



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA PROCESU ROZPADU  
KAPALINY U ŠUMIVÉ TRYSKY**

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE LIQUID BREAKUP PROCESS OF AN EFFERVESCENT ATOMIZER

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Matouš Zaremba

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2017



## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Inverzní šumivá tryska, primární atomizace, sekundární atomizace, sprej, dvou-fázový tok, bublinkový tok, dvoumédiová tryska.

## **KEYWORDS**

Inversed effervescent atomizer, primary atomization, secondary atomization, spray, twin-fluid flow, bubbly flow, twin-fluid atomizer.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZAREMBA, M. *Experimentální analýza procesu rozpadu kapaliny u šumivé trysky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 77 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..



# OBSAH

ÚVOD.....	7
1 SHRNU TÍ LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	9
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	11
3 VÝSLEDKY A DISKUSE .....	13
3.1 Popis a funkce inverzní šumivé trysky .....	13
3.2 Primární rozpad kapaliny u inverzní šumivé trysky .....	13
3.2.1 <i>Zpracování obrazových dat</i> .....	14
3.2.2 <i>Frekvenční analýza</i> .....	15
3.2.3 <i>Řádná ortogonální dekompozice</i> .....	15
3.2.4 <i>Vyhodnocení vizuálních dat pomocí sledování deformace kapalinových struktur</i> .....	17
3.2.5 <i>Fyzikální popis rozpadu kapaliny</i> .....	18
3.3 Vývoj spreje generovaný inverzní šumivou tryskou v prostoru .....	20
3.4 Shrnutí poznatků z další výzkumné činnosti vzhledem k cílům disertační práce	23
ZÁVĚR .....	26
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	29

---

## ÚVOD

Dvoumédiové trysky patří mezi jedny z nejuniverzálnějších průmyslových trysek. K rozprášení využívají tyto trysky stlačený vzduch, který je směřován s kapalinou a po průchodu tryskou potom tento rychle proudící vzduch napomáhá k roztrhnutí kapalinového proudu. Tyto trysky mají uplatnění v mnoha průmyslových aplikacích jako například: rozprašování viskózních a odpadních paliv, rozprašování tavenin, mazání při tváření kovů, v potravinářství a další. Právě aplikace rozprašování vysoce viskózních paliv je jednou z nejčastějších oblastí využití. Tyto typy trysek, na rozdíl od jednodušších jednomédiových, umožňují rozprášení vysoce viskózních paliv s dobrou kvalitou spreje. To díky tomu, že produkují malé kapky při relativně nízkých tlacích. Dvoumédiové trysky se dělí podle několika hledisek. Základní rozdělení je podle principu směřování kapaliny a plynu. Rozeznáváme trysky s vnějším a vnitřním směřováním. Tato disertační práce se zaměřuje na trysky s vnitřním směřováním, konkrétně na trysky šumivé (z angl. effervescent).

Trysky s vnitřním směřováním pracují na principu vtačování plynu do proudu kapaliny, nebo je naopak kapalina injektována do rychle proudícího plynu. V případě šumivé trysky se do proudu kapaliny vtačuje stlačený vzduch skrz aerační otvory. Ve směšovací komoře se utváří dvoufázový tok. Tato stlačená směs je dále hnána tryskou a po průchodu výstupním otvorem dojde k expanzi směsi. Stlačený plyn, nejčastěji vzduch, expanduje výrazněji než kapalina a roztrhne kapalinový svazek na menší útvary, které se dále rozpadají vlivem interakce s okolním vzduchem. Jak ukazují výsledky předchozích výzkumných prací na dvoumédiových tryskách, princip rozpadu kapaliny je úzce spojen s charakterem vnitřního toku směsi uvnitř směšovací komory. Charakter dvoufázového toku je závislý na hmotnostních průtocích obou médií, rozměrech směšovací komory, tlaku a na hodnotě GLR (Gas to Liquid Ratio – poměr hmotnostního toku plynu a kapaliny).

Principy rozpadu kapaliny byly zkoumány již od devatenáctého století. S vývojem měřicí techniky došlo k prohloubení poznání teorie těchto fyzikálních principů. Současný trend popisu rozpadu kapaliny se zaměřuje na numerické modelování reálných aplikací s experimentální validací výsledků. Základní mechanismy rozpadu kapaliny byly v minulosti detailně prozkoumány pro modelové případy. Avšak šumivé trysky narušují kapalinu pomocí stlačeného plynu, kde dochází hned k několika různým způsobům rozpadu kapalinového svazku. Je to kombinace vlivu nestabilit způsobených interakcí kapaliny a expandujícího plynu, kapaliny a okolního klidného vzduchu a také nestabilit způsobených turbulencí vzduchu i kapaliny. Pro optimalizaci procesu rozprašování a pro modelování tohoto typu trysek je nutné detailně popsat dvoufázový tok od výstupu z trysky až po plně vyvinutý sprej.

Tato práce popisuje dosavadní poznání v oblasti šumivých trysek a zaměřuje se i na popis rozpadu kapaliny pomocí modelových případů. Tyto zjednodušené mechanismy napomáhají k pochopení mechanismu rozpadu kapaliny při provozování šumivé trysky při tzv. bublinkovém vnitřním toku (z angl. bubbly flow). Z rešeršní části práce je

---

následně určeno tzv. bílé místo vědní oblasti, od kterého se odvíjí cíle disertační práce, vědecké otázky a hypotézy, které autor klade. V další části práce se autor věnuje popisu experimentálního zařízení a metodám použitým k výzkumu. Výsledky práce byly publikovány ve vědeckých časopisech a konferenčních příspěvcích, jejichž shrnutí je v práci uvedeno. Vybrané publikace jsou k práci přiloženy. Hlavním poznatkem vyplývajícím z práce je nalezení nového způsobu rozprašování viskózních paliv pomocí nově vyvinuté koncepce dvoumediové trysky, a to při nízkých provozních tlacích a nízké spotřebě atomizačního plynu, kdy ostatní trysky generují nestabilní sprej. Specifický mechanismus rozpadu kapaliny je popsán a zdůvodněn jako hlavní činitel při generování spreje daného typu trysky.

Předkládaná disertační práce popisuje uceleně, jak se vyvíjela výzkumná činnost autora a jakým způsobem bylo dosaženo naplnění cílů. Původní zadání bylo zaměřeno na výzkum dvoumediových trysek obecně, proto je část výsledků předkládána v porovnání s jinými typy trysek. Později byl cíl práce vymezen striktněji, a zaměřuje se na mechanismus tvorby spreje u šumivé trysky. Práce by měla být celkem, který dává do souvislosti publikace autora tak, aby byly naplněny cíle práce, které jsou v práci definovány. K práci jsou dále přiloženy články publikované v online vědeckých databázích nebo impaktovaných časopisech, které se přímo či nepřímo týkají hlavního tématu disertace, ale bez nichž by určité kroky při práci nebyly možné.

## 1 SHRNUÍ LITERÁRNÍ REŠERŠE

V kapitolách popisující rešerši práce byly popsány šumivé trysky a mechanismus, jakým se vytváří sprej. K pochopení mechanismů rozpadu kapaliny byly rozebrány modelové případy jako rozpad kapalinového proudu a případy rozpadu kapalinových stěn, které se mohou vyskytovat právě při provozování šumivé trysky.

Výzkum šumivých trysek byl převážně experimentálního charakteru s ohledem na požadavky v reálných aplikacích. Většina prací se zabývala vlivy vstupních parametrů (fyzikální vlastnosti kapaliny, tlak kapaliny, hodnota GLR, rozměry trysky) na kvalitu výsledného spreje (rychlost a velikost kapek, hmotnostní rozložení kapaliny ve spreji a stabilita). Práce, zabývající se mechanismy rozpadu kapaliny u šumivých trysek, popisovaly primární nebo sekundární atomizaci zvláště, avšak doposud nebyla publikována práce, která by popisovala sprej šumivé trysky od primárního rozpadu až po výsledný sprej. Primární rozpad kapaliny jako zásadní mechanismus ovlivňující charakteristiky spreje byl doposud popisován na základě pozorování závislých na kvalitě vizuálních záznamů. Kvalita obrazů se s postupem času zlepšovala, ale stále nebyl zachycen detailní postup deformace kapaliny při výtoku z trysky. V současné době je obtížné superponovat získané poznatky, protože publikované práce byly často prováděny za jiných provozních podmínek a na odlišných tryskách, při použití různých kapalin a měřicích metod.

Pro popis tak komplexního jevu, jako je výtok z šumivé trysky, je nutné vycházet ze zjednodušených modelových situací a přístupů, které byly historicky používány. Dostatečně byl popsán jednoduchý případ rozpadu kapalinového proudu pomocí bezrozměrných čísel. Pomocí těchto čísel byly definovány i hranice, kdy jeden mechanismus rozpadu proudu přechází v jiný. Tyto mechanismy jsou přítomny ve všech dalších modelových situacích, a to tak, že vznikající ligamenty se rozpadají právě výše popsaným principem rozpadu kapalinového proudu.

V případě rozpadu kapalinových stěn už je definování hranic, kdy přechází rozpad kapaliny z jednoho principu v druhý, obtížné. V případě, kdy pozorujeme rozpad kapalinové stěny za působení rychle proudícího vzduchu, jsou pro popis zásadní rychlosti obou médií a rozměry stěny. Podobně je tomu i v případě rozpadu anulární kapalinové stěny.

Sekundární atomizace se zabývá narušením samotných kapek. Opět byly pozorovány a popsány základní principy rozpadu, přičemž jejich závislost na bezrozměrných číslech (We a Oh), je znázorněna na Obr. 6. Podle zmíněné závislosti lze predikovat, jakým způsobem se bude kapka rozpadat a které síly budou v tomto procesu dominovat.

Z rešerše dále vyplývá, že pro popis rozpadu kapaliny a zkoumání sil, působících na kapalinu, je vhodné použít teorii bezrozměrných čísel. Proto i pro další práci bude nutné pracovat s těmito čísly. Pro jejich určení jsou zásadní fyzikální vlastnosti kapaliny a vzduchu, charakteristických rozměrů rozpadající se kapaliny, její rychlost vůči okolí. Jako charakteristický rozměr považujeme buď průměr kapalinového proudu, případně tloušťka kapalinové stěny, nebo průměr ligamentu. V případě sekundárního rozpadu

---

kapaliny je to potom průměr kapky. Pro určení těchto veličin pro případ výtoku z šumivé trysky budou použity metody vizualizační (vysokorychlostní kamera) a pro zkoumání vyvinutého spreje bude použita metoda PDA.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z literární rešerše bylo vyspecifikovány cíle disertační práce, které jsou v této kapitole uvedeny. Podstatou disertační práce je fyzikální rozbor rozpadu kapaliny a tvorba spreje šumivé trysky v režimu, který je charakteristický vnitřním bublinkovým tokem.

Cíl disertační práce je:

*„Rozbor primárního a sekundárního rozpadu kapaliny a jejich vliv na výsledný sprej šumivé trysky při jednom zvoleném provozním režimu.“*

Dílčí cíle práce jsou:

- Odborná rešerše problematiky
- Optimalizace nastavení měřicích systémů
- Realizace experimentů:
  - Měření v oblasti primárního rozpadu kapaliny – vizualizace a měření pomocí vysokorychlostní kamery.
  - Měření v oblasti sekundárního rozpadu kapaliny – pomocí PDA a vysokorychlostní kamery.
  - Měření v oblasti, kde jsou procesy rozpadu kapaliny ukončeny (plně vyvinutý sprej), metodou PDA.
- Analýza výsledků: srovnání výsledků z výše uvedených metod, výpočet bezrozměrných čísel
- Publikování výsledků v impaktovaném časopise

Vzhledem k výše definovaným cílům, autor definoval následující vědeckou otázku, kterou svou prací zodpoví:

*„Jaké síly dominují při tvorbě spreje šumivé trysky v oblasti primární a sekundární atomizace při provozu trysky s bublinkovým vnitřním tokem?“*

Na základě definované vědecké otázky autor předkládá následující pracovní hypotézy:

*„Expanze vzduchových bublin, vystupujících z šumivé trysky, je zodpovědná za primární rozpad kapaliny.“*

*„Sekundární rozpad kapaliny je řízen interakcí kapalinových útvarů s okolním vzduchem. Hlavní silou je zde odpor prostředí.“*



### 3 VÝSLEDKY A DISKUSE

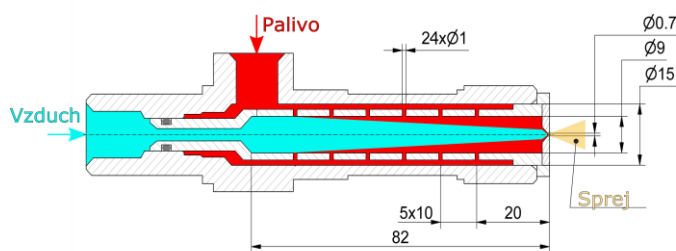
Tato část práce popisuje výsledky vycházející z experimentální práce autora. V následujících kapitolách se autor zabývá kvalitativním porovnáváním vybraných druhů dvoufázových trysek, které vychází z prací [60, 61, 63, 64, 65]. Tyto trysky byly testovány při nízkých tlacích a hodnotách GLR, což způsobovalo komplikace při rozprašování. Hlavním nedostatkem byly nestability sprejů. Z experimentů vyplynulo, že nejvhodnější tryskou pro zkoumané režimy je tzv. inverzní šumivá (OUIL), která je dále detailně zkoumána.

Ukázalo se, že inverzní šumivá tryska dokáže rozprašovat lehký topný olej právě díky specifickému mechanismu směšování tekutin. Tento mechanismus utváří inherentně anulární vnitřní tok, jež vede k mechanismu rozpadu kapaliny shodnému s mechanismem rozpadu kapaliny u klasických šumivých trysek. Tento mechanismus je detailně zkoumán v práci [68] která navazuje na předchozí poznatky [40, 65].

Následující kapitoly jsou řazeny od popisu proudění uvnitř trysky a tvorbu dvoufázového proudění, přes výtok a primární atomizaci až po výsledné charakteristiky spreje a dynamiky kapek. Kapitoly tak shrnují všechny významné poznatky relevantní k tématu disertace. Doplňující informace jsou uvedeny v příložených publikacích autora.

#### 3.1 POPIS A FUNKCE INVERZNÍ ŠUMIVÉ TRYSKY

Konstrukce trysky vychází z návrhů šumivých trysek s tím rozdílem, že vstupy paliva a plynu jsou inverzně zapojené. To znamená, že palivo proudí přes tzv. aerační otvory do směšovací komory, zatímco vzduch proudí středem trysky a následně středem směšovací komory. Díky nízké rychlosti proudění zůstává kapalina přilnuta ke stěnám směšovací komory (Obr. 1), což vytváří anulární dvoufázové proudění pro široké spektrum provozních režimů, jak bylo ukázáno v [40, 65].



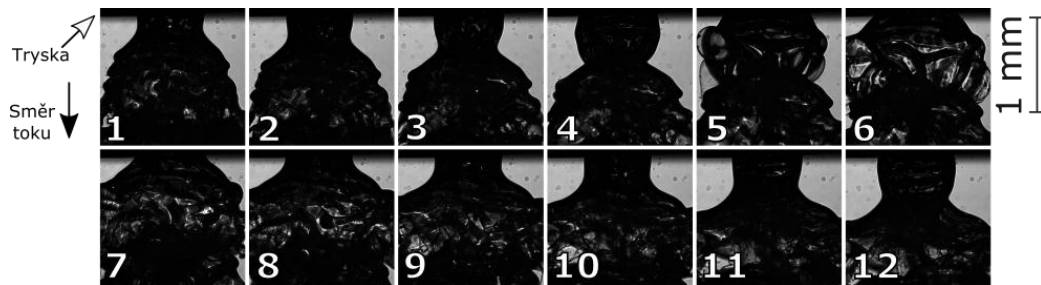
Obr. 1 Schematické zobrazení funkce inverzní šumivé trysky (OUIL).

#### 3.2 PRIMÁRNÍ ROZPAD KAPALINY U INVERZNÍ ŠUMIVÉ TRYSKY

Jak bylo zmíněno v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, OUIL tryska generuje inherentně vnitřní anulární dvoufázové proudění, což vede k mechanismu

rozpadu kapaliny podobnému jako u trysky šumivé. Tento mechanismus je založen na expanzi vzduchových bublinek v blízkosti výstupního otvoru trysky. V případě šumivých trysek je to způsobeno bublinkovým vnitřním tokem. U inverzní šumivé trysky je to díky specifickému mechanismu směšování.

Mechanismus primární atomizace u trysky OUIL byl zkoumán pomocí vysokorychlostní kamery v konfiguraci zpětného osvětlení zkoumané oblasti, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Typický záznam je vidět na obrázku níže:

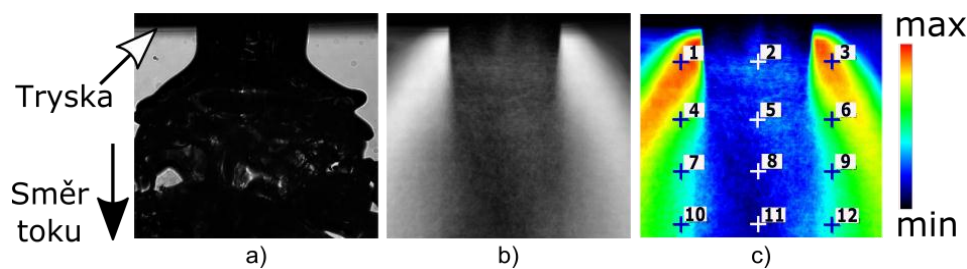


Obr. 2 Ukázka vizualizací pomocí vysokorychlostní kamery v těsné blízkosti u trysky.

Obr. 2 ilustruje expanzi vzduchové bubliny těsně po průchodu výstupním otvorem trysky. K takovým expanzím bublin docházelo náhodně a z vizuálního hlediska nebylo možné vysledovat daný trend. Proto byl pro vyhodnocení záznamů použit následující postup.

### 3.2.1 Zpracování obrazových dat

Ke kvantitativnímu zhodnocení primární atomizace byly vytvořeny průměrné obrazy (RMS z angl. root mean square) ze série 750 obrazů, Obr. 3 c). Tyto obrazy byly vytvořeny určením standardní odchylky intenzity světla daných pixelů přes zkoumanou sérii obrazů. Intenzita v RMS obrazech poukazuje na oblasti, kde jsou velké rozdíly intenzity světla mezi jednotlivými snímky. Proto je lze chápat jako obrazy ukazující místa, kde dochází k výraznému pohybu kapaliny.



Obr. 3 Ukázka RMS obrazů: a) ukázkový snímek bez úprav, b) RMS obraz, c) RMS obraz po konverzi černobílého spektra do červeno-zeleno-modrého spektra.

### 3.2.2 Frekvenční analýza

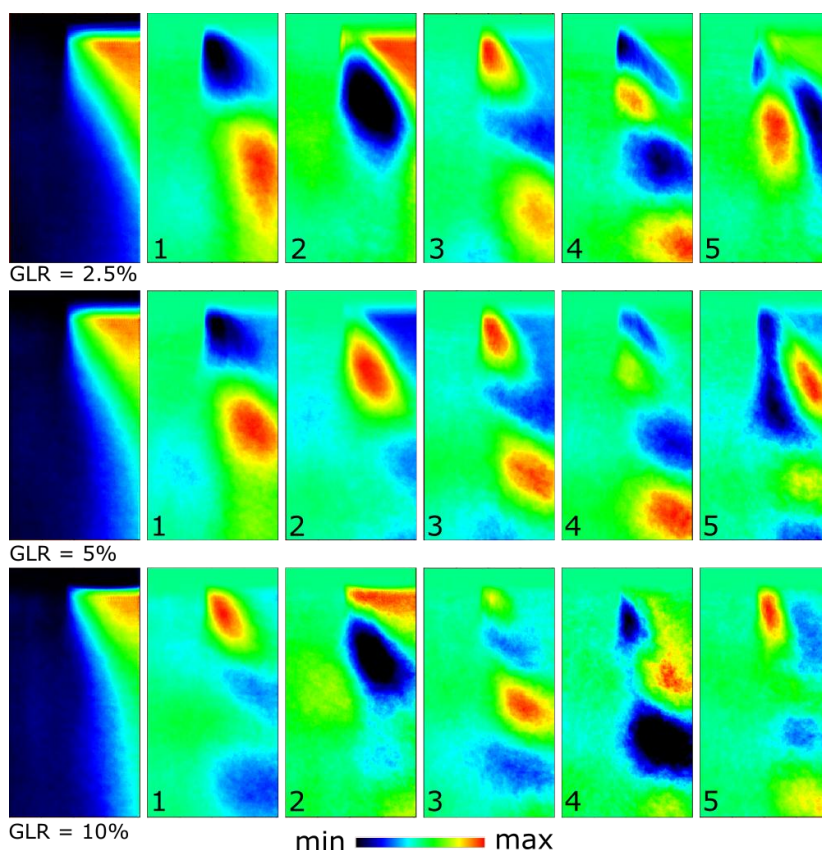
RMS obrazy byly použity pro definování oblastí, ve kterých byla aplikována frekvenční analýza, rychlá Fourierova transformace, FFT (z angl. fast Fourier transformation). Byla vytvořena síť bodů, která pokrývala obraz tak, aby každý bod zachycoval určitou intenzitu světla, Obr. 3 c). Následně byla provedena FFT analýza těchto bodů pro určení charakteristických frekvencí objevujících se ve zkoumaném ději. Bylo ukázáno, že v bodech s nejvyšší intenzitou, tj. s nejvýraznějšími fluktuacemi intenzity světla, byly nalezeny charakteristické frekvence. Ostatní analyzované body neukazovaly rozlišitelnou dominantní frekvenci, proto se dále budou rozebírat data pouze z analýzy z bodu s nejvyšší intenzitou, tj bod č. 1 v Obr. 3 c).

### 3.2.3 Řádná ortogonální dekompozice

Tato metoda filtruje data tak, že vygeneruje tvary objevující se ve zkoumaném procesu, tzv. módy. V případě zpracování obrazových dat uvedených v předchozí kapitole byla tato metoda použita k nalezení charakteristických tvarů objevujících se v průběhu rozpadu kapaliny. Výsledné POD módy pro režim  $GLR = 2,5 \%$  jsou uvedeny na obrázku níže. Všechny POD módy ukazovaly na symetrické struktury, proto byly kvůli úspoře výpočetního času analyzovány pouze poloviční obrazy. Níže jsou uvedeny obrazové výsledky prvních pěti POD módů. Tyto módy jsou přítomny ve většině záznamů a jsou jednoduše pochopitelné z vizuálního hlediska.

Nultý mód reprezentuje statický tvar, který je ekvivalentem průměrného obrazu získaného zprůměrováním intenzity světla na pixelech přes danou sérii snímků. Další módy jsou pak seřazeny sestupně od nejčastěji vyskytovaných tvarů níže. Je zřejmé, že první, více časté módy, jsou charakteristické relativně jednoduchou stavbou. První a druhý mód poukazují na fázi, kdy dochází k prvotní deformaci kapaliny hned po průchodu výstupním otvorem trysky. Další módy, třetí a vyšší, vykazují komplexní struktury připomínající dvě a více bublin při expanzi.

Srovnání frekvenčního spektra získaného FFT analýzou z intenzity pixelu z původních nahrávek a POD analýzy byla vytvořena Tabulka 3, která shrnuje tyto hodnoty pro prvních 5 módů. Toto srovnání slouží k validaci POD metody.



Obr. 4 Výsledné POD módy pro zkoumané režimy GLR. Nultý mód, zde reprezentuje statický tvar, který je ekvivalentem průměrného obrazu. Další módy jsou seřazeny sestupně dle četnosti výskytu.

Tabulka 3. Dominantní frekvence získané FFT z původních nahrávek a POD analýzy.

GLR	Dominantní frekvence					
	Původní nahrávka	POD mód				
		1	2	3	4	5
%	kHz					
2.5	12.61	12.58	12.58	12.58	13.20	4.03
5	12.34	4.78	13.21	13.21	13.21	4.65
10	13.33	13.37	13.37	12.57	9.36	6.55

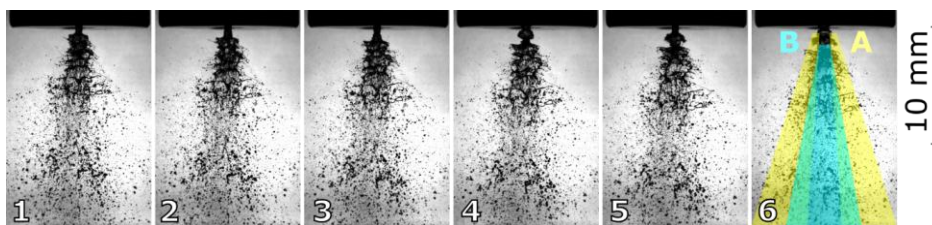
Jak je vidět z tabulky, charakteristické frekvence z původních nahrávek jsou velmi blízko charakteristickým frekvencím prvních třech POD módů. Výjimkou je první mód režimu  $GLR = 5\%$ . Zde, dle detailnějšího popisu z článku [68] vyplývá, že tento režim byl více zkreslen šumem. Avšak ve frekvenčním spektru se objevila druhá dominantní frekvence blízká frekvenci získané z původní nahrávky. Proto i v tomto případě dále uvažujeme, že charakteristické frekvence si odpovídají.

POD módy ukazují charakteristické tvary ve zkoumaném procesu. Je vidět, že kapalina se deformuje hned za otvorem trysky z průměru shodným s průměrem

výstupního otvoru až po okraj zkoumané oblasti. Takto deformovaná kapalná struktura dále pokračuje směrem od trysky, kde se v určité vzdálenosti vlivem nestabilit rozpadá. Na základě tohoto popisu a charakteristických tvarů objevujících se v POD módech byly následně filtrovány původní nahrávky. Filtrace vizuálních dat byla provedena s ohledem na modelové případy, které věrně kopírují tvary POD módů. Výsledkem byla série deseti případů expanze bublin, které byly dále detailně analyzovány pomocí software, který umožňuje sledování vybraných bodů, či křivek v obraze, tzv. liquid tracking method. Sledování deformace kapaliny a jeho vyhodnocení je uvedeno v následující kapitole.

### 3.2.4 Vyhodnocení vizuálních dat pomocí sledování deformace kapalinových struktur

Dvě různá nastavení kamery, tudíž i dvě různá rozlišení, byla použita pro popis mechanismu rozpadu kapaliny. Detailní záběry dvoufázového proudění v blízkosti trysky, jsou zobrazeny na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Tato série fotografií znázorňuje typický mechanismus deformace kapaliny vlivem expanze vzduchové bubliny. Nejvyšší záznamy byly pořízeny při režimu 2,5 % GLR a to proto, že při nízkém průtoku vzduchu má i vytékající kapalina nižší rychlost než v ostatních režimech. V průběhu výtoku kapaliny dochází k expanzi vzduchové bubliny a kapalina se deformuje v radiálním směru roztažením. Roztažení kapaliny se liší v závislosti na velikosti vzduchové bubliny uvnitř. Když kapalina dosáhne určitého rozměru, dále se neroztahuje, je vidět, že dojde k narušení kapaliny zespodu, což umožní vzduchu expandovat plně do okolní atmosféry.



Obr. 5 Série fotografií zachycující rozpad kapaliny u trysky a tvorbu spreje. Provozní režim  $GLR = 2,5 \%$ , snímkovací frekvence 30000 fps. Zóna A v obrázku č. 6 označuje, kde dochází k mechanismu rozpadu a), obdobně pak poukazuje zóna B na mechanismus b).

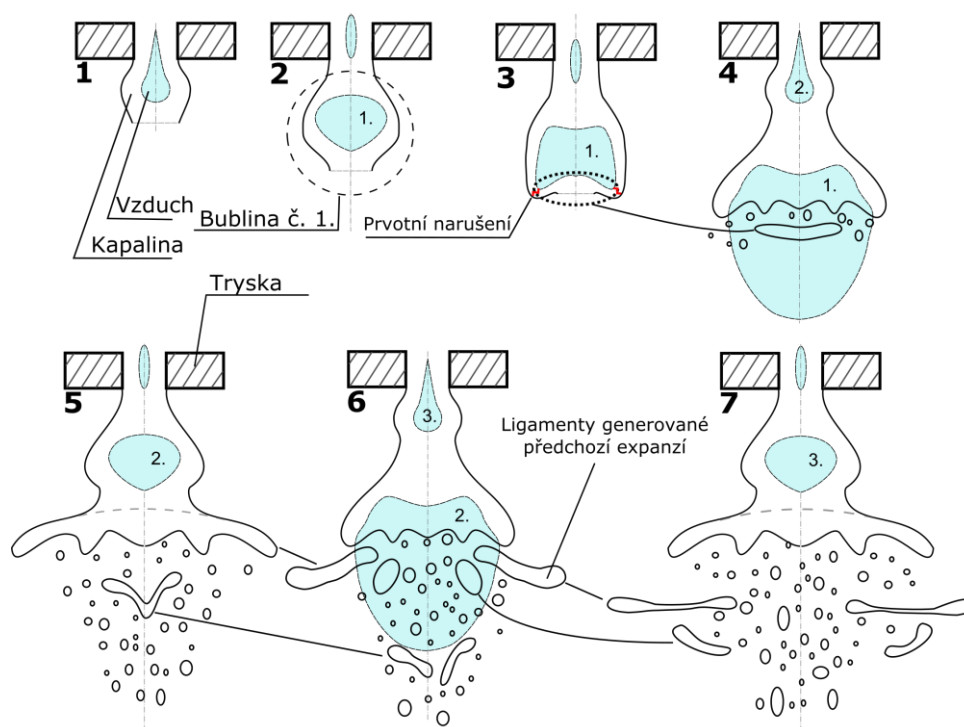
Pro zachycení procesů rozpadu kapaliny po primární deformaci bylo použito nastavení kamery zachycující výtok z trysky a tvorbu spreje, jak ilustruje Obr. 5. Ze záznamů v Obr. 4 a Obr. 5. bylo odvozeno, že k rozpadu kapaliny na jednotlivé kapky dochází pomocí dvou základních mechanismů rozpadu: **a)** rozpad kapaliny, který je zapříčiněn radiální deformací kapaliny a objevuje se právě na okrajích kapalinové stěny. Expandující vzduch deformuje kapalinu do podoby anulární kapalinové stěny, která se v průběhu deformace ztenčuje a tvaruje až do kritického bodu, kdy se objeví první narušení kapaliny a vzduch expanduje vně kapaliny. Vzniklé kapalinové struktury

a jednotlivé kapky se dále pohybují a jsou urychlovány rychle proudícím vzduchem. Tyto struktury jsou vlivem okolního proudění narušovány a mohou se dále rozpadat.

Mechanismus **b)** se objevuje při ose spreje, kdy vzniklé kapalinové struktury jsou urychlovány expandujícím vzduchem. Za předpokladu, že expandující vzduchové bubliny prochází výstupním otvorem opakovaně, dochází k interakci dvou po sobě jdoucích expandujících bublin. Tento mechanismus je odpovědný za rozpad kapalinových struktur hlavně kolem osy spreje. Z vizuálních dat byl vytvořen schematický náčrt (Obr. 5 č. 6), kde dochází k danému mechanismu rozpadu kapaliny. V následujících kapitolách je popsán vliv GLR na atomizaci a poté je uveden fyzikální popis mechanismu rozpadu kapaliny.

### 3.2.5 Fyzikální popis rozpadu kapaliny

Tento popis je založen na vizuálním zhodnocení obrazových záznamů a POD analýze, uvedených v předchozích kapitolách této práce. Pro popis fyzikálních procesů je nutné zavést několik zjednodušujících předpokladů: popis je omezen pouze na jevy objevující se nejčastěji, tj. odpovídající dominantním POD módům. Dále při popisu expanze vzduchové bubliny uvažujeme, že bublina má tvar koule a děj probíhá jako ideální adiabatická expanze. K určení bezrozměrných kritérií byl použit charakteristický rozměr tj. vnější průměr kapalinové struktury Obr. 6.



Obr. 6 Zjednodušený náčrt průběhu deformace kapaliny díky expanzi vzduchové bubliny. Sekvence obrázků ukazuje dvě po sobě jdoucí vzduchové expanze a jejich interakci. Náčrty byly odvozeny z tvarů dominantních POD módů a vysokorychlostních záznamů.

### 3.2.5.1 Zjednodušený popis mechanismu rozpadu kapaliny

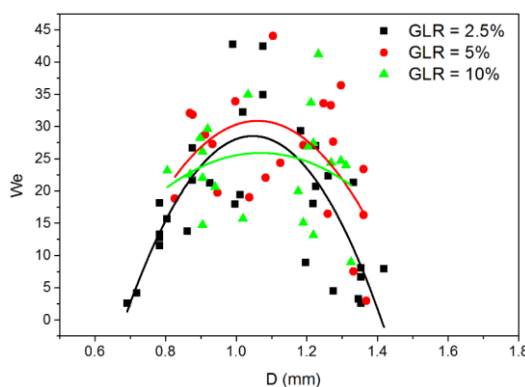
Schématický náčrt mechanismu rozpadu kapaliny u OUIL trysky je znázorněn na Obr. 6. Pro zachycení prvního mechanismu rozpadu kapaliny, a), je použito prvních pět stádií v obrázku. Ty odpovídají expanzi první vzduchové bubliny. Druhý mechanismus, b), se dá popsat následujícími obrázky 5-7, které ilustrují mechanismus interakce dvou po sobě jdoucích expanzí vzduchových bublin. Níže je uveden detailní popis mechanismu rozpadu kapaliny krok po kroku dle uvedeného náčrtu.

### 3.2.5.2 Analýza sil působících na kapalinu v průběhu její prvotní deformace

Následující popis je omezen na stav kapaliny, kdy vzduch je obklopen neporušeným kapalinovým obalem (stavy 1-4 v

Obr. 6). Z naměřených dat bylo určeno, že deformace kapaliny začíná na rozměru shodujícím se s rozměrem výstupního otvoru trysky.

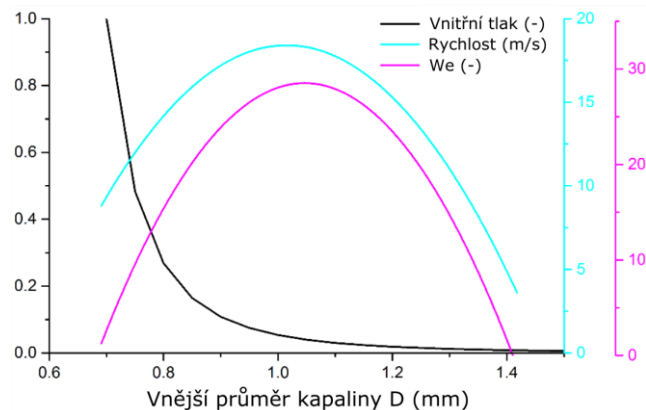
Pro popis setrvačných sil vůči silám povrchového napětí je použito Weberovo číslo, Obr. 7, ve vztahu k vnějšímu průměru kapaliny. Podobně jako rychlostní profily i Weberovo číslo má zhruba kvadratický průběh. V kombinaci s Ohnesorgeho číslem lze, dle [14] a [40] určit stádium, kterým kapalina prochází v průběhu rozpadu. Ohnesorgeho číslo se pro naše případy pohybuje v rozmezí od 3 do  $4,5 \times 10^{-3}$ . Hranice mezi stavy, kdy kapalina zůstane v celku a kdy se rozpadne je pro dané Oh číslo kritická hodnota Weberova čísla 11. V grafech níže však tuto hodnotu kapalina lehce překročí, aniž by se rozpadla. Rozpadá se však při překročení maximální hodnoty, a to mechanismem popsaným v předchozí kapitole. Proto k rozpadu kapaliny nedochází primárně díky silám odporu prostředí.



Obr. 7 Profily Weberova čísla v závislosti na průměru kapalinové struktury během deformace vlivem expanze vzduchové bubliny.

Pokud uvažujeme adiabatickou expanzi ideálního plynu ve tvaru koule, tak lze vykreslit závislost vývoje tlaku uvnitř expandující bubliny v závislosti na vnějším průměru kapaliny, viz

Obr. 8. Tlak uvedený v obrázku je přetlak vůči okolnímu prostředí. Tlak je uveden v relativním měřítku, maximum = 1, minimum = 0 (odpovídá tlaku okolí). Nejvýraznější tlakový spád je vidět na začátku deformace kapaliny, tj. na začátku expanze. To koresponduje s vizuálními záznamy a RMS obrázky, kde k nejvýraznější deformaci dochází právě u výstupního otvoru trysky.



Obr. 8 Vývoj tlaku uvnitř bubliny a Weberova čísla v závislosti na vnějším průměru a rychlosti deformace kapaliny.

Deformace kapaliny je způsobena expanzí vzduchu obklopeného kapalinovou stěnou. Prvotní narušení této kapalinové struktury se však neobjevuje v místě s maximální rychlostí s jejím rozměrem, jak tomu napovídá teorie Weberova čísla, ale objevuje se až poté, co kapalina dosáhne své maximální rychlosti, tj. i Weberova čísla. Za tímto bodem pokračuje dále směs zpomaleným pohybem, avšak deformace se stále vyvíjí vlivem setrvačnosti. To vede ke ztenčování kapalinového filmu a následně k jeho narušení, jak znázorňuje

Obr. 6 ve stavu 3. Při narušení kapalinového filmu dochází k šíření trhliny vlivem povrchového napětí.

### 3.3 VÝVOJ SPREJE GENEROVANÝ INVERZNÍ ŠUMIVOU TRYSKOU V PROSTORU

Pět axiálních rovin bylo zvoleno pro popis prostorového vývoje spreje. V každé pozici byl změřen jeden radiální profil, kde počet měřených bodů se odvíjel od šířky spreje, viz

Obr. 9. Pro rozlišení pohybu kapek a vzduchu bylo použito zjednodušení na bázi Stokesova čísla uvedeného v teoretické části práce. Pro popis dynamiky kapek ve spreji

byla pak zkoumána další pozice, 100 mm od trysky, kde je uvažováno, že sprej je vyvinutý a všechny procesy rozpadu kapaliny jsou ukončeny.

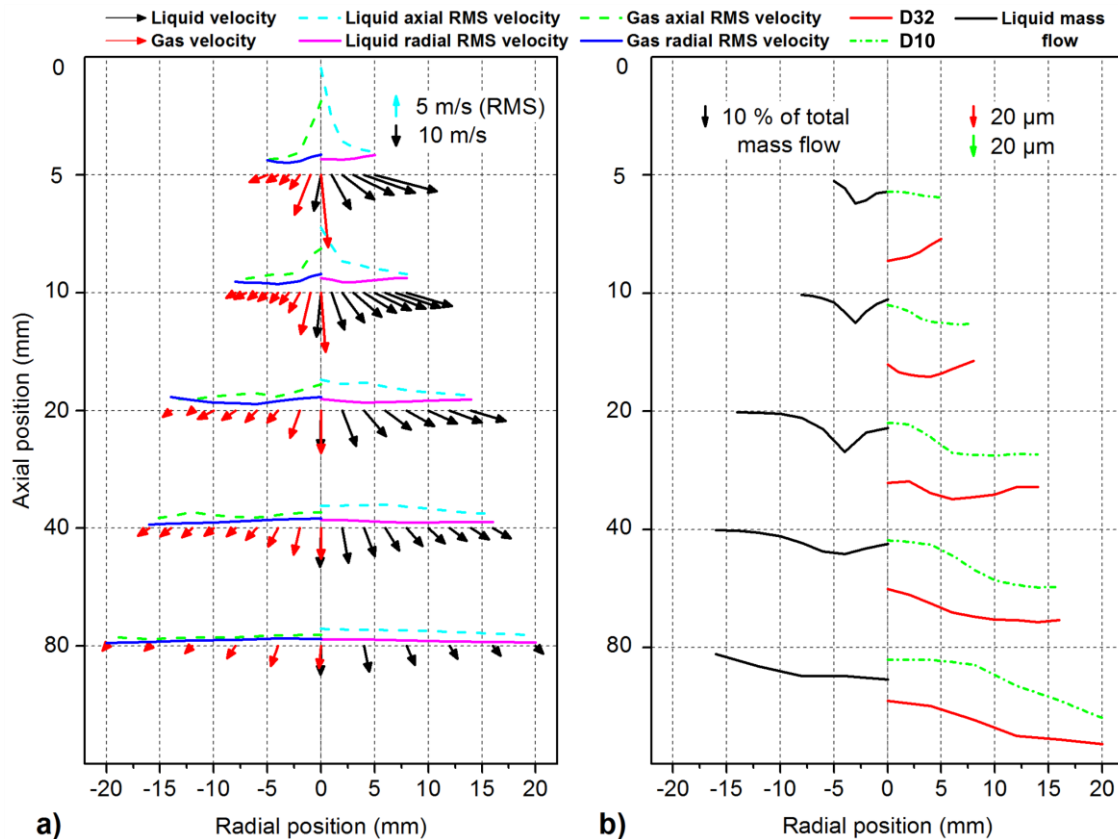
Z POD analýzy byly vyspecifikovány charakteristické tvary objevující se v průběhu primární atomizace. Tyto tvary odpovídají mechanismu, který se objevuje nejčastěji v průběhu tvorby spreje. V následující analýze předpokládáme, že výše uvedenými mechanismy rozpadu kapaliny se rozpadá většinové množství kapaliny. To je sledováno pomocí profilů hmotnostního průtoku kapaliny změřených pomocí PDA systému.

Jak už bylo zmíněno, kapalina se u daného typu trysky rozpadá dvěma mechanismy. Vrchol hmotnostního průtoku ve spreji poukazuje, že většina kapaliny neproudí ve středu, ale v určité vzdálenosti od hlavní osy spreje. Díky tomu, že zmiňované mechanismy rozpadu kapaliny se objevují buď při středu, nebo na okraji spreje, lze usuzovat, že právě jejich kombinace je zásadním mechanismem při narušování kapaliny. To znamená, že kapalina je nejdříve roztažena vlivem expanze vzduchové bubliny, což vede k prvotnímu narušení kapalného filmu. Poté dochází k šíření trhlin a urychlování vzniklých kapalinových struktur. Následující expandující bublina však rázově urychlí struktury kolem hlavní osy spreje a tím také zrychlí jejich rozpad. Na okraji spreje poté dochází k rozpadu mechanismem, který je obdobou mechanismu rozpadu ligamentů. Tyto struktury letí na okrajích spreje a pohybují se vlivem setrvačnosti relativně konstantní rychlostí. To je potvrzeno i fluktuálními profily rychlostí v obrázku níže. S rostoucí vzdáleností od trysky se kapalinové struktury natahují. Proto je na okrajích spreje rozhodující silou odpor prostředí dohromady s povrchovým napětím, které nutí struktury vibrovat.

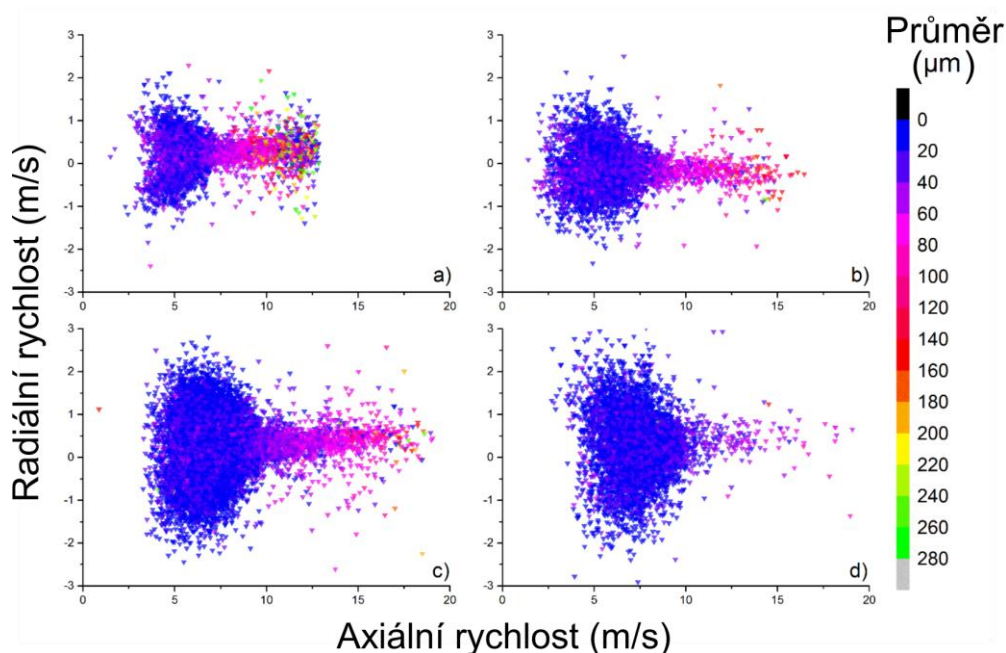
Dále od trysky, cca 40 mm a více, dochází k vyrovnání rychlostí napříč radiálním profilem. To může být přisouzeno interakci spreje s okolním prostředím, které nutí vzduch i samotné kapky zpomalovat. Rozdíl mezi rychlostí kapek a rychlostí vzduchu se s axiální vzdáleností zmenšuje, což potvrzuje výše uvedené tvrzení.

Závislost velikosti rychlosti kapek (radiální a axiální) je znázorněna na Obr. 10 pro čtyři provozní režimy trysky. Pro režim  $GLR = 2,5 \%$  je patrné, že jsou přítomny dva shluky částic v porovnání axiální i radiální rychlosti. Kapky malé zde mají menší axiální rychlost, zato kapky velké se pohybují mnohem rychleji. Radiální složka rychlosti je výrazná u malých kapek a klesá s rostoucím průměrem kapek a jejich axiální rychlostí. Dle poznatků z [65] a [26] je toto chování způsobeno tzv. overshooting phenomenon, který se běžně objevuje u dvoufázových trysek [57]. To znamená, že velké částice si udržují svou rychlost relativně konstantní, zatímco malé částice jsou silně ovlivňovány okolním vzduchem a tím i brzděny. Toto chování je způsobeno právě specifickým mechanismem rozpadu kapaliny, kdy dochází k explozím bublin v blízkosti trysky, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách. Vzduch pak způsobuje fluktuace ve spreji, které se mohou projevit i v oblasti plně vyvinutého spreje. V porovnání s režimy s vyšším hmotnostním tokem vzduchu lze sledovat trend, kdy je toto chování postupně utlumeno. Popisované dva charakteristické oblaky částic se redukují na jeden mrak menších částic v oblasti menších axiálních rychlostí, avšak s výraznější radiální složkou.

Extremem je režim  $GLR = 20 \%$ , kde vidíme pouze částice menší než  $60 \mu\text{m}$  s výraznou radiální složkou rychlosti. Malé kapky jsou zde přítomny z toho důvodu, že  $GLR$  je natolik vysoké, že vystupující směs obsahuje jen malé množství kapaliny, která se vlivem interakce s expandujícím vzduchem rozpadá na malé kapky. Chování kapek odpovídá Stokesově teorii, kdy malé částice jsou snadno unášeny okolním vzduchem. V tomto případě radiální složka rychlosti poukazuje na turbulentní chování vzduchu, případně kapek ve spreji.



Obr. 9 Znárodnění vývoje spreje v různých axiálních vzdálenostech od trysky: a) střední a flukuační rychlosti kapaliny a vzduchu, b) hmotnostní tok a profily středního průměru kapek a Sauterova průměru.



Obr. 10 Korelace axiální a radiální rychlosti s velikostí kapek pro bod ve středu spreje ve vzdálenosti 100 mm od trysky pro různé provozní režimy GLR: a) 2,5 %, b) 5 %, c) 10 %, d) 20 % [64].

### 3.4 SHRUTÍ POZNATKŮ Z DALŠÍ VÝZKUMNÉ ČINNOSTI

Na začátku výzkumné činnosti byl optimalizován PDA systém a použit pro měření charakteristik spreje. Toto mapování je nutné provést k ověření správného nastavení systému. Navíc byly provedeny srovnávací měření mezi dvěma PDA systémy, a to za účelem validace výsledků minulých prací. Publikace [66] poukazuje na fakt, že zkoumané PDA systémy měří shodně rychlosti, avšak přesnost měření velikosti kapek je pro oba systémy odlišná. Z analýzy vyplývá, že hlavním prvkem ovlivňujícím měření je hardware PDA systému. Novější systém má citlivější přijímací optiku, avšak díky ní detekuje i více signálů, které nakonec systém vyhodnotí jako neplatné. Proto byly pro srovnání s minulými pracemi použity předně rychlosti kapek. Velikosti kapek lze pak efektivně hodnotit při použití jednoho systému a za daného nastavení hlavně pro kvantitativní porovnání.

PDA data byla dále zpracována k popisu dynamiky kapek ve spreji, kde bylo nalezeno několik charakteristických jevů typických pro dvoumédiové trysky, které byly detailněji popsány v [28].

V rámci výzkumné činnosti autora byly provedeny návrhy celkem čtyř různých dvoumédiových trysek. Vyrobené trysky byly následně analyzovány při různých provozních režimech. Publikace [63] se věnuje porovnání trysek za použití dvou měřících metod: PDA a PIV. Bylo poukázáno na rozdíly mezi hmotnostními toky ve sprejích a na vliv návrhu trysky na mechanismus rozpadu, který byl hodnocen pomocí délky rozpadu. Ukázalo se, že metoda PIV dokáže kvantitativně zhodnotit rychlostní pole spreje, ale není vhodná pro režimy při nízkém GLR, kde je velký rozsah velikosti

kapek. To poté způsobuje zkreslení při vyhodnocování výsledků a některé husté části spreje nelze vyhodnotit vůbec. Metoda PDA se však osvědčila. Při měření hmotnostních toků ovšem nelze z měření stanovit přesnou hodnotu v daném bodě, a to kvůli chybám měření, které je obtížné kompenzovat. Nicméně tato metoda je vhodná pro porovnání hmotnostních toků v různých pozicích ve spreji.

V průběhu testů se objevovaly silné nestability, a to hlavně při nízkých GLR hodnotách. Stabilitě sprejů se věnuje publikace [61], která poukazuje na problematiku vnitřního proudění v tryskách a na nedostatky metody PDA. V případě silně nestabilních sprejů, kdy pozorujeme nesférické kapalinové struktury i ve větších vzdálenostech od trysky, může docházet k tomu, že jsou tyto útvary chybně zaznamenány, nebo jsou vyhodnoceny jako neplatné měření. Proto je nutné při měření dbát na to, že v měřené oblasti by měly být kulovité kapky. Tím je ovšem omezeno měření v blízkosti trysek, kde probíhá rozpad kapaliny. Ovšem i v plně vyvinutém spreji, typicky od 50 mm od trysky a více, může docházet k interakcím mezi jednotlivými kapkami. Dynamikou kapek v plně vyvinuté oblasti spreje se zabývají publikace [63, 64].

K popisu kolizí byla použita metoda založená na analýze PDA dat, pomocí které lze odhadnout míru kolizí na základě filtrování naměřených kapek dle jejich velikosti a rychlosti. Bylo zjištěno, že pokud tryska pracuje při bublinkovém výtoku, jsou kolize mnohem častější, a to kvůli silnějším fluktuacím rychlosti kapek a vzduchu ve spreji. Dále se v pracích autor zabývá dynamikou kapek obecně. Jsou zde popsány vztahy mezi rychlostí a velikostí pro různé pozice ve spreji. Navíc je zde analyzována přítomnost malých kapek, které mají rychlost řádově vyšší, než by měly mít dle teorie. Tento jev byl vysvětlen na bázi interakce malých kapek s velkými, které je mohou lokálně ovlivňovat. Tento jev byl dokumentován časovým záznamem z PDA měření.

Z výše uvedených prací a jejich závěrů pak vyplývá, že ke správnému popisu vývoje spreje a pochopení fyzikálních principů je nutné detailně popsat primární rozpad kapaliny v blízkosti u trysky. Tím, že trysky byly na počátku práce autora navrženy a testovány jako prototypy, bylo obtížné získat podklady, se kterými by bylo možné získané výsledky srovnat. Bylo proto nutné zmapovat sprej už od těsné blízkosti trysky, což bylo určitou dobu omezeno technikou, která by byla schopna zachytit tak rychlé jevy, jako je výtok z daných trysek. Publikace [65] se detailněji zaměřuje na vysokorychlostní vizualizace a jejich vyhodnocení. Byly popsány rozdíly mezi mechanismy rozpadu kapaliny u zkoumaných trysek ve vztahu k dynamice kapek ve spreji. Zásadním poznatkem je, že k rozprašování viskózních paliv za daných podmínek je nutné, aby tryska byla provozována v režimu anulárního vnitřního toku. Nejlépe fungovala tryska OUIL, která inherentně pracuje s anulárním vnitřním tokem. Překvapivě bylo ukázáno, že tato tryska pracuje s mechanismem rozpadu kapaliny založeným na expanzi vzduchových bublinek, který je shodný s mechanismem rozpadu kapaliny u šumivých trysek. OUIL tryska ovšem dokáže pracovat při nižších tlacích, nízkých hodnotách GLR a generovat přitom relativně stabilní sprej v porovnání se standardní šumivou tryskou. Bylo zjištěno, že bublinkový režim výtoku z trysky je

nejvhodnější pro zajištění jemného a stabilního spreje za daných podmínek. Proto i pro další výzkum byla zkoumána pouze tryska OUIL, a to hlavně proto, že přesný mechanismus rozpadu kapaliny při bublinkovém toku nebyl doposud dostatečně popsán ani pro standardní konfiguraci šumivé trysky. Přípravovaná publikace [68] sleduje detailně rozpad kapaliny těsně u trysky, popisuje silové působení pomocí bezrozměrných kritérií a je základem pro hlavní část výsledků předkládané disertační práce.

Výše uvedené poznatky a metodika byla následně aplikovány pro dvoumédiovou trysku typu airblast [57]. Spreje, generované tímto typem trysek, se liší hlavně vyššími rychlostmi a jinou velikostí kapek. Použitý systém PDA zde dosahoval svých limitů pro měření rychlostí. Publikace popisuje dynamiku kapek ve spreji obdobným způsobem, jako v předchozích pracích uvedených výše. Navíc, jsou zde testovány semi-empirické rovnice pro určení velikostního rozložení kapek ve spreji na základě vstupních údajů o pracovním režimu trysky a jejích geometrických rozměrech.

## ZÁVĚR

Na počátku výzkumné činnosti autora byly zkoumány celkem čtyři různé dvoumédiové trysky, což bylo i v předběžném zadání disertační práce. Trysky byly testovány v tzv. efektivních režimech, které jsou charakteristické nízkými hodnotami GLR a nízkými provozními tlaky. Tyto režimy jsou často doprovázeny nestabilním chováním sprejů, které vede k výraznému zhoršení kvality spreje. Z prací autora předkládané disertační práce, zabývajícími se výzkumem a porovnáním daných trysek, vyplývá, že pouze inverzní šumivá tryska (OIUL) je schopna pracovat za daných podmínek a generovat přitom relativně stabilní sprej. Toto zjištění je zajímavější v tom, že OUIL tryska pracuje inherentně v anulárním vnitřním toku pro široké spektrum provozních režimů. I když je konstrukce OUIL trysky shodná s šumivou tryskou (OUIG), vstupy pro vzduch a palivo jsou opačně připojené. Navíc OUIL tryska, oproti předpokladu, generuje bublinkový výtok, který je velmi podobný výtoku standardní OUIG trysky, který je u tohoto typu trysky podmíněn bublinkovým vnitřním tokem. Tento dvoufázový režim proudění je ovšem charakteristický pouze pro úzké spektrum provozních režimů šumivé trysky OUIG. Touto charakteristikou se OUIL tryska liší a nabývá tak výraznou výhodu oproti trysece OUIG.

Po provedení detailní rešerše bylo téma disertace následně upřesněno. Bylo určeno tzv. bílé místo vědní oblasti: analýza mechanismu rozpadu kapaliny u OUIL trysky. Na základě závěrů plynoucích z rešerše byly stanoveny hypotézy a cíle disertační práce. Samotná práce se zabývá experimentálním popisem rozpadu kapaliny u nově vyvinuté OUIL trysky a přináší tak i nový náhled na rozpad kapaliny u šumivých trysek.

K experimentálnímu výzkumu byly použity vysokorychlostní obrazové záznamy a fázový Dopplerovský analyzátor (PDA). Díky těmto technikám a následnému zpracování dat bylo možné popsat sprej od úplného začátku, až po jeho plně vyvinutou oblast. Ke zpracování dat byly použity metody ke kvantitativnímu vyhodnocení obrazů, a to standardní odchylka intenzity pixelu v obrazech (RMS obrázky), frekvenční analýza intenzity pixelu a řádná ortogonální dekompozice (POD). Tyto metody byly mezi sebou porovnány a částečně tak i validovány. Pro určení bezrozměrných kritérií při primárním rozpadu kapaliny byla použita metoda sledování deformací v obrazech. Pro zpracování PDA dat bylo použito bezrozměrné kritérium, Stokesovo číslo ( $Stk$ ), pomocí kterého bylo možné sledovat vlastnosti pohybu kapaliny a vzduchu ve spreji. Dále byly analyzovány korelace rychlosti a velikosti kapek, průměrné a fluktuální, hmotnostní toky a další veličiny popisující dynamiku spreje. Právě kombinace použitých experimentálních a vyhodnocovacích metod umožňuje provést detailní analýzu spreje a z pohledu současného stavu poznání byla tato kombinace použita poprvé. Pomocí tohoto postupu bylo možné podpořit informace získané o primárním rozpadu kapaliny a rozšířit je tak i na vliv na parametry výsledného spreje.

Analýza primárního rozpadu kapaliny ukazuje, že se kapalina rozpadá dvěma odlišnými mechanismy rozpadu, tj. mechanismy a) a b). První zmiňovaný se odehrává po částečné expanzi vzduchu na okrajích deformované kapaliny. Díky ztenčování

kapalinové stěny dojde k jejímu protržení. Narušení se pak šíří díky povrchovému napětí a setrvačnosti pohybu kapaliny. Vznikají tak ligamenty, které se následně rozpadají na jednotlivé kapky. Druhý mechanismus, b), se odehrává při hlavní ose spreje. Je řízen expandujícím vzduchem, který urychluje kapalinové struktury. Ty se vlivem odporových sil narušují, rozvibrují a následně rozpadají. Zásadní je zde interakce dvou po sobě jdoucích bublin, které při expanzi interagují. Těmito závěry lze pak odpovědět na hypotézy kladené v kapitole 1. Nejdřív uvedeme vědeckou otázku, která byla definována následovně:

*„Jaké síly dominují při tvorbě spreje šumivé trysky v oblasti primární a sekundární atomizace při provozu trysky s bublinkovým vnitřním tokem?“*

Na základě definované vědecké otázky autor předkládá následující pracovní hypotézy:

*„Expanze vzduchových bublin, vystupujících z šumivé trysky, je zodpovědná za primární rozpad kapaliny.“*

Hypotéza potvrzena a rozšířena o detailní popis prvotní deformace a inicializace narušení kapaliny. Kapalina je narušována zespodu, kde má tendenci obalit se kolem kapalinového svazku, který se nachází před expandující bublinou. Vlivem deformace se specifickým průběhem dojde ke ztenčení kapalného filmu, jež inicializuje jeho narušení. Další expanze pak urychluje kapalinové struktury primárně v axiálním směru při hlavní ose spreje.

*„Sekundární rozpad kapaliny je řízen interakcí kapalinových útvarů s okolním vzduchem. Hlavní silou je zde odpor prostředí.“*

Hypotéza byla částečně potvrzena. Z popsaných dvou mechanismů rozpadu kapaliny vyplývá, že po prvotním narušení kapaliny dojde k šíření trhlin vlivem povrchového napětí. Tím vznikají ligamenty, jejichž stabilita je ovlivňována setrvačností pohybu a odporem prostředí, mechanismus a). Řídící silou při rozpadu ligamentu jsou pak síly od povrchového napětí. V případě rozpadu kapalinových struktur uvnitř spreje, mechanismus b), je rozpad způsoben interakcí kapaliny s prudce expandujícím vzduchem. V tomto případě se jedná o rozpad vlivem odporu prostředí.

Z výše uvedených závěrů lze tvrdit, že cíle práce byly naplněny. Výsledky práce byly doposud publikovány v několika člancích recenzovaných časopisů a ve dvou člancích, které vyšly v impaktovaném časopise. Další dva impaktované články jsou v procesu publikování, jejich plánovaný termín vydání je na konci roku 2017 a druhý v roce 2018. Budoucí výzkum tématu předkládané práce může být shrnut do dvou oblastí:

1. Výzkum využití principu směšování trysky OUIL pro širší rozsah provozních režimů (hlavně provozních tlaků) a různých kapalin s vyšší viskozitou

případně i pro návrhy dalších nových typů trysek. Pro nasazení trysky OUIL v reálné spalovací komoře budou nutné testy i se spalováním paliva v provozu.

2. Použitá metodika ukazuje na potenciál, jak pracovat s vizuálními daty stochastických jevů, jako je například rozpad kapaliny. Pomocí tohoto přístupu je možné sledovat hlavní jevy ve zkoumaných procesech. Avšak, díky tomu, že tento postup byl použit poprvé v dané oblasti, je nutné jej verifikovat a případně doplnit o další postupy a metody verifikace. Známým úskalím metody PDA je určení její přesnosti měření velikosti kapek.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BIROUK, M. AND N. LEKIC, Liquid Jet Breakup In Quiescent Atmosphere: A review. *Atomization and Sprays*, 2009, 19(6), 501-528.
- [2] BERKOOZ, G., P. HOLMES AND J. L. LUMLEY The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1993, 25(1), 539-575.
- [3] BUCKNER, H. N. AND P. E. SOJKA, Effervescent Atomization of High-Viscosity Fluids: Part I. Newtonian Liquids 1991-09-01 1991, 1(3), 239-252.
- [4] CARVALHO, I. S. AND M. V. HEITOR, Liquid film break-up in a model of a prefilming airblast nozzle. *Experiments in Fluids*, May 1998, 24(5-6), 408-415.
- [5] CATLIN, C. A. AND J. SWITHENBANK, Physical processes influencing effervescent atomizer performance in the slug and annular flow regimes. *Atomization and Sprays*, Sep-Oct 2001, 11(5), 575-595.
- [6] CHIN, J. S. AND A. H. LEFEBVRE, Flow Patterns in Internal-Mixing, Twin-Fluid Atomizers 1993-12-01 1993, 3(4), 463-475.
- [7] CHIN, J. S. 1995, Effervescent atomization and internal mixing air-assisted atomization;
- [8] DUMOUCHEL, C., On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. *Experiments in Fluids*, Sep 2008, 45(3), 371-422.
- [9] DUMOUCHEL, C., J. COUSIN AND K. TRIBALLIER Experimental analysis of liquid-gas interface at low Weber number: interface length and fractal dimension. *Experiments in Fluids*, Oct 2005a, 39(4), 651-666.
- [10] DUMOUCHEL, C., J. COUSIN AND K. TRIBALLIER Experimental analysis of liquid-gas interface at low Weber number: Interface length and fractal dimension. *Experiments in Fluids*, 2005b, 39(4), 651-666.
- [11] DURINA, L., Measurement of SprayCharacteristic Using Optical Measurement Methods. Master's, Brno University of Technology, 2012.
- [12] EDWARDS, C. F. AND K. D. MARX, Multipoint Statistical Structure of the Ideal Spray, Part I: Fundamental Concepts and the Realization Density. 1995-10-01 1995, 5(4&5), 435-455.
- [13] EGGERS, J. AND E. VILLERMAUX, Physics of liquid jets. *Reports on Progress in Physics*, Mar 2008, 71(3), 79.
- [14] FAETH, G. M., L. P. HSIANG AND P. K. WU, Structure and breakup properties of sprays. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(Suppl), 99-127.
- [15] Ferreira, 2009, Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils;
- [16] GADGIL, H. AND B. RAGHUNANDAN, Effect of Air Injection Configuration on Characteristics of Effervescent Sprays. *Journal of Propulsion and Power*, JUL-AUG 2011 2011a, 27(4), 925-928.
- [17] GADGIL, H. P. AND B. N. RAGHUNANDAN, Some features of spray breakup in effervescent atomizers. *Experiments in Fluids*, Feb 2011b, 50(2), 329-338.
- [18] GROUT, S., C. DUMOUCHEL, J. COUSIN AND H. NUGLISCH Fractal analysis of atomizing liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, 33(9), 1023-1044.
- [19] GULDENBECHER, D. R., C. LÓPEZ-RIVERA AND P. E. SOJKA, Secondary atomization. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(3), 371-402.
- [20] CHEN, H., D. L. S. HUNG, M. XU AND J. ZHONG ANALYZING THE CYCLE-TO-CYCLE VARIATIONS OF PULSING SPRAY CHARACTERISTICS BY MEANS OF THE PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION 2013-09-24 2013, 23(7), 623-641.
- [21] CHEN, H., D. L. S. HUNG, M. XU, H. ZHUANG, et al. Proper orthogonal decomposition analysis of fuel spray structure variation in a spark-ignition direct-injection optical engine. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(4).
- [22] IBRAHIM, A. A. AND M. A. JOG, Nonlinear instability of an annular liquid sheet exposed to gas flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(7), 647-664.
- [23] INAMURA, T. AND M. SHIROTA, Effect of velocity profile of impinging jets on sheet characteristics formed by impingement of two round liquid jets. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 60(0), 149-160.
- [24] JEDELSKY, J. AND M. JICHA, Unsteadiness in effervescent sprays: A new evaluation method and the influence of operational conditions. *Atomization and Sprays*, 2008 2008, 18(1), 49-83.
- [25] JEDELSKY, J. AND M. JICHA, Energy conversion during effervescent atomization. *Fuel*, SEP 2013 2013, 111, 836-844.
- [26] JEDELSKY, J. AND M. JICHA, Droplet dynamics in internally mixed twin-fluid spray. *In WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2014, vol. 82, p. 227-238.

## Seznam použitých Zdrojů

---

- [27] JEDELSKY, J., M. JICHA, J. SLAMA AND J. OTAHAL, Development of an Effervescent Atomizer for Industrial Burners. *Energy & Fuels*, DEC 2009 2009, 23, 6121-6130.
- [28] JEDELSKÝ, J., M. ZAREMBA, M. MALÝ AND M. JÍCHA, Characteristics of droplet motion in effervescent sprays. *In EPJ Web of Conferences*. 2014, vol. 67.
- [29] JOSEPH, D. D., J. BELANGER AND G. S. BEAVERS, Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed airstream. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25(6-7), 1263-1303.
- [30] KONSTANTINOV, D., R. MARSH, P. BOWEN AND A. CRAYFORD, Effervescent Atomization for industrial Energy-Technology Review. *Atomization and Sprays*, 2010 2010, 20(6), 525-552.
- [31] LEFEBVRE, A., Atomization and Sprays. Edtion ed.: Taylor & Francis, 1988. ISBN 9780891166030.
- [32] LI, Z. H., WU Y. X., CAI C. R., ZHANG H., Mixing and atomization characteristics in an internal-mixing twin-fluid atomizer. *Fuel*, Jul 2012, 97, 306-314.
- [33] LIN, S. P., Breakup of Liquid Sheets and Jets. Edtion ed.: Cambridge University Press, 2003. ISBN 9781139439787.
- [34] LIU, M., Y. F. DUAN AND T. N. ZHANG, Evaluation of effervescent atomizer internal design on the spray unsteadiness using a phase/Doppler particle analyzer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Sep 2010, 34(6), 657-665.
- [35] LIU, Z. AND R. D. REITZ, An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops. *International Journal of Multiphase Flow*, Aug 1997, 23(4), 631-650.
- [36] LOZANO, A., F. BARRERAS, G. HAUKE AND C. DOPAZO, Longitudinal instabilities in an air-blasted liquid sheet. *Journal of Fluid Mechanics*, Jun 2001, 437, 143-173.
- [37] LUONG, J. T. K. AND P. E. SOJKA Unsteadiness in effervescent sprays. *Atomization and Sprays*, Jan-Feb 1999, 9(1), 87-109.
- [38] LUMLEY, J. L. The Structure of Inhomogeneous Turbulent Flows. In A.M. YAGLOM AND V.I. TATARSKI eds. Atmospheric turbulence and radio propagation. Nauka, 1967, p. 166-178.
- [39] MLKVIK, M., ZAREMBA M. AND JEDELSKÝ. J., Investigation of the Spray Flow Generated by the Y-type Atomizer. *In Proceedings of the Engineering Meachnics, Svatka, Czech Republic*2014.
- [40] MLKVIK, M., P. STÄHLE, H. P. SCHUCHMANN, V. GAUKEL, et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 77, 19-31
- [41] MANSOUR, A. AND N. CHIGIER, Dynamic behavior of liquid sheets. *Physics of Fluids A*, 1991, 3(12), 2971-2980.
- [42] Mullinger, 1974, The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers
- [43] NASA. Dragg of a sphere. *grc.nasa.gov* [online]. [cit. 2014.09.30]. Dostupné z: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/dragosphere.html>
- [44] PETERSEN, F. J., O. WORTS, T. SCHAEFER AND P. E. SOJKA, Design and atomization properties for an inside-out type effervescent atomizer. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 2004, 30(3), 319-326.
- [45] QIAN, L., J. LIN AND H. XIONG, A fitting formula for predicting droplet mean diameter for various liquid in effervescent atomization spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(3), 586-601.
- [46] ROESLER, T. C. AND A. H. LEFEBVRE., Studies on Aerated-Liquid Atomization. *In American Society of Mechanical Engineers* (Paper). 1987.
- [47] SALLAM, K. A., Z. DAI AND G. M. FAETH, Liquid breakup at the surface of turbulent round liquid jets in still gases. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28(3), 427-449.
- [48] SANTANGELO, P. J. AND P. E. SOJKA, A holographic investigation of the near-nozzle structure of an effervescent atomizer-produced spray. *Atomization and Sprays*, 1995, 5(2), 137-155.
- [49] SANTOLAYA, J., L. AISA, E. CALVO, I. GARCIA, et al. Analysis by droplet size classes of the liquid flow structure in a pressure swirl hollow cone spray. *Chemical Engineering and Processing*, JAN 2010 2010, 49(1), 125-131.
- [50] SEN, D., M. A. BALZAN, D. S. NOBES AND B. A. FLECK, Bubble formation and flow instability in an effervescent atomizer. *Journal of Visualization*, May 2014, 17(2), 113-122.
- [51] SETTLES, G. S. Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. Edtion ed.: Springer Berlin Heidelberg, 2001. ISBN 9783540661559.
- [52] Song, 1996, Study of atomization mechanism of gas/liquid mixtures flowing through Y-jet atomizers
- [53] SOVANI, S., P. SOJKA AND A. LEFEBVRE, Effervescent atomization. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(4), 483-521.

## Seznam použitých Zdrojů

---

- [54] SHEPARD, G. T., Bubble Size Effect on Effervescent Atomization. UNIVERSITY OF MINNESOTA, 2011.
- [55] SCHRÖDER, J., SCHLENDER, M., SOJKA, P.E., GAUKEL, V., SCHUCHMANN, H.P., 2010. Modeling of drop sizes from effervescent atomization of gelatinized starch suspensions. *ILASS Europe 2010*, Brno, Czech Republic
- [56] Tamaki, 2005, Atomization of high-viscous liquid jet by internal mixing twin-fluid atomizer
- [57] URBÁN, A., M. ZAREMBA, M. MALÝ, V. JÓZSA, et al. Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 95, 1-11.
- [58] WAHONO, S., D. HONNERY, J. SORIA AND J. GHOJEL, High-speed visualisation of primary break-up of an annular liquid sheet. *Experiments in Fluids*, Mar 2008, 44(3), 451-459.
- [59] YULE, A. J. AND J. J. DUNKLEY, Atomization of melts for powder production and spray deposition. Edition ed.: Oxford University Press, 1994. ISBN 9780198562580.
- [60] ZAREMBA, M., M. MALÝ, J. JEDELSKÝ AND M. JÍCHA, Comparison of twin-fluid atomizers using a phase Doppler analyser. *AIP Conference Proceedings*, 2014a, 1608(1), 272-275.
- [61] ZAREMBA, M., M. MLKVIK, M. MALÝ, J. JEDELSKÝ, Evaluation of Steadiness and Drop Size Distribution in Sprays Generated by Different Twin-Fluid Atomizers. In *Proceedings of the Experimental Fluid Mechanics Český Krumlov*, Czech Republic 2014.
- [62] ZAREMBA M., Influence of Operational Conditions on Spray Characteristic of Twin-Fluid Atomizers, Master's, Brno University of Technology, 2013.
- [63] ZAREMBA, M., M. MLKVIK, M. MALÝ, J. JEDELSKÝ, Quantitative and Qualitative Comparison of Internally Mixed Twin-Fluid Atomizers, In *Proceedings of the ILASS - Europe*, Bremen, Germany 2014.
- [64] ZAREMBA M., M. M., MLKVIK M., JEDELSKÝ J., JÍCHA M. Droplet dynamics in sprays generated by four different twin-fluid atomizers. In *Proceedings of the Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Sarajevo, Bosna a Hercegovina, 15-18 September 2015 Begell House Inc., 2015, 649-652.
- [65] ZAREMBA, M., L. WEIß, M. MALÝ, M. WENSING, J. JEDELSKY, M. JICHA, Low-pressure twin-fluid atomization: Effect of mixing process on spray formation. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 89, 277-289.
- [66] ZAREMBA, M., M. MALÝ, J. JEDELSKÝ AND M. JÍCHA. Comparison of different configurations of Phase Doppler Analyser. In *EPJ Web of Conferences*. 2016, vol. 114.
- [67] ZAREMBA, M.; MLKVIK, M.; MALÝ, M.; JEDELSKÝ, J.; JÍCHA, M. Study of the Primary Breakup in Twin-Fluid Atomizers with regard to the Droplet Interaction. *ICLASS 2015*. 2015. s. 107-107.
- [68] ZAREMBA, M., J. KOZAK, M. MALY, L. WEISS, P. RUDOLF, J. JEDELSKY, M. JICHA, An Experimental Analysis of the Spraying Processes in Improved Design of Effervescent Atomizer. 2017, Manuscript submitted for publication.
- [69] ZHAO, H., LIU H. F., CAO X. K., LI W. F., Breakup characteristics of liquid drops in bag regime by a continuous and uniform air jet flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(5), 530-534.