



Experimentální výzkum obtékání těles v tažné nádrži

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jaroslav Pulec**
Vedoucí práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Experimental investigation of flow around bluff bodies in a towing tank

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Jaroslav Pulec**
Supervisor: Ing. Petra Dančová, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav Pulec**
Osobní číslo: **S12000367**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Experimentální výzkum obtékání těles v tažné nádrži**
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 se zabývá experimentálním výzkumem obtékání těles v tažné nádrži.

Cíle:

1. Provedení rešerše stávajícího stavu experimentů v tažných nádržích.
2. Provedení experimentů obtékání těles metodou cínových iontů.
3. Vyhodnocení experimentů.
4. Optimalizace tvaru těles.



prof. Ing. Jaroslav Pulec
děkan

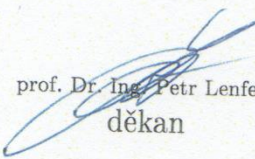
Rozsah grafických prací: **5**
Rozsah pracovní zprávy: **40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

- [1] **NOSKIEVIČ, J. a kol., 1987.** *Mechanika tekutin.* SNTL Praha.
- [2] **HONJI, H., TANEDA, S., TATASUNO, M., 1980.** *Some practical details of the electrolytic precipitation method of flow visualization.* Rep. Res. Inst. Appl. Mech. 28, p. 83.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petra Dančová, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **18. listopadu 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. února 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




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

V Liberci dne 18. listopadu 2015

Prohlášení

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

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

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-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.

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

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

Datum: 7. 7. 2016

Podpis: 

Experimentální výzkum obtékání těles v tažné nádrži

Anotace

V úvodu této bakalářské práce jsou popsány základní jevy doprovázející obtékání těles. Jsou zde vysvětleny pojmy mezní vrstva, úplav za tělesem, odtržení mezní vrstvy a popsán vznik Kármánovy vírové stezky. Následně jsou zde vysvětleny odporové síly na obtékané těleso. Další část se zabývá tažnými nádržemi jakožto zařízeními, ve kterých tyto jevy pozorují. V závěru této části je popsána tažná nádrž v laboratoři KEZ.

V následující kapitole je charakterizována využitá vizualizační metoda, tj. metoda cínových iontů, a je zde popsáno ovládání jednotlivých zařízení a práce se softwarem.

Praktická část se zabývá rozborem výsledků experimentu.

V závěru bylo provedeno zhodnocení výhod a nevýhod zvoleného řešení a celé práce.

Klíčová slova: proudění, úplav za tělesem, tažná nádrž, vizualizace, cínové ionty

Experimental investigation of the flow around bluff bodies in a towing tank

Annotation

In the introduction to this bachelor thesis, basic effects that arise during flowing around inanimate objects are described. Terms such as boundary layer, wake behind a bluff body and flow separation are explained and the origin of Kármán Vortex Street is described. After that, the thesis is focusing on explaining resistive forces to the body in flow. Another part deals with towing tanks as devices for observing these effects. At the end of this chapter, the towing tank at the laboratory KEZ is described.

The following section describes the visualisation method called tin ion visualization and control of the devices as well as the work with their software.

The practical part deals with the analysis of the photographs created during the experiment.

The conclusion is composed of an assessment of the advantages and disadvantages of the chosen solution and whole work carried out in this bachelor thesis.

Keywords: flow, wake behind a bluff body, towing tank, visualization, tin ions

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucí práce Ing. Petře Dančové, Ph.D. za pomoc s touto prací, za cenné rady a za vstřícnost během konzultací.

Poděkování patří i mé rodině a přátelům za podporu a trpělivost.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	9
Úvod	10
1 Obtékání těles.....	11
1.1 Mezní vrstva.....	11
1.2 Typy proudění	12
1.2.1 Laminární proudění	12
1.2.2 Turbulentní proudění	13
1.3 Odtržení mezní vrstvy	13
1.4 Úplav.....	14
1.5 Kármánova vírová stezka	14
1.6 Odpor těles	15
2 Tažné nádrže	17
2.1 Velké tažné nádrže	17
2.2 Malé tažné nádrže.....	18
2.3 Tažná nádrž KEZ	18
3 Vizualizace obtékání tělesa a použitá zařízení.....	20
3.1 Metoda cínových iontů	20
3.1.1 Elektrolyt.....	21
3.1.2 Anoda	21
3.1.3 Katoda	21
3.2 Laser.....	22
3.3 Snímací zařízení	22
3.4 Rám pro připevnění tělesa	22
3.5 Ovládací software EPOS Studio	23
4 Paralelní odtrhávání.....	27
4.1 Konstrukce	27
4.2 Podmínky během experimentu	28
4.3 Výsledky	29
5 Obtékání různých objektů	33
5.1 Výsledky	33
5.2 Optimalizace tvaru tělesa	40
Závěr.....	41
Seznam literatury	42
Seznam příloh	43

Seznam zkratek a symbolů

symbol	jednotka	význam
standardní symboly		
F_x	N	odporová síla
F_y	N	vztlaková síla
F_z	N	boční síla
M_x	$N \cdot m$	klopivý moment
M_y	$N \cdot m$	klonivý moment
M_z	$N \cdot m$	zatačivý moment
v_0	$m \cdot s^{-1}$	rychlost u stěny tělesa
Re	1	Reynoldsovo číslo
u	$m \cdot s^{-1}$	rychlost proudění
d_{CH}	m	charakteristický průměr
c_x	1	součinitel třecího odporu
S	m^2	plocha příčného průřezu
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	hustota
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost tělesa
F	N	celkový odpor tělesa
c	1	součinitel celkového odporu
d	m	průměr
řecké symboly		
δ	m	tloušťka mezní vrstvy
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita
τ	Pa	tečné napětí

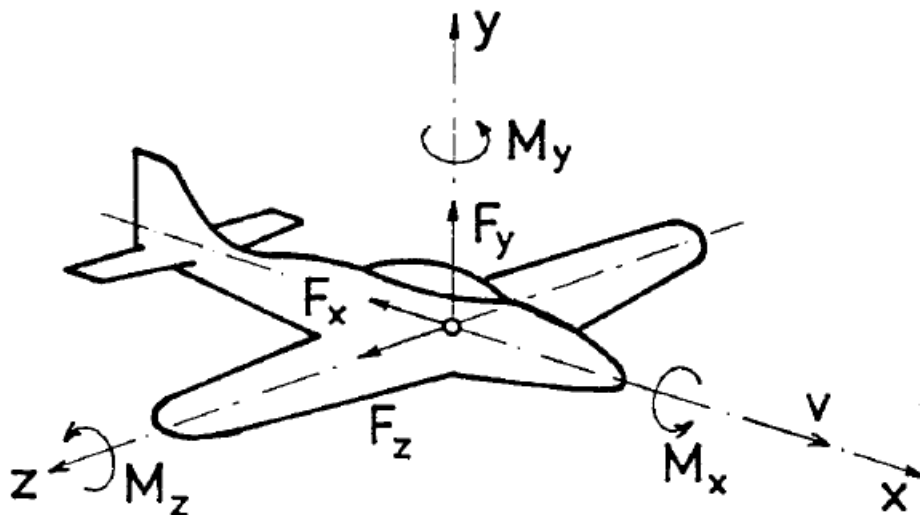
Úvod

Při obtékání těles kapalinou vzniká úplav. Jeho vlastnosti závisí na mnoha kritériích, ať už je to tvar tělesa, vlastnosti kapaliny, či rychlost proudění. Ke sledování úplavu slouží tažné nádrže, ve kterých se proudění pomocí různých metod vizualizuje.

Jednou z těchto metod je metoda cínových iontů, která pomocí elektrolýzy a světelného paprsku vytváří viditelnou oblast v proudící kapalině. Této metody je v této bakalářské práci využito ke zviditelnění úplavu vznikajícího za dvojicí různě vzdálených rovnoběžně orientovaných válců.

1 Obtékání těles

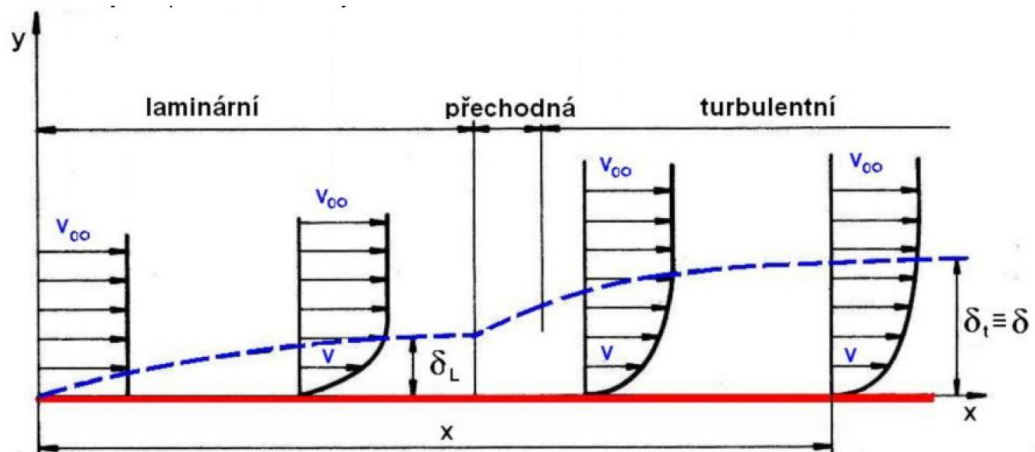
Na obtékaná tělesa reálnou, tj. tekutinou s vnitřním třením (viskozitou), působí vlivem proudění síly a momenty, které lze obecně rozdělit do tří složek. Působícími silami jsou odpor F_x , vztlak F_y a boční síla F_z . Mezi momenty patří moment klopivý M_z , klonivý M_x a zatáčivý M_y . Velikost jednotlivých složek závisí na tvaru těles, poloze vůči směru proudění, na fyzikálních vlastnostech tekutiny (hustota, viskozita) a podmínkách proudění (rychlost). Je-li například obtékáno symetrické těleso, budou některé složky nulové [1].



Obr. 1.1 Síly a momenty působící na obtékané těleso [2]

1.1 Mezní vrstva

Mezní vrstva vzniká vlivem viskozity v blízkosti obtékaného tělesa. Tento jev lze nejlépe pozorovat při obtékání rovinné desky umístěné rovnoběžně v proudu tekutiny. Částice tekutiny ulpívají na stěnách tělesa ($v_0 = 0$) a vzdálenější částice jsou pak brzděny vlivem tření mezi částicemi. Část jejich kinetické energie je přeměňována na teplo. Rychlost směrem od povrchu tělesa postupně narůstá až do hodnoty rychlosti proudu před tělesem. Oblast, kde existuje gradient rychlosti, tedy platí nerovnost $\frac{\partial v}{\partial y} \neq 0$, se nazývá mezní vrstva, přičemž tento pojem byl zaveden Ludwigem Prandtlm [3]. Tloušťka mezní vrstvy se označuje jako δ .



Obr. 1.2 Mezní vrstva na desce [3]

1.2 Typy proudění

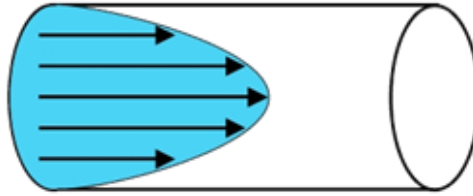
Aby bylo možné popsat typ proudění, bylo zavedeno bezrozměrné, tzv. Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{u d_{CH}}{\nu}, \quad (1.1)$$

kde u ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost proudění, d_{CH} (m) je charakteristický průměr trubice a ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) je kinematická viskozita. Hodnota Re určuje, zda je dané proudění laminární, nebo turbulentní. Hranice mezi těmito stavy není snadno definovatelná – mezi nimi se nachází přechodová oblast. Jako hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním v hladkém kruhovém potrubí bývá uváděna kritická hodnota $Re = 2300$. Proudění s hodnotou $Re < 2300$ je označováno jako laminární, s hodnotou $Re > 2300$ jako turbulentní.

1.2.1 Laminární proudění

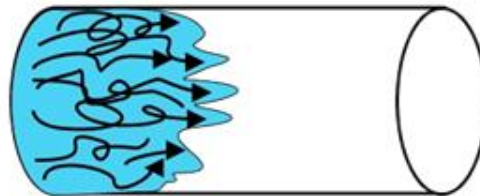
Laminární proudění je takové proudění, jehož proudnice jsou rovnoběžné a vzájemně se nemísí. Částice se pohybují ve vrstvách a navzájem se nepromíchávají. Při proudění tekutiny úzkou trubicí se však jednotlivé vrstvy nepohybují stejnou rychlostí. Vlivem viskozity se nejpomaleji pohybují částice u stěny trubice, zatímco směrem do středu rychlostní profil narůstá až do její maximální hodnoty v ose trubice [4].



Obr. 1.3 Laminární proudění [5]

1.2.2 Turbulentní proudění

Částice při turbulentním proudění procházejí různými vrstvami, čímž dochází k promíchávání vrstev. Částice na rozdíl od laminárního proudění nevykonávají pouze posuvný, ale i vlastní složitý pohyb, který vede ke vzniku vírů. Rychlost jednotlivých částic se neustále a nepravidelně mění, proudění je tedy nestacionární [6].

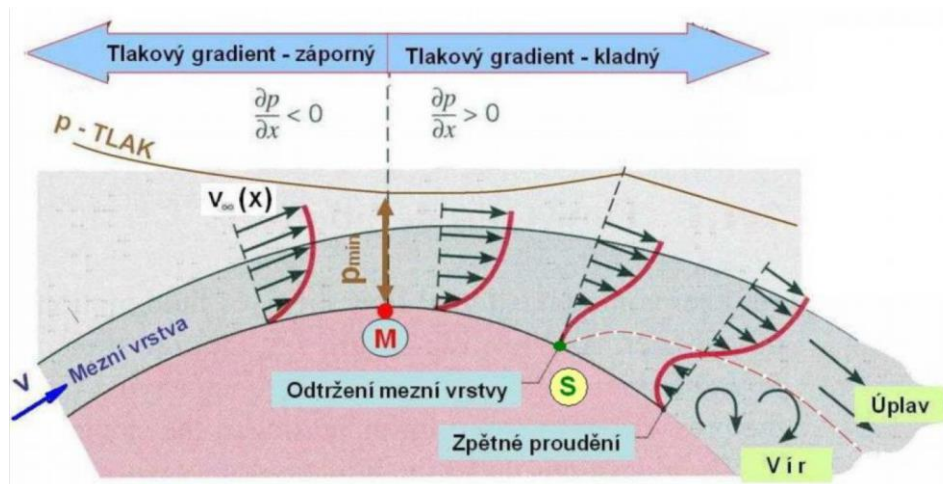


Obr. 1.4 Turbulentní proudění [7]

1.3 Održení mezní vrstvy

Proudí-li tekutina do míst s vyšším tlakem (zadní část koule, válce apod.), dochází vlivem třecích a tlakových sil ke zpomalování tekutiny, až nastane okamžik, kdy je její rychlost nulová. V tomto místě se v rychlostním profilu vytvoří inflexní bod a nastane tzv. odtržení mezní vrstvy. Za tímto místem vznikají u stěny tělesa víry.

Je-li proudění turbulentní, mají částice tekutiny u stěny větší kinetickou energii, proto dochází k odtržení mezní vrstvy později než v laminárním [1].



Obr. 1.5 Održení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [3]

1.4 Úplav

Úplav se vytváří za obtékaným tělesem. Je-li těleso obtékáno bez odtržení mezní vrstvy, je úplav tvořen částicemi, které prošly mezní vrstvou. Tyto zpomalené částice putují podél stěn za těleso, kde se opět spojí v jeden proud. S rostoucí vzdáleností od tělesa se úplav rozšiřuje a rychlostní profil se vyrovnává. Úplav v turbulentním proudění se od laminárního liší pouze vyšší rychlostí rozšiřování a vyrovnání rychlostního profilu.

V případě obtékání s odtržením se za tělesem vytváří podtlak, který se pozvolna vyrovnává na hodnotu tlaku ve volném proudu. V úplavu se vytvářejí víry, které jsou odnášeny s proudem kapaliny. Při turbulentním obtékání těles s odtržením přechází mezní vrstva z laminární do turbulentní a víry se tvoří zcela nepravidelně. Naopak při laminárním dochází k pravidelné tvorbě vírů [3].

1.5 Kármánova vírová stezka

Kármánova vírová stezka je příkladem laminárního obtékání těles s odtržením mezní vrstvy. U oblých těles se mezní vrstva po stranách odtrhává střídavě a vznikají specifické obrazce, tzv. Kármánova vírová stezka. K tomuto jevu dochází při laminárním proudění ($Re = 40 \div 500$).



Obr. 1.6 Kármánova stezka za ostrovem poblíž Kalifornského poloostrova [8]

Na tento na první pohled neškodný jev je nutno brát zřetel při konstrukci výškových budov a mostů. Může dojít k rezonanci frekvence odtrhávání vírů s vlastní frekvencí stavby a následnému zřícení (most Tacoma Narrows ve státě Washington – 1940). Tento jev je dále důsledkem tzv. Strouhalova efektu, kdy dochází ke „zpívání“ telefonních drátů [9], [10].

1.6 Odpor těles

Vlivem viskozity je vůči pohybu tělesa kladen odpor, který je možné rozdělit na odpor třecí a tlakový.

Třecí odpor je dán integrálem třecích sil na povrchu tělesa

$$F_x = \int \tau dx, \quad (\text{N}) \quad (1.2)$$

kde τ (Pa) je tečné napětí kapaliny na stěně, přičemž integrací vzniká vztah [1]

$$F_x = \frac{1}{2} c_x S \rho v^2, \quad (\text{N}) \quad (1.3)$$

kde c_x (1) je součinitel třecího odporu charakteristický pro daný tvar tělesa, S (m^2) je plocha příčného průřezu tělesa, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota kapaliny a v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost pohybu tělesa vůči kapalině. Tento odpor je typický pro obtékání desky paralelním proudem.

Tlakový odpor je způsobený nesymetrickým rozložením tlaku na povrchu tělesa. Je dominantní pro obtékání desky orientované kolmo k proudu, kde před tělesem vzniká přetlak a za tělesem podtlak.

U složitějších tvarů obvykle nelze jednotlivé složky odporu určit odděleně, proto se zavádí obdobný vztah pro celkový odpor tělesa

$$F = \frac{1}{2} c S \rho v^2, \quad (\text{N}) \quad (1.4)$$

kde c (1) je součinitel celkového odporu (např. pro válec $c = 0,5$) [1].

2 Tažné nádrže

Tažná nádrž slouží k pozorování hydrodynamických jevů. Obvykle je tvořena nádrží naplněnou potřebnou kapalinou, která je opatřena tažným mechanismem tvořeným elektromotorem, lineárním vedením s mechanickým převodem (řemen, řetěz apod.). Elektromotor je řízen počítačem. K mechanismu je připevněna konstrukce, která nese zkoumané těleso přes celou délku nádrže. Pro různé aplikace závisející na velikosti zkoumaného objektu a požadované rychlosti tažení existují nádrže různých dispozic.

2.1 Velké tažné nádrže

Velikost velkých tažných nádrží dosahuje délek v desítkách až stovkách metrů. Nejčastěji se používají pro výzkum lodí a lodních šroubů. Ve světě se nachází několik institucí zabývajících se podobným výzkumem.

Jmenovitě je to např. **Námořní výzkumný institut Nizozemí** [11], který disponuje tažnou nádrží s délkou 252 m, šířkou 10,5 m a hloubkou 5,5 m. Nádrž je využívána k optimalizaci odolnosti a pohonů pro lodní návrhy. Další tažná nádrž se vyskytuje v nezávislém veřejném centru pro výzkum **CEHIPAR** (Kanál hydraulických experimentů v El Pardo) ve Španělsku [12]. Jejich nádrž je dlouhá 320 m, široká 12,5 m a hluboká 6,5 m. Tažný vozík umožňuje tažení rychlostí až 10 m/s.



Obr. 2.1 Velká tažná nádrž v El Pardo [13]

Třetím velkým zástupcem je **Národní rada pro výzkum v St. John's, Newfoundland, Kanada** [14]. Tato instituce poskytuje komerční služby v posuzování výkonu v lodních podmínkách pro mezinárodní trh. Provozují několik nádrží o délkách 200 m, 58 m a 90 m. Poslední jmenovaná slouží k tažení těles napříč vrstvou ledu a simuluje tak arktické podmínky. Je to nejdelší nádrž podobného typu na světě.

2.2 Malé tažné nádrže

Obvyklá délka malých tažných nádrží je 5 až 10 metrů. Rychlost tažení bývá v řádech centimetrů za sekundu. Bývají vyrobeny z čirého skla a umožňují vizualizovat úplav a vírové odtrhávání struktur za pomoci různých vizualizačních metod.

2.3 Tažná nádrž KEZ

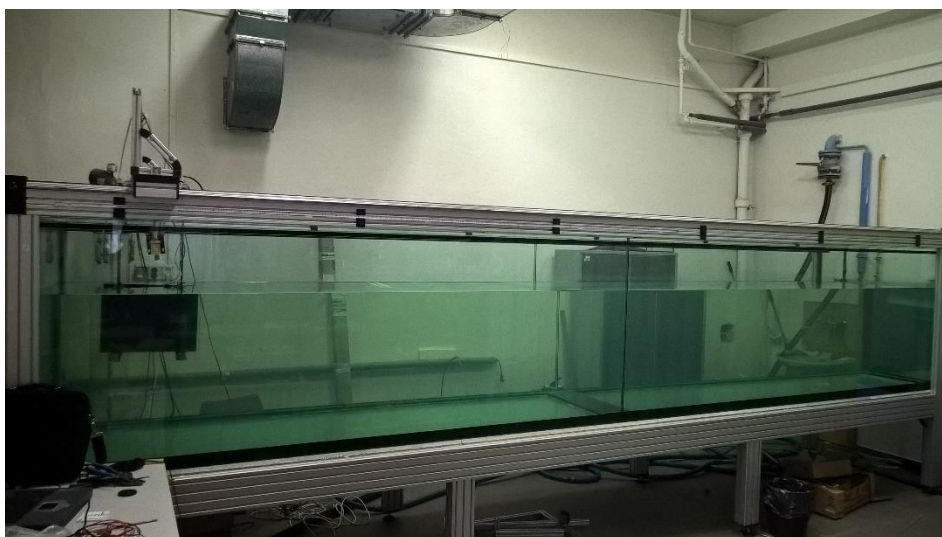
Tažná nádrž v laboratoři byla zprovozněna v roce 2008. Je dlouhá 5,5 m a široká i hluboká 1 m. Řadí se tedy mezi malé nádrže. Umožňuje rychlost tažení až 10 cm/s a je v ní možné sledovat objekt až o hmotnosti 50 kg.

Konstrukce je tvořena hliníkovými profily. Boční stěny jsou tvořeny dvěma samonosnými skly o tloušťce 15 mm, mezi něž je vlepena bezpečnostní fólie o tloušťce 2 mm. Nádrž stojí na osmi nohách opatřených stavitelnými šrouby.

Pojezdový mechanismus se skládá z lineárního vedení a samotné konstrukce pojezdu. Pomocí různých upínacích prvků je k němu možné připevnit sledovaný předmět.

Lineární vedení slouží k posuvu pojezdu. Pro zajištění plynulého pohybu, je vedení tvořeno dvěma ozubenými řemeny na stranách nádrže. Oba řemeny jsou propojeny synchronizačním hřídelem, který zajišťuje synchronizaci obou pojezdů. Pohon je zajištěn adaptačním hřídelí, ke které může být přes spojku připojen jakýkoliv elektromotor.

Tažná nádrž je osazena krokovým elektromotorem **RE35** o výkonu 90 W a řídicí jednotkou **EPOS 70/10**. Tato zařízení spolu s ovládacím softwarem **Epos Studio** vyvinula společnost Maxon Motor.



Obr. 2.2 Tažná nádrž v laboratoři KEZ

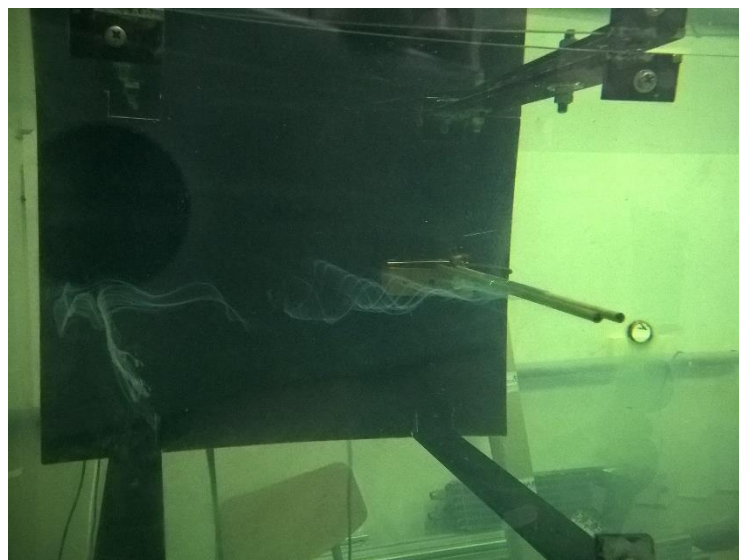
3 Vizualizace obtékání tělesa a použitá zařízení

Nejčastějšími způsoby vizualizace proudění jsou metody využívající zavádění částic, které mají jiné optické vlastnosti než pozorovaná kapalina [15]. Zaváděné částice mohou mít různé skupenství, ale svými vlastnostmi by neměly narušovat pozorované proudění [16]. Je možné využívat souvislých vláken zaváděných částic, či celé souvislé oblasti. Tyto metody lze rozdělit do čtyř základních skupin: zviditelnění proudění pomocí barviva, pomocí směšování různobarevných kapalin, pomocí elektrolýzy nebo pomocí chemické reakce s účinkem světla.

3.1 Metoda cínových iontů

Tato vizualizační metoda, použitá pro experimenty provedené v této bakalářské práci, patří mezi metody zviditelnění proudění pomocí elektrolýzy.

Metoda využívá dvou elektrod. Katoda je tvořena měděným plíškem umístěným ve volné kapalině a anoda, na které dochází k oxidaci, je tvořena cínovou fólií, kterou je zkoumané těleso obaleno. Elektrolyt tvoří roztok vody z vodovodního řadu s kuchyňskou solí, která zvyšuje jeho vodivost. Pomocí elektrod za působení stejnosměrného proudu se vlivem elektrolytického rozpadu kovů vytváří souvislá oblast cínových iontů neboli elektrochemický kouř. Předchozími experimenty [17] bylo zjištěno ideální napětí do 15 V a proud o maximální hodnotě 0,5 A.



Obr. 3.1 Elektrochemický kouř

3.1.1 Elektrolyt

Elektrolyty jsou roztoky kyselin, zásad a solí, které vedou elektrický proud [18]. Částice zprostředkující jeho vedení jsou kationty a anionty a vznikají rozpadem, tzv. elektrolytickou disociací – ionizací.

Pro experimenty provedené v této práci je elektrolyt tvořen roztokem vody z vodovodu s kuchyňskou solí v poměru 1 kg soli na 1 m³ vody. Dochází-li k průchodu elektrického proudu tímto roztokem, nastává disociace vody podle následujícího chemického vzorce:



Kationt se následně vybíjí na anodě za vzniku jemných bublinek. Z cínu se při průchodu proudu uvolňují elektrony a vzniklý kationt cínu reaguje s aniontem OH⁻, jenž v kapalině tvoří hydroxid cínatý, který tvoří potřebný elektrochemický kouř. Reakce jsou pak popsány vzorci (3.2) a (3.3):



3.1.2 Anoda

Anoda je v této práci tvořena fólií z čistého cínu aplikovanou na povrch tělesa. Lze také použít cínové pájecí dráty natažené na rámu před sledovaným objektem. Tento způsob je však nevhodný zejména z důvodu nedostatečné pevnosti cínu. Cín se snadno deformuje, což může vést i k jeho prasknutí. Vzhledem k nižší tuhosti použitého rámu je tedy obtížné řadu cínových strun řádně napnout.

3.1.3 Katoda

Katoda je tvořena mědí, která je umístěna ve formě plíšku no straně upevňovacího rámu.

Z důvodu výroby dostatečného množství kouře je nutno katodu umístit v dostatečné vzdálenosti od anody, ale zároveň nesmí být narušen samotný proud bublinkami za katodou vznikajícími. Větší vodivosti lze také dosáhnout přidáním soli či zvětšením plochy katody.

3.2 Laser

Vzniklý elektrochemický kouř je šedivý, a proto není dostatečně viditelný. Kýženého efektu lze dosáhnout prosvícením proudu silným zdrojem všesměrového světla pronikajícího úzkou šterbinou nebo v dnešní době častěji používaným laserem.

Pro účely experimentů popsaných v této bakalářské práci byl použit kontinuální laser CNI MGL-III-532 o výkonu 200 mW vytvářející koherentní světelný paprsek o vlnové délce 532 nm. Ten bylo nutné upravit pomocí válcové čočky tak, aby vznikla světelná rovina, tzv. laserový řez, která nasvítí potřebný úsek proudu kapaliny. Světelný zdroj byl umístěn na rám nad sledovaný objekt tak, aby putoval spolu s celou konstrukcí, a tím bylo docíleno možnosti pozorovat proudění napříč celou tažnou nádrží. Takto vytvořený laserový řez při řádném zatemnění místnosti již disponuje dostatečným kontrastem a je možné ho zaznamenat na snímací zařízení.

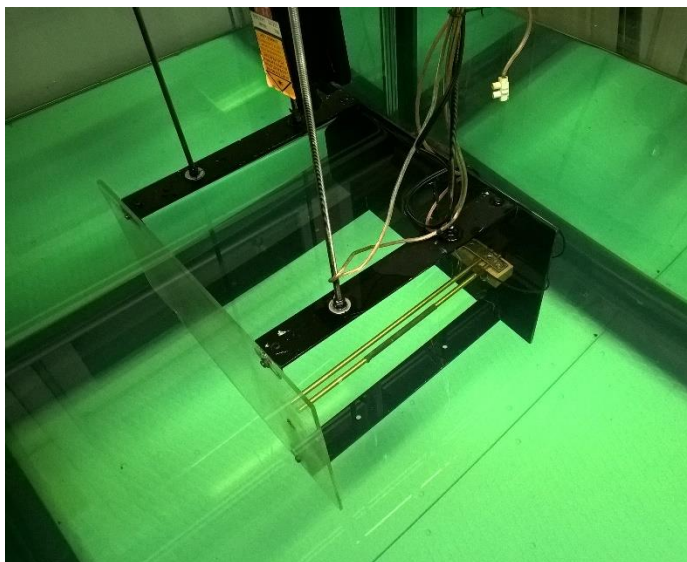
Laser je zapojen ke generátoru Tektronix AFG 3102, který je nastaven pro generování sinusového signálu o frekvenci 200 Hz v rozmezí 1 mV až 1 V.

3.3 Snímací zařízení

Pro zaznamenání experimentu byl použit profesionální fotoaparát Canon EOS 40D s manuálním nastavením.

3.4 Rám pro připevnění tělesa

Pro upevnění tělesa, laseru a elektrod byl použit rám vytvořený v minulých letech pro podobný experiment [17]. Čelní strana rámu je z důvodu zaznamenávání výsledků tvořena z čirého plexiskla, zadní pak z plexiskla neprůhledného. Obě strany jsou spojeny hliníkovými profily, které jsou z důvodů eliminace případných odlesků natřeny na černo. V přední části je mezi plexiskla umístěno pozorované těleso obalené cínovou fólií a na zadní část neprůhledného plexiskla je připevněn měděný plíšek jako katoda. Tato konstrukce, která vymezuje pozorovaný objem kapaliny, je připevněna čtyřmi dlouhými závitovými tyčemi ke konstrukci pojezdového mechanismu, a je součástí základní výbavy tažné nádrže v laboratoři KEZ.



Obr. 3.2 Rám vymezující pozorovaný objem kapaliny

3.5 Ovládací software EPOS Studio

Software je vytvořen jako univerzální pro všechny řídicí jednotky EPOS. Pomocí něj probíhá komunikace mezi uživatelem a řídicí jednotkou. Spárování probíhá podle následujících bodů [17]:

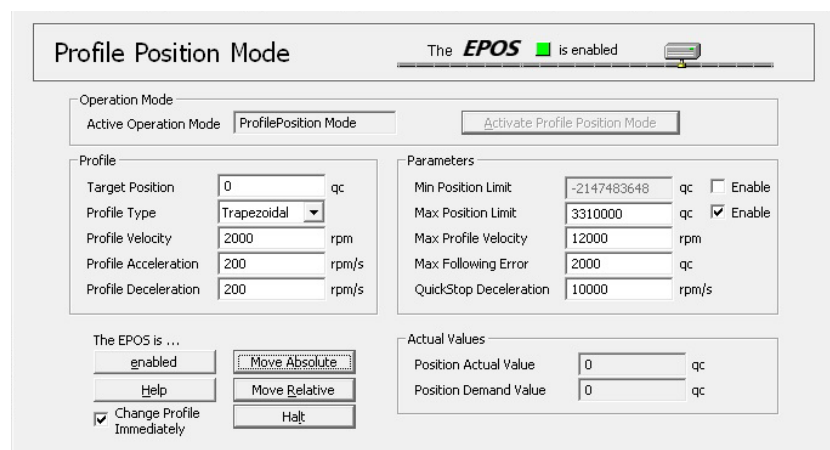
- a) Nejprve je nutné zapojit řídicí jednotku pomocí adaptéru do zásuvky.
- b) Spuštění samotného softwaru:
SW je možné stáhnout z webových stránek podpory výrobce [19]. Software z neznámých příčin nespolupracuje s operačními systémy Windows 7 a novějšími, přestože výrobce udává jejich kompatibilitu. Je nutné, aby řídicí jednotka při spuštění softwaru již běžela, jinak nedojde ke správnému spárování.
- c) Objeví se nabídka tvorby nového řídicího programu. Tu je možné ignorovat, protože je už vytvořen. Nabídku lze tedy zavřít. Na horní liště označíme nabídku „File“ a dále stiskneme „Open“. Nyní lze vybrat zvolený program – v případě této BP „TOWTANK“ a program se spustí.
- d) Dále probíhá samotné párování s řídicí jednotkou. V levé části v oblasti komunikačního stromu kliknout pravým tlačítkem myši na položku

„RS232“, dále na „Properties“ a u položky „Port“ vybrat položku USB rozhraní, čili „COM#“. Potvrdit tlačítkem OK.

- e) Pravým tlačítkem myši kliknout opět na „RS232“ a potvrdit kliknutím na „Connect“. Nastane-li chyba, je to pravděpodobně způsobeno redukcí ze starého R232 konektoru, který už se dnes nepoužívá, na novější USB rozhraní. Chyba však nemá vliv na činnost, stačí ji pouze vymazat z rejstříku umístěného ve spodní části obrazovky. Chybu je nutné označit pravým tlačítkem myši a potvrdit volbu „Clear all entries“.

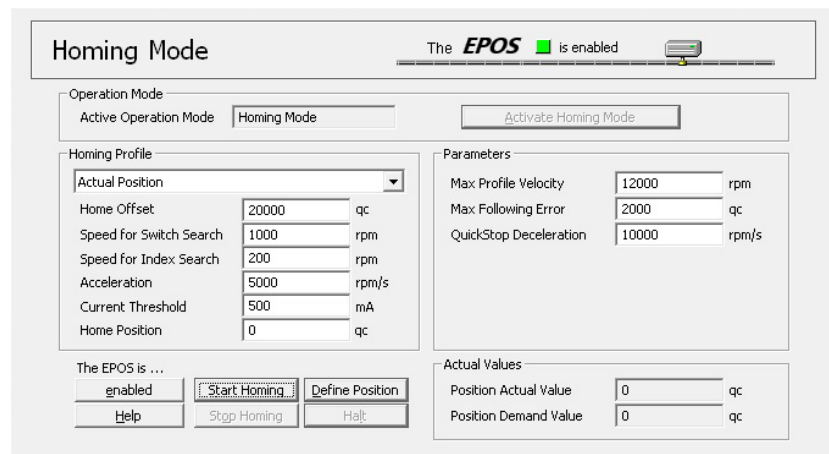
Následně bude popsáno samotné ovládání softwaru. Program má několik operačních módů, které se vzájemně liší typem řízení rychlosti pojezdu. Pro tuto BP je využito třech módů, přičemž se každý musí samostatně aktivovat stiskem tlačítka „Activate -jméno módu-“.

Prvním módem je „Profile position mode“. Ten definuje primárně polohu lóže lineárního vedení. Dále je možné nastavit rychlost pojezdu, jeho zrychlení a zpomalování do zvoleného bodu trajektorie.



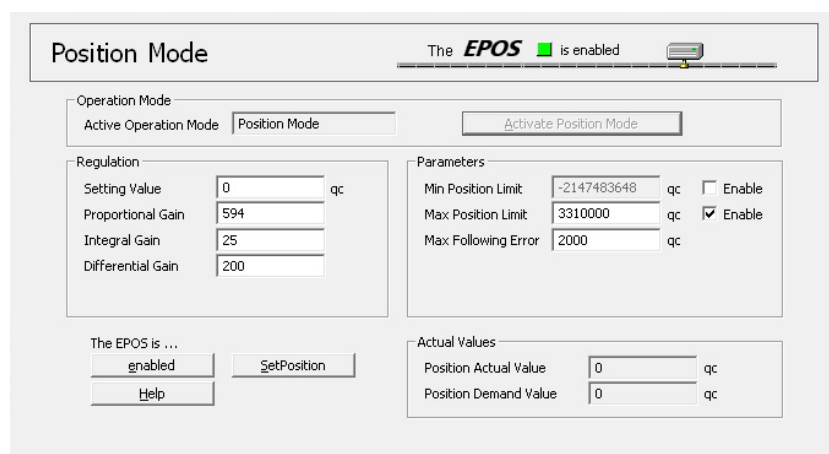
Obr. 3.3 Panel Profile position mode

„Homing mode“ se používá k nalezení základní referenční pozice pojezdu. Po nalezení a uložení tohoto bodu se referenční systém vynuluje.



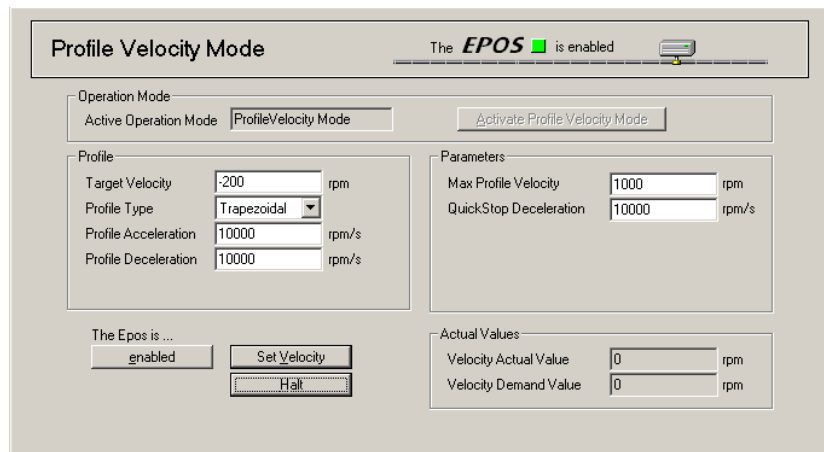
Obr. 3.4 Panel Homing mode

„*Position mode*“ je mód určený k nastavení pouze hodnoty polohy pojezdu a maximální rychlosti, které může dosáhnout. Zbylé hodnoty si program spočítá sám a nelze je tak nastavit.



Obr. 3.5 Panel Position mode

„*Profile velocity mode*“ slouží k nastavení cílové rychlosti posuvu, respektive otáček motoru za minutu. Dále je možné nastavit hodnotu zrychlení a zpomalení při rozjezdu a dojezdu. Tento mód vyhovuje aplikaci v této bakalářské práci. Z důvodu minimalizace chvění nosné konstrukce a s tím spojeným nežádoucím ovlivňováním kapaliny je vhodné nastavovat vyšší hodnoty zrychlení a zpomalení (1000 rpm/s a více).



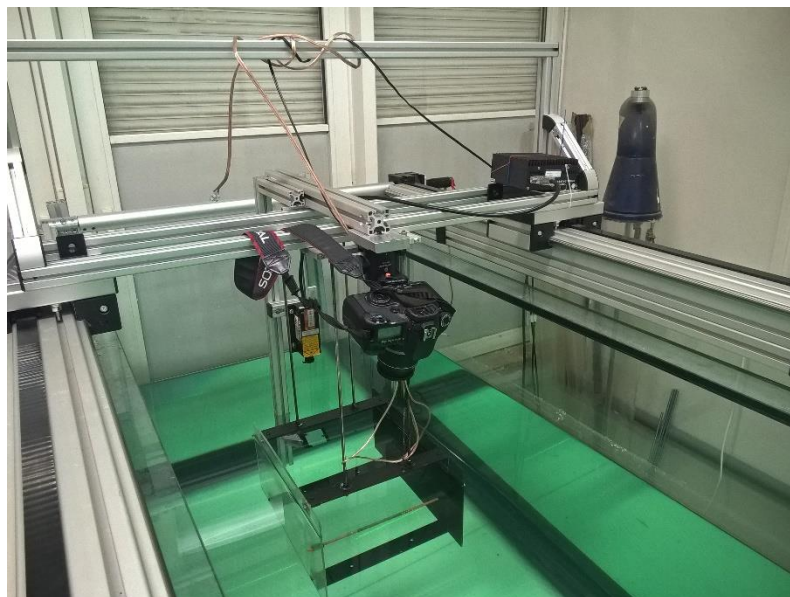
Obr. 3.6 Panel Profile velocity mode

4 Paralelní odtrhávání

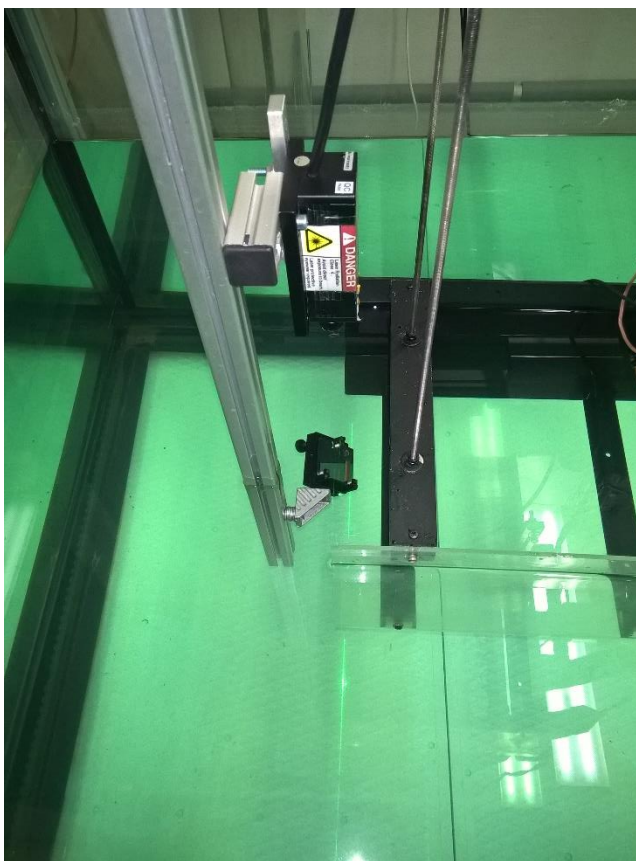
Úplav za pozorovaným objektem může být negativně ovlivněn nežádoucím prouděním způsobeným nevhodně sestavenou nosnou konstrukcí či jejím chvěním. Z tohoto důvodu je důležité, aby byla konstrukce dostatečně pevná a zároveň aby byl pozorovaný objem vymezený konstrukcí co největší vůči pozorovanému tělesu. U vzniklého laserového řezu je tedy nutné zajistit, aby reprezentoval obtékání podél celé délky tělesa. Pro tyto účely byla sestavena konstrukce, která umožňuje tento jev pozorovat.

4.1 Konstrukce

Konstrukce je tvořena přídavnými hliníkovými profily. Rám ve tvaru obráceného písmene „L“ je připevněn ke stávající nosné konstrukci. Na svislém rameni je připevněn laser s válcovou čočkou, který vytváří světelnou rovinu orientovanou kolmo k dlouhé stěně nádrže směřující svisle dolů a která je nasměrována pomocí nastavitelného zrcátka do vodorovného směru tak, aby vytvářela na zadní straně pozorovaného objektu vodorovnou světelnou čáru. Na vodorovném rameni rámu je připevněna stativová hlava s fotoaparátem, který vytváří snímky vzniklého úplavu ze shora.



Obr. 4.1 Přídavná konstrukce s fotoaparátem, laserem, zrcátkem a konstrukcí nosící pozorované těleso ve formě válce připevněného mezi plexiskly



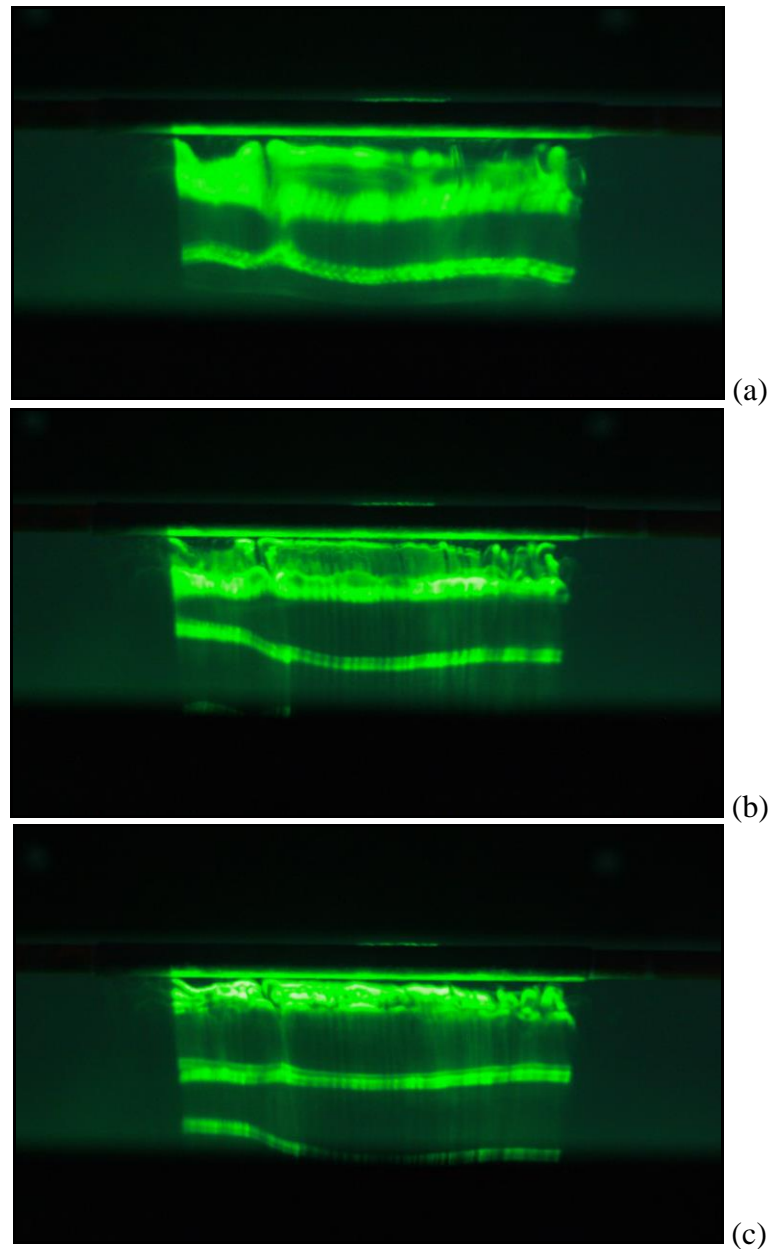
Obr. 4.2 Rameno nesoucí laser s nastavitelným zrcátkem

4.2 Podmínky během experimentu

Experiment probíhal s mosazným válcem o průměru 6,1 mm, na němž byla aplikována cínová fólie o tloušťce 0,3 mm, která tvořila anodu. Pozorování bylo provedeno při teplotě vody 23 °C (tato teplota odpovídala také teplotě v laboratoři) a v rozmezí $Re = (50 \div 130)$. Fotoaparát byl nastaven v režimu manuální volby doby expozice, přičemž bylo využito nejnižší úrovně, čili 0,3 s z důvodu fotografování pohybujícího se úplavu vůči fotoaparátu. Citlivost byla po provedení několika pokusných pozorování nastavena na 1250. Clona se u zvoleného programu nastavuje automaticky dle intenzity světla. Během experimentu bylo zjištěno, že standardně dodávaný objektiv nedisponuje dostatečnou světelností, načež byl vyměněn za kratší, pro tento experiment vhodnější. Ukázka fotografií vytvořených pomocí původního objektivu se nachází v příloze 2.

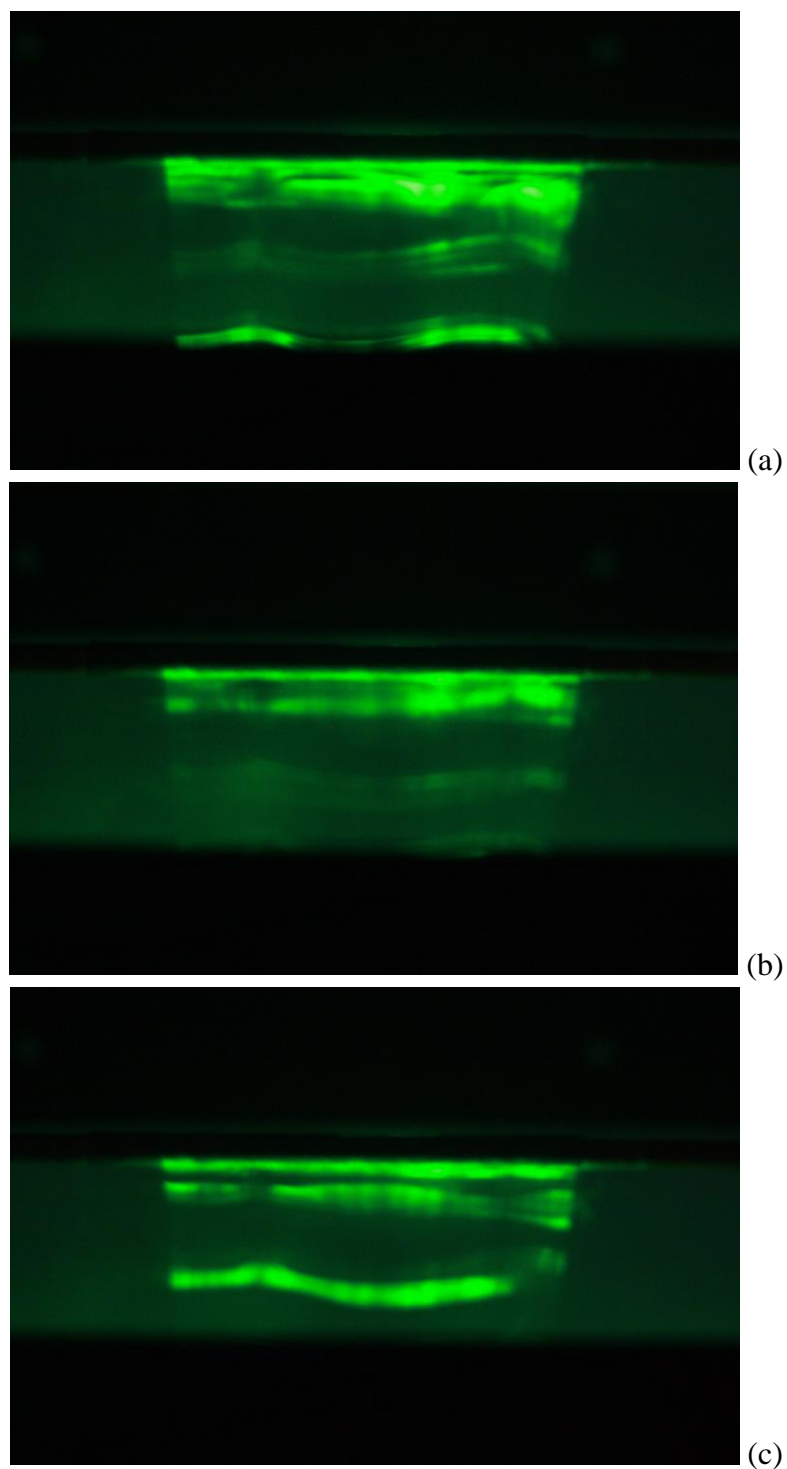
4.3 Výsledky

Při $Re = 50$ (obr. 4.3) bylo pozorováno relativně rovnoměrné odtrhávání mezní vrstvy naznačující minimální chvění konstrukce a zanedbatelné ovlivňování proudění okolními vlivy.



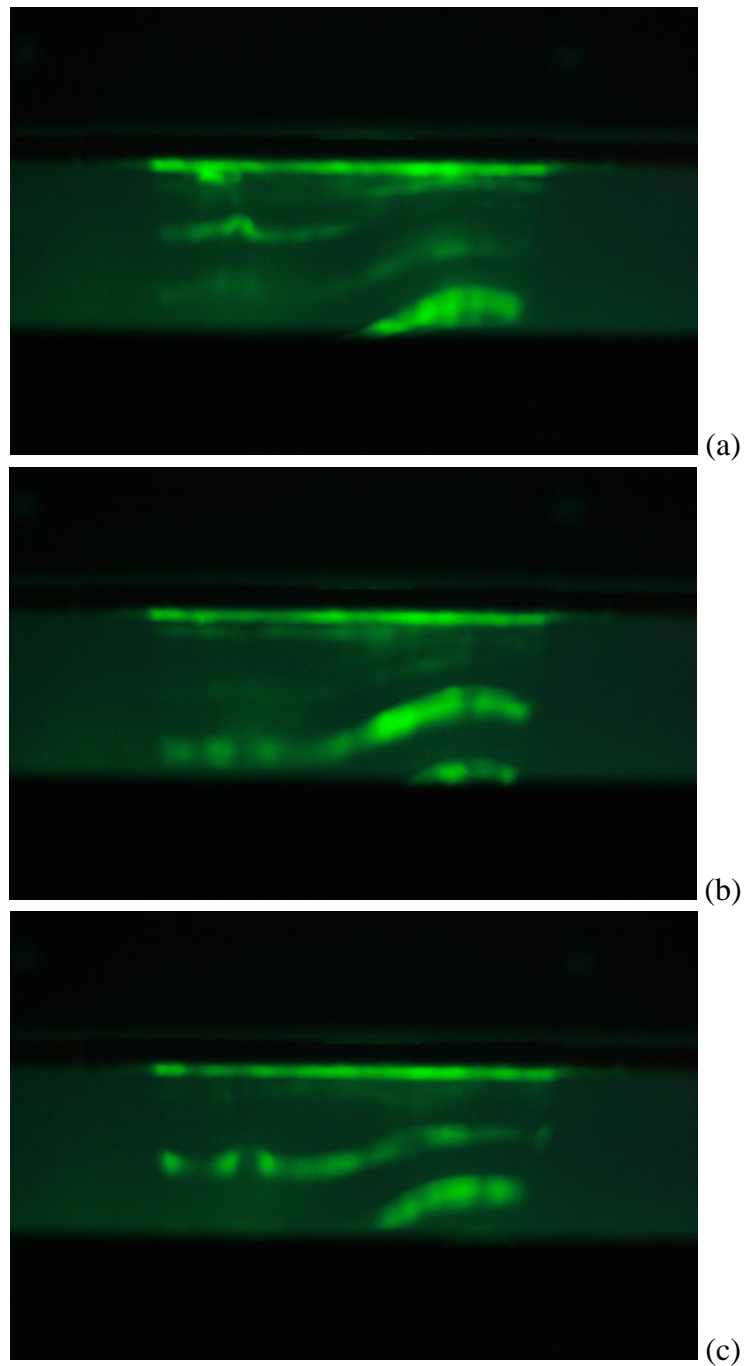
Obr. 4.3 Odtrhávání mezní vrstvy při $Re = 50$

Při zvyšování rychlosti přestávají být snímky ostré, jelikož úplav je vůči fotoaparátu v pohybu (obr. 4.4). Je ale i nadále patrné, že k odtrhávání dochází podél tělesa téměř rovnoměrně. Následující snímky byly pořízeny při $Re = 70$.



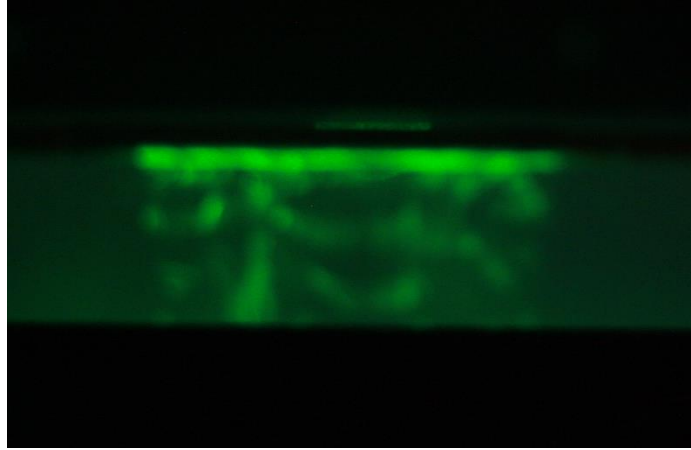
Obr. 4.4 Odtrhávání mezní vrstvy při $Re = 70$

Při $Re = 90$ (obr. 4.5) začíná být patrné mírně zvlněné odtrhávání. To může být způsobeno např. nedokonale přilehlou cínovou fólií na povrchu tělesa. Není však pozorováno nic, co by mohlo výrazněji znehodnocovat následný experiment.



Obr. 4.5 Odtrhávání mezní vrstvy při $Re = 90$

Při hodnotách $Re = (110 \div 130)$ trend pokračoval (obr. 4.6). Za tělesem se vytvářelo zvlnění v oblasti odtržení. Výsledné snímky jsou však vlivem poměrně vysoké rychlosti pohybu tělesa a tedy i fotoaparátu velmi neostré. Bylo také zjištěno negativní ovlivňování nosného rámu vibracemi způsobenými manuálním stiskem spouště fotoaparátu.



Obr. 4.6 Odtrhávání mezní vrstvy při $Re = 130$

5 Obtékání různých objektů

Pozorovaný objekt tvořily dva rovnoběžné, vodorovně orientované válce umístěné kolmo k proudu. První válec byl tvořen mosaznou tyčí s cínovou vrstvou shodnou s předchozím experimentem. Druhý válec byla tatáž tyč, avšak bez vrstvy cínu. Elektrochemický kouř byl tedy vytvářen pouze na prvním válci. Změna tvaru objektu byla prováděna změnou vzdálenosti válců, kvůli čemuž byl vyroben upínací mechanismus tvořený dřevěným hranolem s rovnoběžnými drážkami v potřebných vzdálenostech. Mosazné tyče bylo možné pomocí vrutů a kovového plíšku fixovat ve vzdálenostech 2, 3 a 5,5 průměrů válce bez cínu.

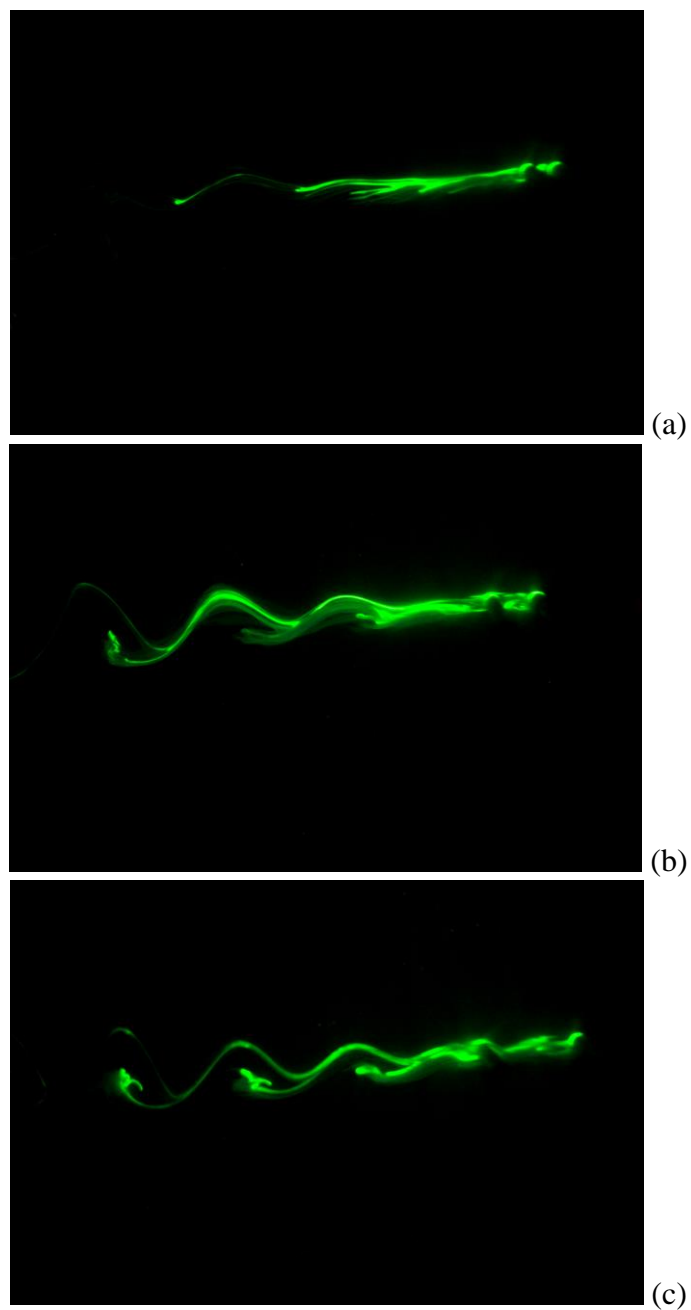


Obr. 5.1 Upevnění válců

Experiment probíhal při teplotě 24 °C v rozmezí $Re = (30 \div 130)$. Nastavení fotoaparátu odpovídá předchozímu experimentu.

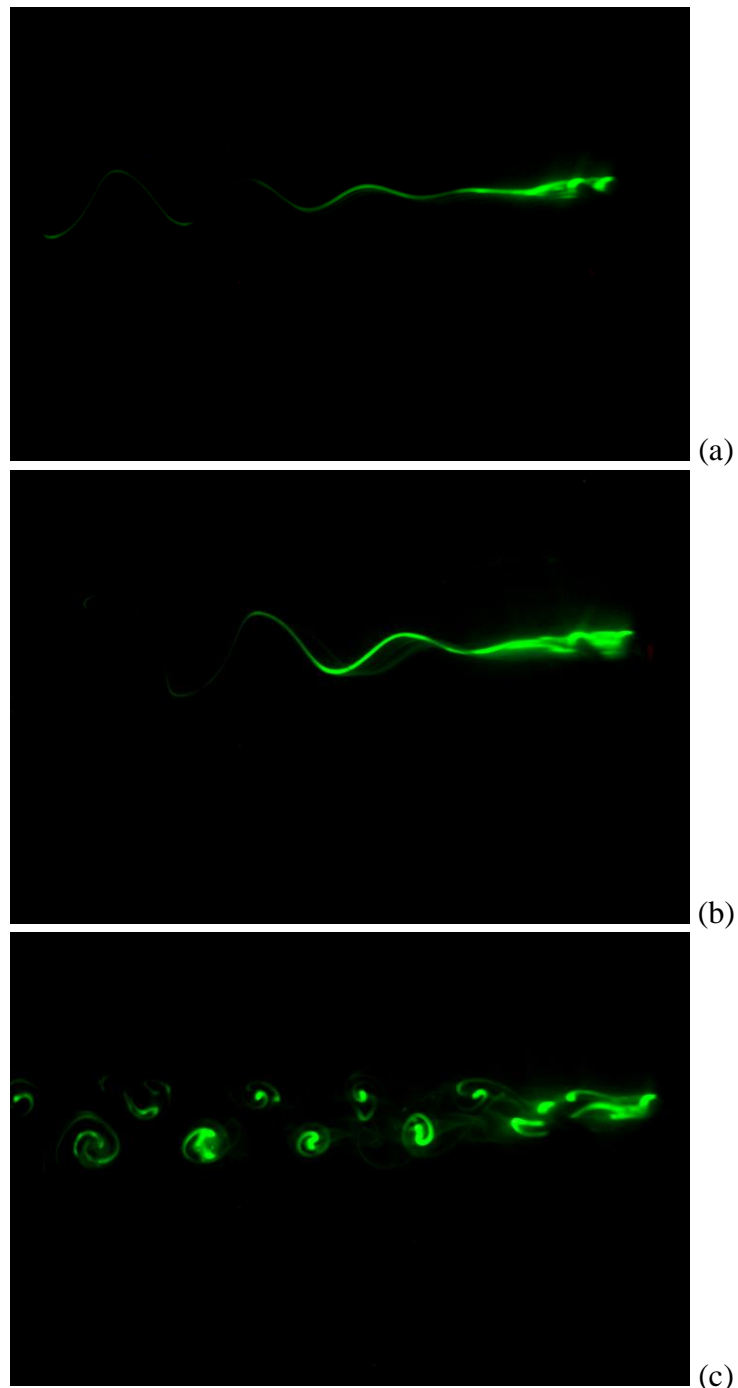
5.1 Výsledky

Při $Re = 30$ (obr. 5.2) je trajektorie proudu téměř přímá. Při vzdálenosti tří průměrů je patrné střídavé vychylování trajektorie, jehož frekvence se dále při vzdálenosti 5,5d ještě zvyšuje, naopak amplituda klesá. U všech vzdáleností však došlo pravděpodobně vlivem nízké rychlosti k oddělování proudů.



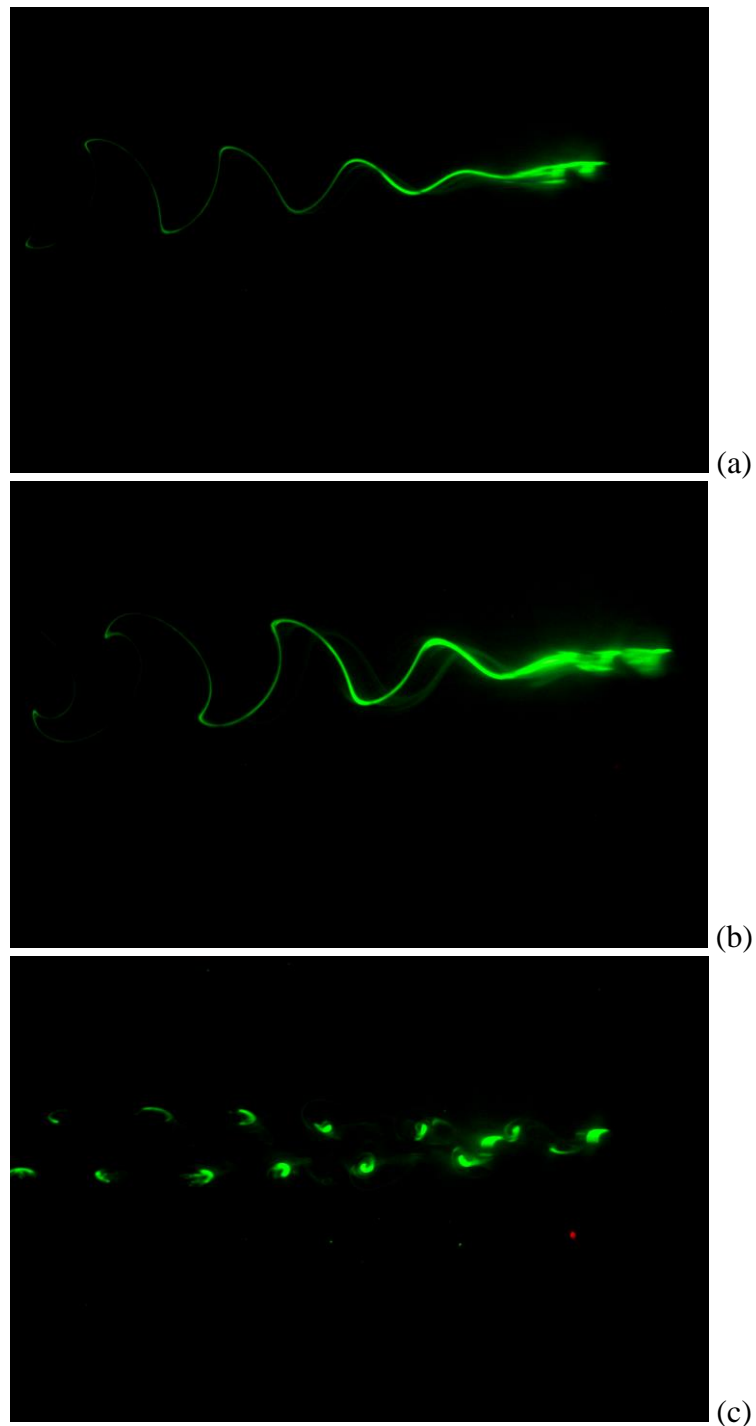
Obr. 5.2 Postupné zvětšování vzdálenosti válců při $Re = 30$,
(a) vzdálenost $2d$, (b) vzdálenost $3d$, (c) vzdálenost $5,5d$

Při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla už se proudy spojily (obr. 5.3). Při $Re = 50$ se už vytváří patrné vlnky i u válců vzdálených $2d$, zatímco u vzdálenosti $3d$ dochází k jejich zalamování. U nejvzdálenějších válců se už plně vytváří Kármánova vírová stezka.



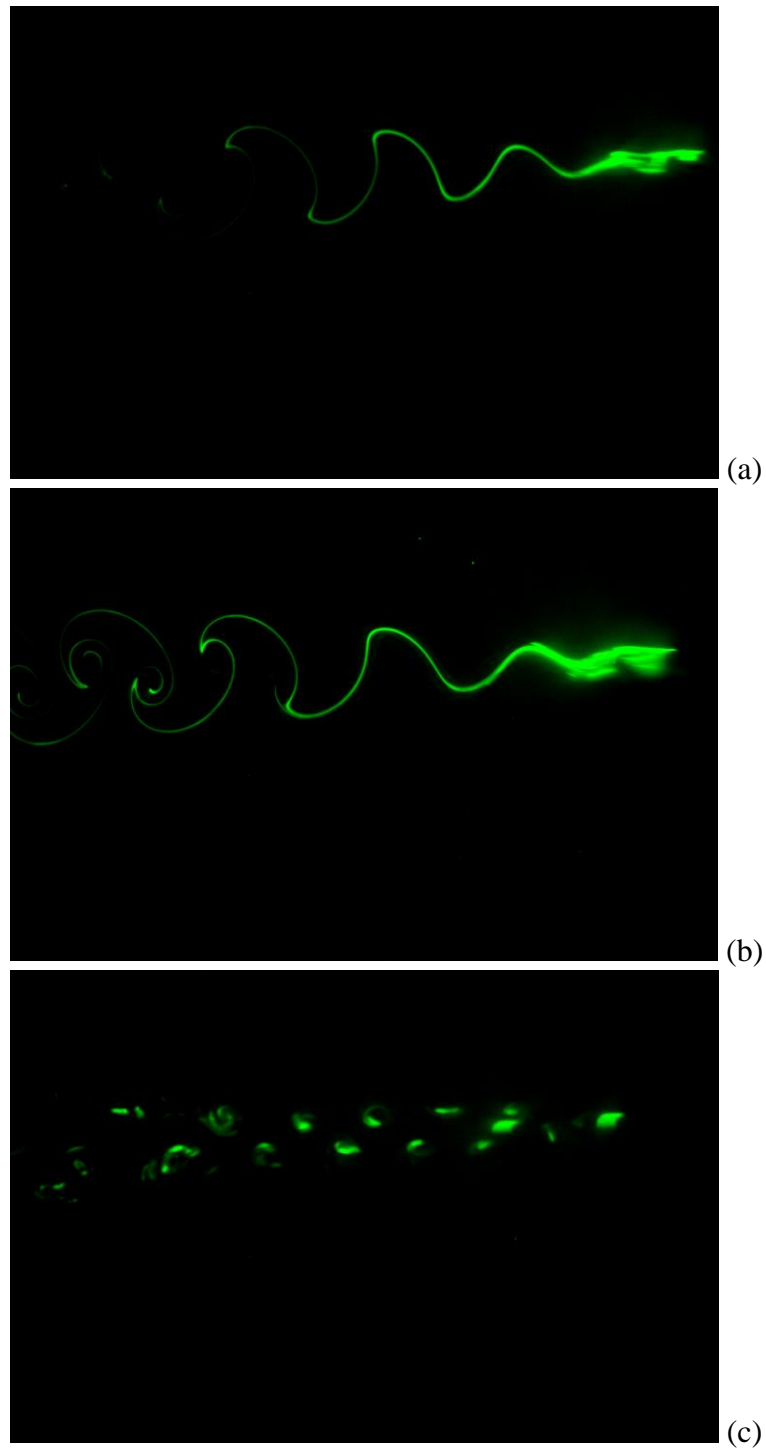
Obr. 5.3 Úplavy při $Re = 50$, (a) vzdálenost $2d$, (b) vzdálenost $3d$, (c) vzdálenost $5,5d$

Při hodnotě $Re = 70$ (obr. 5.4) dochází k zalamování vln i u válců vzdálených $2d$ a trajektorie proudění kolem válců vzdálených $3d$ se dále zašpičatuje. Nejevzdálenější válce za sebou vytvářejí stále rychleji rotující víry.



Obr. 5.4 Úplavy při $Re = 70$, (a) vzdálenost $2d$, (b) vzdálenost $3d$, (c) vzdálenost $5,5d$

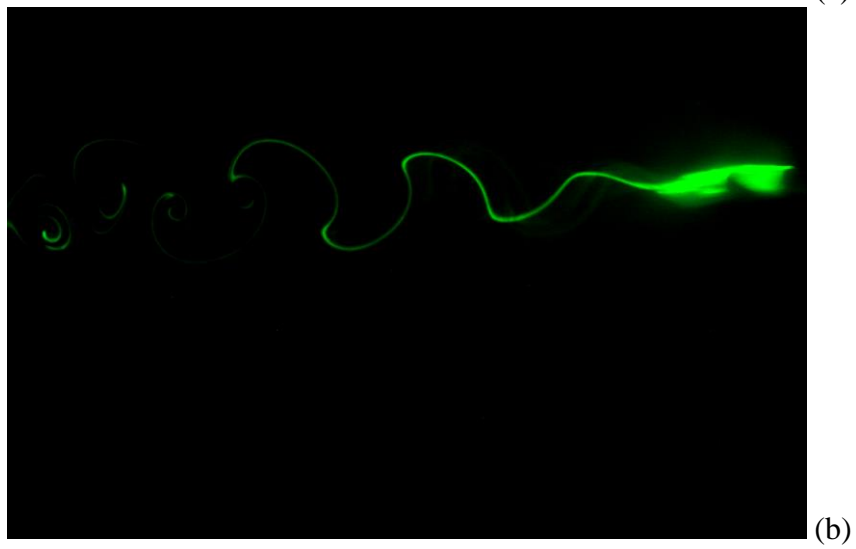
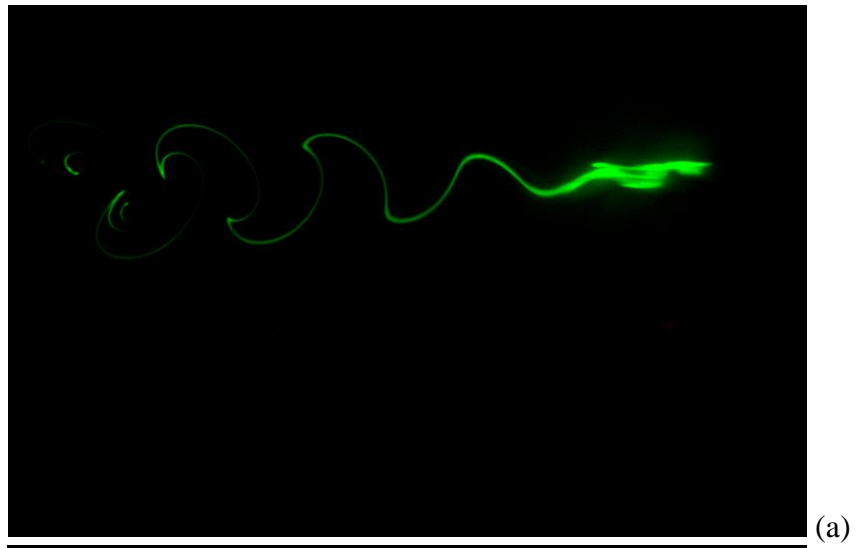
Obtékání nejbližších válců se při $Re = 90$ podobá obtékání vzdálenějších při $Re = 70$ z obr. 5.4b, zatímco u nich při $Re = 90$ vzniká Kármánova vírová stezka. Úplav za nejvzdálenějšími válců se stává více a více nečitelným a kvůli vysoké rychlosti rotace vírů je již téměř nemožné ho pomocí využití techniky zaznamenat.



Obr. 5.5 Úplavy při $Re = 90$, (a) vzdálenost $2d$, (b) vzdálenost $3d$, (c) vzdálenost $5,5d$

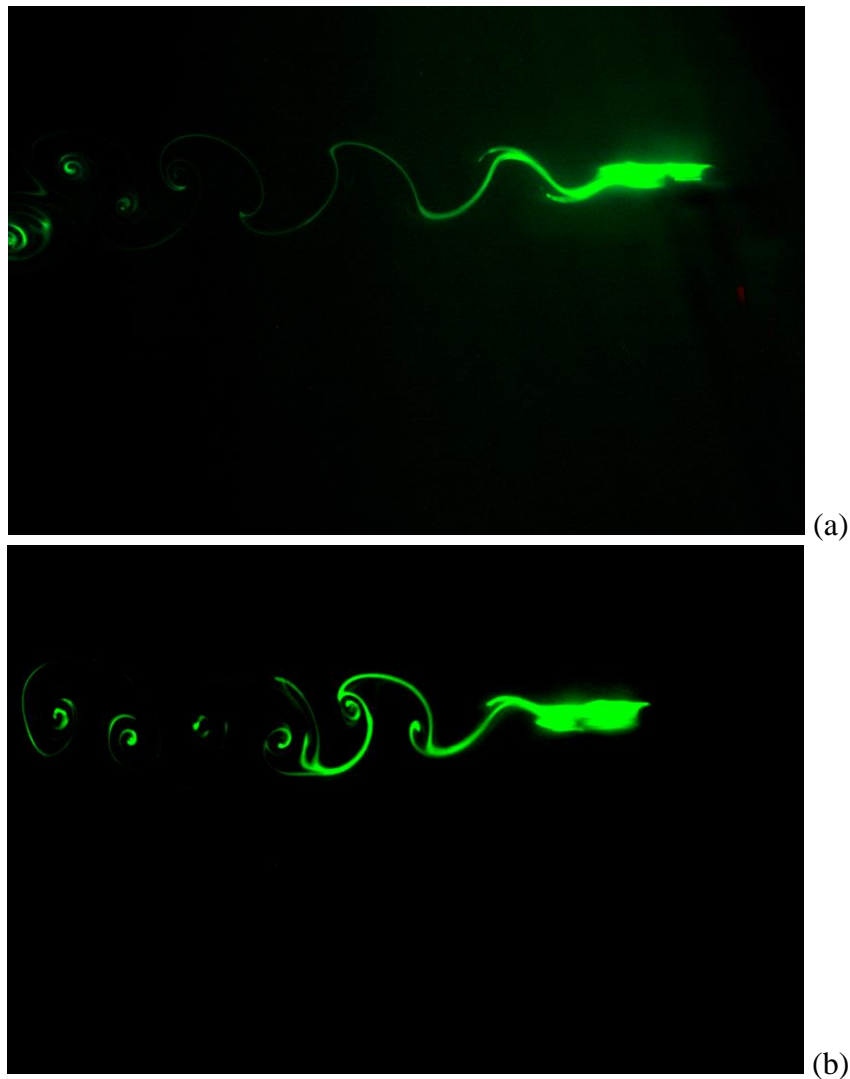
Při vyšších hodnotách Re už budou z výše zmíněných důvodů porovnávány pouze dvojice bližších válců, tedy válce ve vzdálenosti dvou a tří průměrů.

Při $Re = 110$ (obr. 5.6) je Kármánova vírová stezka patrná už u obou vzdáleností válců. Liší se pouze frekvence vírů a amplituda vychylování trajektorie.



Obr. 5.6 Úplavy při $Re = 110$, (a) vzdálenost $2d$, (b) vzdálenost $3d$

$Re = 130$ (obr. 5.7), tedy nejvyšší sledovaná hodnota, vytváří u válců vzdálených $2d$ stále poměrně pravidelné víry, zatímco u válců vzdálených $3d$ dochází k tvorbě elipsovitých vírů.

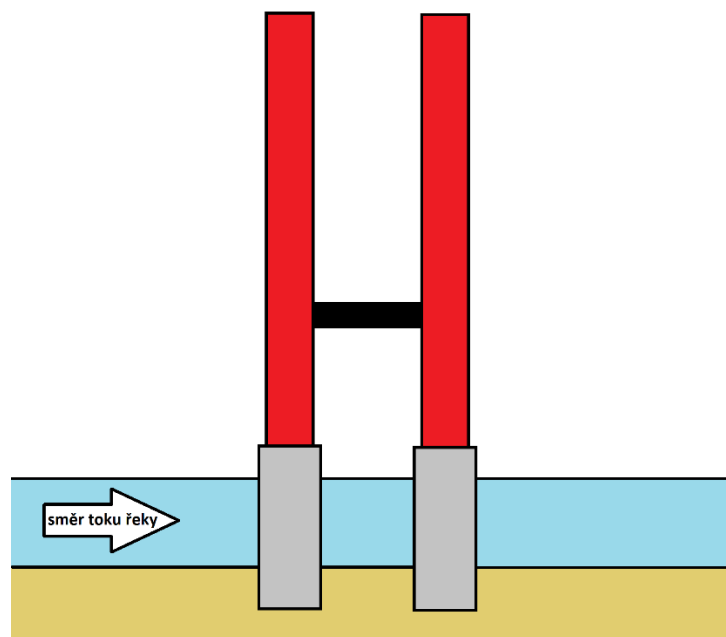


Obr. 5.7 Úplavy při $Re = 130$, (a) vzdálenost $2d$, (b) vzdálenost $3d$

Další zrychlování těles by zřejmě způsobilo jevy podobné zobrazeným na obrázcích 5.3c, 5.4c a 5.5c, čili zvyšování rychlosti rotace vírů, které by znemožňovaly úplav zachytit. Se snižující se vzdáleností válců by se však vznikající obrazce zvětšovaly.

5.2 Optimalizace tvaru tělesa

Pro představu otázky optimalizace tvaru těles je uvedena aplikace tohoto experimentu ve formě pilířů mostu napříč dolním tokem řeky, kde je již proudění vody dostatečně pomalé a blízké laminárnímu. Příklad takového mostu je zobrazen na obr. 5.8. V těchto podmínkách je nutné zohlednit rychlost proudění vody a je potřeba pilíře postavit v takové vzdálenosti, aby frekvence odtrhávání proudu od sloupů nebyla pro most destruktivní.



Obr. 5.8 Pohled na pilíře mostu v jeho podélném směru

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se jevy vznikajícími během obtékání těles. Praktická část byla příprava experimentu obtékání s vizualizací metodou cínových iontů, jeho provedení, vyhodnocení a následná optimalizace tvaru tělesa.

Jelikož bylo využito konstrukce a technických zařízení použitých při předchozích experimentech, bylo nutné provést pouze dílčí úpravy potřebné k této aplikaci. Kvůli experimentu, zda dochází k paralelnímu odtrhávání mezní vrstvy za tělesem, bylo nutné vytvořit rám nesoucí laser, zrcátko pro směřování paprsku do vodorovného směru a stativovou hlavu pro fotografování ze shora. Pro samotný vizualizační experiment úplavu bylo nutné vytvořit mechanismus pro upevnění těles v rámu.

Dále bylo nutné seznámit se s ovládním techniky a softwaru potřebných k provedení experimentu a také s možnostmi nastavení fotoaparátu.

V další fázi došlo k samotnému experimentu. Nejprve byl proveden pokus, zda je rám k experimentu vhodný a jestli dochází k paralelnímu odtrhávání mezní vrstvy po celé délce tělesa. Během pokusu bylo zjištěno, že standardní objektiv fotoaparátu není příliš vhodný, proto byl použit kratší s větší světelností. Dále byl zjištěn problém se samotnou konstrukcí rámu zejména při vyšších rychlostech. Během manuálního fotografování stiskem tlačítka na fotoaparátu docházelo k přenášení vibrací do rámu, čímž byl tento pokus negativně ovlivňován. Problém by mohl být vyřešen dálkovou spouští, pomocí které by bylo zamezeno přímému kontaktu s rámem.

Další fází bylo provedení vizualizačního experimentu úplavu. Bylo pozorováno obtékání dvojice mosazných tyčí při osových vzdálenostech dvou, třech a pěti a půl průměrů při Reynoldsových číslech v rozmezí $Re = (30 \div 130)$. Zvolené upevnění tělesa se ukázalo jako dostatečně tuhé a plně vyhovovalo této aplikaci. Rám tentokrát nebyl nikterak ovlivňován stiskem spouště fotoaparátu, jelikož byl umístěn na stativu vedle tažné nádrže. Byla tak vytvořena série fotografií s dostatečnou ostrostí a experiment se tedy zdařil.

Následně byly pomocí znalostí získaných při studiu úplavu fotografie popsány a poté byl v teoretické rovině vyvozen závěr o optimálním tvaru obtékaného tělesa.

Seznam literatury

- [1] DRÁBKOVÁ, S. a kol.: *Mechanika tekutin*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007
- [2] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC, J.: *Mechanika tekutin*, České vysoké učení technické v Praze, 2000
- [3] JANALÍK, J.: *Obtékání a odpor těles*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008
- [4] http://www.wikiskripta.eu/index.php/Lamin%C3%A1rn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD, citováno dne 29. 2. 2016
- [5] <http://sszdra-karvina.cz/bunka/fy/02prou/prlam.htm>, citováno dne 29. 2. 2016
- [6] http://www.wikiskripta.eu/index.php/Turbulentn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD, citováno dne 29. 2. 2016
- [7] <http://sszdra-karvina.cz/bunka/fy/02prou/prtur.htm>, citováno dne 29. 2. 2016
- [8] <http://python-prepa.github.io/ateliers/VonKarman.html>, citováno dne 5. 3. 2016
- [9] <http://www.letmodel.cz/23/Theodor%20von%20Karman.htm>, citováno dne 5. 3. 2016
- [10] https://cs.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge, citováno dne 5. 3. 2016
- [11] <http://www.marin.nl>, citováno dne 11. 5. 2016
- [12] <http://www.cehipar.es>, citováno dne 11. 5. 2016
- [13] <https://www.escapadarural.com/blog/el-oceano-de-madrid>, citováno dne 11. 5. 2016
- [14] <http://www.nrc-cnrc.gc.ca>, citováno dne 11. 5. 2016
- [15] VAVRLA, Z.: *Vizualizace proudění*, Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [16] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0301.htm>, citováno dne 11. 5. 2016
- [17] LUKÁŠEK, V.: *Vizualizační experimenty v tažné nádrži*, Technická univerzita v Liberci, 2014
- [18] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/278-elektrolyt-elektrolyza>, citováno dne 1. 6. 2016
- [19] http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8818445385758/EPOS-Setup.zip, citováno dne 1. 6. 2016

Seznam příloh

Příloha 1: Použitá zařízení

Příloha 2: Paralelní odtrhávání mezní vrstvy

Příloha 1: Použitá zařízení



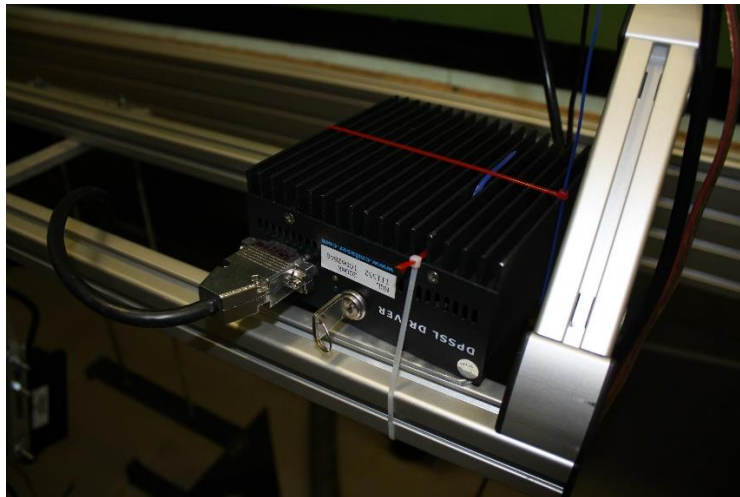
Obr. P 1.1 Nosný rám



Obr. P 1.2 Zdroj pro elektrolýzu



Obr. P 1.3 Osciloskop

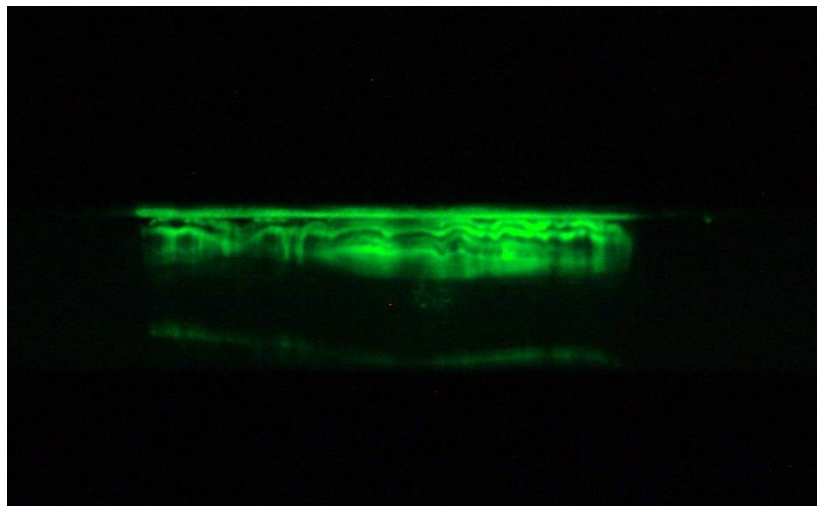


Obr. P 1.4 Zdroj laseru

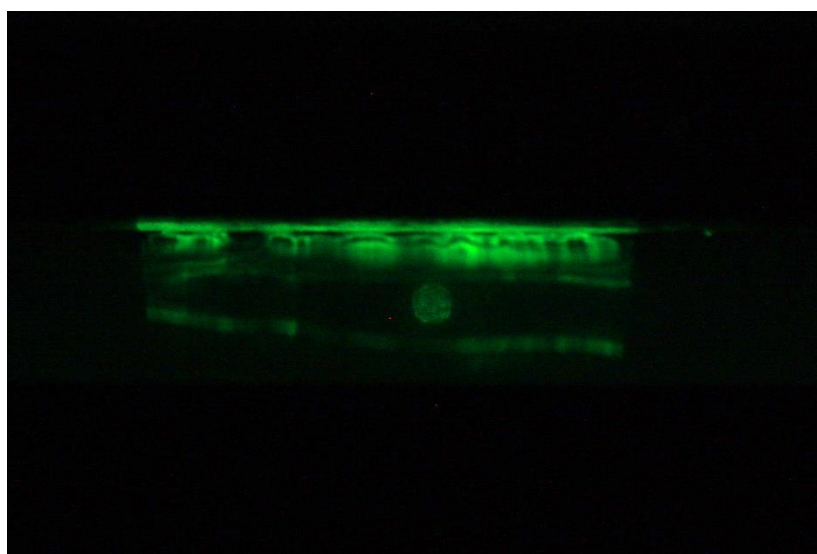


Obr. P 1.5 Laser

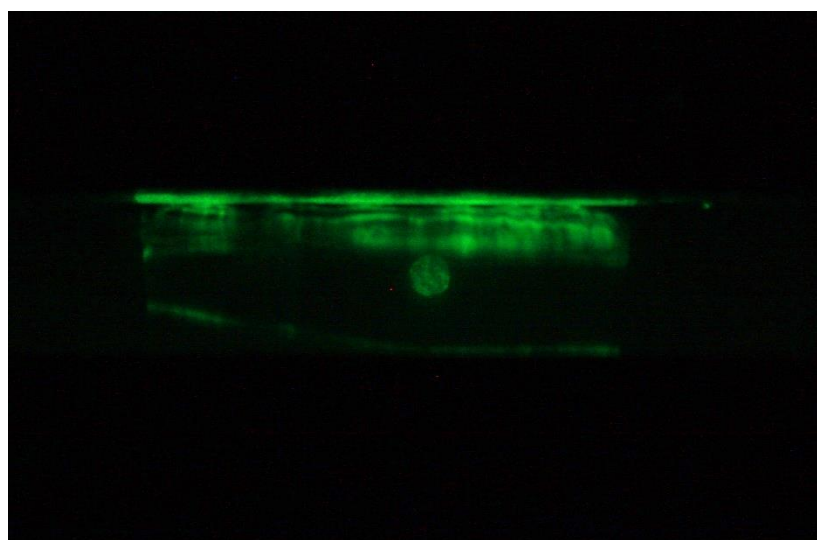
Příloha 2: Paralelní odtrhávání mezní vrstvy



(a)

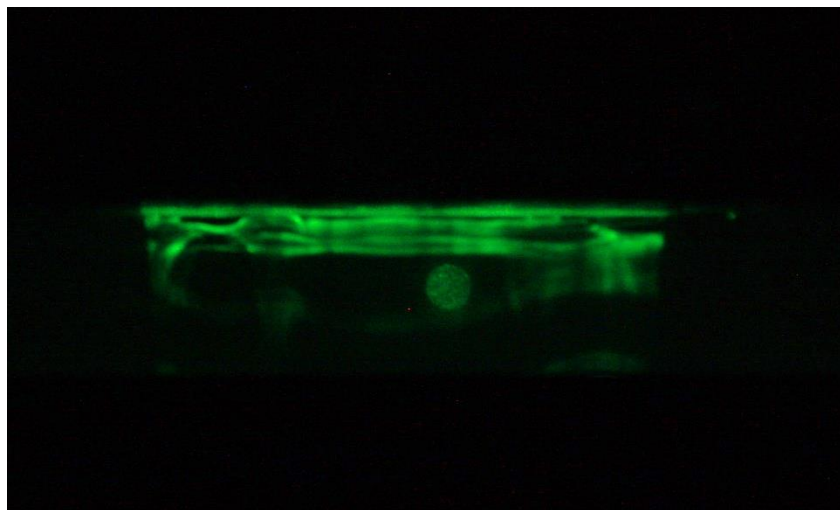


(b)

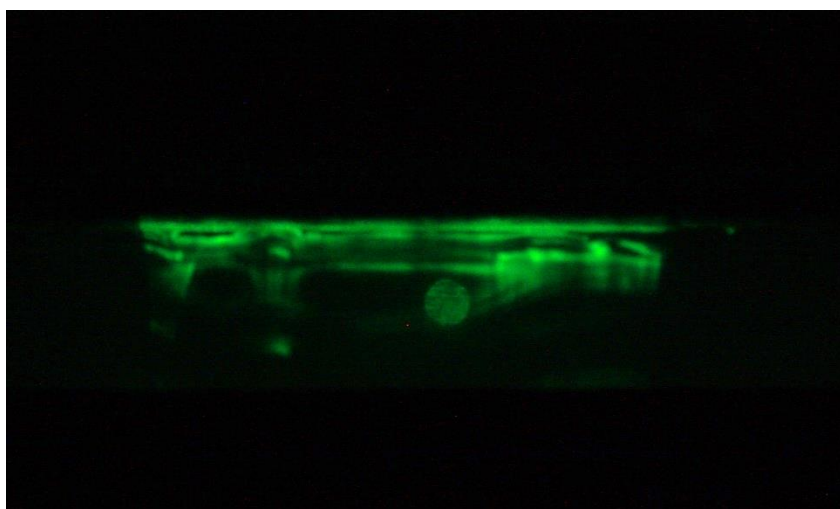


(c)

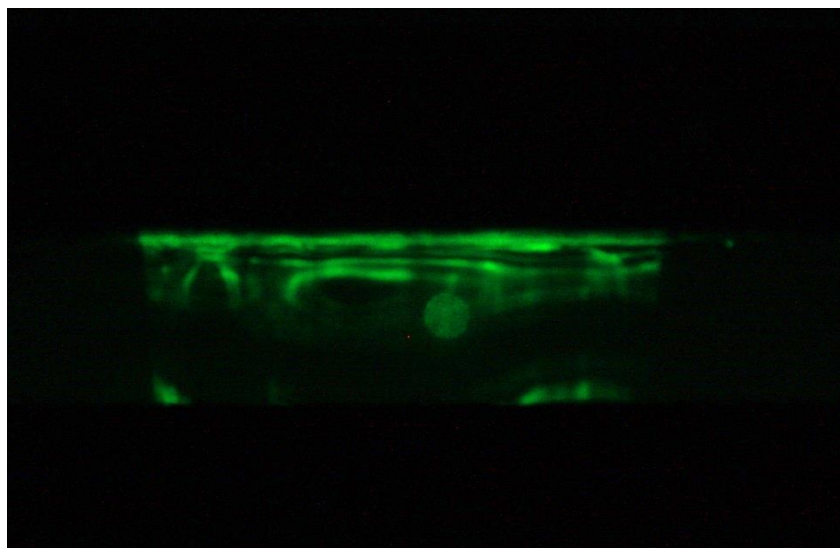
Obr. P 2.1 Fotografie pořízené původním objektivem při $Re = 50$



(a)

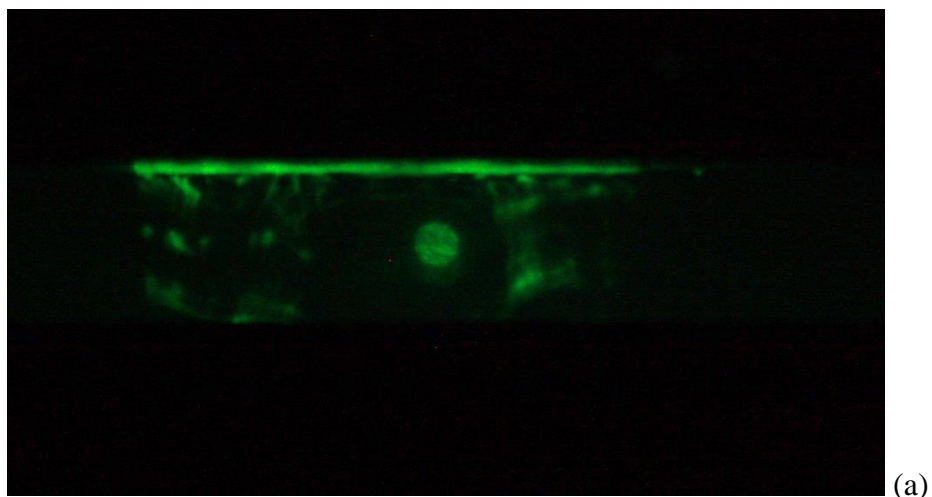


(b)

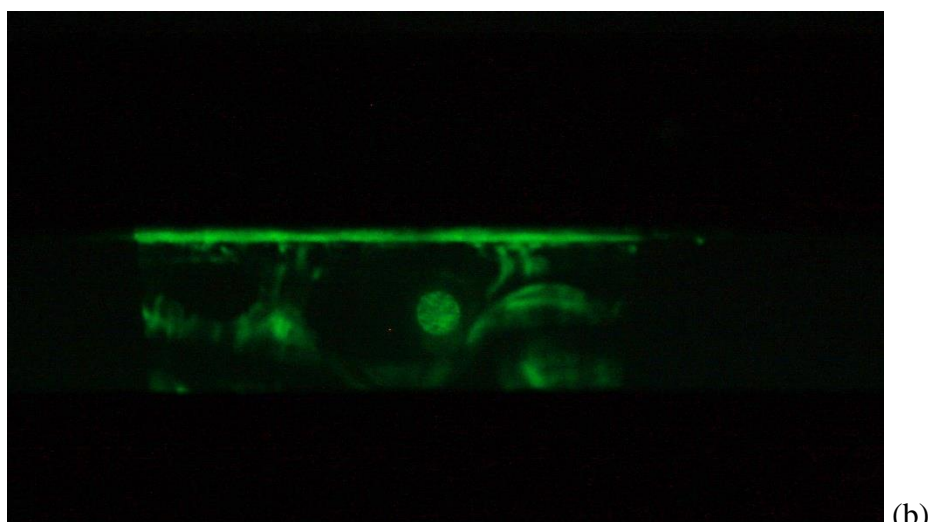


(c)

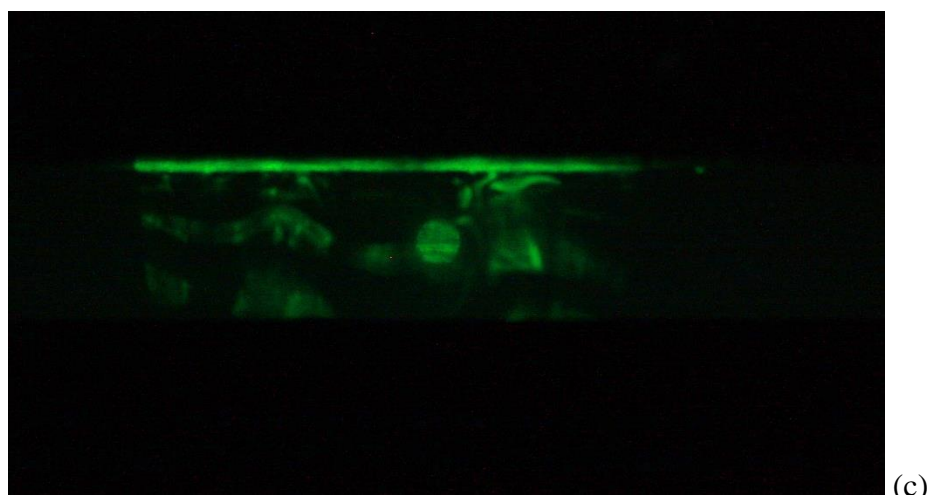
Obr. P 2.2 Fotografie pořízené původním objektivem při $Re = 70$



(a)

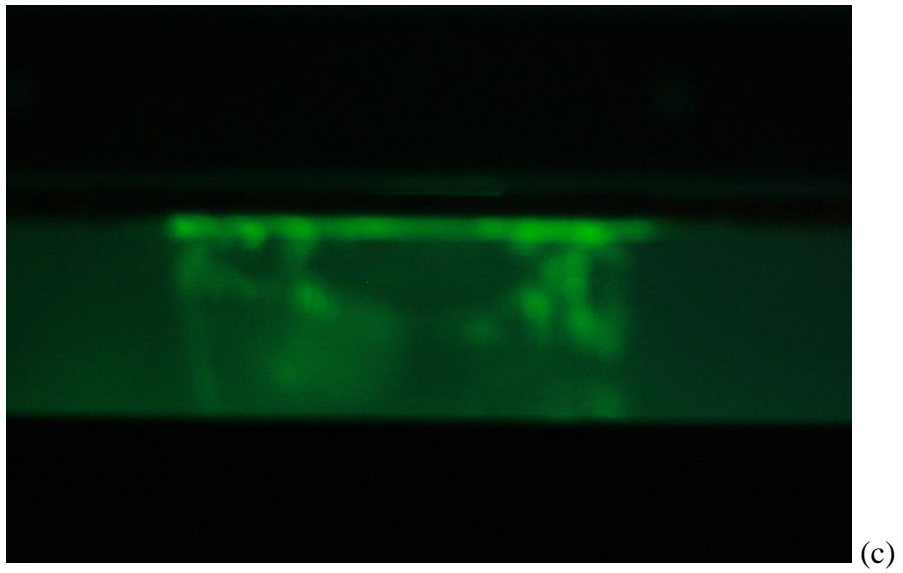
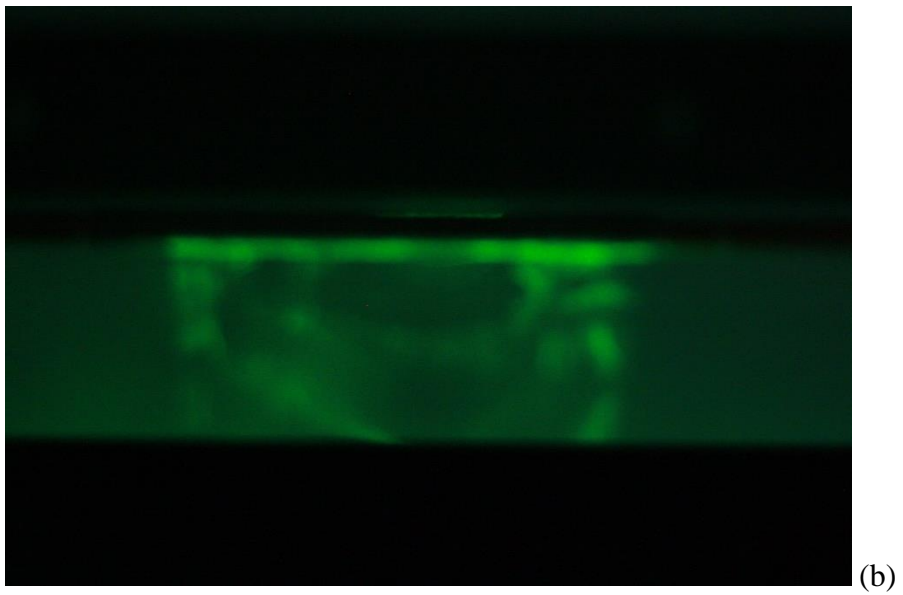
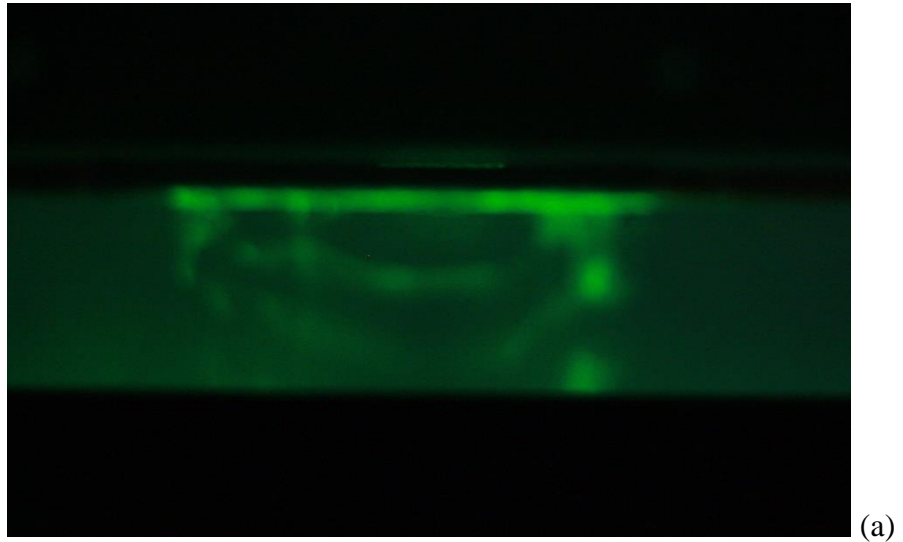


(b)

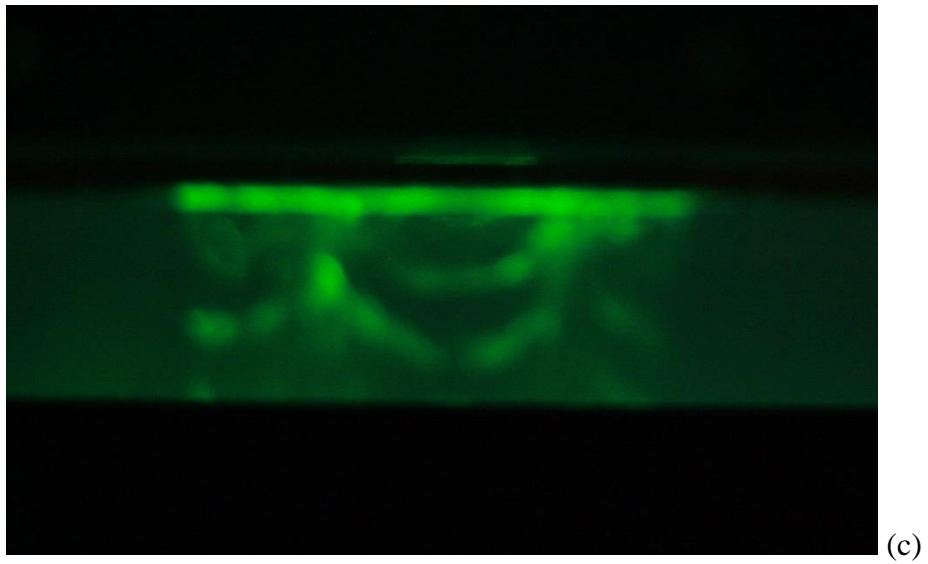
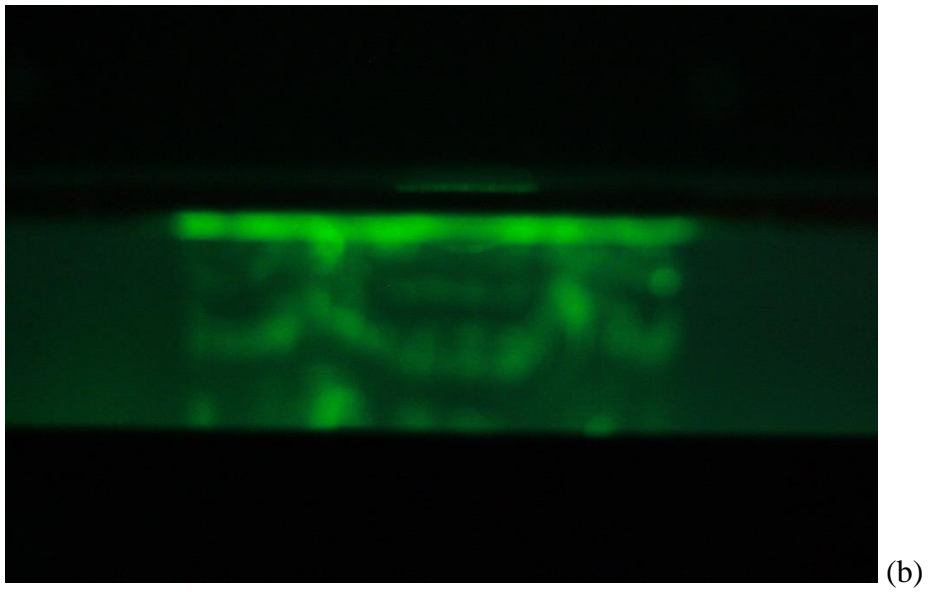


(c)

Obr. P 2.3 Fotografie pořízené původním objektivem při $Re = 90$



Obr. P 2.4 Fotografie pořízené kratším objektivem při $Re = 110$



Obr. P 2.5 Fotografie pořízené kratším objektivem při $Re = 130$