



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VYHODNOCENÍ ÚHLU KUŽELU SPREJE U
ROZPRAŠOVACÍCH TRYSEK S VYUŽITÍM OBRAZOVÝCH
METOD**

ESTIMATION OF SPRAY CONE ANGLE FROM ATOMIZATION NOZZLES USING IMAGE BASED METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Štafa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2016

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá možnými způsoby stanovení tzv. úhlu kuželu spreje (ÚKS). Cílem práce bylo provést literární rešerši v oblasti atomizace, struktury spreje a metod pro vyhodnocení ÚKS. Další část práce popisuje způsoby úpravy datových snímků a počítačové programy, pomocí kterých byla zpracována navazující experimentální část.

Experimentální část popisuje jednotlivé kroky úpravy pořízených snímků spreje v různých pracovních režimech. Zhotovené snímky byly zpracovány pomocí speciálních počítačových programů. Přednosti a nedostatky jednotlivých programů s důrazem na jejich funkčnost pro měření ÚKS jsou v práci taktéž zahrnuty. Výsledky práce obsahují údaje o průběhu hodnot ÚKS v závislosti na vzdálenosti od ústí trysky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sprej, úhel kuželu spreje, úprava snímků, obrazové metody, tryska

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to estimate spray cone angle. The theoretical part deals with basic principles of atomization, spray structure and spray processing methods including image based methods.

The experimental part describes steps of spray cone angle estimation in several specially designed softwares. Advantages and disadvantages of these programmes were evaluated with great emphasis on functionality. Results contain data of spray cone angle values depending on distance between atomization nozzle and spray stream level.

KEY WORDS

Spray, spray cone angle, image processing, image based methods, nozzle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTAFKA, O. *Vyhodnocení úhlu kuželu spreje u rozprašovacích trysek s využitím obrazových metod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Vyhodnocení úhlu spreje u rozprašovacích trysek s využitím obrazových metod* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jana Jedelského, Ph.D, a že jsem uvedl všechny literární prameny, odbornou literaturu a webové stránky, ze kterých jsem při psaní práce čerpal.

V Brně dne 27. května 2016

.....
Ondřej Štafa

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za ochotu, trpělivost a cenné rady při odborných konzultacích. Dále bych rád poděkoval Ladě Janáčkové, Bc. Milanu Malému a Bc. Petru Caletkovi za odbornou podporu při zpracování obrazových snímků.

V neposlední řadě děkuji mé rodině za neustálou podporu při studiu vysoké školy.

Práce vznikla za přispění projektu GA15-09040S, který 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.”

OBSAH

Úvod	15
1 Základy atomizace	16
1.1 Mechanismus.....	16
1.2 Způsoby atomizace	17
1.3 Faktory ovlivňující rozpad kapaliny	17
1.3.1 Viskozita kapaliny.....	17
1.3.2 Povrchové napětí	18
1.3.3 Hustota	18
2 Charakteristika spreje.....	19
2.1 Tvar spreje	19
2.2 Nárazová síla.....	20
2.3 Velikost kapek.....	20
3 Úhel kužele spreje.....	21
4 Metody stanovení úhlu kužele spreje	22
4.1 Optické metody.....	22
4.1.1 Princip tvorby obrazu spreje	22
4.1.2 Obrazové metody.....	23
4.1.3 Laserové metody.....	23
4.3 Metoda mechanických paternátorů	27
5 Představení Počítačových programů pro zpracování obrazu.....	28
5.1 Image J	28
5.2 Interfer.....	28
5.3 PCO picture viewer	28
6 Segmentace obrazu	29
6.1 Detekce hran.....	29
6.2 Detekce oblastí.....	29
6.2.1 Metoda spojování a rozdělování oblastí.....	29
6.2.2 Metoda narůstání oblastí.....	30
6.2.3 Metoda postupného zaplavování	30
7 Posouzení jednotlivých programů.....	31
7.1 Image J	31
7.2 Interfer.....	32
7.3 PCO Picture Viewer	33
7.4 Srovnání.....	34

8	Vyhodnocení úhlu kuželu spreje	35
8.1	Zpracování v programu Image j	37
8.1.1	Pracovní tlak 15 bar	37
8.1.2	Pracovní tlak 5 bar	43
8.2	Zpracování snímků v programu interfer	48
8.2.1	Detekce rozhraní.....	48
8.2.2	Výsledky měření v pracovním režimu 15 bar	50
8.2.3	Výsledky měření pro pracovní tlak 5 bar	52
8.4	Zpracování snímků v programu PCO	54
8.4.1	Detekce rozhraní.....	55
8.4.2	Výsledky měření v pracovním režimu 15 bar	56
8.4.3	Výsledky měření pro pracovní tlak 5 bar	58
8.5	Závislost úks na vzdálenosti od trysky	60
9	Závěrečné hodnocení	61
	Seznam použitých zdrojů.....	63
	Seznam použitých symbolů a zkratek.....	66
	Seznam obrázků.....	67
	Seznam grafů.....	67
	Seznam tabulek.....	68

ÚVOD

Sprej je definován jako směs rozptýlených kapalných částic velmi malého rozměru. V průběhu let se pozornost inženýrů a vědeckých pracovníků zaměřila zejména na vodní spreje. Ty vzniknou, pokud je paprsek rozstříkovaného média rozptýlen na větší množství jemných kapek do plynné atmosféry. Rozstříkování probíhá ve většině případů za pomoci trysky.

Faktorů ovlivňujících rozprašování existuje celá řada. Patří mezi ně například viskozita, která je směrodatná pro strukturu jednotlivých kapek. Výsledný tvar kapky záleží na povrchovém napětí. Nesmíme však zapomínat také na vliv prostředí, ve kterém se kapalina nachází.

Úhel kužele spreje patří mezi základní parametry při procesu rozprašování kapaliny. Rozpoznat hranici mezi sprejem a okolím je klíčový krok k určení úhlu rozptylu spreje. V současné době existuje několik metod, zejména optických, pro stanovení tohoto úhlu užitím vhodného počítačového programu a vhodně sestaveného měřicího zařízení.

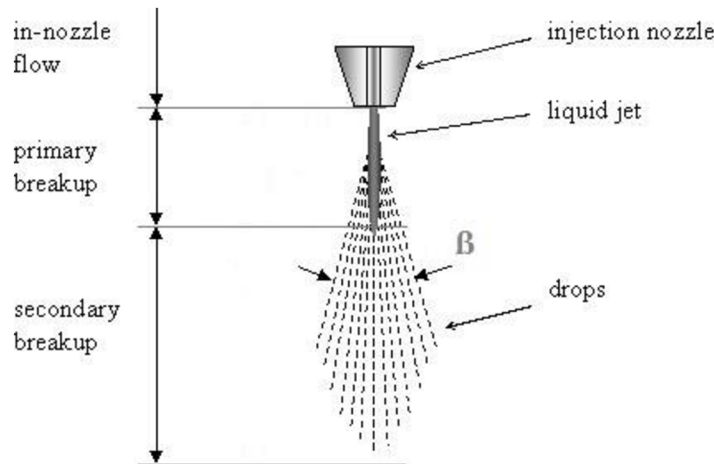
Mezi praktické cíle práce patří analýza série digitálních snímků spreje pořízených ve dvou různých pracovních režimech. Tyto snímky jsou posléze upraveny ve třech speciálních počítačových programech s důrazem na vyhodnocení úhlu kužele spreje. Konkrétně se jedná o programy *Image J*, *PCO Picture Viewer Software* a *Interferer*.

V průmyslové praxi je zevrubná znalost procesu rozpadu kapaliny zcela zásadní. Znalost rozpadu proudícího média je nezbytná například pro efektivní spalování paliva v leteckých motorech či pro postřikové systémy užívané v zemědělství. Jelikož se nacházíme v době, kdy jsou neustále inovace čím dál více vyžadovány, je nárůst zájmu o problematiku rozprašování logický.

1 ZÁKLADY ATOMIZACE

1.1 MECHANISMUS

K rozpadu kapaliny je nutné zařízení, které dokáže změnit charakter proudícího média. Takovou schopnost má tryska, která je zpravidla umístěna na výstupu zařízení. V okamžiku, kdy je narušen celistvý tvar kapaliny procházející tryskou, nastává její primární rozpad. Tato počáteční fáze je charakterizována tvorbou kapek převážně větších rozměrů. Sekundární rozpad nastane bezprostředně po primárním. Větší kapky se postupně rozpadají na menší kapičky [2].



Obr. 1.1 - Primární a sekundární rozpad tekutiny [5]

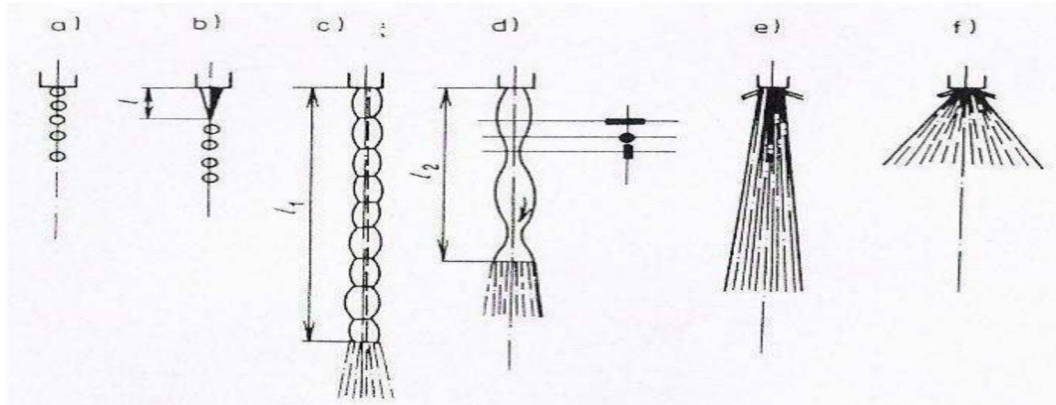
Přeměnu proudící kapaliny na sprej lze také popsat jako překonávání vlivu povrchového napětí a viskózních sil. Tato přeměna je hnána vnitřními silami kapaliny a silami působícími zvenčí. Díky stálému účinku těchto sil se mění i tvar. Jednotlivé kapky proudícího média se snaží dosáhnout takového tvaru, který by umožnil zachovat minimální plochu, a tedy minimální povrchovou energii. Tyto podmínky splňuje koule.



Obr. 1.2 - Ukázka reálného rozprašování [6]

1.2 ZPŮSOBY ATOMIZACE

Existuje hned několik možností, jak lze kapaliny rozprašovat. Tvar toku kapaliny se mění v závislosti na rychlosti proudění, hustotě kapaliny, tlaku kapaliny v atomizéru, ale také díky geometrii daného rozprašovače.



Obr. 1.3 - Ilustrace způsobů atomizace kapaliny [7]

V případě, že médium vystupuje ze zařízení pod nízkým tlakem a malou rychlostí, chová se kapalina jako na Obr. 1.3a. Ve formě malých kapek vystupuje i v případě Obr. 1.3b pouze s tím rozdílem, že výstup probíhá v části l , kde se tvoří stejnorodý paprsek. Velké množství velkých kapek má za důsledek vznik nestability toku. Je to právě nestabilita, která řídí další rozpad média do menších kapiček. Symetrická nestabilita na povrchu toku na Obr. 1.3c způsobí prodloužení délky paprsku o l_1 . Pokud se zvětší rychlost proudící kapaliny na výstupu, dojde působením nesymetrické nestability ke zmenšení délky l_2 . Tento okamžik je zachycen na Obr. 1.3d. Paprsek se přestává tvořit, dochází-li ke zvyšování výstupní rychlosti média. V takovém případě dojde k rozpadu, jakmile proud mine výstup rozprašovače Obr. 1.3e. Postupné zvyšování rychlosti zvýší úhel kužele spreje Obr. 1.3f. [3]

1.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ROZPAD KAPALINY

1.3.1 VISKOZITA KAPALINY

Označuje se tak vnitřní pnutí kapaliny. Jestliže tekutina proudí, jsou jednotlivé molekuly (elementární objemy, vrstvy) v relativním pohybu. Na rozhraní těchto vrstev dochází ke tření a vzniku smykových napětí. Viskozita je závislá na stavových veličinách (tlak, teplota, hustota). Pokud bychom chtěli porovnat vliv tlaku a teploty, pak je vliv tlaku méně zásadní. S rostoucí teplotou naopak nabývají mezimolekulární síly menších hodnot, a proto viskozita u kapalin s rostoucí teplotou klesá. V praxi to znamená, že se těžká uhlovodíková paliva před atomizací zahřejí. Obecně také platí, že čím vyšší viskozita je, tím větší kapky se tvoří [8].

Vazkost měříme pomocí viskozimetru. Lze měřit viskozitu dynamickou μ , která stanovuje vztah mezi napětím a rychlostí kapaliny. Je ovlivněna teplotou, ale s tlakem se nemění. Existuje také kinematická viskozita ν , což je uměle vytvořená veličina udávající podíl mezi dynamickou viskozitou μ a hustotou kapaliny ρ .

1.3.2 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

Vzniká účinkem kohézních, mezimolekulárních sil v povrchové vrstvě kapaliny. Povrch tekutiny se snaží dosáhnout takového stavu, ve kterém by byla jeho energie co nejmenší. Vliv povrchového napětí na rozpad kapaliny je nepřehlédnutelný [2]. Lze si jej představit jako sílu, která brání vzniku nové povrchové plochy. Čím menší je povrch kapaliny ve vztahu k objemu, tím více se tvar kapiček blíží kouli. Toto napětí se snižuje, pokud teplota daného prostředí roste.

Číselně a rozměrově lze povrchové napětí vyjádřit pomocí kapilární konstanty σ , často označované i jako hustota povrchové energie. Výpočet této veličiny můžeme provést dvěma způsoby. Povrchové napětí tak můžeme chápat jako sílu působící kolmo k jednotce délce povrchu kapaliny (1.1) [9].

$$\sigma = \frac{dF}{dl} \quad [N \cdot m^{-1}] \quad (1.1)$$

Povrchové napětí také značně závisí na druhu kapaliny. Pro příklad jsou v Tab. 1.1 uvedeny hodnoty napětí vybraných kapalin při teplotě 20° C důležitých v průmyslu.

Tab. 1.1 - Hodnoty povrchového napětí pro vybrané kapaliny [10]

Název	Voda	Petrolej	Líh	Terpentýn	Metanol	Nafta
$\sigma [10^{-3} \cdot N \cdot m^{-1}]$	72,25	27	22,3	27,8	22,7	30

1.3.3 HUSTOTA

Hustota látky ρ je dána podílem její elementární hmotnosti dm a elementárního objemu dV .

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (1.2)$$

Většina kapalin svoji hustotu s rostoucí teplotou snižuje. Díky rostoucí teplotě se zvětšuje objem. Existují ale případy, kdy se kapalina takto nechová. Nejznámějším příkladem je anomálie vody v rozmezí o až 3,98 °C.

S menší hustotou je kapalina schopna v rozprašovači dosáhnout vyšší kinetické energie, čímž je umožněna tvorba menších kapek. Hustota je tak spolu s povrchovým napětím hlavními činiteli měnící velikostní rozložení kapek ve spreji [3].

Tab. 1.2 - Hustota vybraných kapalin při 20° C [11]

Název	Voda	Petrolej	Líh	Terpentýn	Metanol	Nafta
$\rho [kg \cdot m^{-3}]$	998	810	789	855	792	835

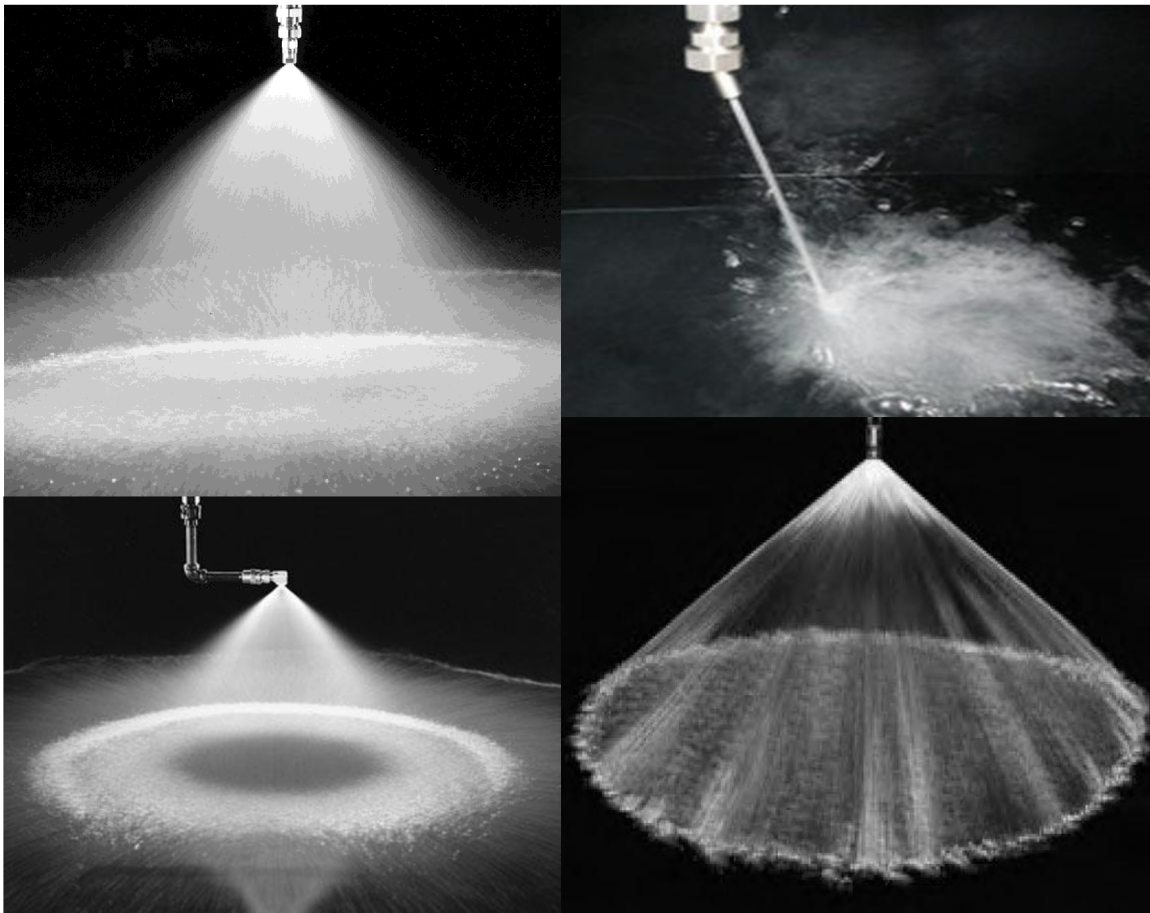
2 CHARATERISTIKA SPREJE

Kromě samotného popisu úhlu kužele spreje ve zvláštní kapitole se tato práce zabývá i dalšími charakteristikami spreje, které tvoří nutný teoretický základ pro pochopení problematiky.

2.1 TVAR SPREJE

V závislosti na konstrukci dané trysky může sprej vycházející z trysky nabývat různých tvarů rozstříku. Záleží také na konkrétní aplikaci (vstřikování paliva, zvlhčování, zemědělské postřikování apod.), pro kterou je tryska navrhována tak, aby byla co nejučinnější. Samotný detailní popis konstrukce jednotlivých typů trysek však není předmětem této práce.

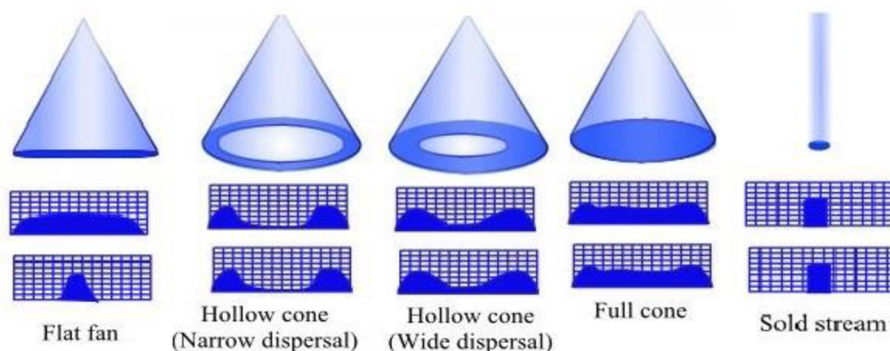
Sprej může nabývat tvaru dutého kužele. Nárazová plocha tvoří prstenec. Takový tvar je formován, jakmile vířením médium vystupuje z trysky. Tímto způsobem lze vytvořit i velmi jemný rozstřík - mlžení, jehož rozstříkované kapky jsou velmi malých rozměrů. Oválná plocha nárazu vzniká v případě tvaru plného kužele, u kterého se také vyskytují největší kapky. Stejnoseměrný proud proudící tryskou za pomoci vnitřních stabilizátorů skrze vyvrtaný otvor vysílá plný proud, díky němuž na nárazové ploše vznikne bodový obrazec. Sprej může nabývat i tvaru úzkého vějíře, který je vhodný pro rozstříkování pomocí hlavice osazené několika tryskami. Jednotlivé tvary spreje se tak nepřekrývají [2].



Obr. 2.1 - Různé typy rozstříku: plný kužel (vpravo dole), dutý kužel (vlevo dole), plný proud (vpravo nahoře), oválný rozstřík (vlevo nahoře) [37]

2.2 NÁRAZOVÁ SÍLA

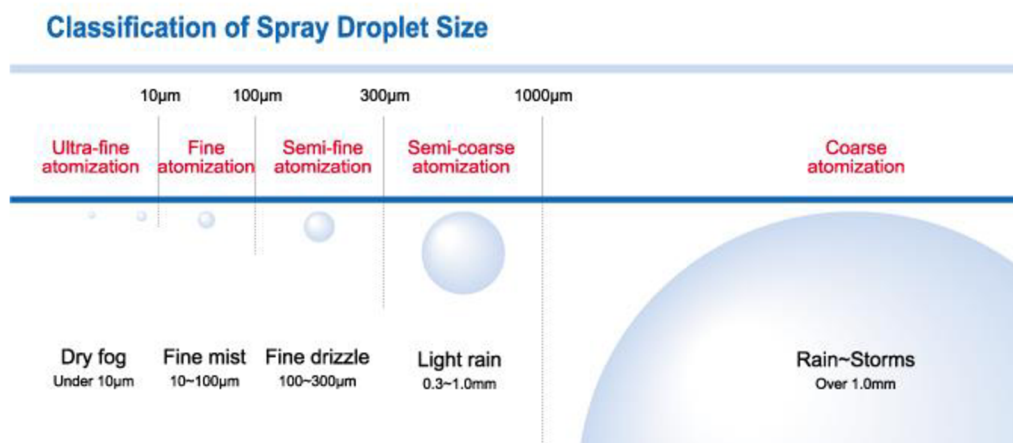
Lze ji vyjádřit několika způsoby. Nejčastěji se vysvětluje jako účinek síly působící na nárazovou plochu m^2 . Vysoké hodnoty jsou požadovány pro trysky tvořící plný a vějířovitý paprsek. S narůstající vzdáleností mezi dopadovou plochou a tryskou se nárazová síla zmenšuje [12]. Tato veličina je také závislá na objemovém průtoku, typu trysky a tlaku kapaliny.



Obr. 2.2 - Rozložení nárazové síly dle tvaru spreje [36]

2.3 VELIKOST KAPEK

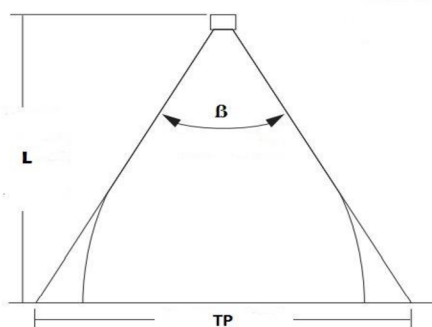
Koncepce trysky je navržena tak, aby byl vycházející sprej pro danou aplikaci co nejúčinnější. Údaje o velikosti kapek, zejména průměr, povrch a objem, jsou tak pro průmyslovou praxi velmi důležité. Každá tryska tvoří kapky o různých velikostech. Při vysokém tlaku se tvoří menší kapky, logicky pak při nízkém tlaku vznikají kapky větších velikostí. Rozsah rozměrů je ale i tak velmi široký. Pro usnadnění se uplatňuje označení rozložení velikosti kapek [12].



Obr. 2.3 - Rozdělení kapek dle velikosti v µm [13]

3 ÚHEL KUŽELE SPREJE

Tato charakteristika spreje pomáhá určit přibližné pokrytí pro užitečný rozstřík tekutiny. Konstrukce trysky má na úhel kuželu zásadní vliv (viz *kap. 2.1*). Úhel kužele spreje¹ je dále závislý na vzdálenosti trysky od nárazové plochy, na provozním tlaku, průtoku, ale také na viskozitě kapaliny. Obecně také platí, že se zvyšující se teplotou kapaliny se ÚKS zvyšuje [2]. S úhlem kuželu spreje je pevně spojeno jeho teoretické pokrytí, což je oblast, kterou je sprej schopen zasáhnout při ideálních podmínkách. Kapaliny s vyšší hodnotou viskozity tvoří malý ÚKS, čímž je dosaženo i menšího teoretického pokrytí. Naopak menší viskozita kapaliny má za následek větší úhel rozstříku a tedy i většího pokrytí sprejem. Teoretické pokrytí zároveň klesá se stále nižší hodnotou povrchového napětí a provozního tlaku. [12]



Obr. 3.1 - Teoretické pokrytí spreje [14]

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty teoretického pokrytí v závislosti na ÚKS, které byly vypočteny za předpokladu, že úhel β se na celé vzdálenosti L během rozprašování nemění. To lze aplikovat pouze pro použití v prozovech s malými vzdálenostmi mezi tryskou a nárazovou plochou.

Tab. 3.1 - Teoretické pokrytí rozstříku při různých vzdálenostech od nárazové plochy a úhlu rozstříku [12]

Úhel rozstříku β	Vzdálenost L [cm]					
	5	10	20	30	40	50
	Teoretické pokrytí TP [cm]					
5°	0.4	0.9	1.8	2.6	3.5	4.4
10°	0.9	1.8	3.5	5.3	7	8.8
20°	1.8	3.5	7.1	10.6	14.1	17.6
40°	3.6	7.3	14.6	21.8	33.1	41.4
60°	5.8	11.6	23.1	34.6	46.2	57.7
80°	8.4	16.8	33.6	50.4	67.1	83.9

¹ dále jen ÚKS

4 METODY STANOVENÍ ÚHLU KUŽELE SPREJE

Určit hranici mezi samotným sprejem a okolím je jedním hlavních problémů při určování úhlu rozstříku. Lze využít optických či mechanických metod.

4.1 OPTICKÉ METODY

4.1.1 PRINCIP TVORBY OBRAZU SPREJE

4.1.1.1 LOM SVĚTLA

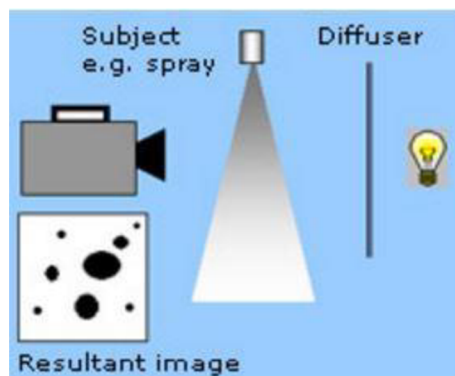
Metoda využívající lom světla se nazývá refraktometrie. Je založena na principu zjišťování indexu lomu, resp. metoda sleduje, kolik světla se při průchodu jednotlivými částicemi proudícího média odrazí. Vlastnosti při lomu světla měříme pomocí refraktometru.

Pro měření ÚKS sledujeme odraz jednotlivých kapiček. Mohou nastat různé případy lomu světla. Světelný paprsek se buďto na rozhraní okolního prostředí a média úplně odrazí, což způsobí, že zpět do okolního prostředí již žádný světelný paprsek neprojde. Druhou možností je, že paprsek projde rozhraním. Při lomu světla na kapce kapaliny dochází ke změně indexu lomu, tedy ke změně rychlosti, směru šíření a vlnové délky světelného paprsku. Při použití bílého světelného paprsku dochází k rozložení světla na jednotlivé barevné složky.^[42]

4.1.1.2 STÍNOGRAFIE

Jedná se o velmi efektivní metodu, pokud je naším záměrem sledovat tvar proudu. Mezi světelným zdrojem a snímacím zařízením je sledovaný objekt, v našem případě sprej. Směr vyslaného světelného paprsku je kolmý na osu trysky, ze které sprej proudí. Sprej blokuje úplnému průchodu světla, což se projeví na zhotoveném snímku vytvořením tmavých oblastí.^[41]

Stínografií³ byly pořízeny snímky, které jsou dále zkoumány v experimentální práci této práce. Je to metoda, které lze aplikovat v analýze proudu, balistice či svařování.



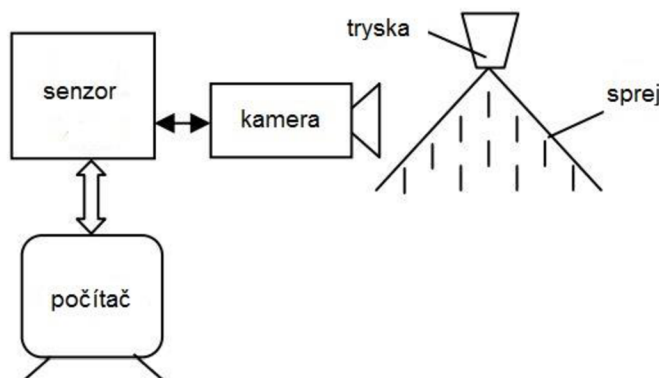
Obr. 4.1 - Zjednodušené sestavení snímacího zařízení při použití stínografie [41]

² disperze světla

³ shadowgraphy

4.1.2 OBRAZOVÉ METODY

Obrazové metody umožňují podrobný výzkum chování sprejů. Tyto metody vyžadují nejprve pořízení obrazových snímků. K tomu je nutné mít funkční sestavu vhodných technologií. Na Obr. 4.2 je schematicky zobrazena zjednodušená sestava takového systému. Skládá se výstupní trysky, kde výstupním otvorem proudí tekutina za vzniku spreje [17]. Sprej je snímán vysokorychlostní kamerou. Pomocí grafického senzoru (CCD apod.) jsou datové snímky dopraveny do počítače, kde probíhá konečný proces vyhodnocení dat užitím vhodného softwaru [15].



Obr. 4.2 – Schéma sestavy pro pořízení obrazových snímků

Typ snímku pro vyhodnocení může být různý. V softwaru lze většinou pracovat s binárními snímky, jejichž výhodou je snadnější manipulace. Nevýhoda binárních snímků spočívá v nižší přesnosti. Dalším typem je černobílý snímek, který je přesnější než binární, ale na druhou stranu je výpočtově náročnější. Oba typy lze kombinovat a využít jejich hlavních výhod. Rozhraní spreje můžeme sledovat rozdělením obrazu na barevné složky a poté zkoumat ty nejvýraznější složky, u kterých vyniknou požadované vlastnosti⁴. [17]

Proces zpracování doprovází několik uživatelských operací. Především se jedná o odstranění přebytečného šumu, prahování, dojde také ke zvýraznění viditelných hran a k celkové restauraci obrazu. [17]

4.1.3 LASEROVÉ METODY

Laserové metody lze rozdělit na základě několika kritérií:

- dle oblasti měření – bodové, plošné
- dle základních funkčních principů
- dle typu výstupních dat

Rozdělení metod podle oblasti měření je pro zkoumání úhlu kužele nejzásadnější, a proto se tato práce tímto rozdělením podrobněji zabývá.

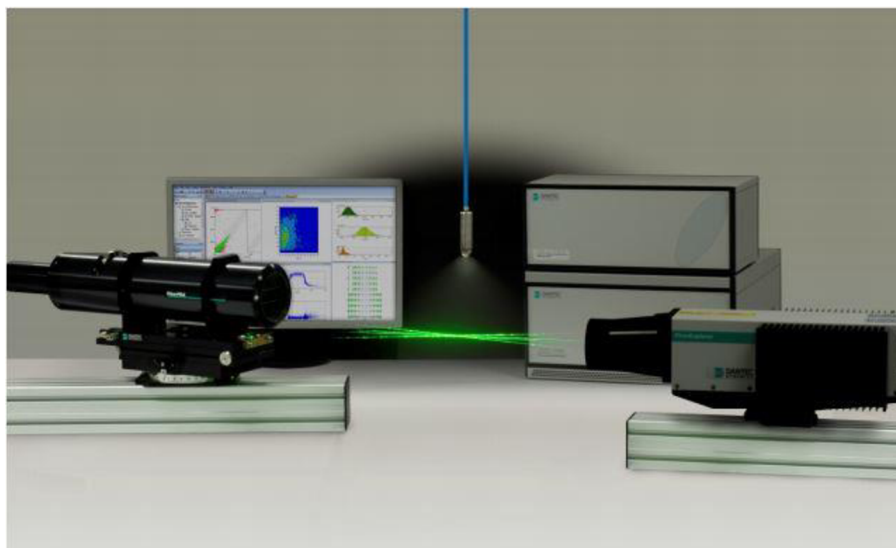
⁴ např. dostatečná barevná rozlišitelnost, kontrast apod.

4.2.1.1 BODOVÉ METODY

Příslušné vlastnosti jsou měřeny v jednom místě proudění. Nevýhoda bodových metod spočívá v neschopnosti měřit přítomnost částic v určité oblasti toku. Na druhou stranu, výhodou lze spatřit v nízké časové náročnosti zpracování. Objem dat je v porovnání s plošnými či prostorovými metodami podstatně menší.

Mezi nejčastěji používané bodové techniky řadíme zejména laserovou Dopplerovskou anemometrii a fázovou Dopplerovskou anemometrii⁵. Jak název napovídá, obě metody pracují díky Dopplerovu jevu, který popisuje změnu frekvence a vlnové délky v závislosti na vysílaném signálu [18]. Princip *LDA* je založen na rozptylu interferenčního obrazce v místě křížení dvou koherentních paprsků.

Pro určení úhlu kužele spreje je vhodnější metoda *PDA* a to díky možnosti měření více parametrů současně. Lze tak provést posouzení úhlu rozstříku daleko efektivněji a přesněji. [19]



Obr. 4.3 - Přístroj HiDense PDA od firmy Dantec Systems [19]

4.2.1.2 PLOŠNÉ METODY

Jednou z takových metod je zkratkou označovaná metoda *PLIF*, neboli *planar laser-induced fluorescence*. Pro vyhodnocení jednotlivých vlastností spreje metoda využívá elastické a fluorescenční charakteristiky světla rozptýleného kapkami.

Pokud jsou jednotlivé kapičky spreje prosvíceny laserovým paprskem, část světelné energie je pohlcena do vybuzených molekul spreje. Tato energie je poté vyzářena fluorescencí. Signál získaný fluorescencí je úměrný objemu molekul, čímž dojde ke zvýšení světelné intenzity spreje. Výhodou této metody je jednoduchá kombinace s ostatními metodami, především s integrální částicovou anemometrií (*particle image velocity*, zkr. *PIV*) [18].

Při analýze úhlu rozstříku musí laserový paprsek protínat sprej ve vodorovné rovině. Zároveň musí být laserový paprsek a osa snímání kamery vzájemně

⁵ Zkr. PDA

kolmé. Proto je nutné, aby tato skutečnost byla při nastavení kamerového snímání spreje brána v potaz, aby nedošlo ke zkreslení dat. Při časově náročném měření také musíme zachovat konstantní hmotnostní tok [21].

Jako fotosenzor, snímající osvětlenou plochu spreje, se používá vysokorychlostní CCD kamera. Fotosenzor mapuje každý pixel obrazu. Množství světla, které dopadá na jednotlivý pixel, je pro měření důležitý ukazatel. Na jeho základě můžeme vytvořit mapovanou oblast spreje, kterou definujeme i podle dalších kritérií. Například můžeme klást požadavek, že mapovaná oblast musí obsahovat 90% objemu spreje.



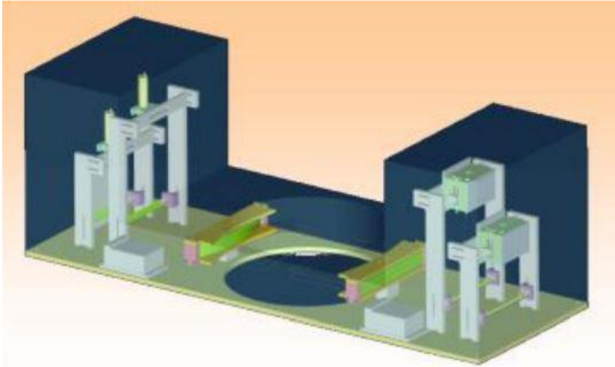
Obr. 4.4 - CCD kamera Pieper [22]

K vyhodnocení spreje lze použít i speciální kombinaci několika optických paternátorů. Tuto možnost využila například americká firma *En' Urga Inc.* Pro níže uvedený produkt lze vyšetřovanou vodorovnou rovinu spreje upravit nastavitelnou vzdáleností trysky od roviny snímání.

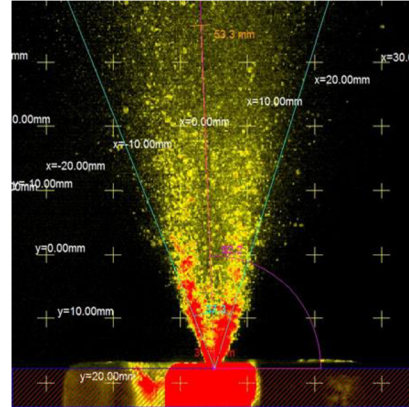


Obr. 4.5 - Vícenásobný optický paternátor [23]

Stejná firma, využívající *PLIF* metodu, v roce 1999 sestrojila přístroj (*Obr. 14*) přímo pro měření úhlu kužele v různých vrstvách. Skládá se ze dvou nezávislých laserových vysílačů, jejichž paprsek prostoupí sprejem ve dvou navzájem odsazených vrstvách. Opakováním měření po jednotlivých vrstvách v pravidelném odsazení je obraz spreje kompletní. [25]



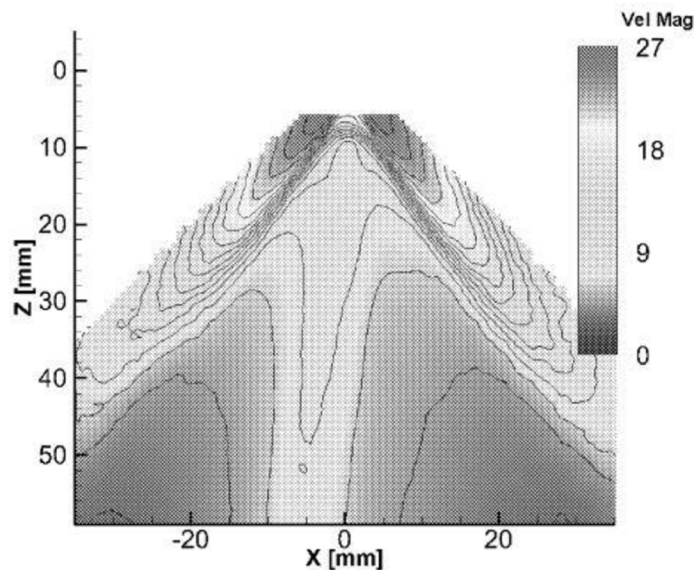
Obr. 4.6 - Vnitřní konstrukce optického paternátoru [23]



Obr. 4.7 - Výstupní data [23]

Příkladem další hojně využívané optické zobrazovací metody je integrální částicová anemometrie. *PIV* se primárně používá pro zjištění rychlostních parametrů ve zvoleném řezu proudícího média. Výstupem je mapa vektorového pole, tedy rychlostní profil kapaliny v reálném čase. Vektory rychlostí obsahují informace o směru, nikoliv pouze velikosti, čehož lze využít při měření geometrie spreje [25]. Tyto vektory jsou získány měřením posunu obrazu částic mezi dvěma světelnými pulsy [27].

Rychlost jednotlivých kapiček je závislá na typu trysky. Při použití trysek s plným kuželem platí, že největší rychlost je na okraji spreje (viz *Obr. 4.8*). Ze snímku rychlostního pole nás zajímají oblasti s největší velikostí rychlosti.



Obr. 4.8 - Rychlostní profil získaný metodou PIV [15]

4.2.1.3 SHRNUTÍ

Tab. 4.1 - Shrnutí optických metod

<i>Metoda</i>	<i>Výhody</i>		<i>Nevýhody</i>		<i>Příklad uplatnění</i>	<i>Možný způsob určení ÚKS</i>
<i>PDA</i>	rychlé zpracování, velký objem informací	bezkontaktní	citlivost na vibrace, časová náročnost	vysoká pořizovací cena	vstříkování paliva	rozložení objemu kapek
<i>LDA</i>	není třeba kalibrace		průhlednost sledované tekutiny		měření proudu v potrubí	rozložení počtu kapek
<i>PLIF</i>	přesnost		průhlednost sledované aparatury		vícefázové látky	kombinace optických paternátorů
<i>PIV</i>			temné prostředí		diagnostika turbulencí	rychlostní profil

4.3 METODA MECHANICKÝCH PATERNÁTORŮ

Mechanický paternátor je zařízení, které mapuje rozstřík spreje pomocí kanálek. Funguje na principu přímého sbírání kapaliny do jednotlivých kanálek, jejichž objem je následně sledován. Z naměřených dat lze zjistit parametry spreje pomocí statistických metod, z nichž nejčastější je určení směrodatné odchylky.

Směrodatná odchylka obsahuje informace o všech bodech paternátoru a shrnuje je do procentuální tabulky, která určuje odchylku rozložení spreje. Udává se, že pro rovnoměrná rozložení spreje by neměla odchylka převýšit hodnotu 0,07. Aby byla zachována přesnost dat, je nutné provést velký počet měření, což je jednou z hlavních nevýhod mechanických paternátorů [28]. Časově náročnému zpracování navíc přispívá i náročná optimalizace konstrukce paternátoru a zpětná distribuce kapaliny do paternátoru.

Uspořádání kanálek lze provést rovnoběžně nebo radiálně. Rovnoběžné uspořádání se používá hlavně pro výzkum rozstříku několika trysek usazených na rameni. Naopak radiální paternátor je vhodný zejména pro studium rozložení spreje vysílaného z jedné trysky, čímž je i pro měření úhlu kuželu spreje vhodnější [28].

5 PŘEDSTAVENÍ POČÍTAČOVÝCH PROGRAMŮ PRO ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Mezi body zadání závěrečné práce patří seznámení se dvěma počítačovými programy pro zpracování obrazu proudění, které jsou v současnosti využívány na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, konkrétně se jedná o *PCO Picture Viewer Software* a *Interfer*. Cílem práce bylo najít i další, veřejně dostupný program, který by bylo možné použít pro určení úhlu spreje. Na základě konzultace s technickým poradcem brněnské pobočky firmy *Spraying Systems Company* byl z nepřeberného množství volně dostupných programů pro zpracování proudění vybrán také software *Image J*.

5.1 IMAGE J

Historie tohoto open-source programu se píše od roku 1997, kdy je v programovacím jazyku Java zprovozněna prvotní verze softwaru. Vývoje programu se od začátku chopil americký *Národní institut pro zdraví*⁶. V současnosti se jedná o standardní program pro analýzu a zpracování obrazových dat široce využívaný pro vědecké účely, zejména v medicíně a biologii. [24]

5.2 INTERFER

Jako grafický editor pro analýzu vizuálních dat lze využít také program *Interfer*⁷. První verze programu byla vytvořena v roce 2000 studenty Masarykovy univerzity v Brně ve spolupráci s Energetickým ústavem FSI VUT v Brně. Původním záměrem bylo vytvoření programu, který by uměl vyhodnotit interferenční proužky vznikající v důsledku prolínání dvou koherentních světelných paprsků. Postupem času se podařilo přidat i funkce umožňující prahování či filtraci obrazu. [3]

5.3 PCO PICTURE VIEWER

Jde o program primárně navržený pro úpravu obrazů pořízených optickými metodami. Umožňuje konverzi snímků do standardních formátů, pracuje však pouze s bitmapovými snímky.

⁶ National Institute of Health, Bethesda, Maryland, USA

⁷ Zahrnuje i verzi *Interfer Visual*

6 SEGMENTACE OBRAZU

Jestliže je nutné obrazový výstup rozdělit na oblasti se stejnými vlastnostmi⁸, lze využít segmentace obrazu. Provedením segmentace necháme sledovaný objekt vyniknout. Jelikož informace o obsahu digitálního snímku jsou uloženy v každém pixelu, existuje také několik přístupů, jak segmentaci provést [30; 32].

6.1 DETEKCE HRAN

Jedná se o jednu nejrozšířenějších segmentačních technik, což vychází z faktu, že hrana objektu není v mnoha případech na první pohled rozeznatelná. Určení rozhraní spreje mezi tyto případy bezpochyby patří.

Hrany jsou rozeznány pomocí lokální funkce definované na základě rozdílu jasu sousedních pixelů snímku. Detektor hran pak sleduje hodnoty derivací těchto lokálních funkcí jasu. V oblasti rozhraní se derivace okolního prostředí a objektu značně liší, a proto je v místě největšího rozdílu hodnot derivací detekována hrana. Tyto hranice však nemusí být spojité, v horším případě mohou být i falešné. [30]



Obr. 6.1 - Detekce hran černobílého snímku [31]

Zvláštním případem detekce hran je detekce okrajů proudu, která využívá zejména prahování. Práhování chápeme proces, při kterém lze měnit hodnoty vstupních barevných složek obrazu na optimální hodnoty. Hlavním úkolem je najít vhodné hodnoty prahu. [30]

6.2 DETEKCE OBLASTÍ

6.2.1 METODA SPOJOVÁNÍ A ROZDĚLOVÁNÍ OBLASTÍ

V odborných textech [32] nazývána *Split and Merge method*. Základem této metody je rozdělení snímku na několik oblastí, které do sebe vzájemně nezasahují. Požadavkem však je, aby oblasti byly spojité. Po definování jednotlivých segmentů proběhne kontrola homogenity na základě předem určených kritérií (stejný jas, barevná hloubka apod.). Výhodou této metody je vysoká odolnost proti šumu. [32]

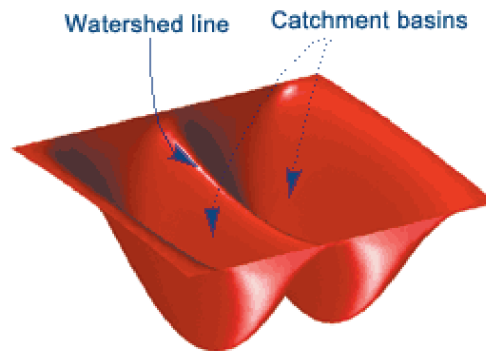
⁸ Např. hodnota jasu či barevná hloubka

6.2.2 METODA NARŮSTÁNÍ OBLASTÍ

Prvotním impulsem k nárůstu oblasti je startovací pixel, který se externě zadá do snímku. Kontrola homogenity je pak testována v okolí startovacího pixelu. Pokud pixely v okolí startovacího pixelu splňují požadavek homogenity, jsou zahrnuty do narůstající oblasti. V opačném případě nárůst oblasti končí. Volbu startovacího pixelu lze provést víckrát. Jednotlivé oblasti jsou poté spojeny do jedné, výsledné oblasti. [38]

6.2.3 METODA POSTUPNÉHO ZAPLAVOVÁNÍ

V literatuře označované jako *Watershed segmentation*. Pomocí této metody si obraz lze představit jako topografický terén, na kterém lze pozorovat různé světelné intenzity. Čím vyšší „nadmořská výška“, tím vyšší světelná intenzita. Barevná složka obrazu je zachycována v jakémsi povodí (catchment basins). Jakmile tato složka narazí na hranici jiné barevné složky, vytvoří se mezi nimi hranice (watershed line). [40]



Obr. 6.2 - Zjednodušené zobrazení metody pomocí topografického terénu [39]

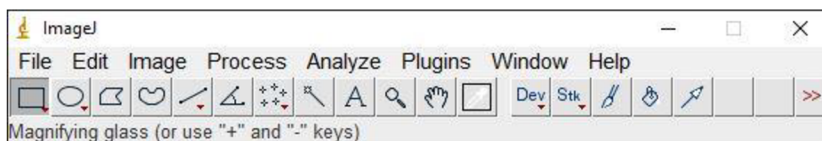
7 POSOUZENÍ JEDNOTLIVÝCH PROGRAMŮ

7.1 IMAGE J

Mezi hlavní výhody tohoto programu patří jeho jednoduchost, intuitivní ovládání a bezplatné použití. Nespornou výhodou je také fakt, že program byl vyvinut v programovacím jazyku Java, což se velmi pozitivně projevuje na rychlosti provádění jednotlivých příkazů. Díky tomu, že program *Image J* je globálně používaný program pro úpravu obrazových dat získaných ve výzkumu, bylo snadné nalézt řešení mnoha problémů, které se během četných úprav vyskytly.

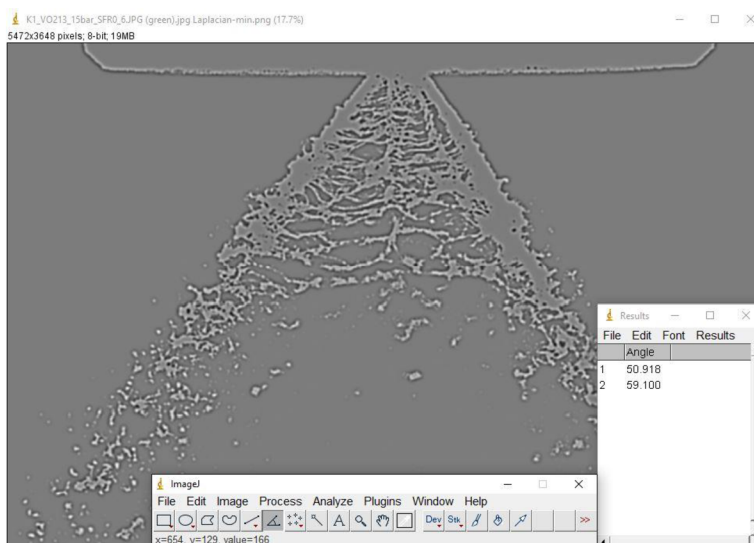
Pokud uživatel nemá potřebné znalosti o fungování programu, nabízí *Image J* obsáhlý manuál, který je psán velmi srozumitelným jazykem. Manuál neobsahuje jen návody a rady, ale také knihovnu zásuvných modulů, které program doplňují [24]. Široký výběr zásuvných modulů je bezesporu další velkou výhodou softwaru. V případě této práce byly vybrány zásuvné moduly pro prahování a detekci hran, což umožnilo efektivně měřit ÚKS.

Uživatelské prostředí je přátelské a jednoduché, což však nijak nesnižuje jeho funkčnost. Výhodou je i dialogový řádek ve spodní části hlavního okna, kde lze sledovat hodnoty os souřadného systému, počet pixelů či úhel mezi úsečkami. Dialogové okno funguje také jako místo pro komentář právě zvoleného příkazu. Nevýhodou programu je chybějící lišta aktuálně otevřených snímků, přepínání pomocí příkazu *Window* mezi snímky není přehledné.



Obr. 7.1 - Hlavní panel programu Image J

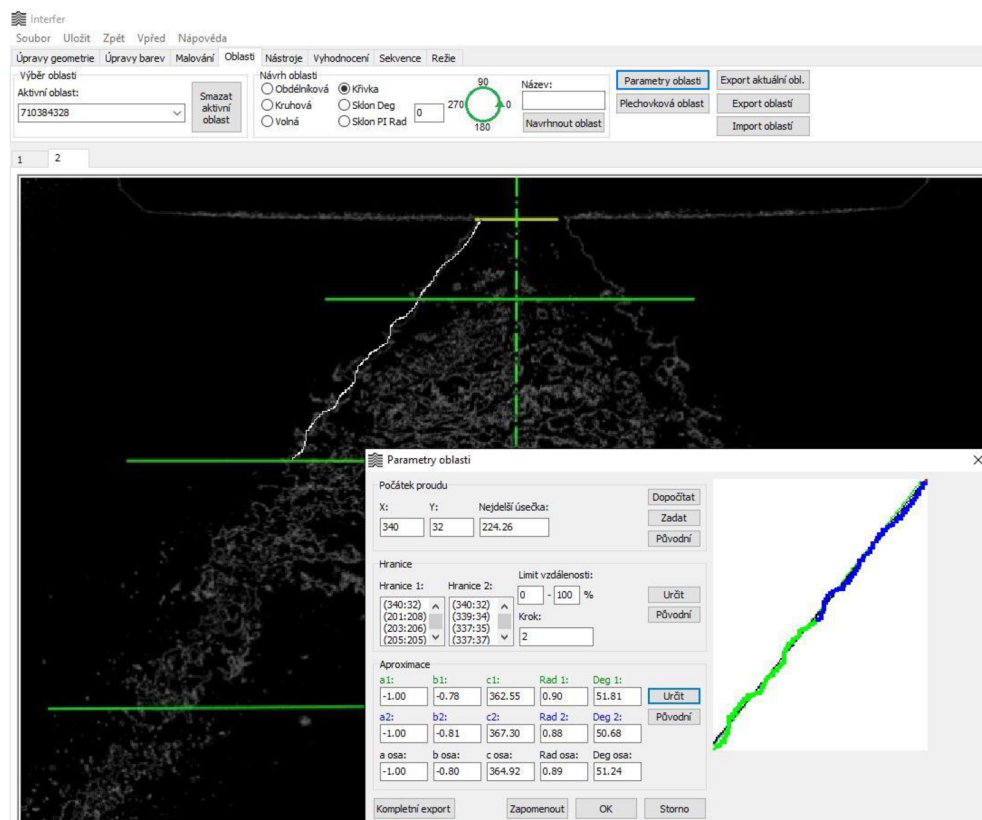
Ve spojitosti s měřením ÚKS bylo další výhodou také možnost uložení naměřených dat do textového souboru a jeho následný export do tabulky souboru MS Excel či Word. Naměřená data tak nemusela být přepisována po provedení jednoho kroku měření.



Obr. 7.2 - Uživatelské prostředí při měření úhlu kužele spreje v programu Image J

7.2 INTERFER

Významnou předností programu, napsaném v programovacím jazyce Delphi, je přesnost výsledků, což se však projevuje na časové náročnosti měření. Původní datové snímky spreje mají příliš velké rozlišení⁹, což se ukázalo jako velký problém při zpracování. Jednotlivý krok úprav (prahování, detekce apod.) pro jediný snímek trval několik desítek minut, a proto autor práce přistoupil k redukci rozlišení snímků¹⁰ tak, aby informace o proudu spreje byly co nejlépe zachovány.



Obr. 7.3 - Hlavní okno programu Interfer při měření

Ovládání programu je na první pohled jednoduché. Program obsahuje několik základních karet pro úpravu geometrie, barev či pro vytvoření sledovaných oblastí. Absence příkazového řádku, dialogového okna s případnými pokyny pro uživatele je nevýhodou Interferu. Chybí také funkční manuál nápovědy.

Nedostatkem programu se ukázala absence ručního nástroje pro měření vzdálenosti, počtu pixelů či úhlu. Jelikož bylo nutné sledovat hodnoty úhlu proudu v různých hladinách, nebylo možné využít sekvenčního měření proudu, čehož se využívá například při hodnocení proudu větrací vyústky osobního automobilu [34]. Oblast se tak musela určit ručně tažením křivky. Parametry oblasti se zobrazují až po definování sledovaného místa.

⁹ 5472 krát 3648 pixelů

¹⁰ 769 krát 419 pixelů

V průběhu úprav snímku se objevila spousta chybových hlášek z neznámých důvodů, které měly za důsledek předčasné ukončení činnosti programu. Časté výpadky zvyšovaly časovou náročnost analýzy datových snímků.

Program pracuje pouze s grafickými formáty se ztrátovou kompresí¹¹ [35].

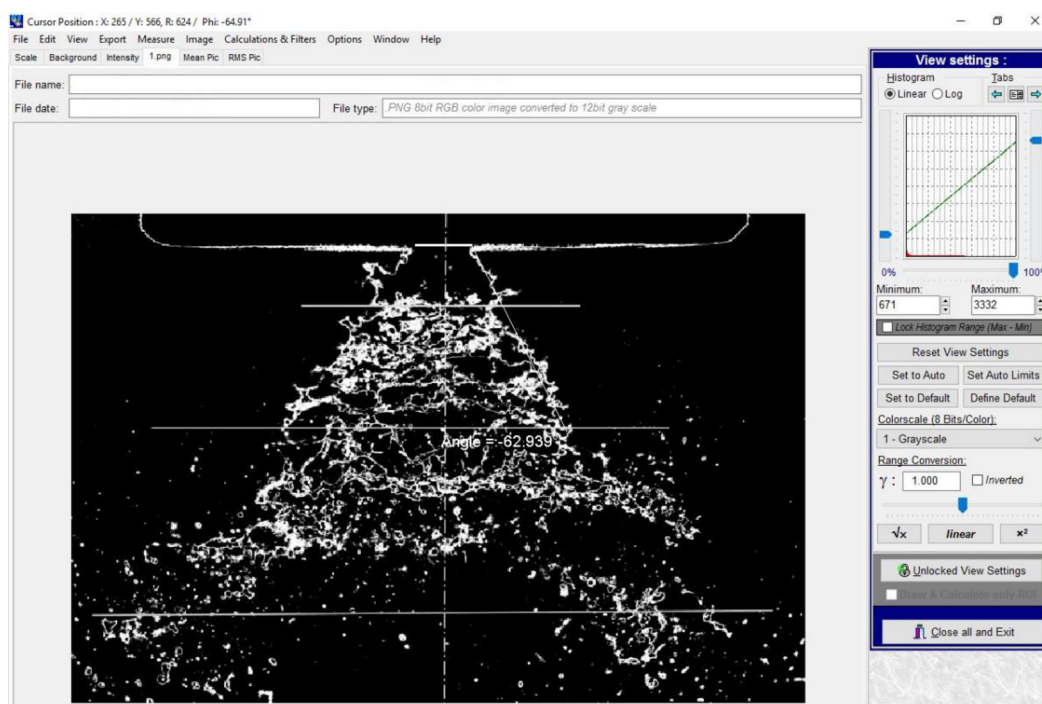
Na druhou stranu, výhodou aplikace byla možnost volby hromadného příkazu. Při zpracování dat uživatel provede nutné kroky úprav pro jeden snímek, které pak při ukládání snímku pomocí speciálního příkazu aplikuje na všechny datové snímky ve společném adresáři. Časovou náročnost měření to sice nesnižuje, ale úpravy mohou běžet automaticky tzv. „na pozadí“. Počet snímků, které bylo možné hromadně upravit, byl úměrný kvalitě rozlišení. Čím vyšší rozlišení, tím menší počet hromadně upravených snímků.

Kvalita naměřených dat závisí na poměru vzdálenosti pixelů v procentech a počtu kroků. Počet kroků je číslo, které udává vzdálenost mezi jednotlivými body proudu. Aproximací těchto bodů lze získat rozhraní spreje a okolí. Ovládním těchto parametrů je tak možné ovlivnit přesnost naměřených dat.

7.3 PCO PICTURE VIEWER

Jak již bylo řečeno, program neumí pracovat s grafickými formáty se ztrátovou kompresí, ale naopak pro práci vyžaduje pouze bezztrátové formáty¹².

Výhodou programu je možnost měnit parametry prahování v reálném čase pomocí speciálního histogramu, který je pevnou součástí hlavního okna. Díky tomu je hledání optimálních hodnot prahu jednodušší a rychlejší než u předchozích programů.



Obr. 7.4 - Uživatelské prostředí programu PCO Picture Viewer Software

¹¹ .jpg, .jpeg

¹² .png, .bmp

Pro účely této práce, tedy zejména měření ÚKS, je velmi nevhodný. I když obsahuje standartní nástroje pro úpravu snímků a škálu hranových detektorů, neumožňuje analyzovat úhel aproximací bodů jako Interfer. Je nutné použít ruční nástroj pro měření úhlu. Nedostatkem tohoto nástroje je samotný způsob měření. Uživatel musí nejprve spojit dva sledované body, tyto body poté vytvoří úsečku. Úhel je vždy měřen mezi touto úsečkou a vodorovnou osou. Není tedy možné měřit úhel mezi dvěma zvolenými úsečkami.

Z tohoto důvodu musela být metodika měření výsledného ÚKS upravena oproti předchozím programům. Tento fakt podtrhuje i nespolehlivost měřícího nástroje, jelikož snímek se během měření úhlu vytratí. Toto „zneviditelnění“ se navíc děje nepravidelně a uživatel tak nemá kontrolu nad tím, zda sleduje úhel na správném místě. Autor práce tento nedostatek ověřil na více počítačích. Pro zaručení dostatečné přesnosti výsledků bylo měření nutné několikrát opakovat.

7.4 SROVNÁNÍ

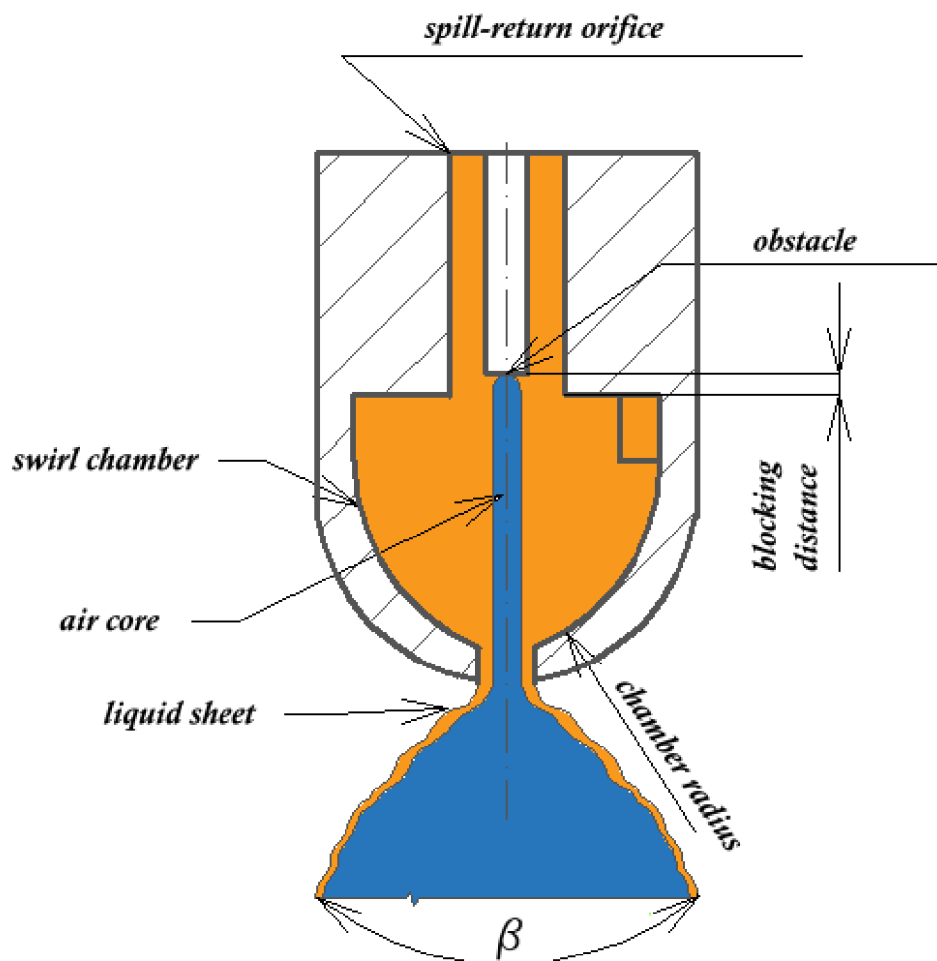
Tab. 7.1 - Srovnání jednotlivých programů

<i>Program</i>	<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>	<i>Způsob měření ÚKS</i>
<i>Image J</i>	intuitivní ovládání	lišta záložek	úhel mezi dvěma křivkami
<i>Interfer</i>	přesnost výsledku	časová náročnost	aproximace bodů
<i>PCO</i>	prahování	chybí automatický nástroj měření úhlu	úhel mezi křivkou a vodorovnou osou

8 VYHODNOCENÍ ÚHLU KUŽELU SPREJE

Datovým podkladem samotného měření jsou obrazové snímky spreje pořízené při činnosti jedné trysky, která byla podrobena zkoumání ve dvou pracovních režimech. Snímky byly zhotoveny studenty strojní fakulty VUT Brno pod vedením doc. Ing. Jana Jedelského, PhD.. Poprvé byla tryska zkoušena za tlaku 15 bar. Poté byl tlak snížen na nižší tlak 5 bar a měření se zopakovalo.

Níže přiložený náčrt zobrazuje použitou pracovní trysku. Použitý atomizér řadíme do skupiny malých vířivých trysek¹³ s obtokem [33]. Překážka byla nastavena tak, aby se vytvořil proud ve tvaru dutého kužele. Tryska byla dále zapojena v součinnosti s měřícím zařízením pracujícím na principu PDA [33].



Obr. 8.1 - Náčrt pracovní trysky [33]

¹³ small pressure-swirl atomizer

Snímky rozčleněné dle toho, za jakého tlaku byly získány, jsou zpracovány v jednotlivých programech. Ve všech programech podrobíme snímky kombinací různých segmentačních metod, prahování a barevného filtrování obrazu.

Způsob výběru sledovaného místa pro měření úhlu je následující. Sledovaný úhel je změřen na dvou polovinách v různých řezech spreje. Kolmá vzdálenost ústí trysky od sledované roviny řezu představuje vzdálenost hladiny. Určení hladiny řezu je provedeno ve třech krocích. Pomocí měřítka, jehož rozlišení je stejné jako rozlišení původních datových obrazů, jsme schopni určit velmi přesně jednotlivé vzdálenosti. Základní hladina byla stanovena v kolmé vzdálenosti 1 mm od roviny ústí trysky. Odsazení je opakováno ještě ve dvou krocích, máme tedy celkem tři hladiny.

Důvodem pro výběr více hladin řezu byla potřeba sledovat vývoj úhlu spreje v závislosti na vzdálenosti od ústí trysky. Cílem měření úhlů bylo ověřit předpoklad, že výsledný ÚKS je pro použitou trysku nejvyšší při ústí trysky, a tedy že s rostoucí vzdáleností od trysky úhel postupně klesá.

Kritéria pro výběr vzdálenosti hladin byla následující:

- Celistvost spreje v dané hladině
- Rozeznatelné rozhraní spreje
- Dostatek digitálních informací o proudu spreje v dané hladině



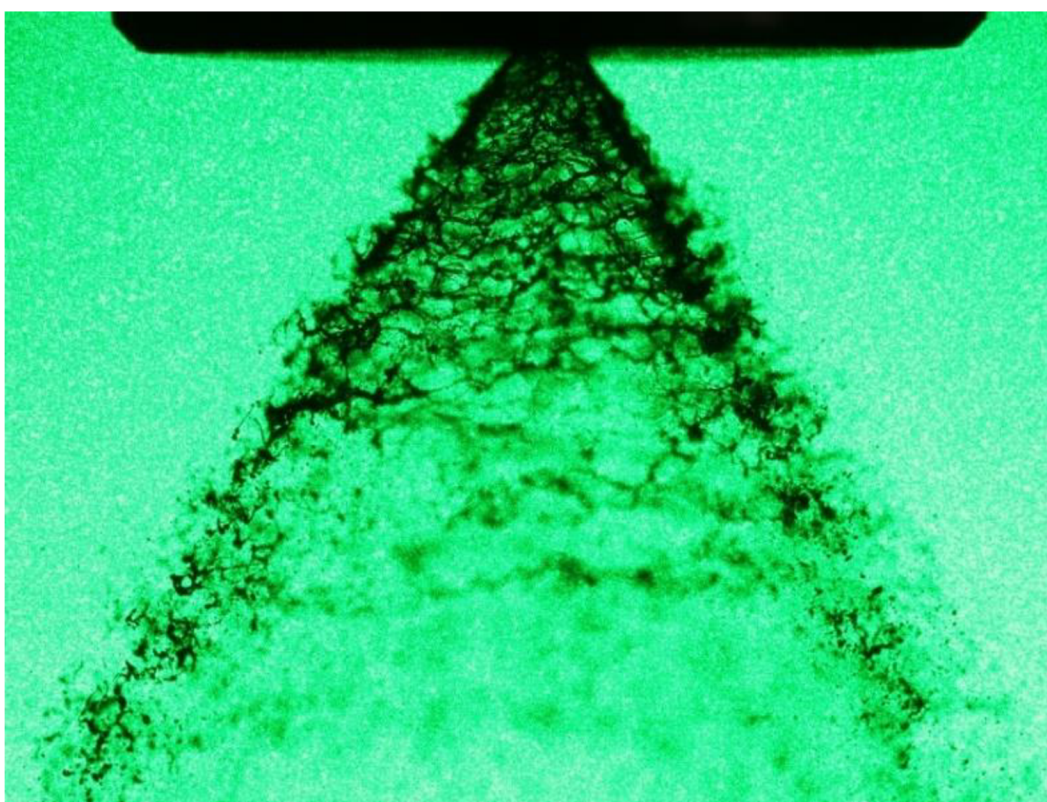
Obr. 8.2 - Schéma se vzdálenostmi jednotlivých hladin řezu kužele spreje

8.1 ZPRACOVÁNÍ V PROGRAMU IMAGE J

8.1.1 PRACOVNÍ TLAK 15 BAR

Datový soubor čítá 9 zdrojových snímků, jež jsou následně upravovány. Původně bylo fotoaparátem zhotoveno o několik desítek snímků více. Při výběru snímků vhodných pro měření ÚKS byl kladen důraz zejména na tvar spreje. Pracovní tlak je tak velký, že tvar spreje je jasně rozeznatelný i tam, kde sprej opouští sledovanou oblast.

V prvním kroku úprav podrobíme původní snímek detekci barevných kanálů RGB¹⁴, čímž vzniknou tři nové snímky barevných kanálů – červený, zelený, modrý. Pro měření úhlu je nutné nalézt takový kanál, který by umožnil hladkou detekci hran pomocí segmentačních metod.



Obr. 8.3 - Původní snímek před zpracováním při pracovním tlaku 15 bar

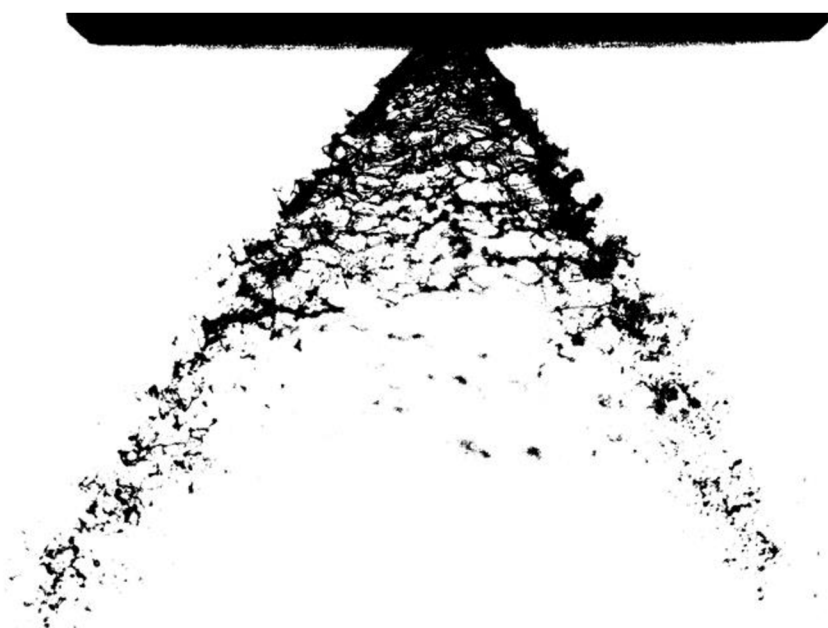
¹⁴ Způsob míchání barev

Po rozvaze byl vybrán zelený (green) kanál, u kterého je oblast spreje nejvíce kontrastní. Následně byly všechny datové snímky pořízené za pracovního tlaku 15 bar převedeny do zeleného kanálu.

Poté byly upravené snímky podrobeny prahování. *Image J* toto umožňuje díky funkci *threshol*, která byla použita na každém snímku zvlášť dle parametru vyvažování černé a bílé barevné složky. Hledání optimální hodnoty prahu určující hranici mezi sprejem a pozadím bylo hlavním problémem při zpracování obrazových dat. Parametry prahování ukazuje následující tabulka Tab. 8.1.

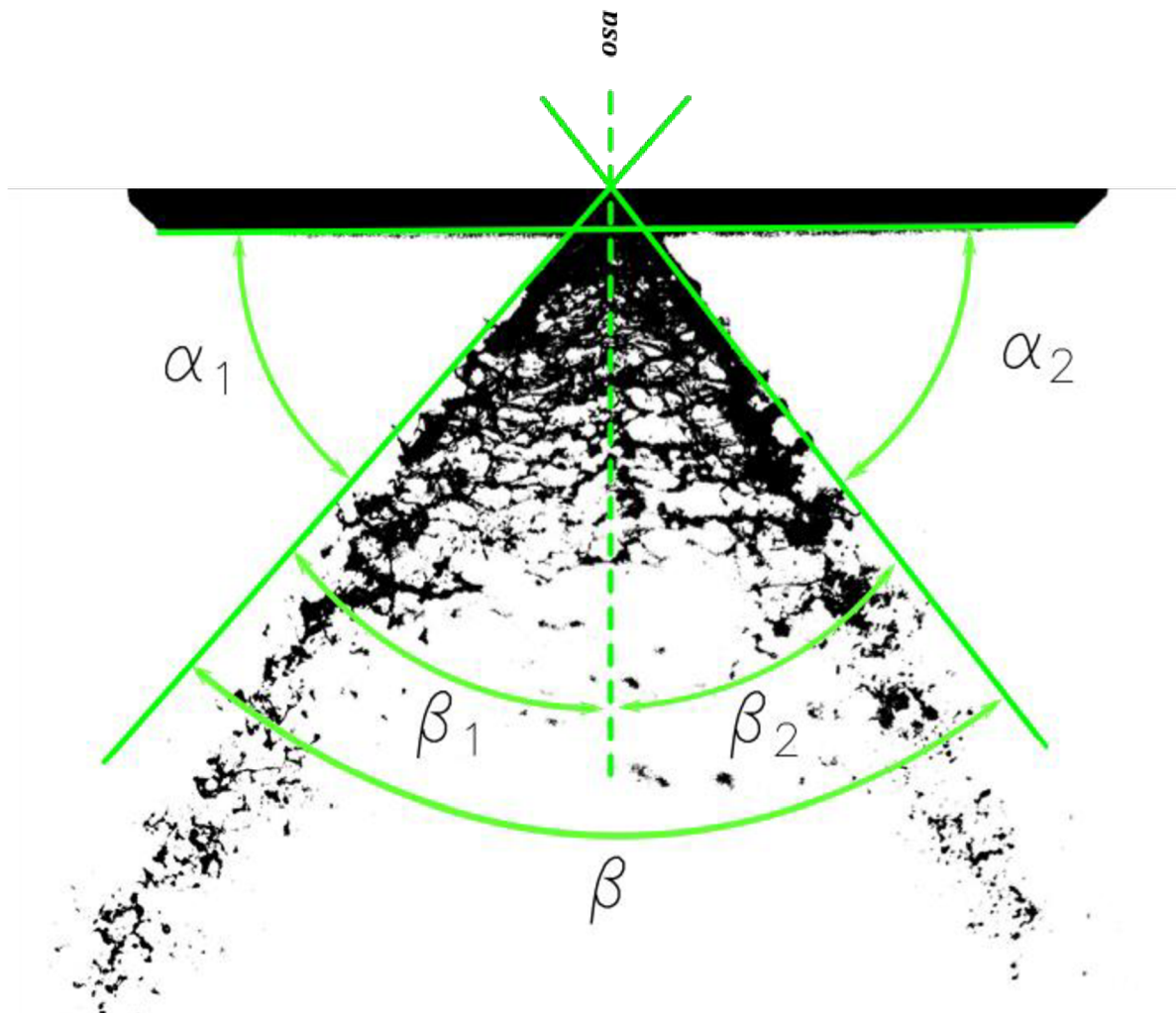
Tab. 8.1 - Použité parametry prahování snímků v zeleném kanále

Pořadí	Percentil [%]	Barevná hloubka	
		Bílá složka W [bit]	Černá složka B [bit]
1	12,66	0	127
2	13,82	1	126
3	15,71	0	134
4	15,43	1	127
5	13,59	2	136
6	14,59	0	127
7	10,51	1	145
8	12,83	0	130
9	15,08	0	135



Obr. 8.4 - Prahovaný snímek R&B: 12,66 %, W: 0, B: 127

Prahovaný obraz byl osou trysky rozdělen na dvě poloviny. I když je na první pohled původní snímek dokonale souměrný, ve skutečnosti tomu tak není. Autor práce se tedy rozhodl sledovat úhly na každé z těchto polovin a hodnoty z obou stran porovnat.



Obr. 8.5 - Sledované úhly

Úhel kužele spreje určíme z úhlů β_1 , β_2 následujícím způsobem:

$$90^\circ - \alpha_1 = \beta_1$$

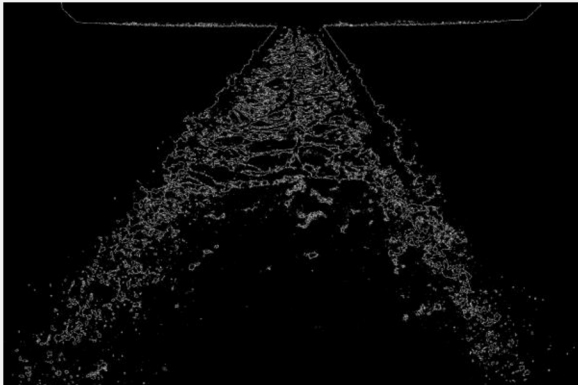
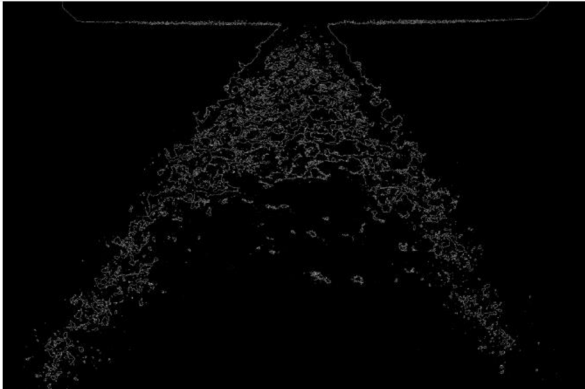
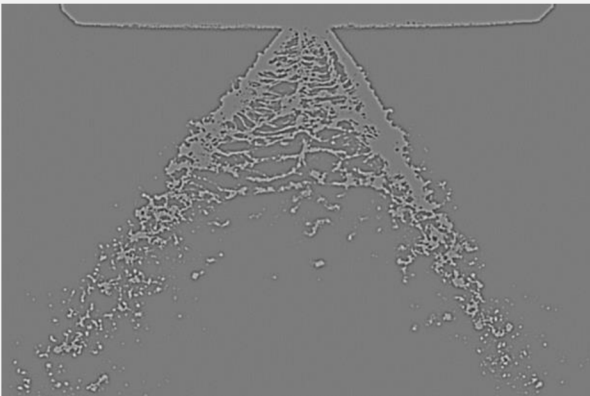
$$90^\circ - \alpha_2 = \beta_2$$

$$\beta_1 + \beta_2 = \beta$$

8.1.1.1 DETEKCE ROZHŘANÍ

Program *Image J* nemá defaultně zabudovanou funkci na detekci hran, avšak existuje několik doplňkových modulů, které rozšiřují základní funkce softwaru. Z řady zásuvných modulů byl vybrán plugin *FeatureJ*. Hlavní výhodou tohoto pluginu je možnost určit detekci hran několika metodami v jednom snímku. Mezi tyto metody, užívající stejnojmenné operátory, patří například metoda derivativní, Hessianova afinity metoda či Laplaceova metoda [29]. Podrobnější popis těchto metod však překračuje rozsah práce.

Tab. 8.2 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku podle jednotlivých metod

METODA	SNÍMEK	VHODNOST
<i>Derivativní</i>		ANO
<i>Hessianova</i>		ANO
<i>Laplaceova</i>		ANO

8.1.1.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Tab. 8.3 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 1 vzdálené 1 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 1				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	49° 47'	57° 2'	40° 13'	32° 57'	73° 10'
2	53° 13'	55° 57'	36° 47'	34° 2'	70° 49'
3	52° 1'	58° 20'	37° 58'	31° 40'	69° 38'
4	51° 47'	55° 33'	38° 13'	34° 27'	72° 39'
5	53° 54'	54° 29'	36° 6'	35° 30'	71° 36'
6	51° 54'	57° 53'	38° 5'	32° 7'	70° 12'
7	54° 14'	56° 34'	35° 45'	33° 26'	69° 11'
8	51° 47'	55° 18'	38° 12'	34° 41'	72° 54'
9	53° 35'	54° 7'	36° 25'	35° 53'	72° 18'

Tab. 8.4 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 2 vzdálené 3 mm od ústí trysky

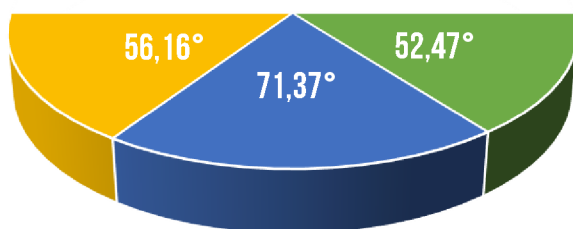
Pořadí	Hladina 2				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	50° 41'	55° 41'	39° 19'	34° 19'	73° 38'
2	52° 39'	56° 12'	37° 21'	33° 48'	71° 9'
3	50° 59'	55° 52'	39° 1'	34° 8'	73° 9'
4	51° 29'	55° 48'	38° 31'	34° 12'	72° 43'
5	51° 11'	56° 53'	38° 49'	33° 7'	71° 56'
6	50° 38'	59° 20'	39° 22'	30° 40'	70° 2'
7	53° 10'	57° 26'	36° 50'	32° 34'	69° 23'
8	52° 32'	56° 17'	37° 28'	33° 43'	71° 12'
9	52° 57'	55° 50'	37° 3'	34° 10'	71° 13'

VYHODNOCENÍ ÚHLU KUŽELU SPREJE

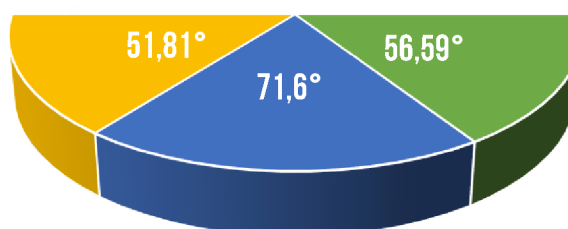
Tab. 8.5 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 2 vzdálené 6 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 3				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	54° 24'	58° 48'	35° 36'	31° 12'	66° 48'
2	55° 26'	61° 28'	34° 34'	28° 32'	63° 6'
3	55° 1'	62° 4'	34° 59'	27° 56'	62° 55'
4	54° 26'	61° 43'	35° 34'	28° 17'	63° 51'
5	54° 1'	59° 52'	35° 59'	30° 8'	66° 6'
6	55° 42'	60° 40'	34° 18'	29° 20'	63° 38'
7	55° 52'	61° 34'	34° 8'	28° 26'	62° 33'
8	56° 22'	58° 54'	33° 38'	31° 6'	64° 45'
9	57° 9'	63° 15'	32° 51'	26° 45'	59° 36'

PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 1

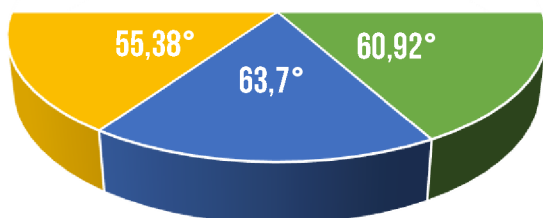


PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 2

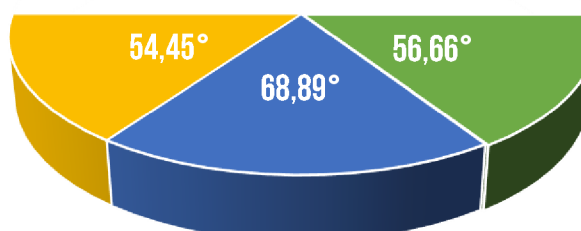


■ ALFA 2 ■ BETA ■ ALFA 1

PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 3



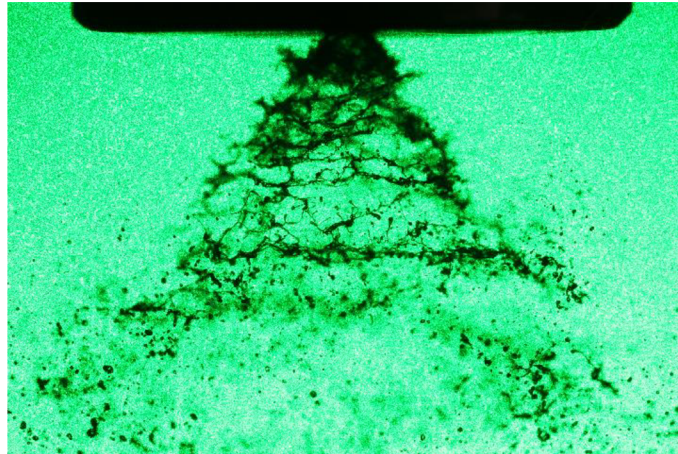
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ VŠECH TŘÍ HLADIN



Skupina grafů 8.1 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Image J, tlak 15 bar

8.1.2 PRACOVNÍ TLAK 5 BAR

Datový soubor čítá 10 zdrojových snímků. Kritéria pro výběr snímků byla nastavena stejně jako v případě pracovního tlaku 15 bar. Shoduje se prvotní fáze úpravy snímků i výběr barevného kanálu, tedy zeleného kanálu.

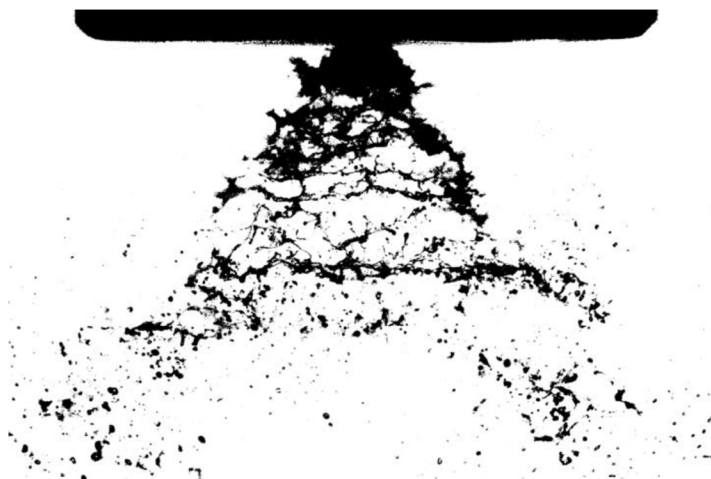


Obr. 8.6 - Původní datový snímek za pracovního tlaku 15 bar

V dalším kroku provedeme prahování snímků v zeleném kanálu. Bylo opět provedeno vyvážení bílé a černé složky dle parametrů, které jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 8.6.

Tab. 8.6 - Použité parametry prahování snímků v modrém kanále

Pořadí	Percentil [%]	Barevná hloubka	
		Bílý kanál W [bit]	Černý kanál B [bit]
1	14,53	0	153
2	17,52	1	144
3	13,3	0	143
4	13,07	0	145
5	17,53	0	142
6	17,56	0	143
7	15,42	1	141
8	16,51	0	143
9	17,63	0	141
10	15,26	0	142

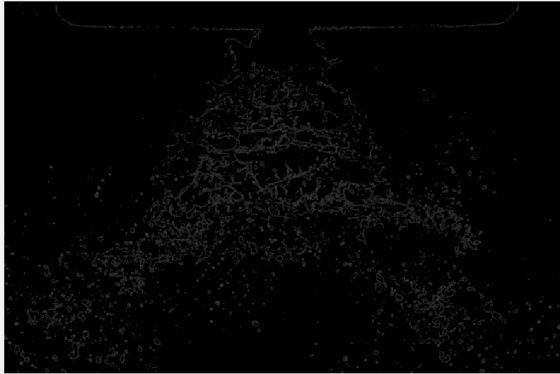
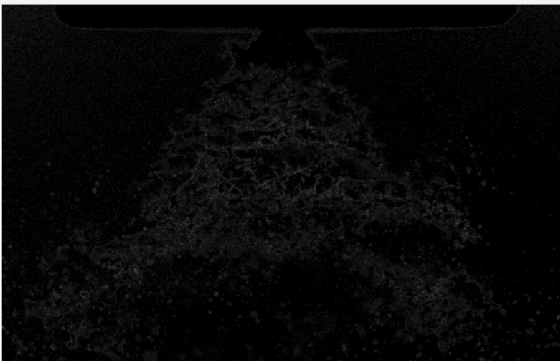


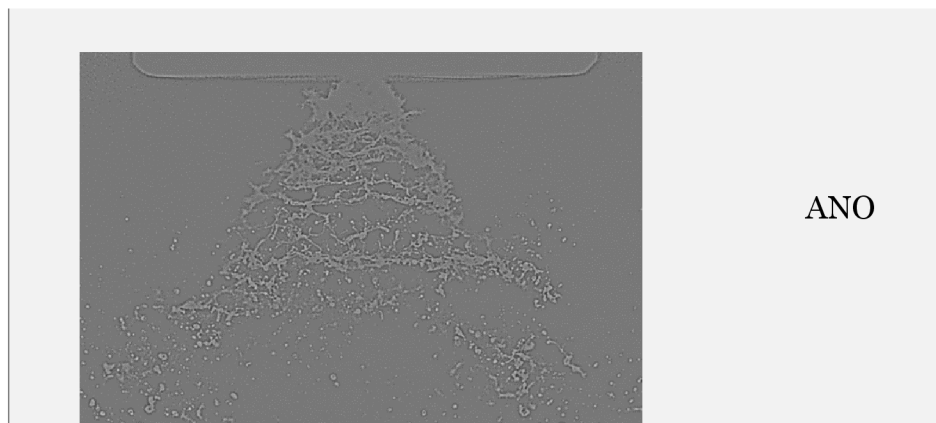
Obr. 8.7 - Prahovaný snímek R&B: 17,52 %, W: 1, B: 144

8.1.2.1 DETEKCE ROZHRAŇÍ

Prahované snímky dále podrobíme stejným metodám detekce rozhraní jako v případě pracovního tlaku 15 bar. Z těchto metod vybereme vhodnou metodu pro měření úhlů. Výpočet úhlů provedeme na základě předchozího postupu (viz Obr. 8.5). Vhodnost jednotlivých metod se oproti pracovnímu tlaku 15 bar liší, což ukazuje následující tabulka.

Tab. 8.7 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku podle jednotlivých metod

METODA	SNÍMEK	VHODNOST
<i>Derivativní</i>		NE
<i>Hessianova</i>		NE

Laplaceova

ANO

Na rozdíl od předchozího případu, kdy by bylo vhodné použít všechny tři metody pro měření ÚKS, v případě snímků pořízeného za nízkého tlaku se snímky pořízené Laplaceovou metodou jeví jako jediné vhodné pro další měření. Detekované snímky zhotovené jak Hessianovou, tak derivativní metodou jsou velice roztržité. Roztržitý tvar je způsoben hlavně nižším pracovním tlakem, jelikož jednotlivé kapky tekutiny k sobě nejsou tlačeny tak velkou silou, jako se tomu děje při vyšším pracovním tlaku 15 bar. Jednotlivé hladiny měření se shodují s předchozím případem. Opět tedy ÚKS měříme ve třech hladinách, na každé vertikální polovině jednou.

8.1.2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Tab. 8.8 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 1 vzdálené 1 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 1				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	49° 12′	52° 21′	40° 48′	37° 39′	78° 27′
2	53° 53′	54° 33′	36° 7′	35° 27′	71° 34′
3	55° 20′	48° 41′	34° 40′	41° 19′	75° 59′
4	46° 33′	41° 49′	43° 27′	48° 11′	91° 39′
5	61° 28′	62° 0′	28° 32′	27° 60′	56° 32′
6	41° 1′	54° 5′	48° 59′	35° 55′	84° 54′
7	31° 33′	43° 36′	58° 27′	46° 24′	104° 51′
8	60° 8′	60° 16′	29° 52′	29° 44′	59° 36′
9	47° 6′	45° 44′	42° 54′	44° 16′	87° 9′
10	39° 5′	50° 46′	50° 55′	39° 14′	90° 9′

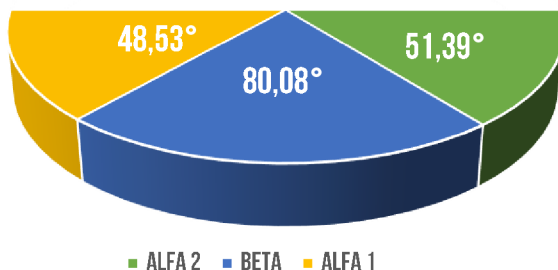
Tab. 8.9 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 2 vzdálené 3 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 2				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	53° 19′	61° 11′	36° 41′	28° 49′	65° 30′
2	52° 54′	59° 23′	37° 6′	30° 37′	67° 43′
3	47° 47′	54° 34′	42° 13′	35° 26′	77° 39′
4	60° 3′	60° 16′	29° 57′	29° 44′	59° 41′
5	57° 41′	63° 36′	32° 19′	26° 24′	58° 43′
6	56° 6′	58° 59′	33° 54′	31° 1′	64° 55′
7	56° 27′	55° 14′	33° 33′	34° 46′	68° 18′
8	52° 20′	47° 60′	37° 40′	42° 0′	79° 40′
9	49° 21′	51° 33′	40° 39′	38° 27′	79° 6′
10	53° 19′	61° 11′	36° 41′	28° 49′	65° 30′

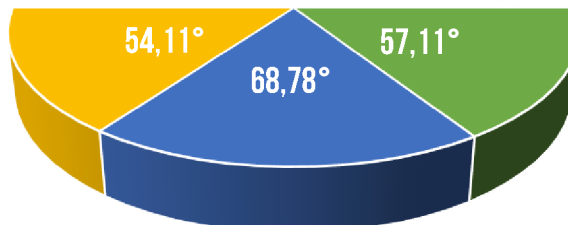
Tab. 8.10 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 3 vzdálené 6 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 3				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	57° 5'	57° 1'	32° 55'	32° 59'	65° 54'
2	58° 45'	62° 56'	31° 15'	27° 4'	58° 19'
3	63° 35'	58° 24'	26° 25'	31° 36'	58° 1'
4	62° 37'	60° 40'	27° 23'	29° 20'	56° 43'
5	57° 44'	65° 39'	32° 16'	24° 21'	56° 37'
6	58° 28'	65° 14'	31° 32'	24° 46'	56° 18'
7	52° 49'	61° 18'	37° 11'	28° 42'	65° 53'
8	67° 7'	58° 58'	22° 53'	31° 2'	53° 55'
9	58° 18'	56° 15'	31° 42'	33° 45'	65° 27'
10	59° 15'	63° 34'	30° 45'	26° 26'	57° 11'

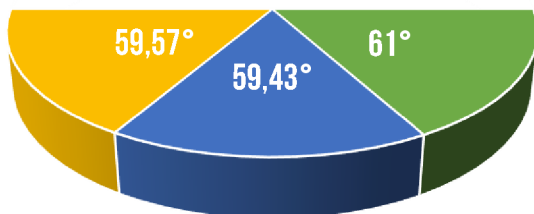
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 1



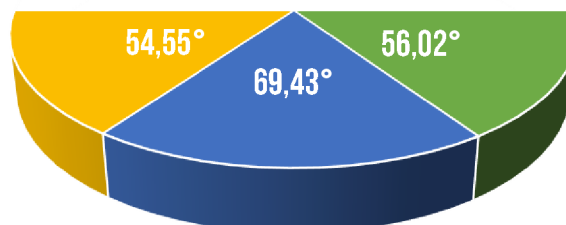
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 2



PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 3



PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ ZE VŠECH TŘÍ HLADIN



Skupina grafů 8.2 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Image J, tlak 5 bar

8.2 ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ V PROGRAMU INTERFER

Pro všechny původní snímky v obou pracovních režimech bylo použito jednotné nastavení optimálních prahových hodnot.

Prahované snímky byly pro svoji nesouměrnost rozděleny na dvě poloviny dle Obr. 8.5. Metodika výpočtu úhlu zůstala stejná:

$$90^\circ - \alpha_1 = \beta_1$$

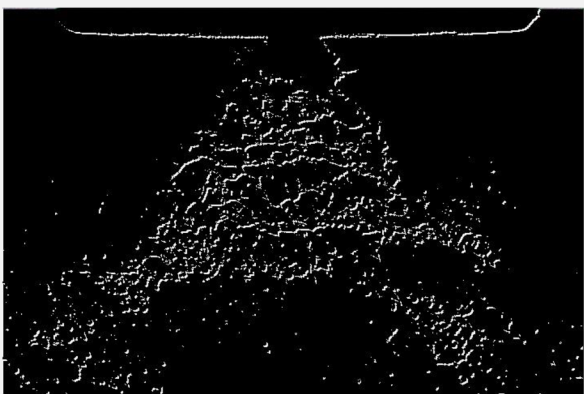
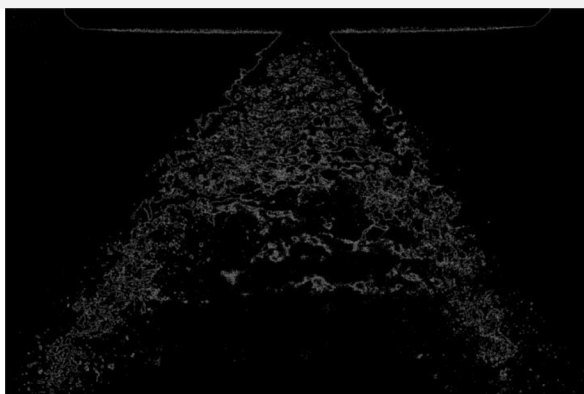
$$90^\circ - \alpha_2 = \beta_2$$

$$\beta_1 + \beta_2 = \beta$$

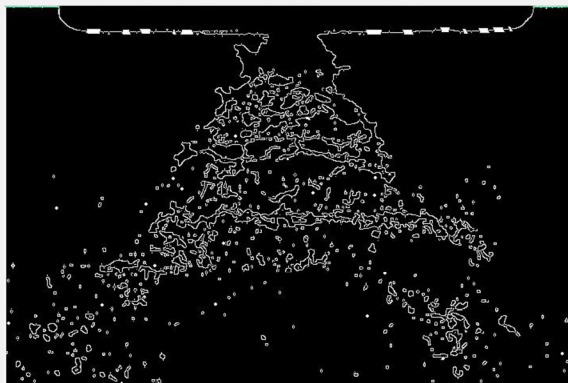
8.2.1 DETEKCE ROZHRAŇÍ

Před samotným měřením úhlů bylo nutné snímky pro toto měření upravit pomocí segmentačních metod. Pro měření v Interferu byla vybrána Laplaceova metoda. Po porovnání se snímky upravených dle ostatních metod (Sobelova, Cannyho) se Laplaceova metoda opět jevila jako nejvíce vhodná pro měření úhlu kuželu spreje.

Tab. 8.11 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku podle jednotlivých metod

METODA	SNÍMEK	VHODNOST
<i>Sobelova</i>		NE
<i>Laplaceova</i>		ANO

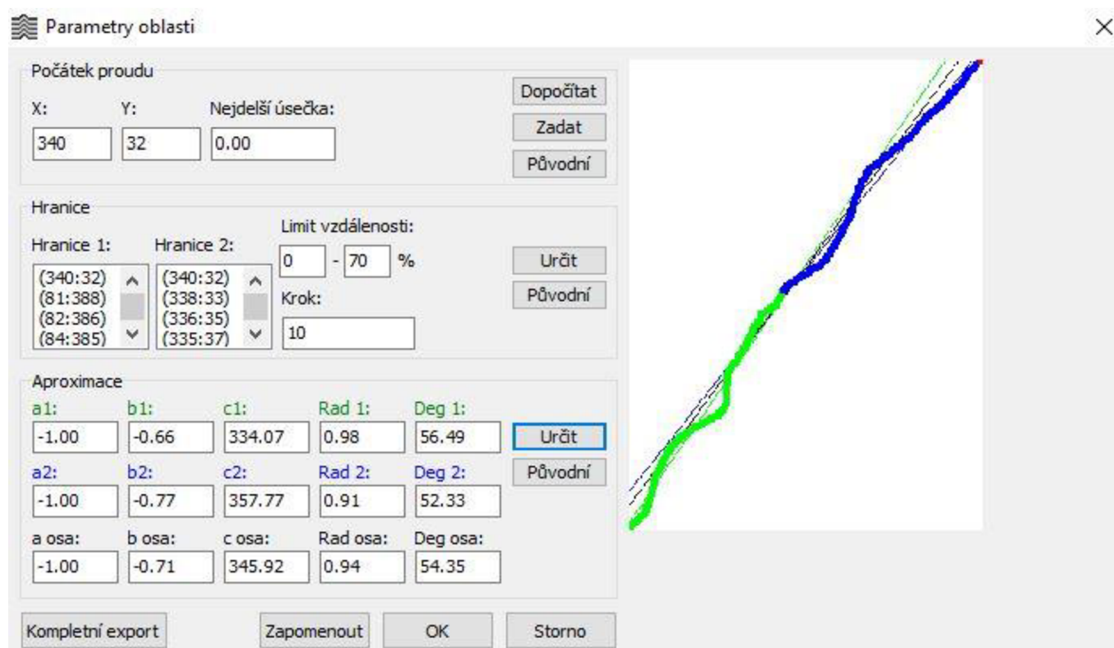
Cannyho



NE

Měření bylo i nyní provedeno ve třech rovnoběžných hladinách, které jsou od ústí trysky vzestupně vzdáleny 1, 3 a 6 mm (viz Obr. 8.2).

Na každé polovině proudu spreje, v místech rozhraní vytvořené pomocí Laplaceovy metody, bylo dále nutné navrhnout oblast reprezentující toto rozhraní. Tato oblast byla reprezentována ručně vytvořenou křivkou určující parametry proudu. Interfer neumožňuje měřit úhel systémovým nástrojem, ale úhel je možné odečíst z parametrů proudu. Hranice proudu je dána bodovou aproximací, kterou lze ovládat pomocí limitní vzdálenosti bodů a počtu kroků aproximace.



Obr. 8.8 - Aproximace křivky proudu

8.2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V PRACOVNÍM REŽIMU 15 BAR

Tab. 8.12 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 1 vzdálené 1 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 1				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	47° 54'	51° 15'	42° 6'	38° 45'	80° 51'
2	52° 19'	53° 8'	37° 41'	36° 52'	74° 32'
3	51° 53'	53° 17'	38° 7'	36° 43'	74° 50'
4	52° 55'	51° 42'	37° 5'	38° 18'	75° 23'
5	49° 55'	54° 14'	40° 5'	35° 46'	75° 51'
6	54° 29'	51° 10'	35° 31'	38° 50'	74° 21'
7	51° 19'	54° 39'	38° 41'	35° 21'	74° 2'
8	51° 29'	53° 6'	38° 31'	36° 54'	75° 25'
9	51° 47'	55° 35'	38° 13'	34° 25'	72° 38'

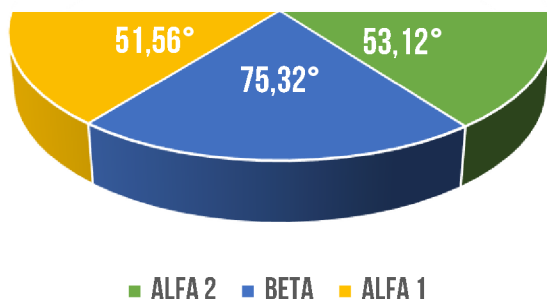
Tab. 8.13 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 2 vzdálené 3 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 2				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	50° 9'	55° 13'	39° 51'	34° 47'	74° 38'
2	51° 29'	56° 56'	38° 31'	33° 4'	71° 35'
3	50° 20'	53° 47'	39° 40'	36° 13'	75° 52'
4	51° 38'	59° 21'	38° 22'	30° 39'	69° 1'
5	50° 13'	56° 52'	39° 47'	33° 8'	72° 55'
6	50° 44'	59° 26'	39° 16'	30° 34'	69° 50'
7	52° 23'	53° 26'	37° 37'	36° 34'	74° 11'
8	50° 44'	57° 45'	39° 16'	32° 15'	71° 31'
9	51° 29'	55° 40'	38° 31'	34° 20'	72° 51'

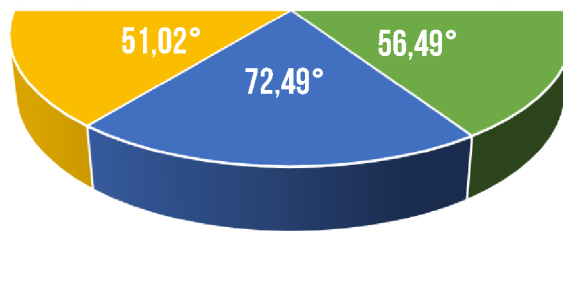
Tab. 8.14 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 3 vzdálené 6 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 2				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	56° 7'	61° 23'	33° 53'	28° 37'	62° 31'
2	51° 46'	61° 28'	38° 14'	28° 32'	66° 47'
3	52° 22'	56° 2'	37° 38'	33° 58'	71° 35'
4	50° 41'	59° 6'	39° 19'	30° 54'	70° 13'
5	50° 43'	59° 21'	39° 17'	30° 39'	69° 56'
6	51° 47'	58° 30'	38° 13'	31° 30'	69° 43'
7	57° 49'	58° 44'	32° 11'	31° 16'	63° 27'
8	53° 37'	60° 28'	36° 23'	29° 32'	65° 55'
9	60° 7'	59° 22'	29° 53'	30° 38'	60° 31'

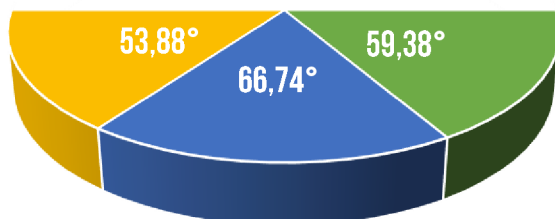
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 1



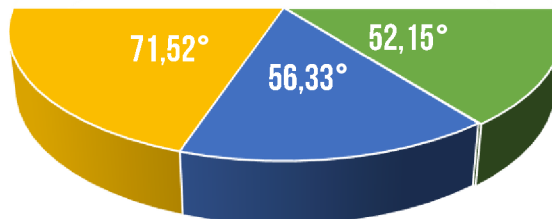
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 2



PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 3



CELKOVÝ PRŮMĚR HODNOT ÚHLŮ VŠECH TŘÍ HLADIN



Skupina grafů 8.3 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Interfer, tlak 15 bar

8.2.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PRO PRACOVNÍ TLAK 5 BAR
Tab. 8.15 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 1 vzdálené 1 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 1				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	55° 4′	57° 25′	34° 56′	32° 35′	67° 31′
2	53° 22′	48° 19′	36° 38′	41° 41′	78° 19′
3	48° 43′	50° 43′	41° 17′	39° 17′	80° 34′
4	62° 50′	60° 47′	27° 10′	29° 13′	56° 23′
5	28° 2′	55° 32′	61° 58′	34° 28′	96° 26′
6	32° 19′	63° 8′	57° 41′	26° 52′	84° 34′
7	49° 44′	42° 43′	40° 16′	47° 17′	87° 33′
8	63° 44′	65° 1′	26° 16′	24° 59′	51° 15′
9	47° 1′	44° 10′	42° 59′	45° 50′	88° 49′
10	41° 58′	56° 1′	48° 2′	33° 59′	82° 1′

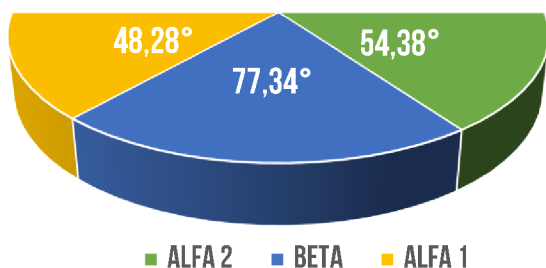
Tab. 8.16 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 2 vzdálené 3 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 2				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	55° 40′	65° 34′	34° 20′	24° 26′	58° 47′
2	55° 12′	56° 17′	34° 48′	33° 43′	68° 31′
3	61° 29′	60° 56′	28° 31′	29° 4′	57° 35′
4	55° 40′	56° 14′	34° 20′	33° 46′	68° 5′
5	50° 55′	61° 40′	39° 5′	28° 20′	67° 26′
6	50° 41′	62° 58′	39° 19′	27° 2′	66° 21′
7	60° 16′	61° 28′	29° 44′	28° 32′	58° 16′
8	55° 31′	44° 23′	34° 29′	45° 37′	80° 7′
9	45° 58′	54° 38′	44° 2′	35° 22′	79° 24′
10	57° 25′	55° 0′	32° 0′	34° 0′	67° 0′

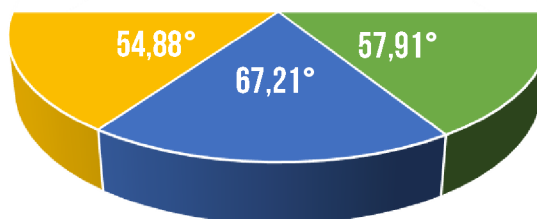
Tab. 8.17 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 3 vzdálené 6 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 3				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β
1	54° 8′	62° 34′	35° 52′	27° 26′	63° 18′
2	54° 50′	61° 19′	35° 10′	28° 41′	63° 51′
3	68° 5′	66° 38′	21° 55′	23° 22′	45° 17′
4	61° 1′	74° 4′	28° 59′	15° 56′	44° 55′
5	63° 8′	72° 50′	26° 52′	17° 10′	44° 2′
6	60° 37′	73° 8′	29° 23′	16° 52′	46° 14′
7	68° 20′	67° 17′	21° 40′	22° 43′	44° 23′
8	72° 37′	60° 44′	17° 23′	29° 16′	46° 39′
9	60° 1′	58° 21′	29° 59′	31° 39′	61° 38′
10	60° 5′	68° 2′	29° 55′	21° 58′	51° 53′

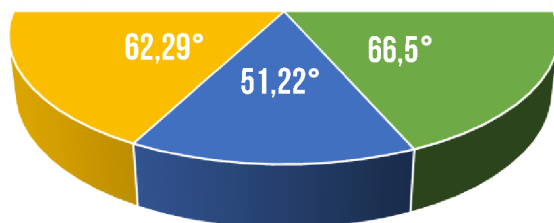
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 1



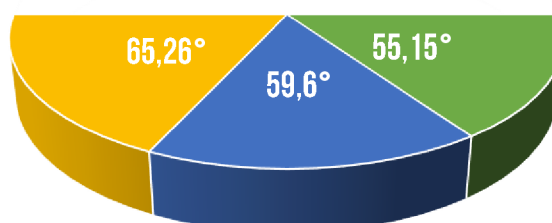
PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 2



PRŮMĚRNÉ HODNOTY ÚHLŮ: HLADINA 3



CELKOVÝ PRŮMĚR HODNOT ÚHLŮ VŠECH TŘÍ HLADIN

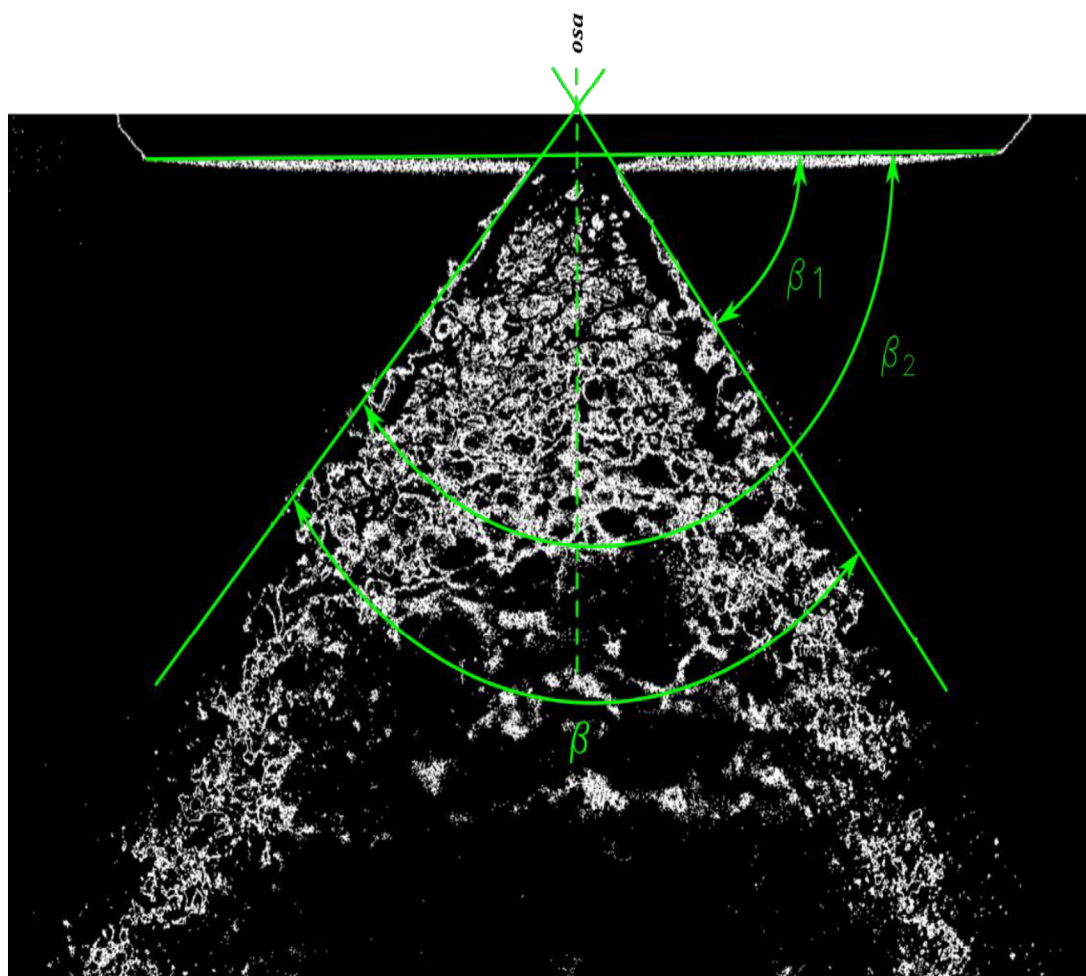


Skupina grafů 8.4 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Interfer, tlak 5 bar

8.4 ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ V PROGRAMU PCO

Nejprve bylo opět nutné datové obrazy podrobit prahování. Program PCO defaultně zobrazí snímky v šedém kanálu. Pomocí nástroje pro nastavení hodnot histogramu lze snímek prahovat bez předchozího rozdělení na barevné kanály RGB. Hledání optimálních hodnot prahu je tak daleko účinnější a viditelné v reálném čase.

V případě zpracování snímků v PCO se mění metodika výpočtu úhlu spreje z důvodu rozdílného měření úhlu v samotném programu PCO.



Obr. 8.9 - Sledované úhly v programu PCO Picture Viewer

Provedeme měření úhlu β_1 a β_2 opět ve třech hladinách ve stejných vzdálenostech jako v případě předchozích měření.

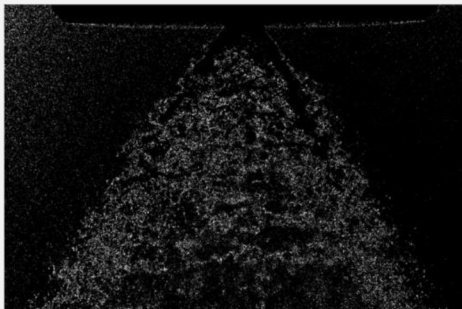
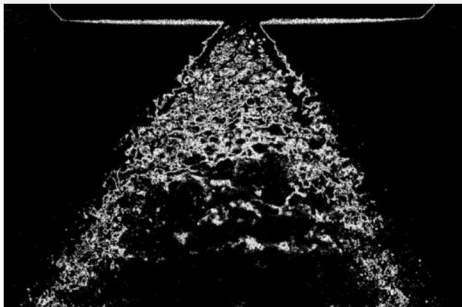
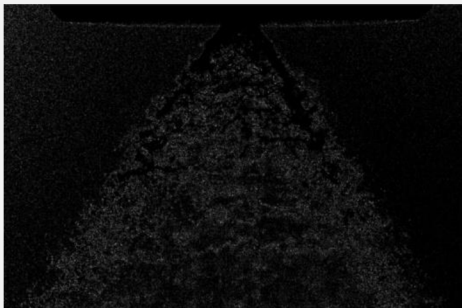
Výsledný úhel β stanovíme dle výpočtu:

$$\beta_2 - \beta_1 = \beta$$

8.4.1 DETEKCE ROZHŘANÍ

V dalším kroku byla provedena detekce rozhraní. Pro hledání rozhraní spreje byly vybrány opět tři metody, které byly navzájem srovnány.

Tab. 8.18 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku podle jednotlivých metod v programu PCO

METODA	SNÍMEK	VHODNOST
<i>Sobelova</i>		NE
<i>Laplaceova</i>		ANO
<i>Robertsova</i>		NE

I v tomto případě byl Laplaceův hranový detektor shledán jako nejvhodnější nástroj pro detekci hranic spreje a použit pro všechny datové snímky. Hlavním důvodem pro konečný výběr tohoto detektoru svědčil fakt, že výstupní snímky disponovaly nejvyšším kontrastem.

8.4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V PRACOVNÍM REŽIMU 15 BAR

Tab. 8.19 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 1 vzdálené 1 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 1		
	β_1	β_2	β
1	54° 41'	120° 11'	65° 30'
2	55° 41'	125° 19'	69° 38'
3	57° 9'	134° 32'	77° 23'
4	50° 50'	129° 38'	78° 48'
5	54° 10'	126° 2'	71° 52'
6	50° 32'	130° 32'	79° 60'
7	54° 15'	130° 41'	76° 26'
8	52° 3'	125° 50'	73° 47'
9	55° 26'	128° 40'	73° 14'

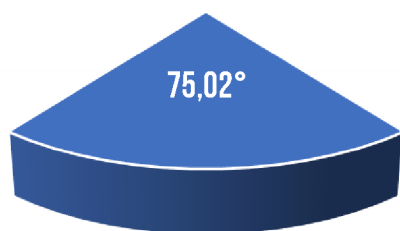
Tab. 8.20 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar v hladině 2 vzdálené 3 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 2		
	β_1	β_2	β
1	56° 36'	126° 40'	70° 3'
2	54° 39'	126° 26'	71° 47'
3	54° 24'	129° 19'	74° 55'
4	58° 7'	127° 47'	69° 40'
5	58° 27'	130° 54'	72° 27'
6	53° 51'	126° 30'	72° 39'
7	55° 1'	125° 10'	70° 8'
8	58° 57'	127° 7'	68° 11'
9	56° 10'	130° 24'	74° 13'

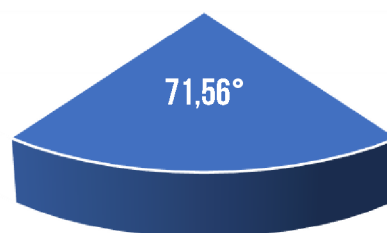
Tab. 8.21 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 15 bar

Pořadí	Hladina 3		
	β_1	β_2	β
1	60° 10'	126° 32'	66° 21'
2	61° 7'	126° 7'	65° 0'
3	59° 31'	123° 54'	64° 23'
4	60° 23'	126° 52'	66° 29'
5	59° 13'	126° 16'	67° 3'
6	62° 22'	129° 37'	67° 15'
7	58° 22'	123° 41'	65° 19'
8	61° 22'	126° 32'	65° 10'
9	62° 3'	127° 52'	65° 48'

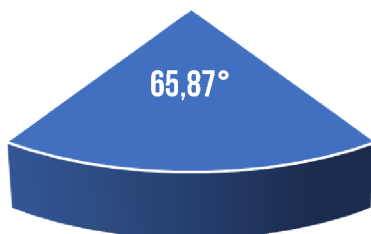
PRŮMĚRNÁ HODNOTA ÚHLU β : HLADINA 1



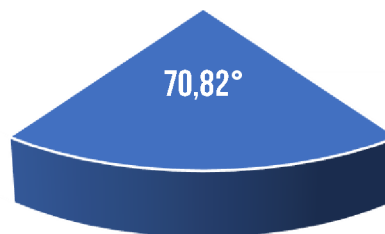
PRŮMĚRNÁ HODNOTA ÚHLU β : HLADINA 2



PRŮMĚRNÁ HODNOTA ÚHLU β : HLADINA 3



CELKOVÝ PRŮMĚR HODNOT ÚHLU β



Skupina grafů 8.5 - Průměrné hodnoty úhlu v programu PCO, tlak 15 bar

8.4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PRO PRACOVNÍ TLAK 5 BAR

Tab. 8.22 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 1 vzdálené 1 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 1		
	β_1	β_2	β
1	60° 41'	120° 11'	59° 29'
2	50° 49'	141° 39'	90° 50'
3	44° 35'	121° 36'	77° 1'
4	52° 20'	124° 48'	72° 28'
5	54° 10'	106° 10'	52° 1'
6	60° 51'	120° 31'	59° 39'
7	54° 55'	150° 7'	95° 11'
8	72° 26'	130° 35'	58° 10'
9	44° 32'	136° 6'	91° 35'
10	66° 43'	128° 13'	61° 30'

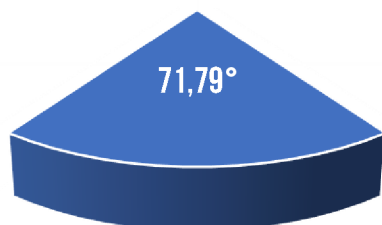
Tab. 8.23 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 2 vzdálené 3 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 2		
	β_1	β_2	β
1	55° 56'	127° 12'	71° 16'
2	59° 20'	126° 13'	66° 53'
3	56° 47'	118° 40'	61° 53'
4	58° 1'	119° 37'	61° 36'
5	49° 45'	124° 3'	74° 18'
6	64° 43'	120° 47'	56° 3'
7	55° 1'	118° 55'	63° 54'
8	52° 42'	121° 14'	68° 32'
9	45° 42'	120° 24'	74° 42'
10	55° 56'	127° 12'	71° 16'

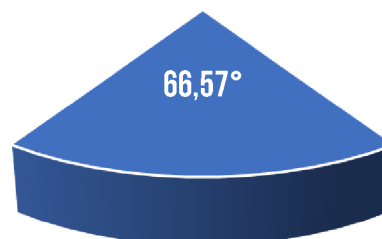
Tab. 8.24 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje trysky pod pracovním tlakem 5 bar v hladině 3 vzdálené 6 mm od ústí trysky

Pořadí	Hladina 3		
	β_1	β_2	β
1	55° 56'	127° 12'	71° 16'
2	59° 20'	126° 13'	66° 53'
3	56° 47'	118° 40'	61° 53'
4	58° 1'	119° 37'	61° 36'
5	49° 45'	124° 3'	74° 18'
6	64° 43'	120° 47'	56° 3'
7	55° 1'	118° 55'	63° 54'
8	52° 42'	121° 14'	68° 32'
9	45° 42'	120° 24'	74° 42'
10	55° 56'	127° 12'	71° 16'

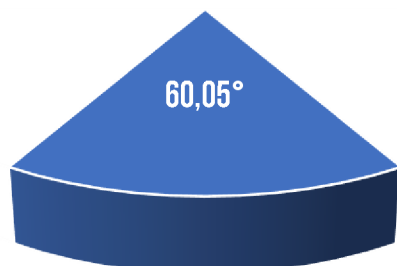
PRŮMĚRNÁ HODNOTA ÚHLU β : HLADINA 1



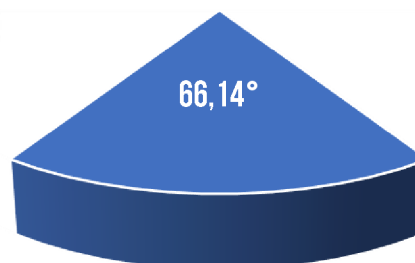
PRŮMĚRNÁ HODNOTA ÚHLU β : HLADINA 2



PRŮMĚRNÁ HODNOTA ÚHLU β : HLADINA 3

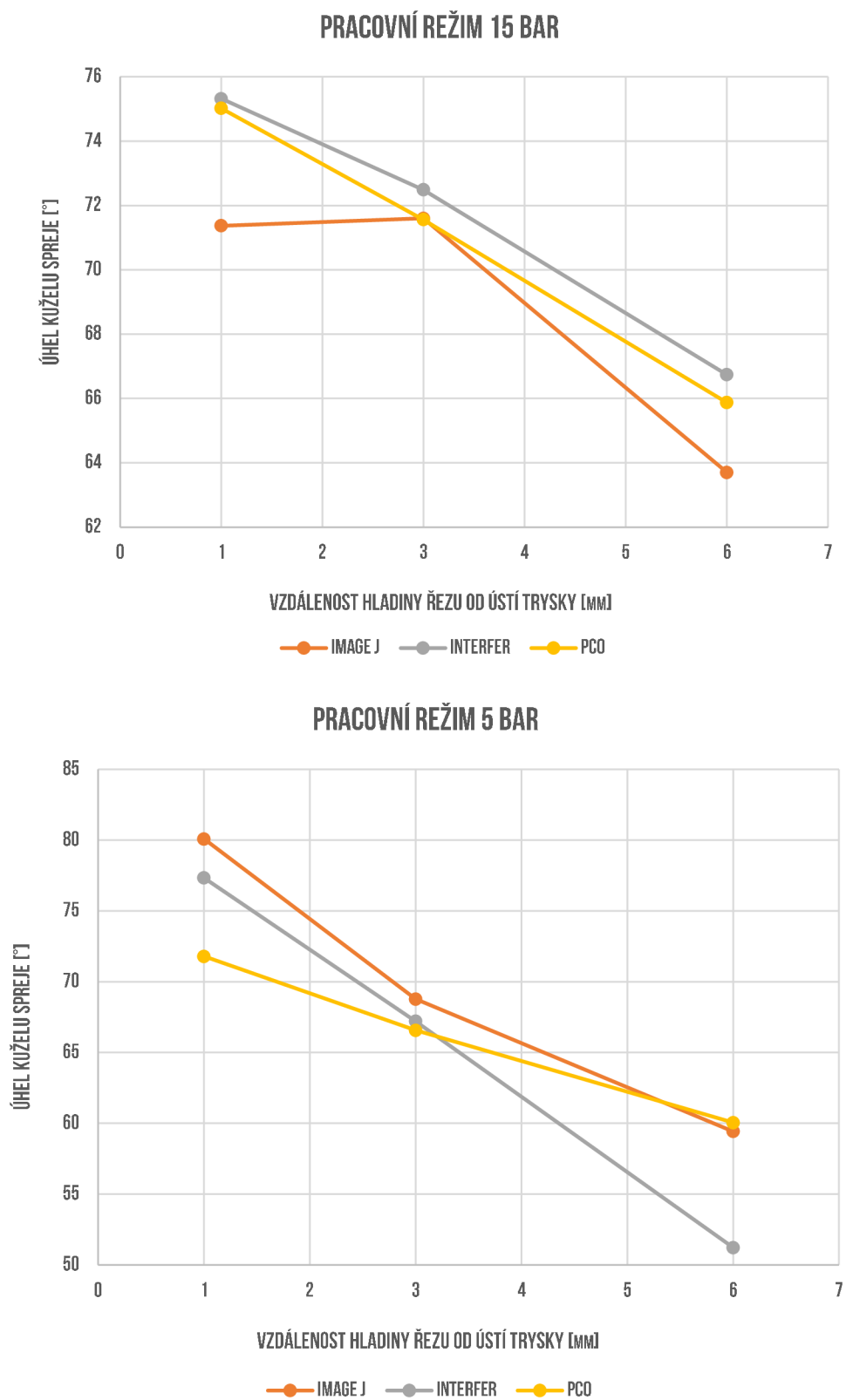


CELKOVÝ PRŮMĚR HODNOT ÚHLU β



Skupina grafů 8.6 - Průměrné hodnoty úhlu v programu PCO, tlak 15 bar

8.5 ZÁVISLOST ÚKS NA VZDÁLENOSTI OD TRYSKY



Skupina grafů 8.7 - Průběh závislosti ÚKS na vzdálenostech od trysky

9 ZÁVĚREČNÉ HODNOCENÍ

Úkolem bakalářské práce bylo stanovit hodnoty úhlu kuželu spreje pomocí obrazových metod. Po vypracování rešeršní části práce, která obsahuje popis základních principů atomizace, charakteristiky ovlivňující chování spreje či různých metod pro určení úhlu spreje, se autor zaměřil na experimentální část práce.

Pomocí PDA systému byla zhotovena série snímků spreje ve dvou pracovních režimech, které se lišily hodnotami tlaku¹⁵. Jednotlivé snímky byly podrobeny úpravám ve třech počítačových programech – *Image J*, *Interfer* a *PCO Picture Viewer Software*.

Autor zkoumal chování proudu spreje ve třech různých vzdálenostech od ústí atomizační trysky. Pro každý program byla vytvořena metodika výpočtu úhlu kuželu spreje.

Byl potvrzen předpoklad, že úhel kuželu spreje s rostoucí vzdáleností od ústí trysky klesá, přičemž pokles je nápadnější při nižším pracovním tlaku 5 bar (viz Skupina grafů 8.7).

V případě vyššího pracovního tlaku bylo rozhraní proudu spreje a okolí lépe rozeznatelné a úhel tak bylo možné vyhodnotit i v nejvzdálenější hladině¹⁶ od ústí trysky s velkou přesností. To ovšem neplatilo pro nižší pracovní tlak, kde vlivem necelistvosti proudu spreje nejsou výsledné hodnoty ÚKS tak přesné.

Ukázalo se, že proud spreje se při nižším pracovním tlaku rozpadá rychleji. ÚKS s rostoucí vzdáleností od trysky je tak obtížné přesně analyzovat, což potvrzují hodnoty výsledného úhlu β v pracovním režimu 5 bar, které mají výraznou odchylku ve všech případech měření.

Co se týče posouzení vhodnosti analýzy ÚKS v uvedených počítačových programech, bylo zjištěno, že nejpřesnější výsledky lze dosáhnout při práci v programu *Interfer*, jelikož při výpočtu úhlu používá bodovou aproximaci, jejíž parametry může uživatel sám ovlivnit. S přesností výsledků však souvisí časová náročnost jednotlivých operací. Omezením programu při výpočtu úhlu spreje byl také fakt, že parametry aproximace nebylo možné nastavit tak, aby byl úhel vyhodnocen automaticky v jednotlivých hladinách. Určení hladiny tedy autor musel provést ručně. Práci v tomto programu omezovaly i časté výpadky způsobené chybným naprogramováním softwaru.

ÚKS byl měřen také pomocí open-source programu *Image J*, který se ukázal jako užitečný nástroj i pro měření úhlu spreje. Autor dále shledal *PCO Picture Viewer* nevhodným programem pro měření sledované charakteristiky spreje, i když ÚKS v něm vyhodnotit lze. Chod programu byl však velmi nespolehlivý. Tento software je vhodný pro řadu úprav snímků jako prahování, hranová detekce či filtrování. Neobsahuje však účinnější nástroj pro určení úhlu než ruční měření, které je nepřesné a pro větší sérii snímků časově náročné.

Celkovou analýzou došel autor k závěru, že ÚKS lze stanovit ve všech třech programech, avšak záleží na konkrétní aplikaci, pro kterou je měření prováděno, jelikož přesnost výsledků se dle typu programu liší.

¹⁶ Nejvzdálenější hladina vzdálena 6 mm od ústí trysky, viz Obr. 8.2

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] S.N. Sridhara and B.N. Raghunandan / JAFM, Vol. 3, No. 2, pp. 111-123, 2010.
- [2] Lefebvre AH. Atomization and sprays. Combustion, vol. xi. New York: Hemisphere Pub. Corp.; 1989. p. 421.
- [3] RICHTER, J. Interfer. [2015] <http://www.energetickeforum.cz/ext/2pf/>.
- [4] KULA, J., LINKA, A. , TUNÁK, M. Zpracování a analýza obrazu [online]. [Liberec]: Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, [citováno 5.4. 2014].
Dostupné z: http://blade1.ft.tul.cz/cgi-bin/elearning/elearning.fcgi?page=publ&action=showThemeContentText&item=500&theme_id=39.
- [5] *Spray breakup* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.bnwpix.com/large-breakup/bGFyZ2UtYnJlYWt1cA/>
- [6] *Full cone spray* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.i-spraynozzle.com/en/SMP-Wide-angle-Full-Cone-Nozzle-382.html>
- [7] Mádr, V., Rozprašování a spalování kapalných paliv. Aleko, 1994
- [8] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, 2010, s. 16-58 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [9] Erika Mechlová Molekulová fyzika 1. Ostrava: Ediční středisko CIT OU, 2004. ISBN 80-7042-989-5
- [10] *Povrchové napětí kapalin: Tabulka hodnot* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/povrchove-napeti.htm>
- [11] *Hustota kapalin: Tabulka hodnot* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-kapalin.htm>
- [12] Spray performance considerations: Technical reference. *Spraying Systems Co.* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.spray.com/cat70/cat70pdf/ssco_cat70_a.pdf
- [13] *Research & Development: Classification of spray droplet size* [online]. [cit. 2016-04-18].
Dostupné z: http://www.ikeuchiusa.com/technical_information.html
- [14] *Theoretical spray coverage* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.steinen.com/industrial/usa/english/spray-calculator.php>
- [15] *Optical patternator for rapid characterization of sprays* [online]. In: . s. 2-34 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/pdf/OPPAT.pdf>
- [16] *PLIF - Optical patternator* [online]. In: . s. 1-4 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/pdf/plif.pdf>
- [17] Optika: Digitální záznam obrazu. *Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/optika/1402.htm>

- [18] PAVELEK, Milan, Eva JANOTKOVÁ a Josef ŠTĚTINA. *Vizualizační a optické měřící metody* [online]. 2. vydání. Brno, 2007 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika>
- [19] *Spray particle characterization: Phase Doppler Anemometry* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/phase-doppler-anemometry>
- [20] URUBA, V. Laser Doppler Anemometry (LDA) [online]. 2003 [cit. 2011-04-08]. Ústav termomechaniky AV ČR. Dostupné z: <<http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf>
- [21] HATSCHBACH, Petr. *Využití metody PIV při vývoji spalovacích motorů* [online]. In: . s. 1-7 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10457054-Vyuziti-metody-piv-pri-vyvoji-spalovacich-motoru.html>
- [22] *High Performance Colour CCD Camera* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://www.pieper-video.com/front_content.php?idart=39
- [23] *AP-500 Spray Angle Paternator Brochure* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://www.enurga.com/assets/docs/AP-500_brochure.pdf
- [24] *Image J* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
- [25] RAFFAEL, Markus, Jürgen KOMPENHANS a Steven WERELEY. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide* [online]. In: . s. 177-201 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235432671_Particle_Image_Velocimetry_A_Practical_Guide
- [26] *Vizualizační metody v technice prostředí* [online]. PAVELEK, Milan. s. 11-12 [cit. 2016-04-19]. ISBN ISBN 978-80-214-3821-7. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3821-7.pdf>
- [27] Dantec Dynamics. Particle Image Velocimetry measurement principles. [Online]. [cit. 2016-05-23] Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=820>.
- [28] *Development of a High-Resolution Mechanical Spray* [online]. BORROUGHS, Eric W. s. 3-56 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/34471630_Development_of_a_highresolution_mechanical_spray_paternator_for_the_characterization_of_fuel_sprays_electronic_resource
- [29] BHATIA, Akshay. *Hessian-Laplace Feature Detector and Haar Descriptor for Image Matching* [online]. In: . Ottawa: University of Ottawa, 2007, s. 26-62 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <https://www.site.uottawa.ca/~laganier/publications/thesis/akshay-thesis.pdf>
- [30] ŠPANĚL, M. , BERAN, V. *Obrazové segmentační techniky* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav počítačové grafiky a multimédií, 2005, [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/#_Toc125769322

- [31] Segmentation. *Mathworks.com* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/51124/versions/1/screenshot.jpg>
- [32] BAJGAR, Bc. Aleš. *Obrazové segmentační techniky* [online]. , 22-35 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39096
- [33] MALÝ, Milan, Lada JANÁČKOVÁ, Jan JEDELSKÝ a Miroslav JÍCHA. *The influence of spill-line geometry on a spray generated by a pressure-swirl atomizer*. Brno, 2016. Brno University of Technology.
- [34] CALETKA, Petr. *Hodnocení funkčnosti větrací vyústky pro kabinu osobního vozu*. Brno, 2014, 66 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jedelský, PhD.
- [35] KŘIVÁKOVÁ, Linda a Ondřej VÁLA. *Formáty pro rastrovou grafiku* [online]. In.: Praha, 2011, s. 4-7 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://geo3.fsv.cvut.cz/vyuka/kapr/sp/2011/ott/vala_krikavova_sp.pdf
- [36] *Liquid distribution* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.bete.co.uk/resources/engineering-resources/guide-to-spray-properties/7--fluid-distribution>
- [37] *Spray pattern* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.sealpump.com/hollow-cone-nozzles.php>
- [38] ŠPANĚL, Michal a Vítězslav BERAN, V. *Obrazové segmentační techniky* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav počítačové grafiky a multimédií, 2005, [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/#_Toc125769322
- [39] *Watershed segmentation* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-watershed-transform-strategies-for-image-segmentation.html>
- [40] BEUCHER, S. , LANTUEJOUL, C. Use of Watersheds in Contour Detection. In *International Workshop on Image Processing: Real-time Edge and Motion Detection/Estimation*, Rennes, France., 1979.
- [41] *Shadowgraphy* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.photron.com/?cmd=casestudy&type=shadowgraphy>
- [42] *Refraktometrie* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://anl.zshk.cz/vyuka/refraktometrie.aspx>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SYMBOL, ZKRATKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
μ	$N \cdot s \cdot m^{-1}$	<i>dynamická viskozita</i>
dm	kg	<i>elementární hmotnost</i>
dV	m^3	<i>elementární objem</i>
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	<i>hustota</i>
σ	$N \cdot m^{-1}$	<i>tečné napětí</i>
β	°	<i>výsledný úhel kuželu spreje</i>
α	°	<i>vnější úhel rozhraní spreje</i>
CCD		<i>grafický senzor</i>
L		<i>nárazová plocha</i>
LDA		<i>laserová Dopplerovská anemometrie</i>
PDA		<i>fázová Dopplerovská anemometrie</i>
PIV		<i>integrální částová anemometrie</i>
PLIF		<i>planar laser induced fluorescence</i>
TP		<i>teoretické pokrytí</i>
ÚKS		<i>úhel kuželu spreje</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 - Primární a sekundární rozpad tekutiny [5]	16
Obr. 1.2 - Ukázka reálného rozprašování [6].....	16
Obr. 1.3 - Ilustrace způsobů atomizace kapaliny [7]	17
Obr. 1.4 - Rozložení nárazové síly dle tvaru spreje [36].....	17
Obr. 2.1 - Různé typy rozstříku: plný kužel [37].....	19
Obr. 2.2 - Rozložení nárazové síly dle tvaru spreje [36]	20
Obr. 2.3 - Rozdělení kapek dle velikosti v μm [13].....	20
Obr. 3.1 - Teoretické pokrytí spreje [14].....	21
Obr. 4.1 - Zjednodušená sestava snímacího zařízení při použití stínografie [41].....	22
Obr. 4.2 - Schéma sestavy pro pořízení obrazových snímků	23
Obr. 4.3 - Přístroj HiDense PDA od firmy Dantec Systems [19]	24
Obr. 4.4 - CCD kamera Pieper [22]	25
Obr. 4.5 - Vícenásobný optický paternátor [23].....	25
Obr. 4.6 - Vnitřní konstrukce optického paternátoru [23]	26
Obr. 4.7 - Výstupní data [23].....	26
Obr. 4.8 - Rychlostní profil získaný metodou PIV [15].....	26
Obr. 6.1 - Detekce hran černobílého snímku [31]	29
Obr. 6.2 - Zobrazení metody pomocí topografického terénu [39]	30
Obr. 7.1 - Hlavní panel programu Image J	31
Obr. 7.2 - Uživatelské prostředí při měření ÚKS v programu Image J.....	31
Obr. 7.3 - Hlavní okno programu Interfer při měření.....	32
Obr. 7.4 - Uživatelské prostředí programu PCO Picture Viewer Software	33
Obr. 8.1 - Nákres pracovní trysky [33]	35
Obr. 8.2 - Schéma se vzdálenostmi jednotlivých hladin řezu kužele spreje	36
Obr. 8.3 - Původní snímek před zpracováním při pracovním tlaku 15 bar	37
Obr. 8.4 - Prahovaný snímek R&B: 12,66 %, W: 0, B: 127	38
Obr. 8.5 - Sledované úhly.....	39
Obr. 8.6 - Původní datový snímek za pracovního tlaku 15 bar	43
Obr. 8.7 - Prahovaný snímek R&B: 17,52 %, W: 1, B: 144.....	44
Obr. 8.8 - Aproximace křivky proudu	49
Obr. 8.9 - Sledované úhly v programu PCO Picture Viewer	54

SEZNAM GRAFŮ

Skupina grafů 8.1 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Image J, tlak 15 bar ..	42
Skupina grafů 8.2 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Image J, tlak 5 bar ...	47
Skupina grafů 8.3 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Interfer, tlak 15 bar ...	51
Skupina grafů 8.4 - Průměrné hodnoty úhlu v programu Interfer, tlak 5 bar ...	53
Skupina grafů 8.5 - Průměrné hodnoty úhlu v programu PCO, tlak 15 bar	57
Skupina grafů 8.6 - Průměrné hodnoty úhlu v programu PCO, tlak 15 bar	59
Skupina grafů 8.7 - Průběh závislostí ÚKS na vzdálenostech od trysky.....	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 - Hodnoty povrchového napětí pro vybrané kapaliny [10].....	18
Tab. 1.2 - Hustota vybraných kapalin při 20° C [11]	18
Tab. 3.1 - Teoretické pokrytí rozstříku při různých vzdálenostech [12]	21
Tab. 4.1 - Shrnutí optických metod	27
Tab. 7.1 - Srovnání jednotlivých programů	34
Tab. 8.1 - Použité parametry prahování snímků v zeleném kanále	38
Tab. 8.2 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku.....	40
Tab. 8.3 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	41
Tab. 8.4 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	41
Tab. 8.5 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	42
Tab. 8.6 - Použité parametry prahování snímků v modrém kanále	43
Tab. 8.7 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku	44
Tab. 8.8 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	46
Tab. 8.9 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	46
Tab. 8.10 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	47
Tab. 8.11 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku.....	48
Tab. 8.12 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	50
Tab. 8.13 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje.....	50
Tab. 8.14 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	51
Tab. 8.15 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje.....	52
Tab. 8.16 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	52
Tab. 8.17 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje.....	53
Tab. 8.18 - Ukázka detekce rozhraní stejného snímku v PCO	55
Tab. 8.19 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	56
Tab. 8.20 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje.....	56
Tab. 8.21 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	57
Tab. 8.22 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	58
Tab. 8.23 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	58
Tab. 8.24 - Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů kužele spreje	59