



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**TESTOVÁNÍ PRŮHLEDNÉHO MODELU TLAKOVÉ VÍŘIVÉ
TRYSKY**

TESTING OF A TRANSPARENT MODEL OF A PRESSURE-SWIRL NOZZLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marcel Sapík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Marcel Sapík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Testování průhledného modelu tlakové vířivé trysky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakter proudění v rozprašovacích tryskách ovlivňuje chování kapaliny na jejím výstupu a výsledný sprej. Předmětem práce je zkoušení modelu tlakové vířivé trysky, který bude sloužit pro vizualizace a použití optických metod. Provoz modelu musí zajistit splnění podobnostní kritérií s originálem, je nutno najít vhodnou modelovou kapalinu, doladit index lomu kapaliny ve shodě s indexem lomu materiálu stěn modelu, respektovat pevnostní limity modelu atd. Práce zahrnuje i návrh a přípravu zkušebního zařízení pro trysku a další činnosti nutné pro úspěšné provedení experimentu.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše modelových kapalin a konstrukčních materiálů pro modely s využitím optických metod, rešerše typů prováděných optických experimentů na podobných tryskách
2. Definice kritérií pro výběr kapaliny vhodné pro uvažované experimenty
3. Posouzení a klasifikace vybraných kapalin s ohledem na tato kritéria
4. Příprava zkušebního stendu a jeho výkresová dokumentace
5. Sestavení trysky a ověření funkčnosti včetně použitých snímačů a aktuátorů
6. Optimalizace provozu trysky a volba kapaliny pro zajištění podobnosti experimentu na modelu s originálem trysky, stanovení bezrozměrných kritérií proudění (Re , Fr , We)
7. Řešení tlakových odběrů v komoře a měření tlakových poměrů na trysce
8. Základní vizualizace vnitřního proudění
9. Vypracování výpočetního postupu pro vyhodnocení dráhy paprsku a optických korekcí při měření rychlosti metodou LDA ve složené optické soustavě a použití na vybraných LDA výsledcích
10. Test několika kapalin s různou mírou shody indexu lomu s materiálem modelu, vyhodnocení vlivu indexu lomu na kvalitu LDA výsledků
11. Vyhodnocení zkušeností s provozem trysky, její použitelnosti pro experimenty a životnosti,

doporučení a návrhy úprav nové konstrukce průhledné trysky

Seznam doporučené literatury:

ZHANG, Zhengji. LDA application methods: laser doppler anemometry for fluid dynamics. New York: Springer, c2010. ISBN 978-3-642-13513-2.

BUDWIG, R. Refractive index matching methods for liquid flow investigations, Experiments in Fluids 17, 1994

HASSAN, Y.A. – DOMINGUEZ-ONTIVEROS, E.E. Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques Nuclear Engineering and Design, s3080-3085, 2008

DE KEUKELAERE, The Internal Flow in a Swirl Atomizer Nozzle, MSc Dissertation, Dept. Mech. Eng., UMIST, 1995.

HORVAY, M. – LEUCKEL, W. LDA-Measurements of Liquid Swirl Flow in Converging Swirl Chambers with Tangential Inlets. Laser Anemometry in Fluid Mechanics, s.487-503, 1984

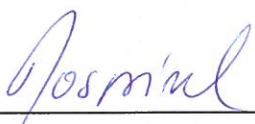
HAAM, S.J. – BRODKEY, R.S. – FORT, I. – KLABOCH, L. – PLACNIK, M. – VANECEK, V. Laser Doppler anemometry measurements in an index of refraction matched column in the presence of dispersed beads part I, International Journal of Multiphase Flow s1401–1418, 2000

Refractive indexes of common Liquids, Solid and Gases [online], poslední aktualizace 30.9.2016 [vid 1.10.2016], The Engineering ToolBox. Dostupné z http://www.engineeringtoolbox.com/refractive-index-d_1264.html

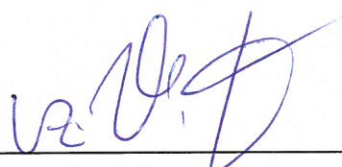
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 25. 10. 2017





doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu



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

Abstrakt

Obsahem práce je zprovoznění průhledného a zvětšeného PMMA modelu tlakové vířivé trysky, což zahrnuje výběr pracovních kapalin a přípravu testovací sestavy, která by umožňovala použití optických metod (LDA, PDA, PIV, vysokorychlostní vizualizace). Teoretická část popisuje základní teorii rozprašování, optické měřicí metody a zabývá se problematikou šíření světla v opticky složitých soustavách. Její součástí je také rozsáhlá rešerše průhledných kapalin a materiálů zvětšených modelů použitých v experimentech, jejichž častým cílem bylo dosažení shody indexů lomu světla. V praktické části je věnována pozornost přípravě testovací sestavy a jsou zde zpracovány testy chemické koroze několika vybraných kapalin na materiál PMMA včetně shrnutí zkušeností s jejich použitím, neboť docházelo k neustálému poškozování materiálu. Následovalo několik LDA měření za použití kerosinu, p-cymenu, 1-bromnaftalenu a vody, kdy byl zhodnocen vliv rozdílu indexů lomu na výsledky. Ukázalo se, že k pozorovatelnému ovlivnění nedochází, je-li rozdíl indexu lomu mezi materiálem trysky a kapaliny malý. Dále byla provedena vizualizace vnitřního proudění pomocí vysokorychlostní kamery. Praktickou část uzavírají odběry statického tlaku v komoře trysky, kdy byl měřen tlakový poměr na stěnách komory i v její ose. Měřením bylo potvrzeno, že tlak na stěnách komory je konstantní a liší se v závislosti na vzdálenosti od osy komory.

Klíčová slova

Atomizace, rozprašování, tryska, LDA, vysokorychlostní vizualizace, vnitřní proudění, index lomu světla, plexisklo, PMMA, sprej

Abstract

The aim of the thesis is to put a transparent scaled PMMA model of the pressure swirl nozzle into operation, which includes, the selection of working fluids and the preparation of a test set to allow measurements using optical methods (LDA, PDA, PIV, high-speed visualization). The theoretical part describes the basic theory of atomization, optical measurement methods and deals with the problems of optical transition in optically complex systems. It also includes an extensive search for transparent liquids and materials of enlarged models that have been used in experiments, which often aim to match light refractive indices between these materials. In the practical part, attention is paid to the preparation of the test set and tests of chemical effects of several selected liquids on PMMA material are conducted, including a summary of experience with their use, as there was a permanent damage to the material. Several LDA measurements followed, using kerosene, p-cymene, 1-bromonaphthalene and water, evaluated the effect of the refractive index difference on the results. It turned out that no observable influence occurred if the refractive index difference between the nozzle material and the liquid was small. In addition, a visualization of internal flow through a high-speed camera was made. The practical part closes the static pressure measurement in the nozzle chamber, where the pressure ratio was measured on the walls of the chamber as well as on its axis. The measurement confirmed that the pressure on the chamber walls is constant and varies with the distance from the chamber axis.

Keywords

Atomization, atomizer, nozzle, LDA, high-speed visualization, internal flow, refractive index, plexiglass, perspex, PMMA, spray

Bibliografická citace

SAPÍK, M. *Testování průhledného modelu tlakové vířivé trysky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 100 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Testování průhledného modelu tlakové vířivé trysky“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2018

Marcel Sapík

Poděkování

Hlavní poděkování patří vedoucímu doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D., za jeho trpělivost, motivaci a odborné vedení nejen mé diplomové práce.

Práce vznikla s podporou projektů GA15-09040S a GA18-15839S, které finančně podpořila Grantová agentura České republiky a projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I.”

Chtěl bych poděkovat Ing. Milanu Malému za jeho cenné rady a pomoc při práci v laboratoři sprejů a Bc. Ladě Janáčkové, která mi pomohla při přípravě měření.

Velké díky patří mé rodině, která mě podporovala a motivovala při studiu a Janě za to, že mi vždy byla nablízku.

Obsah

Úvod	13
1 Základy atomizace	15
1.1 Tlakové trysky	16
1.2 Průhledný model tlakové vířivé trysky	19
1.3 Charakteristické veličiny trysky	20
2 Optické metody a vizualizace proudění.....	22
2.1 Laserová dopplerovská anemometrie (LDA)	22
2.1.1 Fázová dopplerovská anemometrie (PDA)	24
2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)	25
2.3 Vysokorychlostní vizualizace	26
3 Fyzikální aspekty spojené s kapalinou a tryskou	27
3.1 Fyzikální vlastnosti kapaliny	27
3.1.1 Hustota kapaliny.....	27
3.1.2 Povrchové napětí.....	27
3.1.3 Index lomu světla	28
3.1.4 Viskozita kapaliny.....	29
3.2 Bezrozměrná kritéria proudění	31
3.2.1 Vírové číslo	31
3.2.2 Reynoldsovo číslo	31
3.2.3 Freudeho číslo	33
3.2.4 Weberovo číslo.....	34
3.2.5 Ohnesorgovo číslo.....	34
4 Rešerše kapalin, materiálů a optických experimentů pro průhledné modely	35
4.1 Kapaliny pro průhledné modely.....	36
4.1.1 Hledání vhodné kapaliny.....	36
4.1.2 Další uvažované kapaliny	42
4.1.3 Souhrn kapalin	43
4.2 Materiály pro průhledné modely.....	44
4.2.1 Standardní průhledné materiály	44
4.2.2 Materiály pro 3D tisk	46
4.2.3 Souhrn materiálů pro výrobu průhledného modelu	47
4.3 Experimenty se zvětšenými modely trysek.....	48
5 Testování a výběr kapalin	49
5.1 První testy s výběrem pracovní kapaliny	50
5.1.1 Posouzení vlastností testovaných kapalin	51
5.2 Testování prvních směsí	52
5.2.1 Testování směsí s anýzovým olejem.....	53
5.2.2 Posouzení vlastností anýzových roztoků	53
5.2.3 Testování směsí s tetralínem	54
5.2.4 Posouzení vlastností tetralínových roztoků	54
5.2.5 Vyhodnocení prvních testů	55
5.3 Užití vybrané kapaliny	56
5.4 Poškození modelu trysky a testy PMMA se zatížením.....	57
5.5 Testování nově vybraných kapalin	62
5.6 Vyhodnocení testování kapalin.....	64

6 Příprava modelu trysky a pracovní sestavy	66
6.1 Model trysky	66
6.2 Vsazení modelu do pracovní sestavy	68
6.2.1 Použité materiály, přístroje a snímače	75
6.3 Zkušenosti s provozem trysky	76
6.3.1 Změna konstrukce modelu trysky	76
7 Měření a vizualizace vnitřního proudění v modelu	78
7.1 Stanovení bezrozměrných kritérií proudění	78
7.2 Vysokorychlostní vizualizace vnitřního proudění	81
7.3 LDA měření vnitřního proudění	83
7.3.1 Ovlivnění LDA měření rozdílným indexem lomu světla.....	84
7.3.2 Korekce dráhy paprsku	87
7.4 Tlakové odběry v trysce.....	90
8 Závěr	92
Seznam použitých zdrojů	93
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	97
Seznam příloh	99

Úvod

Atomizace je proces, při kterém dochází k rozpadu proudu kapaliny na menší útvary – kapky, k čemuž se používají trysky (atomizéry), které vytváří sprej kapek. Trysky se průmyslově používají například při spalování, lakování, vodním chlazení a jiných aplikacích. Atomizace je velice složitý a komplexní proces, který dosud není zcela zdokumentován.

Protože jsou trysky několik milimetrů malá zařízení, je pro vizualizaci a měření vnitřního proudění nezbytné vytvořit zvětšený průhledný model. Při zvětšení je třeba dodržet některá bezrozměrná kritéria, aby bylo chování kapaliny totožné jako s originální tryskou. Zvětšený model se používá například k LDA měření nebo vizualizaci pomocí vysokorychlostní kamery. Pro přesné měření je žádoucí, aby byl index lomu kapaliny a průhledného materiálu shodný.

Jedni z prvních autorů, kteří použili zvětšený průhledný model tryšky, jsou Horvay a Leuckel [1, 2]. Autoři zkoumali vliv geometrie tryšky na vnitřní proudění a charakter spreje za použití směsi tetralínu (1,2,3,4-tetrahydronaftalen), ricinového oleje a terpentýnu. Stejnou směs použil Liu [3], ačkoli chemicky poškozuje materiál. De Keukelaere [4] použil zvětšený PMMA (poly-methylmetaakrylát – plexisklo) model pro měření průtoku, tlaku, rychlostního pole vnitřního proudění, rozměrů vzdušného jádra aj. Výsledky porovnával s teoretickými předpoklady. Na jeho práci navazují Chinn a Yule [5], kteří provedli srovnání počítačových modelů s měřením rychlostního pole. Hassan a Dominguez-Ontiveros [6] dosahovali indexu lomu PMMA pomocí p-cymenu, jehož index lomu je velmi blízký materiálu.

Autor touto prací navazuje na svou bakalářskou práci [7], která se věnuje konstrukci zvětšených průhledných modelů trysek. Jejím výsledkem jsou výrobní výkresy vlastního modulárního řešení tlakové vířivé tryšky vyrobené z PMMA. V této práci postupuje autor dále a výzkum s průhlednými modely rozšiřuje.

V kapitolách 1 a 2 jsou popsány základní poznatky rozprašování kapalin a užívaných optických (LDA, PIV, aj.) a vizualizačních (vysokorychlostní kamera) měřicích metod, na které navazuje 3. kapitola s teorií spojenou s bezrozměrnými kritérii a fyzikálními vlastnostmi důležitých pro kapalinu v tryse.

Jedním z hlavních cílů práce bylo nalezení a výběr pracovní kapaliny pro zvětšený model z PMMA, která by měla vhodné vlastnosti – index lomu světla, viskozita, průhlednost, aj., čemuž jsou věnovány kapitoly 4 a 5. V kapitole 4 je vypracována rešerše pracovních kapalin a průhledných materiálů, které byly použity pro dosažení shody indexu lomu. Součástí kapitoly je také vzhled do experimentů, které jsou u zvětšených modelů trysek prováděny. Výběr kapaliny se stal velkou překážkou, neboť kapaliny většinou nedosahovaly indexu lomu PMMA, a pokud ano, tak často poškozovaly materiál tryšky. Z tohoto důvodu je kapitola 5 poměrně obsáhlá, neboť bylo nezbytné provést vlastní testy odolnosti. Prvotní testy, kdy došlo k silnému poškození materiálu modelu, se ukázaly jako nedostatečné a musely být pozměněny tak, aby lépe reflektovaly skutečné zatížení tryšky. Rozšíření kapitoly 5 o nové testování ovlivnilo rozsah kapitoly 4, protože muselo dojít k jejímu rozšíření o další kapaliny, u nichž byly nároky na index lomu sníženy a na chemickou netečnost vůči PMMA zvýšeny.

Kapitola 6 popisuje přípravu modulárního modelu tryšky i celé sestavy včetně zapojení všech snímačů a zařízení. Součástí kapitoly je zhodnocení a návrh změn konstrukce modelu tryšky, kdy by došlo k odstranění nadměrně namáhaných oblastí, ušetření nákladů na výrobu a usnadnění práce s modelem.

V kapitole 7 je popsáno samotné měření s modelem trysky. Vnitřní proudění v trysce bylo zkoumáno pomocí metody LDA a vizualizací vysokorychlostní kamerou. Z měření byla stanovena bezrozměrná kritéria proudění. Dále byly do stěny modelu vyvrtány otvory pro měření tlaku v komoře.

Náplní této kapitoly bylo provést jednoduchá měření, která se používají spolu se zvětšenými modely trysky a poukázat na problémy s nimi spojené, včetně jejich řešení. Výsledky měření byly popsány v odborných článcích [8, 9], které se zabývají vlastnostmi vnitřního proudění a vzdušného jádra.

Složitějšímu LDA měření a vysokorychlostní vizualizaci se blíže věnovala kolegyně Bc. Lada Janáčková, která na toto téma zpracovala diplomovou práci.

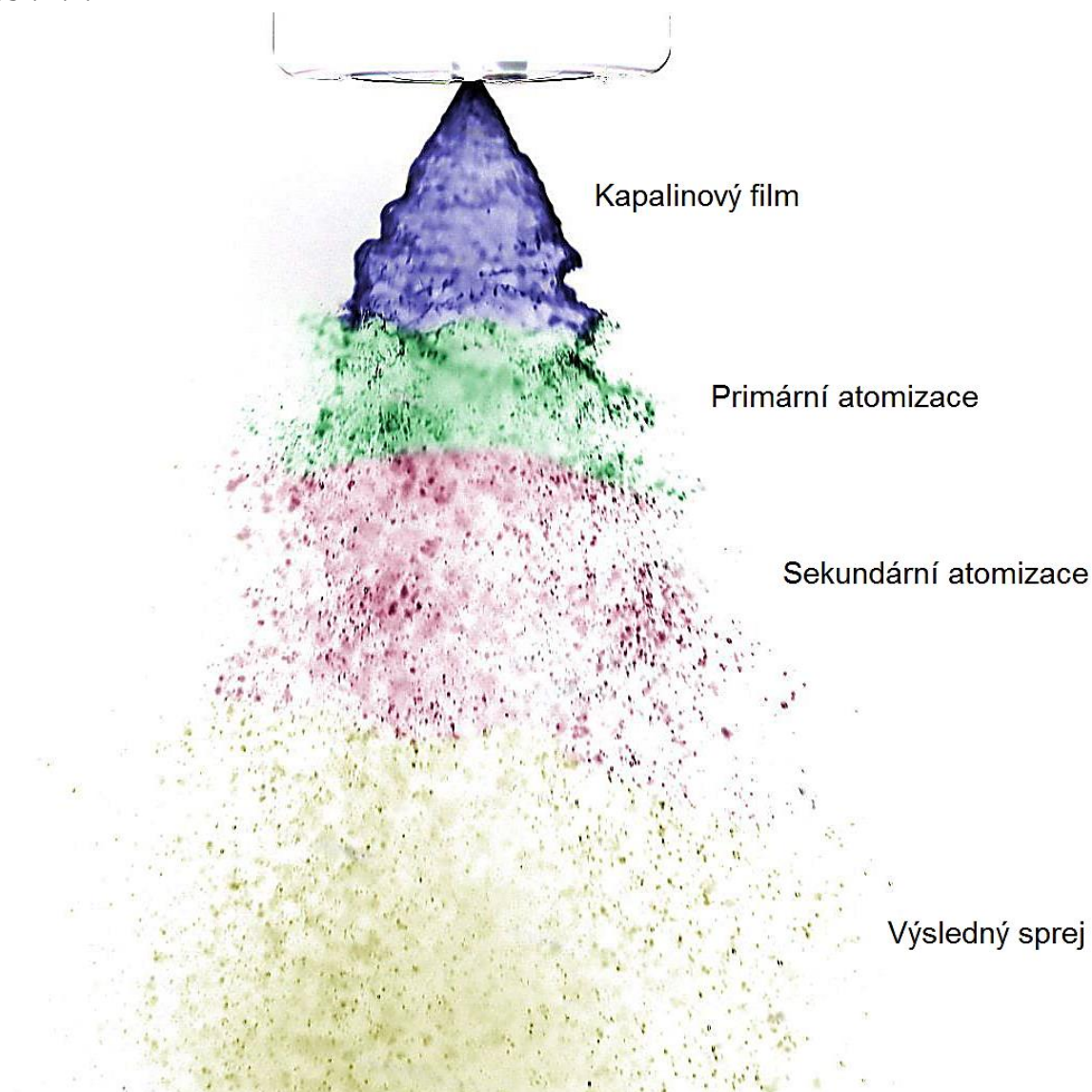
Součástí práce je vypracovaný výkres testovací sestavy.

Výzkum v oblasti atomizace je důležitý pro zajištění tvorby optimálního spreje pro danou aplikaci. Ve spalovacích motorech je jemnější sprej lépe smíchán se vzduchem, což vede k účinnějšímu spalování a snížení spotřeby paliva, a tedy i omezení emisí.

1 Základy atomizace

Atomizace či rozprašování je proces, při kterém je souvislý proud kapaliny přeměněn na malé kapky, které tvoří sprej. Rozprašování nachází využití ve spalování, spalovacích motorech, chlazení, čištění, barvení, aj.

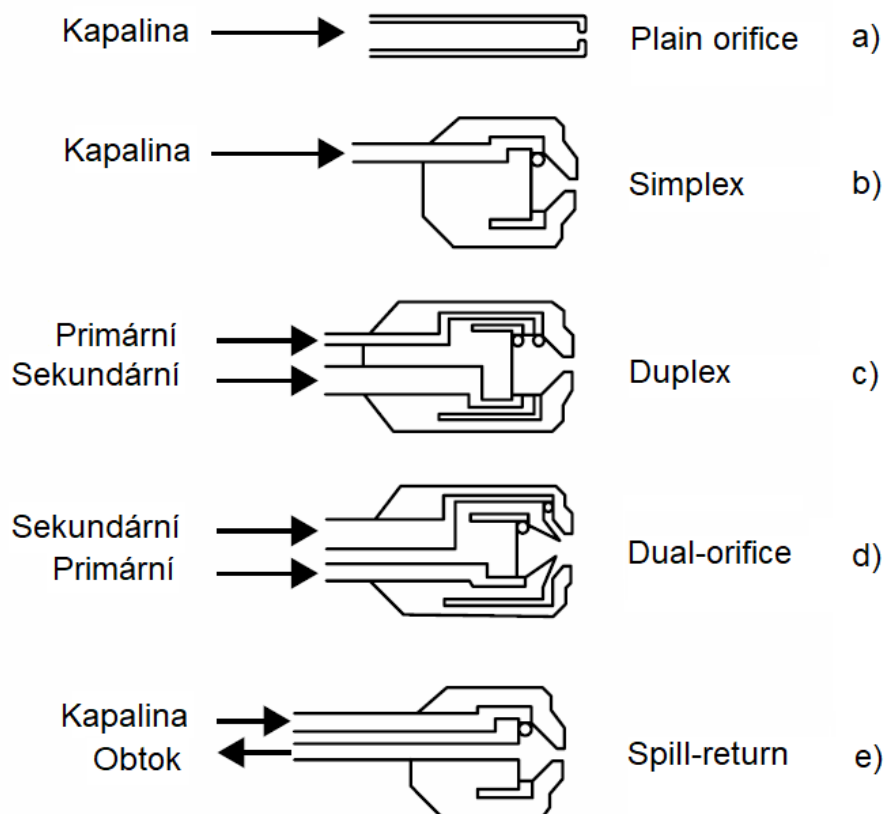
Samotný proces lze rozdělit do dvou dějů – *primární atomizace*, což je děj, probíhající těsně za otvorem trysky, kdy dochází k rozpadu proudu kapaliny na menší deformované útvary. *Primární atomizace* závisí kromě vlastního vnitřního proudění také na vlastnostech prostředí, do kterého tryska ústí. Na vlastnostech prostředí závisí i *sekundární atomizace*, kdy dochází k překonání kohezních sil silami aerodynamickými a útvary se dále rozpadají na menší kapky, viz obr. 1.1.



Obr. 1.1: Rozpad kapalinového filmu až do výsledného spreje, převzato z [10]

1.1 Tlakové trysky

Tlakové trysky, využívající k atomizaci mechanickou energii média, jsou nejobvyklejším typem trysek a dělí se na několik typů, z nichž některé jsou popsány níže (obr. 1.2).



Obr. 1.2: Schéma tlakových vířivých trysek: (a) Plain Orifice (Tryska s jednoduchým otvorem); (b) Simplex (Jednoduchá tryska); (c) Duplex (Tryska se dvěma nezávislými vstupy); (d) Dual-orifice (Tryska se dvěma otvory); (e) Spill-return (Tryska s obtokem); převzato z [11]

Plain orifice (Tryska s jednoduchým otvorem)

Jednoduchá tryska kruhového průřezu, kdy je kapalina tlačena malým otvorem. Dobrá atomizace je podmíněna malými rozměry ústí trysky (přibližně 0,3 mm, aby nedošlo k jeho ucpání přimíšenými částicemi). Využití nachází v přídavném spalování (forsáž) proudových motorů, kdy lze krátkodobě zvýšit výkon motoru. Dalšími aplikacemi jsou náporové, spalovací nebo raketové motory [12].

Simplex (Jednoduchá tryska)

Základní tryska s vírovou komorou, do které je pomocí tangenciálních vstupů přiváděna kapalina a dochází zde k přeměně tlakové energie na kinetickou. To má za následek zvýšení tlaku u stěny komory, respektive snížení tlaku v její osové oblasti a tvorbě vzdušného jádra, které se od výtokového otvoru šíří v ose komory dále, viz obr. 1.3.



Obr. 1.3: Vzdušné jádro v komoře trysky

Díky tomuto jevu vytéká kapalina z trysky v podobě tenkého filmu, který tvoří tvar dutého kuželu. Dobré atomizace je dosaženo při vysokých tlacích.

Tryska se dvěma vstupy (Duplex)

Tento typ trysky umožňuje dosahovat dobré atomizace bez nutnosti provozu při vysokých tlacích, což je nevýhoda jiných typů trysek, neboť průtok kapaliny je závislý na druhé mocnině tlakové difference. Proto má tato tryska dvě sady vstupů – primární a sekundární. Hlavní atomizace je prováděna pomocí primárních vstupů o malém průřezu, a pokud je překročen určitý vstupní tlak, otevře se ventil a kapalina začne protékat i většími sekundárními vstupy.

Nevýhodou trysky je poměrně nestálý úhel spreje, který je při nižších průtocích široký a s rostoucím průtokem se zmenšuje. Dalším negativem je špatné rozprašování při nízkých průtocích sekundární větvi [12].

Tryska se dvěma otvory (Dual-orifice)

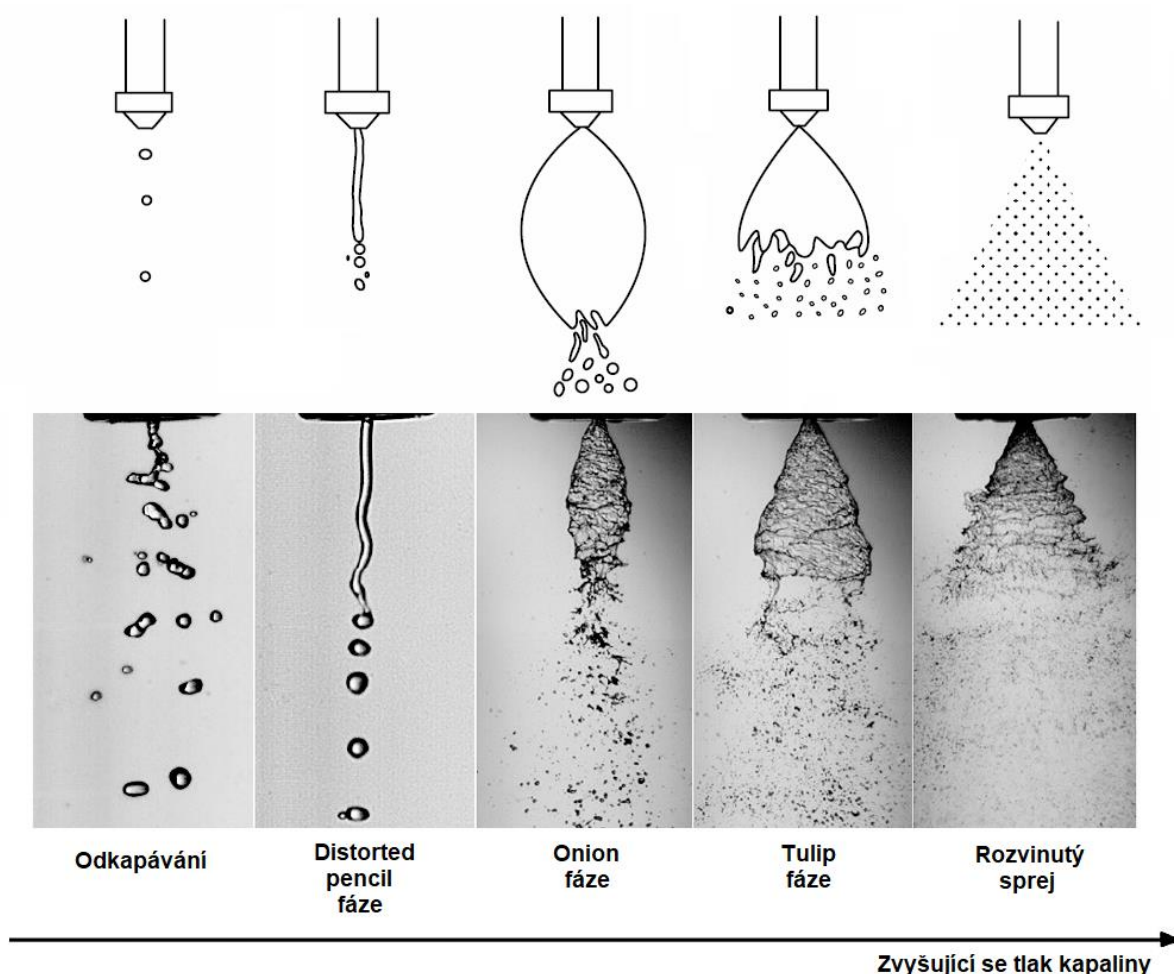
Koncept trysky se dvěma výstupními otvory (komorami) stejně jako trysky se dvěma vstupy vznikl kvůli náročnosti na vysoký provozní tlak u jiných typů trysek. Při nízkých průtocích je do atomizace zapojena pouze vnitřní komora, zatímco při vyšších je převážná část atomizace prováděna v komoře vnější. Přechod umožňuje ventil, který se po dosažení určitého pracovního tlaku kapaliny otevře. Sprej je při tomto přechodu nekvalitní.

Proti trysce s jednou komorou a dvěma vstupy nabízí toto řešení možnost rozdílných geometrií komor a tedy i rozdílných vlastností spreje [12].

Tryska s obtokem (Spill-return)

Koncept podobný trysce *simplex*, ovšem s jedním nebo více otvory v zadní stěně komory, díky kterým se pomocí regulovatelného ventilu odvádí část kapaliny zpět do oběhu. Výhodou této trysky je schopnost udržovat vysoký tlak a dobrý sprej je tvořen i za velmi nízkých průtoků [12].

Kapalina z těchto trysek vytéká v podobě tenkého filmu malým otvorem pod vysokým tlakem, který se mění v kinetickou energii (rychlost). Právě na tlaku je kvalita atomizace závislá a dělí se na několik fází, viz obr. 1.4.



Obr. 1.4: Formování spreje v závislosti na tlaku; převzato z [11]

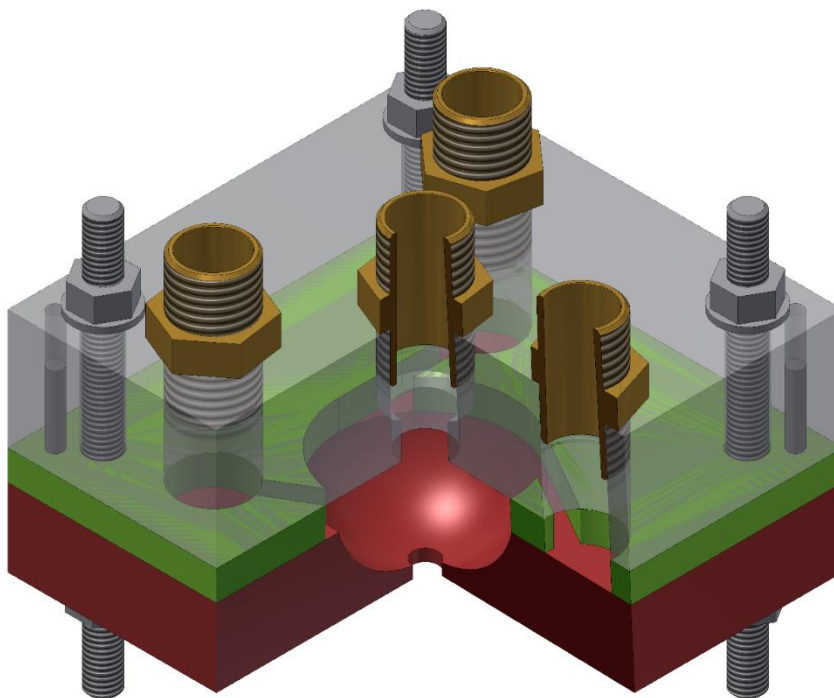
Při velmi nízkém tlaku kapalina pouze vykapává a vytéká otvorem. S rostoucím tlakem se začíná projevovat vířivá složka rychlosti, avšak síly kohezní mají stále výraznou složku a film za otvorem trysky vytváří uzavřený objem. Tato fáze se podle tvaru nazývá *onion* fáze a přechází v *tulip* fázi. Se zvyšováním tlaku se zlepšuje podoba spreje až do požadované kvality.

Základem tlakových vířivých trysek je komora, kde víří kapalina, která je do ní přiváděna pomocí tangenciálních vstupů, standardně dvou, ale nevylučuje se použití více, rovnoměrně rozdělených po obvodu. Vstupy mohou tvořit samostatný díl, nebo být součástí zadní stěny, která může mít jeden nebo více obtokových otvorů (*Spill-return*), nebo žádný (*Simplex*).

Právě z tlakové vířivé trysky používané v leteckém motoru, byl vytvořen zvětšený průhledný model.

1.2 Průhledný model tlakové vířivé trysky

Jak již bylo zmíněno v úvodu, práce navazuje na autorovu bakalářskou práci [7], ve které bylo úkolem navrhnout zvětšený a průhledný model tlakové vířivé trysky (viz obr. 1.5) a připravit výrobní výkresy. Model je vyroben z litého plexiskla, opracován a následně vybroušen a vyleštěn.



Obr. 1.5: Sestavený model modulární tlakové vířivé trysky

Model se skládá ze tří měnitelných částí – dílu s komorou, dílu s tangenciálními vstupy do komory a dílu se vstupními otvory a armaturami. Ty jsou sešroubovány pomocí šroubů, které jimi prochází. V případě poškození nebo užití odlišné geometrie lze provést jednoduchou výměnu.

Po výrobě modelu bylo nezbytné připravit testovací sestavu, vybrat pracovní kapalinu a provést otestování funkčnosti všech komponent měření, čemuž se věnují následující kapitoly.

1.3 Charakteristické veličiny trysky

Na základě vnitřní geometrie trysky a vlastností provozní kapaliny lze stanovit několik parametrů, které jsou pro trysku specifické.

Průtokový faktor (Flow Number)

Parametr, který popisuje efektivní průtočnou oblast trysky, je definován vztahem 1.1 [13]:

$$FN = \frac{\dot{m}_k}{\sqrt{\rho_k \Delta p_k}} \quad (1.1)$$

Kde je FN průtokový faktor
 $\dot{m}_k$ hmotnostní tok kapaliny
 ρ_k hustota kapaliny
 Δp_k vstupní přetlak do trysky

FN závislé na parametrech trysky stanovil Lefebvre [13] vztahem 1.2:

$$FN = 0,389 d_0^{1,25} A_i^{0,5} D_t^{-0,25} \quad (1.2)$$

Kde je FN průtokový faktor
 d_0 průměr výstupního otvoru
 A_i součet plochy průřezu vstupních otvorů
 D_t průměr vířivé komory (největší vzdálenost mezi okraji komory)

Výtokový součinitel (Discharge Coefficient)

Výtokový součinitel je poměrem skutečného a teoretického průtoku. Vzhledem k přítomnosti vzdušného jádra (viz obr. 1.4), které částečně zamezuje výtoku kapaliny, je zřejmé, že tento koeficient dosahuje nízkých hodnot [13]. Koeficient je definován vztahem 1.3 [14]:

$$C_d = \frac{\dot{m}_k}{A_0 \frac{\Delta p_k}{\rho_k}} \quad (1.3)$$

Kde je C_d výtokový součinitel
 $\dot{m}_k$ hmotnostní tok kapaliny
 A_0 plocha průřezu výstupního otvoru
 ρ_k hustota kapaliny
 Δp_k vstupní přetlak do trysky

Rizk a Lefebvre v [15] používají korelační vztah 1.4, který je závislý pouze na rozměrech trysky:

$$C_d = 0,35 \left(\frac{A_i}{D_t d_0} \right)^{0,5} \left(\frac{D_t}{d_0} \right)^{0,25} \quad (1.4)$$

Kde je C_d výtokový součinitel
 A_i součet plochy průřezu vstupních otvorů
 d_0 průměr výstupního otvoru
 D_t průměr vířivé komory

Úhel kuželu spreje (Spray Cone Angle)

Úhel kuželu spreje je důležitou charakteristikou trysky. S rostoucím úhlem dochází ke zlepšení atomizace, neboť kapky jsou déle vystaveny působení okolního vzduchu. Veličina, která je odvozena v [16], je definována vztahem 1.5:

$$2\theta = 6 \left(\frac{D_t d_0}{A_i} \right)^{0,15} \left(\frac{\Delta p_k d_0^2 \rho_k}{\mu_k^2} \right)^{0,25} \quad (1.5)$$

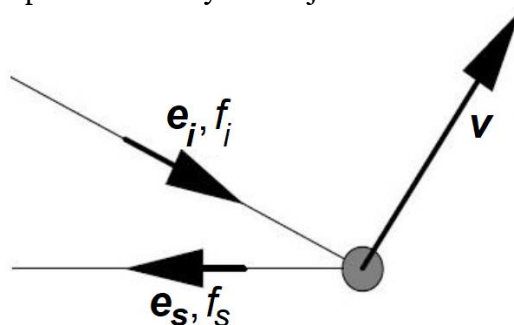
Kde je 2θ úhel kuželu spreje (θ odpovídá úhlu mezi osou a okrajem kužele spreje)
 D_t průměr vířivé komory
 d_0 průměr výstupního otvoru
 A_i součet plochy průřezu vstupních otvorů
 Δp_k vstupní přetlak do trysky
 ρ_k hustota kapaliny
 μ_k dynamická viskozita kapaliny

2 Optické metody a vizualizace proudění

Mezi základní měření charakteristiky spreje nebo vnitřního proudění patří laserová anemometrie a vizualizace pomocí vysokorychlostních kamer, pomocí kterých lze sledovat charakter proudění, což umožňuje hlubší pochopení dějů během rozprašovacího procesu. Tyto metody umožňují neinvazivní měření rychlosti a velikosti částic, ať už ve vnitřním proudění pomocí rozptýlených mikroskopických částic, které sledují proud, nebo ve spreji zaznamenáním průchodu kapek ve vzduchu.

2.1 Laserová dopplerovská anemometrie (LDA)

Jedná se o nejrozšířenější metodu laserové anemometrie využívající Dopplerova jevu. Při dopadu světla na částici dochází ke změně jeho frekvence, viz obr. 2.1. Změnu frekvence, jež je závislá na geometrii a rychlosti pohybu měřené částice, dokáže zaznamenat a změřit přijímací optika (fotodetektor), která spolu s laserovým zdrojem tvoří základ metody LDA.



Obr. 2.1: Rozptyl paprsku při dopadu na částici, převzato z [17]

Paprsek o frekvenci f_i ve směru vektoru $\mathbf{e}_i$ dopadá na částici o rychlosti $\mathbf{v}$, dojde k jeho rozptýlení do směru $\mathbf{e}_s$ a posunutí frekvence o Δf .

Frekvence rozptýleného paprsku je definována vztahem 2.1 jako součet frekvence paprsku ze zdroje a dopplerovského posuvu:

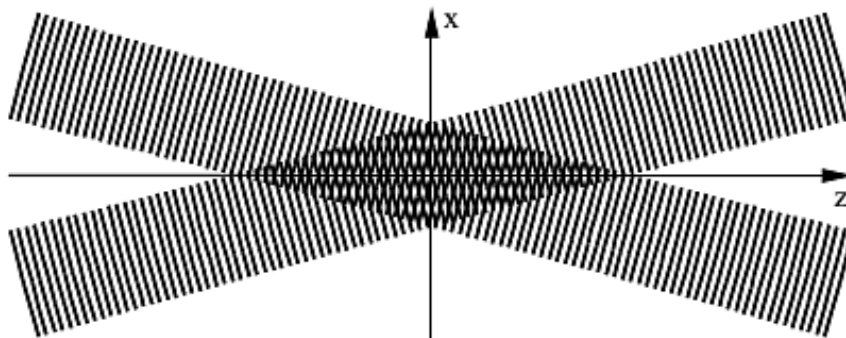
$$f_s = f_i + \frac{\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_i)}{\lambda_i} \quad (2.1)$$

Kde je

f_s	frekvence paprsku, který je zachycen přijímací optikou
f_i	frekvence paprsku světelného zdroje
$\mathbf{v}$	rychlost částice
λ_i	vlnová délka
$\mathbf{e}_s$	jednotkový vektor ve směru rozptýleného paprsku
$\mathbf{e}_i$	jednotkový vektor ve směru paprsku zdroje

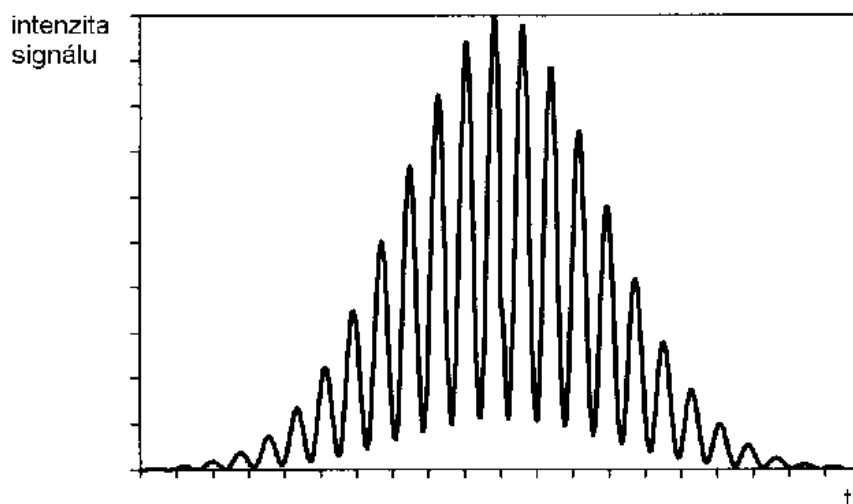
Vektory $\mathbf{e}_i$ a $\mathbf{e}_s$ jsou obvykle téměř souběžné [18] a obr. 2.1 je pouze schematický.

LDA systém tvoří dva monochromatické (jedna vlnová délka), koherentní (fázový rozdíl obou paprsků je konstantní) paprsky, které vznikly rozdělením hlavního paprsku, křížící se v měřicím bodě. Tímto způsobem dochází k jejich interferenci, kdy se vytváří souběžné pravidelně se střídající tmavé a světlé interferenční roviny zvané *fringe*, viz obr. 2.2 [17].



Obr. 2.2: Křížení laserových paprsků a jejich interference; převzato z [17]

Částice procházející objemem, vytváří signál (obr. 2.3), který zaznamená přijímací optika jako změnu frekvence paprsku. Informace o této změně je odeslána do výpočetního procesoru, kde je zpracována. Výsledkem je vlastní rychlost částice. Aby bylo možno určit její směr, je jeden z paprsků frekvenčně posunut, obvykle o 40 MHz.

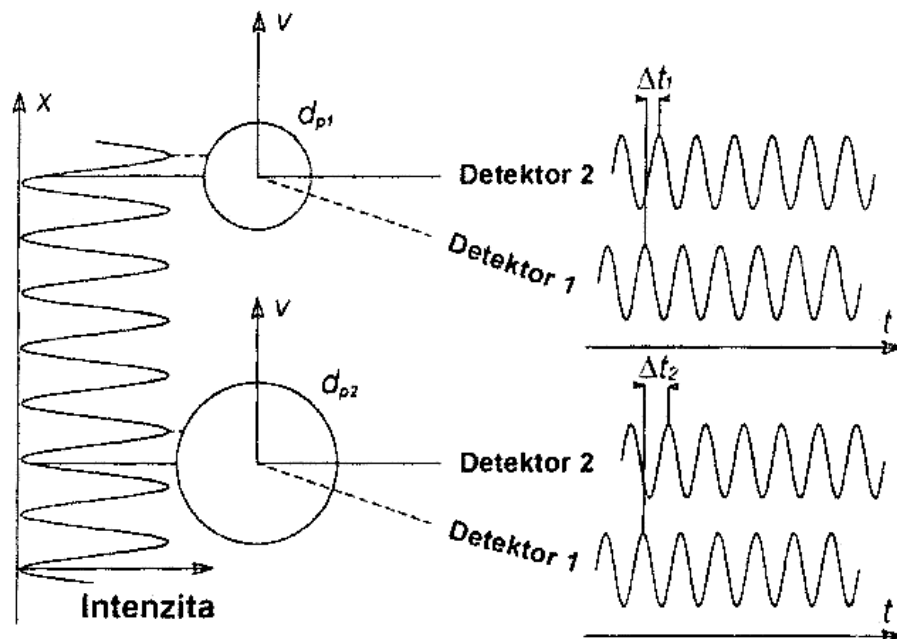


Obr. 2.3: Dopplerovský signál částice procházející měřicím objemem; převzato z [19]

Pro měření vlastností spreje je metoda LDA mnohdy nedostatečná, neboť kromě rychlostí kapek je velice důležitá i jejich velikost. K určení velikosti částic slouží rozšíření LDA na PDA.

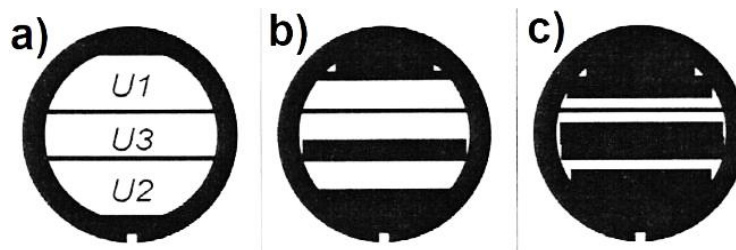
2.1.1 Fázová dopplerovská anemometrie (PDA)

Rozšíření metody LDA o další fotodetektory, díky čemuž je možné měřit rozměr kulových částic. Detektory zaznamenají shodný tvar signálu, který je však fázově posunut o Δt , viz obr. 2.4.



Obr. 2.4: Větší částice o průměru d_{p2} se vyznačuje větším fázovým posunem Δt_2 ; převzato z [18]

Aby se předešlo nejasnostem v případě, že je částice již natolik velká, že jsou signály posunuty o více než periodu (tzv. 2π dvojznačnost) jsou v praxi používány tři fotodetektory v kombinaci s aperturními maskami, které lze v závislosti na rozsahu rozměrů částic měnit, viz obr. 2.5.

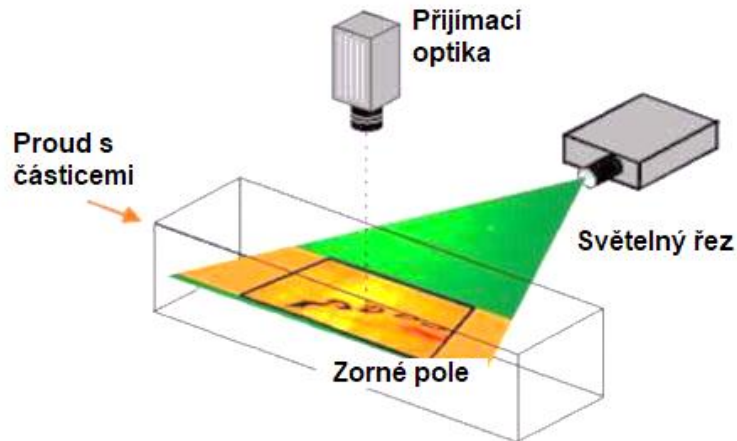


Obr. 2.5: Vyměnitelné masky pro rozdílné rozsahy rozměrů částic; a) malý rozsah, b) střední rozsah, c) velký rozsah; převzato z [18]

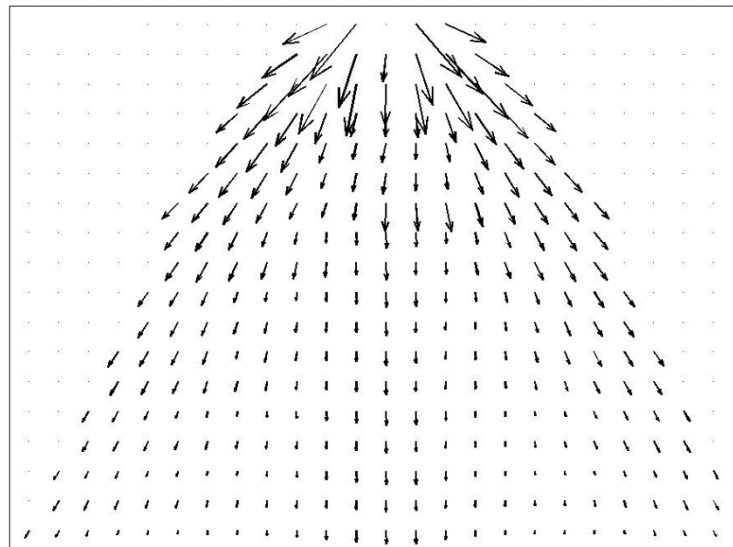
Metoda PDA je rozšířeným nástrojem pro měření vlastností spreje, kdy poskytuje informace, na jejichž základě lze zhodnotit efektivitu atomizace, kvalitu a vhodnost geometrie trysky pro danou aplikaci.

2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)

Metoda PIV rozšiřuje bodové měření na rovinné nebo prostorové, ovšem za cenu nižšího rozlišení. Světelný paprsek je rozšířen do světelné roviny (řezu), která osvětluje částice ve zkoumaném objemu (obr. 2.6), k čemuž se využívá pulsních laserů. Částice jsou buď dodatečně přidány, nebo jsou vytvářeny charakterem měření, jako jsou například kapky ve spreji. Ze záznamu jejich posunutí mezi jednotlivými pulsy za definovaný časový úsek lze určit gradient a velikost rychlosti. Tímto způsobem vznikají vektorové mapy (obr. 2.7), které poskytují přehled o proudění v širším měřítku.



Obr. 2.6: Základní schéma PIV systému, převzato z [20]

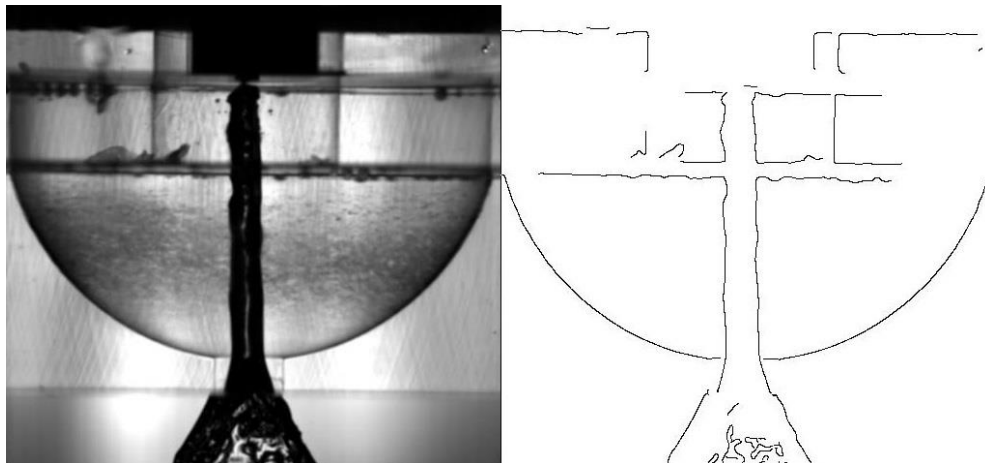


Obr. 2.7: Vektorová mapa spreje; převzato z [21]

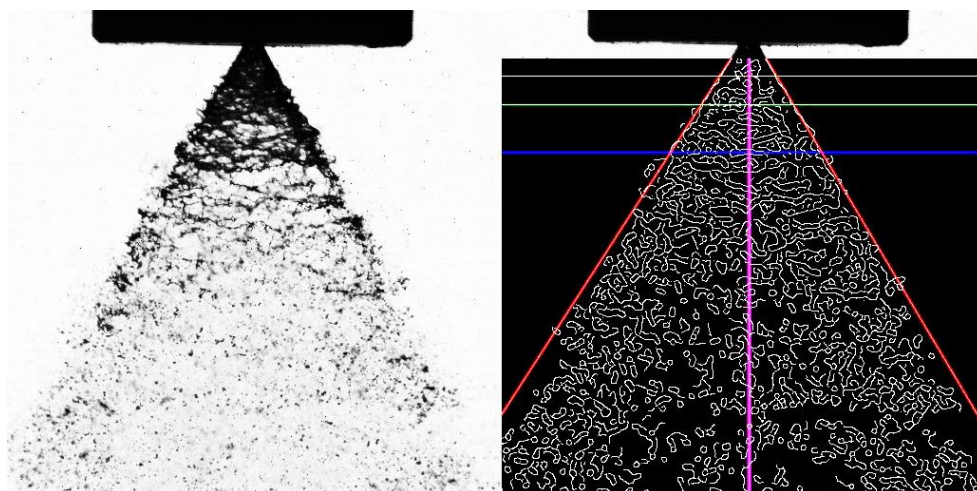
Často jsou užívány dvě synchronizované kamery (tzv. stereoskopické PIV), aby se předešlo zkreslení kvůli odlišné perspektivě obrazu z jedné kamery.

2.3 Vysokorychlostní vizualizace

Jedná se o metodu, která mnohdy slouží k prvotnímu získání informací, umožňující záznam velmi rychlých dějů a jejich vyhodnocení. U průhledného modelu trysky lze vizualizaci pomocí vysokorychlostní kamery použít ke studiu vnitřního proudění a sledování částic až k ústí trysky. V případě spreje je možné sledovat jeho chování a charakter, blíže zkoumat přechod mezi primární a sekundární atomizací nebo pozorovat vlivy prostředí na výsledný sprej.



Obr. 2.8: Vyhodnocení záznamu pomocí hledání hran v programu Matlab, čímž lze stanovit rozměry vzdušného jádra nebo úhel kuželu spreje



Obr. 2.9: Hledání hran pomocí programu Matlab po optimalizaci, kdy je viditelný přechod mezi jednotlivými stupni atomizace

Vysokorychlostní vizualizace nachází uplatnění v mnoha odvětvích výzkumu, jako je vizualizace proudění vzduchu, zkoušení střeliva a výbušnin, crash testy aj.

3 Fyzikální aspekty spojené s kapalinou a tryskou

Pro průhledný PMMA model je nezbytné zvolit vhodnou pracovní kapalinu, která musí kombinovat několik vlastností. Pro minimalizaci nežádoucího lomu světelného paprsku je vhodné, aby kapalina měla dostatečně vysoký index lomu světla, nejlépe shodný s PMMA pro potlačení tohoto jevu. Fyzikální vlastnosti důležité pro pracovní kapalinu jsou popsány níže.

3.1 Fyzikální vlastnosti kapaliny

Podkapitola se věnuje vybraným fyzikálním vlastnostem kapalin, které jsou důležité především kvůli dodržení bezrozměrných čísel (viz kap. 3.2), ale také pro splnění funkce modelu.

3.1.1 Hustota kapaliny

Hustota kapaliny ρ_k je definována jako hmotnost objemové jednotky kapaliny a popisuje ji vztah:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad (3.1)$$

Kde je ρ_k hustota kapaliny
 m_k hmotnost kapaliny
 V_k objem kapaliny

3.1.2 Povrchové napětí

Povrch kapaliny se chová jako tenká pružná blána, která uzavírá objem do tvaru nejnižší energetické hladiny (koule) a brání průniku vnějších sil do tohoto objemu. Lze jej definovat jako:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (3.2)$$

Kde je σ povrchové napětí
 F síla působící na povrch kapaliny
 l délka povrchu

Povrchové napětí lze také vyjádřit jako poměr energie povrchu a jeho plochy:

$$\sigma = \frac{dE_A}{dA} \quad (3.3)$$

Kde je σ povrchové napětí
 dE_A změna povrchové energie
 dA plocha povrchu

Povrchové napětí hraje důležitou roli při atomizaci, neboť je nezbytné překonat soudržné síly, aby došlo k rozpadu kapaliny.

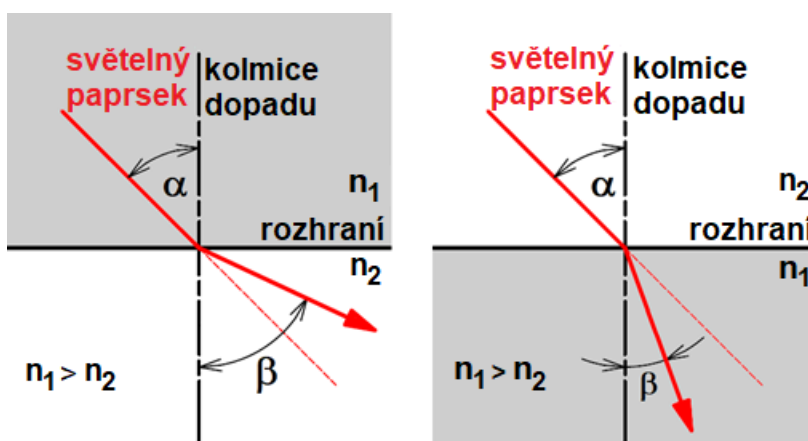
3.1.3 Index lomu světla

Veličina je definována poměrem rychlosti světla ve vakuu a rychlostí světla v prostředí:

$$n = \frac{c}{v_s} \quad (3.4)$$

Kde je n index lomu světla daného prostředí
 c rychlost světla ve vakuu
 v_s rychlost světla v daném prostředí

Při průchodu světelného paprsku rozhraním rozdílných prostředí dochází ke změně jeho dráhy na základě rozdílu indexu lomů, viz obr. 3.1. Pro použitou kapalinu je tedy nezbytné, aby se její index lomu světla nejvíce blížil použitému materiálu a nedocházelo ke zkreslení obrazu nebo měřených hodnot, čemuž se blíže věnuje kap. 7.



Obr. 3.1: Lom paprsku na rozhraní prostředí; PMMA ($n_1 = 1,49$) a voda ($n_2 = 1,33$)

- a) přechod světla z prostředí opticky hustšího n_1 do řidšího n_2 – lom od kolmice dopadu
 b) přechod světla z prostředí opticky řidšího n_2 do hustšího n_1 – lom ke kolmici dopadu

Pro světlo platí tzv. *Fermatův princip*, kdy se světelný paprsek mezi dvěma body šíří tak, aby vzdálenost mezi nimi urazil za nejkratší čas. Z tohoto principu lze odvodit *Snellův zákon*, který popisuje lom paprsku při přechodu mezi prostředními o různých indexech lomu světla:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (3.5)$$

Kde je α úhel dopadu
 β úhel lomu
 n_1 a n_2 indexy lomu světla prostředí
 n_{21} relativní index lomu

Podmínkou je, že nedochází k totálnímu odrazu paprsku.

Druhým zákonem je *zákon odrazu světla*, který popisuje odrazy paprsku na rozhraní dvou prostředí, kde dochází k alespoň částečnému odrazu:

$$\alpha = \alpha' \quad (3.6)$$

Kde je α úhel dopadu
 α' úhel odrazu

3.1.4 Viskozita kapaliny

Viskozitu lze popsat jako odpor kapaliny proti tečení nebo jako vnitřní tření v kapalině. Kapaliny se dělí do skupin podle svého chování – newtonské a nenewtonské, pro které neplatí Newtonův zákon.

Podle Newtonova zákona viskozity platí pro tečné napětí na stěně elementárního hranolku kapaliny o výšce dn vztah:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dn} \quad (3.7)$$

Kde je τ tečné napětí
 μ dynamická viskozita
 $\frac{dv}{dn}$ gradient rychlosti

Tento zákon platí pro newtonské kapaliny, mezi které patří například voda.

Kromě dynamické viskozity se rozlišuje ještě viskozita kinematická, která je definovaná:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.8)$$

Kde je ν kinematická viskozita
 μ dynamická viskozita
 ρ hustota kapaliny

Nenewtonské kapaliny jsou z pohledu chování složitější a rozdělují se do dvou skupin – kapaliny s časově nezávislými (reologickými vlastnostmi) a kapaliny s časově závislými vlastnostmi [18].

Kapaliny s časově nezávislými vlastnostmi – reologické kapaliny

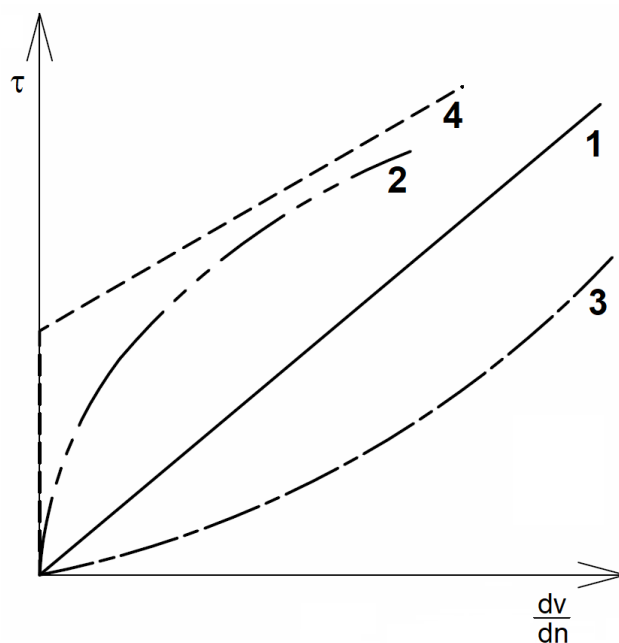
Reologické kapaliny jsou děleny do tří následujících skupin, jejichž charakteristiku lze vyjádřit pomocí reogramu (viz obr. 3.2):

- Pseudoplastické kapaliny – kapaliny, které mají nepravidelně orientované molekuly, a jejichž viskozita klesá s rychlostí deformace; např. krev
- Dilatantní kapaliny – jedná se o směs pevné látky a newtonské kapaliny, u které dochází k růstu viskozity s rychlostí deformace; např. písek s vodou
- Binghamské kapaliny – do překonání meze tekutosti se tento typ kapalin chová jako pevná látka, po jejím překonání začíná téct jako newtonská kapalina; např. zubní pasta

Pro tento druh kapalin platí vztah 3.7 pro tečné napětí [22]:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot (dv/dn)^{m_{exp}} \quad (3.9)$$

Kde je τ tečné napětí
 τ_0 mez tekutosti při nulovém gradientu
 k koeficient koexistence
 m_{exp} exponent nenewtonského toku
 $\frac{dv}{dn}$ gradient rychlosti (smyková rychlost)



Obr. 3.2: Reogram – závislost tečného napětí a smykové rychlosti; 1 – Newtonské kapaliny, 2 – Pseudoplastické kapaliny, 3 – Dilatantní kapaliny, 4 – Binghamské kapaliny

Kapaliny s časově závislými vlastnostmi

Tento druh kapalin se dělí na dvě hlavní skupiny:

- Reopexní kapaliny – Při pohybu dochází ke zvyšování tečného napětí a poklesu smykové rychlosti, což způsobuje postupné tuhnutí kapaliny; např. sádra s vodou [19]
- Tixotropní kapaliny – S časem za konstantní smykové rychlosti klesá tečné napětí a kapalina se stává tekutější; např. natěračské barvy [22]

3.2 Bezrozměrná kritéria proudění

Pro práci se zvětšenými modely je nezbytné dodržení vybraných bezrozměrných čísel, aby bylo chování kapaliny ve zvětšených modelech shodné s původní předlohou.

3.2.1 Vírové číslo

Pro zvětšený model trysky musí být zachováno vírové číslo, které vyjadřuje poměr mezi poloměrem vírové komory, poloměrem otvoru trysky a součtem plochy průřezu vstupů do trysky [4]. Vírové číslo, definované vztahem 3.10, zůstane shodné v případě, že jsou všechny rozměry trysky zvětšeny stejně.

$$S_0 = \frac{Q \rho_k w_i R_t}{Q \rho_k u_0 r_0} = \frac{w_i R_t}{u_0 r_0} \quad (3.10)$$

Za předpokladu, že tangenciální rychlost odpovídá poměru průtoku a ploše vstupů a axiální rychlost je dána poměrem průtoku a průřezu výstupního otvoru (vztah 3.11), je dán vztah 3.12 [2].

$$w_i = \frac{Q}{A_i} \quad \text{a} \quad u_0 = \frac{Q}{\pi r_0} \quad (3.11)$$

$$S_0 = \frac{\pi R_t r_0}{A_i} \quad (3.12)$$

Kde je	S_0	vírové číslo
	ρ_k	hustota kapaliny
	Q	průtok
	w_i	vířivá rychlost kapaliny (rychlost kapaliny na vstupech do trysky)
	R_t	poloměr vířivé komory (největší vzdálenost mezi osou komory a okrajem)
	u_0	axiální rychlost kapaliny
	r_0	poloměr výstupního otvoru
	A_i	součet plochy průřezu vstupních otvorů

Vírové číslo je mimo jiné užitečné při stanovení poměru celkové a axiální hybnosti kapaliny [23].

3.2.2 Reynoldsovo číslo

Velice důležitým parametrem, který musí být shodný u zvětšeného modelu s původní tryskou, je Reynoldsovo číslo. To lze určit pro několik pozic v trysce, jako jsou například vstupní otvory nebo výtok z trysky. Reynoldsovo číslo je poměrem dvou protichůdných sil, kdy na jedné straně je setrvačná síla pohybu kapaliny, proti které působí vnitřní tření v kapalině – viskózní síla, viz vztah 3.13 [23]. Jeho hodnota určuje, zda se uvnitř trysky jedná o proudění laminární nebo turbulentní.

$$Re = \frac{\text{Setrvačné síly}}{\text{Viskózní síly}} = \frac{w_i^2 D_i^2 \rho_k}{\mu w_i D_i} = \frac{w_i D_i \rho_k}{\mu} = \frac{w_i D_i}{\nu} \quad (3.13)$$

Kde je	Re	Reynoldsovo číslo
	w_i	tangenciální rychlost kapaliny
	D_i	hydraulický průměr vstupních portů
	ρ_k	hustota kapaliny
	μ	dynamická viskozita kapaliny
	ν	kinematická viskozita kapaliny

Pro dosažení shodného Reynoldsova čísla mezi původní tryskou a zvětšeným modelem, musí dojít k úpravě parametrů, na kterých je Re závislé. Do vztahu 3.13 je dosazena Bernoulliho rovnice (vztah 3.14):

$$w_i = \sqrt{\frac{2\Delta p_k}{\rho_k}} \quad (3.14)$$

Kde je w_i tangenciální rychlost kapaliny
 Δp_k pracovní přetlak kapaliny
 ρ_k hustota kapaliny

Dosazení vztahu 3.14 do vztahu 3.13:

$$Re = \frac{\sqrt{\frac{2\Delta p_k}{\rho_k}} D_i \rho_k}{\mu} \quad (3.15)$$

Změna rozměru (vztah 3.16) je závislá na měřítku zvětšení modelu (index 2) proti původní trysce (index 1):

$$D_{i2} = m_m D_{i1} \quad (3.16)$$

Reynoldsovo číslo původní trysky s původní kapalinou a zvětšeného modelu s kapalinou novou musí být shodné (vztah 3.17):

$$\frac{D_{i1} \sqrt{\Delta p_{k1}} \sqrt{2} \sqrt{\rho_{k1}}}{\mu_1} = \frac{D_{i2} \sqrt{\Delta p_{k2}} \sqrt{2} \sqrt{\rho_{k2}}}{\mu_2} \quad (3.17)$$

Po dosazení a úpravě vztahů 3.16 a 3.17 je dán vztah 3.18, který určuje poměry veličin kapalin pro zvětšený model. Pro dosažení shodného Re je provozně měněn především vstupní tlak:

$$\frac{\Delta p_{k2}}{\Delta p_{k1}} = \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^2 \frac{\rho_{k1}}{\rho_{k2}} \left(\frac{1}{m_m} \right)^2 \quad (3.18)$$

Vztahem 3.18 je určen poměr mezi veličinami, jestliže kapalina protéká celým průřezem. Pro trysku se jedná o část se vstupními porty. Reynoldsovo číslo pro kapalinu vytékající z výtokového otvoru platí vztah 3.19, který je rozšířen o výtokový součinitel C_d .

$$w_i = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p_k}{\rho_k}} \quad (3.19)$$

Stejným postupem jako v rovnicích 3.15 – 3.18 je odvozen vztah 3.20:

$$\frac{\Delta p_{k2}}{\Delta p_{k1}} = \left(\frac{C_{d1}}{C_{d2}} \right)^2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^2 \frac{\rho_{k1}}{\rho_{k2}} \left(\frac{1}{m_m} \right)^2 \quad (3.20)$$

Kde je $_1$ označení pro původní trysku
 $_2$ označení pro zvětšený model trysky
 Δp_k pracovní přetlak kapaliny
 C_d výtokový součinitel
 μ dynamická viskozita kapaliny
 ρ_k hustota kapaliny
 m_m měřítko zvětšení rozměrů

3.2.3 Freudeho číslo

Freudeho číslo, které je definováno vztahem 3.21, vyjadřuje vliv gravitace na vnitřní proudění [22] a musí být dostatečně vysoké, aby bylo možné považovat vliv gravitace za zanedbatelný.

$$Fr = \sqrt{\frac{\text{Kinetická energie}}{\text{Potenciální energie}}} = \sqrt{\frac{u_0^2}{4r_0g}} \quad (3.21)$$

Kde je Fr Freudeho číslo
 u_0 axiální rychlost kapaliny
 r_0 poloměr výstupního otvoru trysky
 g gravitační zrychlení

Axiální rychlost je přibližně shodná s rychlostí výtoku, který je částečně omezen vzdušným jádrem. Rychlost je tedy závislá na průtoku, poloměru výtokového otvoru a vzdušného jádra, viz vztah 3.22:

$$u_0 = \frac{Q}{\pi(r_0^2 - r_{0ac}^2)} \quad (3.22)$$

Dosazením vztahů 3.21 a 3.22 je dán vztah 3.23 pro Freudeho číslo v trysce:

$$Fr = \frac{Q}{2\pi(r_0^2 - r_{0ac}^2)\sqrt{r_0g}} \quad (3.23)$$

Kde je Fr Freudeho číslo
 Q průtok kapaliny na výtlaku čerpadla
 r_0 poloměr výstupního otvoru trysky
 r_{0ac} poloměr vzdušného jádra
 g gravitační zrychlení

Vztah 3.21 uvažuje trysku v pozici, kdy je osa komory v horizontální poloze. De Keukelaere v [4] užil zvětšený model trysky a při $Fr = 7,5$ zaznamenal v horizontální poloze malé zvýšení tlaku na stěně.

Freudeho čísla pro původní trysku a zvětšený model jsou i přes totožnou konfiguraci odlišná a poměr mezi nimi lze stanovit vztahem 3.25:

$$Fr_1 = \frac{\frac{\dot{m}_{k1}}{\rho_{k1}}}{2\pi(r_0^2 - r_{0ac}^2)\sqrt{r_0g}} \text{ a } Fr_2 = \frac{\frac{\dot{m}_{k2}}{\rho_{k2}}}{2\pi m_m^2(r_0^2 - r_{0ac}^2)\sqrt{m_m r_0 g}} \quad (3.24)$$

$$\frac{Fr_1}{Fr_2} = \frac{\dot{m}_{k1}\rho_{k2}\sqrt{m_m^5}}{\dot{m}_{k2}\rho_{k1}} \quad (3.25)$$

Kde je $_1$ označení pro původní trysku
 $_2$ označení pro zvětšený model trysky
 $\dot{m}_k$ hmotnostní tok kapaliny
 ρ_k hustota kapaliny
 m_m měřítko zvětšení rozměrů

3.2.4 Weberovo číslo

Chování kapaliny na rozhraní prostředí (vzdušné jádro, tvorba kapek) popisuje Weberovo číslo, které je poměrem mezi setrvačnou silou a povrchovým napětím (vztah 3.26).

$$We = \frac{\text{Setrvavačné síly}}{\text{Povrchové napětí}} = \frac{u_p^2 D_p \rho_k}{\sigma} \quad (3.26)$$

Kde je We Weberovo číslo
 u_p relativní rychlost kapky
 D_p průměr kapky
 ρ_k hustota kapaliny
 σ povrchové napětí

S rostoucím Weberovým číslem rostou síly, které narušují celistvost prostředí [13]. Hodnoty Weberova čísla se u zvětšených modelů trysky proti jejich předlohám značně liší, a proto je měření charakteristik spreje redukováno pouze na měření úhlu kuželu spreje.

3.2.5 Ohnesorgovo číslo

Vliv viskozity na rozpad spreje určuje Ohnesorgovo číslo, definováno vztahem 3.27.

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (3.27)$$

Kde je Oh Ohnesorgovo číslo
 We Weberovo číslo
 Re Reynoldsovo číslo

Viskózní síly mají významnou roli při hodnotě $Oh > 0,1$. Pokud je hodnota nižší, lze jejich vliv považovat za zanedbatelný [24]. Stejně jako Weberovo číslo je Ohnesorgovo číslo zvětšených modelů výrazně odlišné než u originální trysky. Proto se u takových modelů srovnávací měření charakteristik spreje (velikost kapek, aj.) neprovádí.

4 Rešerše kapalin, materiálů a optických experimentů pro průhledné modely

Pro dosažení kvalitních výsledků pomocí optických měření je při procházení paprsku několika optickými rozhraními nezbytné, aby mezi nimi byl co nejmenší rozdíl indexů lomu světla. Z tohoto důvodu je používána metoda MIR – *Matched Index of Refraction Technique* (Metoda pro sjednocení indexů lomu). V této kapitole je věnována pozornost jak průhledným materiálům, které lze použít, tak pracovním kapalinám, jejichž index lomu by měl být co nejbližší indexu lomu materiálu.

Při výběru vhodné kapaliny je nezbytné pamatovat na jejich fyzikální vlastnosti popsané v kapitole 3. Mísením čistých kapalin lze docílit optimalizaci vlastností. Směs je vhodné připravit smícháním více kapalin tak, aby jejich index lomu co nejpřesněji odpovídal indexu lomu plexiskla – rozhraní mezi kapalinou a komorou trysky se stane neviditelné. Dále je třeba, aby změnou poměru jednotlivých složek bylo možné regulovat viskozitu a hustotu směsi, neboť je nezbytné dodržet stanovená bezrozměrná kritéria, viz kap. 3.2. Pro hledání a míchání směsi je pro tuto práci stanoveno několik základních podmínek:

- Dostatečná průhlednost výsledné směsi (pro vizualizaci vysokorychlostní kamerou)
- Dostatečný rozsah indexu lomu a viskozity
- Možnost tyto vlastnosti měnit a upravovat podle potřeby
- Odolnost vůči nežádoucím změnám vlastností (odpařování, stárnutí, aj.)
- Směs by neměla chemicky působit na plexisklo (není zcela nutnou podmínkou)
- Pracovní teplota kapaliny se může pohybovat od -20 do 50 °C
- Pracovní tlak kapaliny do 0,15 MPa

Kromě základních podmínek je nutné uvažovat i konkrétnější vlastnosti kapalin:

- Cena
- Dostatečná dostupnost
- Negativní vlivy na člověka, PMMA nebo jiné materiály v sestavě
- Zápach
- Zbarvení
- Rychlost oxidace
- Pěnivost kapaliny
- Snadné čištění
- Dosažení požadovaných bezrozměrných kritérií

Rešerše kapalin, materiálů a používaných optických metod byla vypracována důkladně, se snahou aby sloužila jako propracovaný přehled problematiky průhledných modelů a hledání vhodných pracovních kapalin. Rešerše také nabízí vhled do oblastí, kde jsou průhledné modely aplikovány, a ukazuje problémy, které sami autoři museli překonat. Pro její vypracování bylo užito poznatků z mnoha odborných článků, které se převážně zabývají problematikou proudění tekutin. Dále byly použity odborné práce věnující se problematice optických metod (LDA, PIV, aj.), jejichž nutností pro přesné měření bylo sjednocení indexů lomů mezi materiálem a tekutinou, aby nedocházelo k nechtěným lomům světla.

4.1 Kapaliny pro průhledné modely

Největší důraz při výběru kapaliny byl kladen na blízkost indexu lomu světla s PMMA. S indexem lomu PMMA přibližně 1,4925 (při vlnové délce světla 589 nm) je důležité, aby alespoň jedna složka výsledné směsi měla index lomu vyšší, neboť právě smícháním ve vhodném poměru s kapalinou o nižším indexu lomu vznikne směs s ideálním indexem lomu, kterou by nebylo nutné temperovat (změna indexu lomu pomocí teploty). Tento požadavek ovšem výrazně sníží množství kapalin pro výběr. Obecně lze říci, že s rostoucím indexem lomu materiálu klesá množství látek, které je možné použít.

Index lomu blízký PMMA mají často oleje – organické sloučeniny, z nichž výrazně vyšší index lomu má jen několik (např. anýzový olej). Proti této výhodné vlastnosti ovšem stojí fakt, že plexisklo je korozivní právě v kombinaci s mnoha organickými, především aromatickými kapalinami, neboť se jedná o organická rozpouštědla, která jsou však velmi často dobře mísitelná mezi sebou, a nabízely by tedy vhodné řešení pro tvorbu směsí.

Kvůli odlišným fyzikálním i chemickým vlastnostem byla zpracována rešerše, kde jsou kromě olejů uvažovány i jiné kapaliny, pro které byla zhodnocena vhodnost použití pro aplikace týkající se této práce. Kromě fyzikálních a chemických vlastností je důležité brát zřetel na zachování průhlednosti, neboť ačkoli mohou být obě vstupní látky průhledné, jejich smícháním může docházet ke vzniku sraženin nebo zbarvení směsi.

4.1.1 Hledání vhodné kapaliny

Prvotní vhled do problematiky představovaly tabulky chemických odolností pro plasty, například [25, 26], které vytvářely firmy zabývající se jejich výrobou. Tyto tabulky, které dokázaly pomoci při výběru prvních návrhů, se staly inspirací pro vlastní sérii testů, kdy byla zkoumána chemická odolnost PMMA vůči kapalinám. Důležitým zdrojem, který sloužil jako základ pro hledání v odborné literatuře, se stala tabulka 4.1 [6] a práce [27], které nabízí přehled několika olejů a dalších kapalin použitých spolu s PMMA materiálem.

Autoři pracující s vodou

Nejběžněji používanou kapalinu pro použití s průhlednými modely je voda, a to zejména kvůli nízké ceně, vhodným fyzikálním vlastnostem a dobré průhlednosti. Také výborně odolává změnám vlastností v čase a nepůsobí negativně na plexisklo. Autoři, jako například Keukelaere [4] nebo Hsieh a Rajamani [28], používají vodu jako pracovní médium, především při zkoumání způsobu chování kapaliny uvnitř trysky. Pokud je potřeba kapalina viskóznější, lze vodu v požadovaném poměru smíchat s glycerolem.

V práci [4] je použit zvětšený model trysky z plexiskla v kombinaci s vodou jako pracovním médiem. Na model jsou aplikovány měřicí metody pro zjištění průtoku nebo tlaku, a také je zkoumán tvar rychlostního pole a tvar vzdušného jádra.

V práci [28] je měřeno rychlostní pole ve skleněném odstředivém separátoru pomocí optických metod s porovnáním výsledků mezi pracovními látkami – vodou a směsí vody s glycerolem (glycerín), s jehož rostoucím obsahem se výrazně měnila viskozita směsi, která s úbytkem vody exponenciálně rostla.

Voda má při teplotě 20 °C přibližně index lomu 1,33 a glycerol při stejné teplotě 1,47, zatímco PMMA dosahuje hodnoty 1,49 [29]. Směsí vody s glycerolem tedy není možné dosáhnout stejného indexu lomu, protože obě látky mají index lomu nižší než plexisklo.

Několik autorů se nespokojilo pouze s vodou nebo směsí s glycerolem jako pracovním médiem a hledali směs, jejíž index lomu by byl blíže indexu materiálu trysky při běžných provozních podmínkách.

Tab. 4.1: Indexy lomů kapalin a jejich vlastnosti, převzato z [6]

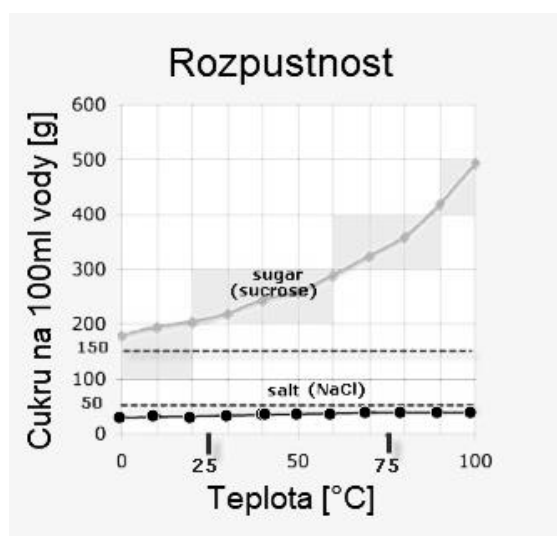
Fluid	Refractive Index	CAS #	Density (g/cm ³)	Dynamic viscosity (cP)	Cost
Water	1.33		1	1	
Glycerin	1.47	56-81-5	1.262	934	\$\$
Zinc iodide solution	1.33–1.62	10139-47-6	4.74	1–10.	\$\$\$\$
Sodium iodide solution	1.33–1.5 (60%)	7681-82-5	3.67		\$\$
Potassium thiocyanate sol.	1.33–1.49	333-20-0	1.89	1–2.4	\$
Ammonium thiocyanate sol.	1.33–1.5	1762-95-4	1.3	1–2.1	\$\$
Sodium thiocyanate sol.	1.33–1.48	540-72-7	1.74	1–7.5	\$
Kerosene	1.45	8008-20-6	0.8		\$
Silicone oil mixture	1.47	63148-58-3	1.102	90–110	\$\$\$\$
Mineral oil	1.48	8020-83-5	0.862		\$
Turpentine	1.47	8006-64-2	0.87	1.49	
Solvent naphtha	1.5		0.67		
Soybean oil	1.47	8001-22-7	0.93	69	\$\$\$
Olive oil	1.47		0.92	84	
Castor oil	1.48	8001-79-4	0.96	986	\$\$\$
Tung oil	1.52	8001-20-5	0.93		\$
Cassia oil	1.6				
Dibutylphthalate	1.49	84-74-2	1.043		\$
Tetraline	1.541	119-64-2	0.969		\$\$\$
Benzyl alcohol	1.54	100-51-6	1.044	5	\$\$\$
Ethyl alcohol	1.362	64-17-5	0.79		\$\$\$
Methylnaphthalene	1.615	90-12-0	1.001		\$\$\$\$
Chloronaphthalene	1.632	90-13-1	1.194		\$\$\$\$
200 fluid (Dow Corning)	1.404		0.816	1	
550 fluid (Dow Corning)	1.4935		1.065	125	
556 fluid (Dow Corning)	1.46		0.98	20	
710 fluid (Dow Corning)	1.533		1.11	500	
Cargille RI matching fluids	1.3–2.3				\$\$\$\$\$
D-Limonene	1.473	5989-27-5	0.843	0.8	\$\$\$\$
Methylsalicylate	1.526	119-36-8	1.184	4.09	\$\$\$\$
Diethylphthalate	1.504	84-66-2	1.118	12	\$\$
p-Cymene	1.491	99-87-6	0.857	0.876	\$\$
Isopropyl alcohol	1.378	67-63-0	0.81		\$\$

Muguercia (1993)

V práci [30] se autor pokusil nalézt vhodnou kapalinu pro index lomu shodný se skleněnou trubicí. Zprvu použil směs tří složek – 72% roztok vody s cukrem, směs vody a glycerolu a 58% roztok jodidu sodného. Touto směsí se autorovi podařilo dosáhnout indexu lomu skla (přibližně $n = 1,473$ při 20 °C).

Index lomu PMMA je jen o dvě setiny vyšší než 100% glycerolu, s přihlédnutím k jeho vysoké viskozitě, se směs vody a glycerolu jeví nedostačující.

Cukrový roztok je také nedostatečný, neboť 72% roztok je nasycen přibližně při 35 °C, což odpovídá 260 g cukru na 100 ml (viz obr. 4.1) vody a indexu lomu 1,47. Větší koncentrace lze dosáhnout dalším zahříváním roztoku, ovšem od koncentrace 70 % výrazně roste viskozita roztoku. Indexu lomu 1,49 odpovídá 79–80% roztok, pro jehož přípravu by však bylo nutné směs udržovat na teplotě přibližně 80 °C [31]. Což je provozně nežádoucí. Rozprašování cukerného roztoku by mimo jiné stěžovalo práci vzhledem k jeho lepivosti.

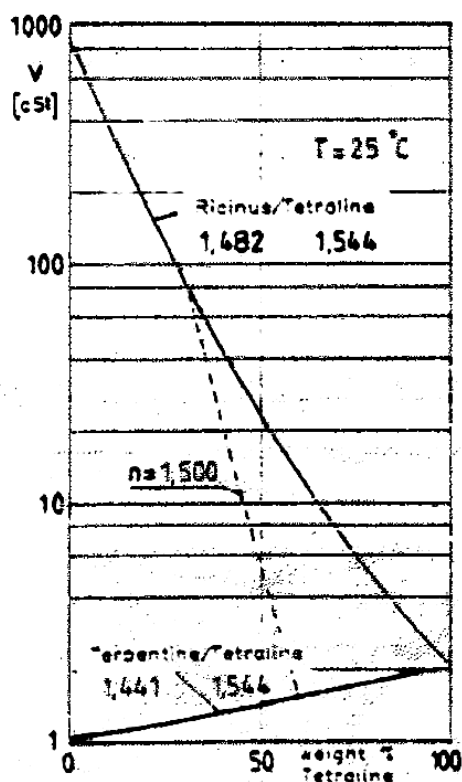


Obr. 4.1: Křivka rozpustnosti cukru ve vodě v závislosti na teplotě; převzato z [31]

Od výše zmíněné směsi bylo upuštěno, neboť je velmi viskózní. Nově byla použita 58–60% směs benzyl alkoholu a 95% etanolu v poměru takovém, aby došlo k dosažení shody indexů lomu pracovní kapaliny se skleněnou trubicí. Směs má stejnou hustotu jako voda a je 2,7× viskóznější. Dochází ovšem k negativnímu působení na části trati, jako jsou těsnění, plastová potrubí aj. Tento fakt by kapalinu vyloučil i v případě, že by byl model trysky vyroben ze skla.

Horvay a Leuckel (1984)

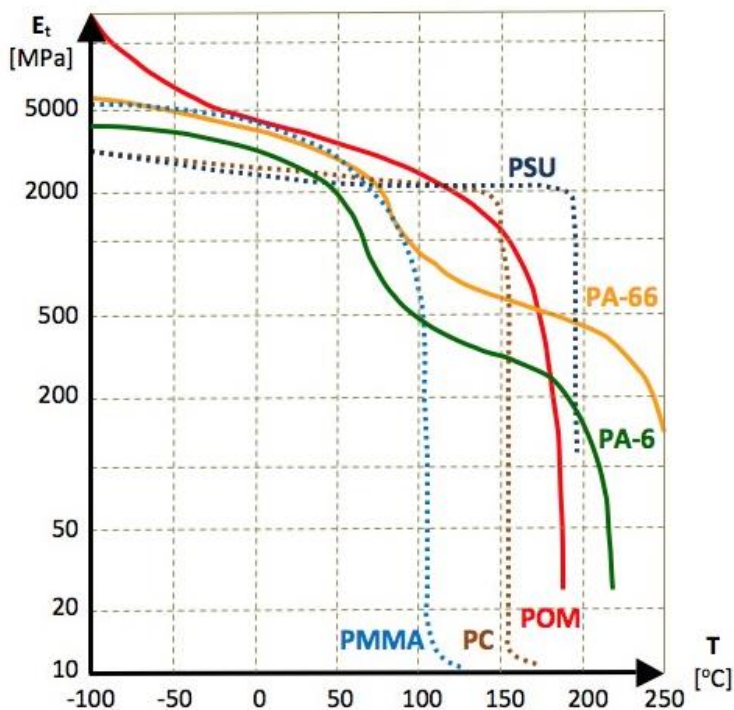
Autoři v práci [1] používají model z PMMA a snaží se dosáhnout pracovní kapaliny takové, aby měla shodný index lomu s plexisklem. Vědomi si korozivních účinků aromatických sloučenin na materiál PMMA použili směs poloaromatického tetrahydronaftalenu (tetralín), terpentýnu a ricinového oleje. Pomocí kombinace tří složek lze dobře měnit index lomu i viskozitu výsledné směsi (viz obr. 4.2) a s ní úzce související Reynoldsovo číslo. Práce s těmito látkami obnáší rizika, neboť tetralín i terpentýn jsou pro člověka nebezpečné látky. Výpary tetralínu poškozují a ničí červené krvinky, výpary terpentýnu poškozují dýchací a nervovou soustavu [32, 33].



Obr. 4.2: Závislost viskozity a indexu lomu směsí jako funkce koncentrace; převzato z [1]

Podle autorů je možné omezit poškození plexiskla tak, že je model zahřát na teplotu 95 °C po dobu 24 hodin, kdy je teplota skelného přechodu (změna ze sklovitého stavu plastu do stavu kaučukového a obráceně) pro PMMA přibližně 105–115 °C [34].

Lze tedy předpokládat, že autoři chtěli plast změkčit, a snížit tak modul pružnosti, viz obr. 4.3.



Obr. 4.3: Závislost modulu pružnosti vybraných plastů na teplotě; převzato z [34]

Struktura PMMA se však se snížením teploty opět vrací do původního tvrdého a křehkého stavu. Důvod, proč tak autoři učinili, nebylo možno dohledat. Stejnou směs terpentýnu a tetralínu používá Liu [3], ovšem jeho model byl poškozován, a tak tento problém zůstává nevyřešen.

Scholz, Reuter a Heitmann (2012)

V práci [35] byl použit jodid sodný, který byl zvolen jako nejvhodnější směs pro PIV měření PMMA modelu (v měřítku 1:1) válce a hlavy válce motoru. Během jejich testů bylo odhaleno několik nevýhod použité kapaliny.

Jodid sodný je silně hygroskopickou látku (snadno váže vzdušnou vlhkost), která je velice náročná na úschovu a přípravu, kdy musí dojít k dokonalému vysušení ve vakuové peci. Roztok není časově stálým, neboť velmi rychle oxiduje při kontaktu s okolním vzduchem a rychle váže vodu. Je tedy nezbytné pro každé měření připravovat a přesně odměřovat nový roztok, což je vzhledem k nechemickému zaměření práce vážný nedostatek. Zbarvení v důsledku oxidace se lze částečně zbavit použitím thiosulfátu sodného (Antichlor). Kromě náročné přípravy a údržby tvoří čistý jodid sodný drobné sraženiny, viz obr. 4.4.

Autoři měli problém s ocelovými i nerezovými částmi pokusné tratě, které vlivem působení jodidu sodného rychle korodovaly. Netečný byl vůči hliníku, mědi, PMMA a částem z tvrdého plastu. Elastické plasty (těsnění, hadice) začaly rychle křehnout a musely být vyměněny za pevnější, které poskytovaly delší životnost. Krátkou životností těsnění se ukázal další problém – jodid sodný během několika týdnů červeně obarvil okolí tratě, kvůli únikům způsobených zkorodovanými těsněními a manipulací s kapalinou.

Kromě jodidu sodného autoři zvažovali použít směs tetralínu a terpentýnu, směs vody a glycerínu, olej Shell Gravex 917 a roztok vody s jodidem zinečnatým. Jodid sodný byl vybrán kvůli vhodné viskozitě, neutrálnímu chování vůči PMMA i lidské kůži, výrazně nižším nákladům než v případě jodidu zinečnatého a menšímu zbarvování kapaliny v důsledku oxidace. Olej Shell Gravex 917 je svým složením a vlastnostmi velice blízký minerálnímu oleji (parafinu). Vzhledem k větší dostupnosti minerálního oleje byl Shell Gravex z kapalin pro testování vyrazen.

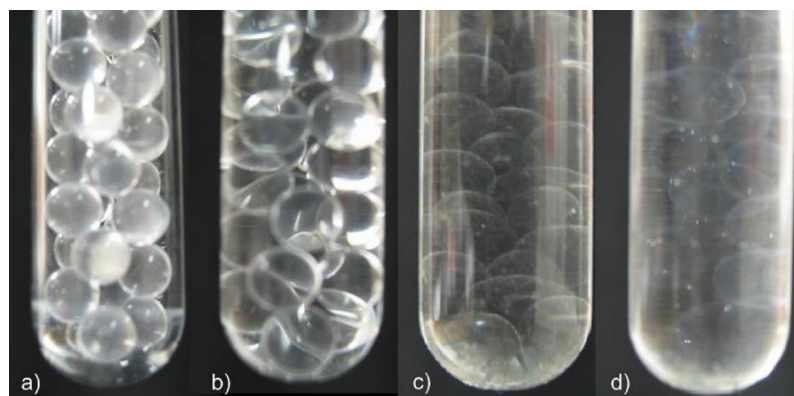
Hendriks a Aviram (1982)

V práci [36] autoři zvolili jako pracovní médium jodid zinečnatý, který poskytuje velmi dobré provozní vlastnosti a není korozivní vůči plexisklu. Pro dosažení shodného indexu lomu s PMMA je potřeba přibližně 60% roztok při 21 °C. Roztok má podobnou nebo jen mírně vyšší viskozitu jak voda.

Jodid zinečnatý je nákladným médiem, složitým na přípravu a úschovu, stejně jako jodid sodný. Také je třeba jej kvůli silně hygroskopickým vlastnostem vysušit ve vakuové peci, poté je teprve možno přesné navážení soli. Vytvořený roztok je čirý, ale rychle oxiduje v kontaktu se vzduchem. Další nevýhodou je, že jodid zinečnatý dráždí lidskou kůži.

Hassan a Dominguez-Ontiveros (2008)

Autoři v [6] použili kapalinu zvanou *paracymen* (též cymen, p-cymen, 4-isopropyltoluen nebo 4-metylkumen). Za použití LDA zkoumali proudění mezi PMMA kuličkami ve skleněném válci, viz obr. 4.4.



Obr. 4.4: PMMA kuličky v různých prostředích;
a) vzduch, b) voda, c) p-cymen, d) roztok jodidu sodného; převzato z [6]

Podle autorů by pro dosažení nejlepších optických výsledků bylo nejvhodnější použít roztok jodidu sodného, avšak v roztoku vznikaly pevné částice, které narušovaly měření.

Z toho důvodu použili p-cymen, poznamenali však, že jako organická látka nepříznivě působí na materiál PMMA, a je třeba tomuto jevu věnovat pozornost. Měření tato skutečnost nenarušila. Autoři v práci [37] korozivní účinky p-cymenu na PMMA nezmiňují, naopak poznamenávají, že použití této látky jako pracovní kapaliny bylo správné rozhodnutí, při kterém docílili shody indexů lomu.

Nemes, Jalal a Coletti (2016)

V práci [38] byl pro simulaci proudění v lidské průdušnici a průduškách použit materiál WaterShed (WaterShed XC 11122) s indexem lomu 1,514, který je používán jako materiál pro 3D tisk. Jako pracovní kapalina byla zvolena směs anýzového a parafínového oleje. Podle autorů tato směs na materiál negativně nepůsobí.

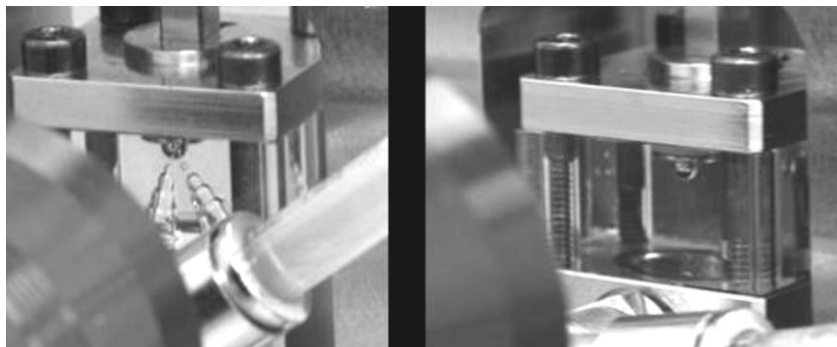
Stahl a kol. (2005)

V práci [39] se autoři zabývali primární atomizací tlakových trysek. Pro měření pomocí LDA sjednotili index lomu kapaliny a plexiskla, čehož dosáhli pomocí směsi olejů Shell Gravex 917 a 913.

Purwar a kol. (2016)

Skupina autorů v práci [40] studovala vliv kavitace vysokotlaké diesellové trysky na výsledný sprej. Pro tuto práci připravili asymetrickou průhlednou trysku z materiálu PMMA, index lomu pracovní kapaliny shodného s plexisklem je dosaženo pomocí 1-bromnaftalenu, který má vyšší index lomu než PMMA a kalibračního oleje (Castrolcalibrationoil ISO 4113).

Stejná směs kapalin byla použita v práci [41], která se zabývala kavitací u ústí vstřikovačů, viz obr. 4.5.



Obr. 4.5: PMMA tryska; Vlevo otvory vyplněny vzduchem, vpravo zvolenou směsí;
převzato z [41]

4.1.2 Další uvažované kapaliny

V této podkapitole jsou přidány další kapaliny, které nebyly součástí rešerše literárních zdrojů.

Ing. Filip Mravec, Ph.D., v emailové komunikaci zmiňuje tři kapaliny (Clericiho roztok, chlorid kademnatý a bromid arsenitý), které mohou dosáhnout indexu lomu plexiskla, jsou ovšem vysoce toxické vůči lidskému organismu. Kromě těchto roztoků jsou přidány další kapaliny nebo látky, které lze uvažovat pro obsah této práce.

Clericiho roztok

Jedná se o bezbarvý až žlutě zbarvený roztok malonátu a mravenčanu thalnatého, který je ředitelný vodou a může dosahovat indexu lomu až 1,56. Díky přítomnému thaliu se jedná o velice toxický roztok, náročným na úschovu, neboť časem oxiduje.

Chlorid kademnatý

Jedná se o hygroskopický bílý prášek, který je rozpustný ve vodě, kde tvoří bezbarvý roztok. Jako hemipentahydrát má index lomu přibližně 1,65 a používá se k výrobě žlutého barviva. Kadmium je také velice toxická látka, kvůli čemuž byl roztok vyřazen z testování.

Bromid arsenitý

Bílá až bledě žlutá krystalická látka o vysokém indexu lomu ($n = 2,3$), kterou lze rozpustit ve vodě, čímž vznikne silně jedovatý roztok. Jde o další roztok, který byl vyřazen kvůli toxickým vlastnostem.

Skořicový aldehyd

V práci [42] se autoři snaží dosáhnout shodného indexu lomu p-cymenu s PMMA pomocí přidání 1–2 % této látky a vytvořit směs. Jedná se o žlutou olejovitou kapalinu s vysokým indexem lomu ($n = 1,62$). Látka nebyla v této práci použita, neboť výrazně poškozuje PMMA a rychle oxiduje.

Thiokyanaté soli

Budwig v [27] zmiňuje autory, kteří použili thiokyanaté soli. Tyto soli jsou rozpustné ve vodě a glycerínu, lze tak snadno regulovat viskozitu i index lomu směsi. Většinou se používají pro plasty s nižším indexem lomu než PMMA, protože index lomu solí se pohybuje přibližně mezi 1,47 – 1,49. Vážným nedostatkem těchto látek je vysoká toxicita.

Další přidané kapaliny

V laboratoři sprejů VUT v Brně dlouhodobě probíhá výzkum trysek leteckých motorů. Z tohoto důvodu je zde používáno letecké palivo kerosin (Kerosin – typ Jet A-1) o indexu lomu 1,44 – 1,45, které bylo zařazeno do testování vlivu na PMMA.

Při nákupu vybraných kapalin z rešerše byl proveden dodatečný průzkum látek, které nabízela firma Fichema s.r.o. Jelikož se jednalo o oleje, ke kterým nebylo možno nalézt jejich chemický vliv na PMMA, rozhodl se autor přidat tyto oleje k testování. Jedná se o bodlákový olej $n = 1,476$ a tungový olej $n = 1,52$, který má index lomu vyšší než PMMA, je však hnědě zbarven a je velice viskózní.

4.1.3 Souhrn kapalin

Cílem kapitoly 4.1 bylo najít vhodnou kapalinu nebo směs pro přiblížení až shodu indexu lomu světla s materiálem PMMA. V tab. 4.2 je vypsána většina kapalin vyskytujících se v rešerši, které jsou doplněny o index lomu pro vlnovou délku světla 589 nm.

Tab. 4.2: Seznam kapalin, které byly doplněny nebo získány rešerší, s krátkou poznámkou s rozhodnutím o dalším testování

Kapalina	$n [-]$	Testy	Poznámka
1-Bromnaftalen	1,657	Ano	Vyšší index lomu
Anýzový olej	1,567	Ano	Vyšší index lomu
Bromid arsenitý	2,3	Ne	Toxicita
Bodlákový olej	1,476	Ano	Blízký index lomu, mísitelnost s jinými oleji
Clericiho roztok	1,56	Ne	Toxicita
Glycerín	1,47	Ano	Blízký index lomu, mísitelnost s vodou
Chlorid kademnatý	1,65	Ne	Toxicita
Jodid sodný	1,33 – 1,5	Ne	Náročná příprava a údržba, agresivita vůči materiálu trati
Jodid zinečnatý	1,33 – 1,62	Ne	Náročná příprava a údržba, vysoká cena
Kerosin	1,44	Ano	Netečnost vůči PMMA, dobrá viskozita a dostupnost
Parafinový olej	1,48	Ano	Blízký index lomu, netečnost vůči PMMA
p-Cymen	1,49	Ano	Blízký index lomu, dobrá viskozita, nejednoznačné chování
Ricinový olej	1,479	Ano	Blízký index lomu, použití pro zvýšení viskozity
Shell Gravex 913	1,489	Ne	Vlastnosti blízké parafinu, špatná dostupnost
Shell Gravex 917	1,492	Ne	Vlastnosti blízké parafinu, špatná dostupnost
Skočiový aldehyd	1,62	Ne	Náročná příprava, agresivní vůči PMMA
Terpentýn	1,473	Ano	Blízký index lomu, dobrá viskozita, nejednoznačné chování
Tetralín	1,541	Ano	Vyšší index lomu
Thiokyanaté soli	1,47 – 1,49	Ne	Toxicita
Tungový olej	1,52	Ano	Vyšší index lomu
Voda	1,33	Ano	Netečnost vůči PMMA, dobrá dostupnost
Voda s cukrem	1,33 – 1,47	Ne	Náročná příprava a údržba, nízký index lomu
Voda s glycerolem	1,33 – 1,47	Ne	Nízký index lomu a vysoká viskozita

4.2 Materiály pro průhledné modely

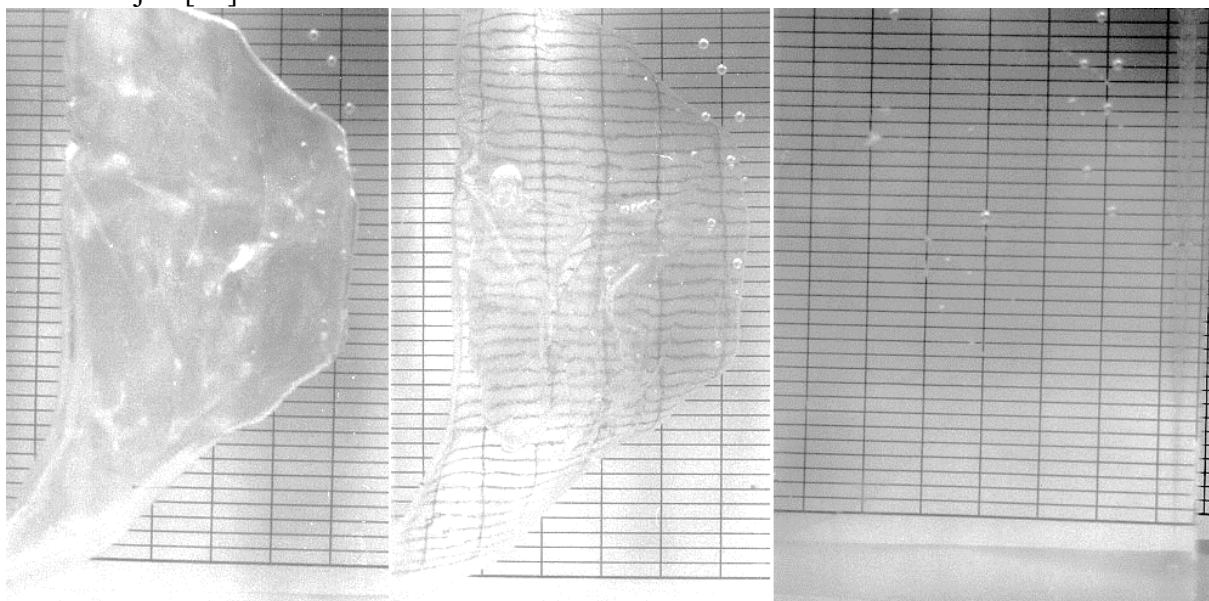
Kapitola se věnuje materiálům pro průhledné modely, které jsou částečně zmíněny již v kapitole 4.1, neboť autoři v nich řešili jak otázku kapalin, tak materiálů. Přesto je zde samostatně vypracována rešerše pro průhledné modely, které autoři používají spolu s optickými metodami.

4.2.1 Standardní průhledné materiály

Hopkins a kol. (2000)

Práce [43] se věnuje měření metodou PIV, pro kterou bylo třeba připravit transparentní model nosní dutiny, viz obr. 4.6. Ta byla vyrobena odlitím silikonu a pro dosažení shody indexu lomu mezi kapalinou a materiálem byla použita směs vody a glycerínu – 41 % vody a 59 % glycerínu.

Silikonový model je náročný na výrobu a jeho mechanické vlastnosti pro model trysky jsou nedostačující [44].



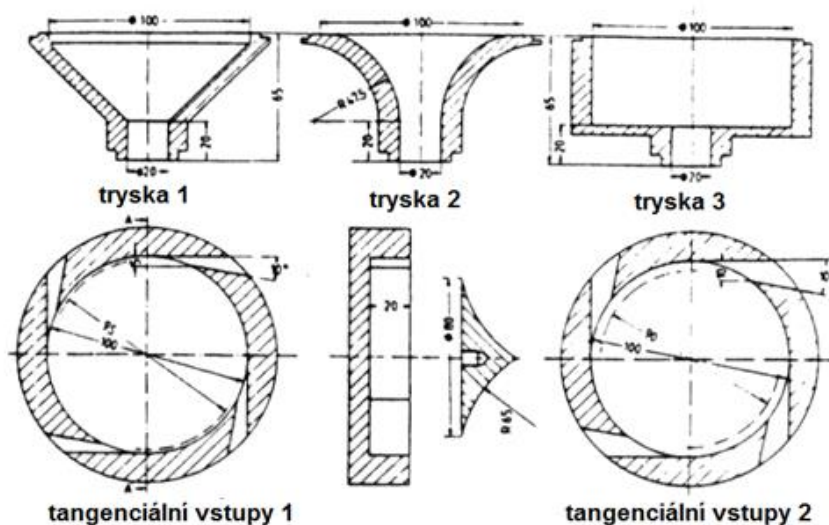
Obr. 4.6: Silikonový model nosní dutiny, kterým proudí – nalevo vzduch, uprostřed voda, vpravo směs vody a glycerínu; převzato z [43]

Stoots a kol. (2001)

Autoři v [45] zkoumali techniku sjednocení indexů lomu světla – MIR a její vliv na měření proudění. Jako materiál pro testování byl vybrán tavený křemen (*fused quartz*) s indexem lomu světla $n = 1,46$ a pracovní kapalinou byl zvolen lehký minerální olej, který byl udržován na teplotě přibližně 24 °C. Tato kombinace nabízí dobré optické vlastnosti, látky se vzájemně neovlivňují a nedochází k nežádoucím chemickým účinkům. Cena taveného křemene je ovšem velmi vysoká a lze vyrábět pouze jednoduché tvary jako je deska, válec, koule aj. [44].

Horvay a Leuckel (1984)

V práci [1] vytvořili autoři modulární zvětšený model trysky z PMMA. Spolu s tímto modelem bylo provedeno LDA měření vnitřního proudění při použití rozdílných tvarů komor a rozdílné velikosti tangenciálních vstupů (viz obr. 4.7). Pro sjednocení indexu lomu užili směs tetralínu (tetrahydronaftalenu), terpentýnu a ricinového oleje.



Obr. 4.7: Rozdílné komory modulárního konceptu zvětšeného modelu tlakové vířivé trysky; převzato z [1]

Modulární typy komor vyrobené z PMMA využil k měření pomocí LDA v příčných řezech i Chinn a kol. v [5]. Mezi další autory patří například Keukelaere [4], který použil zvětšený model trysky vyrobený z plexiskla a jako pracovní kapalinu zvolil vodu, stejnou kombinaci použili Rashid a kol. [46].

Plexisklo nabízí dobré mechanické vlastnosti, kdy je v lité formě velice pevné a odolné proti mechanickému poškození. Chemicky je PMMA odolné vůči většině vodnatých roztoků, ovšem organické látky nebo rozpouštědla na něj mohou negativně působit. Přesto se jedná o nejběžněji používaný materiál pro tento typ měření.

Yarlagadda a Yoganathan (1989)

V práci [47] bylo užito 3mm tyčí z borosilikátového skla – Pyrex a směsi silikonových olejů Dow Corning 556 a 550 ke studiu vlivu pórovitosti povrchu na proudění. Jedná se o druh tepelně odolného skla, které má nízkou tepelnou roztažnost. Pyrex není příliš využíván kvůli vyššímu indexu lomu a křehkosti materiálu [48].

4.2.2 Materiály pro 3D tisk

Tento způsob výroby modelů se rychle vyvíjí a pro výrobu průhledných modelů se stane cennou výrobní technologií, neboť 3D tisk je proti běžným způsobům výroby (lití a řezání bloku materiálu, následné obrábění atd.) velmi levný. Je ovšem nezbytné, aby výroba pomocí 3D tisku odstranila problémy týkající se samotné technologie, jako je nedostatečně hladký povrch, nízké přesnosti rozměrů, problémy se spékáním, s průhledností, se změnou rozměrů vlivem vlhkosti materiálu, apod.

Jakkoli geometricky složitý model lze pomocí 3D tisku vyrobit dvěma způsoby – přímý tisk vrstev, nebo vakuové odlévání.

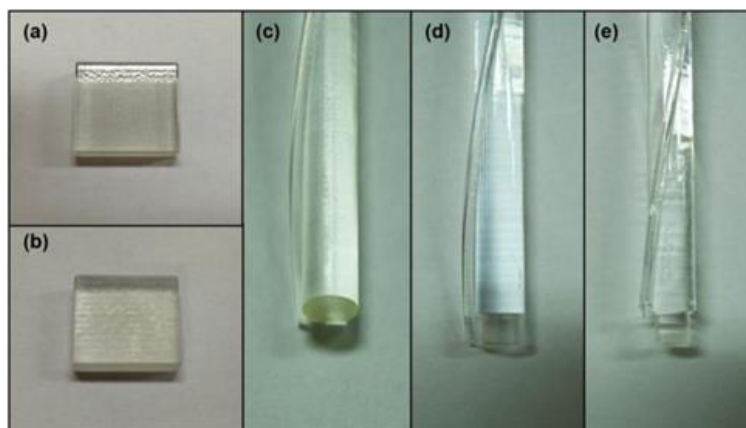
Song a kol. (2015)

Práce [44] se věnuje sjednocení indexu lomu kapalin s modely, které byly vyrobeny pomocí několika metod 3D tisku, viz obr. 4.8. Část byla vyrobena pomocí přímého tisku, a to metodami SLS (selektivní laserové slinování), kdy je práškový materiál spojován pomocí laseru a SLA (stereolitografie), která využívá světla k vytvrdnutí tekutého polymeru nanášeného ve vrstvách.

Pro metodu SLS byl použit průhledný materiál VeroClear-RGD810, což je průhledná a bezbarvá akrylová pryskyřice v práškové podobě. Kvůli drsnosti povrchu však byla průhlednost nedostatečná. Ta se zlepšila ponořením modelu do kapaliny, která částečně vyplnila nedokonalosti povrchu. Vhodným broušením a leštěním by bylo dosaženo vyšší průhlednosti.

Pro metodu SLA byla zvolena průhledná voděodolná pryskyřice TSR-829. Model vyrobený touto metodou poskytuje lepší průhlednost a čistotu materiálu.

Další modely byly vyrobeny metodou vakuového odlévání, kdy byly na výrobu použity plastové průhledné materiály – epoxid a uretan. Autoři práce zaznamenali drobné vzduchové bubliny uvnitř materiálu, přesto mají tyto modely lepší optické vlastnosti než ty, které jsou vyrobené metodou přímého tisku. Jako pracovní kapalina pro všechny materiály byla zvolena směs anýzového a minerálního oleje.



Obr. 4.8: 3D modely, kterými jsou vyrobeny:

a) SLS – lesklé, b) SLS – matné, c) SLA, d) epoxid, e) uretan; převzato z [44]

Nemes, Jalal a Coletti (2016)

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, autoři v [38] použili materiál WaterShed XC 11122 pro simulaci proudění lidskou průdušnicí a jako pracovní kapalinu zvolili směs anýzového a minerálního oleje.

4.2.3 Souhrn materiálů pro výrobu průhledného modelu

Souhrn zmíněných materiálů, které lze užít pro výrobu modelu trysky, je uveden v tab. 4.3 včetně indexů lomu při vlnové délce světla 589 nm.

Tab. 4.3: Materiály použité pro průhledné modely

Materiál	n [–]	Poznámka
Epoxid	1,55	Vysoký index lomu, dobrá průhlednost
PMMA	1,49	Dobré mechanické vlastnosti a průhlednost
Pyrex	1,47	Křehký materiál
Silikon	1,43	Nedostačující mechanické vlastnosti, náročná výroba
SLA TSR-829	1,51	3D tisk, nedostatečná průhlednost
SLS-matné VeroClear-RGD810	1,47	3D tisk, potřeba dokončovacích úprav pro lepší průhlednost
SLS-lesklé VeroClear-RGD810	1,51	3D tisk, potřeba dokončovacích úprav pro lepší průhlednost
Tavený křemen	1,46	Vysoká cena, pouze jednoduché tvary, chemická odolnost
Uretan	1,50	Dobrá průhlednost
WaterShed	1,51	3D tisk, vysoký index lomu

4.3 Experimenty se zvětšenými modely trysek

Závěrečná kapitola řešeršní práce se věnuje experimentům prováděným na průhledných zvětšených modelech průhledných trysek. Nejčastěji se jedná o zkoumání charakteru vnitřního proudění metodou LDA nebo jeho vizualizaci pomocí vysokorychlostních kamer.

Horvay a Leuckel (1984)

Experimenty provedené na zvětšeném průhledném modelu tlakové vířivé trysky modulární konstrukce již několikrát zmíněnými autory v [1] se věnovaly především studiu vnitřního proudění. Autoři se zaměřili na rychlostní pole uvnitř trysky a jeho změnu v důsledku změny vnitřní geometrie, viz obr. 4.7. Využita byla metoda LDA, pomocí které autoři měřili jednotlivé složky rychlosti. Kromě laserové metody byla provedena vizualizace vzdušného jádra pomocí vysokorychlostní kamery.

Cooper, Chinn a Yule (1999)

Autoři v [5] použili průhledný zvětšený model tlakové vířivé trysky s vyměnitelným dílem s komorou. Metodou LDA byly měřeny všechny složky rychlosti. Pomocí CFD simulace byl predikován vznik recirkulačních oblastí poblíž stěny trysky a vzdušného jádra, což výsledky LDA měření potvrzují.

Rashid a kol. (2012)

Další již zmíněnou prací je [47], ve které autoři studovali vliv pracovního tlaku soustavy a počtu tangenciálních vstupů na velikost úhlu spreje za užití fotoaparátu. Pomocí těchto měření zjistili, že s vyšším pracovním tlakem a zvyšujícím se počtem vstupních portů roste šířka úhlu spreje.

De Keukelaere (1995)

V práci [4] autor provedl několik měření, jako je měření rychlostního pole uvnitř trysky pomocí LDA, stanovení rozměrů vzdušného jádra pomocí kamery nebo měření veličin spojené s prouděním kapaliny, jako je průtok, tlak aj.

5 Testování a výběr kapalin

Z kapitoly 4.1, která se věnovala řešení pracovních kapalin pro průhledné modely, bylo vybráno několik kapalin pro možné dosažení shody indexu lomu, viz tab. 5.1. Je však nutné, aby byly kapaliny otestovány kvůli případným korozivním účinkům na materiál PMMA.

Jako testovací vzorky byly použity plné odřezky extrudovaného plexiskla o velikosti přibližně 20×20×5 mm, které byly umístěny do 30ml skleněných nádob opatřených uzavíratelným víkem. Nádoby byly naplněny jak čistými kapalinami, tak vytvořenými směsmi s indexem lomu blízkým materiálu PMMA.

Tab. 5.1: Zkoumané kapaliny a jejich fyzikální vlastnosti

Kapaliny	CAS	μ [mPa·s]	n [–]	ρ [kg/m ³]
1-Bromnaftalen ²	90-11-9	4,98	1,657	1480
Anýzový olej ¹	8007-70-3	2,37	1,557	981
Bodlákový olej ²	8001-23-8	76	1,476	925
Glycerín ¹	56-81-5	934	1,47	1262
Kerosin ²	8008-20-6	1,64	1,45	785
Parafínový olej ¹	8042-47-5	21	1,48	850
p-Cymen ¹	99-87-6	0,88	1,49	860
Ricinový olej ¹	8001-79-4	986	1,479	960
Terpentýn ¹	8006-64-2	1,49	1,473	857
Tetralín ¹	119-64-2	2,1	1,541	973
Tungový olej ²	8001-20-5	152	1,52	937
Voda ¹	7732-18-5	1	1,33	993

Voda byla do tabulky 5.1 přidána jako srovnávací kapalina, neboť je známo, že plexisklo nepoškozuje.

Čísla u názvů kapalin představují pořadí testů, kdy byly kapaliny testovány. Na základě prvního testování byl vybrán p-cymen, který, jak se ukázalo v praxi, není vhodný jako pracovní kapalina pro model z PMMA, viz kap. 5.3. Z tohoto důvodu bylo provedeno další testování, kde byly využity nabyté zkušenosti.

Kapitola 5 je rozdělena tak, aby popisovala celý průběh testování tak, jak bylo prováděno, a sledovala vývoj jednotlivých úvah.

5.1 První testy s výběrem pracovní kapaliny

Pro přehledný popis chemického vlivu byla autorem vytvořena stupnice, která popisuje stupeň poškození, kdy 0 odpovídá nulovému poškození plexiskla, zatímco 10 odpovídá úplnému rozpuštění materiálu, viz tab. 5.2.

Tab. 5.2: Stupnice úrovně poškození odřezků PMMA

Poškození	Hodnocení
Žádné	0
Bodové poškození	1
Drobné poškození	2
Jemné praskliny	3
Drobné praskliny	4
Praskliny	5
Popraskáno	6
Silně popraskáno	7
Počátek rozpadu	8
Rozpad materiálu	9
Rozloženo	10

Kapaliny uvedené v tab. 5.3 byly vybrány pro testování chemického vlivu na PMMA, který byl zaznamenán po 10, 60 a 130 dnech, kromě chemického vlivu jsou u kapalin zhodnoceny vlastnosti stanovené v kapitole 4.

Tab. 5.3: Poškození PMMA odřezků po 10, 60 a 130 dnech stálé expozice v kapalinách

Kapaliny	n [–]	Poškození za		
		10 dní	60 dní	130 dní
Anýzový olej	1,557	7	8	9
Glycerín	1,47	0	0	0
Parafínový olej	1,48	0	0	0
p-Cymen	1,49	1	1	2
Ricinový olej	1,479	0	0	0
Terpentýn	1,473	2	3	4
Tetralín	1,541	6	7	8
Voda	1,33	0	0	0

Obě kapaliny s indexem lomu vyšším než je PMMA (anýzový olej a tetralín), plexisklo silně poškozuje a pozorovatelné účinky jsou patrné už po jednom dni expozice. Terpentýn také působí na materiál plexiskla, vytváří však pouze jemné krátké praskliny. Z tabulky 5.3 je zřejmé, že pokud má výsledná směs obsahovat některou z těchto látek, je nezbytné, aby je obsahovala v nejmenším množství.

Vzhledem k pracím [6], kde bylo zmíněno pozvolné poškozování a [37], kde nebylo zmíněno poškození PMMA, bylo pro autora překvapující, jak rychle se odřezek v p-cymenu poškodil. V průběhu testování vznikla pouze jedna jemná prasklina, a to již druhý den, což autor připisoval spíše pnutí nařezaného materiálu, které se projevilo nezávisle na kapalině, protože se v průběhu 130 dní kromě několika drobných prasklin na bočních stěnách odřezku neobjevila další prasklina.

Kromě kapalin zmíněných výše, byl testován také vliv isopropylalkoholu (zkráceně isopropyl), který je použit jako čisticí prostředek povrchu modelu. Deset dní po zahájení pozorování způsobil bodové poškození v místech řezu a po 130 dnech jsou patrné drobné praskliny. Takové poškození není příliš silné a isopropyl může být využíván v malém množství pro otírání a odmaštění stěn modelu. V praxi se ukázalo, že tato kapalina, pokud je použita k čištění stěn, nepůsobuje žádné poškození modelu.

5.1.1 Posouzení vlastností testovaných kapalin

Všechny kapaliny kromě ricinového oleje jsou bezbarvé a dobře průhledné. Tyto vlastnosti si kapaliny uchovávají, neboť výrazně neoxidují. Ricinový olej má typickou olejovou žlutou barvu se zhoršenou průhledností.

Problém s pěněním se vyskytuje u parafínu, glycerínu a ricinového oleje, kdy tvoří bubliny, které se obtížně a pomalu dostávají k hladině a jen pozvolna relaxují, čehož lze využít a vytvořené bubliny použít jako pozorovatelné částice u optických metod, viz [1]. Kromě výše zmíněných kapalin pění také anýzový olej, který tvoří velice drobné bubliny, které snižují průhlednost kapaliny, ale velmi dobře relaxuje. Tetralín pění obdobně jako anýzový olej s rychlejší relaxací a nesnižuje průhlednost, pouze vytváří tenkou vrstvu pěny na povrchu. Terpentýn pění velmi málo a rychle relaxuje a p-cymen nepění takřka vůbec a relaxuje ihned.

S rostoucí viskozitou se zhoršuje čistitelnost povrchu od zbytků kapaliny, což se vztahuje především na parafín a ricinový olej – látky vyšší viskozity, přesto je glycerín dobře čistitelný, neboť se jedná o kapalinu rozpustnou ve vodě.

Parafín, glycerín a ricinový olej téměř nedráždí kůži. Zatímco ostatní kapaliny (tetralín, anýzový olej, p-cymen, terpentýn) kůži značně vysušují a silně dráždí. Výrobce (SigmaAldrich) je doporučeno použití ochranného pláště, brýlí, respirátoru a rukavic při manipulaci s těmito látkami. Tetralín a p-cymen mají výrazný nepříjemný zápach.

Glycerín, parafín, ricinový olej a terpentýn jsou poměrně levné a dobře dostupné kapaliny. Pro potřeby testování byly u firmy Fichema s.r.o. zakoupeny vzorky v litrových nádobách. Ostatní kapaliny (tetralín, p-cymen, anýzový olej) byly zakoupeny u firmy SigmaAldrich a vzhledem k vysoké čistotě jsou tyto kapaliny poměrně nákladné (p-cymen – 1200 Kč/l, anýzový olej – 13000 Kč/l, tetralín – 4000 Kč/l).

5.2 Testování prvních směsí

Tetralín a anýzový olej jako kapaliny o vyšším indexu lomu než PMMA byly smíchány s jednotlivými kapalinami o indexu lomu nižším. Pomocí lineární interpolace bylo spočítáno přibližné množství anýzu nebo tetralínu potřebných pro dosažení shodného indexu lomu s PMMA, viz tab. 5.4 a 5.5. Jedná se o přibližnou koncentraci, neboť i výrobce chemikálií uvádí index lomu v určitém rozsahu.

Ze vztahu 3.18 lze za níže uvedených předpokladů stanovit přibližnou požadovanou viskozitu směsi.

- V původní trysce je použit kerosin
- Provozní tlak kapaliny v modelu není vyšší než 0,15 MPa
- Hustota směsi je přibližně 930 kg/m³

Tomu odpovídá požadovaná viskozita přibližně 6,3 mPa·s, hodnota je pouze orientační.

U výsledných směsí je obtížné předpokládat jejich viskozitu. Tu lze změřit pomocí viskozimetru, nebo ji lze přibližně určit pomocí empirických vztahů, které ovšem platí pouze pro úzkou skupinu kapalin [49]. Pro výpočet viskozity olejů byl použit upravený Ledererův vztah (5.1 – 5.3) [50], který vychází z Arrheniova vztahu:

$$\ln \mu_k = x_A \ln \mu_A + x_B \ln \mu_B \quad (5.1)$$

$$x_A = \frac{V_A}{V_A + \alpha_\mu V_B} \quad (5.2)$$

$$x_B = 1 - x_A \quad (5.3)$$

Kde je	μ_k	výsledná viskozita směsi
	μ_A	viskozita kapaliny o vyšším indexu lomu (anýzový olej, tetralín)
	μ_B	viskozita kapaliny o nižším indexu lomu (parafín, terpentýn, aj.)
	V_A	objem kapaliny o vyšším indexu lomu
	V_B	objem kapaliny o nižším indexu lomu
	α_μ	empirická konstanta, která byla z měření stanovena na hodnotu 0,28 [51]

Hodnoty x_A a x_B jsou určeny z výpočtu množství kapaliny, která je potřebná pro docílení sjednocení indexu lomu s PMMA. Lze je přibližně stanovit výpočtem, nebo z měření indexu lomu.

5.2.1 Testování směsí s anýzovým olejem

Anýzový olej byl přidán do čistých kapalin o nižším indexu lomu. Procentuální podíl anýzu ve směsi je zaznamenán v tabulce 5.4 spolu s viskozitou určenou výpočtem ze vztahu 5.1 a poškozením za 10, 60 a 130 dní.

Tab. 5.4: Množství anýzového oleje v kapalinách pro dosažení indexu lomu PMMA, doplněno o dynamickou viskozitu směsi a poškození PMMA po 10, 60 a 130 dnech

Roztok	Poměr anýzu na 100ml	μ [mPa·s]	Poškození za			
			10 dní	60 dní	130 dní	
Anýzový olej +	Glycerín	25,86	-	7	8	9
	Parafín	16,23	8,60	1	3	4
	p-Cymen	3,73	0,99	1	2	2
	Ricinový olej	17,31	74,74	1	2	3
	Terpentýn	23,21	1,90	5	6	6

Z tabulky 5.4 je patrné, že směs kapalin plexisklo poškozuje v každém z případů. Při testu byl potvrzen předpoklad neslučitelnosti anýzového oleje a glycerínu. Po intenzivním zamíchání se směs výrazně zakalila, kdy až s postupem času dochází k oddělování směsí a stoupání anýzového oleje nad glycerín. Odřezek PMMA plove na rozhraní těchto kapalin.

U směsí anýzu s parafínem, terpentýnem a ricinovým olejem lze pozorovat po 10 dnech drobné zárodky prvních prasklin. Směs s p-cymenem se chovala stejně jako čistý p-cymen, což je vzhledem k velmi nízkému obsahu anýzového oleje ve směsi pochopitelné. I v tomto případě došlo k tvorbě jedné praskliny v prvních několika dnech, která již dále nenarůstala. Pouze později byly pozorovány drobné praskliny na okrajích odřezku.

Viskozita směsí je poměrně vhodná pro pracovní kapalinu, anýzový olej s p-cymenem dokonce mají viskozitu, kterou lze považovat za shodnou s vodou. Pouze u směsí anýzového oleje a parafínu je viskozita vyšší, než je požadováno.

5.2.2 Posouzení vlastností anýzových roztoků

Vzniklé roztoky jsou bezbarvé a průhledné, pouze směs s ricinovým olejem je spíše matná s nažloutlou barvou.

Směs anýzového oleje s parafínem při protřepání výrazně pění, relaxace trvá dlouho a směs ztrácí průhlednost. S ricinovým olejem tvoří drobné bubliny, nekalí se a relaxace je velmi pomalá. Směs s terpentýnem pění velmi intenzivně a stává se neprůhlednou, relaxuje ovšem poměrně rychle. Anýzový olej s p-cymenem má takřka totožné vlastnosti co čistý p-cymen, tudíž směs téměř nepění a relaxuje okamžitě.

Všechny směsi s anýzovým olejem zanechávaly odřezky PMMA lepkavé a nepříjemné na dotek. Tento problém nebylo možné odstranit ani omytím odřezků pomocí saponátu. Kromě toho jsou uvedené směsi dráždivé pro kůži.

Z uvedených vlastností se nejlépe jeví směs anýzového oleje s p-cymenem.

5.2.3 Testování směsí s tetralínem

Druhou látkou o vyšším indexu lomu než PMMA je tetralín, jehož procentuální podíl ve směsi, viskozita a poškození plexiskla za 130 dní jsou zapsány v tabulce 5.5.

Tab. 5.5: Množství tetralínu (1,2,3,4-tetrahydronaftalen) v kapalinách pro dosažení indexu lomu PMMA, doplněno o dynamickou viskozitu a poškození po 10, 60 a 130 dnech

Roztok	Poměr anýzu na 100ml	μ [mPa·s]	Poškození za		
			10 dní	60 dní	130 dní
Glycerín	31,69	-	6	7	8
Parafín	20,49	6,97	2	4	5
Tetralín + p-Cymen	4,90	1,01	1	2	3
Ricinový olej	21,77	45,92	2	3	3
Terpentýn	28,68	1,82	5	5	6

Z tabulky 5.5 vyplývá, že i v případě směsí tetralínu dochází k poškozování plexiskla. Tetralín je stejně jako anýzový olej nemísitelný s glycerínem. Odřezek PMMA plove na rozhraní kapalin. Kousky plexiskla v roztocích s terpentýnem, parafínem a ricinovým olejem jsou po 10 dnech lehce popraskané, především směs s terpentýnem. Tetralín s p-cymenem poškozují plexisklo jen mírně, a to ve formě velmi malých prasklin na hranách odřezku a jemné praskliny protínající stěnu.

Viskozita všech směsí je vhodná jako pracovní kapalina, pouze v případě užití tetralínu s parafínem je třeba provedení testů, neboť hodnota viskozity směsi je hraniční. I v tomto případě je velmi příhodná viskozita tetralínu s p-cymenem, neboť ji lze považovat za shodnou s vodou.

5.2.4 Posouzení vlastností tetralínových roztoků

Směs s ricinovým olejem je nažloutlá, avšak stále dobře průhledná, ostatní jsou zcela bezbarvé a průhledné. Směs tetralínu s parafínem po protřepání intenzivně pění, zcela se zakalí a relaxace trvá velmi dlouho. Totéž platí v případě ricinového oleje, který v kombinaci s tetralínem pění méně a relaxuje rychleji než s anýzovým olejem, přesto je relaxace pomalá. Směs tetralínu a terpentýnu, která byla použita v [2], výrazně pění, ale velmi rychle relaxuje. Směs s p-cymenem pění více než kapalina samotná, ale rychle relaxuje.

Kapaliny vysouší lidskou kůži a po delší době dochází k dráždění pokožky. Směsi tetralínu, ač jsou z pohledu viskozity a poškození podobné anýzovému oleji, mnohem výrazněji pění a stávají se méně vhodnými pro optická měření. Z tohoto pohledu se jeví směs s terpentýnem nebo p-cymenem jako vhodná, neboť se poměrně rychle vrací do stavu čisté kapaliny bez pěny. Terpentýn ovšem rychle poškozují odřezky PMMA.

5.2.5 Vyhodnocení prvních testů a výběr pracovní kapaliny

Ačkoli některé kapaliny nevykazují poškozování plexiskla, nejsou přesto příliš vhodné pro užití s průhlednými zvětšenými modely.

Ricinový olej je vysoce viskózní, žlutě zbarvený a zhoršuje průhlednost směsi. Z tohoto důvodu je jeho použití vyloučeno. Přesto se jeví jako velmi vhodný pro testování vazkých kapalin, neboť nepoškozuje plexisklo, je dobře mísitelný s jinými oleji, a pokud je použit v nízké koncentraci s jinou, průhlednou kapalinou, může mít směs dostatečné optické vlastnosti pro optická měření a vysokorychlostní vizualizaci.

Glycerín je stejně jako ricinový olej velmi vazký, ovšem průhledný a mísitelný s vodou. Taková směs je velmi levná a lze ji vhodně použít například při měření kapalin v širokém pásmu viskozit. Naopak není mísitelný s oleji, což jej pro použití v této práci vylučuje, neboť nelze pouze pomocí ředění glycerínu a vody dosáhnout indexu lomu světla plexiskla.

Parafinový olej je velmi dobrou kapalinou pro použití spolu s PMMA, protože nezpůsobuje žádné chemické poškození materiálu. Nevýhodou této kapaliny je tvorba bublin a ve směsi s anýzovým olejem i tetralínem pění natolik, že se kapalina stává neprůhlednou. Parafinový olej je příliš vazký pro užití zvětšený model tlakové vířivé trysky, v menším množství jej je možné použít jako kapalinu pro úpravu viskozity nebo indexu lomu.

Roztoky s terpentýnem mají nízkou viskozitu, jsou bezbarvé, průhledné a dobře se jimi dosahuje indexu lomu PMMA. Terpentýn samotný není příliš pěnivý, vzniklé roztoky ovšem pění poměrně výrazně a jak čistá kapalina, tak směs znatelně poškozuje plexisklo. Čistá kapalina má index lomu blízký PMMA a takřka shodný s parafinovým olejem, pokud není požadavek na poškozování plexiskla, lze tyto kapaliny smíchat nebo nahradit pro dosažení optimální viskozity směsi.

Poslední kapalinou o nižším indexu lomu než plexisklo je p-cymen, který se jeví nejlepší možnou kapalinou, kdy lze temperováním přibližně na 14 °C [42] dosáhnout indexu lomu PMMA bez použití další chemikálie. Konečnou požadovanou teplotu lze přibližně stanovit výpočtem. V knize [52] je uvedeno, že zvýšením vlnové délky světla o 10 nm klesá index lomu kapaliny o 0,0015 a se zvýšením teploty o 1 °C klesne index o 0,0004. Dobrých optických výsledků je dosaženo i při běžné pokojové teplotě a bez mísení kapalin.

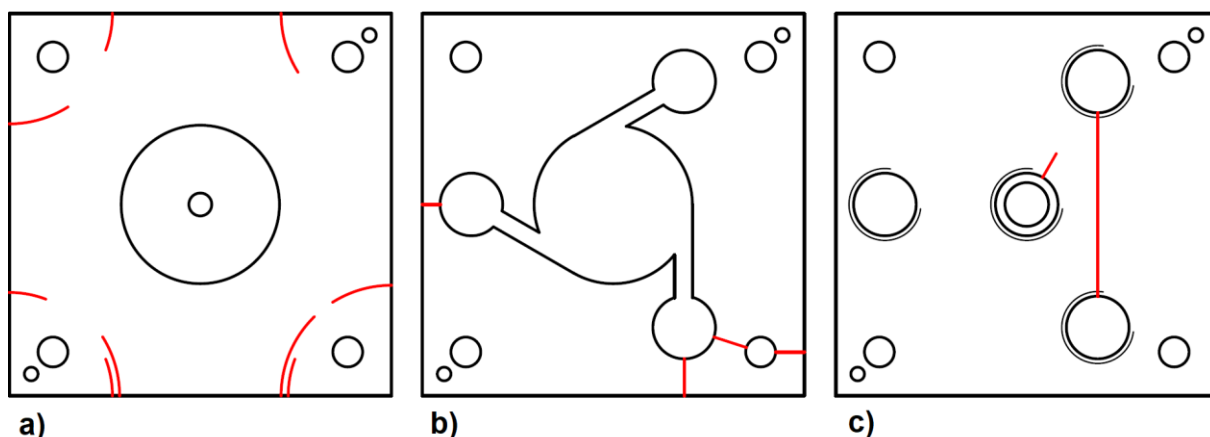
Kapaliny o vyšším indexu lomu než plexisklo (anýzový olej a tetralín) jsou podobně vazké a vykazují poměrně silné chemické poškozování plexiskla. Předností tetralínu je výrazně nižší cena, naopak vytváří opticky méně kvalitní kapaliny, které se mohou stát až neprůhlednými. Anýzový olej je tedy vhodnější kapalina pro optické měření i přes silnější reaktivitu s plexisklem.

Vzhledem ke svým vlastnostem (index lomu blízký PMMA, dobrou viskozitu, průhlednost aj.) se p-cymen jeví jako nejvhodnější kapalina pro práci s průhledným modelem.

5.3 Užití vybrané kapaliny

Na základě výsledků testů z kapitoly 5.2 byl vybrán čistý p-cymen, který byl použit jako pracovní kapalina pro model tlakové vířivé trysky.

Již během prvního dne testování došlo k rozsáhlému poškození zejména horního dílu se vstupy do trysky, kdy vznikla hluboká prasklina mezi vstupními závity. Dále došlo k prasknutí prostředního dílu v nejužším místě otvoru jednoho z tangenciálních vstupů. U spodního dílu se objevily pouze povrchové praskliny v místech okolo spojovacích šroubů a podložek. Místa poškození jsou schematicky zaznačena na obr. 5.1:



Obr. 5.1: Schéma poškození jednotlivých modelu trysky; a) spodní díl – povrchové praskliny v okolí děr pro spojovací šrouby, b) prostřední díl – rozlomení materiálu v označených místech, c) horní díl – hluboké praskliny v označených místech

Praskliny uvnitř struktury spodního dílu nezpůsobovaly žádné problémy, bylo však nutné použití lepidla na materiál PMMA pro spojení úlomků prostředního dílu. Lepidlo bylo nezbytné nanášet velmi opatrně, neboť mírně leptá materiál, aby mohlo dojít k pevnému spojení. Takto naleptaný materiál se ovšem stává neprůhledným až matným.

Vzhledem k testům z kapitoly 5.2 by k natolik silnému poškození nemělo dojít. Rozsah poškození je také velice neúměrný pracovnímu času. Autor se domnívá, že je chemická koroze výrazně ovlivněná i pnutím materiálu, především pnutí v závitech a tlak podložek na materiál.

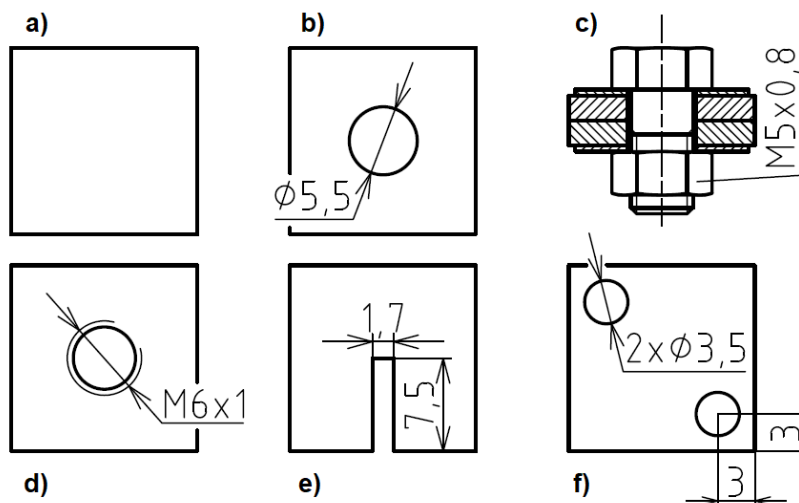
Byla provedena rešerše literárních zdrojů, které by tuto problematiku popisovaly, ovšem žádný relevantní zdroj nebyl nalezen.

Z tohoto důvodu byly připraveny testy rozdílného stresového zatížení (takové, aby bylo podobné jako na trysce) materiálu PMMA ve zvolených kapalinách. Byl vybrán čistý p-cymen, jako již použitá pracovní kapalina, směs anýzového oleje s terpentýnem a tetralín s terpentýnem jako kapaliny, se kterými je dobrá manipulace a zároveň poškozují plexisklo.

5.4 Poškození modelu trysky a testy PMMA se zatížením

Pro test byly připraveny odřezky extrudovaného plexiskla o rozměrech 20×20×5 mm, které byly dále perforovány, viz obr. 5.2. Do dílu se závitem byl přidán šroub, který byl zašroubován až po konec závitu, aby došlo k namáhání materiálu.

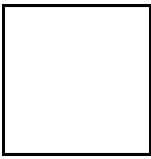
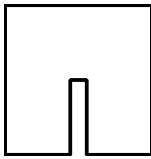
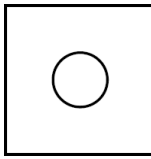
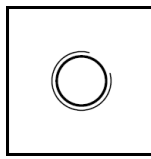
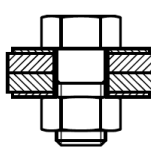
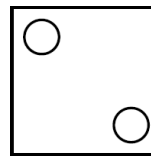
Pro testy byly vybrány 3 kapaliny – p-cymen, směs anýzového oleje a terpentýnu a směs tetralínu s terpentýnem.



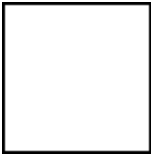
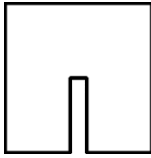
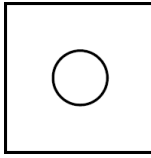
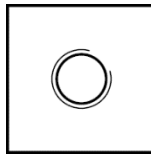
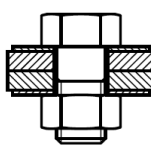
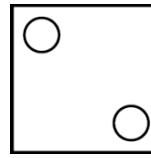
Obr. 5.2: PMMA odřezky, které byly užity pro testy ve vybraných kapalinách; a) čistý díl bez úprav, b) díl s vyvrtaným otvorem o průměru 5,5 mm, c) šroubové spojení dvou dílů s vyvrtaným otvorem o průměru 5,5 mm, pod hlavou šroubu a maticí jsou umístěny podložky pro rozložení síly, d) díl s vyvrtaným M6 závitem a stoupáním 1 mm, do závitu byl zašroubován krátký šroub, který vyvolával další stresové namáhání plexiskla, e) díl s ostrým vybráním, f) díl se dvěma menšími otvory, umístěnými blízko okraje stěny

Testování probíhalo 10 dní a každý den byl pozorován a zapsán rozsah poškození. Pro přehlednost práce jsou tab. 5.6, 5.7 a 5.8 zestručněny, neboť od 4. dne již u dílů nedocházelo k výrazným změnám poškození.

Tab. 5.6: Poškození odřezků PMMA v p-cymenu

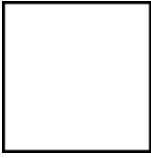
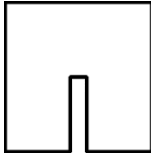
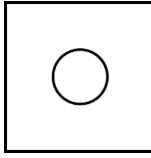
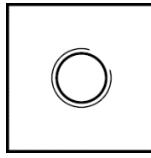
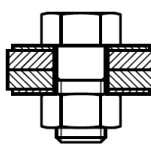
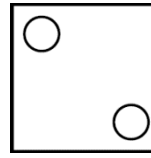
p-Cymen						
PMMA kus						
Den 1	0	1	0	9	6	0
Den 2	0	3	0	-	7	0
Den 3	0	4	0	-	9	0
Den 4	0	4	0	-	-	0
Den 6	0	4	1	-	-	0
Den 10	1	5	1	-	-	1

Tab. 5.7: Poškození odřezků PMMA ve směsi anýzového oleje a terpentýnu

Anýzový olej + Terpentýn						
PMMA kus						
Den 1	1	2	1	9	7	1
Den 2	2	2	2	-	8	2
Den 3	2	2	2	-	9	2
Den 4	3	3	3	-	9*	4
Den 6	4	4	4	-	9*	5
Den 10	5	5	5	-	9*	6

* – Došlo k odpadání částí, které nebyly pod podložkami, pod kterými se oba díly nerozdělitelně spojily a byly silně popraskané.

Tab. 5.8: Poškození odřezků PMMA ve směsi tetralínu a terpentýnu

Tetralín + Terpentýn						
PMMA kus						
Den 1	1	2	1	9	6	2
Den 2	1	2	2	-	7	2
Den 3	2	2	2	-	7	3
Den 4	3	2	3	-	8	3
Den 6	4	3	4	-	8	5
Den 10	5	5	5	-	9	6

Z tabulek 5.6, 5.7 a 5.8 je patrný důvod poškození jednotlivých dílů, kterým odpovídají výsledky testování. Silově namáhané odřezky (spojené díly a díl se závitem a šroubem) jsou výrazněji poškozovány než ostatní, kdy je díl se závitem poškozen natolik intenzivně, že ve všech třech kapalinách došlo k jeho prasknutí již po jednom dni, podobně jako se stalo s díly modelu.

Díly ponořené v roztocích anýzového oleje a tetralínu od druhého dne po vytažení z kapaliny (kvůli kontrole) lepí a manipulace s nimi je obtížná. U směsi s anýzovým olejem došlo druhý den ke slepení šroubem spojených dílů, které nadále nebylo možné oddělit. Rohové části odřezků, které nebyly překryty nerezovou podložkou, se začaly od čtvrtého dne odlamovat od celku. Přestože byla struktura pod podložkami silně popraskána, nedocházelo vlivem slepení dílů k jejímu dalšímu výraznějšímu poškození.

Toto zjištění vedlo autora k otázce, je-li vůbec možné potlačit negativní chování kapaliny, pokud by byl její objem ve směsi snížen. Z tohoto důvodu bylo připraveno několik tříslůžkových směsí o různé koncentraci parafínového oleje, p-cymenu a anýzového oleje, viz tab. 5.9.

Tab. 5.9: Podíl jednotlivých složek ve směsi o indexu lomu plexiskla ($n = 1,4925$), kde byl postupně navyšován poměr parafínu

Parafín [%]	p-Cymen [%]	Anýz [%]	μ [mPa·s]
10	84,7	5,3	2,49
15	79,0	6,0	3,51
20	73,2	6,8	4,63
25	67,5	7,5	5,80
30	61,7	8,3	7,00
35	56,0	9,0	8,20
40	50,2	9,8	9,40
45	44,5	10,5	10,58
50	38,7	11,3	11,73
55	33,0	12,0	12,85
60	27,2	12,8	13,94
65	21,5	13,5	15,00
70	15,7	14,3	16,04
75	10,0	15,0	17,06
80	4,2	15,8	18,12

Objemový podíl parafínového oleje, který nepoškozuje plexisklo, byl postupně zvyšován o 5 % od 10 % do 80 %. Pomocí vztahů 5.4 a 5.5 byl vypočítán objemový podíl ostatních kapalin tak, aby bylo docíleno indexu lomu plexiskla a ze vztahu 5.6 byla stanovena přibližná viskozita směsi.

$$V_{cym}n_{cym} \cdot V_{an}n_{an} \cdot V_{par}n_{par} = n_{mat} \quad (5.4)$$

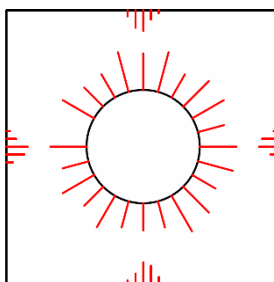
$$V_{cym} + V_{an} + V_{par} = 1 \quad (5.5)$$

$$\ln \mu_k = \frac{V_{par}}{V_{par} + \alpha_\mu(V_{cym} + V_{an})} \ln \mu_{par} + \left(1 - \frac{V_{par}}{V_{par} + \alpha_\mu(V_{cym} + V_{an})}\right) \cdot \left[\frac{V_{cym}}{V_{cym} + \alpha_\mu V_{an}} \ln \mu_{cym} + \left(1 - \frac{V_{cym}}{V_{cym} + \alpha_\mu V_{an}}\right) \ln \mu_{an} \right] \quad (5.6)$$

Kde je V_{cym} objemový podíl p-cymenu ve směsi
 n_{cym} index lomu světla p-cymenu
 μ_{cym} hodnota dynamické viskozity p-cymenu
 V_{an} objemový podíl anýzového oleje ve směsi
 n_{an} index lomu světla anýzového oleje
 μ_{an} hodnota dynamické viskozity anýzového oleje
 V_{par} objemový podíl parafrinového oleje ve směsi (5%, 10%, atd.)
 n_{par} index lomu světla parafrinového oleje
 μ_{par} hodnota dynamické viskozity parafrinového oleje
 n_{mat} index lomu průhledného materiálu, kterého je třeba směsí docílit
 α_μ empirická konstanta 0,28 [51]

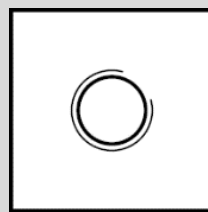
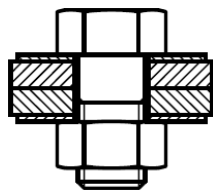
S ohledem na zjištěné skutečnosti byl upraven testovací postup. Jednotlivé směsi byly testovány pouze s odřezkem s vyvrtaným M6 závitem a šroubem spojenými díly, viz tab. 5.10.

Z tabulky 5.10 je patrné, že odřezek s vyvrtaným závitem, je poškozován nejintenzivněji a k jeho zničení dochází velmi rychle po vzniku hlubších prasklin. I přes vyšší obsah parafrinového oleje ve směsi není výrazněji potlačeno chemické poškozování materiálu. Z tohoto důvodu je nezbytné rozšířit testované kapaliny o méně vhodné z pohledu indexu lomu, barvy nebo viskozity. Vývoj poškození sešroubovaných odřezků je znázorněn na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Díky rozpětí koncentrací parafrinového oleje lze pozorovat počáteční vývoj poškození sešroubovaných odřezků

Tab. 5.10: Testy chemického vlivu tříložkové kapaliny na vybrané odřezky PMMA; bíle označené hodnoty náleží šroubem spojeným odřezkům, zatímco podbarvené hodnoty patří odřezku se závitem



Poškození PMMA za

Parafín [%]	15 h	40 h	60 h	7 dní	10 dní	Parafín [%]
10	7	9	-	-	-	10
	9	-	-	-	-	
15	7	9	-	-	-	15
	8	9	-	-	-	
20	6	9	-	-	-	20
	8	9	-	-	-	
25	6	9	-	-	-	25
	7	9	-	-	-	
30	6	9	-	-	-	30
	6	9	-	-	-	
35	5	7	9	-	-	35
	7	7	9	-	-	
40	5	7	9	-	-	40
	7	7	9	-	-	
45	4	5	7	9	-	45
	0	6	7	9	-	
50	2	3	3	5	7	50
	0	2	4	6	8	
55	2	3	3	5	7	55
	0	0	2	4	7	
60	0	3	3	4	6	60
	0	0	0	3	7	
65	0	2	2	3	4	65
	0	1	2	2	5	
70	0	2	2	3	4	70
	0	2	3	4	5	
75	0	2	2	3	3	75
	0	2	3	3	4	
80	0	1	1	2	2	80
	0	0	0	2	3	

5.5 Testování nově vybraných kapalin

Po zkušenostech z testů, které jsou popsány v předchozích kapitolách, byly opětovně testovány původně vybrané kapaliny s přidavkem nových, viz tab. 5.11.

Tab. 5.11: Nově přidané kapaliny

Kapaliny	n [–]
1-Bromnaftalen	1,657
Bodlákový olej	1,476
Kerosin	1,45
Tungový olej	1,52

Kromě kerosinu jsou kapaliny zbarveny do světle žluté, přesto jsou stále průhledné. Kerosin je zpočátku průhledný, ale časem oxiduje a žloutne, zůstává však stále průhledný s vhodnou viskozitou. Tungový olej je viskózní žlutohnědá matná kapalina, jejíž užití bylo předpokládáno v malém množství pro zvýšení indexu lomu směsi, kdy se příliš neprojevují jeho špatné optické vlastnosti. Bromnaftalen je mírně nažloutlá kapalina s vysokým indexem lomu, vysokou hustotou a poměrně nízkou viskozitou. Bodlákový olej je vazká kapalina s blízkým indexem lomu plexiskla, která je testována, pokud by v budoucích aplikacích bylo nutné užití kapaliny o vyšší viskozitě.

Bodlákový ani tungový olej vzhledem k jejich viskozitě nepění. Kerosin mírně pění, avšak rychle dochází k jeho relaxaci. Bromnaftalen nevytváří pěnu na hladině, ale tvoří bubliny v celém objemu, které relaxují relativně dlouhou dobu.

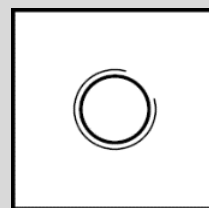
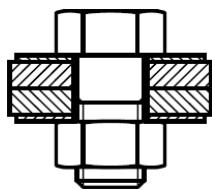
Kerosin je jakožto letecké palivo levnou kapalinou, totéž platí pro tungový a bodlákový olej, které lze zakoupit u společnosti Fichema za cenu přibližně 200 Kč/l. Bromnaftalen nabízí společnost SigmaAldrich za cenu 8000 Kč/l.

Kromě testování jednotlivých kapalin z tab. 5.11 bylo provedeno testování směsi kerosinu a bromnaftalenu v poměru, který odpovídal shodě indexu lomu PMMA. Testování však ukázalo stejně jako v případě čistých kapalin (tab. 5.12), že je plexisklo poškozováno velmi výrazně.

V případě nového testování byl upraven čas, kdy byly kapaliny kontrolovány, neboť ze zkušenosti bylo patrné, že nepoškodí-li kapalina plexisklo do dvou dní, lze očekávat, že není vůči PMMA korozivní. Tabulka 5.12 tento předpoklad potvrzuje. Lze tedy tvrdit, že tímto typem testů, lze spolehlivě a velmi dobře určit, zda kapalina bude poškozovat plexisklo.

Testování čistých kapalin probíhalo na odřezcích se závitem a dílech spojených šroubem.

Tab. 5.12: Poškození odřezků PMMA ve vybraných kapalinách



Poškození PMMA za							
Kapalina	4 h	1 den	2 dny	7 dní	10 dní	Kapalina	
1-Bromnaftalen	7	9	-	-	-	1-Bromnaftalen	
	8	9	-	-	-		
Anýzový olej	7	9	9*	9*	9*	Anýzový olej	
	8	9	-	-	-		
Bodlákový olej	0	0	0	0	0	Bodlákový olej	
	0	0	0	0	0		
Glycerín	0	0	0	0	0	Glycerín	
	0	0	0	0	0		
Kerosin	0	0	0	0	0	Kerosin	
	0	0	0	0	0		
Parafínový olej	0	0	0	0	0	Parafínový olej	
	0	0	0	0	0		
p-Cymen	1	6	9	-	-	p-Cymen	
	7	9	-	-	-		
Ricinový olej	0	0	0	0	0	Ricinový olej	
	0	0	0	0	0		
Terpentýn	2	7	9	-	-	Terpentýn	
	3	8	9	-	-		
Tetralín	3	7	9*	9*	9*	Tetralín	
	8	9	-	-	-		
Tungový olej	0	0	0	0	0	Tungový olej	
	0	0	0	0	0		
Voda	0	0	0	0	0	Voda	
	0	0	0	0	0		

* – Došlo k odpadání částí, které nebyly pod podložkami, pod kterými se oba díly nerozdělitelně spojily a byly silně popraskané.

Z testů vyplývá, že kromě tungového oleje, jsou kapaliny s vyšším indexem lomu (anýzový olej, tetralín, bromnaftalen) agresivní vůči PMMA. Tungový olej je ovšem vazká kapalina se špatnými optickými vlastnostmi, kterou nelze smíchat s jinou kapalinou tak, aby bylo dosaženo indexu lomu světla plexiskla a zároveň byla splněna podmínka nízké viskozity pro dosažení shody Reynoldsova čísla.

Vzhledem k výsledkům testování z tab. 5.12 byl jako pracovní kapalina vybrán kerosin o indexu lomu 1,44, vůči kterému je PMMA odolná, má vhodnou viskozitu a je průhledný.

5.6 Vyhodnocení testování kapalin

Výběr pracovní kapaliny se ukázal mnohem komplexnějším problémem, než bylo zprvu patrné. Rešerše zahrnovala prohledávání prací uveřejněné v ILASS (Institute for Liquid Atomization and Spray Systems) a ICLASS (International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems), Experiments in Fluids, Lisbon Symposium aj.

Častým problémem u tohoto typu prací bylo nedostatečné zhodnocení, zda byla použita pracovní kapalina vhodnou pro zvolený typ testů, nebo zda se vyskytly problémy s poškozováním určitého typu materiálu: plexisklo, těsnění, kovové části tratě, materiály čerpadla aj.

Přestože jsou k dispozici tabulky chemické odolnosti PMMA vůči některým látkám, bylo nezbytné provést vlastní testy vlivu kapalin na tento materiál. První testy byly provedeny na obyčejných odřezcích plexiskla, které byly vloženy do jednotlivých kapalin bez ohledu na index lomu a zároveň do směsí, které byly připraveny s důrazem na shodu indexu lomu. Z těchto testů byl zprvu vybrán p-cymen, který se svou průhledností, optimálnímu indexu lomu, vhodné viskozitě, nízké ceně, nepěnovitostí a nízké korozi plexiskla, jevil jako nejvhodnější kapalina pro práci s průhledným modelem.

Po jednodenním měření byl model poškozen natolik, že musel být opraven. Ještě několik dní bylo možné s modelem a p-cymenem pracovat, poškození se však stále zhoršovalo, až se stal horní díl se závity prakticky neprůhledným, neboť musel být často lepen. Tryska byla před testováním několik dní sestavena a pevně sešroubována bez jediné známky poškození, proto nelze předpokládat, že by poškození bylo způsobeno mechanickým namáháním materiálu.

Na základě této zkušenosti byly připraveny nové testy, pro které byly připraveny PMMA odřezky, které byly zatíženy externí silou (spojení dílů pomocí šroubu s maticí a vyvrtání závitu, do kterého byl přidán šroub), nebo byly různě perforovány (otvor uprostřed, menší otvory v rozích, ostré vybrání). Testy ukázaly, že perforace odřezků nemá výrazný vliv na jejich korozi, ovšem externí síla, která na odřezky působí v chemicky korozivním prostředí, toto působení umocňuje a díly jsou vážně poškozeny již během několika hodin.

Podrobnější vysvětlení k tomuto zajímavému jevu se nepodařilo dohledat v žádné literatuře.

Tyto testy ukázaly, že p-cymen nebyl vhodnou pracovní kapalinou pro plexisklo, pokud je pevně spojeno šrouby a obsahuje několik vešroubovaných armatur. S ohledem na tyto testy byla připravena třísložková směs parafínu, anýzového oleje a p-cymenu, jejíž obsah parafínu rostl vždy po 5% a ostatní složky byly zastoupeny v poměru tak, aby bylo docíleno indexu lomu PMMA. Ukázalo se, že i malé množství chemicky agresivní kapaliny stačí k poškození odřezků plexiskla. Z tohoto důvodu bylo nezbytné nalézt kapalinu, která by PMMA nepoškozovala vůbec.

Nabyté zkušenosti byly použity při posledním testování, kdy byly testovány odřezky dvou typů – sešroubované díly pomocí šroubu a matice a dílu se závitem a šroubem, které byly opět vloženy do čistých kapalin. Ukázalo se, že je třeba snížit nároky na shodu indexu lomu světla, neboť všechny kapaliny o vyšším indexu lomu silně poškozují plexisklo.

Nově vybranou pracovní kapalinou, která byla vybrána jako vhodný kompromis mezi indexem lomu, viskozitou a chemickým vlivem na PMMA, se stal kerosin (Jet A1).

Kromě rozdílného druhu kapalin lze použít jiný druh materiálu modelu. Ty ovšem nejsou vzhledem ke křehkosti (pyrex) nebo nemožnosti výroby složitějších tvarů (tavený křemen) vhodné pro výrobu zvětšeného modelu trysky. Nabízí se tedy možnost 3D tisku, je ovšem nezbytné, aby došlo ke zdokonalení výroby, neboť modely z materiálů použitých pro 3D jsou stále málo průhledné, obsahují vměstky materiálu a jiné chyby. Také mají nízkou přesnost rozměrů a vysokou drsnost, která může mít vliv na výsledné chování kapaliny uvnitř trysky.

Tab. 5.13: Seznam testovaných kapalin s jejich vlastnostmi a zhodnocením

Kapaliny	CAS	σ (20 °C) [mN/m]	μ (20 °C) [mPa·s]	n [–]	ρ [kg/m ³]	Poškozuje PMMA
1-Bromnaftalen	90-11-9	44,4	4,98	1,657	1480	Ano
Anýzový olej	8007-70-3	33,3	2,37	1,557	981	Ano
Bodlákový olej	8001-23-8	34	76	1,476	925	Ne
Glycerín	56-81-5	64	934	1,47	1262	Ne
Kerosin	8008-20-6	28	1,64	1,45	785	Ne
Parafínový olej	8042-47-5	20	21	1,48	850	Ne
p-Cymen	99-87-6	28,1	0,88	1,49	860	Ano
Ricinový olej	8001-79-4	39	986	1,479	960	Ne
Terpentýn	8006-64-2	54,8	1,49	1,473	857	Ano
Tetralín	119-64-2	33,6	2,1	1,541	973	Ano
Tungový olej	8001-20-5	33,1	152	1,52	937	Ne
Voda	7732-18-5	72,8	1	1,33	993	Ne

6 Příprava modelu trysky a pracovní sestavy

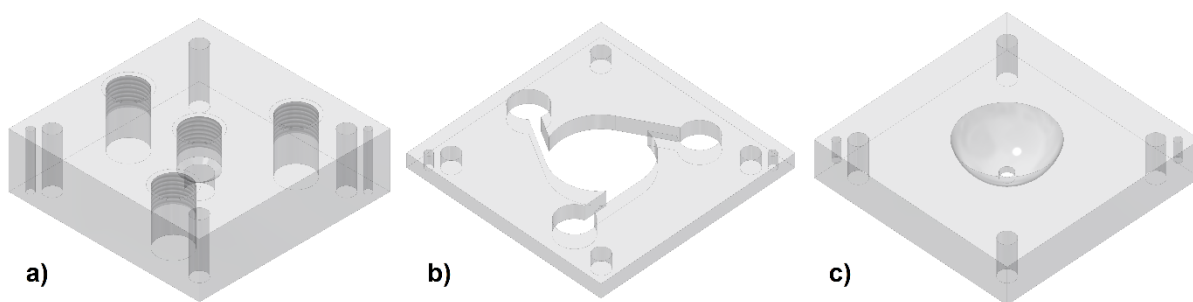
Se zvolenou pracovní kapalinou, lze přistoupit k přípravě modelu vířivé trysky a samotné sestavy, která byla připravena tak, aby umožňovala všechny druhy měření související s modelem.

Vzhledem k dlouholetému výzkumu trysek a sprejů disponuje laboratoř sprejů připravenou konstrukcí sestavenou z hliníkových dílů dodané firmou ALUTEC KK s.r.o., která je opatřena dvouosým traverzovacím systémem firmy Dantec Dynamics. S konstrukcí je spojena upínací deska, která slouží k pevnému upnutí přístrojů, jako je vysokorychlostní kamera nebo LDA systém.

Autor práce tedy musel spíše zajistit optimální připevnění a polohu modelu trysky, než stavět a navrhovat celý rám. Kromě toho bylo nutné postavit hydraulický a měřicí okruh a zajistit funkčnost všech snímačů, které se měly v měření objevit.

6.1 Model trysky

Materiálem modelu trysky je lité plexisklo, které se mezi plastovými materiály vyznačuje výbornými mechanickými vlastnostmi, díky kterým jej lze obrábět i na velice přesné rozměry. Model samotný je rozdělen na tři díly (viz obr. 6.1), které jsou pomocí šroubů a matic spojeny k sobě.

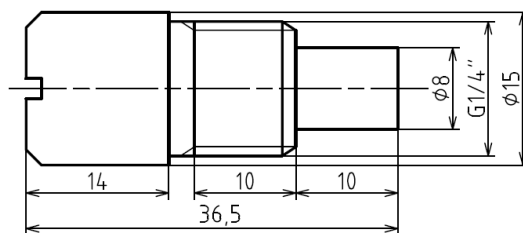


Obr. 6.1: Jednotlivé díly modelu trysky; a) horní díl se závity pro armatury, b) střední díl s tangenciálními vstupy, c) spodní díl s komorou trysky

Modulární konstrukce modelu umožňuje výměnu jednotlivých dílů s odlišnou geometrií, čímž lze zkoumat vliv geometrie na vnitřní proudění nebo výsledný sprej. Modulárnost také zlepšuje případnou opravu, neboť stačí vyměnit poškozený díl pro opětovnou funkci trysky.

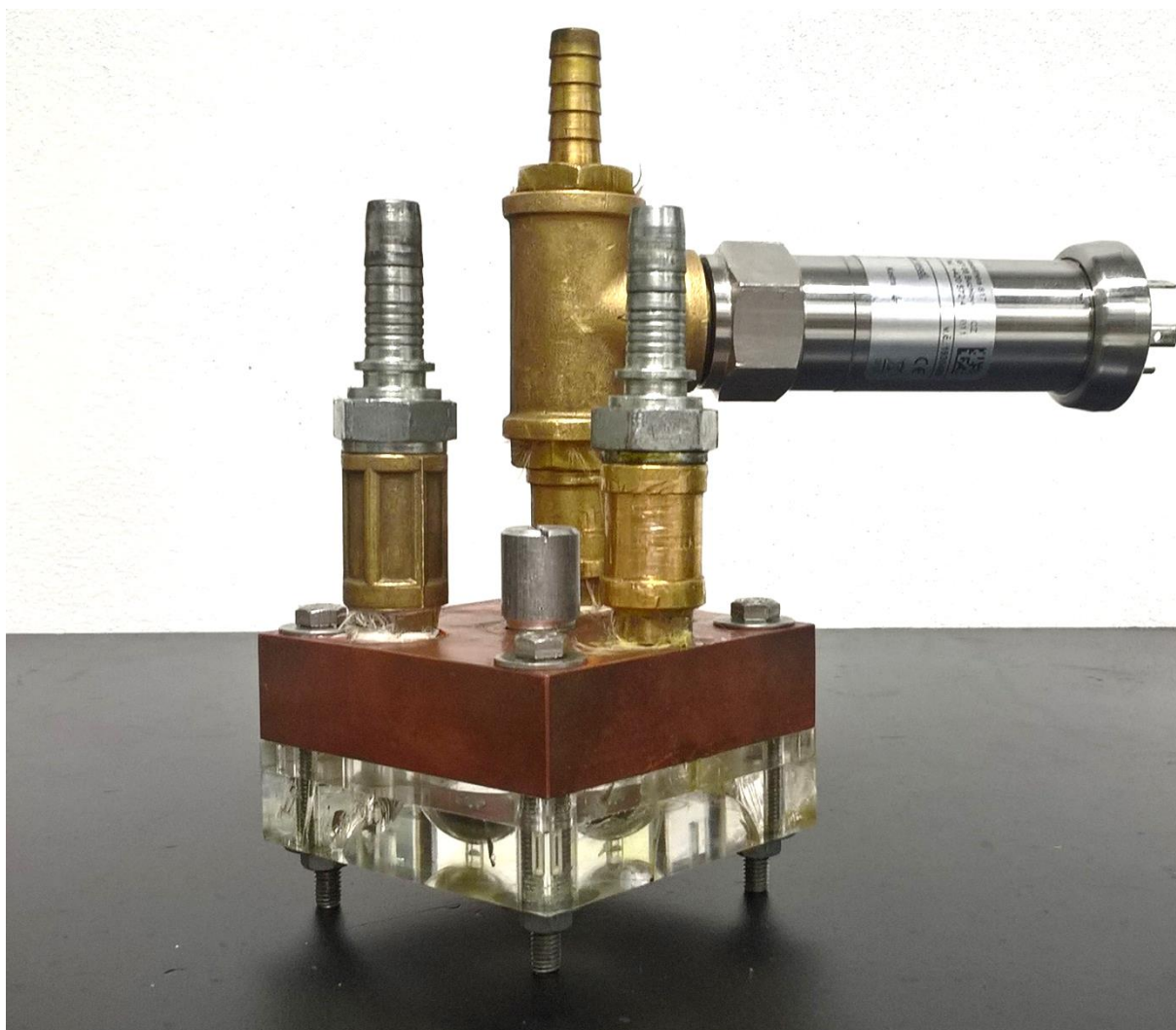
Po sestavení trysky byly do modelu zašroubovány mosazné vsuvky, které sloužily k přívodu pracovní kapaliny. Konfigurace *simplex* a *spill-return* lze snadno měnit pomocí tvarovaného šroubu (viz obr. 6.2), kterým lze ucpat obtokový otvor trysky. Je ovšem nezbytné, aby spodní stěna horního dílu modelu lícovala se spodní stranou šroubu a nedocházelo tak k ovlivnění proudění uvnitř trysky.

Do modelu nebyly vsazovány středící kolíky, neboť by se jednalo o další zdroj mechanického namáhání, což po počátečním poškození trysky nebylo žádoucí. Lícování dílů se dosahovalo vysokorychlostní kamerou, pomocí které byly drobné odchylky mezi díly dobře patrné, což umožňovalo snadnou nápravu.



Obr. 6.2: Šroub pro utěsnění obtokového otvoru dílů

K jedné ze vstupních armatur je připojen mosazný t-kus, ke kterému byl našroubován jeden z tlakoměrů, který měřil tlak kapaliny na vstupu do trysky. V případě provozu trysky s obtokem je další t-kus s tlakoměrem připojen k vsuvce na obtoku. Konečným prvkem jsou mosazné trny pro připojení hadic. Sestavený blok je na obr. 6.3.

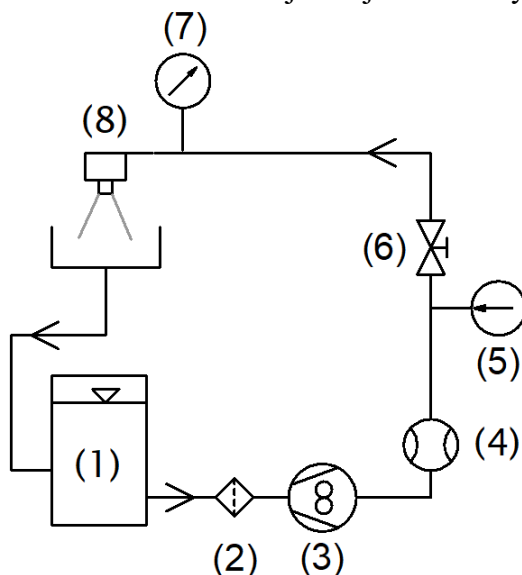


Obr. 6.3: Sestavený model trysky včetně těsnicího šroubu a tlakoměru; měděný horní díl byl přidán po silném poškození původního dílu po sérii testů s p-cyemenem

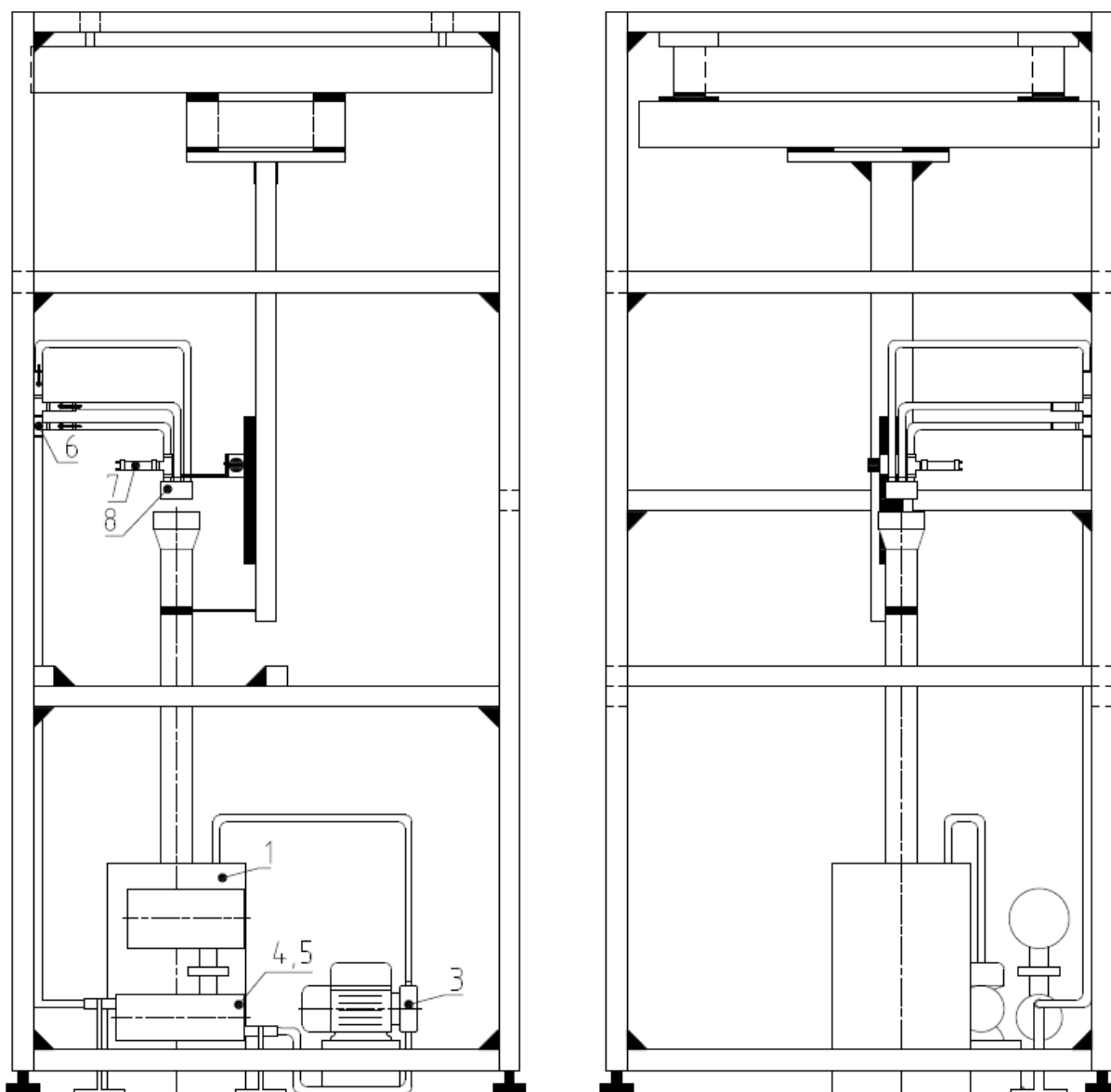
6.2 Vsazení modelu do pracovní sestavy

Mezi spoj armatur byl přidán ocelový profil pro připevnění modelu k lineárnímu mikroposuvu, který umožňuje vertikální posuv modelu v měřitelných krocích. Mikroposuv je upevněn na svislé rameno z hliníkového profilu, které je připojeno k 2D traverzovacímu systému. Tento systém je zavěšen na hliníkovém rámu, vedle kterého se nachází stabilní upínací deska pro vizualizační a měřicí techniku.

Sprej je z trysky (8) odváděn pomocí PVC potrubí. Stéká z potrubí do nádoby s pracovní kapalinou (1), do které je také případně přivedeno potrubí z obtokového otvoru (8), pokud je tato konfigurace trysky testována. Z nádrže je kapalina čerpána přes filtr (2) synchronním čerpadlem (3) s frekvenčním měničem a je rozváděna pomocí nerezových hadic dále přes průtokoměr (4) zpět do trysky (8). Před tryskou je pomocí mosazných t-kusů proud rozdělen do tří pryžových hadic Semperit, které jsou připojené na trny vedoucí do jednotlivých vtokových otvorů. V okruhu je zapojen snímač teploty (5), který je součástí průtokoměru a již zmiňovaný snímač tlaku (7). Soustavu lze uzavřít pomocí ventilu (6). Další ventil je případně přidán k hadici z obtokového otvoru pro regulaci průtoku touto větví. Sestava je pro lepší ilustraci zobrazena na obr. 6.4 v podobě schématu a na obr. 6.5 jako zjednodušený výkres.



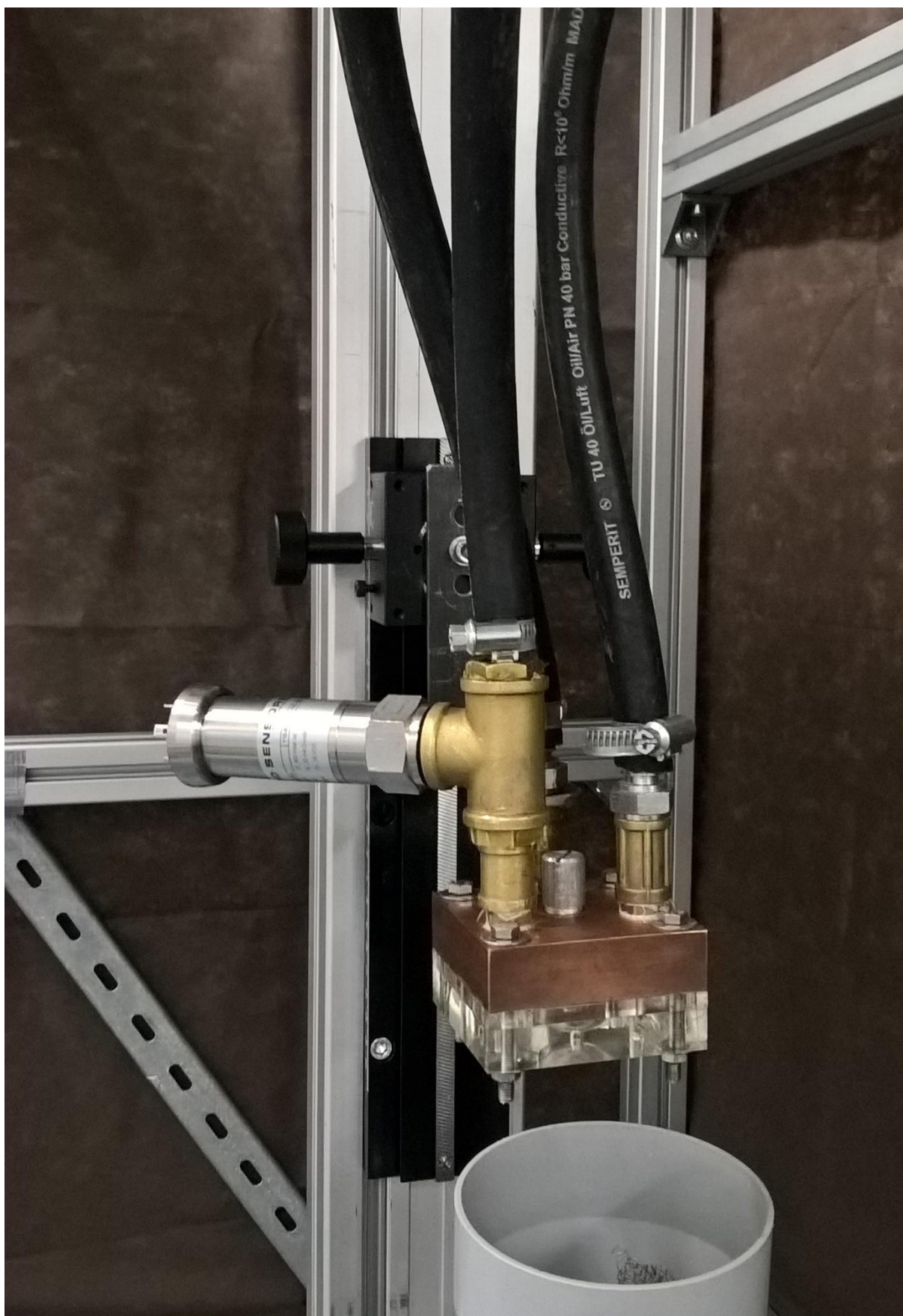
Obr. 6.4: Schématický nákres kapalinového okruhu; převzato z [8]



Obr. 6.5: Zjednodušený výkres testovací sestavy; celá sestava včetně kót a popisu zařízení je zobrazena na přiloženém výkresu – Příloha 2



Obr. 6.6: Fotografie sestavy



Obr. 6.7: Detail trysky v sestavě

6.2.1 Použité materiály, přístroje a snímače

Součástí měřicího okruhu popsaného v kap. 6.2 je kromě samotné konstrukce také několik snímačů a měřicích zařízení. Nejdůležitější prvky jsou zahrnuty níže. V příloze 1 se nachází kompletní kusovník sestavy. Hodnoty před položkami odpovídají těm, kterými jsou popsány části okruhu.

Materiály konstrukce

Mosazné armatury (G 1/4" – G 1/2"), nerezové šrouby a matice

(6) Kulový kohout G 1/4"

Hliníkový profil Alutec KK 45×45–164545 a spojovací materiál

Hladké potrubí z PVC DN70

Materiály a přístroje v kapalinovém oběhu

Nerezová připojovací opletená hadice s koncovkami G 1/4" – G 1/2"

Víceúčelová pryžová hadice Semperit TU 40, vnitřní průměr 10 mm, tloušťka stěn 3,5 mm

(3) Odstředivé čerpadlo se synchronním motorem Lowara PSA 70/A; průtok do 0,96 m³/h, výtlačná výška do 82 m, otáčky 2900 min⁻¹, teplota čerpané kapaliny –10 °C až 80 °C, max. přípustný tlak 1 MPa; litinové tělo, bronzové kolo

(4, 5) Coriolisův průtokoměr Sitrans F C MASS 2100, výrobce Siemens; typ 7ME4100-1CD10-1BA1, DN 3/ PN 100, teplota kapaliny –50 °C až 180 °C, v. č. 7ME410895903N451

Vysílač Sitrans F C MASSFLO MASS 6000, výrobce Siemens, typ 7ME4110-1FA21-1AAD, napětí 24 V, v. č. 020124H341

(7) Snímač tlaku DMP 331I, výrobce BD SENZORS; typ 110-4000-1-1-100-100-1-111, měřicí rozsah 0–400 mbar, přesnost ± 0,25 % z rozsahu, proudový výstup 4–20 mA, v. č. 1930489

Vysokorychlostní záznamová kamera Photron FASTCAM SA-Z; typ 2100K-M-16GB, rozlišení 1024×1024 při frekvenci 20000 FPS, v. č. 10202414173

Flow Explorer 2D Mini LDA, výrobce Dantec Dynamics; typ 9065X041, měření až 100000 částic za sekundu, sériové číslo 0145

LED osvětlení se stojanem, výrobce IDT, USA; 130 W, sériové číslo 39-0112-0074

6.3 Zkušenosti s provozem trysky

Model i celá sestava se ukázaly jako dobře fungující. V prvních pokusech s vodou se projevila nedostatečná těsnost mezi díly, ačkoli byly pevně spojené. Tryska byla z toho důvodu rozebrána a na styčné stěny mezi díly byl přidán průhledný silikon na plasty. I ve velmi malé vrstvě zabránil dalšímu pronikání kapaliny mezi díly i při vyšších tlacích.

Při testování se objevily problémy s opakovatelností měření, kdy si neodpovídaly výsledky mezi měřeními při stejné konfiguraci. Při hledání příčiny se ukázalo, že se v ohybech zavzdušňují pryžové hadice. Z tohoto důvodu byly k jednotlivým větvím vedoucím ke vstupním otvorům předsazeny kulové ventily. Zavíráním ventilů a poklepáním na ohyb hadice byly vzduchové kapsy odstraněny.

Dále byl do soustavy přidán t-kus s ústím do okolního vzduchu, neboť kapalina se i po vypnutí čerpadla držela uvnitř komory a nedocházelo k jejímu odtoku. Otevřením ventilu došlo k narušení podtlaku a kapalina z trysky vytekla.

Do hrdla PVC potrubí bylo po několika testech vsazena kovová síťovina, která měla snížit množství kapaliny, které se odráželo od stěn a ulpívalo na stěnách trysky. I přes tuto aplikaci stále docházelo k vysokému počtu odrazů zpět. Vsunutím síťoviny hlouběji do potrubí a přidání rozšiřujícího kusu PVC došlo k velmi výraznému snížení zpětných odrazů.

Poškozené díly po testech s p-cymenem byly lepeny pomocí lepidla určeného pro plasty, které částečně leptalo povrch těchto plastů. Bylo tedy nezbytné, aby bylo lepidlo nanášeno velice opatrně. Spleené díly se ukázaly být mechanicky stále pevné, přesto se v místech spojů po dalším použití p-cymenu opět poškodily.

Z důvodu neustálého nežádoucího pohybu sestavy například při manipulaci s mikroposuvem došlo ke zpevnění již postavené konstrukce z profilů Alutec, a to zvýšením počtu rohových a dalších spojení. Protože se celá sestava stále pohybovala i po tomto vyztužení, byly k nejvyšším profilům sestavy přišroubovány kovové vzpěry, které byly připevněny ke zdem místnosti. Toto opatření výrazně snížilo veškerý pohyb soustavy. Kromě hliníkových profilů Alutec jsou na různých místech konstrukce připevněny c-profilý pro další zvýšení tuhosti soustavy.

6.3.1 Změna konstrukce modelu trysky

Je vhodné uvažovat o několika úpravách navrženého modelu (viz obr. 6.8), přestože se ukázal jako poměrně dobrá koncepce. Samotný materiál modelu je velice pevný a dostatečně tvrdý, který i při příliš silném utažení šroubů nevykazuje žádný defekt, dojde pouze k pružné deformaci materiálu. Z pohledu mechanického namáhání je model dimenzován dostatečně, důvodem jeho poškození se stala chemická koroze výrazně zesílená silovým zatížením.

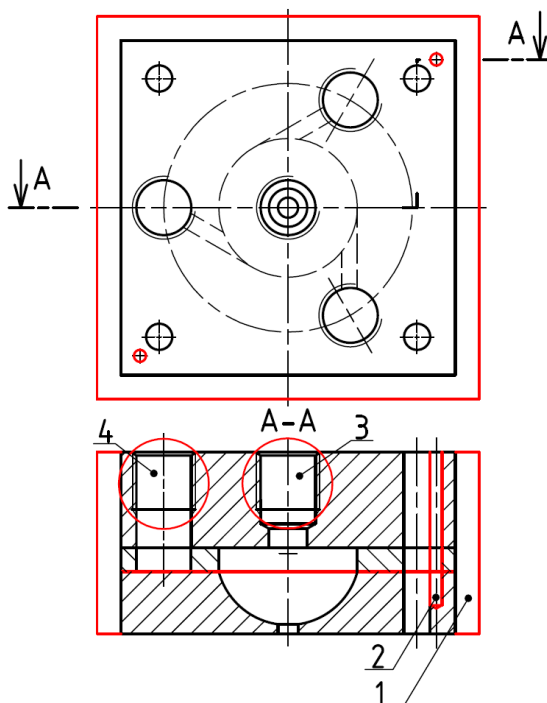
Sestavený model trysky má rozměry 70×70×38 mm. Původní návrh se zaměřil na co nejmenší možnou délku optického rozhraní (tloušťku stěn), aby nedocházelo k útlumu světelného paprsku, většímu výskytu chyb materiálu apod. Ukázalo se, že vyleštěné lité plexisklo je dobře průhledným materiálem a stěny modelu mohou být zvětšeny. Zlepší se tak mechanická pevnost materiálu a riziková místa budou odstraněna. Otvory pro spojovací šrouby lze umístit mimo zorné pole vtokových otvorů, což zlepšuje pozorování kapaliny v těchto místech.

Při testování se ukázalo, že není třeba přidávat do sestavy středící kolíky, neboť model lze snadno vystředit pomocí pohledu vysokorychlostní kamerou. Kolíky také do modelu zanáší pnutí materiálu kvůli jejich nutnému přesahu.

Vzhledem k dalšímu směřování výzkumu, který se zaměří především na vliv obtokové části na proudění, lze uvažovat o pevném spojení spodního dílu s komorou a středního dílu s tangenciálními vstupy. Ty by byly vyrobeny odděleně, poté by došlo k jejich průmyslovému slepení a vyleštění přechodu mezi díly. Tato úprava by sice snížila modularitu modelu, došlo by ovšem ke zlepšení optického přechodu mezi díly, zvýšení pevnosti modelu a utěsnění zdroje úniku kapaliny. K takovému bloku lze měnit pouze horní díl, jehož úprava (tvorba závitu) a změna materiálu (např. měď nebo mosaz) v oblasti obtokového otvoru by umožňovala snadnou výměnou rozdílných obtokových konfigurací se zachováním celého modelu ve složeném stavu a upnutém na nosné konstrukci.

Z důvodu chemické koroze se ukázaly problematické také závity v modelu, které se v případě špatného utěsnění stávají zdrojem úniku kapaliny, neboť není možné, vzhledem k materiálu modelu, zašroubovat armatury na konec závitu. Jejich utěsnění se ukázalo dostatečné za pomoci teflonové nitě nebo pásky.

Pokud není životnost modelu jedním z hlavních požadavků (například modely vyrobené 3D tiskem) a je nutné použití kapaliny, která materiál poškozuje, nabízí se jako řešení pro prodloužení životnosti modelu neřezání závitů vstupních otvorů v horním dílu. Touto změnou zůstanou zachovány vstupy do trysky, do kterých by se vstupní armatury vlepovaly pomocí lepidla nebo silikonu. Výrazně se tím sníží mechanické zatížení horního dílu, který déle odolá chemickým vlivům pracovní kapaliny. V případě, že je užita kapalina, která materiál nepoškozuje, není pro tuto změnu důvod, neboť díl se závity nebyl poškozen až do chvíle prvních testů s připravenou kapalinou.



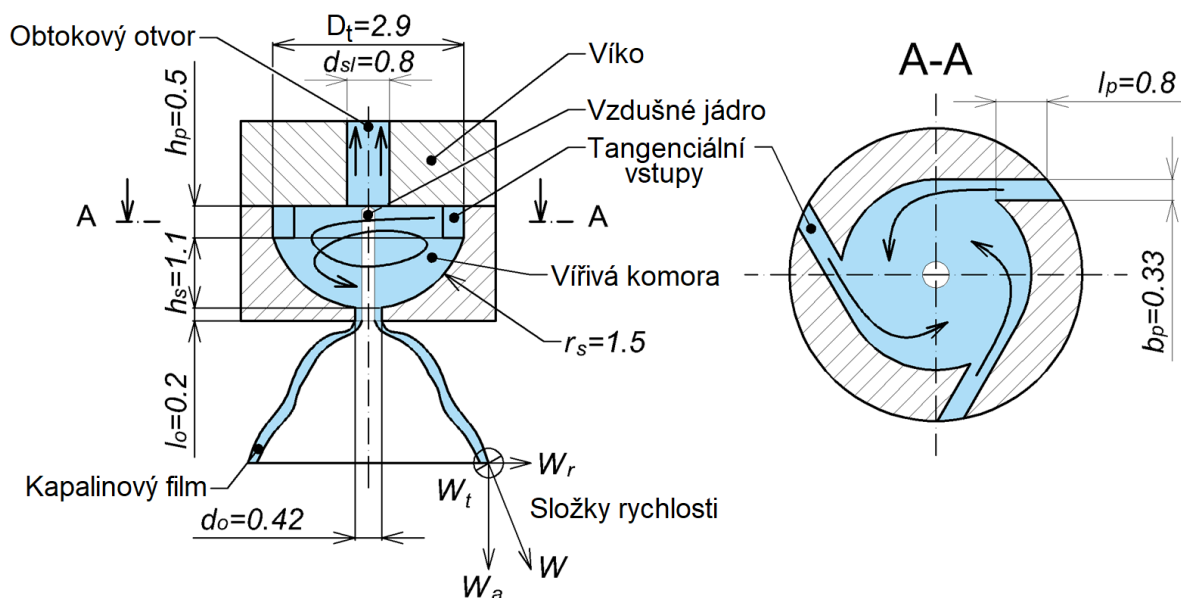
Obr. 6.8: Složený model trysky s označením možných změn v konstrukci; 1 – rozšíření stěn, 2 – odstranění otvoru pro středící kolíky, 3 – úprava závitu obtokového otvoru (například jeho zvětšení), 4 – neřezání závitů vstupních otvorů

7 Měření a vizualizace vnitřního proudění v modelu

Soustava s upnutou tryskou, připojenými snímači, připravenými vizualizačními přístroji a fungujícím okruhem pracovní kapaliny byla podrobena sérii několika optických a vizualizačních testů. Kapitola se zabývá samotnou prací se zvětšeným modulárním modelem tlakové vířivé trysky. Model je spolu s pracovní kapalinou snímán vysokorychlostní kamerou, je provedeno několik LDA měření nebo jsou stanovena bezrozměrná kritéria proudění.

7.1 Stanovení bezrozměrných kritérií proudění

Pro dosažení shodného charakteru proudění kapaliny ve zvětšeném modelu s originální tryskou je nezbytné, aby Reynoldsovo číslo a vírové číslo modelu odpovídalo hodnotám s původní tryskou. Na základě tohoto předpokladu byl již odvozen vztah 3.18, který udává poměr pracovního tlaku a vlastností kapaliny pro zachování Re . Dalším bezrozměrným kritériem, kterému musí být věnována pozornost je Freudeho číslo, které je definováno vztahem 3.21 a nutnou podmínkou je, že $Fr \gg 1$. Výpočty vychází z geometrie trysky, jejíž rozměry jsou uvedeny na obr. 7.1.



Obr. 7.1: Konstrukce skutečné trysky, rozměry v mm; převzato z [9]

Pro původní trysku byla naměřena data při tlaku pracovní kapaliny 0,5, 1 a 1,5 MPa s odpovídajícím průtokem. Kapalinou, která se používá pro tento typ trysek, je kerosin Jet A1. Jeho vlastnosti při 25 °C jsou:

Povrchové napětí	$\sigma_{ker} = 0,0291 \text{ kg/s}^2$
Dynam. viskozita	$\mu_{ker} = 0,0016 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
Hustota kapaliny	$\rho_{ker} = 795 \text{ kg/m}^3$

Úpravou (vztahy 7.1 a 7.2) vztahu 3.13 a dosazením naměřených hodnot je stanovena hodnota Reynoldsova čísla pro ekvivalentní tlak 0,5 MPa u trysky typu *simplex*:

$$Re = \frac{w_i D_i \rho_k}{\mu}$$

$$w_p = \frac{\frac{\dot{m}}{\rho_k}}{n_{port} h_p b_p} \quad (7.1)$$

$$D_i = \frac{4 \cdot h_p b_p}{2 \cdot (h_p + b_p)} \quad (7.2)$$

Průměrná rychlost ze vztahu 7.1 odpovídá podílu objemového průtoku a průřezu vstupního otvoru. Hydraulický průměr je poměrem čtyřnásobku průřezu vstupního otvoru a jeho obvodu. Dosazením do původní rovnice pro Re , je dán a vyčíslen vztah 7.3.

$$Re = \frac{\frac{\frac{\dot{m}}{\rho_{ker}}}{n_{port} h_p b_p} \cdot \left(\frac{4 \cdot h_p b_p}{2 \cdot (h_p + b_p)} \right) \cdot \rho_{ker}}{\mu_{ker}} \quad (7.3)$$

$$= \frac{\frac{\frac{5,41}{795 \cdot 3600}}{3 \cdot 0,00033 \cdot 0,0005} \cdot \frac{4 \cdot 0,00033 \cdot 0,0005}{2 \cdot (0,00033 + 0,0005)} \cdot 795}{0,0016} = 755$$

Kde je Re Reynoldsovo číslo
 $\dot{m}$ hmotnostní tok kapaliny
 ρ_{ker} hustota kerosinu
 n_{port} počet vstupních otvorů
 h_p výška vstupního otvoru
 b_p šířka vstupního otvoru
 μ_{ker} dynamická viskozita kerosinu

Stejným způsobem je stanoveno Freudeho číslo (vztah 3.23) a výtokový součinitel (vztah 1.3). Výsledné hodnoty jsou součástí tab. 7.1.

Tab. 7.1: Naměřené hodnoty tlaku a průtoku spolu s vypočítanými bezrozměrnými kritérii platnými pro skutečnou leteckou trysku; převzato z [9]

Typ	Skutečná tryska				
	Δp [MPa]	$\dot{m}$ [kg/h]	C_d [–]	Re [–]	Fr [–]
Simplex	0,5	5,41	0,387	755	137
	1	7,31	0,369	1021	293
	1,5	8,97	0,365	1252	360
Spill-return	0,5	7,7	0,542	1075	309
	1	10,25	0,519	1431	411
	1,5	12,4	0,510	1731	497

Všechny rozměry modelu se proti původní trysce zvětšily 10×, vírové číslo (vztah 3.10) zůstává tedy zachováno. Při zvětšení geometrických rozměrů je třeba úměrně zvýšit průtok. Jelikož je i pro průhledný model užít kerosin jako pracovní kapalina (v původní trysce je používanou kapalinou), stačí navýšit průtok také 10×.

Průtok p-cymenu je nutno vzhledem k odlišným fyzikálním vlastnostem pozměnit, viz vztah 7.4, který je odvozen ze vztahu 7.3 a předpokladu shody Re původní trysky a zvětšeného modelu:

$$\begin{aligned} \text{Povrchové napětí} \quad \sigma_{cym} &= 0,028 \text{ kg/s}^2 \\ \text{Dynam. viskozita} \quad \mu_{cym} &= 0,00086 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)} \\ \text{Hustota kapaliny} \quad \rho_{cym} &= 850 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{model} = m_m \frac{\mu_{model}}{\mu_{p\u00fadvod}} \dot{m}_{p\u00fadvod} = 10 \frac{0,000856}{0,0016} 5,41 = 29 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (7.4)$$

Kde je $\dot{m}_{model}$ průtok kapaliny ve zvětšeném modelu
 m_m měřítko zvětšení rozměrů
 μ_{model} dynamická viskozita kapaliny užitá ve zvětšeném modelu
 $\mu_{p\u00fadvod}$ dynamická viskozita kapaliny užitá v původní trysce
 $\dot{m}_{p\u00fadvod}$ průtok kapaliny v původní trysce

Tab. 7.2: Hodnoty průtoků a Freudeho čísel pro vybrané pracovní kapaliny ve zvětšeném modelu; převzato z [9]

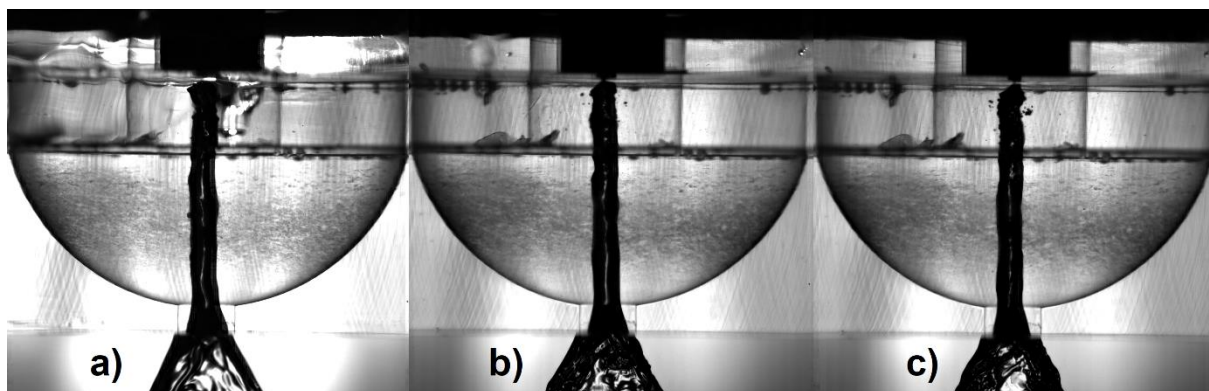
Zvětšený průhledný model						
Typ	Re [–]	Δp_{ekv} [MPa]	p-Cymen		Kerosin	
			$\dot{m}$ [kg/h]	Fr [–]	$\dot{m}$ [kg/h]	Fr [–]
Simplex	755	0,5	29	3,4	54,1	6,9
	1021	1	39,2	4,7	73,1	9,3
	1252	1,5	48,1	5,7	89,7	11,4
Spill-Return	1075	0,5	41,3	4,9	77	9,8
	1431	1	55	6,5	102,5	13
	1731	1,5	66,5	7,9	124	15,7

Z tab. 7.2 je patrné poměrně nízké Freudeho číslo pro p-cymen, i tento fakt byl důvodem snahy vyměnit p-cymen jako pracovní kapalinu, neboť dochází k ovlivnění vnitřního proudění gravitací. Kerosin je z tohoto pohledu vhodnější kapalinou, ovšem pro dosažení shodného Re je nutné dvojnásobný průtok (stanoveno vztahem 7.4) než v případě p-cymenu, který má téměř dvojnásobnou dynamickou viskozitu.

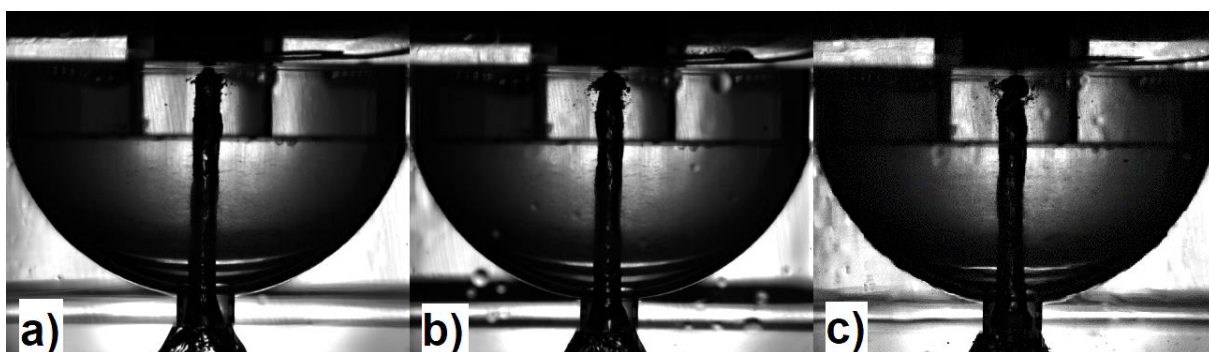
7.2 Vysokorychlostní vizualizace vnitřního proudění

Pomocí vysokorychlostní kamery lze pozorovat chování kapaliny uvnitř trysky nebo pozorovat charakter spreje a určit některé veličiny, jako jsou úhel kuželu spreje nebo velikost vzdušného jádra.

Výsledky z vysokorychlostní vizualizace byly uveřejněny v pracích [8, 9], kdy byl studován rozdíl ve vnitřním proudění mezi tryskami typu *simplex* (obr. 7.2 a 7.3) a *spill-return* (obr. 7.4) a vliv vstupního tlaku (tedy Reynoldsova čísla) na charakteristiku vzdušeného jádra a spreje. Testované soustavy svým průtokem odpovídaly ekvivalentnímu tlaku 0,5, 1 a 1,5 MPa.



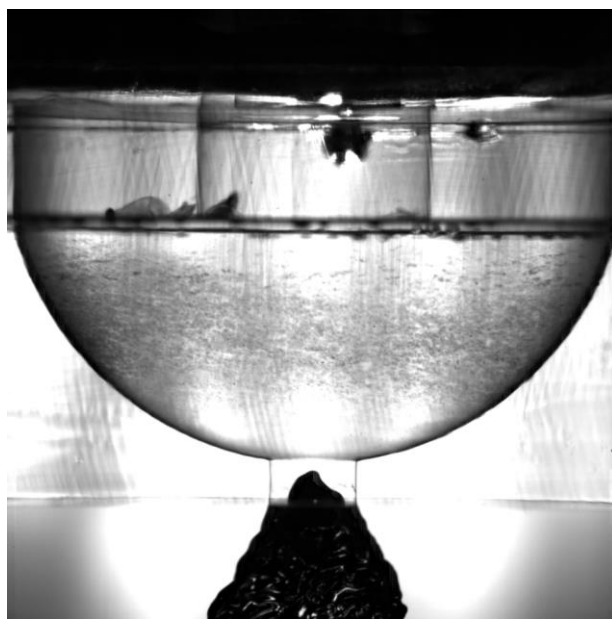
Obr. 7.2: Konfigurace *simplex* s p-cymenem; a) $Re = 755$, $\Delta p_{ekv} = 0,5$ MPa, b) $Re = 1021$, $\Delta p_{ekv} = 1$ MPa, c) $Re = 1252$, $\Delta p_{ekv} = 1,5$ MPa



Obr. 7.3: Konfigurace *simplex* s kerosinem; a) $Re = 755$, $\Delta p_{ekv} = 0,5$ MPa, b) $Re = 1021$, $\Delta p_{ekv} = 1$ MPa, c) $Re = 1252$, $\Delta p_{ekv} = 1,5$ MPa; převzato z [9]

Stabilní vzdušené jádro bylo ve všech případech konfigurace *simplex* rozvinuto. Rozměry vzdušného jádra se při vyšším Reynoldsově čísle stávají nezávislé na pracovním tlaku [53]. Autoři toto chování připisují tření kapaliny o materiál trysky, které působí proti zvýšení vířivé rychlosti.

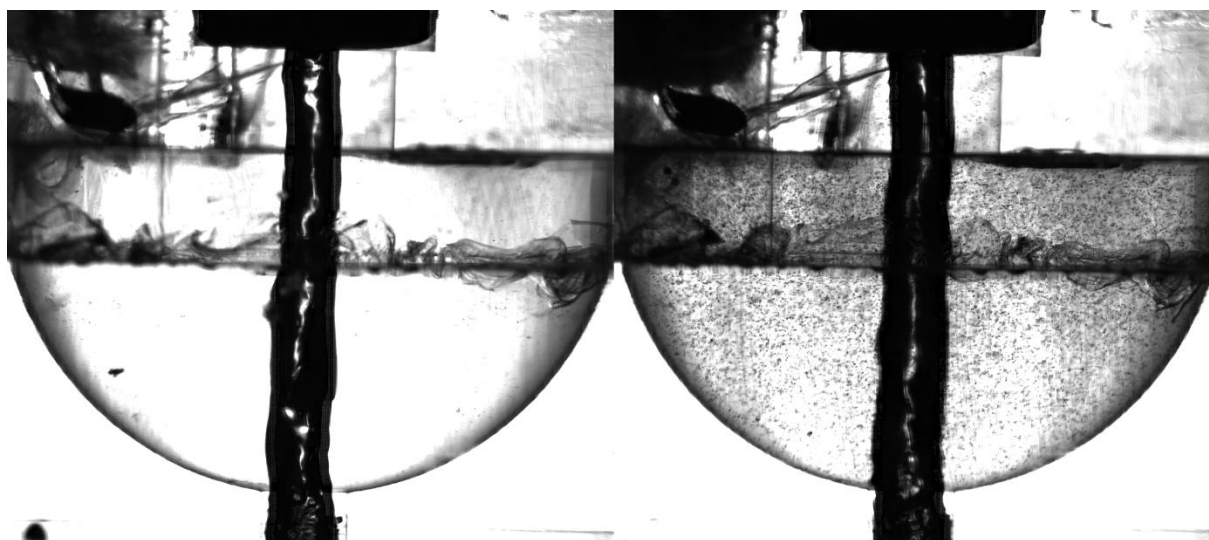
Po změně konfigurace trysky na *spill-return* při zavřeném obtoku nebylo možné získat stabilní vzdušné jádro. Sprej i zlomek vzdušeného jádra byly nestabilní a jádro pulzovalo, dokonce i zmizelo.



Obr. 7.4: Konfigurace *spill-return* s p-cymenem a uzavřeným obtokem, kdy došlo k vytvoření pouze zárodku vzdušného jádra, které se dále nerozvíjelo

Autoři v [9] přisuzují zánik vzdušného jádra zpětnému přisávání kapaliny z obtokového otvoru, neboť jádro v trysce s obtokovým otvorem nebo otvory mimo osu trysky je stabilní [3].

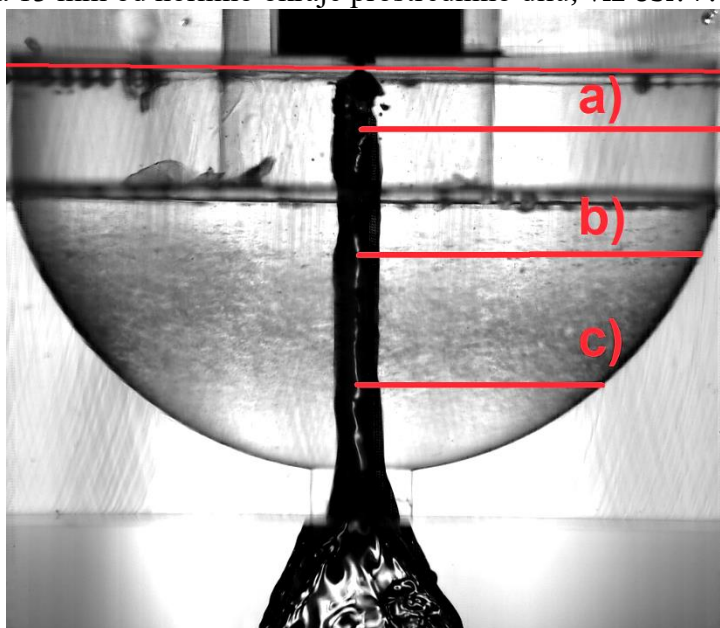
Úplným otevřením obtokového otvoru dojde k tvorbě vzdušného jádra. Přidáním trasovacích částic do proudu lze zahájit LDA měření vnitřního proudění, viz obr. 7.5.



Obr. 7.5: Plně otevřený obtokový ventil a přidání trasovacích částic do proudu p-cymenu; (již patrné poškození horního dílu)

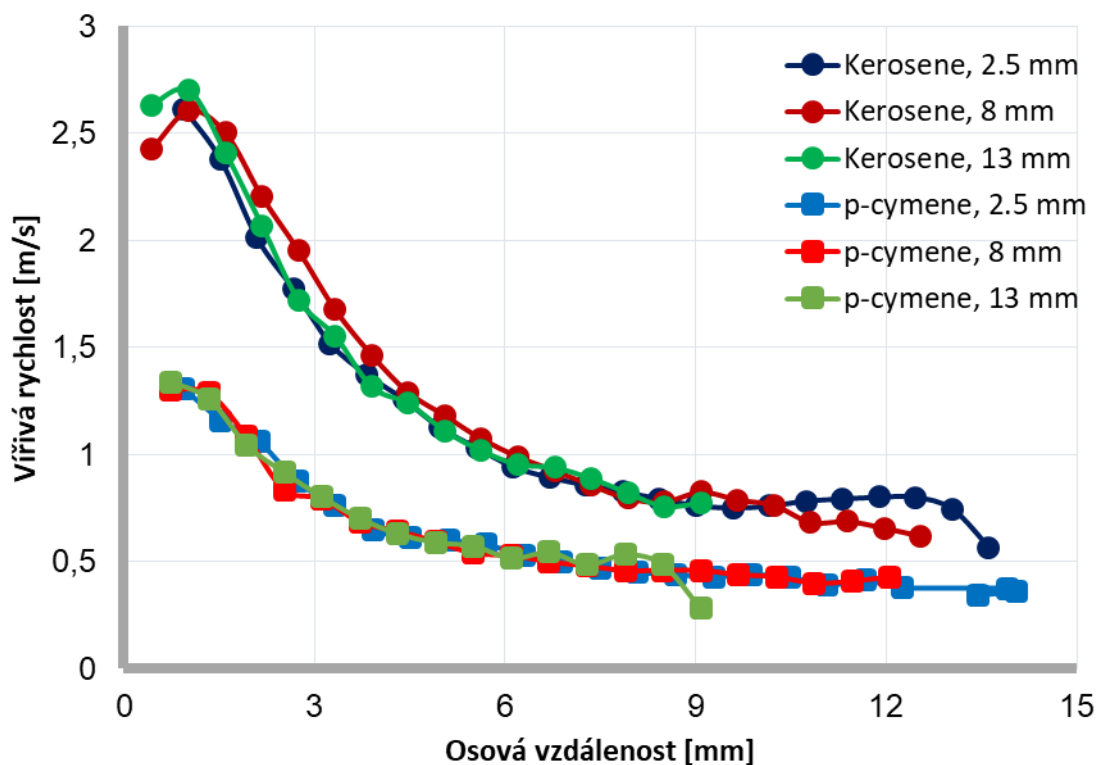
7.3 LDA měření vnitřního proudění

Hlavní měření probíhalo s p-cymenem a kerosinem jako pracovní kapalinou ve třech rovinách trysky, a to 2,5, 8 a 13 mm od horního okraje prostředního dílu, viz obr. 7.6.



Obr. 7.6: Zobrazení rovin měření s vyznačenou vzdáleností od horní hrany prostředního dílu:
a) 2,5 mm, b) 8 mm, c) 13 mm

Měřicí objem se nacházel ve střední rovině trysky a s nastaveným krokem posuvu 0,25 mm se blížil k ose komory. Z naměřených hodnot byla vypracována závislost vířivé rychlosti na osově vzdálenosti, viz obr. 7.7.



Obr. 7.7: Naměřené hodnoty rychlosti pro kerosin a p-cymen při $Re = 1560$; převzato z [8]

Rychlostní maximum se nachází blízko rozhraní vzdušného jádra. Průběh rychlostí je mezi kapalinami shodný, ovšem hodnoty rychlosti kerosinu jsou vyšší, neboť musí být zvýšen průtok pro dodržení shodného Reynoldsova čísla.

Ukázalo se, že se kapaliny při měření vířivé složky rychlosti chovají velice podobně a rozdíl indexu lomu kerosinu a PMMA nemá výrazný vliv na výsledky měření. Naměřené rychlosti v blízkosti vzdušného jádra jsou narušeny výrazným optickým šumem, který je generován optickými odrazy na jeho povrchu. Tentýž problém se týká měření blízko stěny komory.

U vybraných kapalin se ovšem projeví výrazné rozdíly v rychlosti přenosu dat (data-rate), jestliže byla měřena radiální složka rychlosti. Data-rate kerosinu, jako látky o nižším indexu lomu světla, dosahoval o řád nižší hodnoty, než v případě p-cymenu [8].

7.3.1 Ovlivnění LDA měření rozdílným indexem lomu světla

Z výše uvedených výsledků měření bylo vybráno několik kapalin o rozdílném indexu lomu, než je materiál modelu trysky – PMMA, aby u nich mohla být provedena korekce. Jako pracovní kapaliny byly na základě blízké viskozity a neutrálnímu chování vůči plexisklu vybrány: 11,5% směs kerosinu a bromnaftalenu, kdy bylo dosaženo velice blízké shody indexu lomu s PMMA, čistý kerosin a voda.

Měření bylo provedeno přibližně 8 mm od horní hrany středního dílu (předešlá pozice b) a průtok kapalin byl stanoven za předpokladu, že vířivá rychlost kapalin bude konstantní. K dodržení rychlosti kapaliny byl použit jednoduchý vztah rovnosti průtoků, viz vztah 7.5:

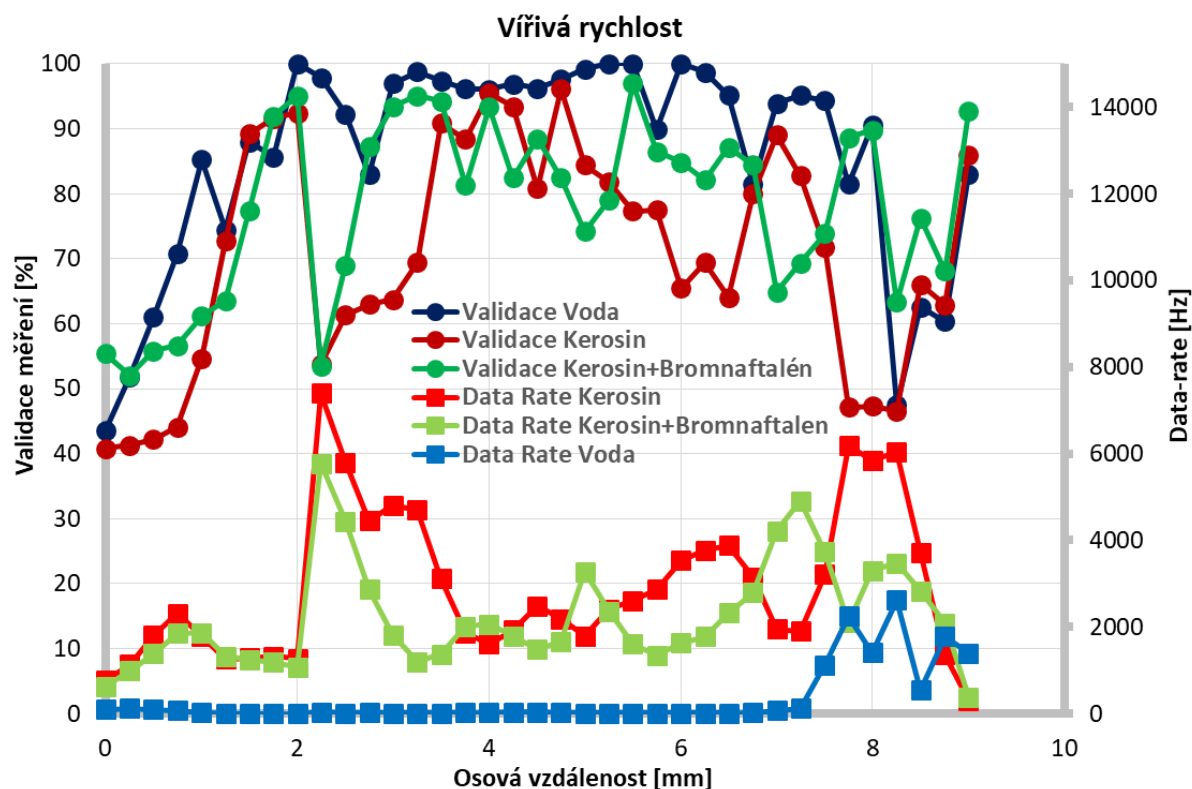
$$\frac{\dot{m}_{k1}}{\rho_{k1}} = \frac{\dot{m}_{k2}}{\rho_{k2}} \quad (7.5)$$

Kde je $\dot{m}_{k1}$ průtok původní kapaliny ve zvětšeném modelu
 ρ_{k1} hustota původní kapaliny ve zvětšeném modelu
 $\dot{m}_{k2}$ průtok nové kapaliny ve zvětšeném modelu
 ρ_{k2} hustota nové kapaliny ve zvětšeném modelu

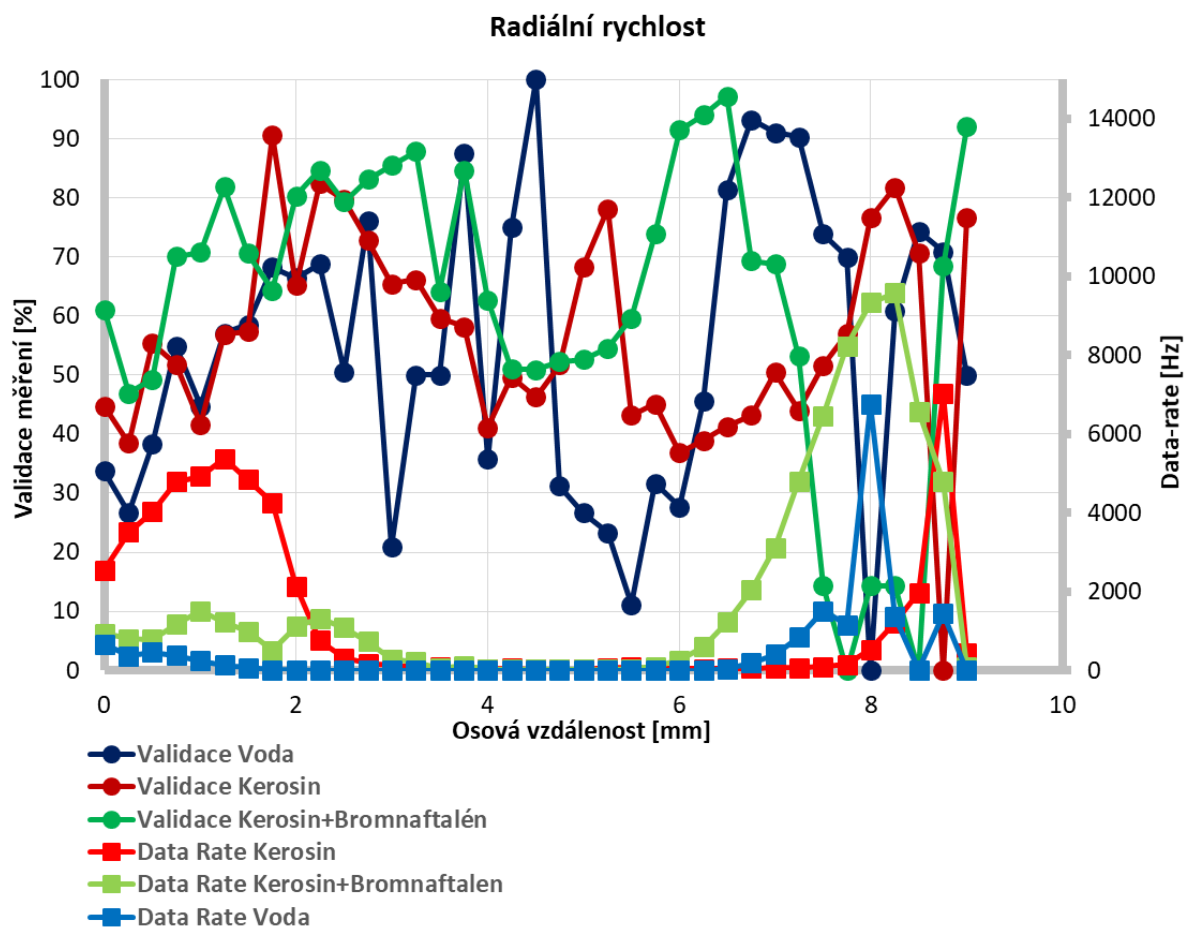
Tab. 7.3: Naměřené hmotnostní průtoky a vstupní tlaky při teplotě kapaliny 26,5 °C

Kapaliny	$n [-]$	$\rho [\text{kg/m}^3]$	$\dot{m} [\text{kg/h}]$	$\Delta p [\text{MPa}]$
Kerosin	1,44	790	1,657	0,00101
Kerosin + Bromnaftalen	1,49	850	1,557	0,00108
Voda	1,33	1000	1,47	0,00161

Důležitým ukazatelem kvality měření je rychlost přenosu dat a validace měření. Tyto veličiny se vzájemně ovlivňují, například validace klesá, pokud je data-rate příliš vysoký (vysoká citlivost) pro konkrétní typ měření. Naopak příliš vysoká validace je naměřena při velmi nízkém data-rate, kdy je měření prakticky neplatné. Závislost validace a data-rate na osové vzdálenosti pro vířivou a radiální rychlost je popsána na obr. 7.8 a 7.9.

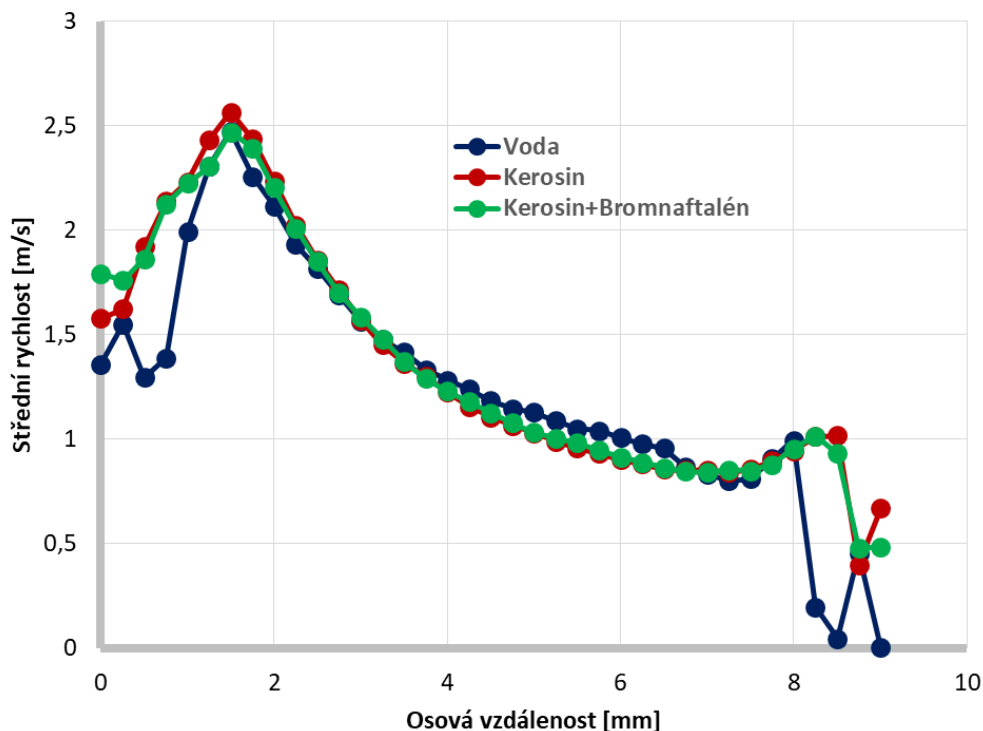


Obr. 7.8: Závislost validace a data-rate vířivé rychlosti kapalin na osově vzdálenosti



Obr. 7.9: Závislost validace a data-rate radiální rychlosti kapalin na osově vzdálenosti

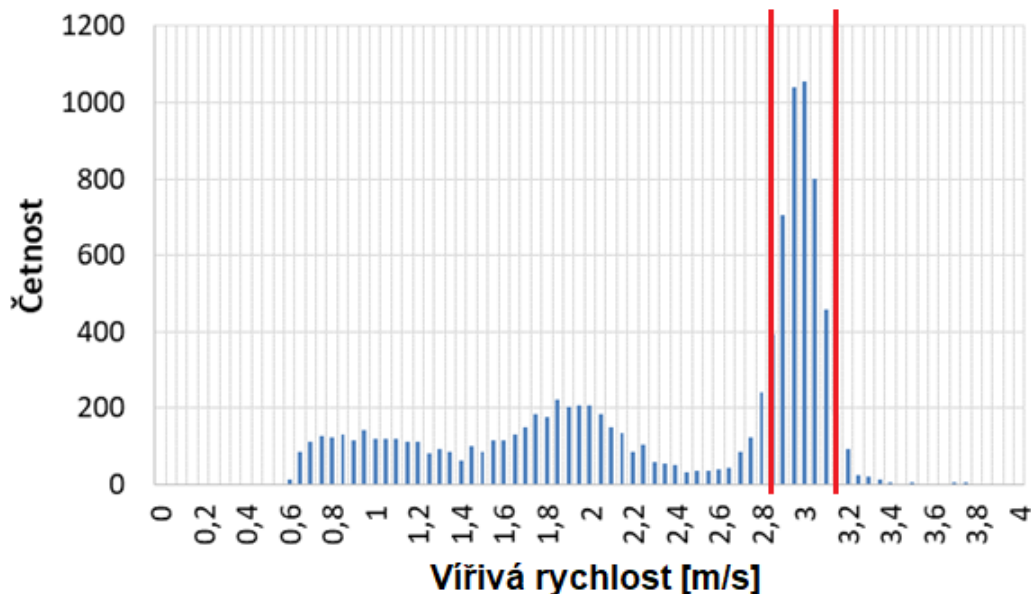
Nezpracovaný průběh středních rychlostí proudění je popsán obr. 7.10.



Obr. 7.10: Závislost střední rychlosti na osově vzdálenosti

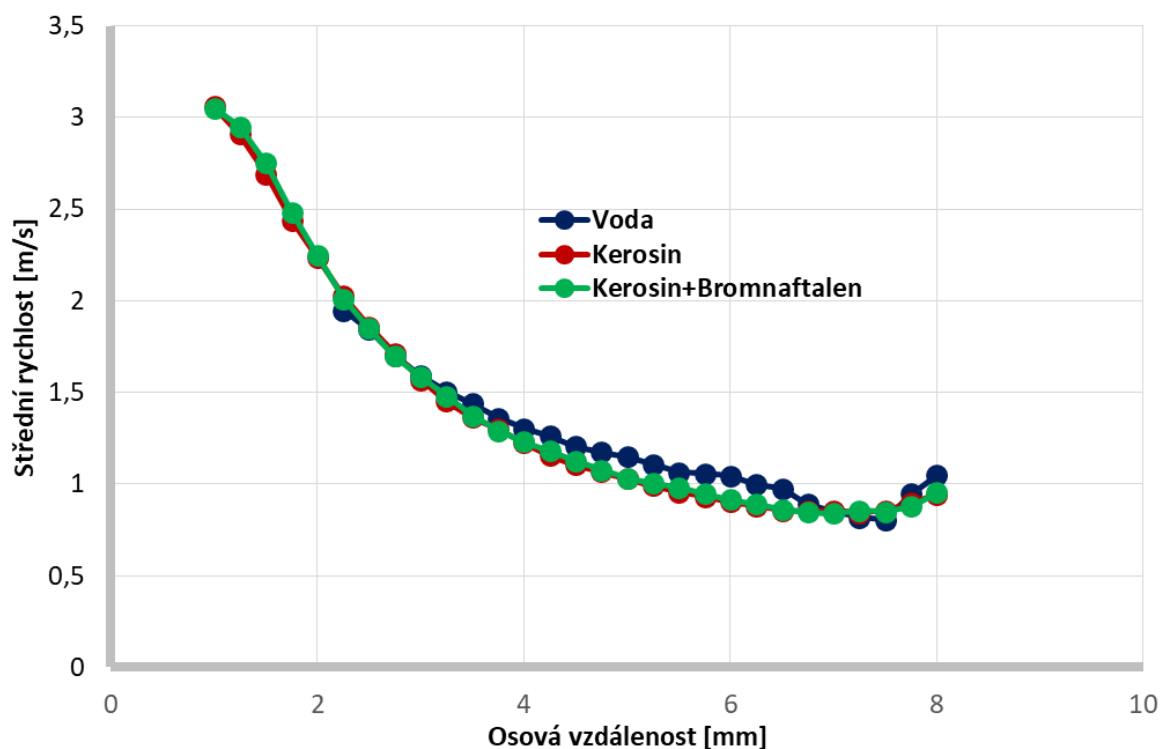
Výsledky rychlosti kerosinu a směsi kerosinu s bromnaftalenem jsou prakticky identické. Hodnoty rychlosti pro vodu jsou vzhledem k nízké hodnotě data-rate zatíženy velkou chybou, kvůli čemuž je vyžadována dodatečná úprava dat. Charakter rychlosti vody je shodný, ovšem hodnoty rychlosti vody odpovídají hodnotám ostatních kapalin blíže k ose komory.

Naměřená data z obr. 7.10 jsou, v krajních hodnotách zatíženy výrazným šumem signálu, způsobeným odrazy světla od optického rozhraní. U těchto hodnot je nutné vyhodnotit naměřená data – nalézt vrchol rychlosti a vybrat užší interval, viz obr. 7.11.



Obr. 7.11: Četnost výskytu hodnot vířivé rychlosti s výběrem intervalu; kerosin v osově vzdálenosti 1,75 mm

Po úpravě a zanedbání některých krajních hodnot z obr. 7.10 (hodnoty blízko jádra nebo stěny modelu) je dán nový graf, viz obr. 7.12.



Obr. 7.12: Upravená závislost střední rychlosti na osové vzdálenosti

Vzhledem k vysoké hladině šumu signálu musely být hodnoty vyřazeny v osové vzdálenosti 2,25 mm a blíže vzdušnému jádru, což odpovídá pozorování, kdy jsou hodnoty rychlosti pro vodu právě posunuty přibližně o 1 mm dále. Laserový svazek se tedy nejspíše dostává k rozhraní vzdušného jádra dříve, než v případě zbylých kapalin.

Po úpravě dat získaných pro kerosin a směs kerosinu s bromnaftalenem jsou průběhy rychlosti prakticky shodné. Je zřejmé, že pro měření tangenciální rychlosti lze použít i kerosin, který má menší index lomu než plexisklo, přesto jsou naměřeny stejné hodnoty vířivé rychlosti jako v případě shodného indexu lomu za použití směsi kerosinu a bromnaftalenu. U vody došlo k výraznějšímu zkreslení výsledků vlivem zvýšeného zašumění signálu. Vykreslení pouze radiální složky rychlosti a porovnání s prvním testem z [8] nebylo možné, neboť její velikost byla naměřena jako nulová s výrazným šumem u všech třech kapalin.

7.3.2 Korekce dráhy paprsku

Testování ukázalo, že příliš vysoký rozdíl v indexech lomu mezi kapalinou a materiálem trysky vede ke zkreslení výsledků. Ty jdou částečně napravit pomocí korekcí, kterými se zabývalo několik autorů, například: Zhang [55] nebo Albrecht [56], kteří navazují na Lowe [57].

Zhang se v [55] mimo jiné zabývá lomem světla procházejícím zakřiveným povrchem prostředí o odlišném indexu lomu. Stanovil základní vztahy (7.6 – 7.8) pro výpočet skutečné pozice laserového paprsku:

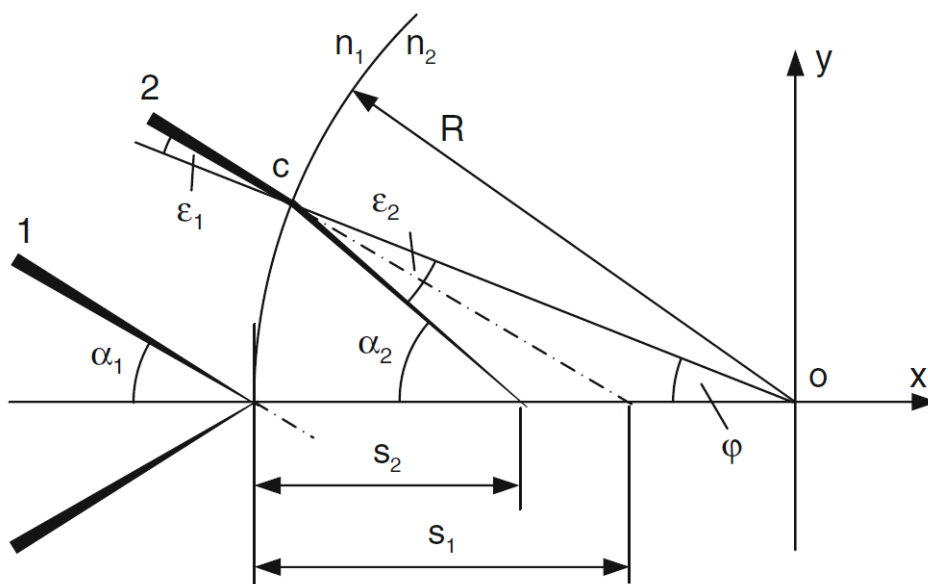
$$n_1 \sin(\alpha_1 - \varphi) = n_2 \sin(\alpha_2 - \varphi) \quad (7.6)$$

$$\frac{R_{tn} - s_1}{\sin(\alpha_1 - \varphi)} = \frac{R_{tn}}{\sin(\alpha_1)} \quad (7.7)$$

$$\frac{R_{tn} - s_2}{\sin(\alpha_2 - \varphi)} = \frac{R_{tn}}{\sin(\alpha_2)} \quad (7.8)$$

Kde je n_1 index lomu světla prostředí, ze kterého paprsek vystupuje (PMMA)
 n_2 index lomu světla prostředí, do kterého paprsek vstupuje (kapalina)
 α_1 původní úhel mezi osou a paprskem laseru
 α_2 nový úhel mezi osou a paprskem laseru
 φ směrový úhel
 R_{tn} poloměr komory ve zvolené pozici
 s_1 vzdálenost, které dosáhne paprsek bez lomu
 s_2 vzdálenost, které dosáhne lomený paprsek

Výše zmíněné veličiny odpovídají značení v obr. 7.13, který schematicky popisuje lom paprsku procházející zakřivenou stěnou.



Obr. 7.13: Lom paprsku 2 a posun proti původní pozici s_1 ; převzato z [55]

Za předpokladu malých úhlů, které svírají laserové paprsky lze ve vztazích 7.6 – 7.8 provést aproximaci $\sin(x) = x$. Výsledkem jsou vztahy 7.9 a 7.10 [55]:

$$\frac{s_2}{R_{tn}} = \frac{1}{1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{R_{tn}}{s_1} - 1 \right)} \quad (7.9)$$

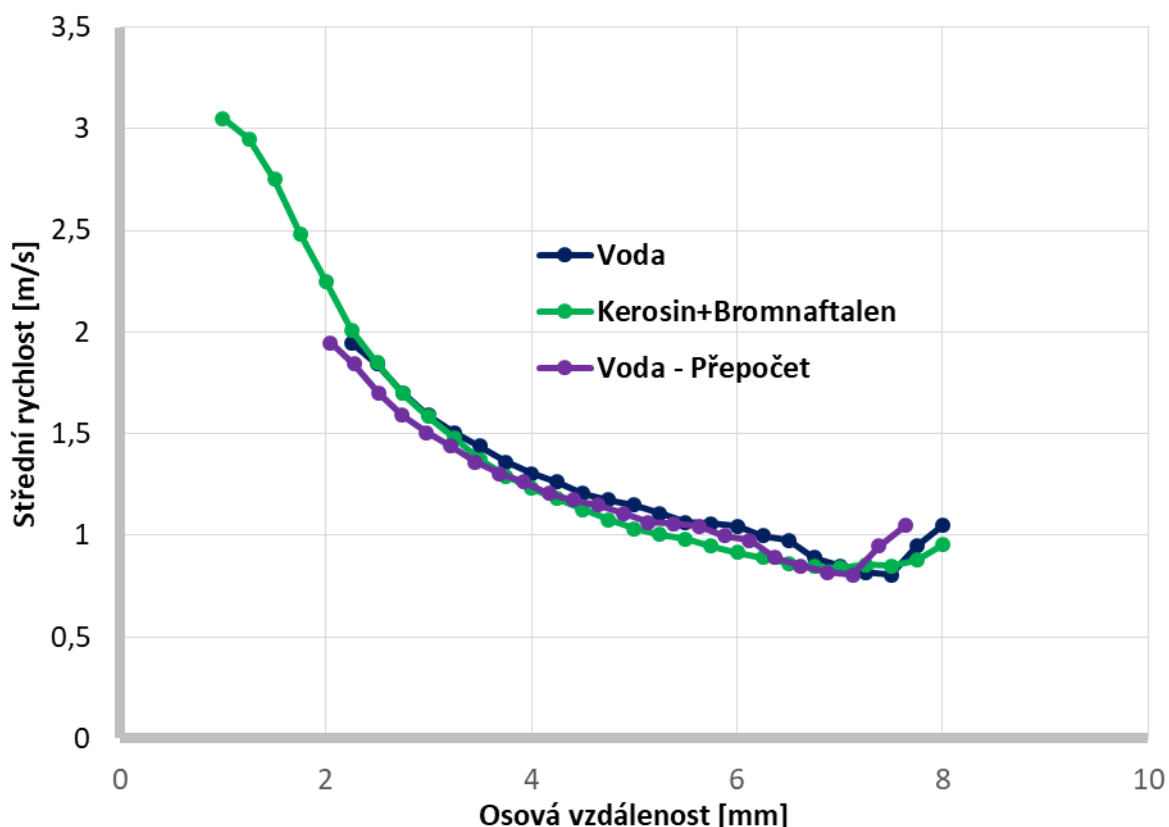
$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{n_1}{n_2} - \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \frac{s_1}{R_{tn}} \quad (7.10)$$

Dosažením hodnot do vztahu 7.9 lze vypočítat skutečnou vzdálenost lomeného paprsku (vztah 7.11). Jelikož bylo měření prováděno v 8 mm od horní hrany prostředního dílu, je $R_m = 13,3$ mm. Za hodnotu s_1 jsou postupně dosazovány měřené polohy 0–9 mm.

Výpočet je proveden pro vodu.

$$s_2 = \frac{R_{tn}}{1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{R_{tn}}{s_1} - 1 \right)} = \frac{13,3}{1 + \frac{1,49}{1,33} \left(\frac{13,3}{8} - 1 \right)} = 7,634 \text{ mm} \quad (7.11)$$

Rychlost vody v nově přepočítaných pozicích byla zaznamenána do grafu, viz obr. 7.14.



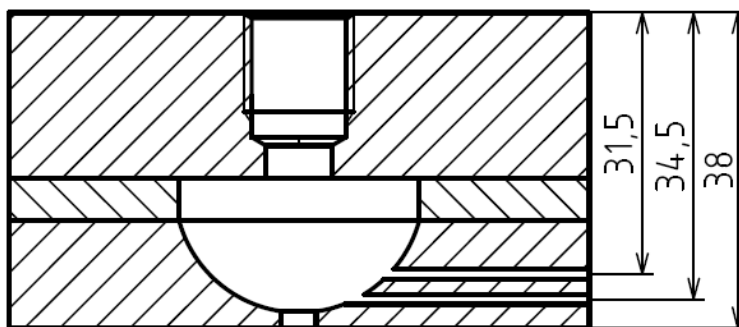
Obr. 7.14: Závislost střední rychlosti na osové vzdálenosti po přepočítání měřené pozice vody

Z obr. 7.14 je patrné přiblížení průběhu závislosti pro vodu, který nyní více odpovídá směsi kerosinu a bromnaftalenu. Také došlo k přiblížení hodnot střední rychlosti. Tímto přepočtem lze vhodně korigovat výsledná data pro kapaliny s výrazně odlišným indexem lomu, než má materiál. Ovšem i přes korekci průběh rychlosti zcela neodpovídá naměřeným hodnotám kapaliny, u které byla dosažena shoda indexu lomu s materiálem. Pro přibližné stanovení průběhu proudění je však tato metoda dostačující.

7.4 Tlakové odběry v trysce

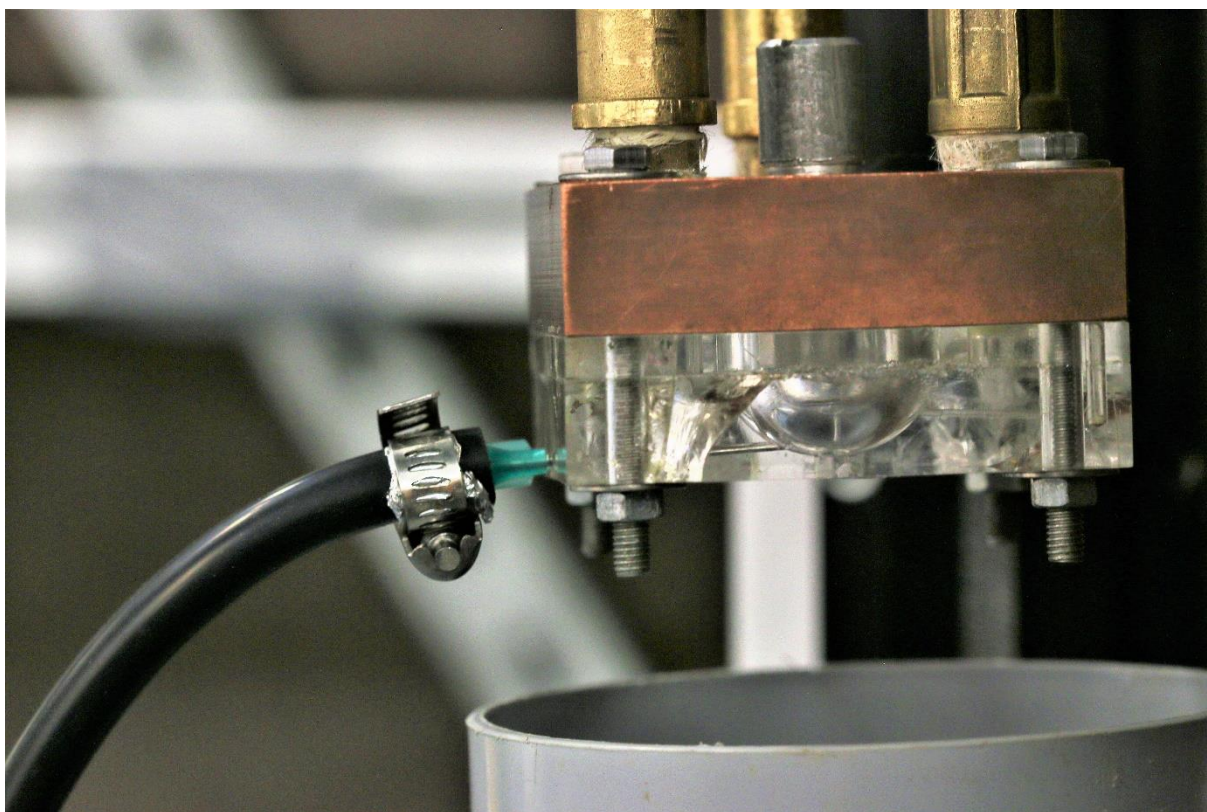
Kromě optických a vizualizačních metod lze na zvětšeném modelu provádět i měření statického tlaku na stěnách komory, jak učinil například Hansen [58], který použil zvětšený průhledný model vyrobený z plexiskla. Takové měření umožňuje sledovat vývoj tlaků v jednotlivých polohách a stanovit poměr mezi tlakem na vstupu a tlakem na stěnách komory.

Pro tlakové odběry byly vyvrtány 2 otvory průměru 1,27 mm, do kterých byly vsunuty jehly průměru 1,21 mm, jež byly pomocí gumové hadice a armatury připojeny k tlakoměru. První otvor byl vyvrtán 31,5 mm od horního okraje trysky (uprostřed spodního dílu) a druhý otvor 34,5 mm od horního okraje trysky, viz obr. 7.15.



Obr. 7.15: Poloha vyvrtaných otvorů o průměru 1,27 mm

Autor zamýšlel ke dvěma otvorům přidat otvor třetí, který by ústil přímo v odtokovém otvoru, vzhledem k jeho malé výšce nebylo možné tento otvor vyvrtat. Při vrtání se vrták mírně ohýbal, kvůli čemuž docházelo k vychýlení jeho dráhy a provrtání povrchu trysky ještě před výtokovým otvorem.



Obr. 7.16: Tlakový odběr na stěně komory

Měření bylo prováděno ve čtyřech pozicích – na stěně a v ose komory (v jádře), viz tab. 7.4. Jako pracovní kapalina byla použita voda.

Tab. 7.4: Hodnoty tlaků a průtoku; Δp – tlak vstupní, Δp_i – tlak v místě odběru

Pozice	Δp [bar]	Δp_i [bar]	$\dot{m}$ [kg/h]	Poměr tlaků
31,5 mm - stěna	0,159	0,153	69,746	0,967
31,5 mm - jádro	0,100	0,033	72,605	0,325
34,5 mm - stěna	0,162	0,152	69,561	0,935
34,5 mm - jádro	0,095	0,012	72,869	0,125

Měření tlaku na stěně neovlivňuje průtok a měřené tlaky jsou prakticky shodné pouze s rozdílem hydrostatického tlaku. Při vsunutí jehly do středu komory dochází k rozpadu vzdušného jádra, neboť jehla působí proti pohybu proudění. Dochází ke snížení úhlu kuželu spreje, navýšení průtoku a výraznému snížení vstupního tlaku. Měření potvrzuje simulace, kdy je tlak na stěnách konstantní a v celé komoře se mění v závislosti na vzdálenosti od osy komory.

8 Závěr

Práce se zabývá zprovozněním zvětšeného průhledného modelu tlakové vířivé trysky užívané v leteckém motoru a měřicími metodami, které jsou s těmito modely používány. Po výrobě modelu bylo nezbytné připravit testovací trať a zvolit vhodnou pracovní kapalinu pro dosažení shody indexu lomu světla s materiálem modelu – plexisklem. S fungující sestavou bylo provedeno několik LDA měření vnitřního proudění a jeho vizualizace pomocí vysokorychlostní kamery pro konfigurace *simplex* a *spill-return* při shodě Reynoldsova čísla proudění s původní leteckou tryskou. Součástí práce je výkres sestavy a podrobná rešerše užitých průhledných materiálů a kapalin pro dosažení shody indexu lomu.

Měření LDA bylo provedeno s několika kapalinami – p-cymen, kerosin, voda a směs kerosinu a bromnaftalenu, kdy byl studován vliv rozdílu indexu lomu světla mezi materiálem modelu a pracovní kapalinou. Směs byla připravena tak, aby bylo dosaženo shody indexu lomu s PMMA. Měření s kerosinem s indexem lomu 1,44, bylo dostatečně přesné a výsledné hodnoty rychlosti odpovídaly směsi kerosinu s bromnaftalenem. Naměřené hodnoty pro vodu bylo nezbytné upravit korekčním vztahem. Po úpravě byly patrné pouze malé rozdíly.

Vysokorychlostní vizualizace byla provedena u kapalin p-cymen a kerosin u konfigurací *simplex* a *spill-return*. U konfigurace *simplex* došlo ke vzniku stabilního vzdušného jádra, zatímco u konfigurace trysky s obtokem nedošlo ke vzniku vzdušného jádra, což doprovázely fluktuace spreje.

Do modelu trysky byly dodatečně vyvrtány otvory do komory trysky, kterými byl měřen statický tlak na její stěně a v její ose. Vsunutím měřicí jehly do osy komory došlo k zániku vzdušného jádra a destabilizaci spreje, jehož úhel se zúžil.

Práce je doplněna o vyhodnocení zkušeností s provozem modelu trysky a návrhy na jeho možné konstrukční změny a zlepšení.

Práce přináší vhled do problematiky rozprašování kapalin a měření charakteristik proudění. Zprovoznění modelu se stalo základem pro další práci, kdy budou testovány rozdílné geometrie komory a tangenciálních vstupů včetně jejich rozměrových modifikací. Cílem je pochopit vliv těchto modifikací na vnitřní proudění a kvalitu spreje, k čemuž jsou v práci popsány měřicí metody, které tomuto porozumění mají pomoci.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HORVAY, M. – LEUCKEL, W. *LDA-Measurements of Liquid Swirl Flow in Converging Swirl Chambers with Tangential Inlets*. Laser Anemometry in Fluid Mechanics, s.487-503, 1984
- [2] HORVAY, M. – LEUCKEL, W. *Experimental and Theoretical Investigation of Swirl Nozzles for Pressure-Jet Atomization*. Ger. Chem. Eng. 9, 1986
- [3] LIU, C. H. – VAFIDIS, C. – WHITELAW, J. H. *Flow in the coolant passages of an Internal combustion engine cylinder head*. Experimental in Fluids, s50–54, 1990
- [4] DE KEUKELAERE, H. *The Internal Flow in a Swirl Atomizer Nozzle*, MSc Dissertation, Dept. Mech. Eng., UMIST, 1995
- [5] COOPER, D. – CHINN, J. J. – YULE, A. J. *Experimental Measuremnts and Computational Predictions of the Internal Flow Field in a Pressure Swirl Atomizer*, 15th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 1999
- [6] HASSAN, Y. A. – DOMINGUEZ-ONTIVEROS, E. E. *Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques* Nuclear Engineering and Design, s3080–3085, 2008
- [7] SAPIK, M. *Návrh a konstrukce průhledné trysky pro vizualizaci a měření vnitřního proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [8] JEDELSKÝ, J. – MALÝ, M. – SAPIK, M. – JANÁČKOVÁ, L. – JÍCHA, M. – SLÁMA, J. – WIGLEY, G. *Internal Flow Characteristics in Scaled Pressure-Swirl Atomizer*, EPJ Web of Conferences, 2017
- [9] JEDELSKÝ, J. – MALÝ, M. – SAPIK, M. – JANÁČKOVÁ, L. – SLÁMA, J. – WIGLEY, G. *Internal Flow and Air Core Dynamics in Simplex and Spill-return Pressure-Swirl Atomizers*, 28th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2017
- [10] MALÝ, M. *Kvalita rozprašování paliv u malých tlakových vířivých trysek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [11] LEFEBVRE, A. H. – MCDONELL, V. G. *Atomization and Sprays, Second edition*. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017
- [12] CHINN, J. J. *The Internal Flow Physics of Swirl Atomizer Nozzles*. UMIST, Thermo-Fluids Division, Department of Mechanical Engineering, 1996
- [13] LEFEBVRE, A. H. – BALLAL, D. R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, Third edition*. CRC Press, 2017. ISBN 9781420086058
- [14] ASHGRIZ, N. *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications*, Springer, 2011, ISBN 978-1-4419-7264-4

- [15] RIZK, N. K. – LEFEBVRE, A. H. *Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers*, Journal of Propulsion and Power, 1985
- [16] RIZK, N. K. – LEFEBVRE, A. H. *Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers*, International Journal of Turbo and Jet Engines, 1987
- [17] *LDA and PDA Reference Manual*. Dantec Dynamics, 1st edition, 2011
- [18] KOPECKÝ, V. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Brno: Tribun EU, 2008, 205 s. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-357-3
- [19] LDA [online], poslední aktualizace 5.2.2001 [vid 28.1.2018], Ing. Pavel Zubík, Ph.D. Dostupné z <http://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm>
- [20] JANALÍK, J. Měření turbulentních fluktuací rychlosti [online]. Ostrava 2006 [vid. 2016-04-28]. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf>
- [21] MADSEN, J. *Computational and Experimental Study of Sprays from the Breakup of Water Sheets*, Ph.D. thesis, The Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, 2006
- [22] ŠOB, F. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. ISBN 80-214-2037-5.
- [23] CHINN, J. J. *The Numerics of the Swirl Atomizer*, 22th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2008
- [24] DURDINA, L. Measurement of Spray Characteristics Using Optical Measurement Methods. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [25] *Labware Chemical Resistance Table* [online], poslední aktualizace 22.6.2012 [vid 18.8.2017], ThermoFisher Scientific. Dostupné z <https://www.thermofisher.com/>
- [26] *Chemical Resistance of Plexiglas* [online], poslední aktualizace 20.3.2015 [vid 18.8.2017], Altuglas International. Dostupné z www.altuglasint.com
- [27] BUDWIG, R. *Refractive index matching methods for liquid flow investigations*, Experiments in Fluids 17, 1994
- [28] HSIEH, K. T. – RAJAMANI, R. K. *Mathematical Model of the Hydrocyclone Based on Physics of Fluid Flow*. Salt Lake City: University of Utah, Comminution Center, 1991
- [29] *Refractive indexes of common Liquids, Solid and Gases* [online], poslední aktualizace 30.9.2016 [vid 1.10.2016], The Engineering Tool Box. Dostupné z http://www.engineeringtoolbox.com/refractive-index-d_1264.html
- [30] MUGUERCIA, I. – CAZANAS, B. – LI, W. – EBADIAN, M. A. *Measurement of the secondary velocity vector in a 180° U-Tube using a 2-D LDA systém with a refractive index matching technice*. Laser Anemometry Advances and Applications, SPIE, 1993

- [31] *Solubility Graph* [online], poslední aktualizace 18.2.2010 [vid 19.9.2017], Vancleave's Science Fun. Dostupné z <http://scienceprojectideasforkids.com/2010/solubility-graph/>
- [32] *Bezpečnostní list: 1,2,3,4-Tetrahydronaphtalene* [online], poslední aktualizace 12.10.2015 [vid 30.11.2016], SigmaAldrich. Dostupné z <https://www.sigmaaldrich.com/safety-center.html>
- [33] *Bezpečnostní list: Terpenine* [online], poslední aktualizace 20.3.2014 [vid 30.11.2016], SigmaAldrich. Dostupné z <https://www.sigmaaldrich.com/safety-center.html>
- [34] *Přechodové teploty polymerů* [online], poslední aktualizace 30.9.2014 [vid 20.9.2017], Polymery. Dostupné z <https://publi.cz/books/180/06.html>
- [35] SCHOLZ, P. – REUTER, I. – HEITMANN, D. *PIV measurements of the flow through an intake port using refractive index matching*, 16th International Symposium on the Application of Laser techniques to Fluid Mechanics, 2012
- [36] HENDRIKS, F. – AVIRAM, A. *Use of zinciodide solutions in flow research*. Review of Scientific Instruments 53, 1982
- [37] HAAM, S. J. – BRODKEY, R. S. – FORT, I. – KLABOCH, L. – PLACNIK, M. – VANECEK, V. *Laser Doppler anemometry measurements in an index of refraction matched column in the presence of dispersed beads part I*, International Journal of Multiphase Flows 1401–1418, 2000
- [38] NEMES, A. – JALAL, S. – VAN DE MOORTELE, T. – COLETTI, F. *Oscillatory flow in human airway model: MRV and PIV*, 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, 2016
- [39] STAHL, M. – GNIRß, M. – DAMASCHKE, N. – TROPEA, C. *Laser Doppler Measurements of Nozzle Flow and Optical Characterisation of the Generated Spray*, 18th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2002
- [40] PURWAR, H. – IDLAHCEN, S. – MÉÈS, L. – ROZÉ, C. – BLAISOT, J. B. – MICHARD, M. – MALIGNE, D. *Simultaneous High-Speed Internal and External Flow measurements for a High-Pressure Diesel Nozzle*, 27th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2016
- [41] MAMAIIKIN, D. – KNORSCH, T. – ROGLER, P. – LEICK, P. – WENSING, M. *High Speed Shadowgraphy of Transparent Nozzles as an Evaluation Tool for In-Nozzle Cavitation Behavior of GDI Injectors*, 28th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2017
- [42] BARDET, P. M. – FU, C. D. – SICKEL C. E. – WEICHSELBAUM N. A. *Refractive index and solubility control of paracyclic solutions*, 17th International Symposium on the Application of Laser techniques to Fluid Mechanics, 2014
- [43] HOPKINS, L. M. – KELLY, J. T. – WEXLER, A. S. – PRASAD, A. K. *Particle image velocimetry measurements in complex geometries*, Experiments in Fluids 29, 2000

- [44] SONG, M. S. – CHOI, H. Y. – SEONG, J. H. – KIM, E. S. *Matching-index-of-refraction of transparent 3D printing models for flow visualization*, Nuclear Engineering and Design, s185–191, 2015
- [45] STOOT, C. – BECKER, S. – CONDIE, K. – DURST, F. – McELITGOT, D. *A large-scale matched index of refraction flow facility for LDA studies around complex geometries*, Experiments in Fluids 30, 2001
- [46] RASHID, M. S. F. M. – HAMID, A. H. A. – SHENG, O. C. – GHAFAR, Z. A. *Effect of Inlet Slot Number on the Spray Cone Angle and Discharge Coefficient of Swirl Atomizer*. Procedia Engineering 41. 2012
- [47] YARLAGADDA, A. P. – YOGANATHAN, A. P. *Experimental studies of model porous media fluid dynamics*, Experiments in Fluids 8, 1989
- [48] HASSAN, Y. A. – AMINI, N. *An investigation of matched index of refraction technique and its application in optical measurements of fluid flow*, Experiments in Fluids 53, 2012
- [49] SHU, W. R. *A viscosity correlation for mixtures of heavy oil, bitumen, and petroleum fractions*, Old SPE j. 24, s277–282, 1984
- [50] LEDERER, E. L. *Viscosity of mixtures with and without diluents*, Proceeding of World Petroleum Congress, London, vol.2, s526–528, 1933
- [51] SONG, M. S. – CHOI, H. Y. – SEONG, J. H. – KIM, S. K. *Matching index of refraction of transparent 3D printing models for flow visualization*, Nuclear Engineering and Design 284, s185–191, 2015
- [52] BENEDETTI-PICHLER, A. A. *Identification of Materials: Via Physical Properties, Chemical Tests and Microscopy*, Springer, s492, 2012
- [53] HALDER, M. – DASH, S. – SOM, S. *Initiation of air core in a simplex nozzle and the effects of operating and geometrical parameters on its shape and size.*, Experimental thermal and fluid science 26, s871–878, 2002
- [54] JEDELSKÝ, J. – MALÝ, M. – JANÁČKOVÁ, L. – JÍCHA, M. *Effect of Geometric Factors on Spray Characteristics and Stability for Small Spray-Return Pressure-Swirl Atomizer*, 27th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2016
- [55] ZHANG, Z. *LDA Application Methods: Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics*, Springer, 2010, ISBN 978-3-642-13513-2
- [56] ALBRECHT, H. E. – BORYS, M. – DAMASCHKE, N. – TROPEA, C. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*, Springer, 2003, ISBN 978-3-642-08739-4
- [57] LOWE, M. L. – KUTT, P. H. *Refraction through cylindrical tubes*, Experiments in Fluids 13, 1992
- [58] HANSEN, K. G. *A Computational and Experimental Study of the Internal Flow in a Scaled Pressure-Swirl Atomizer*, MSc Dissertation, Aalborg Universitet Esbjerg, 2001

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Veličina
A	$[m^2]$	Plocha povrchu
A_i	$[m^2]$	Součet plochy průřezu vstupních otvorů
A_0	$[m^2]$	Plocha průřezu výstupního otvoru
b_p	$[m]$	Šířka vstupního otvoru
C_d	$[-]$	Výtokový součinitel
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost světla
D_i	$[m]$	Hydraulický průměr vstupních portů
D_p	$[m]$	Průměr kapky
D_t	$[m]$	Průměr vířivé komory
d_0	$[m]$	Průměr výstupního otvoru
dn	$[m]$	Výška elementárního hranolu
d_p	$[m]$	Průměr částice
E_A	$[J]$	Povrchová energie
$\mathbf{e}_i$	$[-]$	Vektor ve směru paprsku zdroje
$\mathbf{e}_s$	$[-]$	Vektor ve směru rozptýleného paprsku
F	$[N]$	Síla působící na povrch kapaliny
FN	$[-]$	Průtokový faktor
Fr	$[-]$	Freudeho číslo
f_i	$[Hz]$	Frekvence paprsku světelného zdroje
f_s	$[Hz]$	Frekvence paprsku na přijímači
g	$[m \cdot s^{-2}]$	Gravitační zrychlení
h_p	$[m]$	Výška vstupního otvoru
k	$[-]$	Koeficient koexistence
l	$[m]$	Délka povrchu
m_{exp}	$[-]$	Exponent nenewtonského toku
m_k	$[kg]$	Hmotnost kapaliny
$\dot{m}_k, \dot{m}$	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní tok kapaliny
m_m	$[-]$	Měřítko zvětšení rozměrů
n, n_1, n_2	$[-]$	Index lomu světla prostředí
n_{21}	$[-]$	Relativní index lomu
n_{port}	$[-]$	Počet vstupních otvorů
Oh	$[-]$	Ohnesorgovo číslo
p	$[Pa]$	Tlak
Q	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Průtok kapaliny
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
R_t	$[m]$	Poloměr vířivé komory
R_{tn}	$[m]$	Poloměr komory ve zvolené pozici
r_0	$[m]$	Poloměr výtokového otvoru
r_{0ac}	$[m]$	Poloměr vzdušného jádra
S_0	$[-]$	Vírové číslo
s_1	$[m]$	Vzdálenost, které dosáhne paprsek bez lomu
s_2	$[m]$	Vzdálenost, které dosáhne lomený paprsek
t	$[s]$	Časový úsek

v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost částice
v_s	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost světla v daném prostředí
u_0	$[m \cdot s^{-1}]$	Axiální rychlost kapaliny
u_p	$[m \cdot s^{-1}]$	Relativní rychlost kapky
V_k	$[m^3]$	Objem kapaliny
We	$[-]$	Weberovo číslo
w_i	$[m \cdot s^{-1}]$	Tangenciální rychlost kapaliny
α	$[^\circ]$	Úhel dopadu
α'	$[^\circ]$	Úhel odrazu
α_μ	$[-]$	Empirická konstanta (0,28)
α_1	$[^\circ]$	Původní úhel mezi osou a paprskem laseru
α_2	$[^\circ]$	Nový úhel mezi osou a paprskem laseru
β	$[^\circ]$	Úhel lomu
Δp_k	$[Pa]$	Pracovní přetlak kapaliny
Δp_{ekv}	$[Pa]$	Ekvivalentní tlak
θ	$[^\circ]$	Polovina úhlu kuželu spreje
λ_i	$[-]$	Vlnová délka
μ_k, μ	$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$	Dynamická viskozita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ_k, ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota kapaliny
σ	$[kg \cdot s^{-2}]$	Povrchové napětí
τ	$[Pa]$	Tečné napětí
τ_0	$[Pa]$	Mez tekutosti při nulovém gradientu
φ	$[^\circ]$	Směrový úhel

Zkratka

Význam

CFD	Computational Fluid Dynamics – Počítačová dynamika tekutin
LDA	Laserová Dopplerovská anemometrie
MIR	Metoda pro sjednocení indexů lomu
PDA	Fázová Dopplerovská anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry
PMMA	Plexisklo
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Seznam příloh

Příloha 1	Kusovník testovací sestavy
Příloha 2	Výkres testovací sestavy

Příloha 1

Tab. P1: Kusovník testovací sestavy

Položka	Označení	Délka Kusů
<u>Konstrukční materiály</u>		
AlutecKK profil	45×45-164545	27 m
	45×90-164590	1 m
Pozinkovaný C-profil	8/25/40/25/8	10 m
Fixační úhelník	43×43-304343	40
Stavěcí patky	408012L	4
Šroub s T-hlavou	200820T	120
Matice s přírubou	210810	120
Šrouby DIN 7984	200820	50
Matice s pružinou M8	210802	50
Hliníková deska	350×350×20	1
Manuální lineární mikroposuv		1
Dantec Traverse System		1
Drobný spotřební materiál (šrouby, podložky, aj.)		odhad
<u>Kapalinový oběh</u>		
Čerpadlo Lowara PSA 70/A		1
Průtokoměr Sitrans F C MASS 2100		1
Vysílač Sitrans F C MASSFLO MASS 6000		1
PVC potrubí DN70		1 m
PVC redukce DN100/DN70		1
Kovová objímka s gumou 72–78		1
Sběrná nádoba		1
Kulový kohout G 1/4"		4
Mosazné armatury G 1/4" – G 1/2" (vsuvky, T-kusy, aj.)		odhad
Nerezová opletená hadice s koncovkami G 1/4" – G 1/2"		3×1,5 m
Hadice Semperit TU 40, vnit. prům. 10 mm, tl. stěn 3,5 mm		4 m
Drobný spotřební materiál (těsnění, spony, aj.)		odhad
<u>Laboratorní přístroje</u>		
Snímač tlaku DMP 331I 0 – 400 mbar		2
Photron FASTCAM SA-Z	2100K-M-16GB	1
Flow Explorer 2D Mini LDA	9065X041	1
LED osvětlení se stojanem		1