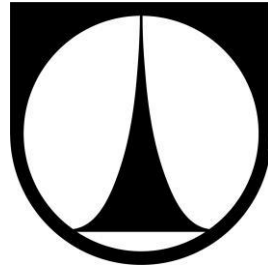


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



**Experimentální výzkum obtékání
ochlazovaného válce**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2018

Bc. Pavel Kotyk



Experimentální výzkum obtékání ochlazovaného válce

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Pavel Kotyk**
Vedoucí práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Kotyk**
Osobní číslo: **S15000358**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Experimentální výzkum obtékání ochlazovaného válce**
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce je zaměřena na experimentální výzkum obtékání ochlazovaného válce.

1. Provedení rešerše současného stavu výzkumu.
2. Teoretický rozbor úlohy.
3. Provedení experimentů.
4. Analýza výsledků.
5. Porovnání získaných výsledků s ostatními autory.

Rozsah grafických prací: -
Rozsah pracovní zprávy: **60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

[1] NOSKIEVIČ, J. a kol., *Mechanika tekutin*. SNTL Praha, 1987.


[2] HONJI, H., TANED, S., TATASUNO, M., *Some practical details of the electrolytic precipitation method of flow visualization*. Rep. Res. Inst. Appl. Mech. 28, 1980, p. 83.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petra Dančová, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení
Konzultant diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. května 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užijí-li diplomovou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 30.4.2018

Podpis:



Anotace

Hlavním cílem této práce je provést experimentální výzkum obtékání ochlazovaného válce se zaměřením na tvorbu a tvar úplavu. Úplav vzniká při obtékání tělesa tekutinou, jeho vlastnosti závisí na mnoha parametrech, např. typu proudící tekutiny, rychlosti proudění, tvaru či teplotě obtékaného tělesa.

V úvodu práce jsou uvedeny dřívější výzkumy a studie zabývající se stejnou problematikou. Pro lepší pochopení podstaty dějů následuje teoretická část, ve které je úloha rozebrána teoreticky.

Poslední část se věnuje samotnému experimentu, jeho přípravě, použitých zařízení a metod měření. Závěrem jsou uvedeny výsledky vizualizace úplavu za ochlazeným válcem a jejich popis.

Klíčová slova: úplav, vizualizace, proudění, tažná nádrž, chlazení

Annotation

The main object of this thesis was to carry out experimental research of flow around cooled circular cylinder, focusing on the wake. The wake is generating behind a cylinder and depends on type of fluid, Reynolds number and temperature.

This thesis starts with the state of art focused on the same problem as is solved. Then, the theoretical part follows.

The last part of thesis focuses on the experiment, its preparation, used equipment what were used and experimental methods. The thesis also shows experimental results and theirs description.

Keywords: wake, visualization, flow, towing tank, cooled cylinder

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Petře Dančové, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině, své manželce a dětem za jejich podporu, pochopení a trpělivost v průběhu mého studia a při tvorbě této práce.

Obsah

Seznam symbolů.....	8
Seznam zkratek.....	8
Úvod.....	10
1 Rešerše.....	11
2 Obtékání válce.....	17
2.1 Odpor tělesa.....	17
2.2 Reynoldsovo číslo.....	18
2.3 Mezní vrstva.....	19
2.4 Održení mezní vrstvy.....	20
3 Úplav.....	22
3.1 Karmánová vírová stezka.....	22
3.2 Strouhalovo číslo.....	23
3.3 Režimy obtékání válce.....	24
4. Kondukce a konvekce.....	26
4.1 Vliv teploty na stabilitu mezní vrstvy.....	27
4.2 Vliv teploty na stabilitu úplavu.....	27
5. Experimentální zařízení a metody.....	29
5.1 Tažná nádrž.....	29
5.2 Vizualizační metoda.....	31
5.3 Snímání úplavu.....	32
5.4 Konstrukce pokusného rámu.....	33
5.5 Konstrukce chlazení válce.....	34

6 Přípravné experimenty.....	38
6.1 Měření povrchové teploty.....	38
6.2 Kontrola odtržení mezní vrstvy	41
6.3 Určení Strouhalova čísla.....	43
7 Vizualizace proudění	46
7.1 Vizualizace úplavu při $Re = 30$	46
7.2 Vizualizace úplavu při $Re = 40$	47
7.3 Vizualizace úplavu při $Re = 50$	48
7.4 Vizualizace úplavu při $Re = 70$	49
7.5 Vizualizace úplavu při $Re = 90$	50
7.6 Vizualizace úplavu pro $Re = 110$	51
7.7 Vizualizace úplavu při $Re = 130$	52
7.8 Vizualizace úplavu při $Re = 150$	53
8 Shrnutí výsledků a jejich porovnání s ostatními autory	54
8.1 Chyby a nejistoty měření	54
8.2 Zvolené chlazení válce.....	54
8.3 Měření povrchové teploty	56
8.4 Kontrola odtržení mezní vrstvy	56
8.5 Určení frekvence a výpočet Strouhalova čísla.....	57
8.6 Vizualizace úplavu.....	59
9 Závěr.....	62
9.1 Další možnosti výzkumu	63
Seznam literatury.....	64
Seznam příloh.....	66

Seznam symbolů

c_{ef}	(1)	referenční koeficient
c_0	(1)	celkový součinitel odporu
c_f	(1)	součinitel třecího odporu
c_p	(1)	součinitel tlakového odporu
d	(m)	průměr (charakteristický rozměr válce)
f	(Hz)	frekvence odtrhávání vírů
F_0	(kg·m·s ⁻²)	celková odporová síla tělesa
F_t	(kg·m·s ⁻²)	třecí odporová síla
F_p	(kg·m·s ⁻²)	tlaková odporová síla
P	(W)	příkon
\dot{q}	(W·m ⁻²)	hustota tepelného toku
Re	(1)	Reynoldsovo číslo
Ri	(1)	Richardsonovo číslo
S_0	(m ²)	charakteristická plocha
St	(1)	Strouhalovo číslo
T	(K)	termodynamická teplota
T_∞	(K)	teplota volného proudu
T_w	(K)	teplota povrchu obtékaného válce
t	(s)	čas
U	(V)	elektrické napětí
v_∞	(m·s ⁻¹)	rychlost volného proudu
α	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	součinitel přestupu tepla
η	(Pa·s)	dynamická viskozita
λ	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	součinitel tepelné vodivosti
ν	(m ² ·s ⁻¹)	kinematická viskozita
ρ	(kg·m ⁻³)	hustota, měrná hmotnost
τ	(Pa)	tečné napětí

Seznam zkratk

2D	2 dimensionální
3D	3 dimensionální
KEZ	Katedra energetických zařízení

FS TUL	Fakulta strojní Technické univerzity v Liberci
PMMA	polymethylmethakrylát
PET	polyethylentereftalát
TDP	navržený tepelný výkon

Úvod

Problematika obtékání těles je předmětem výzkumu již několik desítek let. Poznatky mají využití v mnoha oborech jako je např. letectví, automobilový průmysl, stavebnictví nebo i ve zbrojním průmyslu [2].

Velký vliv na vlastnosti proudění tekutiny má teplota [3]. Tato práce se konkrétně zabývá obtékáním ochlazovaného válce. Cílem této práce je navrhnout konstrukci chlazení válce a jeho experimentální výzkum v tažné nádrži, dále, po zvolení vhodné metody vizualizace, zachytit změny úplavu závisící na teplotě obtékaného tělesa.

V technické praxi se s tímto jevem můžeme setkat např. v klimatizačním okruhu, přesněji ve výparníku, který bývá konstruován jako trubkový tepelný výměník. Tekutina obtéká okolo jednotlivých trubek, které mají nižší teplotu, než je teplota samotné tekutiny. Dochází zde k mísení proudů tekutiny o různé teplotě. Tato práce nám může nastínit, jak takové mísení probíhá.

V první části práce je provedena rešerše současného stavu problému. Je zde popsáno jakými způsoby byla tato problematika řešena v minulosti jinými autory, jaké zvolili parametry pro provedení experimentů a vzájemné porovnání výsledků.

V druhé části diplomové práce je uveden teoretický popis samotného proudění tekutin a jeho typů, dále pak tvorba úplavu. Jeho tvorba a tvar spolu s odtrháváním vírů od obtékaného tělesa je rozebrána podrobněji, jelikož jsou to důležité parametry pro popis obtékání. V závěru teoretické části je popsán vliv teploty na průběh obtékání tělesa.

Ve třetí části, experimentální, je popsána příprava experimentu. Konstrukce a výroba ochlazovaného válce, jeho zapojení do chladicího okruhu a umístění do tažné nádrže. Následuje měření povrchové teploty válce a experiment samotný. Hlavním předmětem zkoumání je, jak již bylo zmíněno, vizualizace úplavu za ochlazeným válcem. Zobrazení výsledků je v rovině kolmé na osu tělesa v závislosti na jeho povrchové teplotě a rychlosti obtékání, respektive velikosti Reynoldsova čísla.

V poslední části práce je provedena analýza získaných výsledků experimentu.

1 Rešerše

Výzkumem obtékání válce se v minulosti zabývala již spousta vědců, obsáhlý přehled získaných poznatků tak lze nalézt např. v monografii od Zdravkoviče, *Flow around circular cylinders, vol 1.(1997), vol 2.(2003)* [4, 5]. V praxi je kladen důraz na studium nestability při obtékání, která může být zdrojem hluku, vibrací, či dokonce zhroucení samotného obtékaného tělesa.

Hlavním z parametrů popisujícím obtékání je Reynoldsovo číslo (Re), které závisí na rychlosti proudění, rozměrech obtékaného tělesa a kinematické viskozitě. Při izotermálním proudění, kdy je teplota proudu tekutiny shodná s teplotou obtékaného tělesa, nenastává žádný problém v určení hodnoty Re . Jiné je to při neizotermálním obtékání, kde se tyto teploty liší. Vlivem rozdílných teplot dochází také ke změně kinetické energie, a tím i místního Reynoldsova čísla napříč průtokovým polem. K největšímu rozdílu dochází v blízkém okolí stěny obtékaného válce, kde je určení referenční hodnoty teploty veliký problém. V minulosti se k výpočtům kinematické viskozity používala vrstevní teplota T_f jako aritmetický průměr teploty volného proudu a teploty povrchu obtékaného tělesa, později se od tohoto zjednodušení, z důvodu nepřesnosti, upustilo [6].

V 90. letech byla snaha popsat fyzikální procesy při neizotermálním obtékání, výsledkem pak bylo zavedení tzv. efektivní teploty T_{ef} . Jako první T_{ef} zavedl Lacordier [7]. Hodnota T_{ef} byla stanovena experimentálně Wangem a kol. [8], na základě podobnosti počátku odtrhávání vírů za izotermálně obtékaným válce a za ohřivaným válcem. Předpokladem bylo, že k odtržení víru začne docházet při dosažení kritické efektivní hodnoty $Re_{Cef} = 47.5 \pm 0,7$. Hodnota T_{ef} byla popsána vztahem:

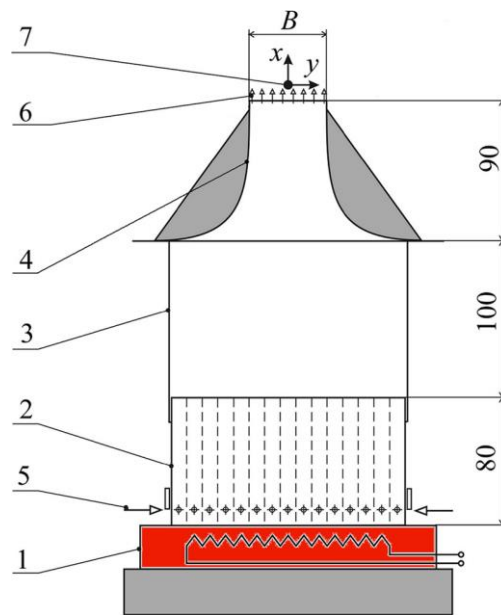
$$T_{ef} = T_{\infty} + c_{ef}(T_w - T_{\infty}) \quad (K) \quad (1.1)$$

kde T_{∞} (K) představuje teplotu volného proudu tekutiny, T_w (K) teplotu povrchu obtékaného válce a c_{ef} (1) je referenční koeficient, jehož hodnota byla stanovena jako 0,28 [8]. Rovnice (1.1) společně s faktorem c_{ef} byla ověřena experimentálně i numericky. První ověření provedl Wang v [8] pomocí vztahu mezi Reynoldsovým a Strouhalovým číslem, který převedl do univerzálního vztahu platného pro oba případy laminárního obtékání, tj. izotermální obtékání a obtékání ohřivaného válce:

$$St = 0,266 - \frac{1,016}{\sqrt{Re_{ef}}} \quad (1) \quad (1.2)$$

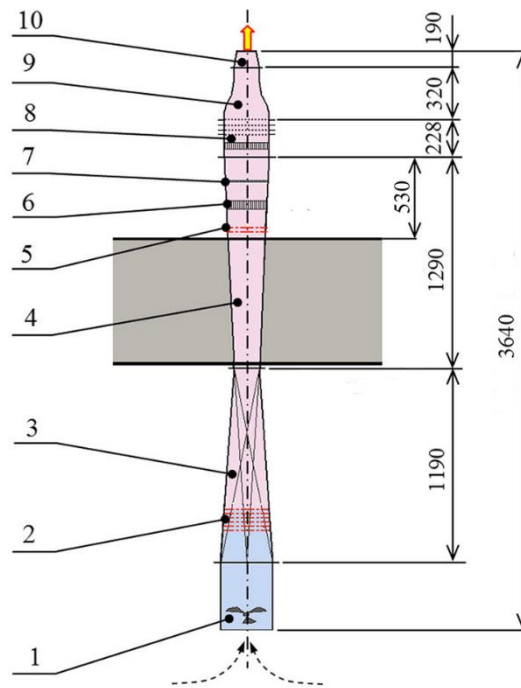
Pro případ izotermálního obtékání, kdy $Re_{ef} = Re$, se rovnice (1.2) shoduje s minimální rozdílem s předešlými výzkumy.

Trávníček ve své práci [6] experimentálně ověřoval platnost rovnice (1.2) i pro případ ochlazovaného válce v teplém proudu vzduchu. Experiment byl prováděn na zařízení vyobrazeném na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Schéma experimentálního zařízení [6]. 1 Elektrický ohřivač, 2 hliníkový výměník tepla, 3 kanál, 4 zužující se tryska, 5 vstupní otvor, 6 proud ohřátého vzduchu, 7 zkoumaný válec

Zařízení pracovalo na principu samovolné konvekce. Vzduch se ohříval průchodem žebrovaného výměníku a vlivem změny hustoty stoupal vzhůru až do zužující se trysky, ve které se urychlil a vystupoval jako tryskový proud, do něhož byl vložen ochlazovaný mosazný válec. Chlazení válce bylo zajištěno průtokem studené vody o konstantní teplotě $17,3 \pm 0,5$ °C. Teplota proudícího vzduchu se v průběhu experimentu pohybovala v rozsahu (70–200) °C, rychlost proudění byla v rozmezí (0,7–1,1) m/s. K vizualizaci proudu bylo využito metody kouřícího drátku. Z důvodu nepřesného nastavení podmínek při provádění experimentu bylo původní zařízení (obr. 1.1) nahrazeno vertikálním nízko rychlostním tunelem s axiálním ventilátorem a ohřivacím systémem (obr. 1.2). Oproti prvnímu návrhu tak bylo možné nastavit teplotu a rychlost proudu nezávisle na sobě.

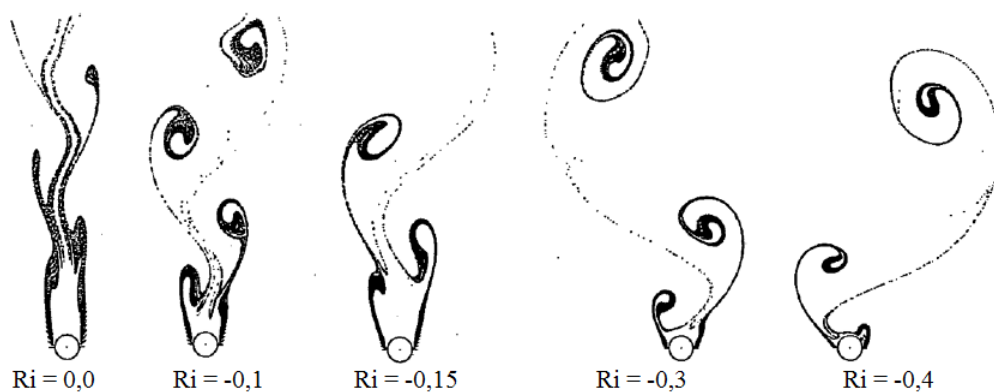


Obr. 1.2 Vertikální tunel [6]. 1 Axiální ventilátor, 2 elektrický ohřívač, 3 přechodová trubka, 4 difuzor, 5 elektrický ohřívač, 6 ocelová pláštěv, 7 ocelová vlna, 8 škrtící klapky, 9 první tryska, 10 druhá tryska

Parametry proudícího vzduchu se pohybovaly v rozmezí rychlostí (0,47–2,7) m/s a teplot (20–211) °C. Získané výsledky experimentu potvrzovaly, že ochlazovaný válec destabilizuje úplav a může způsobit přechod laminárního proudění bez odtržení mezní vrstvy do režimu s paralelním odtrháváním vírů. Dále bylo zjištěno, že pokud začneme ochlazovat válec, který je obtékán vzduchem s paralelním odtrháváním vírů, tak se frekvence odtrhávání vírů zvýší.

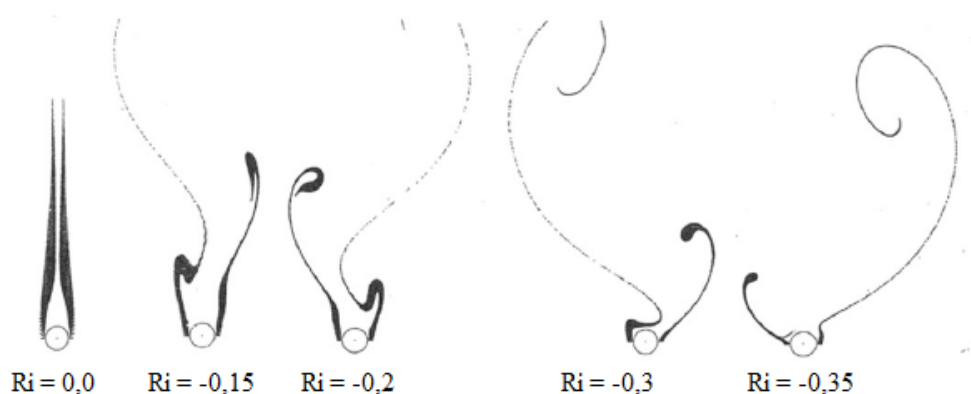
Další výzkumy [6] zabývající se úplavem za obtékaným tělesem potvrdily, že při izotermálním obtékání nemůže Karmánová vírová stezka vzniknout při hodnotě Re menší než $Re_c = (44–49)$ a chování již vzniklé stezky je závislé pouze na velikosti Re , nikoliv na typu proudícího média. Jiné je to, pokud obtékání nebude izotermální a válec bude např. ochlazován. Noto ve své práci [9] potvrdil, že vlivem chlazení válce, díky působení negativní vztlačové síly, vzniká Karmánová vírová stezka za nízkých hodnot Re , nižších než je hranice Re_c . Získané numerické výsledky se shodovali z těmi experimentálními. Dále bylo potřeba se zaměřit na to, jestli vzniklá Karmánová vírová stezka nemůže být závislá na typu proudícího média. Výzkum tohoto jevu je důležitý pro pochopení Karmánové vírové stezky z fyzikálního hlediska. Ve své práci [3] zkoumal Noto numerickými výpočty tvoření vírové stezky za nízkých hodnot Re u různých typů tekutiny, konkrétně ve vodě, vzduchu a rtuti.

Výsledkem výpočtů bylo zjištění, že v jakékoliv kapalné tekutině se se zvyšujícím se chladícím efektem (hodnotou Richardsonova podobnostního čísla) zvětšuje velikost odtrhávajících vírů a zároveň se snižuje jejich frekvence odtrhávání. Karmánová vírová stezka se v jednotlivých proudících tekutinách liší velikostí odtrhávaných vírů, zaoblením vírové stezky a uspořádáním izoterm. Výsledky numerických výpočtů obtékání ochlazovaného válečku rtuť pro $Re = 44$ jsou zobrazeny na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Karmánová vírová stezka pro $Re = 44$ [3]

Noto se v [9] opět zabýval numerickými výpočty obtékání ochlazovaného válce, konkrétně zkoumal změnu úplavu za ochlazovaným válcem pro dvě různé hodnoty Reynoldsova čísla ($Re = 22$, $Re = 44$). Ze získaných výsledků plynulo, že vliv hodnoty Re je na výsledný tvar úplavu velký. Se snižující se hodnotou Re se zvyšuje difuze víru a teploty, naopak se snižuje tvorba vírů a jejich advekce. Získaný výsledek pro $Re = 22$ na obr. 1.4 lze porovnat s obr. 1.3.

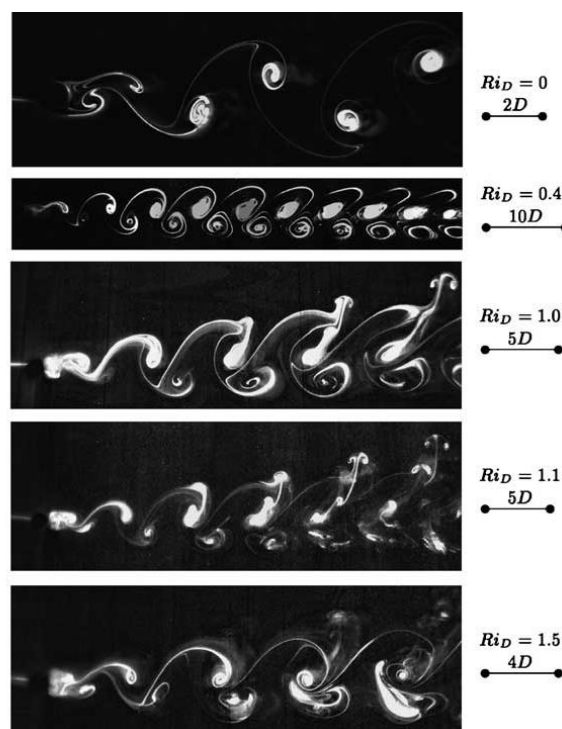


Obr. 1.4 Karmánová vírová stezka pro $Re = 22$ [9]

Většina dalších výzkumů zabývajících se neizotermálním obtékáním těles, zkoumala obtékání při ohřívání tělesa. Jedním z těchto výzkumů je např. práce Baranyi [10]. Experiment byl proveden v aerodynamickém tunelu, do kterého byl umístěn válec, o

průměru 10 mm. Váleček byl ohříván elektricky. K měření byla využita metoda PIV, která umožňuje měřit $2D$ průřez průtokovým polem. Do proudu vzduchu byla přidána olejová mlha, která byla v oblasti okolo válečku prosvícena impulzy laserového řezu. Jednotlivé impulzy byly zachyceny pomocí kamery a následně vyhodnoceny. Měření probíhalo pro rychlosti $Re = (195, 277 \text{ a } 388)$ a teplotu válečku $T = (297, 373, 473, 573 \text{ a } 673)$ K. Výsledky získané experimentálně byly ověřeny numericky pomocí FLUENTu. Výsledkem studie byl vztah mezi $St-Re$, který je srovnatelný s výsledky Williamsona [11], pro izotermální obtékání. Dále byl definován referenční koeficient c_{ef} , jako funkce teplotního poměru, pro výpočet T_{ef} , namísto dříve používané konstanty.

Vizualizaci úplavu za ohříváním válcem se v minulosti zabýval také např. Rindt [12]. V tomto výzkumu je popsáno proudění pro $Re = 117$ a $Ri = (0-1,5)$. K vizualizaci úplavu byla použita metoda cínových iontů. Výsledkem autorova experimentu bylo, že se stoupající teplotou válečku (hodnotou Richardsonova čísla) dochází k destabilizaci úplavu. Úplav se při překročení $Ri > 0,3$ stává $3D$, při vyšších hodnotách Ri je možné pozorovat v určité vzdálenosti po proudu tepelné sloupce, které viditelně narušují vírovou stezku. Deformace vírové stezky s rostoucí teplotou obtékaného válečku je zobrazena na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Karmánová vírové stezka pro různá Ri [12]

Výzkumem závislosti teploty na hodnotu Strouhalova čísla a tedy frekvence odtrhávání vírů při obtékání válečku se zabýval Vít [13]. V tomto experimentu byla použita tažná nádrž, ve které bylo simulováno obtékání měděného válečku o vnějším průměru $d = 4,5$ mm. Zahřívání válečku bylo zajištěno odporovým drátem, který byl veden jeho vnitřkem. Pro měření frekvence byla použita metoda termoanemometrie v režimu konstantní teploty (CTA).

Jedním z výsledků experimentu bylo potvrzení, že zahříváním válečku obtékaného ve vodě dochází ke zvyšování hodnoty St a to již při malých rozdílech teplot mezi volným proudem a povrchem válečku.

2 Obtékání válce

Obtékání těles patří mezi základní úlohy mechaniky tekutin. Jednou z nejvíce zkoumaných oblastí je problematika příčného obtékání tekutiny kolem kruhového válce. Získané poznatky můžeme nalézt např. u Williamsona [11], Zdravkoviče [4, 5] a dalších.

2.1 Odpor tělesa

Při obtékání těles skutečnou tekutinou obecně platí, že se mění velikost a směr rychlosti tekutiny. Příčinou jsou silové účinky mezi tekutinou a obtékaným tělesem, které jsou vyvolány vazkostí. Vzniklé silové účinky dělíme na vztakovou sílu, jejíž směr je kolmý na rychlost nenarušeného proudu, a na odpor tělesa, který představuje síla působící jak ve směru pohybu, tak ve směru opačném. Pro náš případ můžeme vliv vztakové síly zanedbat, jelikož vzniká pouze při obtékání nesymetrického tělesa nebo při nesymetrickém obtékání symetrického tělesa.

Celkový odpor tělesa se skládá ze dvou složek, třecí a tlakové. Třecí odpor je složka způsobena silovým účinkem tečných napětí v mezní vrstvě na povrchu obtékaného tělesa. Je dán vztahem:

$$F_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_f \cdot S_f \cdot v_\infty^2 \quad (\text{N}) \quad (2.1)$$

kde c_f (1) je součinitel třecího odporu, S_f (m^2) je plocha na které se těleso dostává do kontaktu s tekutinou a v_∞ (m/s) je rychlost nezasaženého proudu.

Tlakový odpor vzniká při odtržení proudu od tělesa a výskytu vířivé oblasti za tělesem, tento jev nastává vlivem zakřivení tělesa a viskozity. Tlaková složka odporu je hlavním činitelem tvorby úplavu a je dán vztahem:

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot S_p \cdot v_\infty^2 \quad (\text{N}) \quad (2.2)$$

kde c_p (1) je součinitel tlakového odporu a S_p (m^2) příčný průřez tělesa.

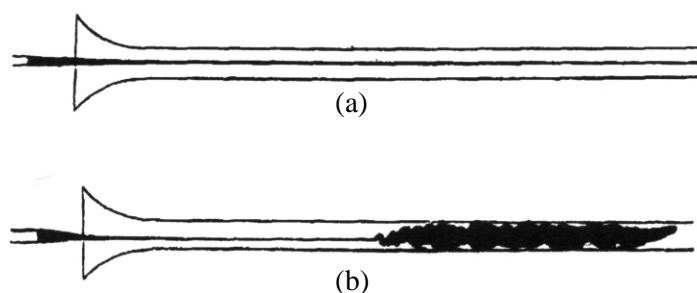
Pro zjednodušení výpočtu se nestanovují jednotlivé složky odporu, ale používá se celkový odpor tělesa, který je vyjádřen rovnicí:

$$F_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_o \cdot S_o \cdot v_\infty^2 \quad (\text{N}) \quad (2.3)$$

kde ρ (kg/m³) představuje hustotu tekutiny, c_o (1) je celkový součinitel odporu charakteristický pro daný tvar tělesa, S_o (m²) je charakteristická plocha a v_∞ (m/s) je rychlosti nezasaženého proudu tekutiny nebo v našem případě rychlost pohybu tělesa vůči kapalině.

2.2 Reynoldsovo číslo

V 19. století určil Osborn Reynolds kritérium pro přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním, které bylo později označeno jako Reynoldsovo číslo. Existenci tohoto přechodu dokázal v jednoduchém pokusu (obr. 2.1), kdy do trubice s proudící tekutinou přivedl úzkou trubičkou obarvenou tekutinu. Při nižších rychlostech zůstávalo obarvené vlákno tekutiny neporušeno, což dokazovalo pohyb částic ve vrstvách bez vzájemného pomíchávání (laminární proudění). Při zvýšení rychlosti proudění nad určitou hodnotu, označovanou jako kritická, začne docházet k intenzivnímu mísení částic vlivem turbulentních pohybů částic všemi směry skrz vrstvy [14].



Obr. 2.1 Reynoldsův pokus (a) laminární proudění, (b) turbulentní proudění [14]

Reynoldsovo číslo (Re) je tedy bezrozměrná veličina určující typ proudu tekutiny. Řadí se mezi podobnostní čísla a jeho hodnota je dána vztahem

$$\text{Re} = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad (1) \quad (2.4)$$

kde v_s (m/s) značí velikost střední hodnoty rychlosti proudění tekutiny, d (m) je hodnota charakteristického rozměru kanálu ve kterém tekutina proudí a ν (m²/s) je kinematická viskozita.

Nejdůležitější hodnota Re je tzv. kritická (Re_k), kdy dochází ke změně typu proudění z laminárního na turbulentní. Je-li hodnota menší než Re_k předpokládáme laminární proudění, naopak při vyšší hodnotě mluvíme o proudění turbulentním. Tato mezní hodnota je určena teoreticky pro určitý typ kanálu a podmínek proudění, např. pro proudění vody v uzavřeném hladkém kruhovém potrubí je mezní hodnota $Re \approx 2320$, pro otevřená koryta je to $Re \approx 580$. V praxi však není možné takto rozdělit proudění pomocí jedné hranice. Mezi laminárním a turbulentním prouděním se nachází tzv. přechodová oblast. Pokud se proudění nachází v této oblasti, objevují se zde oba typy proudění, opět záleží na konkrétních podmínkách, jako je hydraulická drsnost povrchu nebo velikost turbulencí přitékajícího volného proudu.

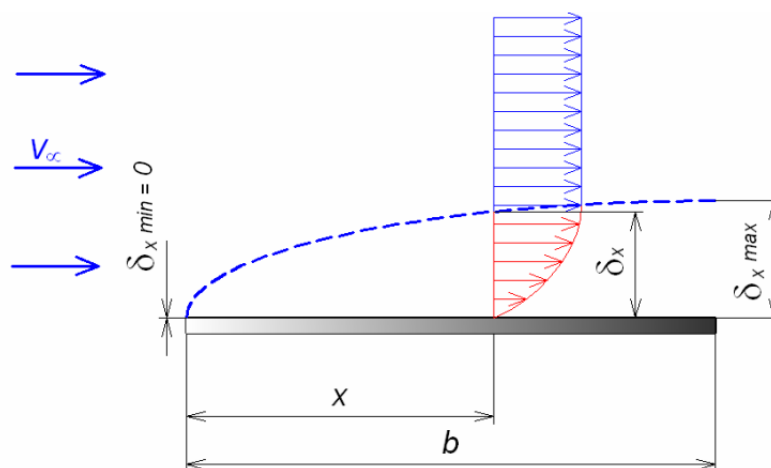
2.3 Mezní vrstva

Na každém tělese, kolem kterého proudí tekutina, nebo které se samo v tekutině pohybuje, se vlivem tření vytváří tenká vrstva zbrzděné tekutiny, tj. mezní vrstva. Tato vrstva se může objevovat v několika podobách.

Nejjednodušší případ mezní vrstvy můžeme sledovat na tenké desce rovnoběžně obtékané proudem tekutiny. Předpokládejme vyrovnaný rychlostní profil nenarušeného proudu v_∞ . Částice, které se při proudění nejbližší přiblíží k desce, vlivem tření ulpí na jejím povrchu $v_0 = 0$ m/s. Ostatní částice, pohybující se kolem povrchu desky se vlivem působení okolních částic budou také zpomalovat. Část jejich kinetické energie je vlivem tření přeměněna na teplo. Rychlost se ve směru kolmém k desce s větší vzdáleností zvyšuje, až nakonec dosáhne hodnoty rychlosti nenarušeného proudu v_∞ . Tloušťka této vrstvy zbrzděné tekutiny δ_x je u náběžné hrany nulová a na odtokové hraně maximální. Mimo mezní vrstvu je rychlost proudu všude téměř konstantní a platí zde vztah [1].

$$\frac{\partial v_\infty}{\partial y} = 0 \quad (\text{s}^{-1}) \quad (2.5)$$

Oproti tomu v oblasti mezní vrstvy je tento gradient nenulový. Tloušťka mezní vrstvy je značena δ a ve směru proudění tekutiny se zvětšuje, viz obr. 2.2



Obr. 2.2 Mezní vrstva [15]

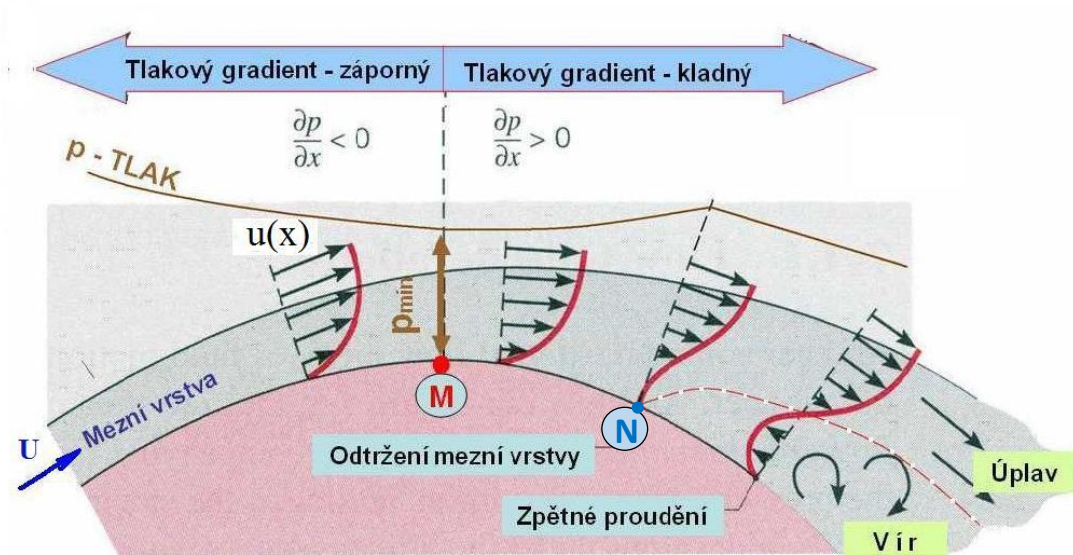
Rychlostí profil má spojitý charakter od nulové rychlosti na povrchu desky až po rychlosti nezasaženého volného proudu. Tloušťka mezní vrstvy dosahuje řádově setin až tisícin charakteristického rozměru obtékaného tělesa.

2.4 Održení mezní vrstvy

Jak bylo popsáno v předešlé kapitole, při obtékání těles tekutinou, popřípadě pohybu těles ve volné tekutině se v blízkosti jeho povrchu vytváří mezní vrstva. Při obtékání rovinné desky se podél jejího povrchu statický tlak nemění, tj. $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, důsledkem toho se částice pohybují stále ve stejném směru po proudu tekutiny.

Jinak je tomu při obtékání zaoblených těles (např. koule, válce, leteckého profilu křídla atd.), kde se mění tlak i rychlosti proudu vzhledem k povrchu tělesa. Tento jev můžeme sledovat na obr. 2.3, kde se zprvu statický tlak snižuje až do bodu M , kde dosahuje svého minima, a poté opět roste. V prvním úseku je tedy tlakový gradient záporný $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$, rychlost se v této oblasti mezní vrstvy zvětšuje. Oproti tomu v druhé části je tlakový gradient kladný $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ a rychlost uvnitř mezní vrstvy se zmenšuje [1].

V oblasti záporného tlakového gradientu jsou částice zbrzdovány jednak zvyšujícím se tlakovým účinkem a také třecími silami. Tlakový účinek se ve směru proudu zvětšuje a dochází tak k deformaci rychlostního profilu. K největšímu zpomalení dochází těsně u povrchu obtékaného tělesa. Nakonec nastane stav, kdy tečna rychlostního profilu svírá se stěnou tělesa pravý úhel, objeví se inflexní bod, což znamená, že se částice zastavily (bod N).



Obr. 2.3 Obtékání zakřiveného povrchu [16]

V důsledku působení tlakového spádu, které je největší u stěny tělesa, se v dalším průběhu obrátí směr proudění. V bodě N tak dochází ke styku zpětného proudění se základním proudem, což vede k oddalování částic od stěny tělesa, tj. odtržení mezní vrstvy. Za tímto bodem dochází později vlivem působení zpětného proudění ke vzniku vírů.

Na polohu bodu odtržení má vliv jednak velikost tlakového gradientu podél obtékaného tělesa a jednak typ proudění uvnitř mezní vrstvy. V případě, má-li obtékané těleso plynulý obrys, nemůže dojít k odtržení mezní vrstvy v první oblasti, kde je tlakový gradient záporný.

3 Úplav

Oblast za obtékaným tělesem, tvořena zpomalenými částicemi mezní vrstvy a částicemi z odtrženého proudu vytvářejí úplav. Nedochozí-li během obtékání k odtržení mezní vrstvy, je úplav tvořen pouze částicemi, které byly zpomaleny. Takový úplav neobsahuje víry, či zpětné proudění, je tvořen pouze spojením mezních vrstev.

Druhým případem je, pokud v průběhu obtékání nastane odtržení mezní vrstvy. Za zadní stranou tělesa vzniká podtlak, který se postupně v úplavu za tělesem vyrovnává na hodnotu tlaku okolního volného proudu. Úplav je tvořen víry, které jsou unášeny po proudu. Podrobněji se podmínkami vzniku, uspořádáním a stabilitou vírů zabýval americký vědec maďarského původu Theodore von Kármán.



Obr. 3.1 Úplav za lodí [17]

3.1 Karmánová vírová stezka

Úplav za tělesem je tedy nově vzniklé proudění, které se buď může po uplynutí dostatečně dlouhé doby stát opět stacionárním prouděním, nebo zůstane nestacionárním (periodickým) [1]. Jedním z příkladů proudění, které zůstane nestacionárním je právě Karmánová vírová stezka. Pro tento jev je charakteristické střídavý vznik vírů za obtékanou překážkou (Obr. 3.2).

Nejlépe lze Karmánovu vírovou stezku popsat pro případ obtékání válce. Vznik a vývoj tohoto jevu závisí na rychlosti proudění, tedy velikosti Reynoldsova čísla. Pro proudění, kdy $Re < 4$, je válec obtékán bez vzniku vírů. V intervalu hodnot $4 < Re < 49$ se sice víry vytvoří, ale zůstávají připojeny k obtékanému válci. K periodickému odtrhávání vírů dochází až při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla ($Re > 49$). Do hodnot přibližně

$Re = 200$ mají víry laminární charakter proudění. Karmánová vírová stezka vzniká i v turbulentních režimech proudění [18].



Obr. 3.2 Karmánová vírová stezka [19]

Víry se od tělesa periodicky odtrhávají střídavě z jedné a z druhé strany. Rozestupy mezi jednotlivými víry jsou stejné. Díky tomuto periodickému charakteru je možné určit frekvenci, s jakou se víry od tělesa odtrhávají. Pokud se frekvence shoduje s vlastní frekvencí tělesa, může dojít k jeho rozkmitání (rezonanci). Tento jev může nastat např. u továrních komínů, vysutých mostů, antény automobilu, kde se k eliminaci rezonance používá do spirály zatočené žebro.

3.2 Strouhalovo číslo

S problematikou tvoření vírů za obtékanou překážkou se také zabýval český experimentální fyzik Vincent Strouhal (1850-1922), po kterém bylo pojmenováno podobnostní číslo. Strouhalovo číslo dává do souvislosti frekvenci vytváření vírů v úplavu za tělesem, jeho charakteristický rozměr a rychlost proudění. Strouhalovo číslo je dáno vztahem:

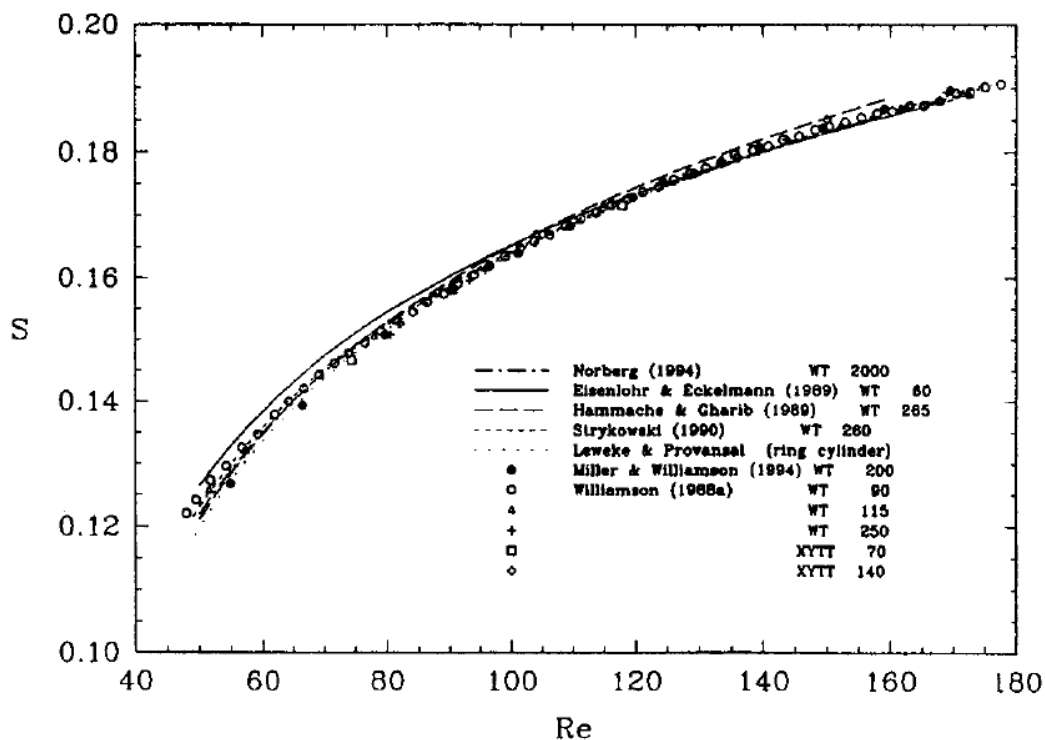
$$St = \frac{f \cdot d}{v} \quad (1) \quad (3.1)$$

kde f (Hz) je frekvence uvolňování vírů, d (m) je charakteristický rozměr obtékané překážky a v (m/s) je rychlost volného proudu tekutiny.

Spolu s Reynoldsovým číslem (kapitola 2.2) se Strouhalovo číslo používá pro popis obtékání válce. Mezi těmito podobnostními čísly můžeme zavést vztah:

$$St = C_1 - \frac{C_2}{Re} \quad (1) \quad (3.2)$$

kde C_1 a C_2 jsou konstanty získané experimentálně. Jejich hodnoty se liší podle autorů a jejich výsledků měření, které můžeme vidět např. v grafu 3.1.

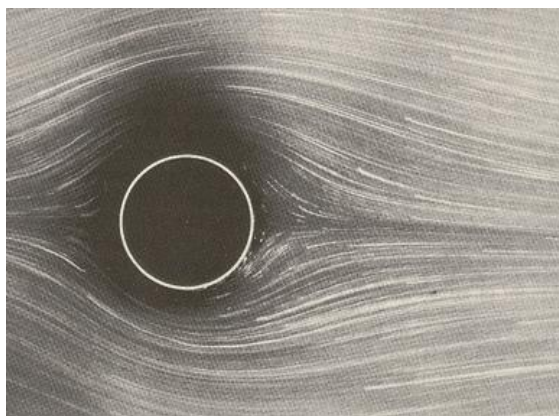


Graf. 3.1 Graf závislosti $St = f(Re)$ [11]

3.3 Režimy obtékání válce

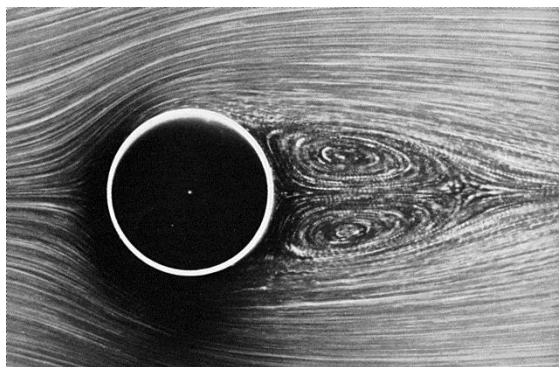
Se zvětšující se rychlostí proudění tekutiny, respektive se zvětšující se hodnotou Reynoldsova čísla prochází úplav za obtékaným tělesem osmi režimy podrobně popsanych např. v [3]. Zprvu je obtékání laminární, pak přechází postupně v úplavu, smykových vrstvách a mezní vrstvě do turbulence až je nakonec proudění plně turbulentní.

První je tedy, jak již bylo zmíněno, laminární obtékání, které se dále dělí na obtékání bez odtržení mezní vrstvy. Pro tento režim platí, že nedochází k odtržení mezní vrstvy od plochy válce. V anglické literatuře se tento režim nazývá „creeping flow“ neboli plazivý proud. Pomyslné proudnice pouze kopírují tvar válce, jak můžeme vidět na obr. 3.3. Tato oblast platí pro $Re \in (0-4)$. Se zvyšující se hodnotou Re se oblast za válcem začíná protahovat ve směru toku volného proudu. Jelikož nedochází k odtržení mezní vrstvy, za tělesem se netvoří úplav.



Obr. 3.3 Laminární obtékání [15]

Po překročení určité hodnoty Re dochází k takovému nárůstu tlaku, že dojde k odtržení mezní vrstvy. Za obtékaným válcem se vytvoří úplav, skládající se ze dvou protiběžných vírů viz obr. 3.4.



Obr. 3.4 Odtržení mezní vrstvy [15]

S rostoucí rychlostí proudu tyto víry mohou být mohutnější. Toto odtržení se nazývá stacionární, jeho horní hranice je dána hodnotou kritického Re_c . Hodnota Re_c se liší podle autorů, např. Williamson [11] udává horní hranici $Re_c = 49$. S dalším zvýšením Re dochází ke ztrátě stability úplavu a za válcem se začnou střídavě odtrhávat dvojice protiběžných vírů, tento režim nazýváme jako periodické odplouvání vírů a vzniká tzv. Karmánová vírová stezka, jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1. Úplav v tomto režimu obtékání je laminární až do hodnoty $Re < (140-194)$, kdy dochází k růstu nestability proudu a postupnému přechodu do turbulence. V této práci se budeme pohybovat v režimu laminárního obtékání, tedy do hodnot $Re < 194$.

4. Kondukce a konvekce

Hlavní podmínkou pro provedení experimentálního výzkumu obtékání ochlazovaného tělesa je právě to ochlazované těleso. Využijeme II. zákona termodynamiky, který říká, že teplo může samovolně přecházet z teplejšího tělesa na chladnější, nikoliv naopak. Budeme tedy obtékanému válci odebírat teplo, pomocí chladnějšího média.

Existují tři možnosti vedení tepla, a to kondukcí, radiací a konvekcí. První zmíněný přenos tepla znamená, že při těsném kontaktu dvou těles částice teplejšího tělesa kmitají kolem své rovnovážné polohy rychleji a při svém pohybu narážejí do pomaleji kmitajících částic chladnějšího tělesa a tím mu předávají část své kinetické energie (tepla).

Při ustáleném ději je tepelný tok konstantní a tedy nezávislý na čase a je popsán Fourierovou rovnicí [21]:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(t) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.1)$$

kde \dot{q} je hustota tepelného toku, λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti a $\text{grad}(t)$ značí gradient teploty v příslušném směru. Integrací této diferenciální rovnice lze získat vztah pro výpočet tepelného toku pro různé tvary kanálů. Pro měrný tepelný tok v ustáleném stavu složenou válcovou stěnou pak platí vztah:

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_3)}{\frac{1}{\lambda_1 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.2)$$

Další přenos tepla, který se v tomto výzkumu objeví je konvekce (přenos tepla prouděním). Přestup tepla probíhá makroskopickým pohybem částic tekutiny, nejčastěji mezi pracovní látkou a stěnou. Na velikosti přestupu tepla konvekcí má největší vliv intenzita proudění. Toto proudění může být buď přirozené (volná konvekce), nebo nucené např. pomocí ventilátoru, vodní pumpy.

Přestup tepla konvekcí je dán vztahem:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_0 - T_1) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.3)$$

kde α ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) je součinitel přestupu tepla, T_0 (K) teplota pracovní tekutiny a T_1 (K) teplota povrchu stěny.

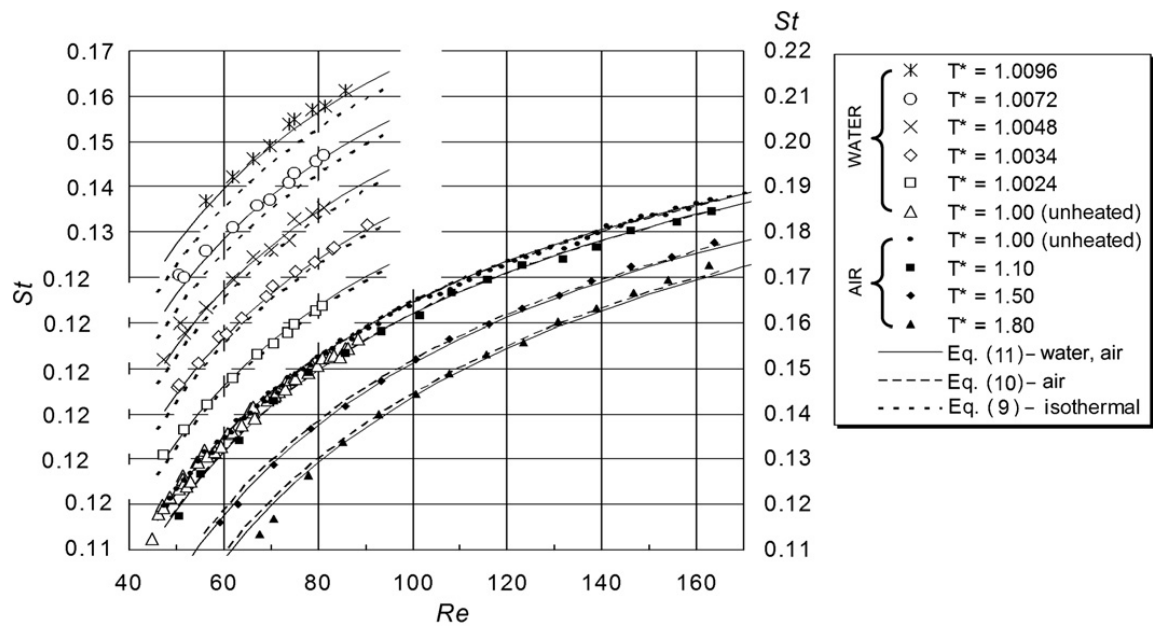
4.1 Vliv teploty na stabilitu mezní vrstvy

Proudové pole v blízkosti obtékaného tělesa ovlivňují dva základní parametry, kromě rychlosti má zásadní vliv také teplota, přesněji teplotní pole. Nejčastěji se tento vliv zkoumá na ohřívaném válci, u kterého se sleduje změna mezní vrstvy a tvorbě vírových struktur za ním [8, 12]. Teplotní profil se velmi podobá rychlostnímu profilu, kdy je u stěny obtékaného tělesa nejmenší. V práci T. Víta a kol. [13] je prováděn experiment, ve kterém bylo sledováno chování obtékaného ohřívaného válce. Experiment byl zaměřen na odtrhávání vírů za válcem ve vodě a ve vzduchu a k získání vztahu Re - St . Výsledky experimentu potvrdily závislost frekvence odtrhávání vírů na teplotním gradientu. S rostoucí teplotou se tato frekvence ve vzduchu snižuje a ve vodě naopak zvyšuje.

Jak již bylo zmíněno výše, teplota má největší vliv v blízkosti povrchu, kde se také nachází mezní vrstva. Při obtékání válce se částice v první části, kde je kladný tlakový gradient (kapitola 2.4) urychlují, pokud je částicím dodávána energie v podobě tepla od ohřívaného válce, jejich rychlost se ještě zvýší. Stejný vliv má dodávané teplo i v druhé části se záporných tlakovým gradientem, kde se částice vlivem nárůstu tlaku zpomalují, ale vyšší teplota toto zpomalení mírní. K úplnému zbrzdění částic, tedy k odtržení mezní vrstvy dochází později než při izotermálním obtékání. Naopak je tomu při obtékání ochlazovaného tělesa, kdy je částicím odebíráno teplo a tedy se ještě více zpomalují. K odtržení mezní vrstvy a tvorbě Karmánové vírové stezky dochází při nižších hodnotách Re [3]. Ochlazováním obtékaného tělesa je mezní vrstva destabilizována, a je možné změnit stabilní laminární režim obtékání na obtékání s paralelním odtrháváním vírů.

4.2 Vliv teploty na stabilitu úplavu

Z předchozích experimentů vyplývá, že zahříváním obtékaného tělesa se úplav destabilizuje a dochází tak k rychlému rozpadu Karmánové vírové stezky, zároveň se také zvyšuje hodnota St . Ochlazováním obtékaného válce se naopak úplav stabilizuje a frekvence paralelního odtrhávání vírů se snižuje. Získaná data z experimentů potvrzující tyto vlastnosti jsou vyobrazena na grafu. 4.1.



Graf. 4.1 Graf závislost St - Re [13]

5. Experimentální zařízení a metody

V této kapitole je popsána tažná nádrž, ve které byl prováděn experiment, použitá vizualizační metoda, konstrukce chladicího zařízení a zapojení obtékaného válce do chladicího okruhu.

5.1 Tažná nádrž

Pokusy byly prováděny v tažné nádrži instalované v laboratoři Katedry energetických zařízení (KEZ). Tažné nádrže jsou všeobecně používány pro zkoumání stavů proudění tekutiny kolem obtékaných profilů těles, nebo slouží např. k provádění hydrodynamických zkoušek modelů lodí za účelem návrhu nové konstrukce, popřípadě ke zlepšení stávající konstrukce lodě [21]. V prvním případě se využívá analogie obtékání, kdy nezáleží na tom, jestli je obtékané těleso v klidu a proudí tekutina, nebo naopak, kdy se těleso pohybuje v klidné tekutině [1].

Použitá tažná nádrž se s rozměry (5500x1000x1000) mm řadí mezi malé tažné nádrže a je sestavena ze tří hlavních celků, skleněné vany, rámu a pojezdového mechanismu.



Obr. 5.1 Tažná nádrž v laboratoři KEZ FS TUL

Nádrž je vyrobena z dvojitého bezpečnostního skla o celkové šířce 30 mm, mezi skly je nalepena bezpečnostní folie o tloušťce 2 mm. Nosný rám vany je vyroben z hliníkových stavebnicových profilů, které mají dostatečnou tuhost a pevnost. Celá konstrukce stojí na

osmi stojných podpěrách, které lze pomocí stavitelných šroubů nastavovat a zajistit tak vodorovnou polohu.

Pojzdový mechanismus je umístěn podél horní hrany na obou stranách nádrže. Každá strana má svojí pojezdovou platformu, ozubený řemen a vedení. Pohon zajišťuje krokový motor spojen s převodovkou, unašeč a řídicí jednotka, pomocí které lze regulovat samotný pohyb platformem.

Pojezdové platformy jsou zkonstruovány z hliníkového stavebnicového profilu, který umožňuje snadně umístění různých měřících zařízení. Maximální zatížení platformem je 50 kg.



Obr. 5.2 Pojezdové platformy

Lineární vedení je zajištěno pomocí ozubeného řemene a krokového motoru. K horní větvi řemene je připojena pojezdová platforma. Zamezení vychýlení řemene je zajištěno umístěním boční zářky. Spodní větev řemene je vedena vnitřkem hliníkové konstrukce nosného rámu. Na konci vedení jsou opět umístěny bezpečnostní zářky. Ozubené řemeny jsou spolu spojeny synchronizační hřídelí k zajištění synchronizace obou pojezdů. Pohon celé soustavy je zajištěn krokovým elektromotorem, který je opatřen planetovou převodovkou s převodem 1:40, která zajišťuje potřebnou linearitu pohybu.

Nastavení požadované rychlosti pohybu platformem je zadáváno do softwaru PC, které je propojeno s řídicí jednotkou EPOS 70/10. Díky řídicí jednotce, lze nastavit i mnoho dalších parametrů pohybu, jako je například potřebné zrychlení platformem, nastavení počáteční a koncové polohy, vrácení do nastavené počáteční polohy po vykonání požadovaného pohybu. Řídicí jednotka je napájena z externího 12 V zdroje.

Celá soustava je dostatečně tuhá a zamezuje tak ovlivnění naměřených výsledku vibracemi, přenášených do soustavy z motoru.

5.2 Vizualizační metoda

Pro zobrazení úplavu za obtékaným tělesem je v této práci použita tzv. metoda cínových iontů. Princip metody je založen na elektrolytickém rozkladu cínu, který vlivem chemické reakce uvolňuje ionty, které tvoří ve vodě dobře viditelná souvislá bílo-šedá vlákna.

Při použití této metody probíhají obvyklé elektrolytické chemické reakce, kdy do elektrolytu, který je v našem případě obyčejná kohoutková voda, umístíme dvě elektrody rozdílných kovů. Anoda je tvořena fólií z cínu, která je obalena okolo povrchu obtékaného válce. Katoda je vyrobena z mědi a je umístěna v dostatečné vzdálenosti od anody, aby byla zajištěna menší energetická náročnost a zároveň aby katoda neovlivňovala průběh obtékání a kvalitu získaných snímků.

Přivedením stejnosměrného proudu na obě elektrody začne docházet k disociaci elektrolytu, která je popsána rovnicí:



Vzniklý kladný iont vodíku se již další reakce nezúčastní, je přitahován záporně nabitou katodou, na které se vybijí za vzniku drobných bublinek. Cín při průchodu proudem uvolní své dva elektrony z valenční vrstvy a stane se z něj kladný iont, který se následně váže na záporný iont OH^- . Touto reakcí vznikne hydroxid cínatý, který vytváří potřebný bílý elektrochemický kouř.

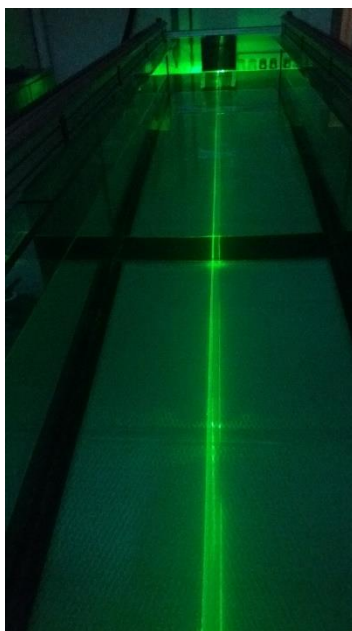


Pro zvýšení rychlosti reakce je do elektrolytu přidána kuchyňská sůl v poměru cca 1:1000, která zvýší jeho elektrickou vodivost. Dostatečné tvorby elektrochemického kouře pro vizualizaci úplavu bylo dosaženo při elektrickém napětí 15 V a elektrického proudu 0,5 A [22]. Během elektrolýzy dochází k postupnému znehodnocování elektrolytu vlivem

vzniklých nevodivých částic elektrochemického kouře a dochází tak k postupně rostoucímu útlumu chemických reakcí, pro opětovné dosažení ideálních podmínek je potřeba vyměnit elektrolyt za nový.

5.3 Snímání úplavu

Vzniklý elektrochemický kouř z vizualizační metody není dostatečně výrazný, z tohoto důvodu se pro názornější výsledky používá zvýraznění referenční roviny laserovým řezem. Pro tento experiment byl použit kontinuální laser o výkonu 200 mW, který vysílá laserový svazek o vlnové délce 532 nm, tento svazek byl bodový a pro účely vytvoření řezu nevhodný, proto byla do laserového paprsku vložena difrakční čočka, která z bodového paprsku vytvoří světelnou rovinu pomocí laserového řezu. Rozptyl světla průchodem čočky byl 90°, takový úhel byl dostatečný pro pokrytí celé plochy úplavu. Difrakční linková čočka byla vyrobena z plastu, tento materiál se ukázal jako dostatečně odolný proti tepelným účinkům použitého laseru, díky tomu u ní nedocházelo k degradaci materiálu a následnému zvětšení rozptylu světelného svazku mimo rovinu.



Obr. 5.3 Laserový řez tažnou nádrží

První série měření byla provedena s umístěním laserové hlavy z boku tažné nádrže, laserový řez byl veden skrz vícevrstvou skleněnou stěnu a celou délku nádrže (obr. 5.3). S tímto umístěním laserové hlavy se s rostoucím znečištěním elektrolytu elektrolytickým kouřem nedalo využívat celou délku nádrže, na jejím konci byla intenzita laseru již

nedostatečná. Z tohoto důvodu byla pro druhou sérii měření přesunuta laserová hlava se zdrojem přímo na pokusný rám nad obtékaný válec.



Obr. 5.4 Umístění laserové hlavy

Pro samotné snímání úplavu byl použit fotoaparát Canon EOS 40D opatřený objektivem se světlostí $f/1,8$ s pevným ohniskem. Tento objektiv byl zvolen z důvodu nepříznivých světelných podmínek v laboratoři, která musela být zatemněná pro lepší zvýraznění úplavu laserem. Dále bylo nutné nastavit rychlost závěrky, clonu a citlivost ISO.

Úplav za tělesem je vlivem nepohybující se tekutiny v klidu, proto bylo rozhodnuto o použití stativu oproti umístění fotoaparátu na pokusný rám. Relativní pohyb mezi fotoaparátem a úplavem by při vyšších hodnotách Re byl natolik velký, že by kvalita pořízených fotografií nebyla uspokojivá.

5.4 Konstrukce pokusného rámu

Pokusný rám pro experiment lze rozdělit na dvě hlavní části. První část je nosná, vyrobená z hliníkových stavebnicových profilů. Je připevněna na pojezdové platformy tažné nádrže. K této nosné konstrukci je pomocí závitových tyčí připojena druhá část pokusného rámu, která je při experimentu ponořená v kapalině. Na nosné části je umístěna laserová hlava s možností aretace polohy, díky níž je možné nastavit směr laseru kolmo na vodní hladinu. Dále je zde umístěn elektrický zdroj laserové hlavy a vodiče potřebné k přivedení stejnosměrného proudu pro proces elektrolýzy. Posledním prvkem umístěným na nosné části je chladicí zařízení (podrobněji popsáno v následující kapitole). Všechny tyto prvky mají na

hranici rámu rozebíratelné spoje v podobě svorkovnic. Toto řešení je z důvodu lepší manipulace při vyjímání a nasazování pokusného rámu.

Druhá část pokusného rámu je zkonstruována tak, aby splňovala podmínky pro provedení experimentu. Konkrétně ji tvoří dvě desky z plexiskla (PMMA), z nichž je přední deska čirá z důvodu vizuálního pozorování a snímání úplavu, zadní deska je opatřena černou matnou barvou pro zvýraznění laserového řezu. Obě desky jsou spojeny dvěma páry příčných nosníků. K horním příčnicím jsou přidělané závitové tyče z nosné části, spodní pár příčnic slouží k vyztužení. Mezi oběma deskami je umístěn i ochlazovaný váleček, který je upnut v sousedních otvorech desek.

Celková konstrukce spodní části je navržena tak, aby co nejméně ovlivňovala proudění v jejím okolí a nedocházelo tak ke zkreslování získaných výsledků, ze stejného důvodu je i většina vodičů připevněna k zadní stěně, zde se také nachází měděná katoda pro vizualizační elektrolytickou metodu.



Obr. 5.5 Spodní část pokusného rámu

5.5 Konstrukce chlazení válce

Samotný ochlazovaný válec je tvořen mosaznou trubičkou o průměru 6 mm, na povrchu je nanášena cínová tenká folie o tloušťce 0,4 mm. Cínová vrstva je zde kvůli vizualizační metodě (kapitola 5.2). Výsledný charakteristický průměr, který je uvažován ve výpočtech, je tedy 6,8 mm.

Chlazení válce bylo zajištěno průtokem chladicího média jeho vnitřkem, pro tento případ byla použita ochlazovaná kohoutková voda. Bylo nutné zkonstruovat chladicí

zařízení, které by dokázalo chladit médium na požadovanou teplotu. Prvotní návrh představoval 3 varianty chlazení:

- 1) Chladicí oběh by obsahoval jeden veliký tepelně izolovaný zásobník se studenou vodou. Voda by byla chlazená pouze přidáním ledu. Ze zásobníku by pomocí vodní pumpy byla chladicí voda vháněna do oběhu.
- 2) Chlazení vody v zásobníku pomocí kompresorového chlazení, díky přidání aktivního chlazení by mohl mít zásobník menší rozměry.
- 3) Chlazení vody v zásobníku pomocí Peltierova článku.

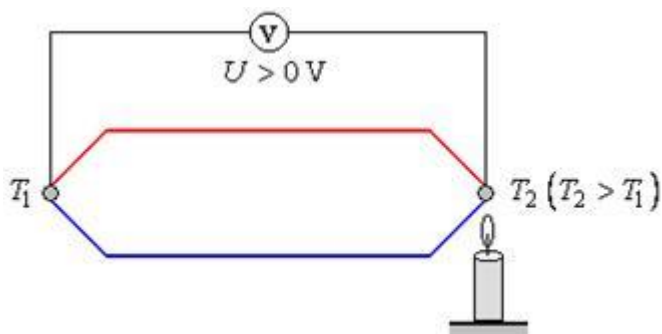
Hlavním nedostatkem první varianty by byla absence aktivního chladiče, který by zajišťoval chlazení media po dostatečně dlouhou dobu, potřebnou pro experiment. Chlazení pomocí ledu by postupem času ztrácelo efektivitu, led by postupně tál a po jeho roztání by teplota uvnitř zásobníku rostla. Led by se musel doplňovat z externího zásobníku. Regulaci teploty válečku by zajišťovala škrtková klapka, kterou by bylo možné nastavit průtok chladiva oběhem.

Nedostatky prvního návrhu by se dali vyřešit přidáním kompresorového chlazení, pracující na stejném principu, jako je u ledniček. Voda by se v zásobníku ochlazovala odváděním tepla pomocí chladiva, které by se nejprve v plynném stavu pomocí kompresoru vtlačovalo do kondenzátoru. Kondenzátor by se ochlazoval pomocí ventilátoru, což by mělo za následek kondenzaci chladiva, které by se průchodem expanzního ventilu dostávalo v podobě nízkotlaké kapaliny do výparníku umístěného do již zmiňované nádoby s ochlazovanou vodou. Nevýhodou tohoto návrhu by byla konstrukční náročnost a celkový objem celé soustavy, kterou by bylo obtížné umístit na pokusný rám.

Za nejvhodnější variantu bylo vybráno chlazení vody pomocí Peltierova článku, který funguje na základě Peltierova jevu. Tento jev byl objeven v 19. století francouzským fyzikem Jeanem C. Peltierem. Při průchodu elektrického proudu obvodem tvořeným dvěma rozdílnými vodiči, většinou bismut a tellur, se jedna z jejich styčných ploch ochlazuje a druhá zahřívá. Tento jev je principiálně opačný k Seebeckovu jevu, který nastává, mají-li dva spoje dvou různých kovů rozdílnou teplotu. Kontaktní napětí obou rozhraní jsou také různá a obvodem prochází elektrický proud, viz obr. 5.6.

Základem Peltierova článku bývají dvě keramické destičky, mezi kterými jsou nanášeny oba kovy a na kterých dochází k termoelektrickému jevu. Rozměry použitého Peltierova článku TEC1-12706HTS jsou (40x40) mm a celková tloušťka 3,8 mm. Maximální

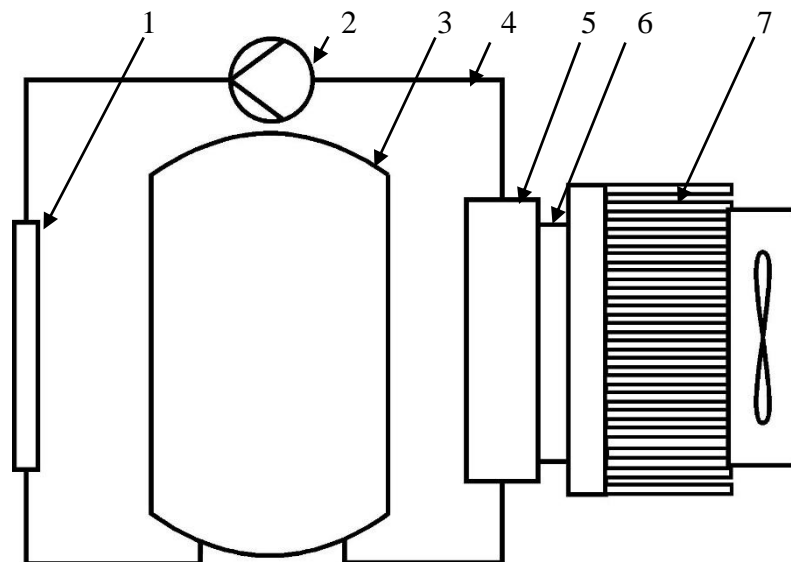
výkon je 63 W a maximální rozdíl teplot přibližně 60 °C [23]. Pokud se tedy podaří udržovat teplejší stranu článku na teplotě 50 °C, na studené straně může být dosaženo teploty až - 10 °C.



Obr. 5.6 Seebeckův jev [24]

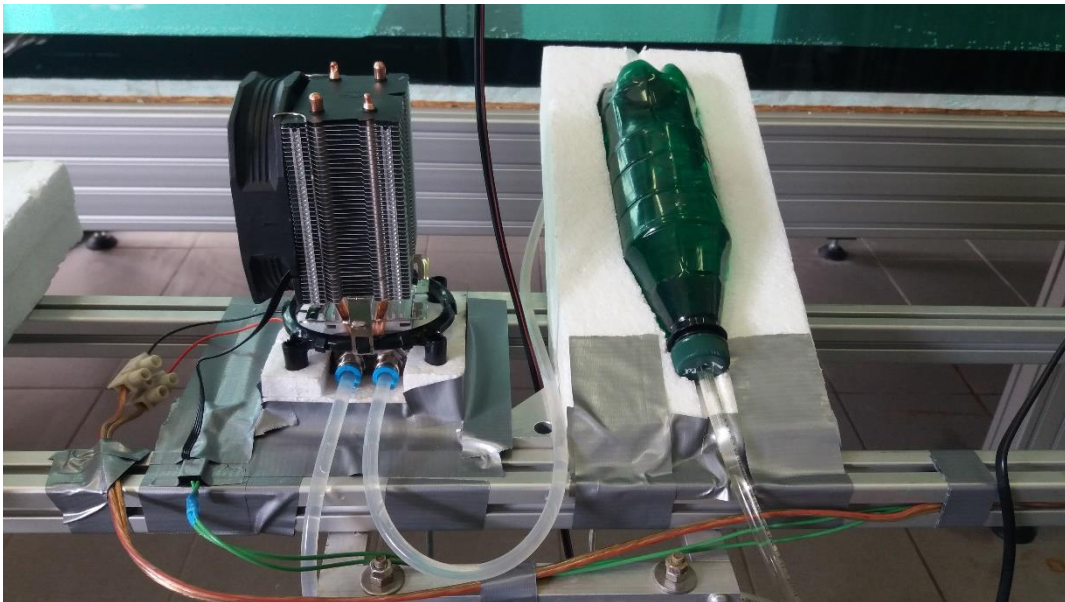
Mezi výhody Peltierova článku patří malé rozměry, díky kterým je možné sestavit chladicí oběh dostatečně malý pro umístění na pokusný rám, dosažení nízkých teplot, snadná regulace výkonu potřebná pro výzkum chlazeného válce při různých teplotách, z tohoto důvodu byl článek napájen regulovatelným zdrojem. Nevýhodou je přehřívání, velká spotřeba proudu a nižší účinnost v porovnání s kompresorovým chlazením (varianta 2).

Na teplou stranu článku byl umístěn chladič SilentiumPC Spartan 3 LT HE1012, vybaven dvěma 6 mm trubicemi pro odvod tepla a hliníkovým chladičem, doplněný axiálním ventilátorem s maximálními otáčkami 2000 ot/min. Tento chladič je chopen uchládit Peltierův článek o celkovém TDP až 135W [25]. Funkcí chladiče bylo udržovat teplou stranu článku na dostatečně nízké hodnotě a zabránit přehřátí, které by vedlo k trvalému poškození Peltierova článku. Ke druhé straně byl připevněn hliníkový tepelný výměník. Jednalo se o dutý kvádr, ke kterému byly přidělané 2 nástrčné rychlospojky pro PVC hadičky, v tomto výměníku docházelo k chlazení vody. Celý výměník byl obalen tepelnou izolací pro zabránění nežádoucího přestupu tepla z okolí. Mezi jednotlivými spoji prvků byla nanášena teplovodiví pasta Arctic Cooling MX-4 s hodnotou tepelné vodivosti 8,5 W/(m·K), pro lepší přenos tepla. Zásobníkem studené vody byla PET lahev o objemu 0,5 l opatřena víkem s otvory pro umístění transportních hadiček, pomocí kterých byly jednotlivé prvky oběhu propojeny. Nádoba byla také obalena tepelnou izolací. Průtok vody oběhem zajišťovalo malé vodní čerpadlo s výkonem 2,6 W, napájeno ze sítě 230 V. Výsledné schéma zapojení oběhu je vyobrazeno na obr. 5.7.



Obr. 5.7 Schéma chladícího oběhu. 1 Obtékaná válec, 2 oběhové čerpadlo, 3 zásobník chladící vody, 4 transportní hadičky, 5 výměník, 6 Peltierův článek, 7 chladič s axiálním ventilátorem

Díky malým rozměrům oběhu ho bylo možné umístit přímo na pokusný rám tažné nádrže, odpadlo tak složité řešení rozvodu transportních hadiček. Výsledná konstrukce je zachycena na obr. 5.8.



Obr. 5.8 Umístění chladícího oběhu

6 Přípravné experimenty

Před samotným experimentem vizualizace úplavu za ochlazovaným válcem, bylo nutné provést pár kontrolních měření a výpočtů z důvodu přesného popisu jednotlivých stavů. Konkrétně se jednalo o měření povrchové teploty obtékaného válce při maximálních hodnotách napájení Peltierova článku, které nám ukázalo průběh teplot a velikost zahřívání prouděním. Jako další byla kontrola bodu odtržení mezní vrstvy a výpočet Strouhalova čísla pro daný typ obtékání.

6.1 Měření povrchové teploty

Pro experimentální výzkum obtékání ochlazovaného válce je znalost teploty povrchu válce důležitá. Z tohoto důvodu byla provedena série měření povrchové teploty ochlazovaného válečku obtékaného kapalinou. Měření bylo provedeno pro nastavení maximálního výkonu chladícího oběhu.

Pro měření povrchové teploty se ve strojírenství používají nejčastěji dvě metody, bezkontaktním měřením pomocí termokamer a pyrometrů, nebo kontaktním pomocí termoelektrických, či odporových snímačů.

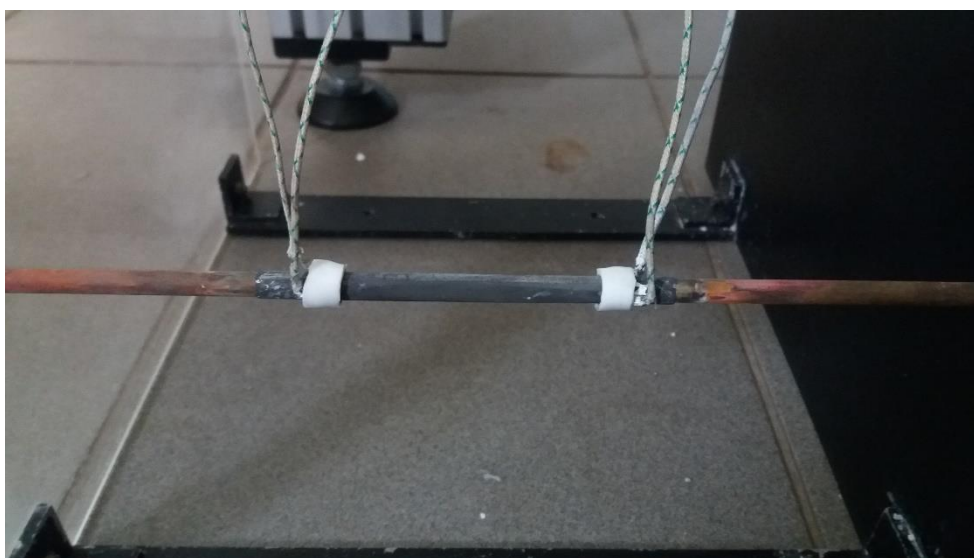
Bezkontaktní metody jsou založeny na skutečnosti, že povrch každého tělesa o teplotě vyšší než 0 K, vyzařuje do svého okolí infračervené záření, pomocí kterého je měřicí zařízení schopno určit teplotu povrchu objektu. Jednou z výhod tohoto měření je to, že nijak neovlivňuje měřený objekt, který se díky tomu nemusí upravovat. Rozhodující nevýhodou, která neumožňuje využít tento způsob měření teploty je neschopnost pracovat ve vodním prostředí.

Z výše uvedených důvodů bylo nutné využít jednu z kontaktních metod, konkrétně bylo zvoleno měření povrchové teploty pomocí termočlánků umístěných na povrchu tělesa. Byly použity termočlánky typu K (Cr-Al) opatřeny patičí pro snadné propojení se sběrníci dat. Z důvodu použití více termočlánků pro měření povrchové teploty na vodivé součásti bylo nutné každý z nich opatřit elektricky izolační vrstvou, která zamezovala vzniku termoelektrickému jevu mezi jednotlivými termočlánky navzájem, a tím i zanesení chyb do měření. Pro tento účel byla na termočlánky nanesena vrstva epoxidové pryskyřice. Epoxidová pryskyřice patří mezi syntetické materiály používané především

v elektrotechnice jako izolační materiál, mezi jeho další výhodu patří dostatečná tepelná vodivost.

Pro lepší představu o průběhu teplot při chlazení bylo použito celkem 5 termočlánků, jeden byl umístěn v zásobníku chladící vody a zbylé 4 na ochlazovaném válečku rozmístěných tak, že byly 2 na náběžné straně a 2 na straně úplavu. Rozložení termočlánků vycházelo z předpokladu, že náběžná strana bude intenzivněji ovlivňována kapalinou při pohybu v tažné nádrži.

K připevnění termočlánků na povrch obtékaného válce byly využity proužky měkké silikonové hadičky, jejíž vnitřní průměr byl menší než vnější průměr zkoumaného válečku. Proužky byly dostatečně pružné k tomu, aby se dali převléknout přes větší válec a zároveň aby stlačily vsunuté termočlánky na povrch válce. Převlečené hadičky sloužily zároveň jako izolační ochrana. Důležitou věcí při použití termočlánků je, aby byl spoj s materiálem přímý, se spolehlivým tepelným kontaktem. Jinak by se mezi spojem termočlánku a povrchem tělesa vyskytla neznámá tepelná impedance. Výsledkem by pak bylo, že se hodnoty naměřených teplot budou blíže vztahovat k materiálu obklopujícímu termočlánek, než k měřené teplotě povrchu.



Obr. 6.1 Připevnění termočlánků na povrch válce

Toto řešení připevnění termočlánků se ukázalo jako dostačující konstrukční řešení, rozptyl teplot mezi jednotlivými hodnotami se pohyboval na hodnotě $\pm 0,1$ °C.

Měření teploty povrchu nebylo možné ověřit jiným způsobem, proto byly získané naměřené hodnoty brány jako orientační. Pro zpřesnění měření teploty by bylo vhodné

použít termočláanky s menším rozměrem a připevnit je k povrchu jedním z následujících možností:

- 1) Vysokoteplotní pájkou, zpravidla se jedná o pájku s obsahem olova alespoň 93% a bodem tavení ($295 \div 305$) °C [26].
- 2) Speciálním lepidlem.

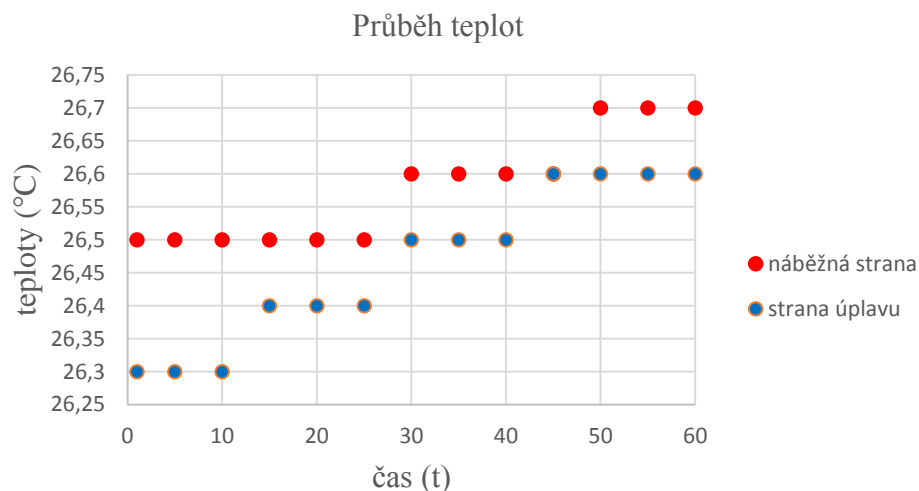
Výhodami první varianty jsou dobrá tepelná vodivost spoje, která minimalizuje chybu, jestliže by se termočlánek nepatrně oddálil od povrchu a pevnost spoje.

Použití lepidel je oproti první variantě snazší a nevyžaduje takovou zručnost. Většinou se používají lepidla aktivovaná UV zářením, která schnou během několika sekund, nebo dvousložkové epoxidy, které tvoří odolnější spoj, avšak k vytvrzení potřebují několik hodin při vysokých teplotách [26]. U obou možností připojení termočláneků by množství přídavného materiálu mělo být co nejmenší.

Samotné měření teploty probíhalo při stálé teplotě vody v tažné nádrži, která se pohybovala v rozmezí $37 \pm 0,5$ °C. Tažná nádrž byla napuštěna takto teplou vodou z důvodu zvýšení rozdílu teplot mezi volným proudem tekutiny T_{∞} a teplotou povrchu obtékaného válce T_w . Pro měření byl nastaven výkon chladicího oběhu na maximum, kdy byl Peltierův článek napájen 15 V a 5 A, rychlosti proudění byly nastavovány na hodnoty $Re = (30, 40, 50, 70, 90, 110, 130)$. Jemnější krok v rozmezí hodnot Reynoldsova čísla 30 až 50, vycházel z předpokladu, že při zapnutí chlazení začne docházet k odtrhávání mezní vrstvy již při nižších hodnotách Re , než je tomu tak při izotermálním proudění. Zvolené hodnoty napájení Peltierova článku a rychlosti proudění byly následně použity i při vizualizaci úplavu. Proces elektrolýzy byl při měření teplot vypnutý.

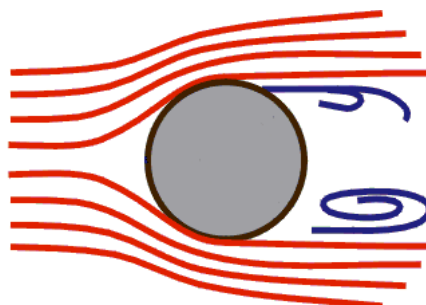
Hodnoty naměřených teplot se zaznamenávaly s frekvencí 4 Hz, měření a nahrávání teplot probíhalo pomocí přístroje Dewetron. Výsledky těchto měření byly zaznamenány do grafů, kde byl vyobrazen průběh teplot za určitý časový úsek.

Měření začínalo ustálením teploty chladicí vody v zásobníku a povrchu válečku, následně bylo zapnuto měření a nahrávání teplot a poté uvedení pojezdů do pohybu, čímž byly získány hodnoty teplot při proudění.



Graf. 6.1 Průběh teplot při $Re = 50$

Z grafu je patrné, že při proudění dochází k zahřívání válce proudem tekutiny, teplota povrchu válce se neustále nepatrně zvětšuje, tento jev je závislý především na výkonu chladicího oběhu. Na náběžné straně válce je zahřívání intenzivnější oproti opačné straně. Tento jev nastává v důsledku toho, že se tekutina v mezní vrstvě pohybuje pomaleji a válec ji dokáže nepatrně zchladit. Zároveň na straně úplavu vlivem vírů nedochází k tak intenzivní výměně nové teplejší tekutiny, jak je vyobrazeno na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Proudnic při obtékání válce [16]

6.2 Kontrola odtržení mezní vrstvy

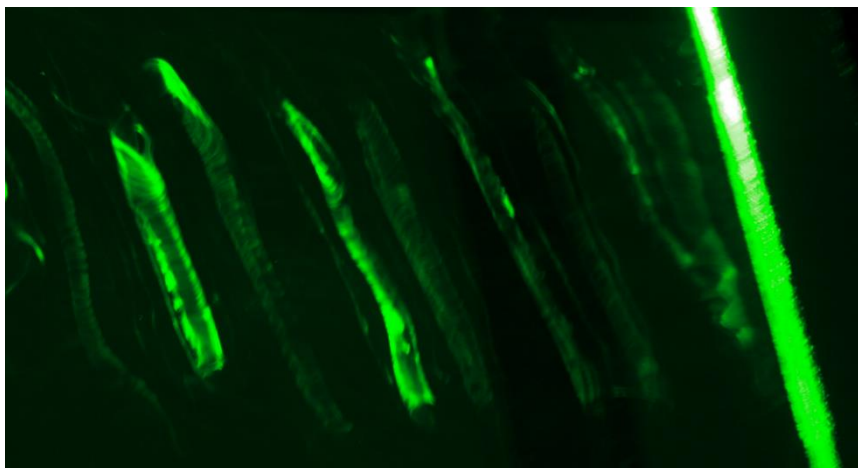
Mezi další přípravné experimenty patřila kontrola správného odtrhávání mezní vrstvy od povrchu obtékaného válce. Tuto kontrolu bylo nutné provést pro ověření správnosti nanesení cínové vrstvy na povrch mosazného válečku. Cínová folie byla obalena okolo válce, spoj byl umístěn na náběžnou stranu z důvodu eliminace ovlivnění bodu odtržení mezní vrstvy. Spoj byl vytvořen přiblížením konců folie k sobě, aby se vzájemně

dotýkaly a následně se tento spoj vyhladil pomocí brusného plátna. Broušení probíhalo pod vodou s hrubostí plátna 400. Vznikl tak téměř nezatelný spoj.

Kontrola byla provedena dle vzoru práce Williamsona [27]. Experiment spočíval v nastavení laserového řezu ve směru horizontálním. Tato rovina pak musela být nastavena do takové výšky, aby v ní ležela celá osa válce a zároveň musel být váleček osvětlen ze strany úplavu. Pokud by byl osvětlen z náběžně strany, úplav by byl ve stínu a nebylo by možné kontrolu provést. Fotoaparát pro zachycení vizualizace odtrhávání mezní vrstvy byl umístěn z vrchu na bok tažné nádrže a směřoval šikmo dolů. Tato pozice nebyla optimální, ale pro zvolenou kontrolu postačila.

Pro správné nanesení cínové vrstvy na nosný váleček by výsledkem experimentu měly být horizontální řezy úplavu, které by měly přímkový charakter. Tyto řezy jsou rovnoběžné s obtékaným válcem a objevují se s nerovnoměrnými rozestupy mezi sebou. Takto uspořádané horizontální řezy úplavu jsou důkazem toho, že k odtržení mezní vrstvy dochází po celé délce válečku v konstantním bodu. Pokud by zachycené čáry byly zakřivené nebo nespojité, docházelo by k nerovnoměrnému odtrhávání mezní vrstvy např. vlivem tvarových chyb obtékaného válečku, nebo nedostatečně ustáleným nabíhajícím volným proudem. Proto je nutné dodržovat určité časové rozestupy mezi jednotlivými experimenty.

Obr. 6.3 již vyobrazuje zachycený výsledek kontroly. Hodnota Reynoldsova čísla pro proudění byla nastavena na $Re = 90$. Z obrázku je patrné, že se úplav tvoří těsně za obtékaným válečkem a řezem úplavu jsou očekávané rovnoběžné čáry. Vrchní zakončení linek jsou mírně deformovány, to je způsobeno přechodem cínové vrstvy a samotného válečku. Pro eliminaci této deformace byly konce cínové vrstvy znovu přebroušeny, aby byl přechod co nejplynulejší. Z uspořádání řezu lze usoudit, že je cínová vrstva nanesena správně a do tvorby úplavu nezanáší žádné výrazné chyby.

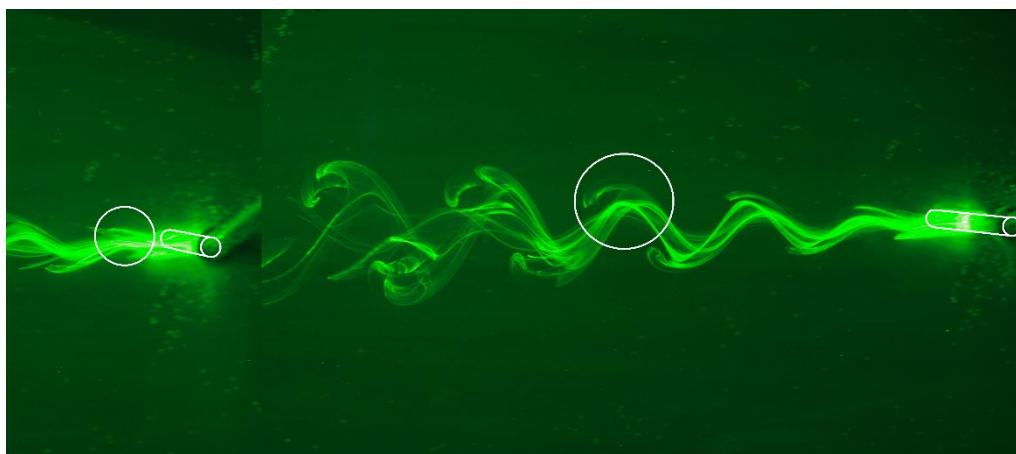


Obr. 6.3 Kontrola odtržení mezní vrstvy

6.3 Určení Strouhalova čísla

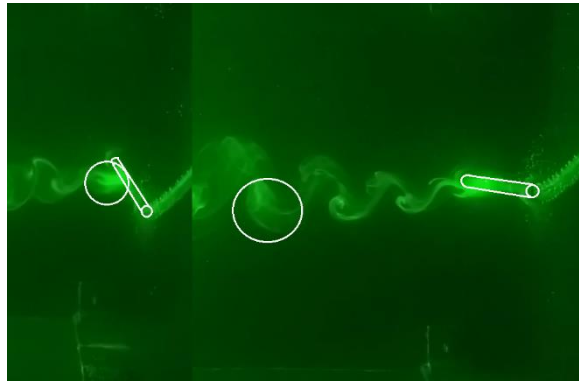
Jedním ze základních zkoumaných parametrů při obtékání tělesa je hodnota Strouhalova čísla, která je dána frekvencí odtrhávání vírů (kapitola 3.2). Při experimentálních metodách se tato frekvence měří např. pomocí stroboskopů [6], kdy se využívá možnost plynulého nastavení frekvence světelných impulzů stroboskopu. Jestliže dojde k synchronizaci frekvence světelných impulzů a frekvence odtrhávání vírů od obtékaného válce, úplav se jeví jako nehybný. Výslednou frekvenci pak lze odečíst na displeji stroboskopu.

Pro tento experiment, kdy se rychlosti proudění pohybují v relativně nízkých hodnotách, bude pro určení frekvence stačit optické pozorování úplavu. Hodnotu frekvence lze vypočítat ze získaných digitálních snímků, které vzájemně porovnáme. Je nutné znát časový rozstup mezi pořízenými fotografiemi a na obou naleznout stejný vírový útvar. Pak se pouze spočte počet vzniklých vírových struktur a vydělí se časovým intervalem. Víry se počítají pouze z jedné strany Karmánové vírové stezky. Na obrázku 6.4 je zobrazeno zmiňované porovnání vzniklého úplavu při hodnotě $Re = 50$, časový rozstup mezi levým a pravým snímkem je 15 s, bíle je zobrazen tentýž vírový prvek. Počet odtržených vírů za tuto dobu jsou 2 a výsledná frekvence je tedy 0,13 Hz.



Obr. 6.4 Porovnání úplavu při $Re = 50$, $\Delta t = 15$ s

Stejný princip výpočtu frekvence lze využít i při snímání úplavu pomocí digitální kamery. Výhodou oproti první metodě je, že z videozáznamu lze lépe odečíst časový úsek, nevýhodou je horší kvalita záznamu oproti použití fotoaparátu. Ukázka kvality je vyobrazena na obrázku 6.5.



Obr. 6.5 Porovnání úplavu při $Re = 90$, $\Delta t = 14$ s

Získané hodnoty frekvence odtrhávání vírů se z obou hodnot liší minimálně, k největší chybě dochází při odečtu časového intervalu pořízených fotografií. Obě tyto metody lze využít pro výpočet Strouhalova čísla

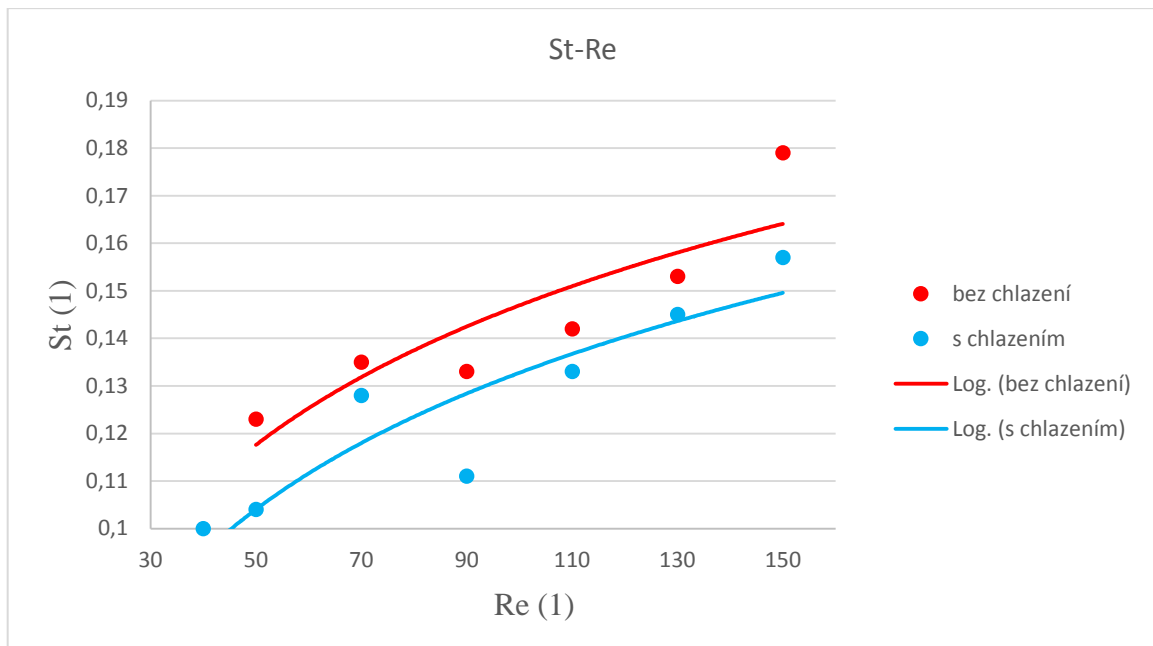
K určení frekvence byly využity obě výše uvedené metody. Výpočet frekvence proběhl jak pro případ izotermálního obtékání, tak pro případ obtékání ochlazovaného válečku. Získané výsledky byly zapsány do tabulky 6.1. Při režimech obtékání, kdy nedochází k odtržení mezní vrstvy, nebylo možné získat frekvenci, v tabulce jsou tyto režimy označeny „x“.

	Re (1)	30	40	50	70	90	110	130	150
f (Hz)	bez chlazení	x	x	0,13	0,2	0,25	0,33	0,42	0,57
	s chlazením	0,05	0,08	0,11	0,19	0,21	0,31	0,4	0,5

Tab. 6.1 Tabulka frekvencí tvorby vírů

Ze získaných hodnot frekvencí byly následně vypočteny hodnoty Strouhalova čísla. Vypočítané hodnoty St byly zpracovány do grafu, tentokrát se jednalo o graf závislosti $St-Re$, který se při experimentech obtékání používá nejčastěji. Jednotlivé body byly proloženy logaritmickým trendem pro lepší znázornění a následné porovnání získaných výsledků s ostatními autory.

Z grafu je zřejmé, že s rostoucí rychlostí proudění tekutiny roste frekvence odtrhávání vírů od povrchu tělesa a tím i Strouhalovo číslo, dále lze pozorovat vliv teploty, která také ovlivňuje frekvenci a celkově tvorbu úplavu za tělesem.



Graf. 6.1 Závislost St-Re

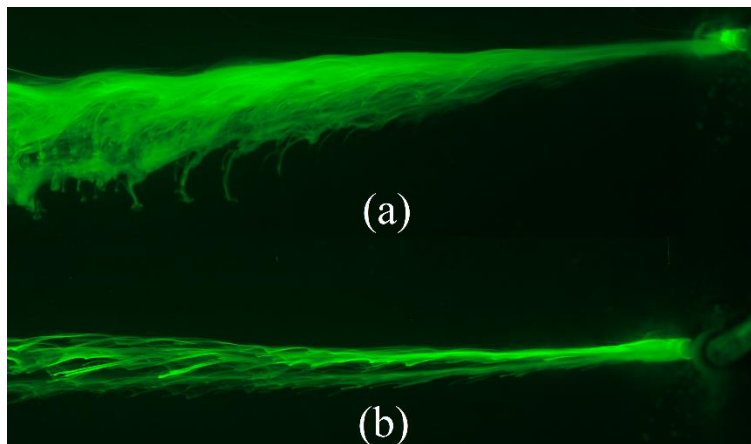
7 Vizualizace proudění

Tato kapitola obsahuje popis výsledků z experimentu vizualizace úplavu za obtékaným válcem. Byly provedeny celkem 2 série experimentů, při první bylo chlazení tělesa vypnuto, při druhém bylo chlazení nastaveno na maximální výkon Peltierova článku. Hodnoty napájení byly $U = 15,4 \text{ V}$ a $I = 5,4 \text{ V}$. Rychlosti posuvů válce v tažné nádrži byly nastaveny tak, aby odpovídaly hodnotám proudění tekutiny $Re = (30, 40, 50, 70, 90, 110 \text{ a } 150)$. Menší krok do hodnoty $Re = 50$ byl zvolen z předpokladu výrazné změny chování úplavu při zapnutém chlazení. Rychlosti byly zadávány do softwaru PC EPOS Studio propojeným se řídicí jednotkou krokového motoru. Teplota vody v tažné nádrži se pohybovala okolo $(37 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Kompletní přehled všech pořízených fotografií úplavu z experimentů je umístěn v příloze.

7.1 Vizualizace úplavu při $Re = 30$

Při nastavení proudění na hodnotu $Re = 30$ se válec pohyboval v tažné nádrži přibližně rychlostí 4 mm/s . Tato rychlost není dostatečně velká k tomu, aby došlo k odtržení mezní vrstvy. Jelikož se jednalo o laminární proudění, částice elektrolytického kouře měly tendenci se pohybovat přímo, zároveň však na ně působila gravitační síla, díky které byla jejich trajektorie mírně zakřivena směrem ke dnu.

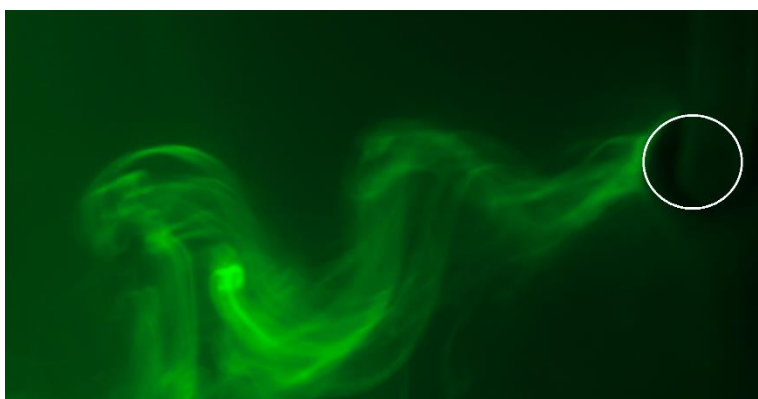
Při hodnotách napájení elektrod $U = 15 \text{ V}$ a $I = 0,5 \text{ A}$, byl vliv působení gravitační síly výrazný, jelikož množství uvolňovaného elektrolytického kouře z cínové anody bylo velké. Z tohoto důvodu bylo napájení sníženo na $U = 8 \text{ V}$, $I = 0,2 \text{ A}$. Při těchto hodnotách bylo uvolňování elektrolytického kouře dostatečné k vizualizaci úplavu. Rozdíl nastavení napájení je zobrazen na obr. 7.1



Obr. 7.1 Úplav při $Re = 30$ (a) $U = 15\text{V}$, $I = 0,5\text{A}$, (b) $U = 8\text{V}$, $I = 0,2\text{A}$

Na obr. 7.1 (b) lze pozorovat ve větší vzdálenosti od válečku naopak mírný pohyb kouře vzhůru, to bylo způsobeno působením vztlakových sil, které také zmírňují působení gravitace.

K velké změně došlo při obtékání válečku při stejné rychlosti, ale se zapnutým chlazením. Rozdíl teplot mezi volným proudem tekutiny a povrchovou teplotou válečku byl přibližně 13 °C. Takto poměrně malý rozdíl teplot byl již znát na tvorbě úplavu. Vlivem zbrzdění mezní vrstvy na ochlazovaném válečku došlo již při takto nízké rychlosti k odtržení mezní vrstvy a tvorbě vírových struktur. Tyto struktury byly rozměrově velmi malé a tvar si zachovávaly pouze v krátké vzdálenosti za obtékaným tělesem. Dále byl vliv difúze tekutiny tak velký, že docházelo k rozrušení Karmánové vírové stezky. Ochlazený úplav za válečkem měl vlivem vyšší hustoty oproti okolní tekutině tendenci klesat ke dnu.



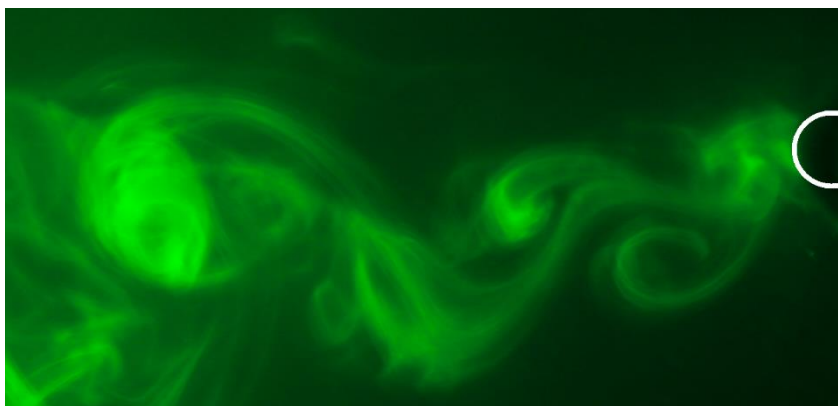
Obr. 7.2 Úplav při $Re = 30$ a zapnutém chlazení

7.2 Vizualizace úplavu při $Re = 40$

Rychlost proudu tekutiny okolo válečku je při hodnotě $Re = 40$ přibližně 5,5 mm/s. Pro izotermální obtékání tělesa je tato rychlost stále ještě nedostatečná k vytvoření vírových struktur v úplavu. Tlakový gradient $\frac{\partial p}{\partial x}$ není tak velký, aby dokázal úplně zbrzdit mezní vrstvu. Avšak oproti hodnotě proudění $Re = 30$, není úplav již tak přímý a jeví známky mírného vychylování mimo jeho osu. To může být způsobeno vyšší relativní rychlostí úplavu vůči volnému proudu, kdy se hodnoty rychlostí blíží již ke kritické hranici Re_c .

Rozdíl opět nastává, pokud je zapnut chladicí oběh a váleček je ochlazován. Nižší teplota obtékaného válečku spolu s tlakovým gradientem, jsou již schopni zbrzdit mezní vrstvu na takovou hodnotu, kdy dojde k jejímu odtržení. Vytvořený úplav se více podobá Karmánové vírové stezce, jednotlivé víry jsou zřetelnější a více se zaoblují. Úplav je jasně

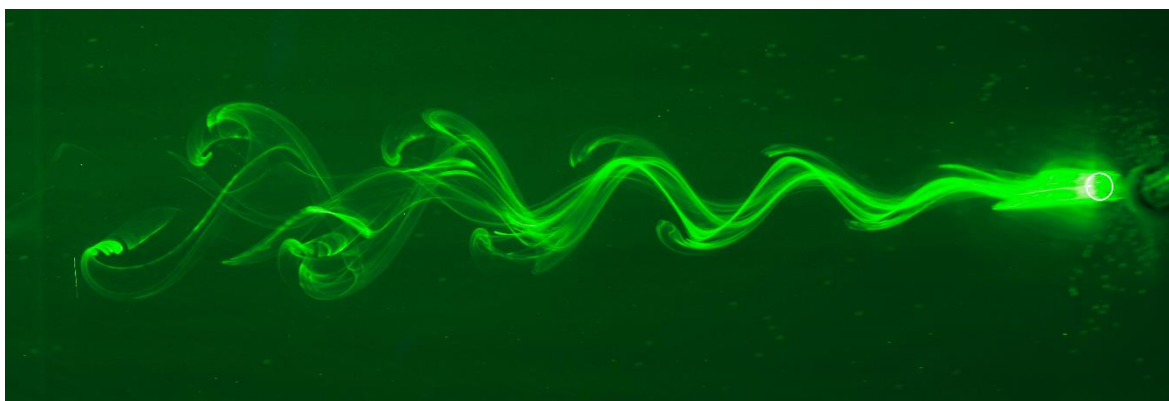
ohraničený a má opět klesající charakter vlivem jak větší hustoty částic elektrolytického kouře, tak vlivem větší hustoty chladnější tekutiny oproti okolnímu teplejšímu proudu. Vytvořený úplav je zobrazen na obrázku 7.3.



Obr. 7.3 Úplav při $Re = 40$ a zapnutém chlazení

7.3 Vizualizace úplavu při $Re = 50$

Při proudění odpovídající $Re = 50$ se rychlost proudu okolo válečku pohybuje na hranici 7 mm/s . Při vypnutém chladícím oběhu, a tedy při izotermálním obtékání již došlo k překročení hraniční hodnoty Re_c , za tělesem se periodicky odtrhávají víry a je tvořena Karmánová vírová stezka. Úplav je celistvý a zřetelně viditelný. Nastavení napájení elektrolýzy je optimální, jelikož se úplav nijak výrazně nevychyluje ze své osy. Tzn., že gravitační a vztlakové síly jsou ve vzájemné rovnováze. Jednotlivé vzniklé víry se s rostoucí vzdáleností od obtékaného válce více zaoblují a stáčí se.



Obr. 7.4 Úplav při $Re = 50$

Při zapnutém chlazení začne docházet k zavinování vzniklých vírů již od počátku odtrhávání mezní vrstvy. Zároveň jsou tyto vzniklé víry oproti izotermálnímu obtékání uspořádány blíže k sobě. Celkově vypadá Karmánová vírová stezka, jakoby byla stlačena.

Zaoblení vírů může být způsobeno tím, že tekutina tvořící Karmánovu vírovou stezku má nižší teplotu a tedy se částice úplavu pohybují pomaleji oproti okolo pohybujícím se částicím volného proudu, které mají vyšší teplotu. Okolní rychleji pohybující se proud tedy „předbíhá“ pomalejší úplav a tím ho nutí se více zaoblit. Při izotermálním obtékání mají částice úplavu i volného proudu stejnou teplotu a rozdíl rychlostí není tak veliký. Zaoblení vírů je tedy v blízkosti obtékaného tělesa minimální.

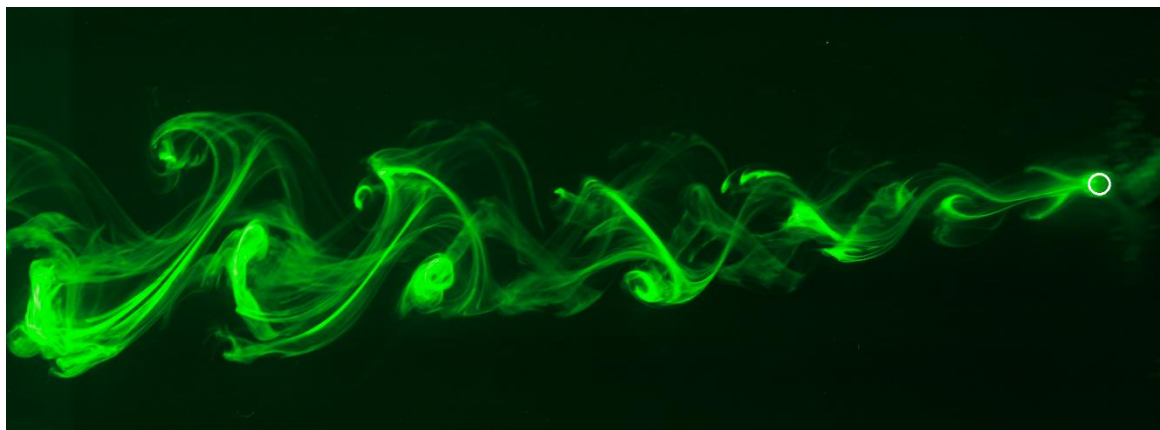


Obr. 7.5 Úplav při $Re = 50$ a zapnutém chlazení

7.4 Vizualizace úplavu při $Re = 70$

Se zvýšením hodnoty $Re = 70$ se rychlost proudění pohybuje okolo hodnoty 10 mm/s. Karmánová vírová stezka je již opět plně vyvinutá, frekvence odtrhávání vírů se zvýšila a víry se při izotermálním obtékání zaoblují již od počátku. Zároveň je větší i amplituda vychýlení vírů od osy.

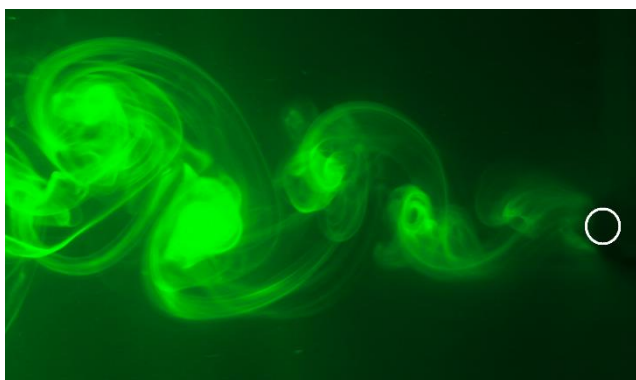
Při vypnutém chlazení je patrný lehce klesavý průběh, způsobený převládajícím působením gravitační síly na částice elektrolytického kouře, které mají vyšší hustotu než kapalina, do níž jsou uvolňovány.



Obr. 7.6 Úplav při $Re = 70$

Při obtékání ochlazovaného válce, je největší rozdíl mezi jednotlivými vytvořenými úplavy pozorovatelný opět hned za obtékaným válcem, kde jsou jednotlivé víry zřetelně ohraničené a mají oblejší charakter, než při izotermálním obtékání zobrazeném na obr. 7.6. Rozdílné chování vírů je dáno vlastnostmi molekul vody, kdy molekuly úplavu s nižší teplotou mají vyšší hustotu a menší pohybovou energii.

Ve větší vzdálenosti od válečku dochází k rozrušení Karmánové vírové stezky, díky vzájemné difúzi kapalin o rozdílných teplotách, kdy má převládající vliv většího množství okolní teplejší kapaliny

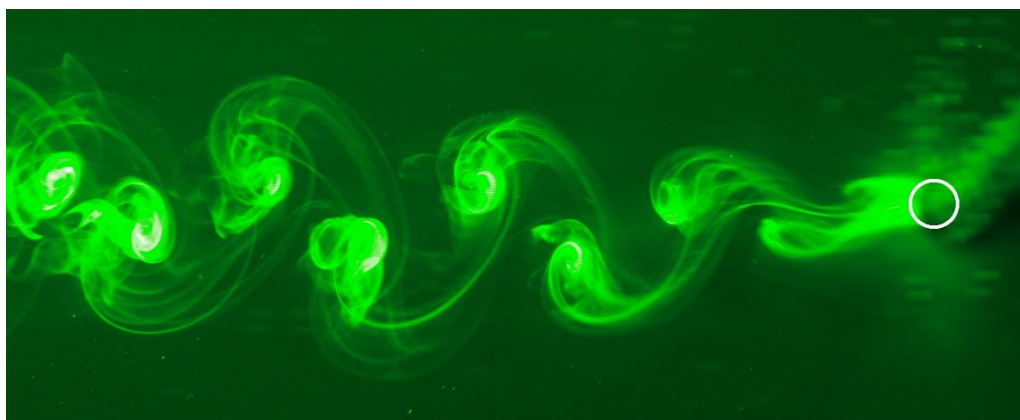


Obr. 7.7 Úplav při $Re = 70$ a zapnutém chlazení

7.5 Vizualizace úplavu při $Re = 90$

Nastavením rychlosti pohybu válečku v tažné nádrži na hodnotu přibližně 13 mm/s dostaneme podmínky proudění odpovídající hodnotě $Re = 90$.

Při této rychlosti a vypnutém chlazení válečku byla vytvořena ostře ohraničená Karmánová vírová stezka, uspořádání vírů bylo pravidelné s periodickým střídáním odtržení z jedné a druhé strany obtékaného tělesa. Zakončení vírů mělo již kruhový tvar, začátky vírů měly tenkou linii a hladce zaoblenou trajektorii.



Obr. 7.8 Úplav při $Re = 90$

Při zapnutém chlazení válečku nedošlo k výrazným změnám úplavu, jednotlivé víry byly pouze umístěny blíže k sobě. Dále došlo k mírnému snížení hodnoty frekvence odtrhávání vírů a tedy hodnotě Strouhalova čísla.

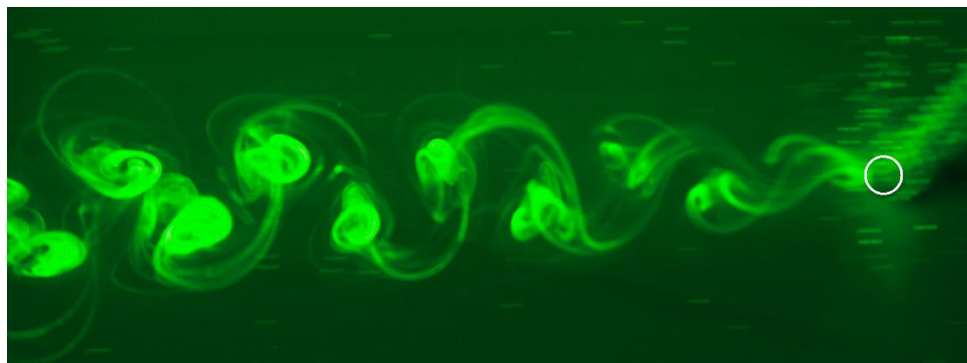
Ve vzdálenosti přibližně $7D$ od válečku se opět objevilo narušení Karmánové vírové stezky vlivem ztráty pohybové energie jednotlivých vírů a vzájemného difúzního působení molekul vody.

7.6 Vizualizace úplavu pro $Re = 110$

Hodnota $Re = 110$ odpovídá rychlosti proudění tekutiny kolem tělesa přibližně $15,5 \text{ mm/s}$. Při této rychlosti proudění je režim obtékání již poměrně daleko od mezní hranice Re_c . Stále se jedná o laminární proudění. Karmánová vírová stezka, která se vytvářela v úplavu za válečkem byla stabilní a rovnoměrná.

Při izotermálním obtékání se víry s rostoucí vzdáleností od obtékaného tělesa postupně zvětšovaly a zároveň ztrácely na intenzitě. Rozestupy mezi jednotlivými víry jsou stejné, což odpovídá periodickému charakteru odtrhávání.

Rozdíl rychlostí mezi volným proudem tekutiny a zbrzděnou mezní vrstvou je již tak velký, že k úplnému zaoblení vírů dochází bezprostředně za obtékaným válečkem. Výsledný úplav je zachycen na obr. 7.9.



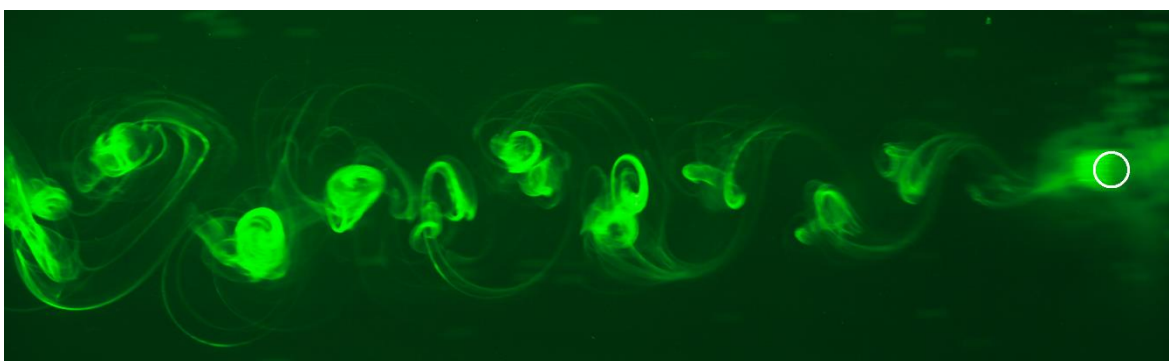
Obr. 7.9 Úplav při $Re = 110$

Zapnutím chladicího oběhu došlo k mírné změně uspořádání vírů. Vzniklé víry se posunuly blíže k ose a vypadalo to, že leží v řadě za sebou. Oblouky tvořící vnější hranici vírové stezky se zvětšily. K náhlému rozpadu víru došlo opět dříve oproti izotermálnímu obtékání, kdy vzájemná interakce mezi úplavem a volným proudem není podpořena rozdílnými teplotami.

7.7 Vizualizace úplavu při $Re = 130$

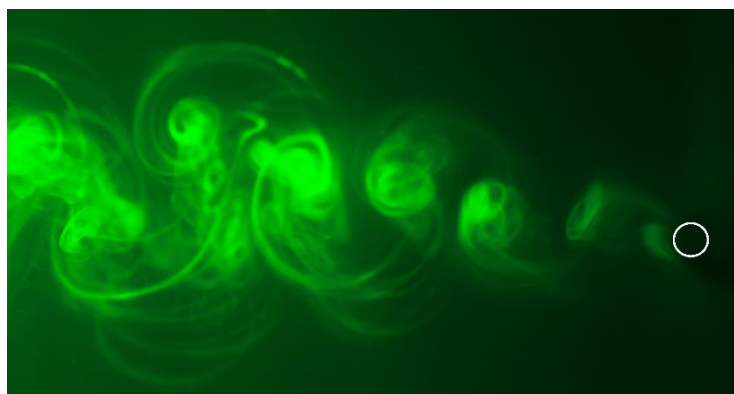
Dalším zvýšením hodnoty $Re = 130$ překročí rychlost proudění tekutiny hranici 18 mm/s.

Karmánová vírová stezka se oproti předešlé rychlosti $Re = 110$ zúžila. Počátky vírů jsou tvořeny tenkými, souvislými oblouky. Barevný kontrast mezi nimi a samotnými víry se zvýšil. Víry leží téměř v jedné ose se stejnými rozestupy mezi sebou. Ve vzdálenosti přibližně $20D$ se víry již postupně ztrácejí.



Obr. 7.10 Úplav při $Re = 130$

Úplav za ochlazovaným válečkem je tvořen taktéž víry s podobným zaoblením vírů, rozestupy mezi nimi jsou však menší. Vlivem těsného uspořádání vírů se začaly ve vzdálenosti zhruba $10D$ vzájemně protínat. S dalším zvýšením vzdálenosti již nebylo možné od sebe rozeznat jednotlivé vírové struktury.



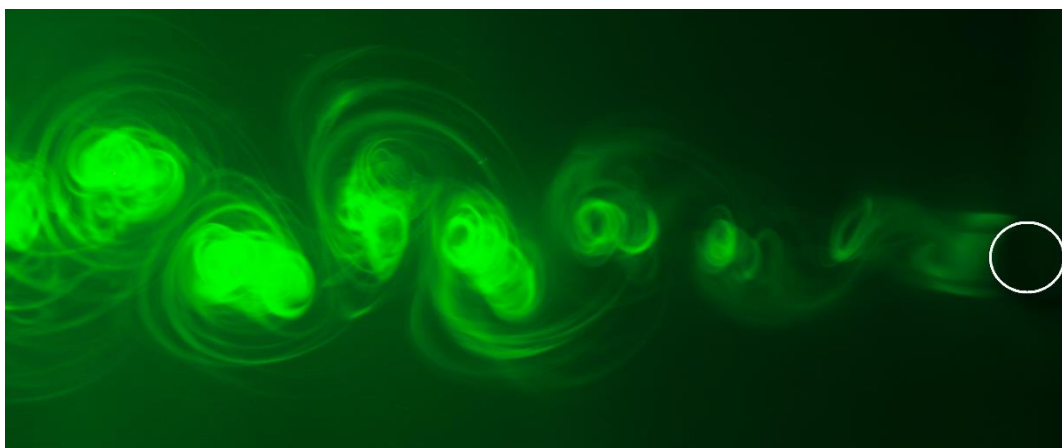
Obr. 7.11 Úplav při $Re = 130$ a zapnutém chlazení

7.8 Vizualizace úplavu při $Re = 150$

Poslední vizualizace úplavu probíhala při nastavení proudění na hodnotu $Re = 150$, které odpovídá rychlosti pohybu válečku 21 mm/s. I při těchto rychlostech bylo proudění po celé délce laminární.

Dominantním prvkem úplavu byly stočené víry, které připomínaly malé kuličky. Frekvence odtrhávání vírů byla již poměrně vysoká, blížila se hodnotě 0,6 Hz. Víry byly rovnoměrně rozmístěny z horní i ze spodní strany úplavu.

Zapnutím chladicího oběhu se vírové struktury seřadil do jedné osy. Karmánová vírová stezka se mírně rozšířila. Jednotlivé víry se začali stáčet více po směru pohybu chlazeného válečku. U izotermálního obtékání je tento pohyb viditelný až ve vzdálenosti přibližně $13D$, zatím co u ochlazovaného válce již ve vzdálenosti $5D$.



Obr. 7.12 Úplav při $Re = 150$ a zapnutém chlazení

8 Shrnutí výsledků a jejich porovnání s ostatními autory

V této kapitole budou shrnuty všechny provedené úkony a přípravné experimenty předcházející samotnou vizualizaci obtékání ochlazovaného válce. Zvolené metody a získané výsledky budou porovnány s výsledky předešlých experimentů ostatních autorů, kteří se zabývali stejnou nebo podobnou tematikou v minulosti.

8.1 Chyby a nejistoty měření

Každé měření vykazuje určitou chybu a v důsledku toho nejistoty. Tyto chyby bývají způsobovány jednak měřicími přístroji, které mají omezenou přesnost, tak člověkem, který bývá součástí měřicího řetězce.

V provedeném experimentu mohly nastat chyby při měření povrchové teploty válce a při měření frekvence odtrhávání vírů.

Pro eliminaci chyb měření teploty byly použité termočlánky kalibrovány, zároveň bylo použito více termočlánků a výsledná hodnota byla vypočítána jako aritmetický průměr. Pro eliminaci náhodných chyb bylo měření provedeno několikrát, avšak z důvodu nemožnosti ověření pomocí jiného způsobu měření je nutné brát tyto hodnoty jako orientační.

Měření frekvence odtrhávání vírů od povrchu obtékaného válce probíhalo pomocí optického pozorování úplavu a následného výpočtu. Toto měření bylo ovlivněno především rozlišovací schopností člověka, který může být zdrojem chyb. Pro snížení nejistoty měření by bylo vhodné použít jinou metodu pro měření frekvence např. měření pomocí stroboskopu nebo termoanemometrie.

8.2 Zvolené chlazení válce

Chlazení obtékaného válce se v dřívějších experimentech řešila většinou pouze protékáním studené vody z vodovodní sítě, např. v práci Trávníčka a kol. [6], kdy se teplota chladicího média pohybovala okolo hodnot 17 °C. Rozdíl teplot mezi povrchem obtékaného tělesa a okolního volného byl zajištěn ohřevem proudící tekutiny. Jelikož se jednalo o

vzduch, stačilo ho prohnat skrz žebrovaný elektrický ohřivač, který zajistil jeho dostatečné zahřátí. Teplota proudícího vzduchu mohla být až 200 °C.

Při použití vody jako proudící tekutiny nelze dosáhnout takovýchto teplot. Dalším problémem bylo množství vody, které by bylo potřeba ohřát. I když se tažná nádrž umístěná v laboratoři KEZ řadí mezi malé tažné nádrže, objem vody, který je potřeba pro experiment je 5000 l. Ohřátí tak velkého množství vody by bylo energeticky příliš náročné a nádrž by musela být vybavena např. výkonnými topnými tělesy.

Pro potřeby tohoto experimentu byla použita pro napuštění tažné nádrže teplá voda z vodovodní sítě, která měla v průběhu vizualizace teplotu $37 \pm 0,5$ °C.

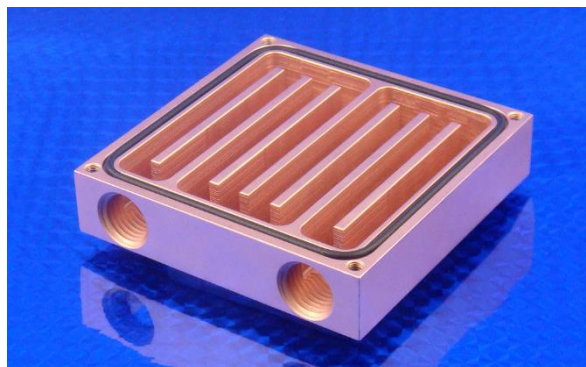
Bylo nutné se tedy zaměřit na řešení chlazení válce. Jednotlivé způsoby jsou již popsány v kapitole 5.5. V práci A. M. Ahmeda [28] je řešeno chlazení válce také pomocí kohoutkové vody, která je ale filtrována skrz tenký filtr chlazený tekutým dusíkem.

Vybraná metoda chlazení pomocí Peltierova článku nebyla v minulosti použita v žádném experimentu zabývající se obtékáním ochlazovaného válce, nebylo možné tedy vycházet ze žádných zkušeností z použití tohoto typu chlazení.

V průběhu experimentu byly zjištěny konstrukční slabiny vybraného typu chlazení, konkrétně se jednalo o:

- 1) Velikost teplosměnné plochy výměníku připevněného k Peltierova článku.
- 2) Použití teplovodivé pasty.

Pro zvýšení efektivity chlazení vody, by bylo vhodné zvýšit plochu tepelného výměníku, který byl v této práci řešen jako dutý hliníkový kvádr. Zvětšení teplosměnné plochy by mohlo být vyřešeno buď použitím např. 2 Peltierových článků a k nim přidaným tepelným výměníkům nebo použitím výměníku s vnitřním kanálkem jako je např. na obr. 8.1.



Obr. 8.1 Chladicí blok pro vodní chlazení [29]

Dalším problémem, který se v průběhu experimentu objevil, bylo zmrznutí teplovodivé pasty. Peltierův článek je při maximálních hodnotách napájení a použitím vhodném chladiči schopen na chladné straně dosáhnout záporných hodnot teploty. S postupem času se na hranici chladné strany článku a tepelného výměníku začaly objevovat krystalky ledu, které se poté zvětšovaly. Přestalo docházet k intenzivnímu chlazení, jelikož se teplota v expanzní nádobě začala mírně zvětšovat. Pro vyřešení tohoto problému stačilo nanést kvalitnější teplovodivou pastu na kovové bázi.

Ostatní prvky oběhu (chladič, vodní čerpadlo, expanzní nádoba) byly zvoleny vhodně a nedošlo u nich k žádnému problému.

8.3 Měření povrchové teploty

V práci Trávníčka [6], se pro měření teploty povrchu obtékaného válce a volného proudu používaly termočlánky jako v tomto experimentu. Dále se zde však již neuvádí průběhy nasnímaných teplot povrchu obtékaného tělesa, je zde pouze uvedena hodnota T^* , která je dána jako poměr povrchové teploty válečku T_w a teploty proudícího volného proudu T_∞ .

Rindt v práci [12], používá pro měření teploty také termočlánky, ale k vyjádření rozdílu teplot mezi povrchem tělesa a proudící tekutinou využívá Richardsonovo podobnostní číslo (Ri), stejně jako např. Noto [3]. Rindt se zde zmiňuje o rozdílném průběhu teplot na náběžné straně a straně úplavu válečku, který je popsán i v této práci (kapitola 6.1).

Vzhledem k rozdílným podmínkám průběhu jednotlivých experimentů, kdy jsou použity různé rychlosti a teploty jak proudící tekutiny, tak teploty ohřevu či chlazení otékaného válečku nelze získané hodnoty porovnat a lze je brát pouze jako hodnoty orientační.

8.4 Kontrola odtržení mezní vrstvy

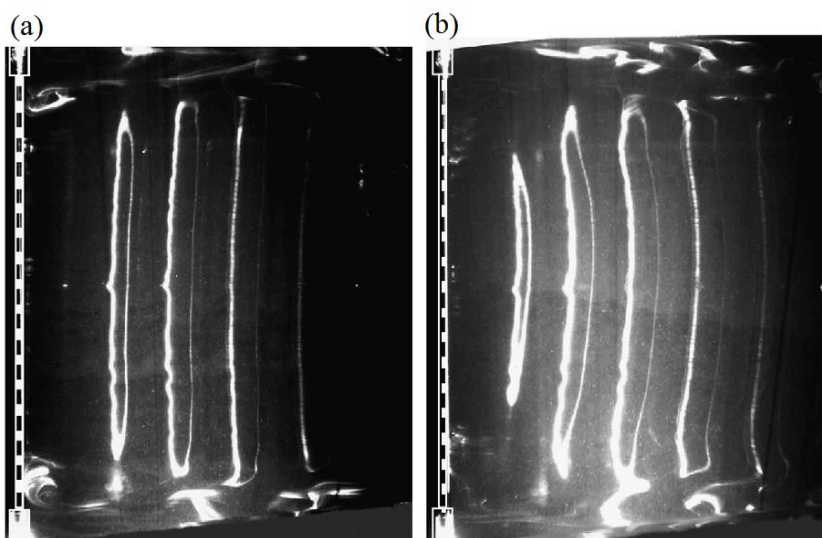
Důležitou věcí pro ověření správnosti konstrukce pokusného rámu, umístění obtékaného válečku a nanesení cínové vrstvy pro proces vizualizace je kontrola odtržení mezní vrstvy.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.2 vzorem této kontroly byla práce Williamsona [27], který k vizualizaci úplavu za obtékaným tělesem používal horizontální řez. Konkrétně

se zabýval zaoblením horizontálního řezu Karmánové vírové stezky, které se zvětšovalo s rostoucí vzdáleností od obtékané překážky. Tuto deformaci přisuzoval vlivu zakončení okrajů válečku pomocí desek. Pokud byly tyto desky, mezi nimiž byl váleček umístěn, rovnoběžné s proudem tekutiny vznikaly na okrajích tělesa v úplavu nepatrné poruchy, které se postupně šířily a ve vzdálenosti $600D$ již způsobovaly nezanedbatelnou deformaci celého úplavu. Vzniklé poruchy se mu podařilo eliminovat mírným natočením bočních desek.

Stejné chování úplavu je zachyceno v práci T. Víta [13], ve které lze zaoblení odtržené vrstvy pozorovat již ve vzdálenosti $225D$. Zachycený jev je zobrazen na obrázku 8.2.

Pro tento experiment, kdy byla provedena vizualizace úplavu do vzdáleností maximálně $50D$, mohly být boční desky rovnoběžně se směrem simulovaného proudění. Deformace byla do těchto malých vzdáleností zanedbatelná. Z důvodu snímání úplavu v tenkém řezu laseru, protínající obtékaný váleček v jeho středu, bylo možné zanedbat i drobné poruchy vznikající vlivem přechodu cínové vrstvy a nosného mosazného válečku.

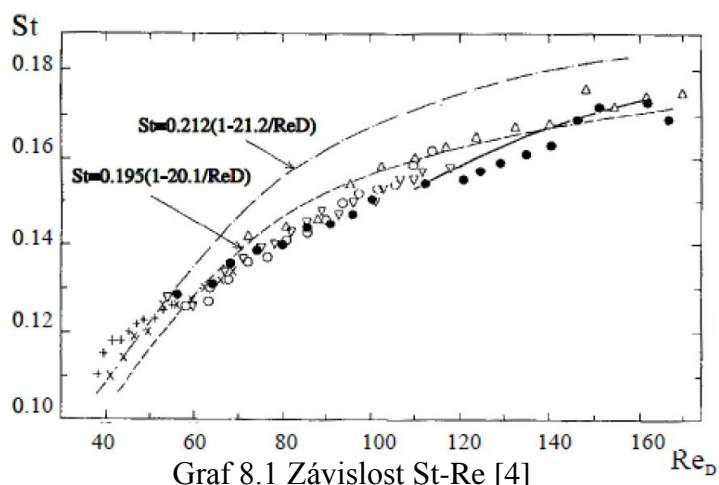


Obr. 8.2 Paralelní a zaoblené odtrhávání mezní vrstvy (a) úplav ve vzdálenosti $25D$, $Re = 70$, (b) úplav ve vzdálenosti $225D$, $Re = 70$ [13]

8.5 Určení frekvence a výpočet Strouhalova čísla

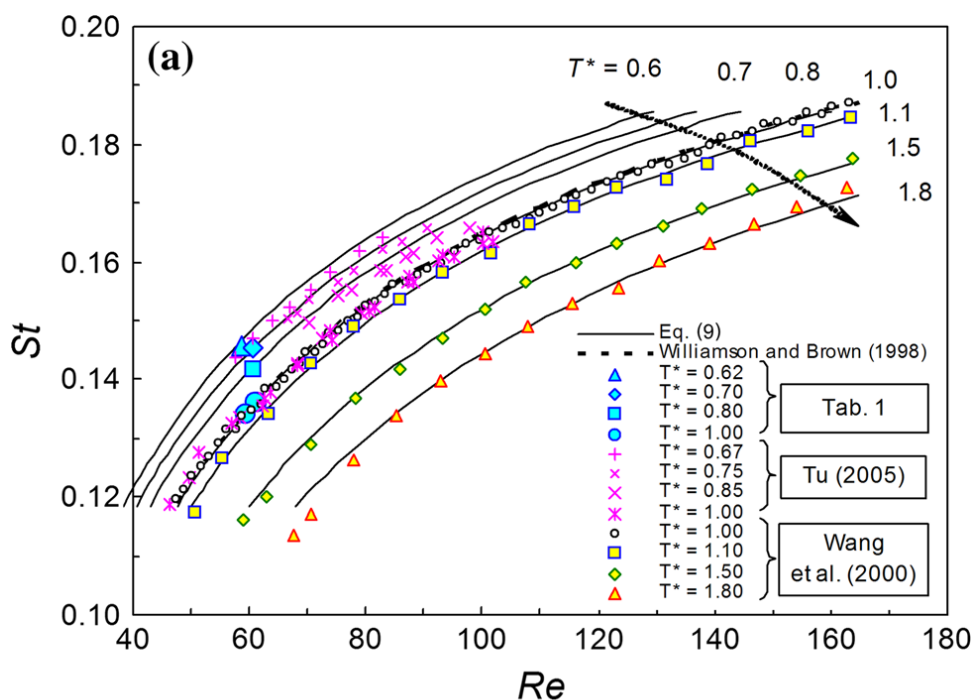
Jedním ze základních parametrů zkoumaných při obtékání válce a tvorbě úplavu je frekvence odtrhávání vírů a tomu odpovídající výpočet Strouhalova čísla. Výpočtem Strouhalova čísla a jeho závislostí na rychlosti proudění, respektive hodnotě Reynoldsova

čísla se v minulosti zabývali např. Wang [8] nebo Zdravkovich [4]. Výsledky experimentů byly zpracovány do grafů závislosti $St = St(Re)$.



Ze získaných závislostí byly vypočítané hodnoty koeficientů rovnice 3.2, tyto koeficienty se opět mírně liší podle autorů.

Dalším parametrem, který má vliv na hodnotu Strouhalova čísla je teplota obtékaného tělesa. Tento vliv zkoumal např. Trávníček [6] nebo Vít [13], z výsledků těchto experimentů plyne, že ohříváním válečku při obtékání proudem vzduchu se frekvence odtrhávání vírů mírně zmenšuje. Opačný jev nastává, pokud je ohříván váleček obtékán kapalinou, v tomto případě se frekvence tvorby vírů zvětšuje, viz graf 8.2.



Graf. 8.2 Závislost $St-Re$ pro ohřívání váleček obtékán vzduchem [6].

Pro parametry experimentu této práce, kdy byl obtékaný váleček ochlazován a obtékán vodou byl předpoklad snížení frekvence odtrhávání vírů a tomu i odpovídal získaný výsledek měření.

Nejdůležitějším parametrem pro výpočet St je tedy frekvence, její správné určení má velký vliv na výsledek výpočtu. Vít [13] ve své práci používal pro získání hodnot frekvence metodu žhaveného drátku. Trávníček [6] zase využil pro změření frekvence odtrhávání vírů stroboskop. V této práci byl využit výpočet frekvence z hodnot získaných snímáním úplavu. Tato metoda může být zdrojem zanesení chyb do výpočtu, avšak získané výsledky odpovídají všem předpokladům a hodnoty téměř korespondují s grafem 4.1.

8.6 Vizualizace úplavu

K vizualizaci úplavu se v minulosti využívalo několik metod, např. Baranyi [10] použil k vizualizaci metodu kouřícího žhaveného drátku, který do proudu tekutiny uvolňuje olejovou mlhu, tato mlha je zvýrazněna laserem a následně snímána fotoaparátem.

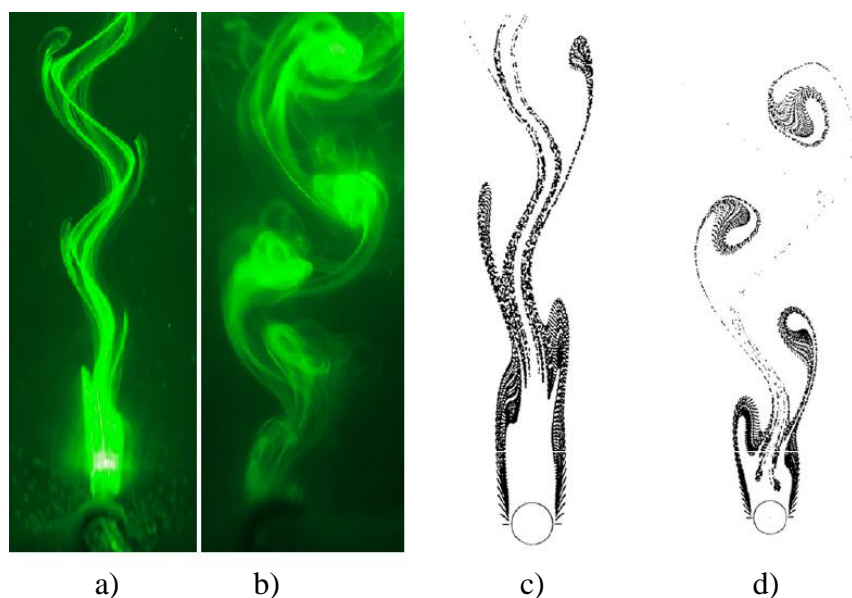
Stejný princip obsahuje i vizualizační metoda cínových iontů, která byla v minulosti použita např. ve výzkumu Rindta [12] nebo při tvorbě této práce. Rozdíl je ve vytváření mlhy, která dokáže vizualizovat úplav za obtékaným tělesem. V tomto případě se jedná o výsledek elektrolytické reakce mezi měděnou katodou a cínovou anodou (kapitola 5.2). Rindt při svém experimentu používal cínovou pásku umístěnou před obtékané těleso, zatímco v této práci byla cínová anoda v podobě fólie obalena přímo na povrch obtékaného válečku.

Kvalita získaných výsledků při použití této vizualizační metody je závislá především na 4 parametrech, na nastavení napájení elektrolýzy, které musí být takové, aby množství uvolňovaných cínových iontů bylo optimální. Kvalitě vody v tažné nádrži, která se postupem času vlivem hromadění částic elektrolytického kouře zhoršovala. V druhé polovině měření se navíc zhoršila kvalita vody přímo z vodovodní sítě, ze které byla nádrž napouštěna. Následkem zakalení vody byla ztráta ostrosti laserového řezu. Samotná kvalita laserového řezu je dalším parametrem, v ideálním případě by měl být tento řez tenký, při přemístění laserové hlavy se objevilo drobné rozostření na okrajích roviny laserového řezu. Posledním článkem ovlivňující kvalitu výsledků je snímací zařízení, které muselo být nastaveno vždy na aktuální světelné podmínky v laboratoři.

I když byla voda v tažné nádrži měněna po každé sérii měření, vlivem změn podmínek snímání úplavu, které se postupem času zhoršovaly, jsou některé snímky úplavu nedokonalé. Laserový řez osvětloval širší část úplavu a fotografie byly neostré.

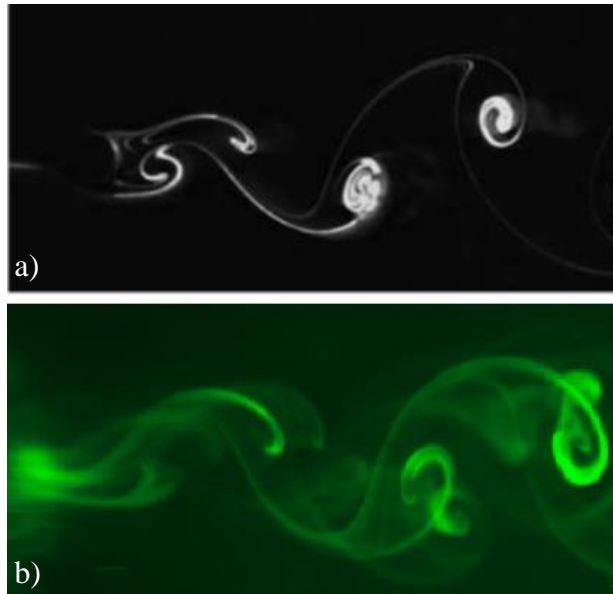
V práci Nota [9] je uvedena změna tvaru Karmánové vírové stezky za obtékaným válcem v jednotlivých tekutinách. Při zvýšení rozdílu teplot mezi volným proudem a obtékaným válečkem jeho ochlazením, začalo docházet ke zvyšování amplitudy vychýlení víru mimo hlavní osu úplavu, zároveň došlo ke zvětšení vírové spirály. Dále vlivem ochlazování válce docházelo ke snižování hodnoty St .

Zvolená metoda chlazení válce, vybraná vizualizační metoda a nanesení cínové folie na povrch obtékaného válce se potvrdilo jako vhodné při porovnání výsledků vizualizací s ostatními autory, jenž se touto problematikou zabývali v minulosti.



Obr. 8.3 Porovnání změny úplavu vlivem chlazení válce (a) $Re = 50$, $T^* = 1$, (b) $Re = 50$, $T^* = 0,95$, (c) $Re = 44$, $T^* = 1$, (d) $Re = 44$, $T^* = 0,9$ [9]

Porovnání pořízených snímků úplavu při nastavených podobných rychlostech této práce a práce Rindta [12] je zobrazeno na obr. 8.4.



Obr. 8.4 Porovnání úplav při (a) $Re = 117$ [12], (b) $Re = 110$

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést experimentální výzkum obtékání ochlazovaného válce. Před samotným experimentem bylo nutné se seznámit s teoretickými podklady této problematiky a se současným stavem výzkumu.

Pro praktickou část byla využita tažná nádrž umístěná v laboratoři KEZ a částečně pokusný rám z předchozích experimentů. Z důvodu dlouhé doby, kdy se nádrž nevyužívala, bylo nutné ji první vypustit a vyčistit od usazenin vodního kamene, které by později mohli ovlivňovat kvalitu pořízených fotografií úplavu. Nově byl také potřeba vymyslet a zkonstruovat chladicí oběh pro chlazení obtékaného válečku a následně vše umístit na pokusný rám nádrže. Při návrhu chlazení bylo zvažováno několik variant, jako nejvhodnější se ukázala možnost s chlazením pomocí Peltierova článku pracujícím na základě stejnojmenného jevu. Chlazení bylo dostačující, avšak pro další použití tohoto článku by bylo vhodné se zaměřit na zvětšení teplosměnné plochy výměníku pro ochlazování vody, které by celý proces zefektivnilo.

Za vizualizační metodu byla vybrána metoda cínových iontu, která je založena na principu elektrolytického rozkladu cínové anody, jenž do proudu tekutiny uvolňuje elektrochemický kouř. Vytvořený kouř, dokáže simulovat chování tekutiny v úplavu za obtékanou překážkou. Ke zvýraznění vizualizace je tento kouř prosvícen laserovým řezem, díky kterému je možné zachytit úplav v jedné rovině. V této práci je použita rovina kolmá k ose válečku. Dále bylo potřeba najít takové hodnoty napájení elektrolýzy, aby docházelo k optimálnímu uvolňování elektrolytického kouře.

Pro ověření funkčnosti chlazení válečku byla následně provedena série měření povrchové teploty při nastavení maximálního výkonu chlazení a různých rychlostí simulovaného proudění. Hodnoty rychlostí byly nastavovány postupně $Re = (30, 40, 50, 70, 90, 110, 130 \text{ a } 150)$, stejné byly použity i při vizualizaci úplavu. Teplota byla snímána pomocí termočlánků typu K, které byly umístěny ve dvou párech na obtékaném válečku. 2 byly na náběžné straně a 2 na straně úplavu. Hodnoty teplot byly měřeny a nahrávány pomocí měřicí stanice Dewetron. Pro eliminaci chyb měření by bylo vhodné se zaměřit na připevnění termočlánků k povrchu obtékaného válečku, které by bylo lepší řešit např. pomocí vysokoteplotní pájky.

Jako další následovala kontrola správnosti nanesení cínové vrstvy na povrch obtékaného válce, která byla nutná pro zvolený proces vizualizace. Možným zdrojem chyb byl spoj cínové vrstvy, který musel být proveden tak, aby co nejméně ovlivňoval vznikající

úplav. Kontrola spočívala v přestavení laserového řezu tak, aby jeho rovina protínala osu obtékaného válečku po celé jeho délce. Výsledný horizontální řez úplavu potvrdil správnost provedení spoje cínové vrstvy, který do tvorby úplavu nezanášel žádné výrazné deformace.

Následoval výpočet Strouhalova čísla pro jednotlivé rychlosti proudění jak pro nechlazený váleček, tak pro chlazený. Vypočítané hodnoty byly zaneseny do grafu St-Re, který odpovídal grafům z předešlých výzkumů. Pro zpřesnění hodnot St, by bylo potřeba použít jinou metodu odečtu frekvence odtrhávání vírů než vizuálního porovnání 2 snímků o známém časovém rozestupu mezi jejich pořízení, např. měření frekvence pomocí stroboskopu nebo pomocí anemometrie žhaveného drátku.

Poté následoval samotný experiment vizualizace obtékání ochlazovaného válečku. V první části proběhla vizualizaci při vypnutém chlazení a následně při jeho chodu. Toto rozdělení na 2 série měření bylo z důvodu porovnání tvorby úplavu. Jednotlivé stavy a změny úplavu byly detailně popsány.

V závěru práce bylo provedeno shrnutí získaných výsledků z jednotlivých měření a jejich porovnání s ostatními autory zabývající se problematikou obtékáním těles. V důsledku shodných výsledků a podobných závěrů při vizualizaci obtékání ochlazovaného válečku s ostatními autory se domnívám, že byl splněn hlavní cíl této diplomové práce. Použité metody mohou být nápomocné při podobném experimentálním výzkumu.

9.1 Další možnosti výzkumu

Pro další experimentální výzkumy obtékání ochlazovaného válce by bylo vhodné zaměřit se na optimalizaci chlazení pomocí Peltierova článku, popř. zkonstruovat kompresorové chladicí zařízení, které by dokázalo intenzivněji odvádět teplo z chladícího média.

Pro získání přesnějších výsledků výzkumu by bylo také vhodné použít jinou vizualizační metodu. Pro metodu cínových iontů je potřeba cínová anoda, která je umístěna buď před obtékaný válec v podobě drátku, nebo přímo na povrch válce v podobě fólie. I když je ovlivnění proudění malé, dochází i přesto k drobným změnám, např. k poklesu frekvence odtrhávání vírů.

Seznam literatury

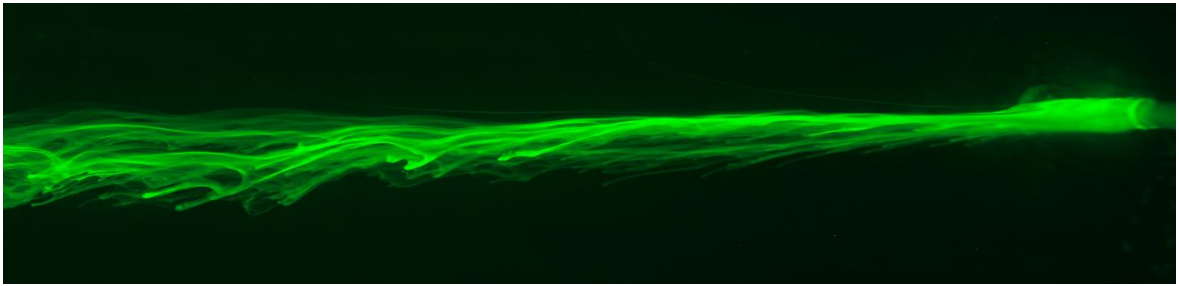
- [1] NOSKIEVIČ, J a kol.: *Mechanika tekutin*, SNTL Praha, 1987
- [2] FILLOLA, G., CARRIER, G., DOR, J. B.: *Experimental study and numerical simulation of flow around wing control surface*, 2006
- [3] NOTO, K.: *Cooled vortex street characteristics*, *Numerical heat transfer, Part A: Applications*, 57:1, 18-39, 2010
- [4] ZDRAVKOVICH, M.: *Flow around circular cylinders, vol 1*. Oxford University Press, Oxford 1997
- [5] ZDRAVKOVICH, M.: *Flow around circular cylinders, vol 2*. Oxford University Press, Oxford 2003
- [6] TRÁVNÍČEK, Z., WANG, A. B., TU, W. Y.: *Laminar vortex shedding behind a cooled circular cylinder*, *Exp. Fluids* 55:1679, 2014
- [7] LECORDIER, J. C., HAMMA L., PARANTHOEN P.: *The control of vortex shedding behind heated circular cylinders at low Reynolds number*, *Exp Fluids* 10:224-229, 1991
- [8] WANG, A. B., TRÁVNÍČEK, Z., CHIA, K. C.: *On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder*. *Phys Fluids* 12(6):1401–1410, 2000
- [9] NOTO, K.: *Cooled vortex street generated by cooling a cylinder at low Reynolds number: effects of Reynolds number difference on cooled wake and cooled vortex street*. *Numer Heat Transf Part A* 54:866–889, 2008
- [10] BARANYI, L., SZABÓ, S., BOLLÓ, B., BORDÁS, R.: *Analysis of low Reynolds number flow around a heated circular cylinder*, *Journal of Mechanical Science and Technology* 23 (2009), 1829~1834
- [11] WILLIAMSON, C. H. K., BROWN, G. L.: *A series in $1/\sqrt{Re}$ to represent the Strouhal–Reynolds number relationship of the cylinder wake*, *J. Fluids Struct.* 12 (8) 1073-1085, 1998
- [12] MAAS, W. J. P. M., RINDT, C. C. M., STEENHOVEN, van, A. A.: *The influence of heat on the 3D-transition of the von Karman vortex street*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(16), 2003
- [13] VÍT, T., REN, M., TRÁVNÍČEK, Z., MARŠÍK, F., RINDT, C. C. M.: *The influence of temperature gradient on the Strouhal–Reynolds number relationship for water and air*. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 31, 751–760, 2007
- [14] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/555-reynoldsovo-cislo>
- [15] DRÁBKOVÁ, S.: *Mechanika tekutin*, Technická univerzita Ostrava, 2007
- [16] <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/obtekani.teles.pdf>
- [17] <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9Aplav>

- [18] JÍZDNÝ, M.: *Vlastní tvary vírového proudění*, Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street
- [20] VÍT, T.: *Přenos tepla / Výměníky tepla*, výukové materiály KEZ TUL, 2010
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_model_basin
- [22] LUKÁŠEK, V.: *Experimentální výzkum obtékání zahříváného válce*, Technická univerzita v Liberci, 2017
- [23] <https://www.svetsoucastek.cz/peltieruv-clanek-hebei-tec1-12706s-p352/>
- [24] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [25] https://www.czc.cz/silentiumpc-spartan-3-lt-he1012/187660/produkt?gclid=Cj0KCQjwxN_XBRCFARIsAIfy1bXZKBRKqtuvynvGuFU7t8FvMSoeUecr5Ehgqfe_0JfrrEMD5YLHiUaApNAEALw_wcB
- [26] <http://www.teplotni-profilomery.cz/technicke-clanky/moznosti-pripojeni-termoclanku/>
- [27] WILLIAMSON, C. H. K.: *Oblique and parallel models of vortex-shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds number*. Journal of Fluid and Mechanics 206, 579 – 627, 1986
- [28] AHMED, A. M., *Forced convective heat transfer to cooled cylinder at low Reynolds numbers and with large temperature differences*, CARDE TECHNICAL REPORT 588/68, 1968
- [29] <https://customthermoelectric.com/water-block-3-0-x-3-0-x-0-85-copper.html>

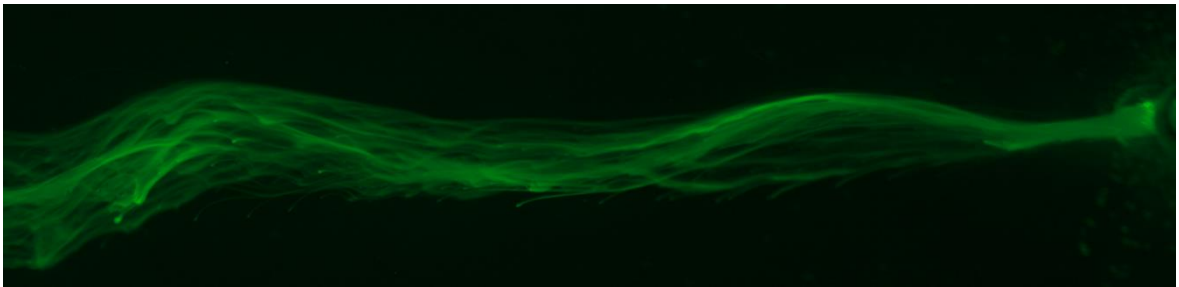
Seznam příloh

Příloha 1: Fotodokumentace vizualizace úplavu

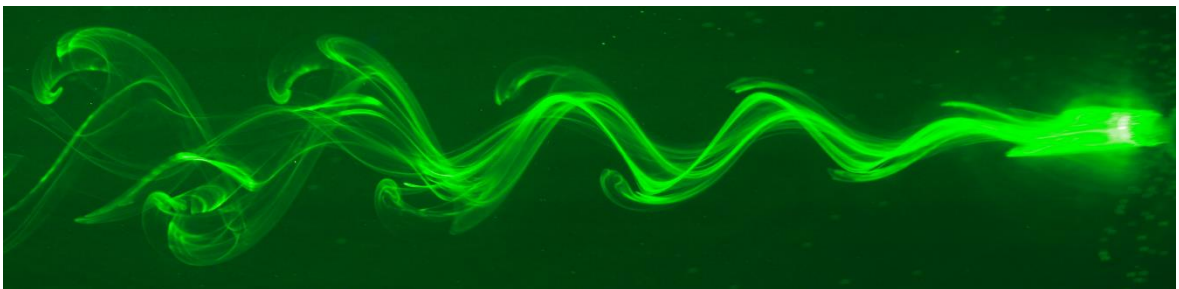
Příloha 1: Fotodokumentace vizualizace úplavu



Obr. 1.1 Úplav při $R = 30$, $T^* = 1$



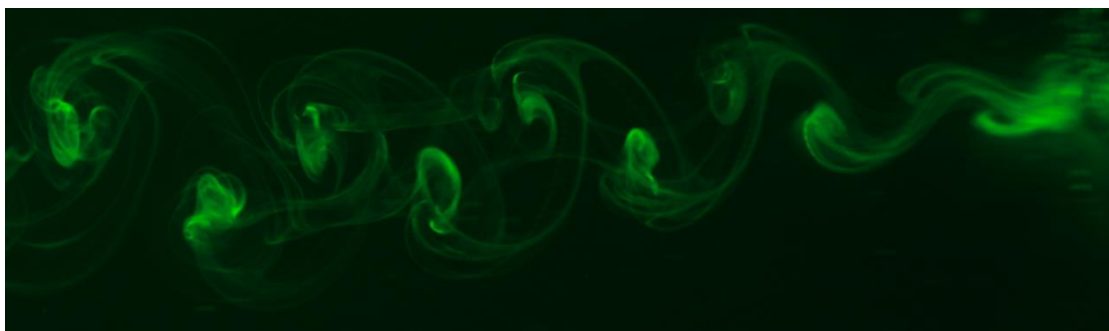
Obr. 1.2 Úplav při $R = 40$, $T^* = 1$



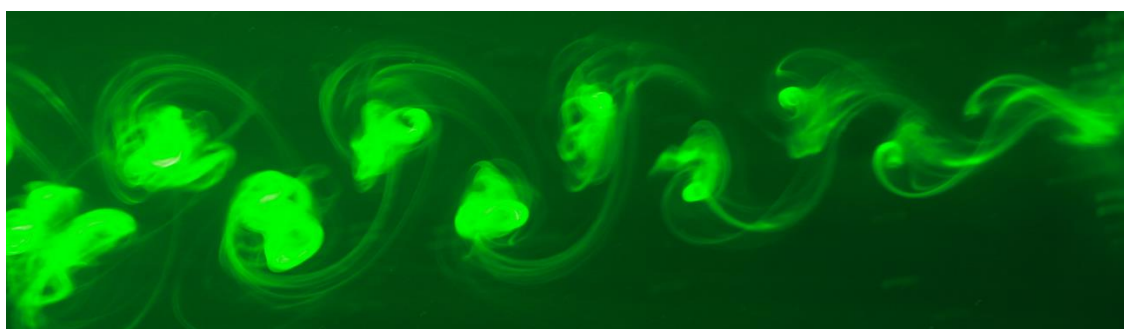
Obr. 1.3 Úplav při $R = 50$, $T^* = 1$



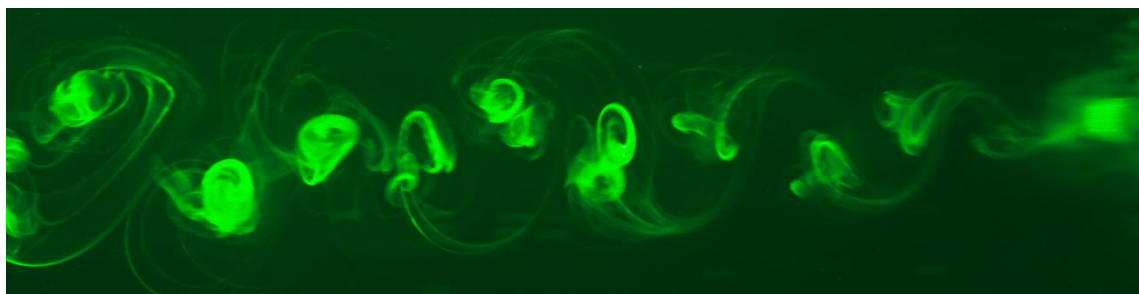
Obr. 1.4 Úplav při $R = 70$, $T^* = 1$



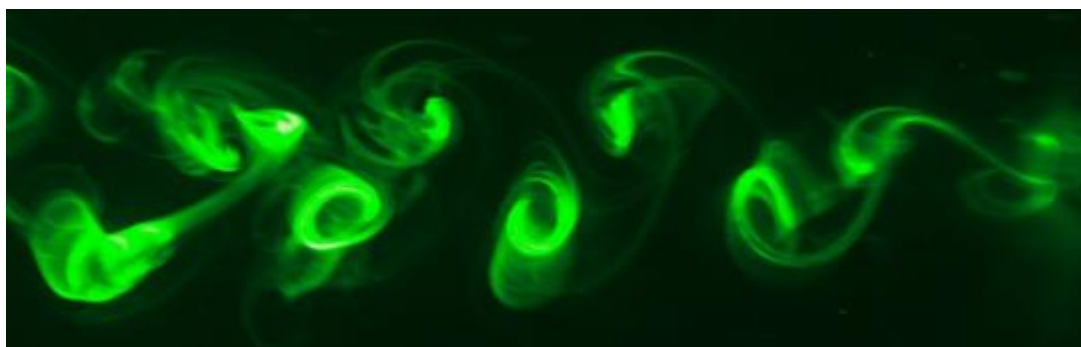
Obr. 1.5 Úplav při $Re = 90$, $T^* = 1$



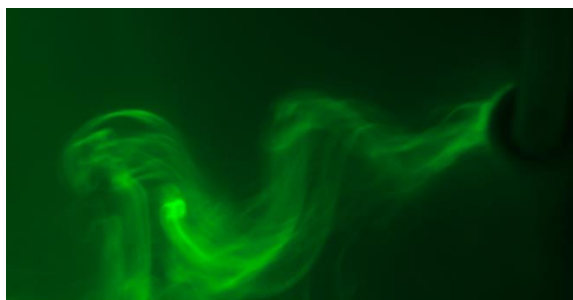
Obr. 1.6 Úplav při $Re = 110$, $T^* = 1$



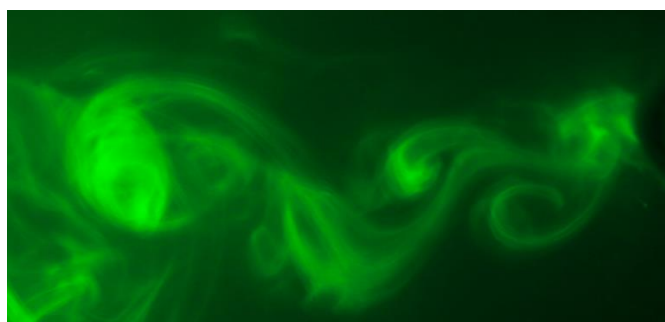
Obr. 1.7 Úplav při $Re = 130$, $T^* = 1$



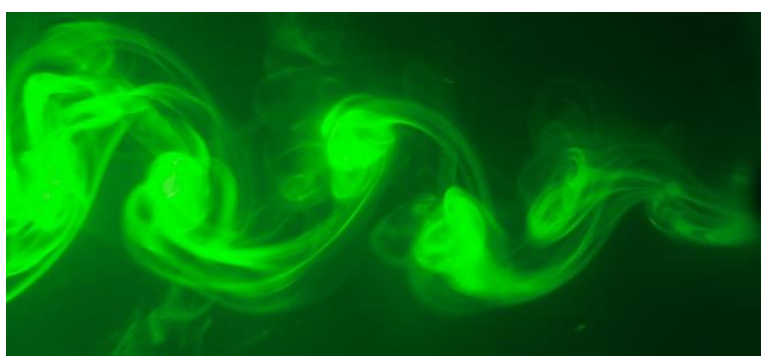
Obr. 1.8 Úplav při $Re = 150$, $T^* = 1$



Obr. 1.9 Úplav při $Re = 30$, $T^* = 0,95$



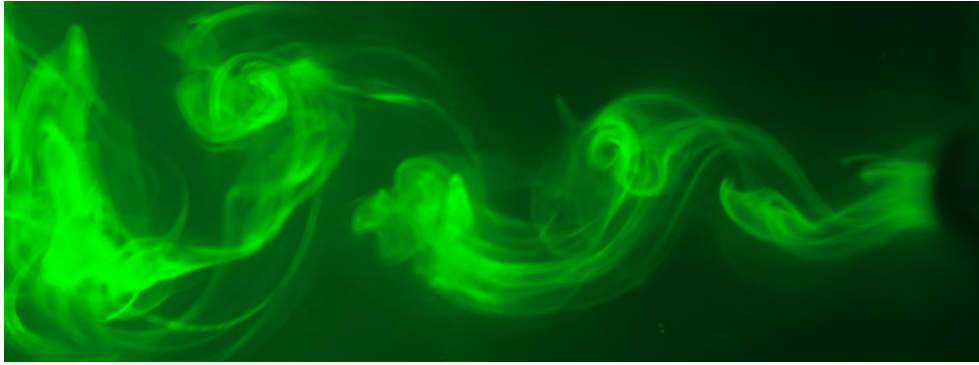
Obr. 1.10 Úplav při $Re = 40$, $T^* = 0,95$



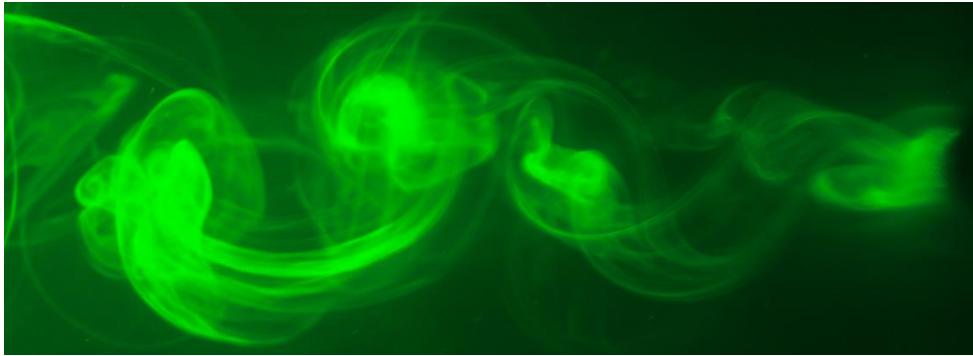
Obr. 1.11 Úplav při $Re = 50$, $T^* = 0,95$



Obr. 1.12 Úplav při $Re = 70$, $T^* = 0,95$



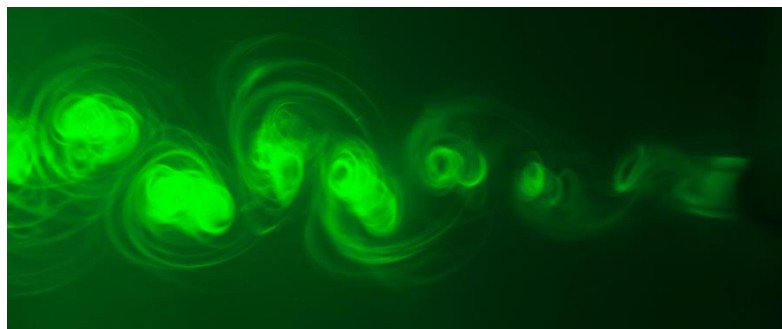
Obr. 1.13 Úplav při $Re = 90$, $T^* = 0,95$



Obr. 1.14 Úplav při $Re = 110$, $T^* = 0,95$



Obr. 1.15 Úplav při $Re = 130$, $T^* = 0,95$



Obr. 1.16 Úplav při $Re = 150$, $T^* = 0,95$