



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Pružné modely cév pro PIV měření

Elastic vessel phantoms for PIV measurement

Diplomová práce

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika

Vedoucí práce: Ing. Ludmila Nováková, Ph.D.

Bc. Adam Bláha

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bláha** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **409588**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Pružné modely cév pro PIV měření

Název diplomové práce anglicky:

Elastic vessel phantoms for PIV measurement

Pokyny pro vypracování:

- 1) Na základě rozboru informací v dostupné literatuře zvolte vhodnou metodu výroby elastických modelů cév.
- 2) Zpracujte metodiku výroby konkrétního modelu, popřípadě navrhnete i vhodné přípravky pro usnadnění výroby.
- 3) Experimentálně ověřte vhodnost vyrobeného modelu pro měření metodou PIV.

Seznam doporučené literatury:

- 1) MCDONALD, D.A.: Blood Flow in the Arteries, Williams & Wilkins, Baltimore, Maryland, 1960
- 2) GEOGHEGAN, P.H., BUCHMANN, N. A., SPENCE, C. J. T. et al.: Fabrication of rigid and ?exible refractive-index-matched ?ow phantoms for flow visualisation and optical flow measurements, Experimental fluids 52, pp 1331, 1347, 2012
- 3) MOAYERIA, M.S., ZENDEHBUDI, G.R.: Effects of elastic property of the wall on flow characteristics through arterial stenoses, J. Biomechanics, V. 36, 525-535, 2003

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ludmila Nováková Ph.D., 12112


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **26.10.2018**


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

28. 9. 2017
Datum převzetí zadání

Bláha
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Pružné modely cév pro PIV měření“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ludmily Novákové, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 9. 8. 2017

Adam Bláha

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Ludmile Novákové, Ph.D. za odborné a zodpovědné vedení, cenné rady, ochotu a pomoc při řešení problémů a zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Novotnému, Ph.D. za pomoc při výrobě přípravku, rady ohledně 3D tisku a informace týkající se metody PIV. Velký dík patří i Ing. Milošovi Kašpárkovi za pomoc a užitečné rady při výrobě modelů i přípravě a provedení experimentálního měření.

Anotační list

Jméno autora: **Bc. Adam BLÁHA**

Název DP: *Pružné modely cév pro PIV měření*

Anglický název: *Elastic vessel phantoms for PIV measurement*

Rok: 2017

Studijní program: *N2301 Strojní inženýrství*

Obor studia: *3901T003 Aplikovaná mechanika*

Ústav: *Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky*

Vedoucí BP: *Ing. Ludmila Nováková, Ph.D.*

Bibliografické údaje: počet stran 73
počet obrázků 75
počet tabulek 6
počet příloh 3

Klíčová slova: Pružné modely, céva, stenóza, hemodynamika, PIV, rychlostní pole, proudnice, index lomu

Keywords: Elastic phantoms, blood vessel, stenosis, hemodynamics, PIV, velocity field, streamlines, refractive index

Anotace:

Práce se zabývá výrobou pružných modelů cév pro měření optickou metodou PIV. Cílem práce je vhodným postupem vyrobit pružný model pro měření metodou PIV a zpracovat metodiku výroby modelu. Na základě experimentu pak ověřit vhodnost vyrobeného modelu pro měření metodou PIV.

Abstract:

The thesis deals with the production of elastic models of blood vessels for measurement of PIV optical method. The aim of the thesis is to use a suitable method to produce an elastic model for PIV measurement and to elaborate the methodology of its production. Then, based on the experiment, verify the suitability of the produced model for PIV measurement.

Obsah

Seznam veličin a jednotek	- 1 -
Cíle práce	- 2 -
1 Úvod.....	- 3 -
2 Lékařský pohled	- 4 -
2.1 Cévní soustava člověka	- 4 -
2.2 Céva	- 5 -
2.3 Stenóza	- 6 -
2.4 Aneurysma	- 7 -
3 Optické metody měření rychlosti tekutiny	- 8 -
3.1 Základní pojmy geometrické optiky	- 8 -
3.1.1 Index lomu světla	- 9 -
3.1.2 Lom a odraz světla	- 9 -
3.2 PIV	- 11 -
3.3 LDA.....	- 13 -
4 Modely cév pro hemodynamiku	- 15 -
4.1 Tuhé modely.....	- 15 -
4.2 Pružné modely	- 17 -
4.2.1 Namáčení formy	- 17 -
4.2.2 Odlévání do rotující formy.....	- 20 -
4.2.3 Odlévání do dělené formy	- 21 -
5 Výroba pružných modelů	- 23 -
5.1 Odlévání do rotující formy.....	- 23 -
5.1.1 Návrh přípravku	- 23 -
5.1.2 Modifikace přípravku.....	- 28 -
5.1.3 Výroba přípravku	- 29 -
5.1.4 Výroba modelu odléváním do rotující formy	- 33 -
5.2 Namáčení formy.....	- 35 -
5.2.1 Výroba modelu namáčením formy	- 36 -
6 Experimentální měření	- 39 -
6.1 Optické vlastnosti modelu	- 39 -
6.2 Měřicí trať	- 42 -
6.3 Experiment	- 42 -

7	Výsledky.....	- 46 -
7.1	Rychlostní pole a proudnice – stacionární režim.....	- 46 -
7.2	Rychlostní pole a proudnice – nestacionární režim.....	- 47 -
7.2.1	Vyhodnocení v šesti úsecích pulzu	- 48 -
7.2.2	Vyhodnocení v deseti bodech, $f = 250$ mHz	- 52 -
7.3	Detekce pohybu stěny	- 58 -
8	Závěr.....	- 60 -
	Seznam zdrojů	- 62 -
	Seznam obrázků	- 64 -
	Seznam tabulek	- 66 -
	Seznam příloh	- 66 -

Seznam veličin a jednotek

c	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	střední rychlost podle objemu
c_s	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	rychlost světla ve vakuu
f	(Hz)	frekvence
i_c	(1)	celkový převodový poměr
i_p	(1)	převodový poměr převodovky
i_s	(1)	sekundární převodový poměr
k_c	$(\text{ml}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1})$	koeficient čerpadla
n	(1)	absolutní index lomu světla
n_{12}	(1)	relativní index lomu světla
r	(m)	poloměr
Re	(1)	Reynoldsovo číslo
U	(V)	elektrické napětí
v	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	rychlost světla v optickém prostředí
v_1	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	rychlost světla v optickém prostředí 1
v_2	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	rychlost světla v optickém prostředí 2
\dot{V}	$(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	objemový tok
α_1	(rad)	úhel dopadu
α_1'	(rad)	úhel odrazu
α_2	(rad)	úhel lomu
α_m	(rad)	mezní úhel
ω	$(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	úhlová rychlost

Cíle práce

Primárním cílem diplomové práce je výroba pružných modelů cév vhodných pro experimentální měření optickou metodou PIV.

Prvním úkolem je provést rozbor informací v dostupné literatuře k danému tématu a na jeho základě zvolit vhodnou metodu výroby pružných modelů cév.

Zvolenou metodou pak prakticky provést výrobu pružného modelu a zpracovat metodiku výroby. Pro výrobu daného modelu použít dostupná zařízení a komponenty, případně v rámci práce navrhnout a zhotovit vhodné přípravky pro usnadnění výroby.

Na závěr sestavit měřicí trať s konkrétním modelem a provést experimentální měření metodou PIV za účelem ověření vhodnosti vyrobeného modelu.

1 Úvod

Hemodynamika je vědní obor, který se zabývá popisem oběhu krve na základě fyzikálních principů. Zkoumají se různé jevy a abnormality vyskytující se v cévní soustavě, přičemž na proudění krve je nahlíženo jako na proudění vazké tekutiny. Hemodynamické jevy lze zkoumat například na základě tlakových měření v různých částech oběhu nebo na základě měření rychlostí, nejčastěji pomocí neinvazivních optických měřících metod.

Vzhledem k vysoké složitosti cévní soustavy se řeší pouze modelové případy určitých problémů. Za jednoduchý model cévy lze považovat obyčejnou trubku, která je vhodně tvarově upravena, aby modelovala určitý problém. Je-li předlohou např. céva se stenózou, pak je trubka v určitém místě zúžena. Tvarově složitější tuhé modely se pak mohou tisknout na 3D tiskárně, různými způsoby obrábět nebo odlévat do forem.

V mnoha případech pro pochopení hemodynamických jevů postačuje danou problematiku modelovat pomocí tuhých modelů. Cévy v těle jsou však pružné, tudíž pevné modely nejsou z autentického hlediska příliš vhodné. O další krok blíže k reálnému chování cév v těle nás posouvají pružné modely. V sofistikovanějších případech, kde je kladen důraz na autentické chování, se nelze bez pružných modelů obejít. Velké množství experimentů se v hemodynamice provádí optickou měřící metodou PIV. Společným nárokem kladeným na pevné i pružné modely je tak jejich průhlednost.

Experimentální měření hemodynamických jevů se v laboratořích často provádí i s několika různými modely. Například zvolená geometrie však nemusí být vyhovující a je třeba vytvořit nový model s jinou geometrií nebo je zkrátka potřeba modelů více, než je momentálně k dispozici. Proto je vhodné zabývat se problematikou výroby pružných modelů, aby bylo možné model v případě potřeby vyrobit a nemuset se spoléhat na externího dodavatele. Takový model bude navíc možné upravovat podle vlastní představy a aktuálních potřeb. Pořizovací náklady externě dodávaných pružných modelů pro hemodynamiku jsou navíc velmi vysoké a dlouhá doba dodání neumožňuje efektivně reagovat na aktuální potřeby.

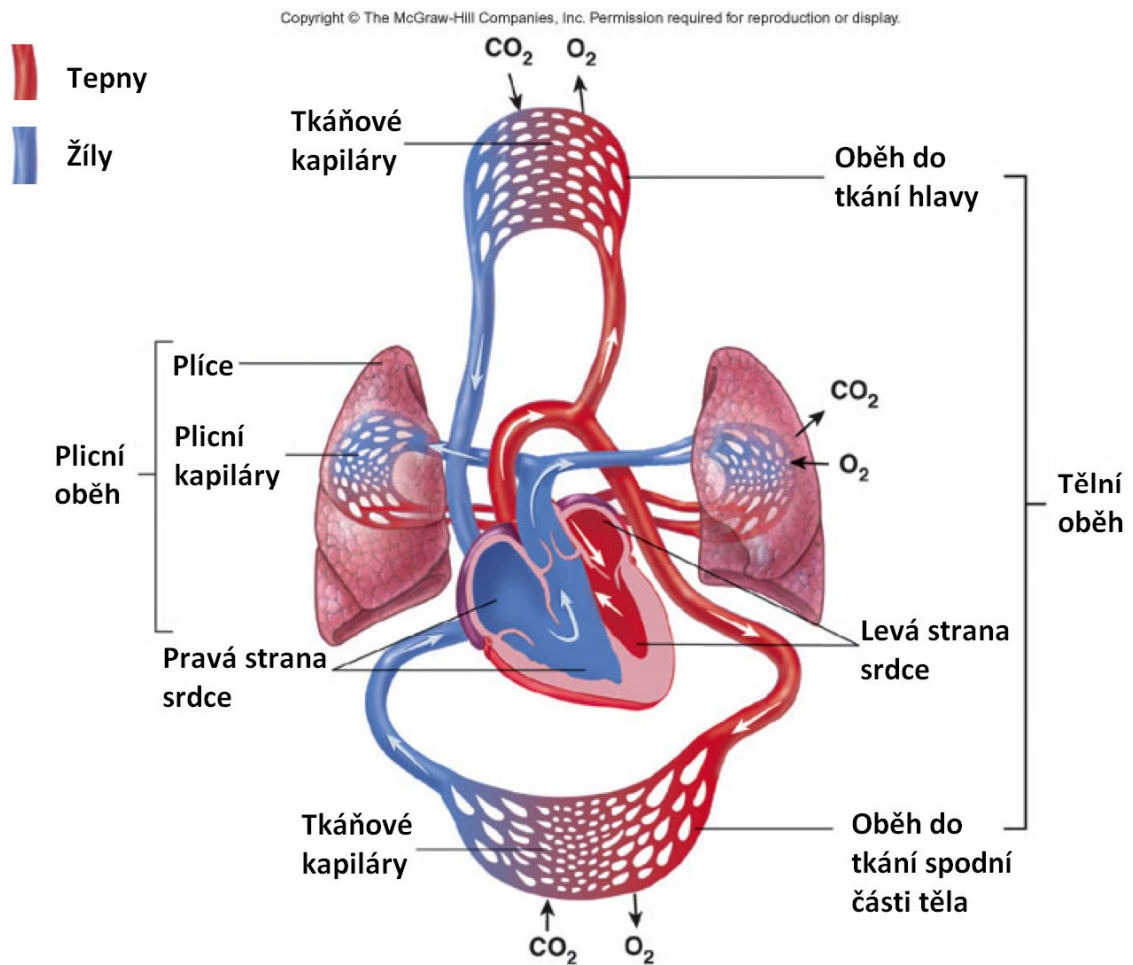
2 Lékařský pohled

Obecně se hemodynamika zabývá prouděním krve v krevním řečišti, přičemž danou problematiku řeší z fyzikálního pohledu jako proudění vazké tekutiny. Vzhledem k vysoké složitosti cévní soustavy a neustálým změnám tlaků v krevním oběhu představuje takový fyzikální popis velice složitý problém. Proto se v hemodynamických laboratořích zkoumají a měří pouze modelové případy určitých problémů. Aby však bylo možné nějaký problém modelovat, je potřeba se seznámit i s jeho předlohou. Proto se tato kapitola zabývá stručným vhladem do problematiky cévní soustavy člověka a základními vadami, které se v ní mohou vyskytovat.

2.1 Cévní soustava člověka

Cévní soustava, též oběhová soustava či kardiovaskulární systém, je jednou z oběhových soustav v lidském těle. Prostřednictvím krve, jako transportního média, rozvádí důležité látky k orgánům a tkáním, případně odvádí látky odpadní. Díky hemoglobinu v krvi přenáší kyslík do tkání a odvádí CO_2 (hemoglobin je schopný na sebe vázat kyslík a CO_2). Dále slouží k transportu živin z trávicí soustavy do jater a z jater pak do celého těla. Odvádí odpadní látky do ledvin a kůže. Rozvádí po těle hormony a řídí termoregulaci organismu [6].

Lidský kardiovaskulární systém se skládá z dvou hlavních oběhů, z tzv. malého (plicního) a velkého (tělního) krevního oběhu, které jsou propojeny (uzavřená oběhová soustava). Pohonným ústrojím celé cévní soustavy je srdce, na které je možné se dívat jako na dvě čerpadla anatomicky propojená a pracující prakticky současně. Pravá část srdce (přibližně 1/3 objemu) vhání krev do malého oběhu, levá (přibližně 2/3 objemu) do velkého. Malý oběh zajišťuje cirkulaci krve mezi srdcem a plicemi. Slouží k výměně krevních plynů, přenáší o kyslík ochuzenou krev z pravé srdeční komory plicní tepnou do plic a z plic pak okysličenou krev čtyřmi plicními žilami do levé srdeční síně a komory. Velký oběh rozvádí okysličenou krev dále po těle. Krev je vypuzována z levé srdeční komory aortou, která se postupně větví do menších tepen (artérií) a vede krev k jednotlivým orgánům a kapilárám na periferii, kde se odkysličí. Žilami se pak odkysličená krev vrací do pravé srdeční síně, odkud je pak vypuzována do pravé komory a tedy do malého oběhu [5], [6].



Obr. 2.1 Kardiovaskulární systém – převzato a upraveno [7]

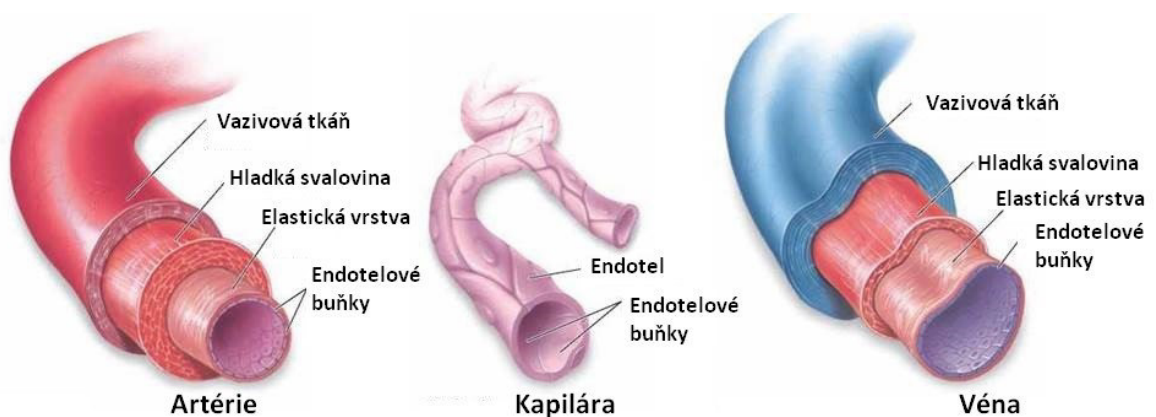
2.2 Céva

Cévy slouží k distribuci krve po celém těle. Jedná se o duté útvary trubkového tvaru s pružnou stěnou. Rozlišují se tři hlavní typy krevních cév: artérie (tepny), vény (žíly) a kapiláry (vlásečnice).

1. Artérie (tepny) jsou cévy, které vedou ze srdce okysličenou krev do těla (v případě tělního oběhu), případně odkysličenou krev do plic (v případě plicního oběhu). Musí čelit vysokým tlakovým změnám, mají silné a pružné stěny. Vnitřní povrch je tvořen vrstvou endotelových buněk, vnější vrstvu pak tvoří silná vazivová tkáň s hladkou svalovinou. Takováto stavba umožňuje artériím se natahovat a smršťovat, a tak se přizpůsobit pulzním nárazům krve ze srdce. Velikost největší tepny (aorty) je přibližně 25 mm, větví se

však až na malé tepénky s vnitřním průměrem řádově v desítkách mikrometrů. Rychlost krve v aortě je běžně 40 – 50 cm/s [5], [6].

2. Kapiláry (vlásečnice) jsou velmi jemné a tenkostěnné cévy. V těle jsou nejhodněji zastoupeny a lze je nalézt takřka v každé tkáni. Propojují artérie a vény. Kapiláry vedou krev velmi blízko buněk tkání za účelem výměny plynů, živin a odpadních látek. Stěny kapilár se skládají pouze z tenké vrstvy endotelu (jedna vrstva epitelálních buněk). Jejich vnitřní průměr se pohybuje přibližně v rozmezí 5 – 20 μm , rychlost proudění krve cca 0,5 mm/s [5], [6].
3. Vény (žíly) jsou cévy, které od kapilár vedou krev zpět k srdci. Kapiláry se postupně spojují v drobné žilky a ty se dále spojují do větších žil. Jelikož artérie a kapiláry absorbují většinu energie pulzu ze srdce, jsou vény vystaveny poměrně malému tlaku. Proto je stěna vény oproti arterii mnohem tenčí, méně elastická a obsahuje méně svalových vláken. Aby bylo zabráněno zpětnému toku krve, některé vény obsahují kapsovitě chlopně (žíly dolních končetin) [5], [6].



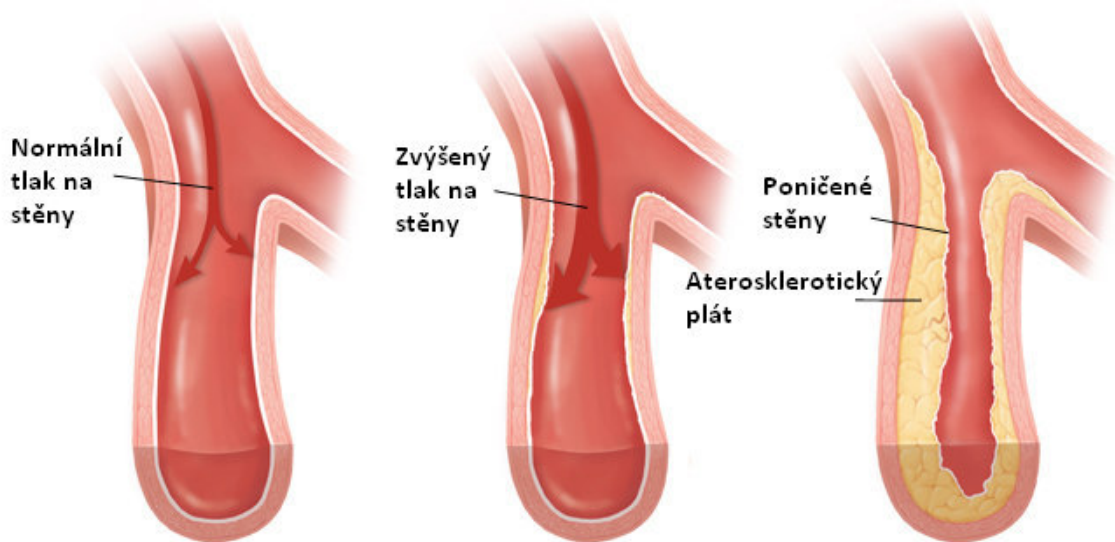
Obr. 2.2 Struktura cév – převzato a upraveno [8]

2.3 Stenóza

Stenóza je jednou z vad, které se mohou vyskytnout v cévách. Jedná se o místní zúžení cévy, které od určitého stupně může představovat závažnou překážku pro proudění krve.

Ke vzniku stenózy nejčastěji dochází v tepnách v důsledku aterosklerózy (kornatění cév). Při ní se tuk, buňky a jiné látky usazují uvnitř arteriálních stěn a dochází tak

tvrdnutí a zúžení cév. Cévní stenóza typicky postihuje tepny v mozku, srdci a dolních končetinách. V závažných případech může být příčinou mozkové mrtvice či infarktu myokardu [9].



Obr. 2.3 Vznik stenózy – převzato a upraveno [7]

2.4 Aneurysma

Aneurysma (výduť) představuje jakýsi protiklad stenózy. Jde o místní rozšíření tepny (obvykle na 1,5 násobek původního průměru). Stejně jako stenóza i aneurysma z fyzikálního hlediska představuje prvek s místní ztrátou. Avšak primární riziko představuje prasknutí aneurysmatu [10].

Aneurysma vzniká v místech s oslabenou cévní stěnou eventuálně v místech, kde se ve struktuře cévy vyskytuje nějaká abnormalita. Příčina vzniku může být vrozená nebo následkem onemocnění. Nejzávažnější případy představuje aneurysma břišní aorty, jehož příčinou je dnes nejčastěji ateroskleróza, a aneurysma mozkových tepen, které je obvykle vrozené. Ruptura takovýchto aneurysmat je příčinou velmi vážných krvácení. Mimo aterosklerózu a vrozené vady patří mezi rizikové faktory vysoký krevní tlak, zvýšené množství lipidů v krvi a kouření [10].

3 Optické metody měření rychlosti tekutiny

Metod měření rychlosti tekutiny je poměrně velké množství. Využít lze principiálně různě složitě mechanické přístroje či sondy nebo některou z optických metod.

V případě mechanických přístrojů, ať již se jedná o metodu žhavených drátků, jednoduché anemometry určené pro měření rychlosti větru, sondy fungující na principu měření tlaků nebo různě sofistikované průtokoměry, dochází k narušení proudu a měřit rychlost lze pouze v určitém místě. V mnoha případech nehrají jejich negativní účinky důležitou roli a stále se s výhodami používají.

Pokud je však potřeba měřit rozložení rychlosti či mapovat rychlostní pole v nějaké oblasti, využívají se metody optické. Právě v hemodynamice při měření rychlostí nebo vizualizaci proudění v modelech s velice různorodou geometrií jsou optické metody nepostradatelné. Zásadní výhoda těchto metod spočívá v tom, že nenarušují proudění a lze měřit a vyhodnocovat rychlostní pole v určité oblasti, nejen bodově. Na druhou stranu je nutné, aby měřený prostor byl průhledný. Optickými metodami samozřejmě není možné měřit rychlostní pole například v kovové trubce, proto se používají třeba modely ze skla, plexiskla či jiných průhledných materiálů. Další limitující faktory optických metod představují základní fyzikální zákony optiky. Veškeré lomy a odrazy světla při přechodu mezi prostředími s různými optickými vlastnostmi mohou výrazně zkreslit výsledky experimentu. Proto je důležité při přípravě experimentu brát tyto faktory v potaz a snažit se je co nejvíce minimalizovat.

3.1 Základní pojmy geometrické optiky

Limitujícími faktory optických metod měření rychlostí tekutin jsou odraz a lom světla. Dopadne-li světlo na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi, může dojít k jeho úplnému odrazu nebo k částečnému odrazu a lomu. Při odrazu se paprsek vrací zpět do prostředí ze kterého vyšel pod stejným úhlem a ve stejné rovině, v případě lomu se paprsek láme do druhého prostředí.

Problematika indexu lomu světla a základních zákonů geometrické optiky je zpracována převážně podle [4].

3.1.1 Index lomu světla

Optická prostředí jsou charakterizována tzv. indexem lomu světla. Jedná se o bezrozměrnou veličinu definovanou poměrem rychlosti světla ve dvou optických prostředích a je tedy pro danou dvojici prostředí charakteristická.

Rozlišuje se absolutní a relativní index lomu světla.

Absolutní index lomu je dán poměrem rychlosti světla ve vakuu c_s a rychlosti světla v daném optickém prostředí v . Jedná se o materiálovou konstantu a pro řadu látek je tabelován.

$$n = \frac{c_s}{v} \quad (1)$$

Relativní index lomu je dán poměrem rychlostí světla ve dvou optických prostředích v_1, v_2 . Nejedná se již o materiálovou konstantu, jelikož závisí na uspořádání.

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

Dále je možné jednoduchou úpravou rovnice (2) odvodit vztah pro relativní index lomu jako poměr absolutních indexů lomu.

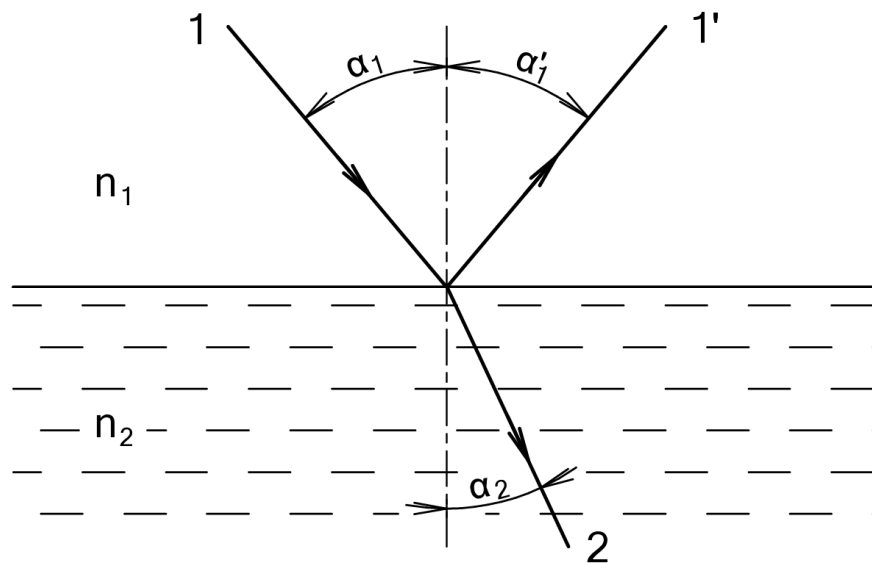
$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{v_1}{c}}{\frac{v_2}{c}} = \frac{\frac{c_s}{v_2}}{\frac{c_s}{v_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

3.1.2 Lom a odraz světla

V opticky homogenních prostředích postačují pro popis šíření světelného paprsku tři základní zákony geometrické optiky. Za opticky homogenní prostředí je považováno prostředí s konstantní hodnotou indexu lomu pro světlo určité vlnové délky.

1. Zákon přímočarého šíření světla

V opticky homogenním prostředí se světelný paprsek šíří přímočaře, po přímce.



Obr. 3.1 Odraz a lom světla

1 – dopadající paprsek, 1' – odražený paprsek, 2 – lomený paprsek

2. Zákon odrazu

Světelný paprsek dopadající na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi se částečně nebo úplně odráží. Úhel dopadu α_1 (viz obr. 3.1) se rovná úhlu odrazu α_1' .

3. Snellův zákon lomu

Paprsek dopadající na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi se částečně láme pod úhlem α_2 (viz obr. 3.1). Lom paprsku se v geometrické optice řídí Snellovým zákonem.

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (4)$$

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad (5)$$

Prostředí s nižší hodnotou indexu lomu se nazývá opticky řidší, prostředí s vyšší hodnotou indexu lomu se nazývá opticky hustší. Pokud světlo vstupuje z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího ($n_1 < n_2$), nastává lom ke kolmici ($\alpha_1 > \alpha_2$). Pokud světlo vstupuje z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího ($n_1 > n_2$), nastává lom od kolmice ($\alpha_1 < \alpha_2$).

K lomu světla od kolmice dochází pouze tehdy, je-li úhel $\alpha_2 < \pi/2$, z čehož plyne, že úhel dopadu musí být menší než určitá mezní hodnota, tedy pro úhel dopadu musí platit: $\alpha_1 < \alpha_m$.

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \pi/2 = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

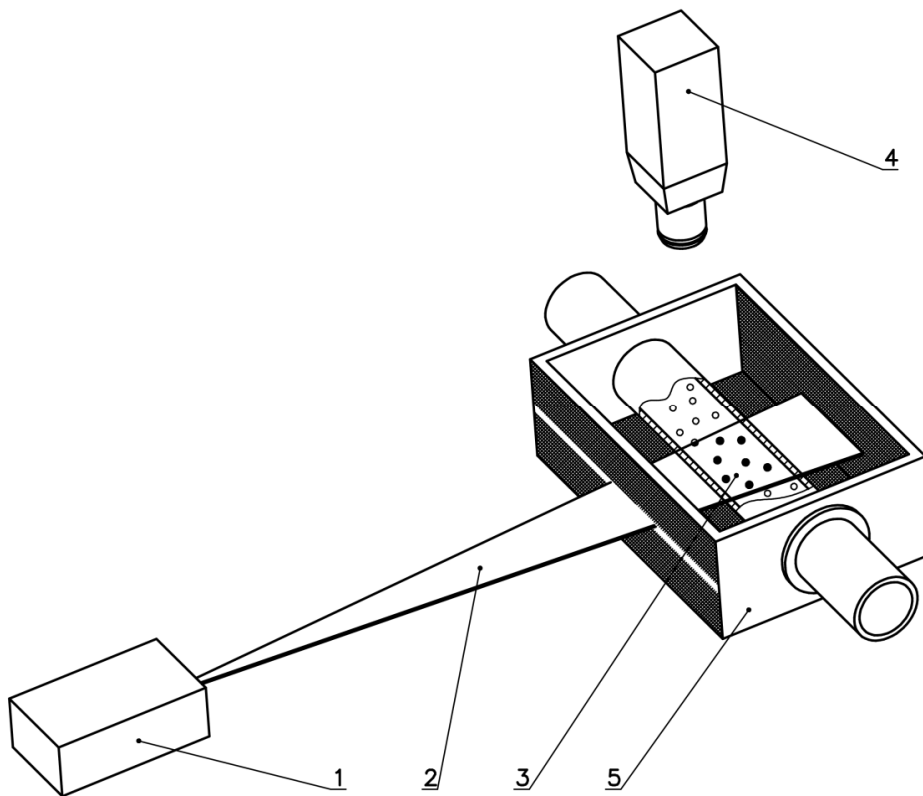
Pokud je úhel dopadu větší než mezní úhel, nedochází k lomu, ale pouze k odrazu, tzv. úplnému (totálnímu) odrazu.

3.2 PIV

PIV (particle image velocimetry) je optická měřicí metoda používající se především pro měření rychlostního pole proudící tekutiny. Jedná se o metodu nenarušující proudění (neinvazivní). Z naměřených hodnot lze mimo vyhodnocení rychlostního pole pak dále vytvořit např. vizualizaci proudění, případně lze metodu PIV modifikovat pro měření koncentrací (PLIF – planar laser induced fluorescence).

Standardně se metodou PIV měří dvě složky rychlosti v rovině. Pro takové měření je potřeba vhodný měřicí prostor s modelem, vhodné značkovací částice, laserová dioda nebo pulzní laser, vysokorychlostní CCD či CMOS kamera a vyhodnocovací software. Do měřené tekutiny se přidají značkovací částice se striktně danou geometrií, velikostí a hustotou. U značkovacích částic je snaha, aby měly ideálně stejnou hustotu jako daná tekutina a také jednotnou velikost. Dále je důležité, aby byly rovnoměrně rozptýleny, neshlukovaly se a neusazovaly na stěnách. Přítomnost částic mírně ovlivňuje proudění. Vhodně zvolené částice se budou pohybovat stejně s tekutinou a ovlivnění proudění bude zanedbatelné [11], [12].

Měřená oblast se prosvěcuje laserovým paprskem rozptýleným do roviny, tzv. laserovým listem. Tak dojde k osvětlení značkovacích částic v rovině určené laserovým listem. Kolmo na tuto rovinu je snímán obraz vysokorychlostní kamerou, která zaznamenává obraz osvětlených částic. Reálně se však na rozhraní prostředí v různé míře objevují odlesky, jejichž intenzitu a množství je snaha minimalizovat. Kamerou se pak nasnímá série obrazů předem určenou, a tedy známou, vzorkovací frekvencí, ze které se určí časový rozdíl mezi dvěma snímky. Ze série snímků a známé frekvence je software schopný vyhodnotit rychlostní pole [11], [12].



Obr. 3.2 Schéma metody PIV

1 – laser (dioda, pulzní), 2 – laserový list, 3 – měřicí prostor se značkovacími částicemi, 4 – vysokorychlostní kamera (CCD, CMOS), 5 – nádobka s tekutinou eliminující nežádoucí optické efekty (volitelné)

Existují i další složitější modifikace PIV metody, které jsou schopné měřit všechny tři složky rychlosti. Stereo PIV využívá dvou kamer, které snímají jednu rovinu pod předem definovanými úhly, z čehož je možné vyhodnotit tři složky rychlosti (2D3C – 2 dimenze (dimensions), 3 složky (components)). Složitější je metoda objemového PIV (Volumetric Velocimetry), označována také jako TOMO PIV, která měří tři složky rychlosti v objemu (3D3C) za použití dvou a více kamer s přesně daným rozmístěním, ty již nesnímají tenký laserový list (rovinu), ale silný list světla [12].

Při experimentech v uzavřených měřicích prostorech (např. skleněná trubka) je nutné brát na vědomí optické efekty, které vznikají na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými optickými vlastnostmi při průchodu světelného paprsku. Měření mohou velmi zneprůjemnit různé odlesky na hranicích měřeného prostoru (stěny skleněné trubky). Za použití fluorescenčních značkovacích částic, které při dopadu laserového paprsku emitují světlo o jiné vlnové délce, a vhodného světelného filtru

Ize odlesky zcela eliminovat. Větší problém představuje optické zkreslení, které vzniká lomem světelných paprsků na rozhraní dvou prostředí. Ideálně by měřeným modelem protékala tekutina o stejném absolutním indexu lomu, jako má měřený model, a v té samé tekutině by byl model ponořený. Zkreslení lze alespoň částečně eliminovat vložením skleněného modelu do nádoby s vodou (viz obr. 3.1), jedná se o jednoduché, bezpečné a levné řešení. V případě skleněného modelu je efektivnějším řešením, místo vody, použití roztoku jodidu sodného, který je schopný téměř úplně eliminovat nežádoucí optické efekty na rozhraní se sklem. Na druhou stranu však reaguje se vzduchem, na kterém degraduje, a leptá materiály na bázi silikonu. Aby k degradaci nedocházelo, je nutné s roztokem jodidu sodného pracovat v inertní atmosféře. Jedná se o zajímavé řešení, avšak poměrně omezené, složité a nákladné.

Shrnutí vlastností:

Optická metoda nenarušující proudění (neinvazivní)

Měření dvou či tří složek rychlosti

Měření v rovině nebo objemu

Velký rozsah měřených rychlostí (0 – supersonické)

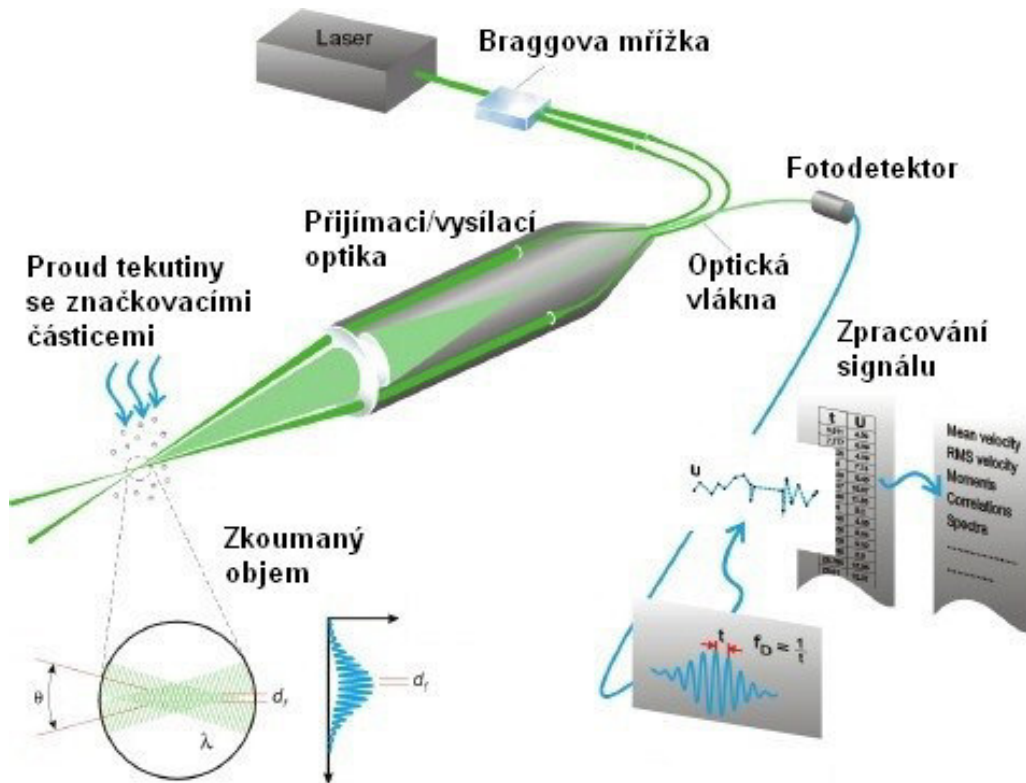
Měřicí prostory od 1 mm² až po 1 m²

Vyhodnocení rychlostních polí v rovině či objemu

3.3 LDA

LDA (Laser Doppler Anemometry), někdy též LDV (Laser Doppler Velocimetry), je optická měřicí metoda vhodná pro 1D, 2D i 3D bodové měření rychlosti ve vnějším i vnitřním proudění. Tato metoda nenarušuje proudění a je směrově citlivá, díky čemuž se používá k měření rychlostí zpětného proudění, v médiích s vysokou teplotou či chemicky reagujících a v rotačních strojích. Zkrátka v případech, kde je nevhodné nebo zcela nemožné použít mechanické senzory [13].

Základní uspořádání LDA se skládá z kontinuálního laseru, vysílací optiky (rozdělovač paprsků – často Braggova mřížka, zaostřovací čočka), přijímací optiky (zaostřovací čočka, interferenční filtr a fotodetektor) a zařízení pro vyhodnocení signálu. Stejně jako v metodě PIV je nutné použít značkovací částice.



Obr. 3.3 Schéma metody LDA – převzato a upraveno [14]

Principiálně je LDA metoda založena na Dopplerově efektu. Ze zdroje kontinuálního laseru je paprsek světla rozdělen, nejčastěji v Braggově mřížce, na dva paprsky o stejné intenzitě. Tyto dva paprsky jsou dále vedeny optickými vlákny a pomocí čočky zaostřeny do zkoumaného objemu, který bývá pouze pár milimetrů velký. Zde dochází ke změně intenzity světla vlivem interference mezi dvěma laserovými paprsky, což vede ke vzniku paralelních rovin s vysokou světelnou intenzitou [14].

Značkovací částice unášené tekutinou při průchodu zkoumaným objemem rozptylují světlo úměrně místní intenzitě světla. Informace o rychlosti proudění se získá právě díky rozptylu světla vlivem průchodu značkovací částice. Dochází ke kolísání intenzity odraženého světla, jejíž frekvence odpovídá dopplerovskému posunu mezi dopadajícím a rozptýleným světlem a je úměrná složce rychlosti kolmé k průsečíku laserových paprsků. Odražené světlo je soustředěno do fotodetektoru, převedeno na elektrický signál, který se dále zpracovává a vyhodnocuje se z něj informace o rychlosti proudění tekutiny [14].

4 Modely cév pro hemodynamiku

Modely používané při experimentálních měřeních v hemodynamice, ať se již jedná o modely cév či jiných problémů, lze rozdělit do dvou velkých skupin, a to na modely tuhé a pružné. Vlivem pružné stěny na proudění v modelu cévy se stenózou a porovnáním s tuhým modelem se mj. zabývá numerická simulace [3]. Mnoho experimentů je prováděno za pomoci optických měřicích metod, např. mapování rychlostního pole metodou PIV. Ve většině případů je tak společným požadavkem kladeným na pevné i pružné modely jejich průhlednost. Pokud není model striktně určen například pro tlaková měření, je nutné uvažovat jeho optické vlastnosti (průhlednost, index lomu světla).

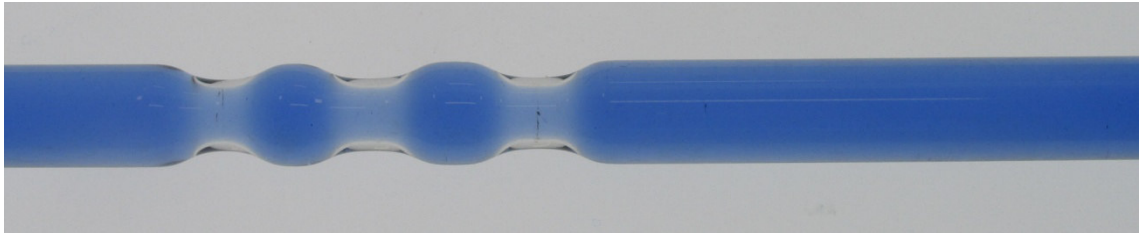
4.1 Tuhé modely

Jednodušší možností řešení modelových problémů v hemodynamice je pomocí tuhých modelů. Cévy v lidském těle však zcela tuhé nejsou, proto tyto modely nejsou v sofistikovanějších případech z hlediska autentičnosti příliš vhodné. Často se ale s výhodami používají. Některé úlohy není ani nutné řešit jinou cestou, modelují se totiž nejen cévy a různé vady vyskytující se v cévní soustavě, ale i jiné problémy související s hemodynamikou. I modely cév jsou ve velkém množství případů tuhé, nejsou sice tolik autentické, ale často zcela postačují pro pochopení některých zkoumaných hemodynamických jevů. Přínejmenším pro první experimentální měření a seznámení se s danou problematikou naprosto postačují.

Jak již bylo řečeno, pokud není model účelně vyráběn pouze pro tlaková měření, je nutné při výběru materiálu dbát na to, aby byl výsledný produkt průhledný. I pokud by byl model určen pro experimentální měření, která nevyžadují optický přístup, tak je vhodné zachovat jeho průhlednost. V budoucnu by jej tak bylo možné využít pro jiná měření, která optický přístup vyžadují. Měření tlaků v průhledném modelu lze provést stejně snadno jako v modelu neprůhledném, mapování rychlostního pole metodou PIV však v neprůhledném modelu provést nelze.

Pro výrobu geometricky nepřiliš složitých modelů se používá sklo a plexisklo. Velkou výhodou skleněných modelů je jejich odolnost proti poškrábání, chemická odolnost a tvarová stálost. Nevýhodou pak křehkost, z toho plynoucí nutná zvýšená

opatrnost při manipulaci, a složitost výroby. Skleněný model v běžné dílně nelze vytvořit a jeho výrobu je třeba zadat zručnému sklenáři.



Obr. 4.1 Skleněný model cévy se třemi stenózami (uvnitř obarvená tekutina)

Oproti tomu je plexisklo snadno obrobitelné a vhodnými lepidly se dá snadno spojovat, jednoduché modely tak lze vyrobit v běžně vybavené dílně. Navíc je oproti sklu poměrně odolné vůči rázům. Hlavní nevýhody plexiskla spočívají v horší chemické odolnosti a náchylnosti na poškrábání. Běžně se v hemodynamických experimentech používají tekutiny, které s plexisklem nereagují, často je to voda a různé vodné roztoky. Při použití agresivnějšího média je ale třeba brát na vědomí právě chemickou odolnost plexiskla. Opakovaným používáním těchto modelů navíc dochází, např. při čištění, k odírání stěn a postupnému zhoršování optických vlastností. Tlakovým měřením a mapováním rychlostního pole v několika variantách modelů stenóz z plexiskla se zabývá bakalářská práce [1].

V dnešní době velmi zajímavou možností výroby tuhých modelů přinášejí 3D tiskárny. Neprůhledné modely lze dokonce vytisknout celé a po úpravě povrchu použít. Průhledné modely není vhodné vyrábět přímo technologií 3D tisku především kvůli struktuře výtisku, vysoké drsnosti povrchu, a tudíž špatným optickým vlastnostem. Je však možné tisknout i geometricky složité objekty z vodou rozpustných materiálů a použít je jako jádro formy, do které se výsledný model odlije. U vytištěného jádra je třeba před použitím ve formě předem upravit povrch kvůli nevyhovující drsnosti. Povrch je možné upravit například natřením několika vrstev klovatiny, ta s výtiskem nereaguje, je vodou ředitelná a tvoří hladký lesklý povrch. Upravené jádro se vloží do formy, rozebíratelné nebo dočasné, a výsledný model se odlije z průhledného materiálu na bázi pryskyřice. Po zatuhnutí se odstraní forma a jádro se nechá rozpustit ve vodě.



Obr. 4.2 Odlitý tuhý model karotické bifurkace

4.2 Pružné modely

Pružné modely představují další krok blíže k reálnému chování cév v těle. Cévy zkrátka tuhé nejsou, často sice stačí problematiku řešit pouze pomocí tuhých modelů, v sofistikovanějších případech se však bez pružných modelů nelze obejít. Nároky kladené na tyto modely se takřka neliší od nároků kladených na modely pevné. Mimo to, že musí být pružné, musí opět být především průhledné a nesmějí chemicky reagovat s použitou tekutinou.

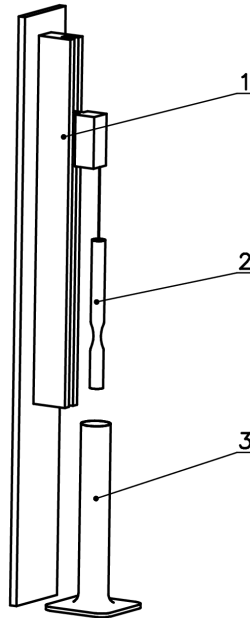
Pro výrobu pružných modelů lze využít tři různé postupy, konkrétně namáčení formy do materiálu a pomalé vytahování, odlévání do rotující formy a odlévání do dělené formy s jádrem.

4.2.1 Namáčení formy

Podobným způsobem, jakým se nanáší barva na různé díly v lázni, lze vytvářet i pružné modely. Tato metoda je založena na principu ulpívání materiálu na stěně formy.

Pro její realizaci je třeba vertikální posuvové zařízení, forma na model a nádoba s pružným materiálem v tekutém stavu. Forma se upevní na vertikální posuvové zařízení (posuvový šroub) vhodným způsobem tak, aby z ní mohl materiál volně odtékat. Nádoba s pružným materiálem, která musí být dostatečně vysoká, aby došlo k úplnému ponoření, se umístí pod formu. Po sestavení takového výrobního zařízení se celá forma namočí do nádoby s pružným materiálem a velmi malou rychlostí se z ní vytahuje, přičemž dochází k postupnému ulpívání a zasychání

materiálu na stěně formy. Následně je nutné nechat materiál ve formě dostatečně doschnout. V závislosti na požadované tloušťce stěny výsledného modelu a vlastnostech ředěného materiálu je možné proces namáčení a vytahování vícekrát opakovat, vždy ale s přestávkami na doschnutí materiálu.



Obr. 4.3 Obecné schéma zařízení pro výrobu modelu metodou namáčení formy

1 – lineární posuvové zařízení, 2 – zavěšená forma, 3 – nádoba s materiálem

Pro tuto metodu lze používat trvalé duté formy, ve kterých bude materiál uplívát na jejich vnitřní stěně. Tímto způsobem se zachovávají vnější rozměry výsledného modelu, které budou odpovídat vnitřním rozměrům formy. Vnitřní rozměry modelu se budou v závislosti na tloušťce stěny měnit. Jako formu je možné použít i tuhé modely z jiných experimentů.

Vhodným materiálem trvalé formy je sklo, které vyniká hladkým povrchem, pevností a chemickou odolností. Jelikož je používán pružný materiál často ředěn poměrně agresivními ředidly, je určitě namístě řešit i chemickou odolnost formy. U některých plastových materiálů může docházet k jejich leptání a rozpouštění.

Zásadní nevýhodou trvalých forem je složitost vyjímání modelu, z čehož následně plyne i omezená oblast použití. Trvalé formy jsou tak vhodné pouze pro modely s jednoduchou geometrií, např. rovné cévy, stenózy a nevelká aneurysmata. Jistým řešením by mohlo být použití dělené formy, avšak u jednoduchých geometrií by

přibyl další nežádoucí prvek v podobě dělicí roviny a z toho plynoucí nedokonalosti modelu. V případě složitějších geometrií by zase byla výroba formy náročná.

Zajímavé řešení přináší technologie 3D tisku. Těleso ve tvaru budoucího modelu lze vytisknout na 3D tiskárně z vodou rozpustného materiálu. Pružný materiál se následně bude nanášet na vnější stěny formy. Struktura povrchu výrobků z 3D tiskárny však není vyhovující, vytištěnou formu je tak ještě nutné upravovat. Stejně jako u jader pro výrobu tuhých modelů je vhodné vnější povrchy formy natřít několika vrstvami klovatiny. Jakmile je u formy docíleno hladkého povrchu, namáčí se do pružného materiálu stejným způsobem, jako v případě trvalých forem, jen s tím rozdílem, že materiál ulpívá na její vnější stěně. Po zatuhnutí materiálu stačí formu rozpustit ve vodě a odpadá tak poměrně zásadní problém tuhých forem v podobě složitého vyjímání modelu.

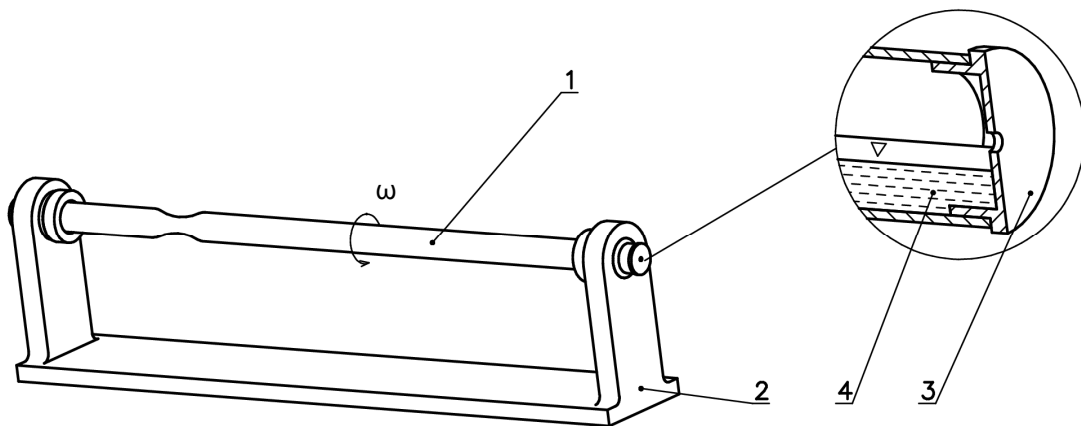
Na rozdíl od trvalých forem jsou zachovány vnitřní rozměry modelu, vnější rozměry se mění v závislosti na tloušťce stěny. Neoddiskutovatelnou výhodou rozpustných forem z 3D tiskárny je možnost výroby i geometricky složitých tvarů. Na druhou stranu je nutné pro každý model tisknout novou formu, její složitost a velikost je limitována možnostmi 3D tiskárny a vždy je třeba dodatečná úprava povrchu.

Tabulka 4.1 Shrnutí výhod a nevýhod skleněných a rozpustných forem

Skleněná forma		Rozpustná forma z 3D tiskárny	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
Pevnost	Křehkost	I pro složité geometrie	Na každý model nutná nová forma
Tvarová stálost	Složitější výroba (v běžné dílně takřka nemožná)	Oddělení modelu od formy	Drsnost povrchu (potřeba vyhladit)
Chemická odolnost	Vyjímání modelu	Snadné výroba	-
Hladkost povrchu	Pouze pro jednoduché geometrie	Snadná modifikace	-

4.2.2 Odlévání do rotující formy

Určitou část modelů lze vyrábět i metodou odlévání do rotující formy. Hned první úskalí spočívá v tom, že forma musí být rotačně symetrická. Postup výroby modelu touto metodou je principiálně velice jednoduchý. Do připravené rotačně symetrické formy se nalije značně zředěný pružný materiál tak, aby při horizontální poloze byla ve formě souvislá hladina. Následně se forma uzavře z obou stran víčkem s malým otvorem v úrovni osy rotace, aby bylo umožněno zasychání odlévaného materiálu. Úroveň hladiny odlévaného materiálu nesmí dosahovat k otvorům ve víčkách, jinak by hrozilo jejich ucpání a model by ve formě nezasychal. Takto připravená forma se upne do vhodného přípravku a nízkými otáčkami se nechá rotovat.



Obr. 4.4 Obecné schéma výroby modelu metodou odlévání do rotující formy

1 – forma, 2 – vhodný přípravek, 3 – víčko s otvorem, 4 – zředěný materiál

Ač se jedná principiálně o poměrně jednoduchou záležitost, její realizace již tak jednoduchá není a omezuje ji mnoho faktorů. První omezení spočívá v již zmíněné rotační symetrii formy, resp. výsledného modelu. Velký problém představuje odlévaný materiál, který je potřeba hodně zředit, aby tvořil souvislou hladinu i při rotaci a rovnoměrně se rozléval. Z toho plyne dlouhá doba postupného ulpívání a zasychání materiálu na stěně formy, a tedy dlouhá doba výroby modelu (až v řádech dnů). Ředidla používaná na ředění materiálů pro výrobu pružných modelů jsou navíc poměrně agresivní vůči plastům, což je první aspekt omezující materiály

formy. Navíc je vhodné, aby byla forma průhledná a dala se kontrolovat hladina odlévaného materiálu. Oba tyto aspekty předurčují za vhodný materiál formy sklo.

Jedná se tedy o metodu principiálně jednoduchou, na realizaci však již složitější. Vhodnou pouze pro jednoduché rotačně symetrické modely odlévané do skleněných forem. Navíc je tato metoda velice časově náročná.

4.2.3 Odlévání do dělené formy

Předešlé dvě metody byly založené na principu ulpívání materiálu na vnitřní či vnější stěně formy. U této metody se již jedná o odlévání v běžném slova smyslu. Používá se dělená dutá forma s jádrem. Dělená forma může být vyrobena z kovových materiálů či plastu, podmínkou opět zůstává, že materiál formy nesmí reagovat s odlévaným materiálem. Sklo pro výrobu formy již vhodné není, jednak kvůli nesnadné výrobě formy a jednak kvůli křehkosti. Jádro formy je opět vhodné vyrobit pomocí 3D tiskárny z vodou rozpustného materiálu a následně vyhladit jeho povrch. Forma se poté sestaví, vhodně do ní upevní jádro a naplní požadovaným materiálem. Po zatuhnutí materiálu se dutá forma rozebere, model vyjme a ve vodní lázni nechá rozpustit jádro.

U takto vyráběných modelů jsou vnější i vnitřní rozměry striktně dány rozměry formy a jádra. Je tak možné vyrábět i větší množství modelů jen s minimálními odchylkami. Jednoznačnou nevýhodou je značná složitost výroby takové formy. Nežádoucí je pak i přítomnost dělicí roviny, která je ve výsledku zodpovědná za nedokonalost modelu v podobě drobných podélných výronků.



Obr. 4.5 Dělená forma s jádrem – převzato a upraveno [2]

Výrobou pružných modelů odléváním do dělené formy se zabývá článek [2]. V tomto případě je dělená forma vyrobena z hliníku obráběním na CNC frézce

a jádro technologií 3D tisku. Jako odlévaný materiál je použit Dow Corning SYLGARD® 184 Silicone Elastomer. Zajímavým způsobem je vyřešeno plnění formy, z důvodu eliminace vzduchových bublin je vstřikovací zařízení skloněno pod úhlem 45° a forma následně plněna odspodu nahoru.



Obr. 4.6 Plnění dělené formy – převzato a upraveno [2]

5 Výroba pružných modelů

Výroba pružných modelů cév se stenózami byla řešena dvěma metodami, konkrétně odléváním do rotující formy a namáčením formy. Při jiných experimentech byly použity skleněné modely cév se stenózami, tyto skleněné modely se použily jako formy pro výrobu pružných modelů. Materiálem pro výrobu modelů byl Plasti Dip[®]. Jedná se o pružný materiál používaný pro úpravu a ochranu povrchů, mimo jiné se často používá ve výrazněji ředěné formě jako tekutá fólie na ochranu karoserí automobilů. Lze jej ředit běžně dostupnými ředidly a schne na vzduchu za běžných podmínek. Dodává se v široké škále barevných odstínů s různými efekty, ale také v transparentní variantě, která je vhodná pro výrobu pružných modelů.

5.1 Odlévání do rotující formy

Aby byla metoda odlévání modelu do rotující formy realizovatelná, bylo nutné vymyslet vhodný způsob, jakým formu rotovat kolem její osy. Nejprve bylo třeba navrhnout přípravek, ve kterém se bude forma otáčet. Většina jeho částí se vyráběla technologií 3D tisku.

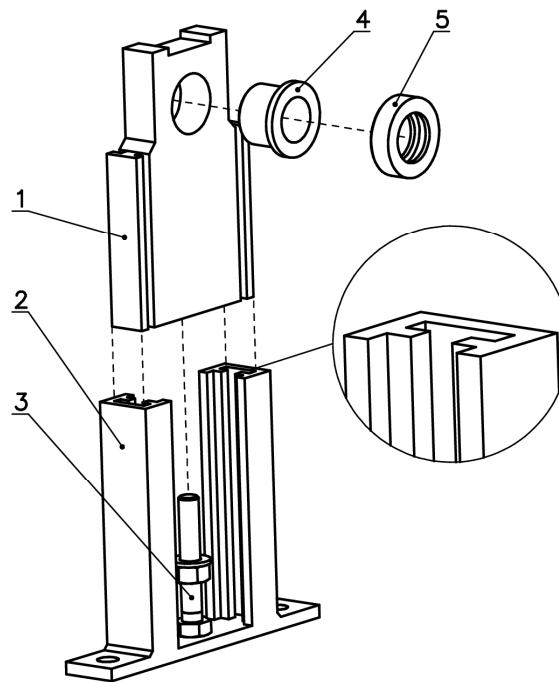
5.1.1 Návrh přípravku

Přípravek jako celek musel vykonávat tři základní funkce, které byly výchozími aspekty při návrhu.

1. Způsob uchycení formy v přípravku musí zajistit její otáčení kolem osy, ale zamezit jakémukoli jinému pohybu.
2. Zajištění rovnoměrné rotace formy nízkými otáčkami.
3. Sušení modelu ve formě.

Velká část dílů se následně tiskla na 3D tiskárně, k čemuž bylo nutné při návrhu přihlížet a jednotlivé díly navrhovat tak, aby byly na 3D tiskárně vyrobitelné. Celý návrh se provedl v CAD programu VariCAD, kde byly vytvořeny 3D modely jednotlivých komponent a složeny do sestav.

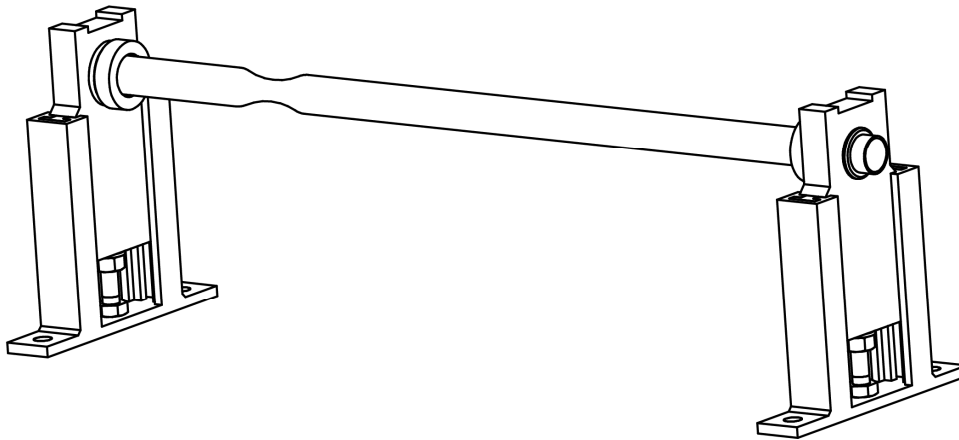
Pro uchycení přípravku byly navrženy dvoudílné stojany s možností výškového nastavení. Vnitřní díl stojanu je možné polohovat pomocí stavěcího šroubu s maticí a je ve vnějším dílu veden pomocí vodících drážek, detail drážky je zobrazen na obr. 5.1. V horní části vnitřního dílu je otvor. Pro docílení lepších kluzných vlastností není tento otvor přímo myšlený pro uchycení rotační formy, ale je připraven pro nalisování teflonového kluzného pouzdra. Ve výsledku se pak bude forma otáčet v teflonovém pouzdře se skvělými kluznými vlastnostmi. Zcela navrchu vnitřní části stojanu je široká drážka určená pro ustavení vodováhy mezi dvěma stojany. Pomocí stavěcích šroubů lze pak korigovat výšku stojanů a seřadit je tak, aby uchycená forma byla ve vodorovné poloze. Axiální pohyb formy je pak zajištěn dorazy s o-kroužky, které se na formu navlékají.



Obr. 5.1 Dvoudílný stojan

1 – vnitřní díl stojanu, 2 – vnější díl stojanu, 3 – stavěcí šroub s maticí, 4 – teflonové kluzné pouzdro, 5 – doraz s o-kroužkem

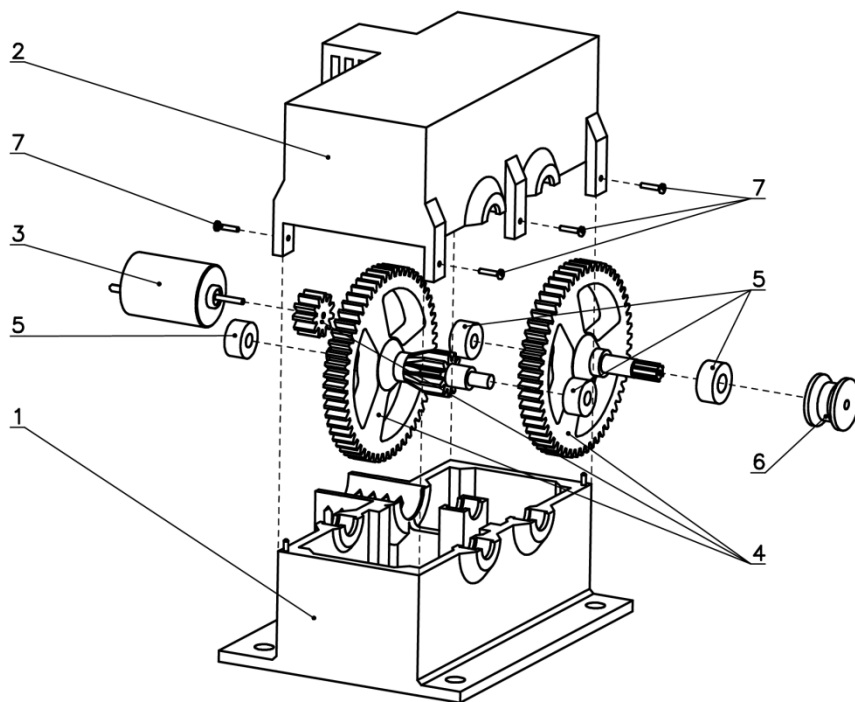
Ve výsledku je pak forma upevněna do dvou těchto stojanů.



Obr. 5.2 Forma uchycená ve stojanech

Rotaci formy bude zajišťovat elektromotorek prostřednictvím pryžového řemene. Malé elektromotory však dosahují velmi vysokých otáček (10 000 ot/min i více) a pouze pomocí snižování výstupního napětí laboratorního zdroje nelze docílit požadovaných nízkých otáček. Jistého zlepšení lze dosáhnout pomocí různě velkých řemenic, malé na motorku, velké na formě. Takovýmto způsobem ale není možné docílit dostatečně velkého převodového poměru, řemenice na formě by musela být velice rozměrná.

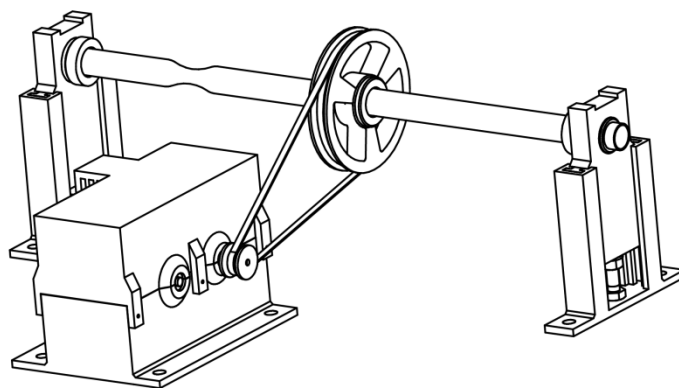
V rámci návrhu přípravku bylo nutné se ještě zabývat návrhem převodovky. Vzhledem k velmi malým silám a momentům nebylo potřeba řešit pevnostní návrh, snaha směřovala pouze za zachováním celočíselné osové vzdálenosti a celkového převodového poměru převodovky $i_p = 25$. Kvůli minimalizaci zástavbového prostoru byla převodovka koncipována jako dvoustupňová a při návrhu byl kladen důraz na to, aby jednotlivé díly byly vyrobitelné na 3D tiskárně. Uložení hřídelí ozubených kol je řešeno pomocí teflonových kluzných pouzder.



Obr. 5.3 Převodovka

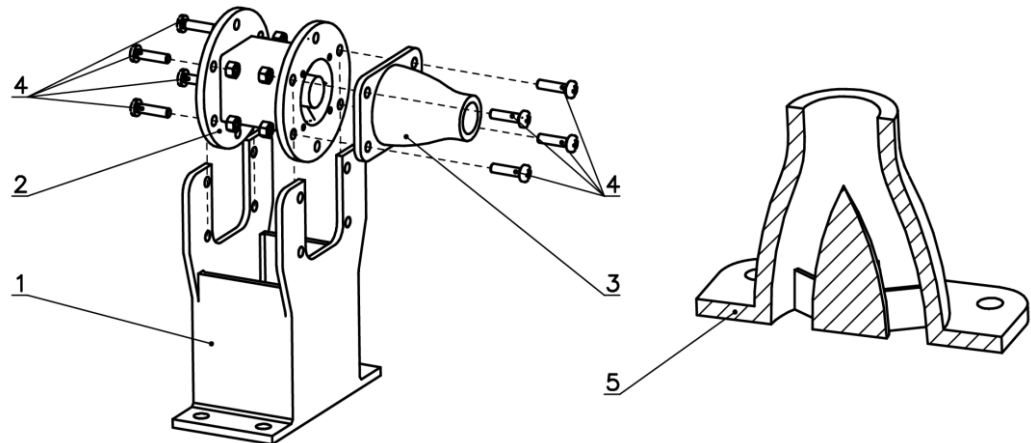
1 – spodní díl skříně, 2 – vrchní díl skříně, 3 – elektromotor, 4 – soustava ozubených kol, 5 – teflonová kluzná pouzdra, 6 – malá řemenice, 7- spojovací šrouby

Na výstupní hřídeli převodovky bude umístěna malá řemenice, velká řemenice bude navlečena na formě a zajištěna pomocí dvou o-kroužků. Mezi řemenicemi bude napnut pryžový řemínek. Rozměry řemenic byly navrženy tak, aby byl sekundární převodový poměr $i_s = 5$. Spolu s převodovým poměrem převodovky $i_p = 25$ bude celkový převodový poměr mezi výstupní hřídelí elektromotoru a rotační formou $i_c = 125$. Z toho plyne, že rychlost otáčení formy bude $125 \times$ menší než rychlost otáčení hřídele elektromotoru.



Obr. 5.4 Forma ve stojanech s pohonem

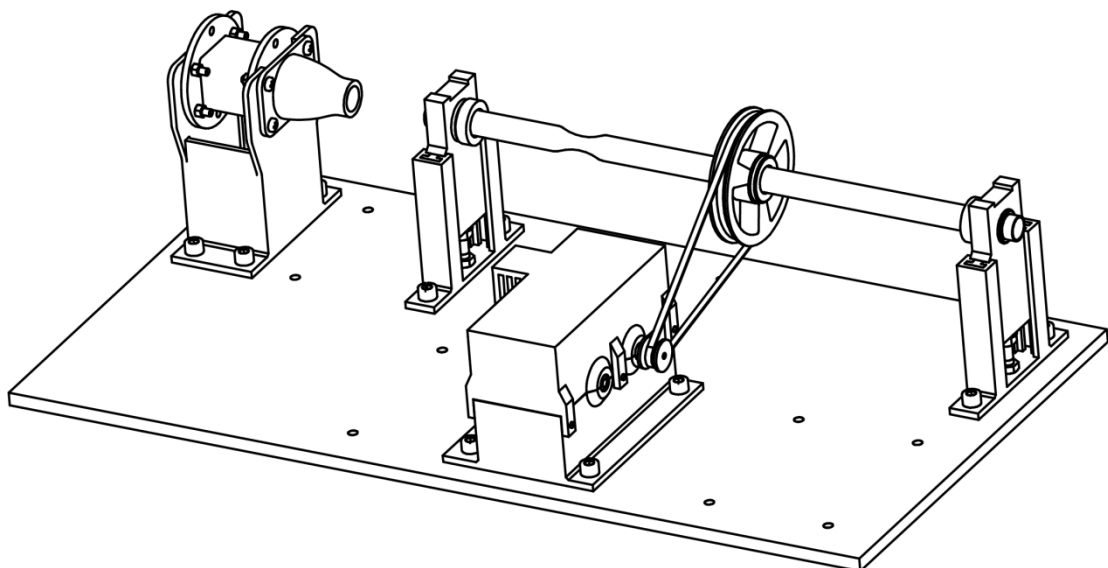
Sušení materiálu ve formě bude zajišťovat malý ventilátor. Na něj byl nejprve navržen jednoduchý stojan. Na výstupu z ventilátoru byl však značný úplav a bylo nutné tok vzduchu z ventilátoru ještě usměrnit. K ventilátoru proto byla navržena ještě tryska, která tento problém řeší a usměřňuje proud vzduchu do vnitřku formy.



Obr. 5.5 Ventilátor se stojanem a tryskou

1 – stojan, 2 – ventilátor, 3 – tryska, 4 – spojovací materiál, 5 – detail trysky v řezu

Veškeré komponenty přípravku byly navrženy tak, aby je bylo možné připevnit šrouby k základní desce s otvory, jejichž rozmístění definuje vzájemnou polohu jednotlivých prvků.



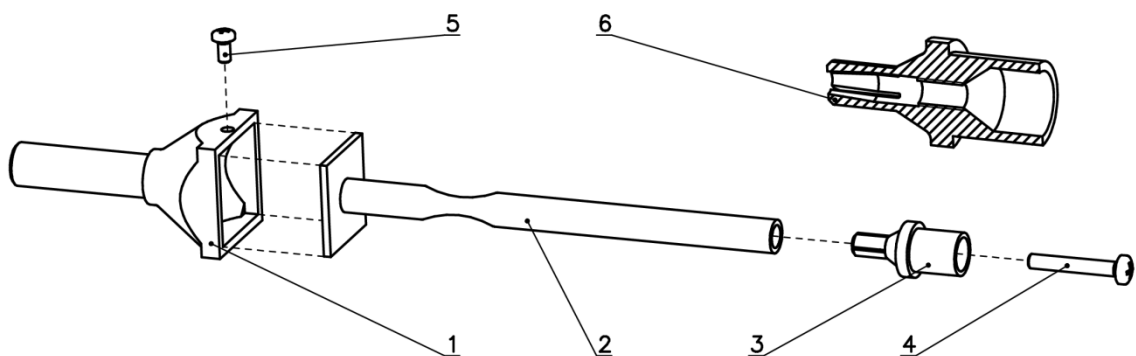
Obr. 5.6 Finální podoba přípravku

5.1.2 Modifikace přípravku

Navržený přípravek určený pro výrobu pružných modelů metodou rotačního odlévání do trvalé skleněné formy byl modifikován za účelem širšího využití. Konkrétně za účelem rovnoměrného sušení pružných modelů odlévaných na vnější stěnu rotačně symetrické formy z vodou rozpustného materiálu vyráběné technologií 3D tisku. Modifikace zahrnovala přestavbu přípravku a návrh uchycení nové formy.

Vodou rozpustná forma má tvar a rozměry vnitřku budoucího pružného modelu. Jelikož jsou příčné rozměry takové formy poměrně malé (do 20 mm), je nutné při 3D tisku z technologických důvodů tisknout základnu o větší ploše. Bez základny by tištěný objekt dostatečně nepřilnul k podložce a vznikl by vadný výrobek. Z důvodu úspory materiálu se forma vyrábí jako dutá.

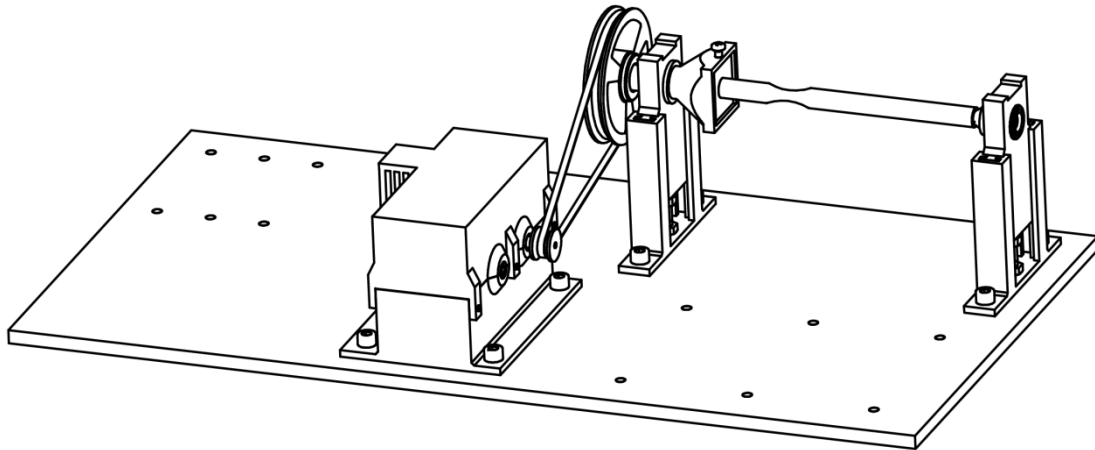
Při návrhu uchycení byla využita tištěná základna čtvercového tvaru. Z jedné strany bude forma uchycena z vnějšku za základnu, přenos momentu tak zajistí tvarový spoj a nebude nutné formu jakkoli svírat. Z druhé strany je forma dutá, pro uchycení byl navržen trn s rozevíracími čelistmi. Konfigurace uchycení je navržena tak, aby se jednotlivé komponenty nedotýkaly vnější části formy a bylo tak možné nanést materiál na formu v celé její délce.



Obr. 5.7 Uchycení rozpustné formy

1 – vnější uchycení (za základnu formy), 2 – rozpustná forma, 3 – rozevírací trn, 4 – šroub (na rozevření trnu), 5 – jistící šroub, 6 – detail rozevíracího trnu v řezu

Veškeré ostatní komponenty lze použít z původního přípravku, jen je třeba změnit jejich rozmístění na základní desce. Základní deska je navržena takovým způsobem, aby bylo možné měnit rozmístění komponent přípravku do několika různých konfigurací.



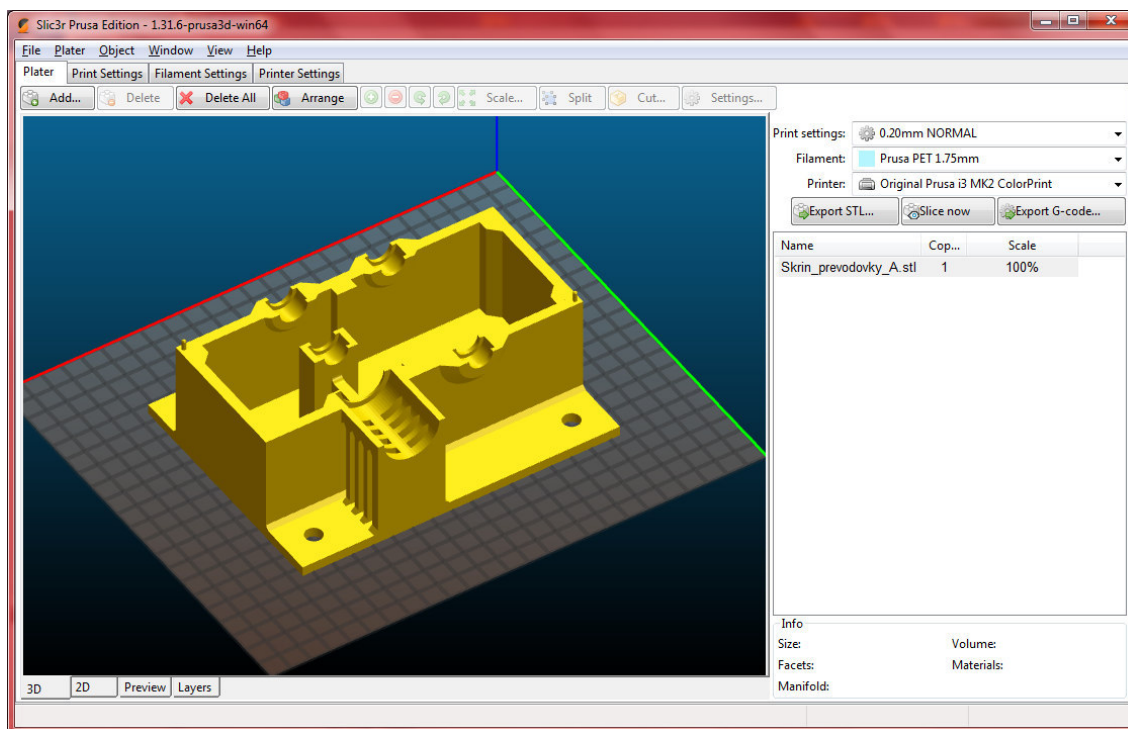
Obr. 5.8 Modifikovaný přípravek

5.1.3 Výroba přípravku

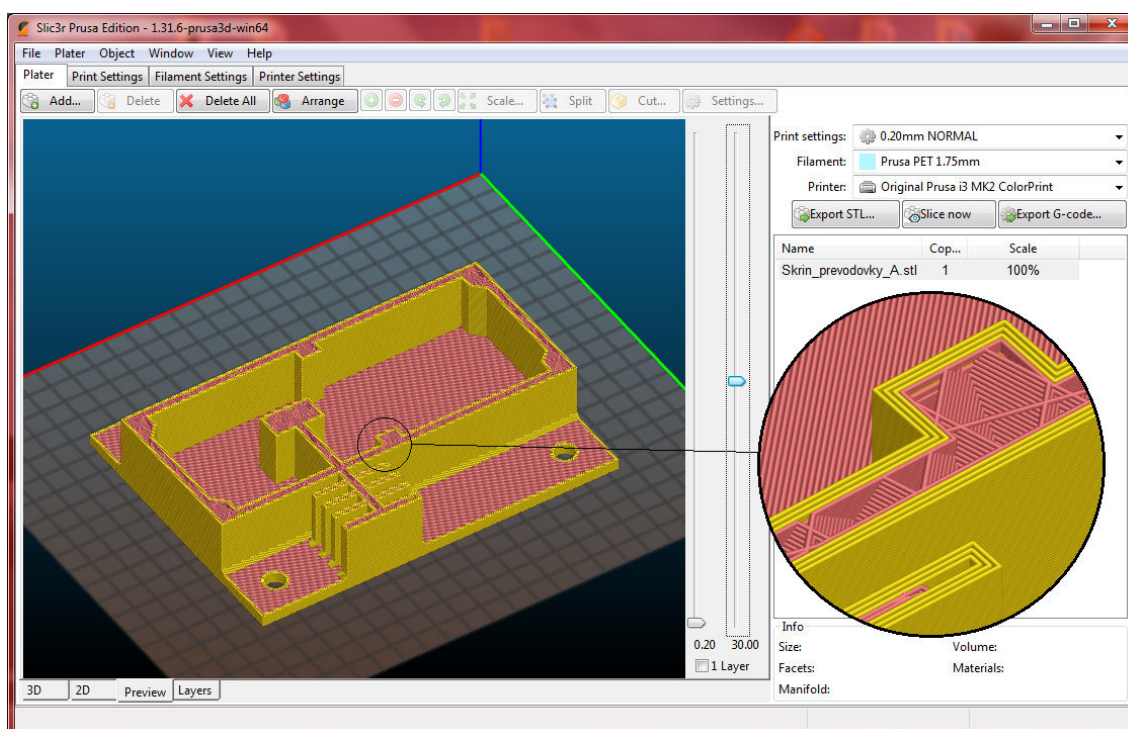
Většina dílů přípravku byla vyráběna technologií 3D tisku, pouze teflonová kluzná pouzdra soustružena a základní deska vyříznuta z plexiskla.

Před samotným 3D tiskem bylo potřeba zhotovit 3D modely jednotlivých komponent v CAD programu. Již ve fázi návrhu přípravku se vytvářely jednotlivé modely takovým způsobem, aby byly na 3D tiskárně vyrobitelné. Nebylo nutné dodatečně 3D modely upravovat, pouze po jednom uložit do vyžadovaného formátu STL.

Příprava tiskových dat z STL dokumentu byla prováděna v programu Prusa3D Slic3r MK2. Jedná se o software určený pro 3D tiskárny společnosti Prusa Research s.r.o., kde lze prostřednictvím virtuálního 3D rozhraní poskládat tištěné komponenty na tiskovou plochu a nastavit potřebné parametry samotného tisku. Po provedení potřebného nastavení a před generováním tiskových dat je možné využít velmi užitečnou funkci „rozřezání“ modelu. Jakmile je tento proces dokončen, je možné přepnout do náhledu rozvrstveného modelu a po jednotlivých vrstvách si prohlížet model přesně tak, jak by se měl tisknout. V tomto náhledu se zobrazují i veškeré nastavené podpory a výplně materiálu.



Obr. 5.9 Rozvržení modelu na tiskové ploše



Obr. 5.10 Náhled modelu před tiskem s detailem řezu

Na obr. 5.10 je zobrazen náhled modelu před tiskem, v tomto případě je nastavena 20% kubická výplň a 3 vertikální vrstvy plného materiálu.

Jakmile jsou provedeny veškeré potřebné úpravy a nastavení tisku, lze přistoupit k finální fázi přípravy tiskových dat a vygenerovat G-kód. Podle G-kódu bude následně řízen samotný tisk.

Tisk jednotlivých komponent probíhal na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK2. Jedná se o druhou generaci open-source tiskárny české společnosti Prusa Research s.r.o. s otevřeným designem, mnoha možnostmi nastavení a širokou škálou podporovaných materiálů.



Obr. 5.11 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2 [15]

Prvním tištěným dílem přípravku byl stojan na ventilátor (viz obr. 5.5). Na tisk byl použit momentálně dostupný materiál PLA (Polylactic acid), který vyniká vysokou pevností a díky velmi malé teplotní roztažnosti je vhodný i pro tisk velkých objektů. Z důvodu lepších mechanických vlastností byl však na tisk ostatních dílů zvolen materiál PET (Polyethylene terephthalate). Jedná se o velmi pevný a všestranný materiál s velkým tepelným odporem. Je doporučován jako velmi vhodný materiál pro tisk mechanických součástí. Vzhledem k malým deformacím se hodí i pro tisk velkých objektů [15].

Po uvážení byly dodatečně z důvodu vyšší pevnosti a trvanlivosti nahrazeny tištěné PET hřídele ozubených kol hřídelemi ocelovými.

Technologie 3D tisku byla zvolena především z důvodu možnosti v poměrně krátké době přípravek navrhnout a vyrobit. Nesporný přínos této technologie spočívá ve schopnosti vyrobit i tvarově velice složité objekty, které by jinými metodami byly těžko vyrobitelné nebo zcela nevyrobitelné, s poměrně malými nároky na přípravu. Úplně odpadá například nutnost vytváření výkresové dokumentace. Na druhou stranu se jedná o poměrně mladou technologii a stále trpí mnohými neduhy. Tištěné výrobky mají charakteristickou strukturu povrchu s patrnými vrstvami materiálu, což v mnoha případech může být nežádoucí a je nutné povrch dodatečně vyhladit. Dalším problémem je doba tisku, pokud je potřeba tisknout rozměrnější objekty s vyšší kvalitou povrchu, pohybuje se doba tisku řádově ve dnech. Posledním podstatnějším problémem je detekce chyb v průběhu tisku. Pokud v průběhu tisku nastane nějaká chyba, třeba se jedna vrstva správně nepoloží, tiskárna to nezjistí a dál tiskne podle vloženého programu. Může se stát, že ostatní vrstvy pokládá nevědomky do vzduchu a dlouhé hodiny dál tiskne vadný výrobek.

Kluzná pouzdra byla pak soustružena. Výroba pouzder neprobíhala paralelně s 3D tiskem, jelikož nebylo jasné, jak rozměrově přesné výtisky budou. Proto nejprve probíhal tisk dílů přípravku a následně se na míru soustružila kluzná pouzdra.

Posledním krokem byla výroba základní desky s otvory, na kterou se veškeré komponenty upevní. Deska byla navržena tak, aby bylo možné jednotlivé komponenty rozestavit do několika uspořádání, včetně modifikované varianty přípravku pro sušení modelů na rozpustné formě. Z navrženého 3D modelu byl využit vhodný 2D pohled a připraven dokument pro řezání laserem. Výroba základní desky probíhala na laserovém řezacím stroji z 10 mm silného plexiskla. Do otvorů byly na závěr vyříznuty závitové šrouby M8.

V této fázi již stačilo zkompletovat jednotlivé části přípravku, vhodně rozmístit na základní desku a připevnit šrouby. Pro pohon elektromotoru a ventilátoru byly použity dva laboratorní zdroje.

5.1.4 Výroba modelu odléváním do rotující formy

Výroba modelu touto metodou je poměrně složitá a přináší mnohá úskalí. Bylo nutné nejprve správně nastavit přípravek do vodorovné polohy, připravit materiál, použít správné množství materiálu, vše zkompletovat a následně volit vhodné otáčky a dobu rotace formy v přípravku. Z důvodu eliminace vzduchových bublin byl materiál před každým použitím opakovaně vakuován ($3 \times - 4 \times$ v případě neředěného Plasti Dipu, $2 \times$ v případě ředěného Plasti Dipu). Při výrobě jednotlivých modelů nebyly přímo měřeny otáčky elektromotoru, případně formy, ale pouze zaznamenáváno napětí na laboratorním zdroji.

V případě prvního modelu by použit neředěný Plasti Dip, otáčky formy odpovídaly napětí 1,8 V laboratorního zdroje (řádově desítky ot/min) a čas výroby byl 1 hodina. Zvolený čas byl však velmi krátký a model ve střední části formy nezaschnul.

Druhý model se vyráběl za stejných podmínek jako první, jen doba výroby se prodloužila na 2,5 hodiny. Materiál nebyl rovnoměrně rozlitý po obvodu, v zúženích nebyl zcela zaschlý a v jednom zúžení vzniklo větší duté místo.

Při výrobě třetího modelu došlo k výraznějšímu zvýšení otáček, cílem bylo otestovat vliv vznikající odstředivé síly na rovnoměrné rozlití materiálu po obvodu. Tato metoda se zcela neosvědčila, na stěnách vznikly malé bubliny a ve dvou místech dvě velké dutiny.

Vznik dutých míst byl pravděpodobně způsoben příliš hustým materiálem, na výrobu posledního modelu byl proto použit ředěný Plasti Dip. Forma se z obou stran ucpala víčky s otvory v ose rotace a množství materiálu bylo zvoleno tak, aby vytvořilo souvislou hladinu po celé délce modelu pod úrovní otvorů. Byly použity stejné otáčky motoru, jako v prvních dvou případech, došlo pouze k navýšení otáček ventilátoru. Čas výroby byl 6 hodin. Za tuto dobu však vznikl na stěnách formy pouze tenký film zaschlého materiálu.

Výroba modelu touto metodou by se musela řádově pohybovat ve dnech, nikoli hodinách. Současně s touto metodou probíhala výroba modelů metodou namáčení formy, která přinášela mnohem lepší výsledky a byla časově i technologicky

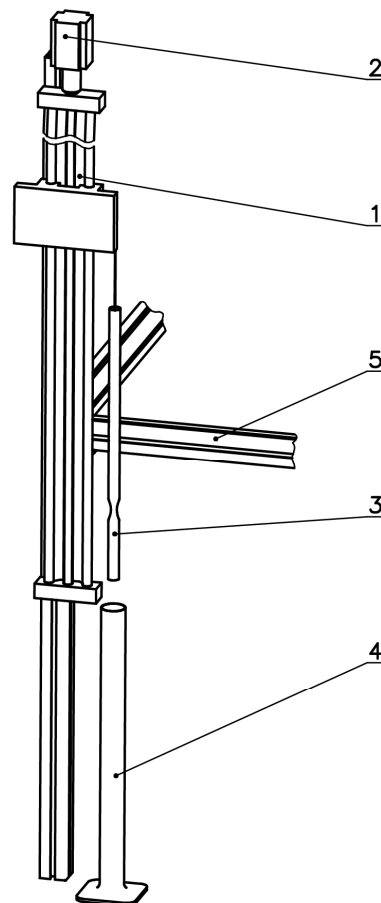
mnohem méně náročná. Postup výroby jednotlivých modelů a dosažené výsledky shrnuje tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Modely vyráběné metodou odlévání do rotující formy

Model č.	Napětí lab. zdroje (V)		Poznámky
	motor	ventilátor	
1	1,8	6,4	Forma s 1 stenózou, neředěný Plasti Dip, doba výroby 1 hodina. Krátká doba, model ve střední části nezaschl.
2	1,8	6,4	Forma se 3 stenózami, neředěný Plasti Dip, doba výroby 2,5 hodiny. Materiál nerovnoměrně rozlitý po obvodu, v zúžení ne zcela zaschlý, vzniklo duté místo.
3	8,6	9,2	Forma se 2 stenózami, neředěný Plasti Dip, doba výroby 3 hodiny. Odstředivé odlévání, velké množství bublin, dvě velké dutiny.
4	1,8	10,4	Forma se 3 stenózami, ředěný Plasti Dip (310 ml PD + 100 ml ředidla), doba výroby 6 hodin. Vznikl pouze tenký film na stěnách, byla by třeba mnohem delší doba v přípravku.

5.2 Namáčení formy

V tomto případě, na rozdíl od předchozí metody, nebylo potřeba vyrábět žádný přípravek, celé zařízení na vytahování formy z materiálu bylo složeno z dostupných komponent. Jako rám zařízení posloužila konstrukce z hliníkového konstrukčního systému Alutec. Na rám se upevnilo lineární posuvové zařízení v podobě vertikálně umístěného posuvového šroubu poháněného krokovým motorem. Součástí krokového motoru bylo i řízení, prostřednictvím kterého bylo možno mj. nastavit rychlost posuvu a koncovou polohu posuvné matice. Vhodným způsobem, nejčastěji pomocí tenkého drátku, se k posuvné matici připevnila forma, pod kterou se umístila nádoba s pružným materiálem v tekutém stavu.

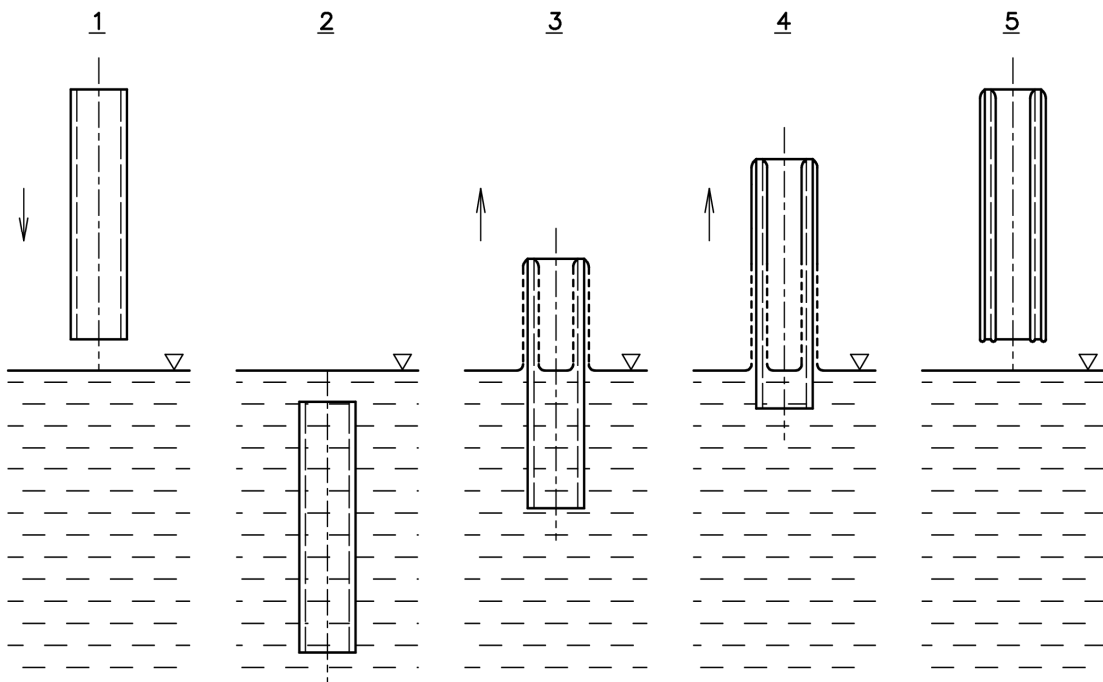


Obr. 5.12 Schéma zařízení pro výrobu modelu metodou namáčení formy

1 – lineární posuvové zařízení (posuvový šroub, posuvná matice, vedení), 2 – krokový motor, 3 – forma, 4 – nádoba s materiálem Plasti Dip, 5 – konstrukce Alutec

5.2.1 Výroba modelu namáčením formy

Principiálně je tato metoda velice jednoduchá, zahrnuje pouze namočení formy do materiálu a následné pomalé vytahování, přičemž materiál ulpívá na stěně formy. Tento proces lze následně s přestávkami na dosychání modelu vícekrát opakovat. Jako formy byly použity skleněné modely se stenózami.



Obr. 5.13 Princip výroby modelu namáčením formy

1 – namáčení formy, 2 – forma zcela ponořena, 3 – vytahování formy, materiál ulpívá na stěnách, 4 – vytahování formy, materiál ulpívá na stěnách a ve vrchní části formy již zasychá, 5 – forma zcela vytažena, materiál zaschlý

U této metody bylo potřeba se vypořádat se dvěma podstatnými problémy, a to eliminací vzduchových bublin v materiálu a volbou vhodné rychlosti vytahování formy. Problém eliminace vzduchových bublin je velice zásadní, protože každá vzduchová bublina v materiálu přináší riziko, že bublina ulpí na stěně formy a po zaschnutí zůstane v modelu. Každá bublina přítomná ve stěně modelu zhoršuje jeho optické vlastnosti a při experimentech může způsobovat zkreslení, nežádoucí odlesky a zhoršení průhlednosti.

První pružný model vyrobený touto metodou byl vyráběn vytahováním z ředěného Plasti Dipu rychlostí 30 mm/min, namáčení bylo pětkrát opakováno s pauzou 10 minut na doschnutí materiálu na stěnách. Rozředění Plasti Dipu částečně

vyřešilo problém se vzduchovými bublinami. Bubliny, které v materiálu zůstaly, byly snadno odstraněny pomocí vývěvy a vakuové nádoby. Na druhou stranu však rozředěný materiál špatně ulpíval na stěnách. Výsledkem byl model se skvělými optickými vlastnostmi, ale příliš tenkou stěnou.

Problém s malou tloušťkou stěny vyřešilo použití neředěného Plasti Dipu, v tomto případě bylo však problematické se vypořádat se vzduchovými bublinami. Materiál bylo nutné opakovaně vakuovat ($3 \times - 4 \times$), a to ve zvláštní nádobě, jelikož nádoba určená pro namáčení formy byla příliš vysoká a do vakuové nádoby se nevešla. Jakmile byly odstraněny bubliny z materiálu ve zvláštní nádobě, bylo ho potřeba opatrně přelit do nádoby určené pro namáčení formy. K přelévání materiálu posloužila injekční stříkačka, tou bylo možné materiál opatrně nabírat a následně pomalu vstříkovat do druhé nádoby. V injekční stříkačce bylo navíc možné materiál kontrolovat, zda opravdu neobsahuje bubliny. Jako ideální řešení se ukázalo pomalu dávkovat materiál z injekční stříkačky na stěnu nádoby a nechat jej po stěně stékat na dno. Na přípravu bylo toto řešení poměrně zdlouhavé, ale vyřešilo problém se vzduchovými bublinami v neředěném Plasti Dipu.

Namáčením a vytahováním formy z neředěného Plasti Dipu vzniklo 5 různých modelů. Rychlost vytahování formy byla snížena na 12 mm/min. Byly použity tři formy s různou geometrií (céva s jednou stenózou, se dvěma stenózami, se třemi stenózami). Počet opakování procesu namáčení a vytahování se také u některých modelů lišil, tudíž vznikly modely s různou tloušťkou stěny. V případě výroby modelů, u kterých docházelo k vícenásobnému namáčení formy, se navíc zjišťovala vhodná metoda a doba sušení materiálu mezi operacemi. Jako nejvhodnější se ukázalo být náporové sušení pomocí ventilátoru po dobu alespoň 20 minut. Do materiálu posledního vyráběného modelu byly přimíchány rhodaminové částice za účelem lepší detekce stěny při experimentálním měření.

Postup výroby a vlastnosti modelů vyrobených metodou namáčení formy shrnuje tabulka 5.2.

Tabulka 5.2 Modely vyráběné metodou namáčení formy

Model č.	Počet namáčení	Rychlost vytahování	Poznámky
1	5	30 mm/min	Forma se 3 stenózami, ředěný Plasti Dip (310 ml PD + 100 ml ředidla), sušeno mezi operacemi 10 min bez ventilátoru. Výborné optické vlastnosti, stěna bez bublin, avšak příliš tenká.
2	2	12 mm/min	Forma se 3 stenózami, neředěný Plasti Dip, sušeno mezi operacemi 10 min bez ventilátoru. Výborné optické vlastnosti, stěna bez bublin, dostatečně silná, tloušťka stěny se však po délce mění (nedostatečné sušení mezi operacemi).
3	2	12 mm/min	Forma se 1 stenózou, neředěný Plasti Dip, sušeno mezi operacemi 20 min s ventilátorem. Výborné optické vlastnosti, stěna bez bublin, dostatečně silná.
4	1	12 mm/min	Forma se 3 stenózami, neředěný Plasti Dip. Výborné optické vlastnosti, stěna bez bublin, poměrně tenká.
5	1	12 mm/min	Forma se 2 stenózami, neředěný Plasti Dip. Výborné optické vlastnosti, stěna bez bublin, poměrně tenká.
6	3	12 mm/min	Forma s 1 stenózou, neředěný Plasti Dip, přidány rhodaminové částice, sušeno mezi operacemi 20 min s ventilátorem. Zhoršené optické vlastnosti (vliv tlusté stěny a přidávaných částic), stěna bez bublin, silná.

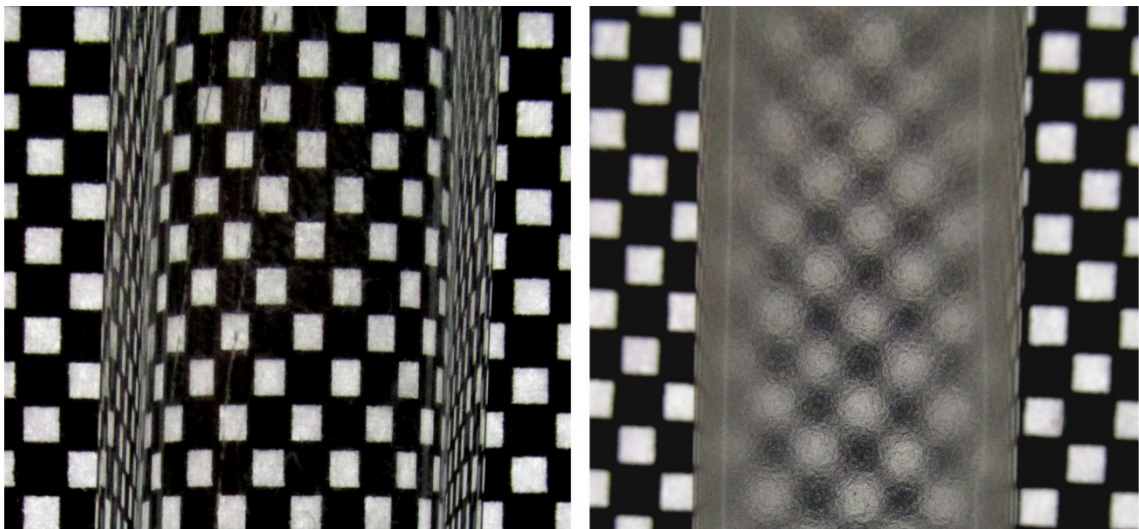
6 Experimentální měření

Vhodnost vybraných modelů byla ověřována experimentálně metodou PIV. Před měřením bylo třeba sestavit měřící trať a vyřešit problém zakomponování modelu do tratě. Dále byly posuzovány optické vlastnosti modelů, především optické zkreslení vlivem zakřivené stěny.

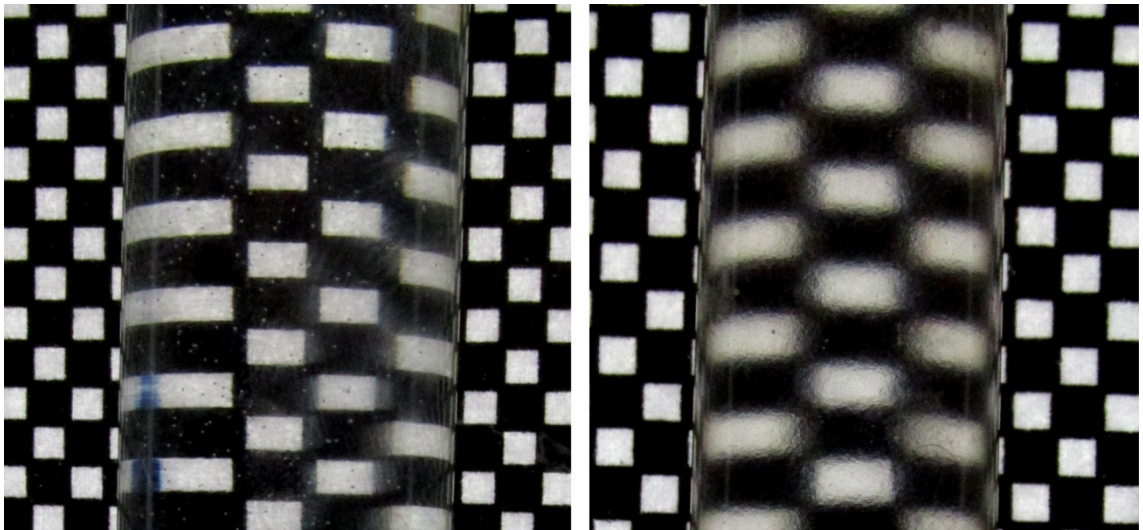
6.1 Optické vlastnosti modelu

Z hlediska optických vlastností byl posuzován model č. 6 (viz tabulka 4.1). Jedná se o model s největší tloušťkou stěny, do které byly navíc přidány rhodaminové částice, což dohromady zhoršuje průhlednost stěny. Z hlediska optických vlastností se v porovnání s ostatními vyrobenými modely jedná o nejhorší případ.

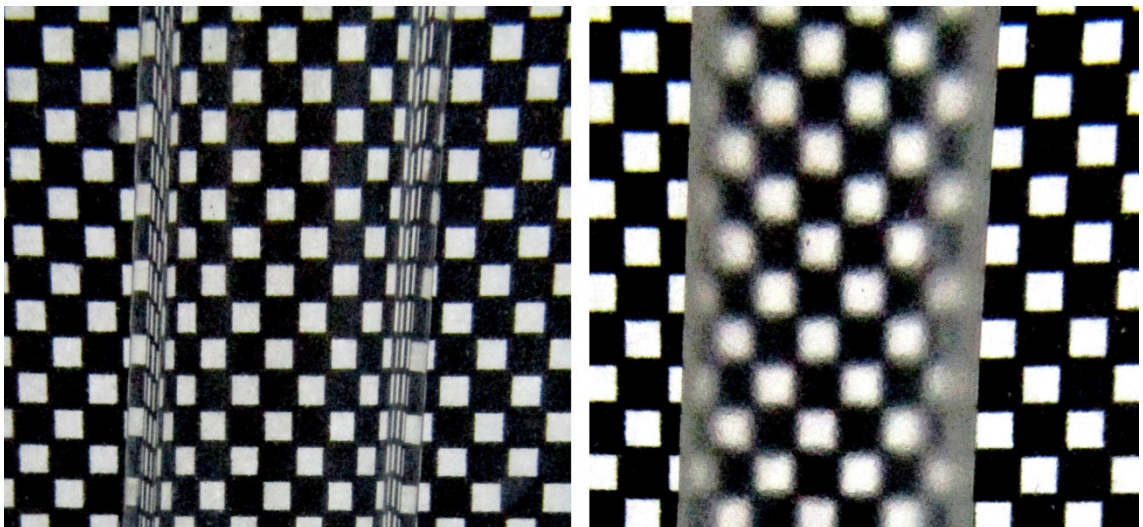
Na vzduchu je stěna modelu značně zakalená, což je důvodem zhoršené průhlednosti a optického zkreslení. Při bližším pohledu však v porovnání s tuhým skleněným modelem nedochází k tak rapidnímu zkreslení u stěn vlivem zakřivení. Po naplnění modelu vodou, došlo ke zlepšení průhlednosti, ale také k výraznému optickému zkreslení vlivem přechodu mezi prostředím s různými indexy lomu (voda-vzduch, vliv stěny modelu je zde zanedbatelný). Jakmile byl model i jeho okolí vyplněno vodou, došlo ke zlepšení průhlednosti i optického zkreslení. Na rozdíl od skleněného modelu není optické zkreslení téměř pozorovatelné.



Obr. 6.1 Porovnání modelů, uvnitř – vzduch, okolí – vzduch
vlevo – skleněný model, vpravo – pružný model



Obr. 6.2 Porovnání modelů, uvnitř – voda, okolí – vzduch
vlevo – skleněný model, vpravo – pružný model



Obr. 6.3 Porovnání modelů, uvnitř – voda, okolí – voda
vlevo – skleněný model, vpravo – pružný model

Na obr. 6.3 je patrné zlepšení optických vlastností pružného modelu při použití vody uvnitř i v okolním prostředí. Zkreslení vlivem zakřivení stěny je oproti skleněnému modelu minimální, ale průhlednost stále není ideální, patrně vlivem tloušťky stěny a přidávaných rhodaminových částic. Ostatní modely vykazovaly o poznání lepší optické vlastnosti.

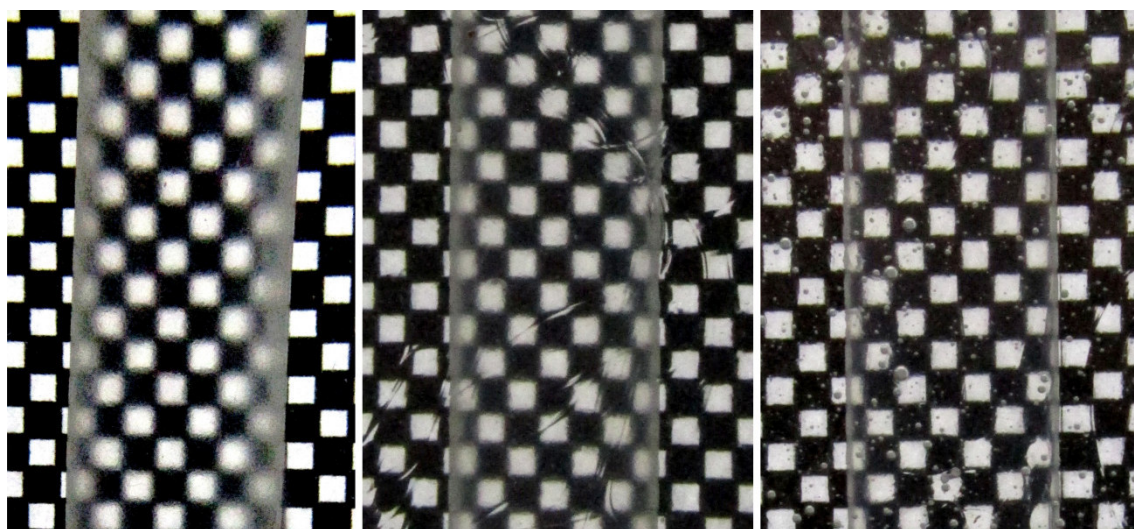
Další zlepšení optických vlastností by přineslo použití tekutiny s vyšší hodnotou indexu lomu, ideálně se stejnou jako má Plasti Dip v tuhém stavu. Hodnota indexu

lomu světla Plasti Dipu však není udávána, je pouze známa hodnota indexu lomu hlavní složky obsažené v Plasti Dipu $n = 1,56$. Pro zlepšení optických vlastností byl použit 80% roztok cukru ve vodě a glycerol. Tabulka 4.1 shrnuje indexy lomu světla použitých tekutin (vakuum pro úplnost).

Tabulka 6.1 Indexy lomu světla použitých tekutin

Látka	Index lomu světla (absolutní)
Vzduch	1,00029
Voda	1,33
80% vodný roztok cukru	1,49
Glycerol	1,47
Vakuum	1

Jak v případě použití 80% cukerného roztoku (uvnitř i vně modelu), tak i v případě použití glycerolu došlo ke znatelnému zlepšení optických vlastností. Stěny modelu se v cukerném roztoku jevíly pouze mírně zakaleně, v porovnání s vodou se průhlednost zlepšila. V případě glycerolu došlo ještě k výraznějšímu zlepšení. Vliv použitých kapalin na optické vlastnosti modelu je demonstrován na obr. 6.4, vady na prostředním obrázku jsou způsobeny vzniklými mapami na hladině roztoku, vady na obrázku vpravo jsou vzduchové bubliny v glycerolu.

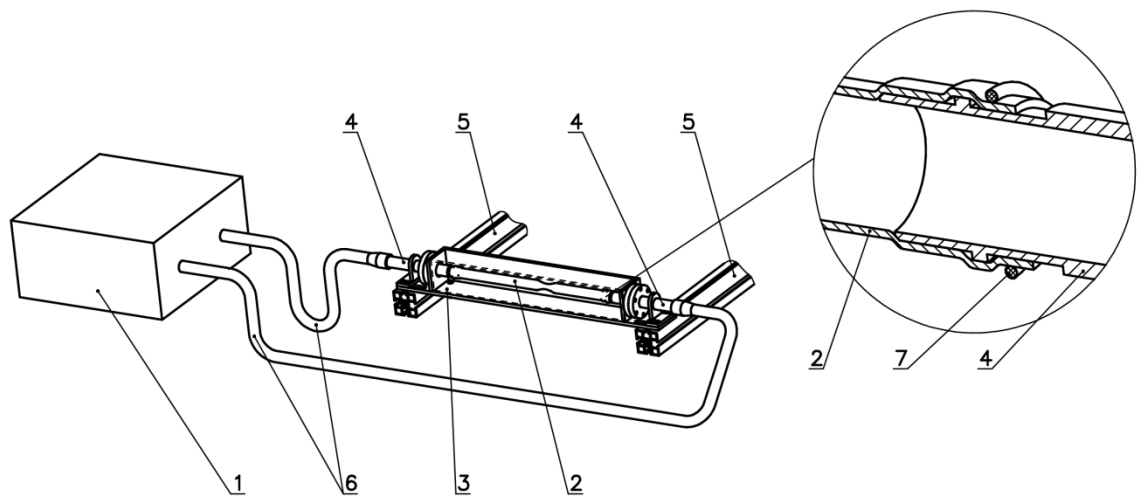


Obr. 6.4 Porovnání optických vlastností modelu v různých tekutinách

levo – model ve vodě, uprostřed – model v 80 % vodném roztoku cukru, vpravo – model v glycerolu

6.2 Měřicí trať

Pro experimentální měření metodou PIV byla sestavena měřicí trať. O pohon trati se staralo počítačem řízené čerpadlo, které bylo propojeno s vhodně upevněným modelem pomocí hadic. Model byl v trati upevněn na dvou trnech z plexiskla s vhodně upravenými konci a zajištěn o-kroužky (viz detail na obr. 6.5). Model byl pak umístěn ve speciálně navržené a vyrobené nádobě, do které bylo možné nalít tekutinu, a tak zlepšit optické vlastnosti modelu pro PIV měření (viz kapitola 6.1).



Obr. 6.5 Schéma měřicí trati

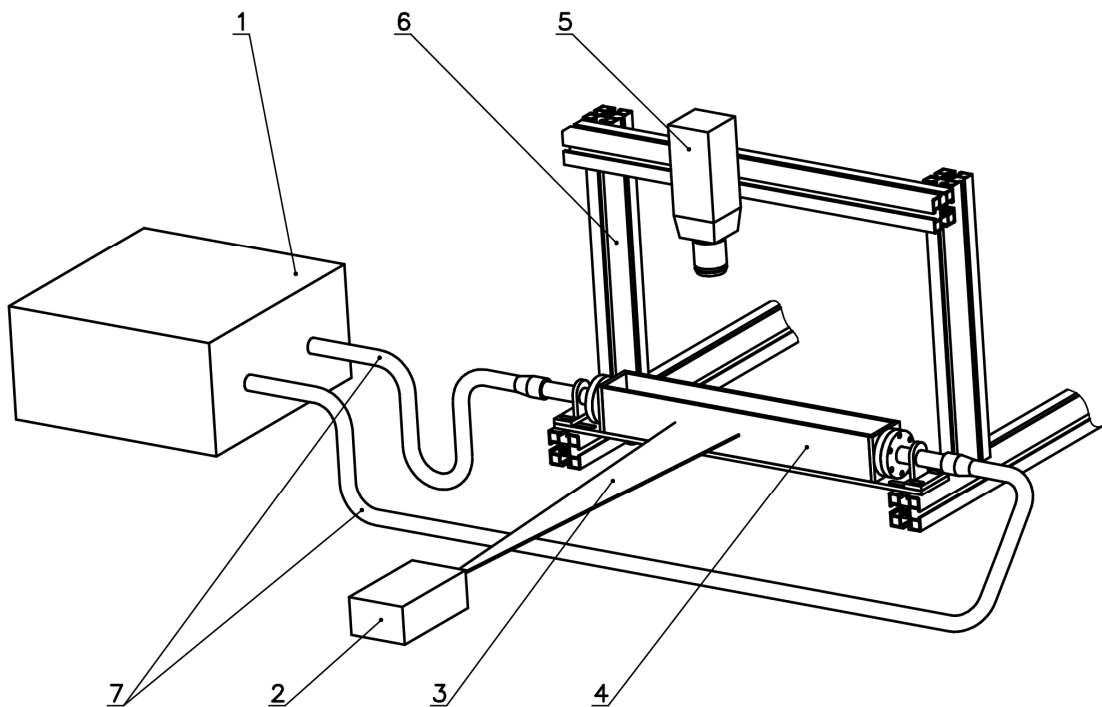
1 – čerpadlo, 2 – pružný model, 3 – nádobka, 4 – upeňovací trn, 5 – konstrukce Alutec, 6 – propojovací hadice, 7 – o-kroužek

6.3 Experiment

Pro ověření vhodnosti vyrobených modelů bylo provedeno experimentální měření metodou PIV. Pro experiment byly vybrány modely č. 3 a č. 6 (viz tabulka 5.2) vyráběné metodou namáčení formy. Jedná se o modely se silnější stěnou, v případě modelu č. 3 byla při výrobě forma namáčena dvakrát, v případě modelu č. 6 třikrát. Do stěny modelu č. 6 byly navíc přidány rhodaminové částice za účelem její snazší detekce.

Při experimentálním měření PIV byly použity dva pulzní lasery synchronizované s vysokorychlostní kamerou. Paprsky obou laserů byly soustředěny do jednoho místa a optickou soustavou rozptýleny do roviny (laserový list) procházející osou měřeného modelu. Kamera byla umístěna nad modelem kolmo na rovinu

laserového listu. Při použití pulzního laseru nesnímá kamera obraz kontinuálně, ale je s laserem synchronizovaná a snímá obraz vždy v okamžik pulzu. Dva pulzní lasery vytvoří dva po sobě jdoucí záblesky za velmi krátký časový okamžik a kamera zaznamená dva obrazy, tento proces se následně mnohokrát opakuje. Software pak vyhodnocuje rychlosti ze série dvojic snímků.



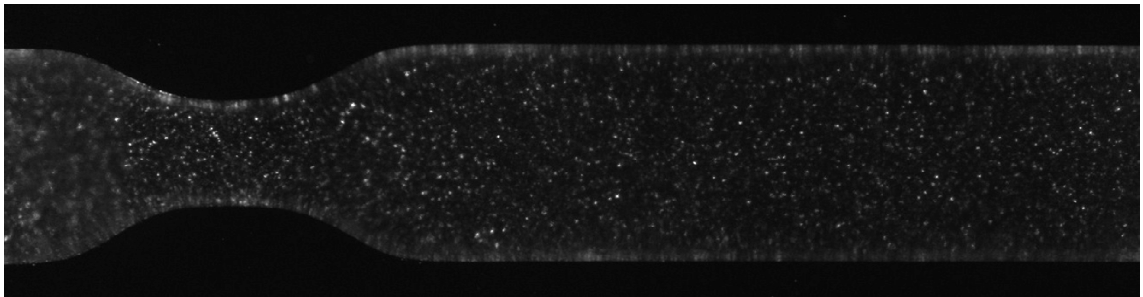
Obr. 6.6 Schéma tratě PIV

1 – čerpadlo, 2 – pulzní laser, 3 – laserový list, 4 – nádobka s upevněným modelem, 5 – vysokorychlostní kamera, 6 – konstrukce Alutec, 7 – propojovací hadice

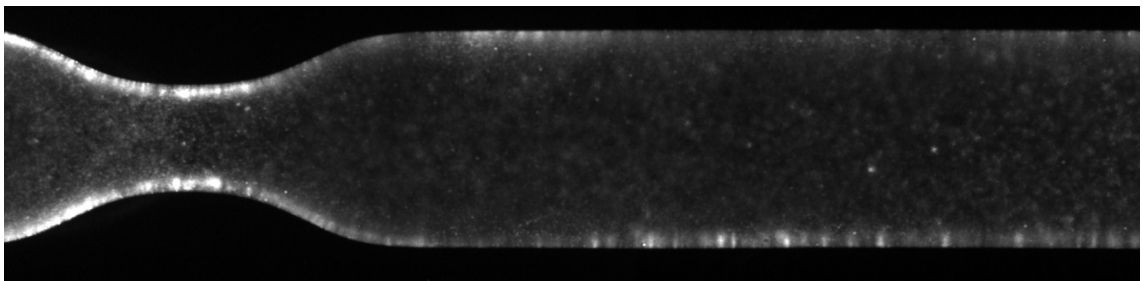
V trati byla použita jako měřená tekutina voda, tou byla naplněna i nádobka s modelem. Kvůli možným komplikacím a vzhledem k tomu, že byl experiment prováděn především za účelem ověření vhodnosti vyrobených modelů, nebyla pro měření použita jiná kapalina za účelem zlepšení optických vlastností. Navíc zhoršené optické vlastnosti ve vodě byly pozorovány pouze u modelu č. 6.

Při měření byly použity rhodaminové fluorescenční částice, které dopadající světlo pouze neodrážejí, ale emitují světlo o jiné vlnové délce. Na kameru lze pak umístit filtr, který propouští pouze světlo o určité vlnové délce, a zlepšit tak kvalitu signálu. Tímto způsobem je možné například odstranit odlesky na rozhraní prostředí. První

měření byla provedena za použití částic bez schopnosti fluorescence, které světlo pouze odrážejí. Kvalita zaznamenaného signálu však nebyla vyhovující, proto byla další měření provedena s rhodaminovými částicemi. I za použití rhodaminových částic byla kvalita signálu zhoršená v případě modelu č. 6, což je zřejmé z porovnání obr. 6.7 a obr. 6.8. Ve stěnách modelu č. 6 jsou přítomny rhodaminové částice, pro vyhodnocení rychlostního pole má tak signál zhoršenou kvalitu. Tento model však vznikl především za účelem snazší detekce pohybu stěny při nestacionárním proudění, hranice mezi modelem a okolním prostředím je na obr. 6.8 jasně patrná, což je z hlediska detekce stěny žádoucí.



Obr. 6.7 Kvalita signálu – model č. 3



Obr. 6.8 Kvalita signálu – model č. 6

O pohon vodní tratě se staralo čerpadlo řízené počítačem. Nastavovanou veličinou byl napěťový signál. Charakteristika čerpadla je lineární a prostřednictvím koeficientu čerpadla $k_c = 22,5 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ je možné dopočítat některé parametry proudění [1]. Experimentálně byl měřen stacionární režim se vstupním napětím $U = 400 \text{ mV}$ a nestacionární režim se sinovým průběhem s napětím $U = 400 \pm 200 \text{ mV}$. Přehled některých režimů včetně přepočítaných hodnot napětí na parametry proudění znázorňuje tabulka 6.2. Rychlost c a Reynoldsovo číslo Re





je počítáno pro trubku kruhového průřezu s vnitřním průměrem 14 mm, což odpovídá vnitřnímu průměru nezúžené části modelů.

Tabulka 6.2 Přehled některých režimů čerpadla

U (V)	\dot{V} (ml·s ⁻¹)	c (m·s ⁻¹)	Re (1)
0,2	4,5	0,029	403
0,4	9	0,058	806
0,6	13,5	0,088	1208
0,8	18	0,117	1611
1	22,5	0,146	2014

U každého modelu byla provedena čtyři měření. Měřen byl stacionární režim s napětím $U = 400 \text{ mV}$ a data byla vyhodnocována z 300 snímků. Dále nestacionární režim se sinovým průběhem a napětím $U = 400 \pm 200 \text{ mV}$, dvakrát s frekvencí $f = 250 \text{ mHz}$, jednou s frekvencí $f = 1 \text{ Hz}$. V případě režimu s frekvencí $f = 250 \text{ mHz}$ byl nejprve měřen jeden pulz a vyhodnocován rozdělený na 6 částí z 60 snímků (10 snímků v každé části). V druhém případě režimu s frekvencí $f = 250 \text{ mHz}$ a režimu s frekvencí $f = 1 \text{ Hz}$ bylo naměřeno 100 pulzů, vyhodnocení bylo provedeno v deseti bodech pulzu dohromady z 1000 snímků (100 snímků v každém bodě, odpovídá 100 pulzům).

Tabulka 6.3 Přehled měřených režimů

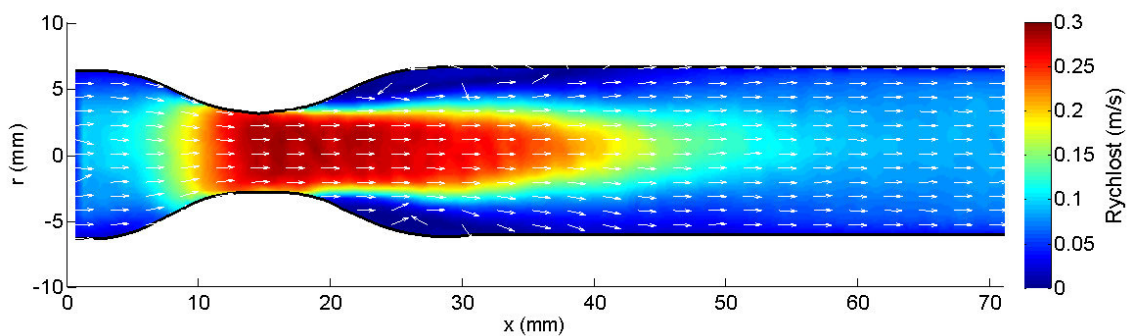
Režim		U (V)	\dot{V} (ml·s ⁻¹)	f (Hz)	
Stacionární		0,4	9	-	
Nestacionární		$0,4 \pm 0,2$	$9 \pm 4,5$	0,25	(1 pulz)
Nestacionární		$0,4 \pm 0,2$	$9 \pm 4,5$	0,25	(100 pulzů)
Nestacionární		$0,4 \pm 0,2$	$9 \pm 4,5$	1	(100 pulzů)

7 Výsledky

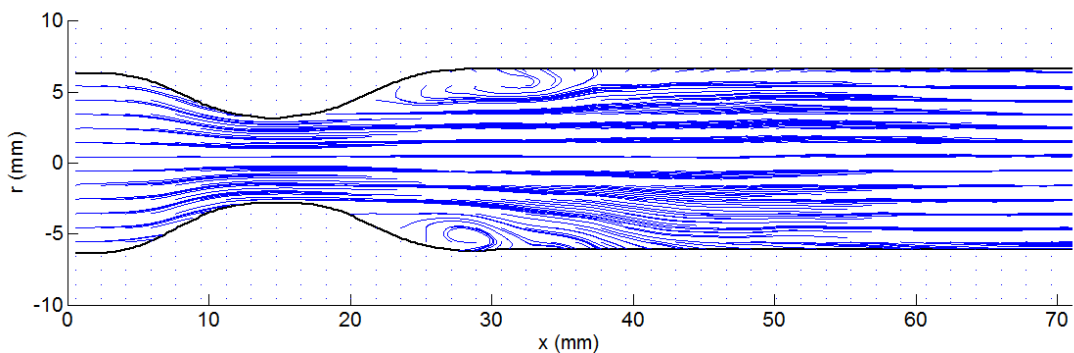
Naměřená data byla zpracována v softwaru Dantec Dynamic Studio, zpracovaná data byla následně exportována a vyhodnocení výsledků proběhlo pomocí programu v softwaru MATLAB. Přehled měřených režimů shrnuje tabulka 6.3.

7.1 Rychlostní pole a proudnice – stacionární režim

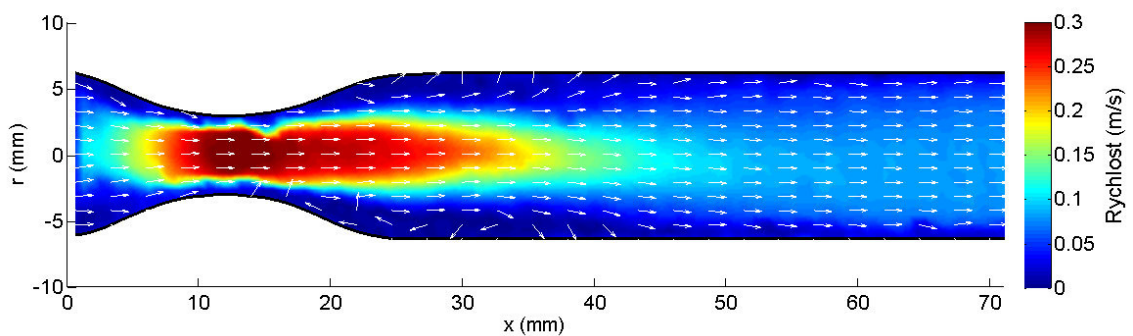
Ve stacionárním režimu byla data vyhodnocována z 300 neměřených snímků.



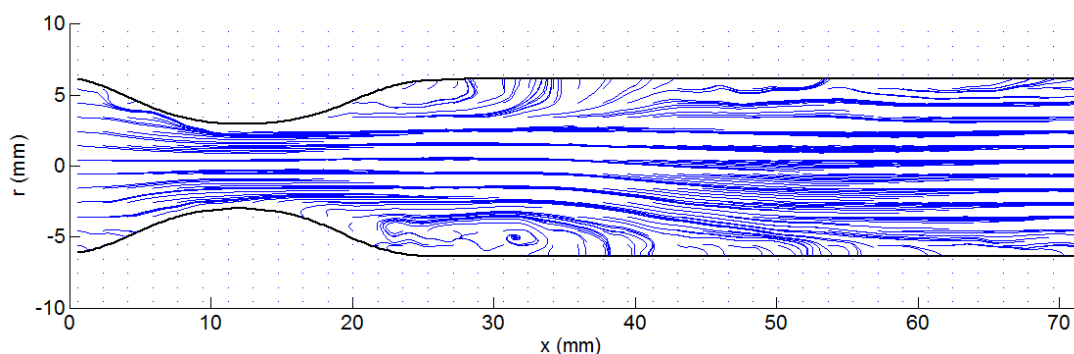
Obr. 7.1 Rychlostní pole v modelu č. 3 - stacionární režim



Obr. 7.2 Proudnice v modelu č. 3 - stacionární režim



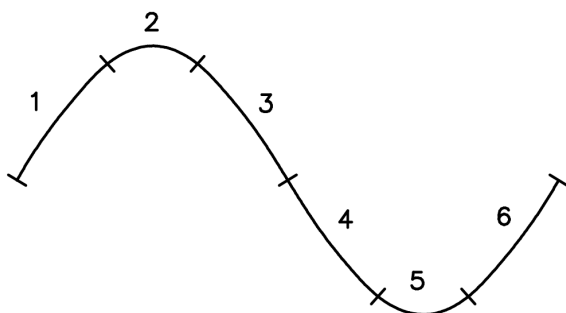
Obr. 7.3 Rychlostní pole v modelu č. 6 - stacionární režim



Obr. 7.4 Proudnice v modelu č. 6 - stacionární režim

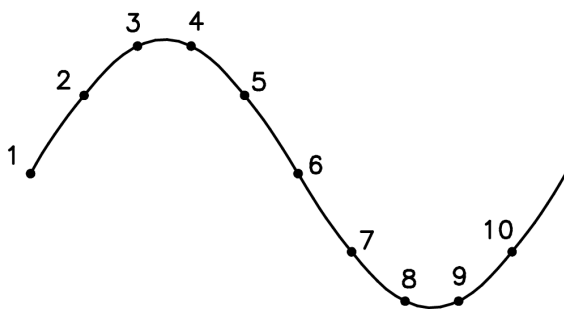
7.2 Rychlostní pole a proudnice – nestacionární režim

Data získaná při měření jednoho sinového pulzu v nestacionárním režimu ($U = 400 \pm 200 \text{ mV}$, $f = 250 \text{ mHz}$) byla vyhodnocována v šesti úsecích pulzu s pravidelným časovým rozestupem z 60 snímků (10 snímků v každé části).



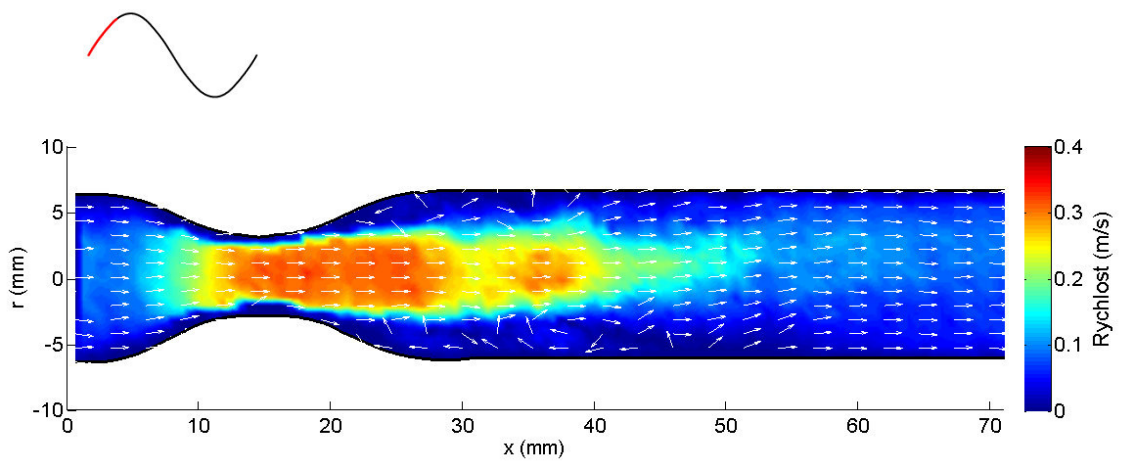
Obr. 7.5 Pulz rozdělený úseky

Data získaná z měření 100 pulzů ve dvou nestacionárních režimech ($U = 400 \pm 200 \text{ mV}$, $f = 250 \text{ mHz}$ a $f = 1 \text{ Hz}$) byla vyhodnocována v 10 bodech pulzu s pravidelným časovým rozestupem z 1000 snímků (100 snímků v každém bodě).

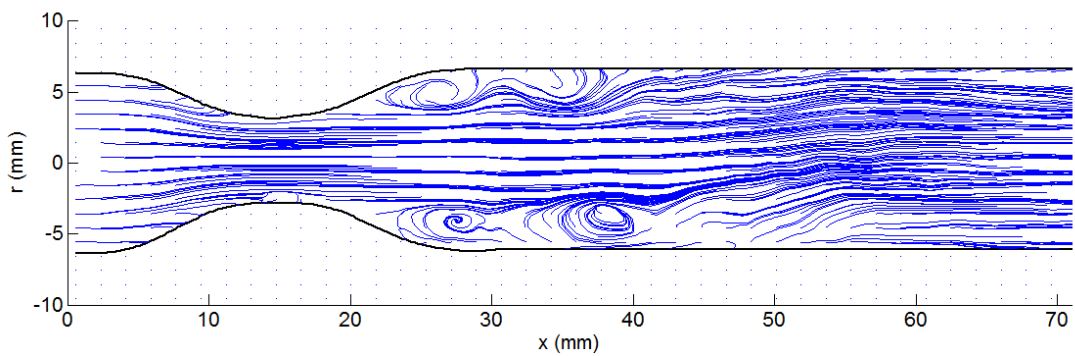


Obr. 7.6 Body umístěné do průběhu pulzu

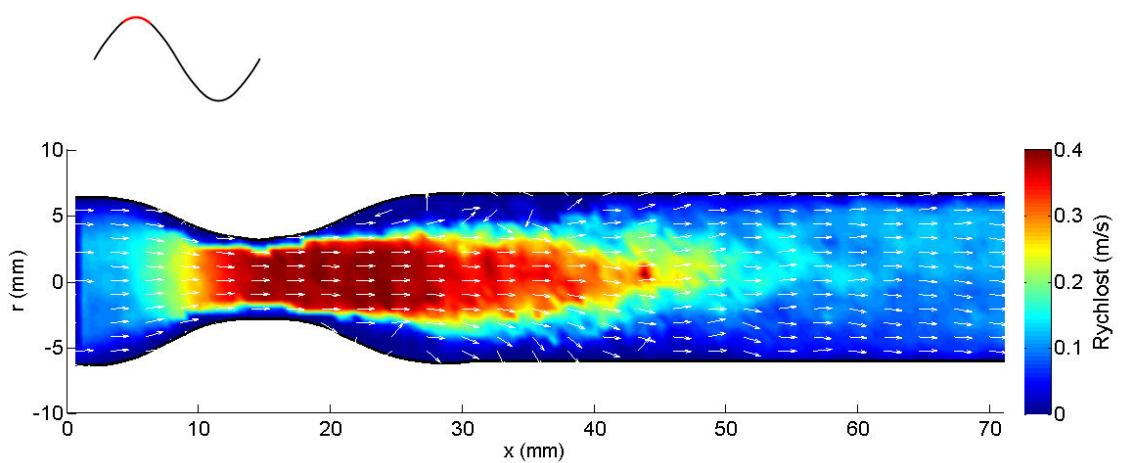
7.2.1 Vyhodnocení v šesti úsecích pulzu



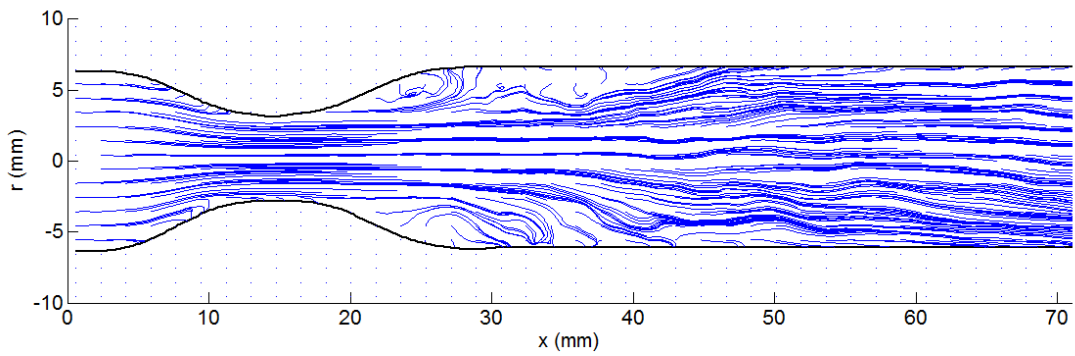
Obr. 7.7 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 1



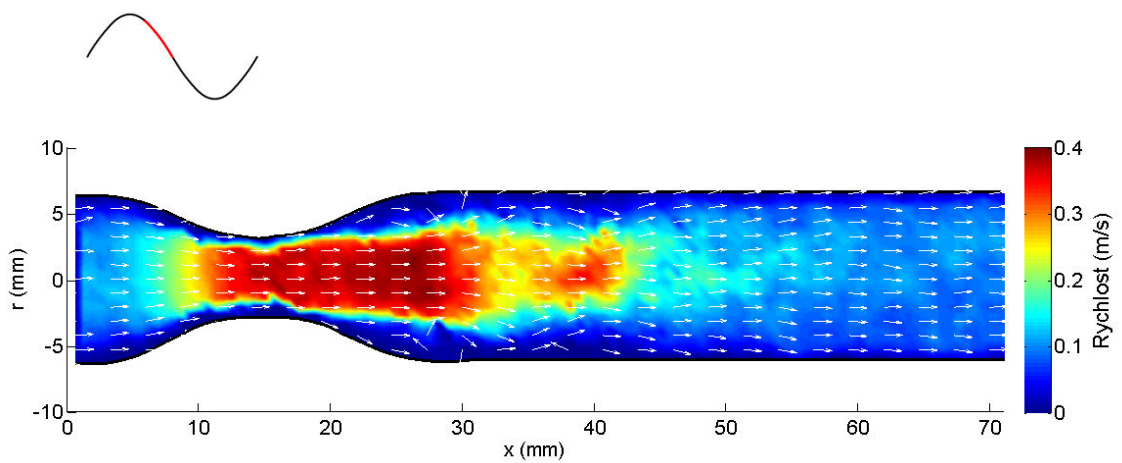
Obr. 7.8 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 1



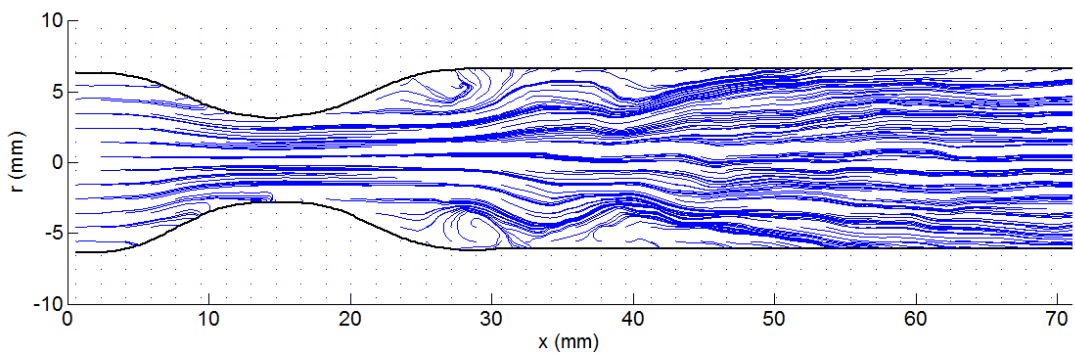
Obr. 7.9 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 2



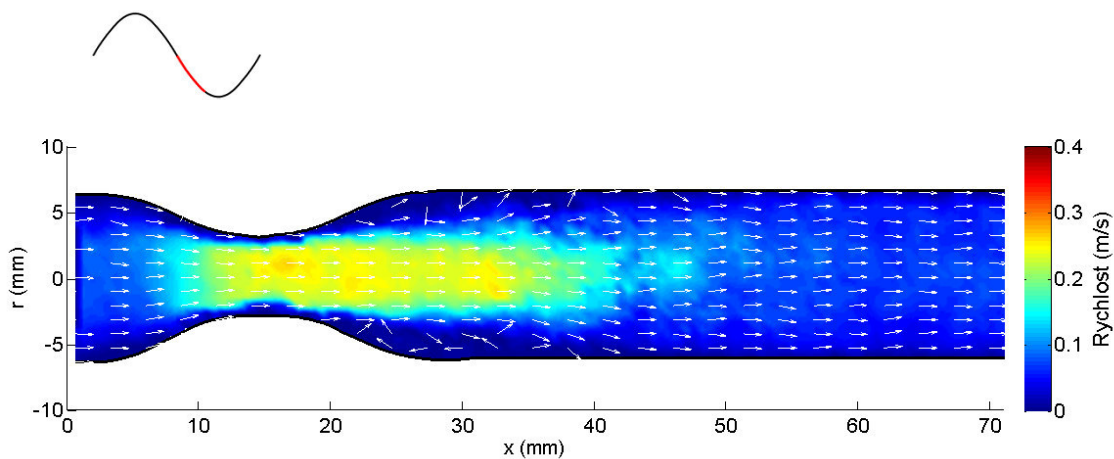
Obr. 7.10 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 2



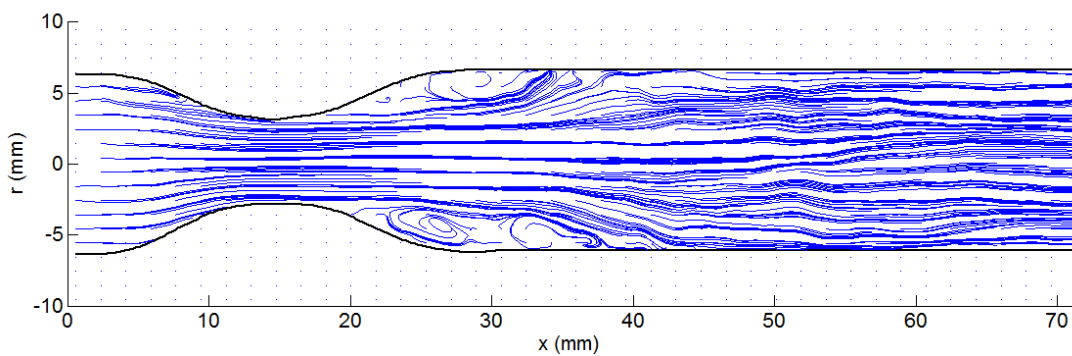
Obr. 7.11 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 3



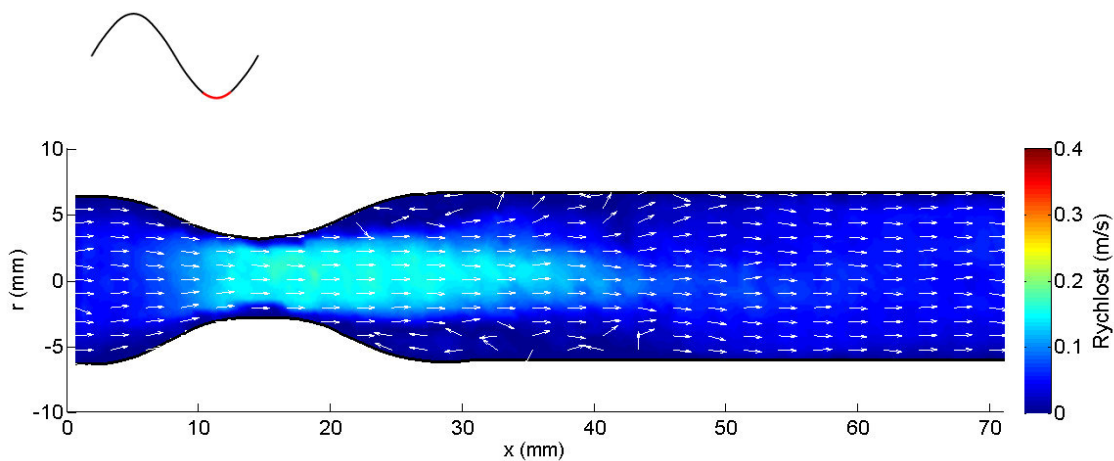
Obr. 7.12 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 3



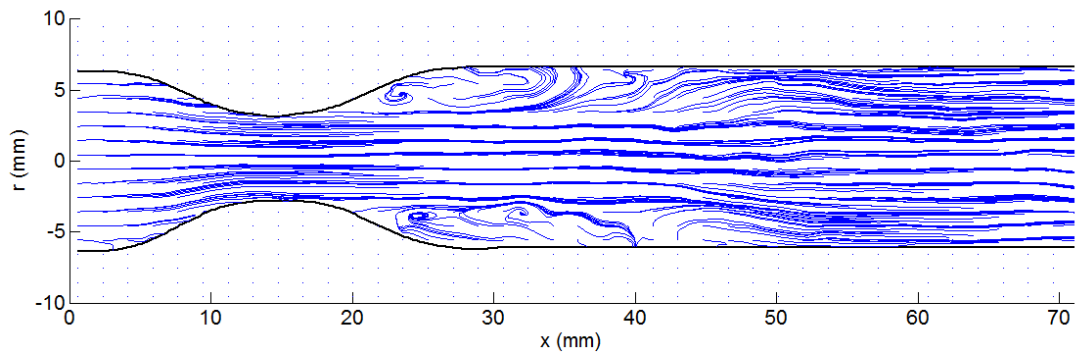
Obr. 7.13 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 4



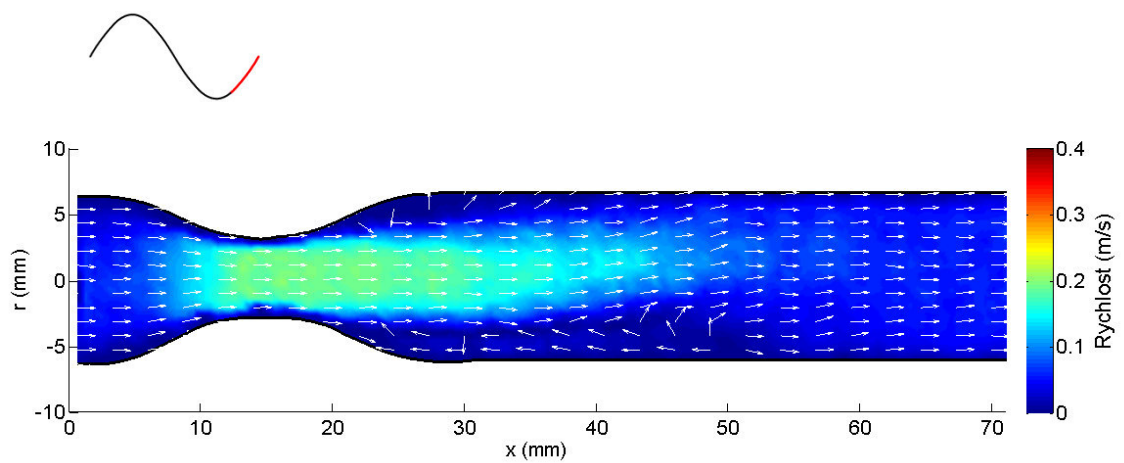
Obr. 7.14 Proudnicie v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 4



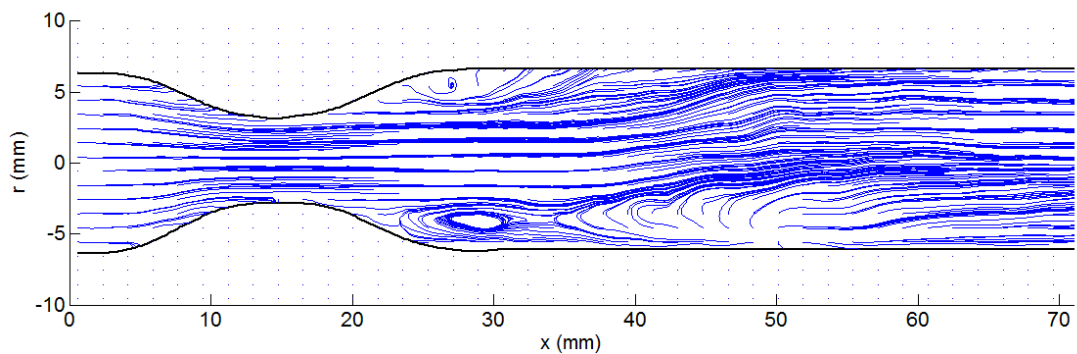
Obr. 7.15 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 5



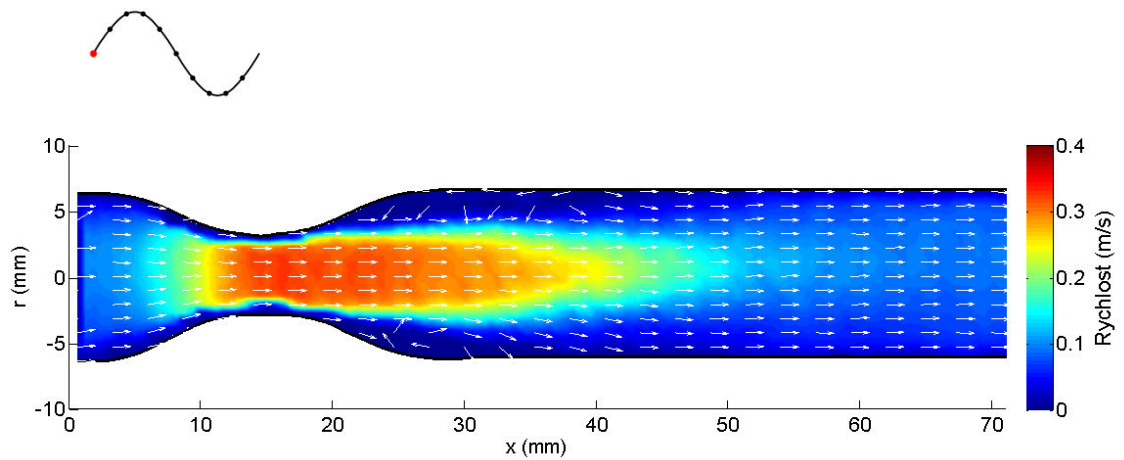
Obr. 7.16 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 5



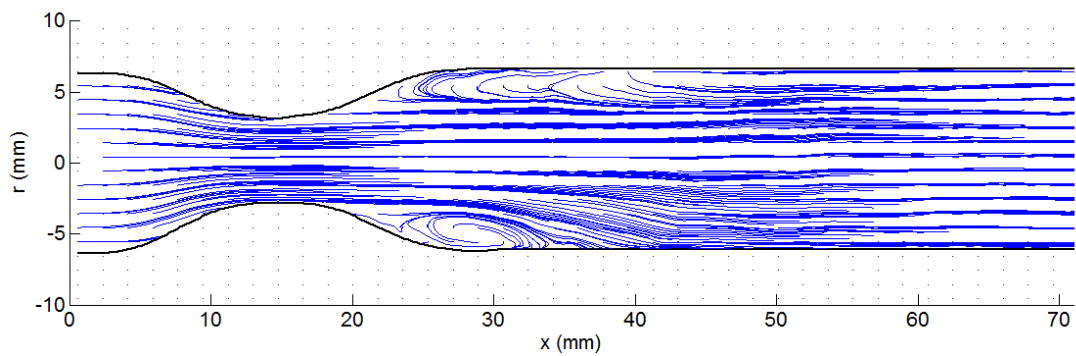
Obr. 7.17 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 6



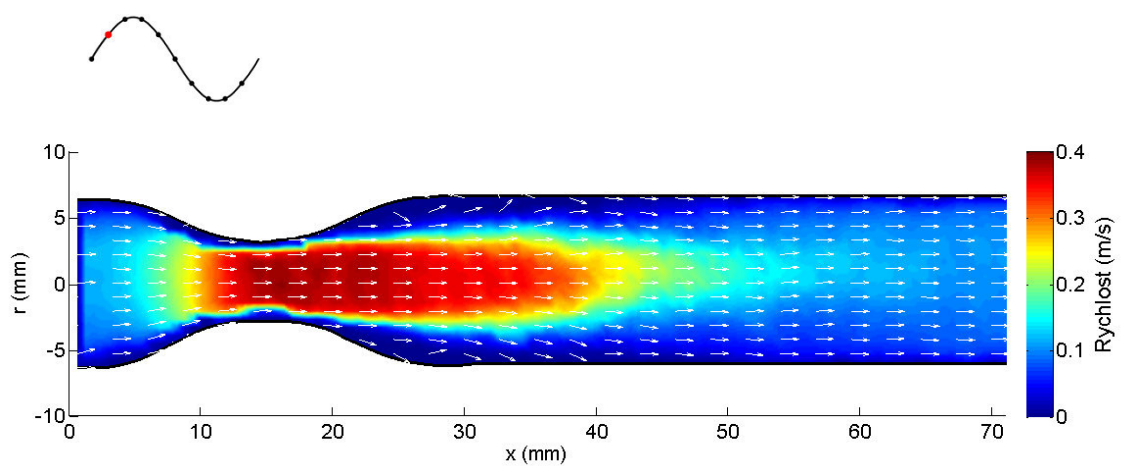
Obr. 7.18 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 6

7.2.2 Vyhodnocení v deseti bodech, $f = 250$ mHz

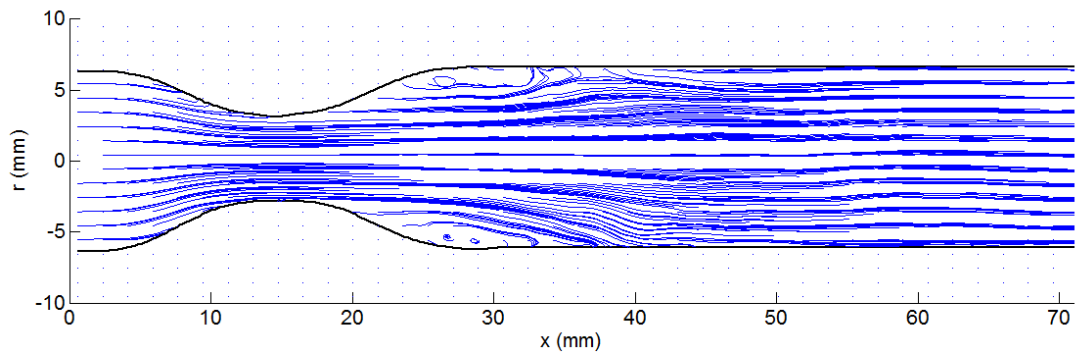
Obr. 7.19 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 1



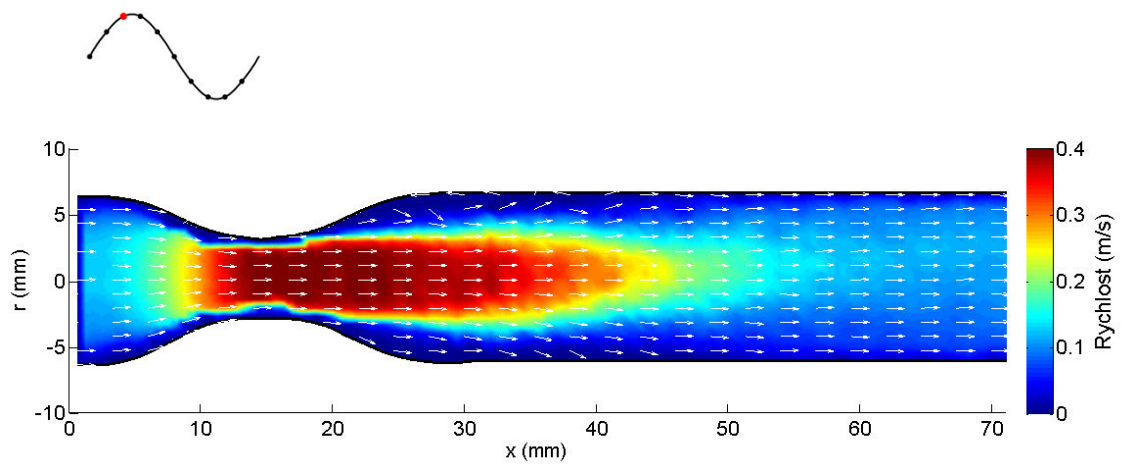
Obr. 7.20 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 1



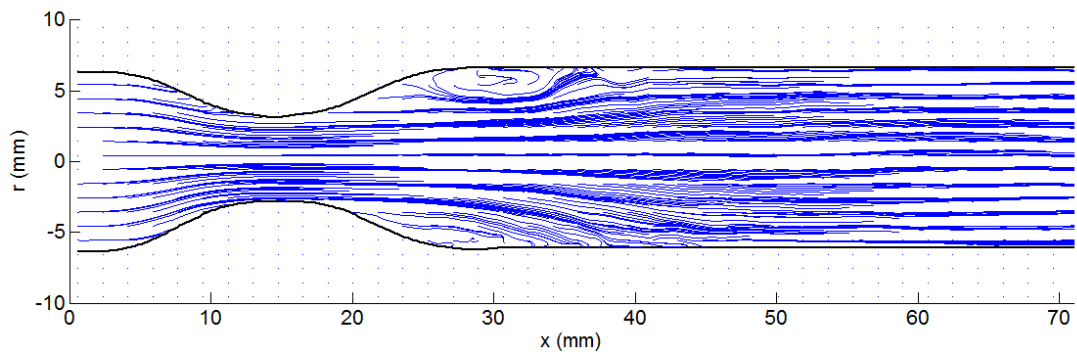
Obr. 7.21 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 2



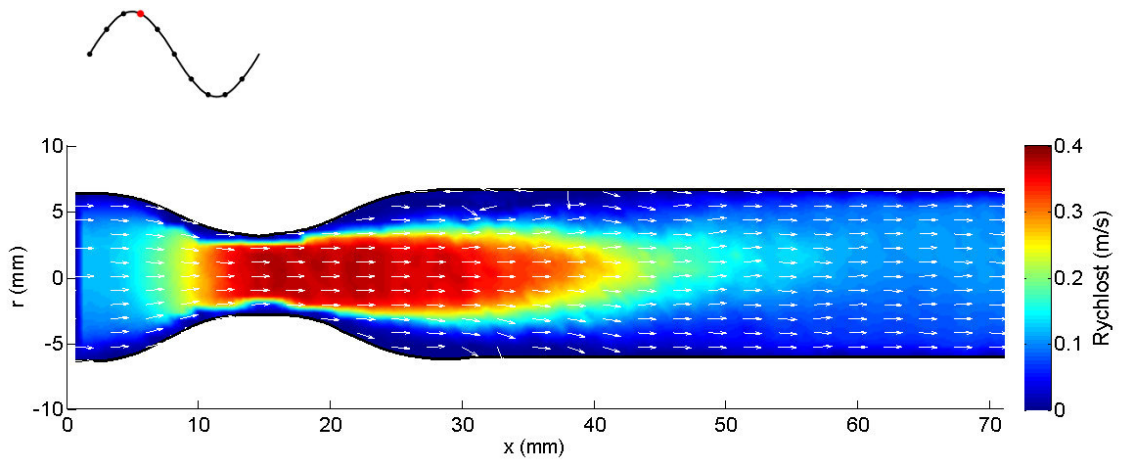
Obr. 7.22 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 2



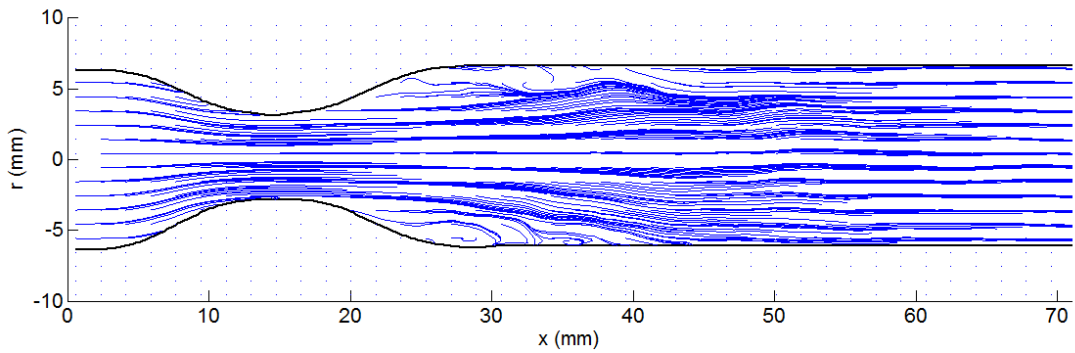
Obr. 7.23 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 3



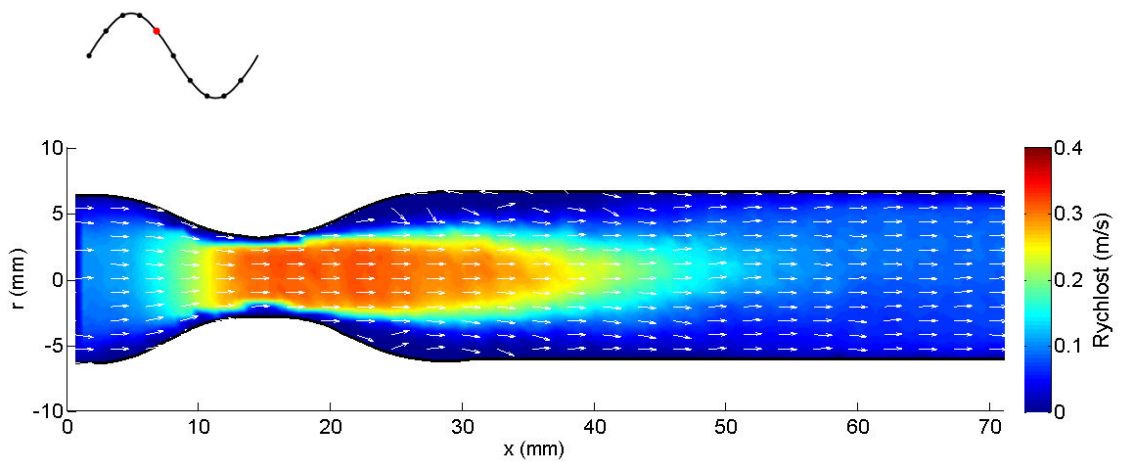
Obr. 7.24 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 3



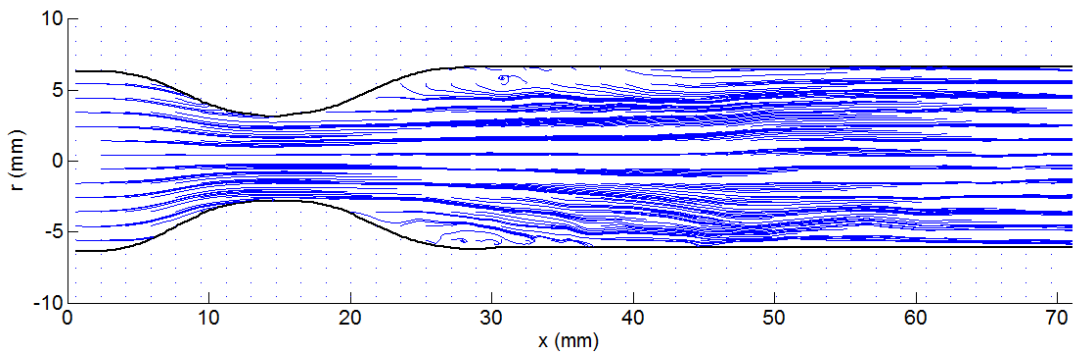
Obr. 7.25 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 4



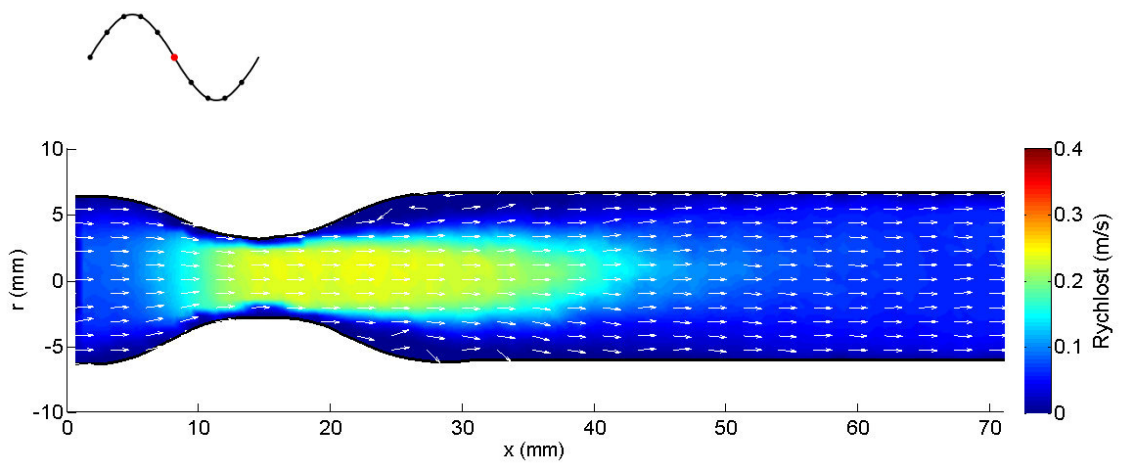
Obr. 7.26 Proudnicie v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 4



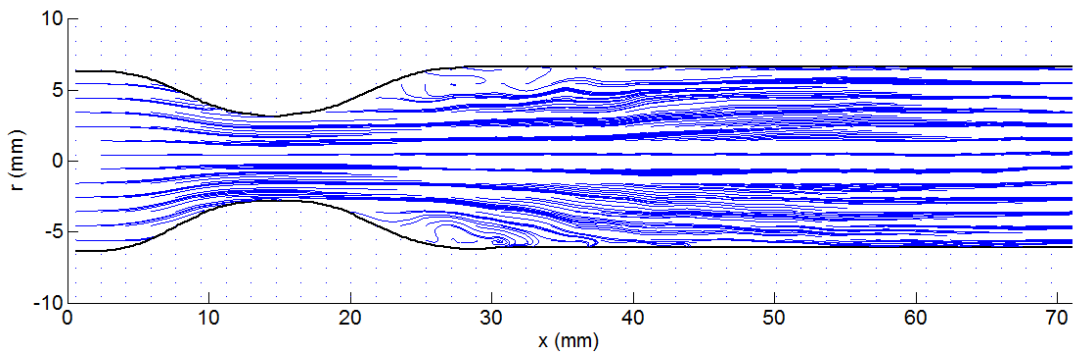
Obr. 7.27 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 5



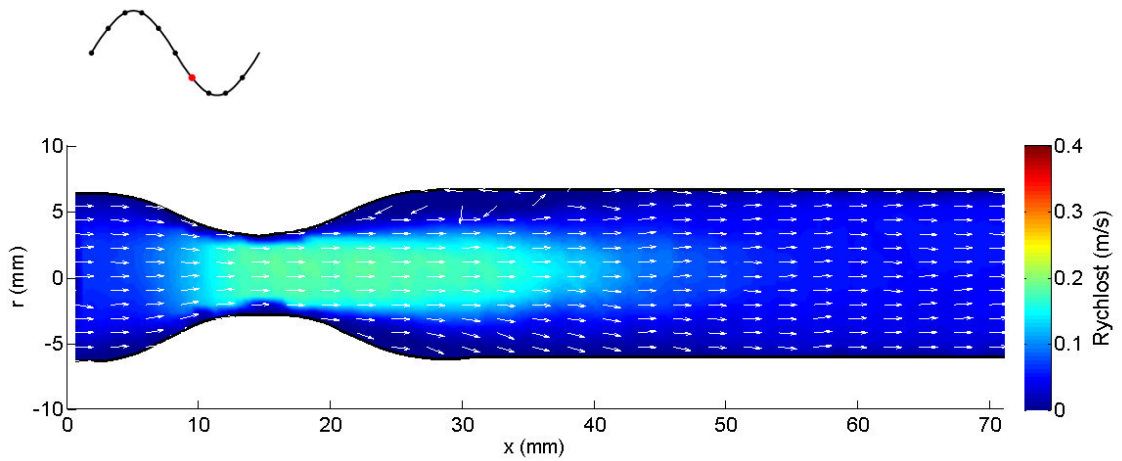
Obr. 7.28 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 5



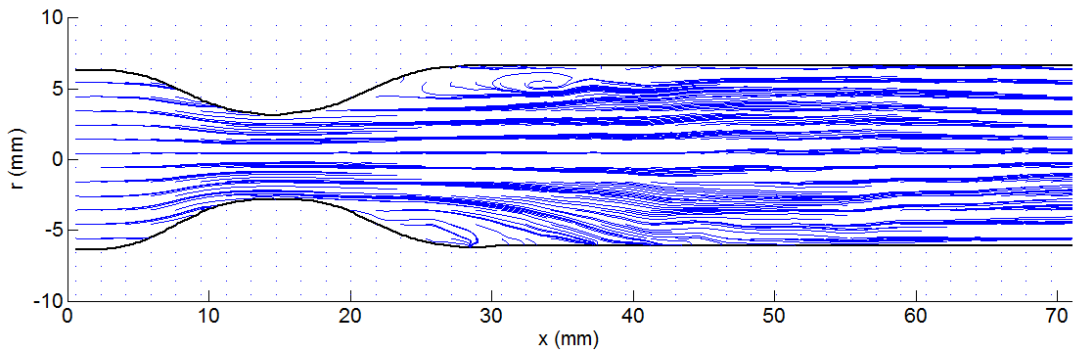
Obr. 7.29 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 6



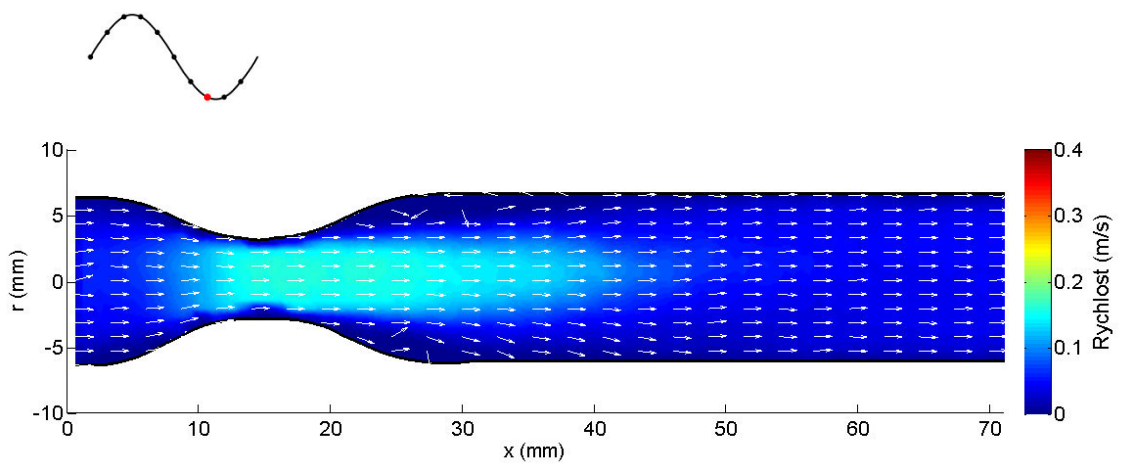
Obr. 7.30 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 6



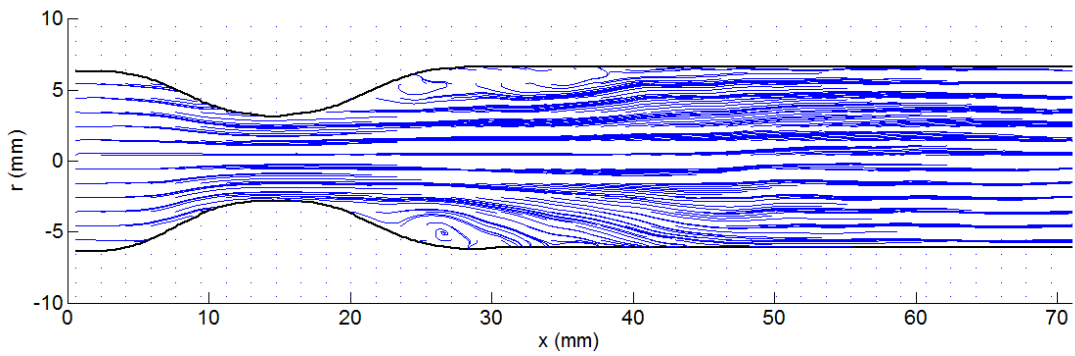
Obr. 7.31 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 7



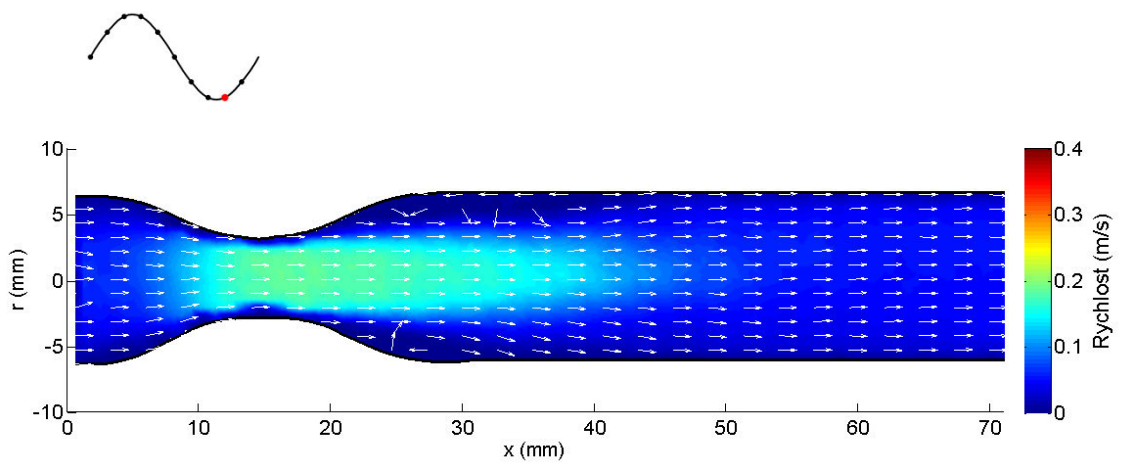
Obr. 7.32 Proudnicie v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 7



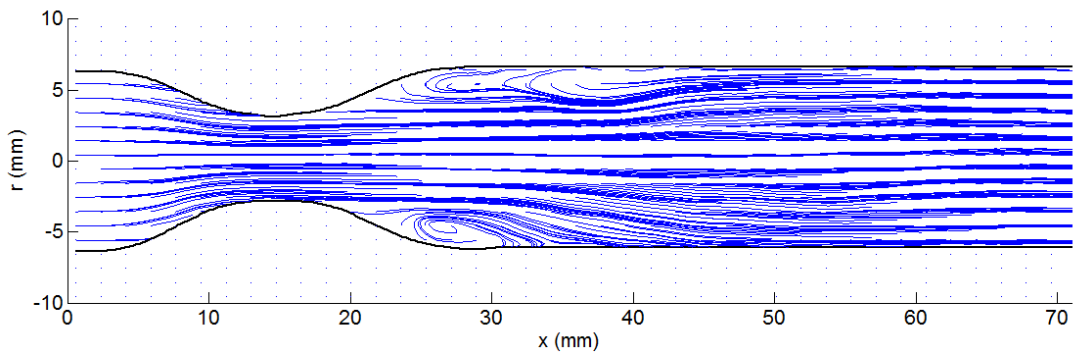
Obr. 7.33 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 8



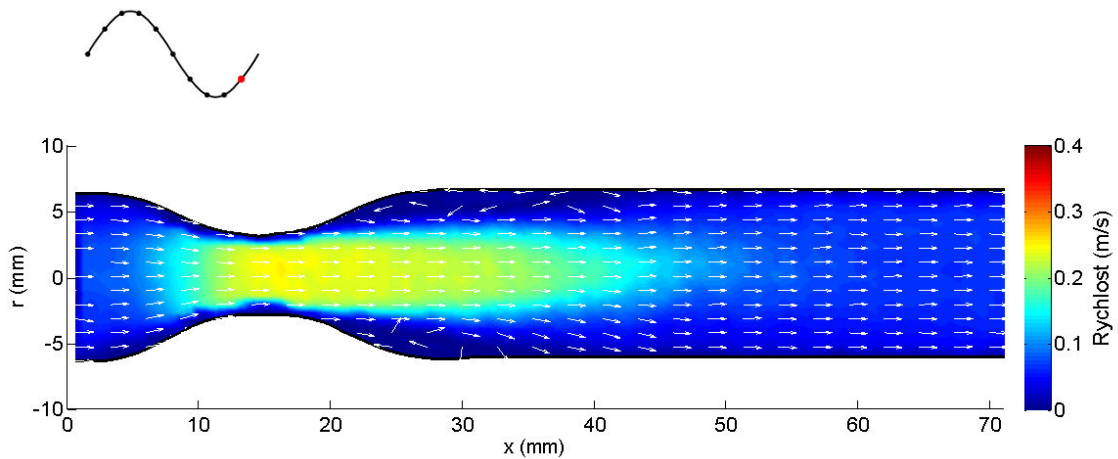
Obr. 7.34 Proudnicie v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 8



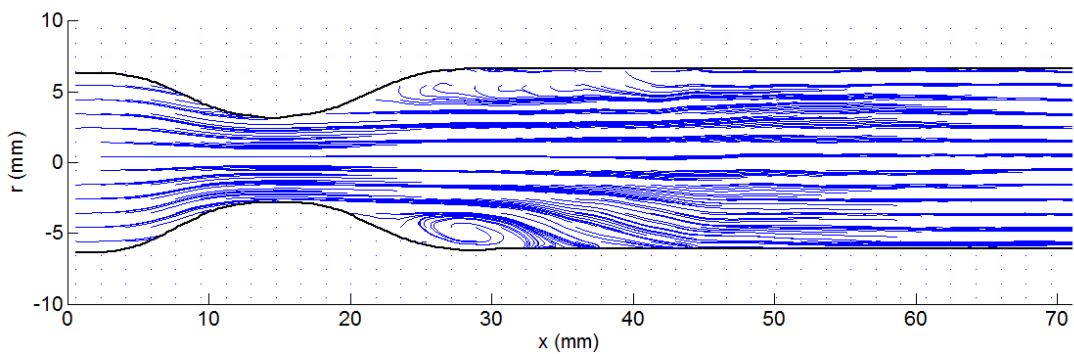
Obr. 7.35 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 9



Obr. 7.36 Proudnicie v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 9



Obr. 7.37 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 10

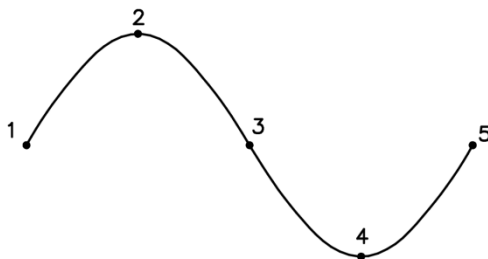


Obr. 7.38 Proudnicie v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 10

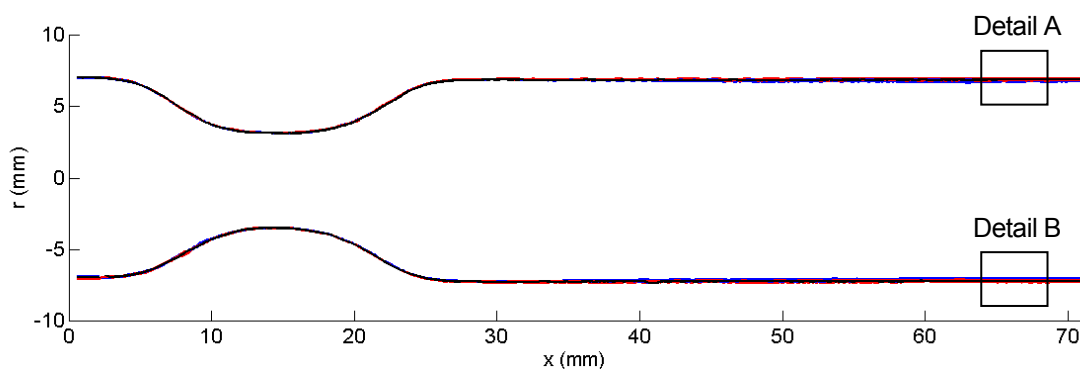
Výsledky ze zbylých měřených nestacionárních režimů (viz tabulka 6.3) jsou obsaženy v příloze I.

7.3 Detekce pohybu stěny

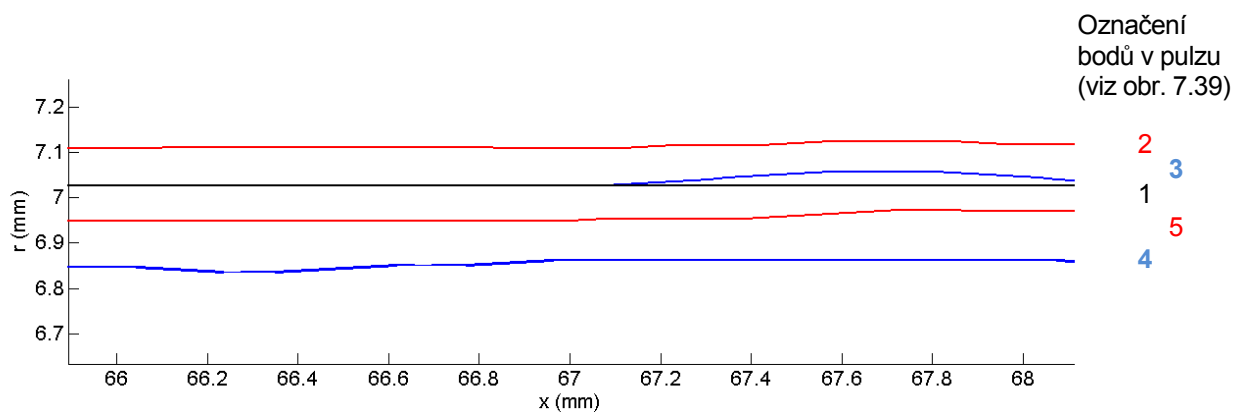
Detekce pohybu stěny byla prováděna v softwaru MATLAB pomocí Sobelovy metody (Sobel method), jejíž kroky se nacházejí v příloze II. Pohyb stěny byl vyhodnocen u modelu č. 3 v pěti bodech sinového pulzu $0,4 \pm 0,2$ V, $f = 1$ Hz. Model č. 6 se pro tento účel neosvědčil.



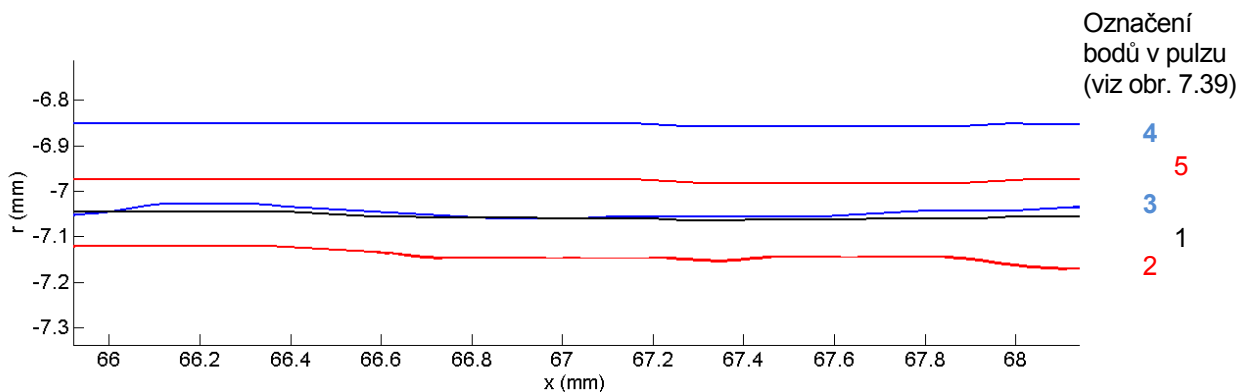
Obr. 7.39 Sinový pulz s pěti body



Obr. 7.40 Detekce pohybu stěny u modelu č. 3



Obr. 7.41 Detekce pohybu stěny u modelu č. 3 - detail A



Obr. 7.42 Detekce pohybu stěny u modelu č. 3 - detail B

Při daném režimu proudění docházelo k pulzaci stěny pružného modelu, v důsledku čehož se měnil poloměr v rozmezí 0,3 mm ve vzdálenosti přibližně 40 mm za stenózou.

8 Závěr

Primárním cílem diplomové práce byla výroba pružných modelů cév vhodnou metodou, zpracování metodiky výroby konkrétního modelu a experimentální ověření vhodnosti vyrobeného modelu pro měření metodou PIV.

Pro výrobu modelů byla zvolena metoda odlévání do rotující formy a metoda namáčení formy. V obou případech byly jako formy použity skleněné modely z jiných experimentů.

V případě metody odlévání do rotující formy byl nejprve navržen, vyroben a sestaven vhodný přípravek. V přípravku byly pak postupně vyráběny čtyři modely. První tři modely nedosahovaly vyhovující kvality. Čtvrtý model byl za cílem zlepšení kvality vyráběn z ředěného materiálu. Za šest hodin výroby v přípravku vznikl na stěnách formy jen tenký film materiálu a tento model nebyl z časových důvodů dokončen. Daná metoda nebyla pro výrobu pružných modelů příliš vhodná vzhledem ke složitosti přípravy výroby a především velké časové náročnosti.

Zároveň s předchozí metodou probíhala výroba pružných modelů metodou namáčení formy, ta byla mnohem méně časově náročná a bylo dosahováno výrazně lepších výsledků. Pro její realizaci bylo sestaveno zařízení z dostupných komponent. Touto metodou bylo vyrobeno šest modelů s vyhovujícími vlastnostmi. Pouze použitelnost prvního modelu pro PIV měření je vzhledem k velmi tenké stěně diskutabilní. Ve všech šesti případech se nevyskytovaly vzduchové bubliny ve stěně a prvních pět modelů mělo velmi dobré optické vlastnosti. Šestý vyrobený model měl nejsilnější stěnu, do níž byly za účelem její lepší detekce přidány rhodaminové značkovací částice. Z těchto dvou důvodů byly optické vlastnosti šestého modelu zhoršené.

Vhodnost vyrobených modelů pro měření metodou PIV byla ověřována na modelech č. 3 a č. 6 (viz tabulka 5.2). Byla navržena a vyrobená nádobka z plexiskla, ve které byl model umístěn a jeho okolí zalito tekutinou z důvodu zlepšení optických vlastností. Dále byly navrženy a vyrobeny trny z plexisklových trubek pro uchycení modelu do tratě. Pro měření byla následně sestavena měřicí trať (viz obr. 6.6).

U obou modelů byla provedena čtyři měření (viz tabulka 6.3), jedno při stacionárním režimu proudění a tři při nestacionárním režimu proudění se sinusovým tvarem pulzu. V případě nestacionárního režimu byla dvě měření provedena při stejném režimu proudění, ale data byla naměřena a vyhodnocena dvěma různými způsoby (viz kapitola 7.2). Vzhledem k charakteru experimentu byla jako měřená tekutina použita voda, tou bylo vyplněno i okolí modelu. Byl však otestován i vliv jiných tekutin na optické vlastnosti modelu. Z důvodu zlepšení kvality signálu byly při měření použity rhodaminové značkovací částice se schopností fluorescence. U pomalejších režimů proudění docházelo k usazování značkovacích částic na stěně modelu a před každým měřením bylo nutné model pomocí rychlejšího režimu vyčistit. Z naměřených dat bylo provedeno vyhodnocení rychlostních polí a vizualizace proudění pomocí proudnic.

Dále byl vyhodnocen pohyb stěny u modelu č. 3. V případě modelu č. 6 s přidanými rhodaminovými částicemi do stěny se nepodařilo stěnu detekovat. Ač byl model č. 6 vyráběn za účelem snazší detekce stěny a hranice mezi stěnou modelu a okolním prostředím je jasně patrná (viz obr. 6.8), tak při vyhodnocení docházelo k detekci falešných hran. Přidání rhodaminových částic do stěny modelu se příliš neosvědčilo. Došlo ke zhoršení optických vlastností modelu, což mělo negativní vliv na kvalitu signálu, a pohyb stěny nebylo možné detekovat.

Experimentálně byla ověřena vhodnost obou modelů pro měření optickou metodou PIV. Kvalitnějšího signálu bylo docíleno u modelu č. 3. V případě modelu č. 6 byla kvalita signálu zhoršena vlivem silnější stěny, a především přítomností rhodaminových značkovacích částic ve stěně. I přes zhoršenou kvalitu byl však signál pro vyhodnocení rychlostních polí použitelný.

Seznam zdrojů

- [1] BLÁHA, A., Vliv opakovaného zúžení průřezu na proudové charakteristiky. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT. Fakulta strojní.
- [2] GEOGHEGAN, P. H., BUCHMANN, N. A., SPENCE, C. et al. Fabrication of rigid and flexible refractive – index – matched flow phantoms for flow visualization and optical flow measurements, Experiments in Fluids. 2012, **52**(5), 1331 – 1347. DOI: 10.1007/S00348-011-1258-0. ISSN 0723-4864
- [3] MOAYERI, M. S., ZENDEHBUDI, G. R. Effects of elastic property of the wall on flow characteristics through arterial stenoses, Journal of Biomechanics. 2003, **36**(4), 525 – 535. DOI: 10.1016/S0021-9290(02)00421-9. ISSN 00219290
- [4] SOPKO, B., SAMEK, L., ČERNÝ, F., Fyzika II. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03194-2
- [5] ROSINA, J., VRÁNOVÁ, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. Biofyzika – Pro zdravotnické a biomedicínské obory. Praha: Grada Publishing, 2013. ISBN 978-80-247-4237-3
- [6] Cardiovascular System [online]. InnerBody.com. [cit. 7.5.2017]. Dostupné z: <<http://www.innerbody.com/image/cardov.html#full-description>>
- [7] Cardiovascular System [online]. Body systems. [cit. 7.5.2017]. Dostupné z: <<http://7mlkbodysystems.weebly.com/cardiovascular-system.html>>
- [8] Architecture of the Vertebrate Circulatory System [online]. Schoolbag. [cit. 7.5.2017]. Dostupné z: <<http://schoolbag.info/biology/living/191.html>>
- [9] What is Vascular Stenosis? [online]. wiseGEEK. [cit. 7.5.2017]. Dostupné z: <<http://www.wisegeekhealth.com/what-is-vascular-stenosis.htm#comments>>
- [10] HNĚVSOVÁ, Veronika. Aneurysma: dělení, diagnostika, rizikové faktory a léčba. In: Medlicker [online]. Medlicker, 2013. [cit. 7.5.2017]. Dostupné z: <<https://cs.medlicker.com/94-aneurysma-deleni-diagnostika-rizikove-faktory-a-lecba>>

-
- [11] ADRIAN, R. J., WESTERWELL, J. Particle image velocimetry. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-44008-0
- [12] Particle image velocimetry (PIV) [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <<http://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>>
- [13] Laser Doppler Anemometry [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 17.4.2017]. Dostupné z: <<https://www.dantecdynamics.com/laser-doppler-anemometry>>
- [14] Measurement principles of LDA [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 17.4.2017]. Dostupné z: <<https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-lda>>
- [15] 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK2S [online]. Prusa Research s.r.o. [cit. 7.7.2017]. Dostupné z: <<http://www.prusa3d.cz/>>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Kardiovaskulární systém – převzato a upraveno [7]	- 5 -
Obr. 2.2 Struktura cév – převzato a upraveno [8]	- 6 -
Obr. 2.3 Vznik stenózy – převzato a upraveno [7]	- 7 -
Obr. 3.1 Odraz a lom světla	- 10 -
Obr. 3.2 Schéma metody PIV	- 12 -
Obr. 3.3 Schéma metody LDA – převzato a upraveno [14]	- 14 -
Obr. 4.1 Skleněný model cévy se třemi stenózami (uvnitř obarvená tekutina)	- 16 -
Obr. 4.2 Odlitý tuhý model karotické bifurkace	- 17 -
Obr. 4.3 Obecné schéma zařízení pro výrobu modelu metodou namáčení formy	- 18 -
Obr. 4.4 Obecné schéma výroby modelu metodou odlévání do rotující formy	- 20 -
Obr. 4.5 Dělená forma s jádrem – převzato a upraveno [2]	- 21 -
Obr. 4.6 Plnění dělené formy – převzato a upraveno [2]	- 22 -
Obr. 5.1 Dvoudílný stojan	- 24 -
Obr. 5.2 Forma uchycená ve stojanech	- 25 -
Obr. 5.3 Převodovka	- 26 -
Obr. 5.4 Forma ve stojanech s pohonem	- 26 -
Obr. 5.5 Ventilátor se stojanem a tryskou	- 27 -
Obr. 5.6 Finální podoba přípravku	- 27 -
Obr. 5.7 Uchycení rozpustné formy	- 28 -
Obr. 5.8 Modifikovaný přípravek	- 29 -
Obr. 5.9 Rozvržení modelu na tiskové ploše	- 30 -
Obr. 5.10 Náhled modelu před tiskem s detailem řezu	- 30 -
Obr. 5.11 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2 [15]	- 31 -
Obr. 5.12 Schéma zařízení pro výrobu modelu metodou namáčení formy	- 35 -
Obr. 5.13 Princip výroby modelu namáčením formy	- 36 -
Obr. 6.1 Porovnání modelů, uvnitř – vzduch, okolí – vzduch	- 39 -
Obr. 6.2 Porovnání modelů, uvnitř – voda, okolí – vzduch	- 40 -
Obr. 6.3 Porovnání modelů, uvnitř – voda, okolí – voda	- 40 -
Obr. 6.4 Porovnání optických vlastností modelu v různých tekutinách	- 41 -
Obr. 6.5 Schéma měřicí tratě	- 42 -
Obr. 6.6 Schéma tratě PIV	- 43 -
Obr. 6.7 Kvalita signálu – model č. 3	- 44 -
Obr. 6.8 Kvalita signálu – model č. 6	- 44 -
Obr. 7.1 Rychlostní pole v modelu č. 3 - stacionární režim	- 46 -
Obr. 7.2 Proudnic v modelu č. 3 - stacionární režim	- 46 -
Obr. 7.3 Rychlostní pole v modelu č. 6 - stacionární režim	- 46 -
Obr. 7.4 Proudnic v modelu č. 6 - stacionární režim	- 47 -

Obr. 7.5 Pulz rozdělený úseky	- 47 -
Obr. 7.6 Body umístěné do průběhu pulzu	- 47 -
Obr. 7.7 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 1	- 48 -
Obr. 7.8 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 1	- 48 -
Obr. 7.9 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 2	- 48 -
Obr. 7.10 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 2	- 49 -
Obr. 7.11 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 3	- 49 -
Obr. 7.12 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 3	- 49 -
Obr. 7.13 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 4	- 50 -
Obr. 7.14 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 4	- 50 -
Obr. 7.15 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 5	- 50 -
Obr. 7.16 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 5	- 51 -
Obr. 7.17 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 6	- 51 -
Obr. 7.18 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, 1 pulz, úsek 6	- 51 -
Obr. 7.19 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 1	- 52 -
Obr. 7.20 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 1	- 52 -
Obr. 7.21 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 2	- 52 -
Obr. 7.22 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 2	- 53 -
Obr. 7.23 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 3	- 53 -
Obr. 7.24 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 3	- 53 -
Obr. 7.25 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 4	- 54 -
Obr. 7.26 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 4	- 54 -
Obr. 7.27 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 5	- 54 -
Obr. 7.28 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 5	- 55 -
Obr. 7.29 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 6	- 55 -
Obr. 7.30 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 6	- 55 -
Obr. 7.31 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 7	- 56 -
Obr. 7.32 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 7	- 56 -
Obr. 7.33 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 8	- 56 -
Obr. 7.34 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 8	- 57 -
Obr. 7.35 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 9	- 57 -
Obr. 7.36 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 9	- 57 -
Obr. 7.37 Rychlostní pole v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 10	- 58 -
Obr. 7.38 Proudnice v modelu č. 3 - nestacionární režim, 250 mHz, bod 10	- 58 -
Obr. 7.39 Sinový pulz s pěti body	- 58 -
Obr. 7.40 Detekce pohybu stěny u modelu č. 3	- 59 -
Obr. 7.41 Detekce pohybu stěny u modelu č. 3 - detail A	- 59 -
Obr. 7.42 Detekce pohybu stěny u modelu č. 3 - detail B	- 59 -

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 Shmutí výhod a nevýhod skleněných a rozpustných forem	- 19 -
Tabulka 5.1 Modely vyráběné metodou odlévání do rotující formy	- 34 -
Tabulka 5.2 Modely vyráběné metodou namáčení formy	- 38 -
Tabulka 6.1 Indexy lomu světla použitých tekutin.....	- 41 -
Tabulka 6.2 Přehled některých režimů čerpadla	- 45 -
Tabulka 6.3 Přehled měřených režimů.....	- 45 -

Seznam příloh

Příloha I – Rychlostní pole a proudnice, nestacionární režimy

Příloha II – Kroky Sobelovy metody

Příloha III – Fotografie (elektronická forma)