

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 613

ISSN 1213-418X

Jan Jedelský

**ROZSTŘIK KAPALIN –
SOUČASNÉ PŘÍSTUPY A METODY
VE VÝZKUMU, CHARAKTERIZACI A NÁVRHU
TLAKOVÝCH VÍŘIVÝCH TRYSEK**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Energetický ústav

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

**ROZSTŘIK KAPALIN – SOUČASNÉ PŘÍSTUPY
A METODY VE VÝZKUMU, CHARAKTERIZACI
A NÁVRHU TLAKOVÝCH VÍŘIVÝCH TRYSEK**

LIQUID ATOMIZATION – PRESENT APPROACHES
AND METHODS IN RESEARCH, CHARACTERISATION
AND DESIGN OF PRESSURE-SWIRL ATOMIZERS

TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

rozstřík kapalin, tlakové vířivé trysky, vlastnosti spreje, atomizační účinnost, rozstříkovací trysky, dvoufázové proudění, optická diagnostika

KEYWORDS

liquid atomization, pressure-swirl atomizer, liquid breakup, spray characteristics, atomization efficiency, two-phase flow, optical diagnostics

© Jan Jedelský, 2018

ISBN 978-80-214-5675-4

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1. ÚVOD	6
2. KONCEPCE PRACÍ.....	7
3. NĚKTERÉ ASPEKTY ROZPRAŠOVÁNÍ KAPALIN METODOU TVT.....	7
3.1. Rozprašovací účinnost	8
3.2. Procesy probíhající v tryskách	9
3.3. Tvorba a rozpad kapalného filmu	10
3.4. Platnost dostupných podkladů	12
4. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ROZSTŘIK KAPALINY	13
4.1. Regulační charakteristiky trysek	14
4.2. Reologické vlastnosti kapaliny	15
4.3. Geometrické parametry trysky	16
5. VNITŘNÍ PROUDĚNÍ	19
6. INTERAKCE MEZI KAPKAMI A OKOLNÍM PROSTŘEDÍM.....	20
6.1. Interakce mezi kapalinou a okolím	21
6.2. Kolize mezi kapkami	21
7. PŘÍSTUPY PŘI VÝZKUMU SPREJŮ A SOUVISEJÍCÍCH JEVŮ	23
7.1. Experimentální metody	23
7.1.1. Dopplerovská anemometrie	23
7.1.2. Vysokorychlostní vizualizace	25
7.1.3. Obrazová anemometrie	26
7.1.4. Modely trysek a modelové kapaliny	26
7.2. Význam a využití numerických simulací.....	29
7.3. Současné trendy a formulace nových cílů ve výzkumu.....	30
8. ZÁVĚR.....	31
SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ.....	32
ABSTRACT	37

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

doc. Ing. Jan JEDELSKÝ, Ph.D.

Narozen: 19. 7. 1971 ve Valašském Meziříčí

Vzdělání a akademická kvalifikace:

- 1994, strojní inženýr, Fakulta strojní VUT v Brně, obor Dopravní a manipulační technika
- 2002, Ph.D., Fakulta strojní VUT v Brně, obor Konstrukční a procesní inženýrství
- 2013, doc., Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Konstrukční a procesní inženýrství



Přehled zaměstnání:

- 1997–2001, asistent, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, Odbor spalovacích motorů, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně
- 1999–2012, odborný asistent, Energetický ústav, odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
- 2013–dosud, docent, Energetický ústav, FSI, VUT v Brně

Pedagogická činnost:

- 2005–dosud, školitel/specialista doktorandského studia (3× obhájená Ph.D, 2× aktivní Ph.D student)
- 2014–dosud, garant předmětu, přednášky předmětu Hluk a vibrace (2.r. NMS)
- v magisterském studijním programu: cvičení předmětu Zkoušení spalovacích motorů (5.r. 1997–1998), Ročníkový projekt (4.r. 2000–2002, 5.r. 1999–2001), Teorie spalovacích motorů (4.r. 2001–2002), 2017–dosud, cvičení předmětu Experimentální metody 2 (2.r. NMS)
- v bakalářském studijním programu: přednášky a cvičení předmětu Pohony a motory (3.r. 2001–2003), cvičení předmětu Termomechanika (3.r. 2004–2013)
- 1998–dosud, vedení 21 obhájených diplomových prací, 19 bakalářských prací
- spoluautor 3 elektronických výukových materiálů

Vědeckovýzkumná činnost:

- 1994–1998, Stirlingův motor (konverze solární energie, nízkoteplotní SM)
- 1995–2001, Zážehové spalovací motory (vývoj metodiky pro detekci zdrojů hluku a vibrací, vysokotlaká indikace, snižování emisí, deformace klikové hřídele, teplotní deformace bloku motoru, dlouhodobé zkoušky motoru)
- 1998–dosud, experimentální mechanika tekutin, jedno- a vícefázové soustavy se zaměřením na: atomizační trysky, dvou-fázový tok kapalina–plyn; aerosoly a spreje, výzkum proudění plynů, aplikace laserových diagnostických metod PIV–PLIF, FDA
- 2007–dosud, příprava a charakterizace pevných a kapalných aerosolů, transport a depozice částic v dýchacím traktu člověka
- Spolupráce na 18 grantových projektech, GAČR, EUREKA, COST, FRVŠ, KONTAKT, TAČR
- 5 českých patentů, 4 užité vzory
- Vedoucí Laboratoře sprejů a Laboratoře proudění tekutin
- H-index 8, Citace publikací podle SCOPUS (bez autocitací) 120, Citace publikací podle ISI Web of Knowledge (bez autocitací) 141

- RESEARCHER ID: A-9224-2013, ORCID ID: 0000-0002-1268-8434, SCOPUS ID: 23090535800
- https://www.researchgate.net/profile/Jan_Jedelsky

Univerzitní a mimouniverzitní aktivity

- 1999–2005, člen akademického senátu FSI VUT v Brně
- 2002–dosud, člen ILASS Europe (Institute for Liquid Atomization and Spray Systems)
- 2011–2017, člen výkonného výboru ILASS Europe
- 2009–dosud, člen České aerosolové společnosti
- 2007–dosud, recenzent 27 odborných, převážně impaktovaných časopisů
<http://www.reviewpage.com/Jan-Jedelsky->
- 2013–2017, člen hodnotícího panelu P101 – Strojírenství, Grantová agentura ČR
- 2015–2017, člen oborové komise technických věd, Grantová agentura České republiky

Spolupráce s průmyslem (projekty aplikovaného a smluvního výzkumu):

ERC GmbH Germany, Philip Morris Products S.A., První brněnská strojírna Třebíč, a.s., TTS eko s.r.o. Třebíč, Evector, spol. s r.o., Škoda auto a.s., Busch Vakuum s.r.o., BLOCK a. s., B & M InterNets, s.r.o. VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s., Honeywell, spol. s r.o., První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s., EKOL spol. s r.o., MVB OPAVA CZ s.r.o., ViskoTeepak s.r.o., Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., SÚJCHBO

1. ÚVOD

Při aplikaci kapalin je často žádoucí dosáhnout velkého sdíleného povrchu kapaliny vůči okolí. Důležité je to při procesech, kdy je nutná mechanická, tepelná či chemická interakce mezi kapalným materiálem a prostředím. Velmi oblíbenou a široce aplikovanou metodou k tomuto účelu je rozstřík kapalin pomocí trysek, atomizerů, injektorů, nebulizerů a podobných zařízení

K aplikacím s mechanickou interakcí patří nanášení kapalin na povrchy (povlakování, barvení, mazání, aplikace chem. prostředků), přenos hybnosti z kapaliny do plynu (strhávání a transport plynů) strhávání částic z objemu plynu a povrchů (čištění plynů, ostřík skel, výkovků, čištění nádrží) nebo transport kapalin (inhalace léčiv). Tepelné interakce zahrnují odpařování a kondenzaci kapalin (tvorba směsí pro spalování, vlhčení vzduchu, sušení produktů), přenos tepla mezi kapalinou a plynem nebo povrchy (chlazení vzduchu či spalin, hašení požárů). Rozstříkovací trysky se užívají i pro přípravu malých částic tam, kde požadujeme jejich určitou velikost (kalibrace přístrojů, rozstřík kovů). Tryska je malou součástí díla, ale velmi ovlivňuje jeho funkcionalitu a technickou hodnotu, např. u motorů provozní náklady, účinnost a emise spalin.

V průmyslových aplikacích jsou využívány zejména tlakové vířivé trysky (TVT). Slouží k dodávání paliva do spalovacích komor stacionárních hořáků i turbínových motorů či válců pístových motorů, pro chlazení, v potravinářství, při nanášení barev, rozstříku hnojiv a zalévání, aplikaci chemikálií v domácnostech atd. Pokročilejší verzí jsou TVT s obtokem (TVTO). Autor řešil několik aplikací TVT a TVTO (TVTO se zlepšenými atomizačními vlastnostmi pro retrofity prům. hořáků – ERC GmbH Germany, Vývoj vstříkovací trysky s širokým regulačním rozsahem pro proudový motor – PBS a.s. Velká Bíteš, Návrh trysky pro mazání nárazecích kol – ViskoTeepak s.r.o., PBS Třebíč, a.s. – projekt Eureka Burner, Návrh vstříkovacích uzlů pro bioplynové stanice – Vítkovice Power Eng. a.s., TVT pro parní dochlazovače – EKOL spol. s r.o.). Potřeba dalšího vývoje TVTO vedla autora k řešení několika projektů základního a aplikovaného výzkumu. Tato práce je proto věnována některým aspektům TVTO z pohledu jejich výzkumu, inovací a dalšího vývoje a představuje průřez autorovy práce v dané oblasti.

Základní principy tvorby kapalných filmů a kapek jsou známy. Vzhledem ke komplexnosti jevů při tvorbě spreje je ale nelze přímo aplikovat v praxi a pro každý případ je třeba vybrat z dostupných řešení, např. z katalogu výrobců trysek, nebo při specifickém zadání trysku vyvinout a otestovat. Současný vývoj trysek je motivován požadavky na velký rozsah provozních režimů a možnosti regulace strojů, tedy i rozsah průtoků tryskou a případně schopnost rozprašovat i za velmi nízkých průtoků. Konkurenceschopnost některých zařízení závisí na kvalitě spreje či schopnosti rozprašovat znečištěná a velmi viskózní média. Snižování nákladů na provoz a údržbu zařízení vyžadují vysokou atomizační účinnost a spolehlivost trysky. Další motivací výzkumu je zavádění emisních limitů v letecké a námořní dopravě. Výzvou je záměna konvenčních paliv za alternativní (bio a odpadní s odlišnými vlastnostmi), aniž by bylo nutné provádět koncepční či konstrukční úpravy spalovacích zařízení. Pro vysokou kvalitu procesů je nutná přesná kontrola parametrů spreje, nejen průměrné velikosti kapek a průtoku kapaliny, ale často i jejich velikostního spektra, rychlosti, resp. hybnosti nebo úhlu kužele spreje (ÚKS). Tyto údaje nejsou s dostatečnou přesností běžně dostupné a nelze je zjistit jinak než experimentálně. Nové diagnostické metody dávají kvalitativně lepší poznatky než starší přístupy, čímž usnadňují a urychlují vývoj.

Současná úroveň nástrojů numerického modelování (CFD) a výkon běžně dostupné výpočetní techniky neumožňuje a dlouho nebude umožňovat simulaci všech dějů relevantních pro stanovení vlastností spreje. Řešením je použití dostupných vývojových metodik a případně vlastní vývoj trysek. Ten je z důvodu komplexnosti celého procesu tvorby spreje převážně experimentálního charakteru, přičemž v posledních 15 letech lze vnitřní proudění již efektivně modelovat v CFD.

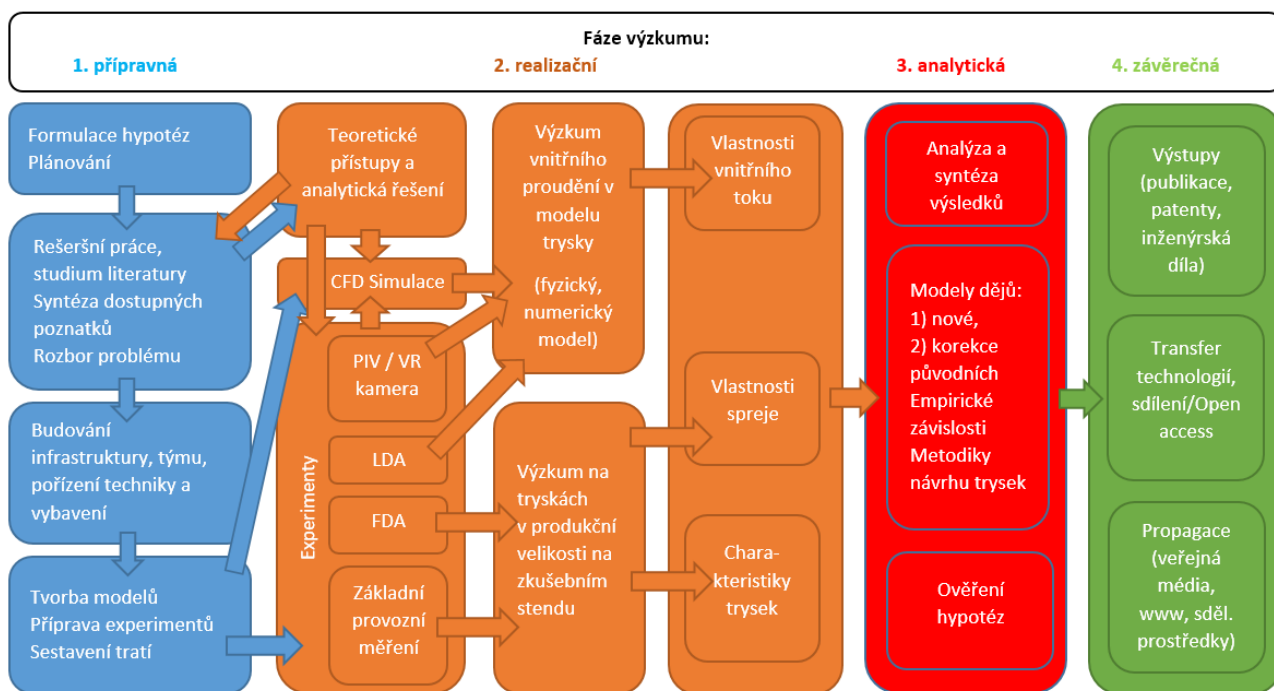
Z uvedeného plynou tři výzvy, které motivují vývoj TVTO: 1) potřeba pochopit děje probíhající při TVT rozstříku kapalin a zejména děje související s obtokem, 2) využít tyto poznatky pro vývoj nových modifikací TVTO a 3) získat informace pro predikce chování TVTO a návrhové metodiky.

2. KONCEPCE PRACÍ

Výzkum rozprašování kapalin a trysek je na EÚ OTTP jedním z dlouhodobě řešených témat, které je nutné s ohledem na jeho rozsah a týmovou práci řešit koordinovaně a s přístupy dlouhodobého plánování. Při tom je kladen důraz na finanční a lidské zdroje, dostupnou infrastrukturu a perspektivu řešených témat. Aktuální problémy aplikovaného a smluvního výzkumu jsou zohledněny v tématech základního výzkumu. Jednotlivé fáze výzkumu jsou zřejmé ze schématu na Obr. 1.

Rozsah a povaha prací vedly k týmovému přístupu s využitím pracovních sil dostupných na VŠ, zejména intenzivnímu zapojení Ph.D. studentů, ale i BS a MS studentů. Technická a odborná náročnost výzkumu vyžaduje využití know-how jiných pracovišť a spolupráci se zejména zahraničními partnery. Nejužší spolupráce v uvedené oblasti je s Loughborough university UK (dr. Wigley, expertiza v optické diagnostice sprejů), Institute of Process Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (dr. Gaukel, rozprašování vysoce viskozních kapalin), Budapest University of Technology and Economics, Hungary (dr. Józsa, trysky pro hořáky), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Germany (prof. Wensing, rozprašování za vysokých tlaků a teplot), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal (dr. Moita, rozprašování nanokapalin).

Současný výzkumný tým představuje vyváženou kombinaci mladých a starších výzkumných pracovníků a studentů různých stupňů studia, s potřebnými zkušenostmi pro experimentální, numerický a teoretický výzkum v oblasti proudění a rozstříku kapalin.



Obr. 1 Schéma přístupu k výzkumu rozprašování kapalin.

3. NĚKTERÉ ASPEKTY ROZPRAŠOVÁNÍ KAPALIN METODOU TVT

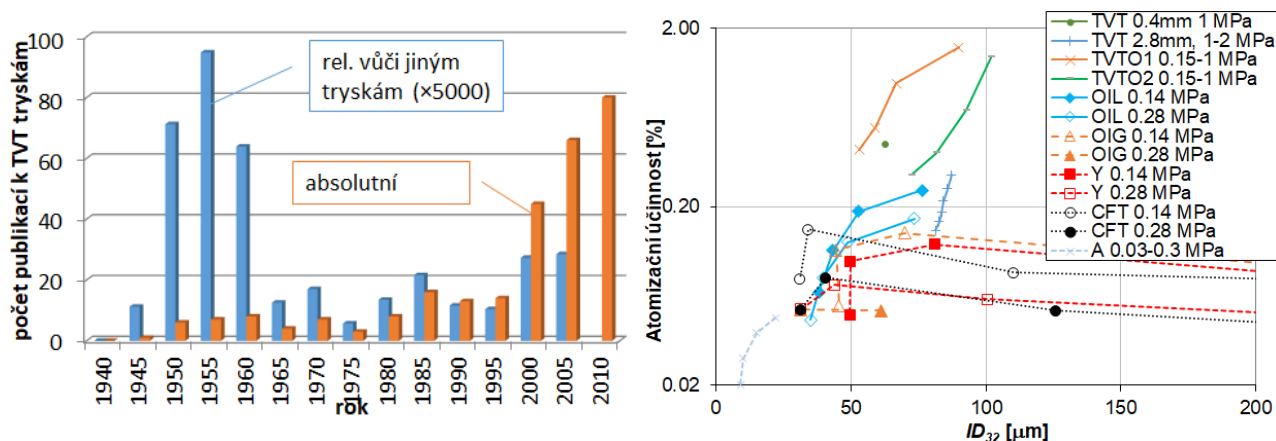
Vývoj TVT¹ byl intenzivní zejména v 60tých letech, kdy byly aplikovány v hořácích a spal. komorách, tehdy byly TVT zkoumány nejintenzivněji v porovnání s jinými tryskami a rozprašováním obecně, viz Obr. 2 vlevo. V 80tých letech zažívaly TVT renezanci zejména ve spalovacích komorách malých turbínových motorů a v současnosti jsou kvůli některým dále

¹ TVT bez obtoku se také nazývají „simplexní“.

uvedeným výhodám přednostně aplikovány tam, kde novější, např. pneumatické, trysky nelze použít. O jejich významu svědčí cca 287 vědeckých článků v letech 1944–2013, 1 kniha [1] a výlučné kapitoly ve 14 knihách. K TVTO však dosud byla věnována velmi malá pozornost a jde pouze o ojedinělé publikace.

3.1. ROZPRAŠOVACÍ ÚČINNOST

Rozstřík kapaliny je proces, při němž je objem kapaliny transformován na menší části – kapky, což je doprovázeno významným nárůstem mezifázového povrchu a spotřebou energie dodané kapalině. Z energetického pohledu lze považovat rozstříkací trysky za zařízení pro transformaci vstupní energie E_1 na zvýšení energie povrchového napětí σ rozstříkované kapaliny E_A . Jde o komplexní proces, kdy transformace probíhá přes několik druhů energií. Jeho účinnost lze vyjádřit „atomizační účinností“ $\eta_a = E_A/E_1$. Její znalost umožňuje porovnat různé typy trysek a vliv provozních podmínek na kvalitu spreje. Kvalitu procesu popisuje tzv. Sauterův střední průměr kapek ve spreji (SMD nebo D_{32}) [2]: $D_{32} = \sum D_i^3 / \sum D_i^2$, kde D_i jsou průměry jednotlivých kapek ve vyšetřované oblasti spreje. Čím menší je D_{32} , tím „lepší“ je sprej.



Obr. 2 Vlevo: Vývoj počtu publikací k TVT v jednotlivých pětiletkách; vpravo: atomizační účinnost různých typů trysek: TVT 0.4mm = TVT s průměrem výstupního otvoru 0.4 mm; TVT 2.8mm = TVT s průměrem výstupního otvoru 2.8 mm; TVTO1 = nový typ TVTO; TVTO2 = původní typ TVTO; dvoumédiové trysky: OIG = “outside-in-gas“ effervescent atomizér, OIL = “outside-in-liquid“ effervescent atomizér, CFT = vlastní návrh dvoumédiové trysky s vnitřním směřováním, Y = „Y-jet“ tryska, A = airblast tryska, data dle [3-8].

V současnosti je k dispozici mnoho typů trysek, které lze rozdělit např. podle druhu energie použité pro rozstřík kapaliny na trysky tlakové, rotační, pneumatické, ultrazvukové a elektrostatické. Obecnou energetickou rovnicí pro jednorozměrné homogenní proudění bez akumulace hmoty a energie lze pro obecný bod v trysce psát [9]:

$$dq + de + dh + \frac{dw^2}{2} + gdz - vdp + \sigma da = 0, \quad (1)$$

kde q vyjadřuje sdílené teplo (tj. tepelná energie na vstupu pro předehřev vysoce-viskozních kapalin nebo pro přehřátí kapalin pro superkritickou či flash-boiling atomizaci), e je obecný symbol pro jakoukoli vstupní energii požadovanou daným typem rozprašovacího zařízení (elektrická energie pro ultrazvukové a elektrostatické trysky, mechanický výkon pro rotační trysky), h je entalpie směsi (mění se při ohřevu/chlazení směsi vnějším zdrojem, třecími ztrátami, expanzním chlazením, vypařováním či kondenzací volatilních kapalin dle stavu prostředí a charakteru výtoku), $w^2/2$ je kinetická energie média, g je gravitační zrychlení, člen $-vdp$ značí expanzi plynu při výtoku u dvou-médiových (pneumatických) trysek a poslední člen vyjadřuje

změnu plochy povrchu kapaliny. Pro vstupní energii kapaliny a případně atomizačního plynu u trysek tlakových a dvou-médiových bez sdílení tepla (ohřevu, vypařování apod.) platí:

$$E_{l1} = p_{l1} \cdot m_l / \rho_l, \quad E_{g1} = \frac{m_g}{\rho_{g1}} \cdot (p_{g1} + p_b) \cdot \ln\left(\frac{p_{g1} + p_b}{p_b}\right)^2 \quad (2)$$

a energie povrchového napětí rozstříkované kapaliny je:

$$E_A = \frac{6\sigma \cdot m(1-\varepsilon)}{\rho_l ID_{32}} \frac{1}{(GLR+1)}, \quad (3)$$

kde $GLR = m_g/m_l = (V_{g1} \cdot \rho_{g1})/(V_l \cdot \rho_l)$ je poměr hmotností atomizačního plynu a kapaliny, $\varepsilon = m_{l2}/m_{l1}$ obtokový poměr, m je hmotnost, V objem, ρ hustota, p tlak, indexy $g, l, 1, 2$, a p označují atomizační plyn, kapalinu a podmínky na vstupu, výstupu a při barometrickém tlaku. Pak ze vztahů (1–3) plyne

$$\eta_a = \frac{6 \cdot \sigma / ID_{32} (1 - \varepsilon)}{p_{l1} + GLR \cdot \frac{\rho_l}{\rho_{g1}} \cdot (p_{g1} + p_b) \cdot \ln\left(\frac{p_{g1} + p_b}{p_b}\right)}. \quad (4)$$

Naše pracoviště se zabývalo detailní analýzou dílčích ztrát trysky a analýzou energetických toků u TVTO [9] a u trysek dvoumédiových typu effervescent [10]. Z údajů o naměřeném ID_{32} pro různé trysky (airblast [11], „Y” a jiných s vnitřním směřováním [3]) lze dle rovnice (4) stanovit η_a těchto trysek s ohledem na jejich provozní parametry (Obr. 2 vpravo).

Je zřejmé, že 1) TVTO mají vyšší η_a , než trysky dvou-médiové obdobných rozměrů, 2) účinnost trysky závisí na jejich velikosti (porovnání TVT 0.4mm a TVT 2.8mm) a na požadované kvalitě spreje, 3) u TVT trysky je požadavek lepšího spreje (nižší ID_{32}) vykoupen snížením η_a , avšak u trysky dvou-médiových toto platí pouze v určitém rozsahu ID_{32} , 4) η_a běžných trysky je velmi malá, typicky pod 1 % ve shodě s [12]. Podle Rivette a Everse [13] mají tlakové trysky $\eta_a = 0.4$ až 1 % dle vstřikovacího tlaku, další autoři uvádějí 0.9–2.6 % [14] resp. 0.1–0.4 % [15], tedy údaje konzistentní s těmi v Obr. 2 vpravo. Trysky typu airblast mají dle [16] $\eta_a = 0.7$ %.

Z diagramu toků energie tryskou (Obr. 11 v [9]) plyne, že přibližně polovina E_l je potřeba na formování vnitřního proudění a výtoku kapaliny, další čtvrtina je předána okolnímu prostředí a zůstává ve formě pohybové energie kapaliny.

Uvedené hodnoty naznačují potenciál možného zlepšení parametrů při dalším vývoji trysky. Nedávné zpřísnění legislativních předpisů v dopravě vedly k dramatickému zvýšení tlaku při vstřikování nafty (typicky 200–250 MPa [17]) pro tvorbu dostatečně jemného spreje. Pak výrazně klesá η_a a příkon čerpadel (např. u common rail systémů) je zejména v režimech jízdy nízkou rychlostí podstatnou částí výkonu dodávaného motorem. Obdobně u malých a velmi malých leteckých prostředků (drony) jsou nároky na čerpání paliva podstatné a je nutné věnovat pozornost jejich snižování.

3.2. PROCESY PROBÍHAJÍCÍ V TRYSKÁCH

Souhrn procesů relevantních pro TVTO rozprašování je uveden v Tab. 1 v pořadí, v němž probíhají. O charakteru těchto dějů rozhoduje několik uvedených kritérií, mimo to je vždy důležitá míra zavírání S . Každý z těchto procesů je reprezentován několika charakteristikami. Výzkum je prováděn kombinací experimentů a simulací, s podporou teoretické analýzy. Nástroje použitelné pro jednotlivé přístupy jsou shrnuty v posledních sloupcích; možnosti a příklady experimentů a simulací jsou uvedeny v přísl. kapitolách. Teoretické přístupy nejsou v tabulce uvedeny kvůli omezeným možnostem řešení praktických případů; jsou však nutné při rozboru problému,

² Uvažována je izotermická komprese atomizačního plynu

nastavování simulací a experimentů i interpretacích výsledků (Obr. 1). Jejich význam při studiu vnitřního proudění a rozpad kapalného filmu, resp. kapek je uveden v kap. 3.3 a 6.2.

Tab. 1 Procesy probíhající u TVTO rozprašování.

	Proces	Výstupy, sledované parametry	Relevantní kritéria ^g	Přístupy	
				Experiment	Simulace
1	Vnitřní proudění	Rychlostní pole, vlastnosti vzdušného jádra	Re_l, Fr^h	LDA ^a , VRV ^a	URANS, LES
2	Výtok a formování kapalného filmu	C_D , $ÚKS$, rychlost, stabilita, tloušťka kapalného filmu	Re_l, We_g, Fr, Bo^e	VRV	
3	Rozpad na menší struktury (<i>primární</i>)	Rozpadová vzdálenost, charakter rozpadu	Re_l, Oh^f, We_g, Bo^e	LIF ^a	(LES) DNS
4	Následný rozpad na kapky (<i>sekundární</i>)	Velikost, rychlost, koncentrace kapek	Re_l, Oh, We_g		
5	Interakce kapek s okolním prostředím a mezi sebou	Charakter interakce, přenos energie, kolize kapek, odpar	Re_g, Stk, We_c^b, c^c	FDA ^a , VRV	URANS, LES, S ^d

^aLaserová Dopplerovská anemometrie, fázová Dopplerovská anemometrie, vysokorychlostní vizualizace, laserem indukovaná fluorescence, ^bkolizní We , ^ckoncentrace kapek ve spreji, ^dstatistické přístupy, ^eBondovo číslo (také nazýváno Eötvösovo číslo) $Bo = \Delta\rho \cdot g \cdot D^2 / \sigma$ může být významné pouze v případě velmi nízkých výtokových rychlostí, $\Delta\rho$ je rozdíl hustot kapaliny a plynu, ^fOhnesorgovo číslo $Oh = \sqrt{We} / Re = \mu / \sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot D}$, D je charakteristický rozměr, ^g Re_l, Re_g a We_g jsou definovány dle vztahů (17, 18) a index g a l značí plyn, resp. kapalinu, ^hFroudeho číslo $Fr = w / \sqrt{g \cdot D}$, g je gravitační zrychlení.

3.3. TVORBA A ROZPAD KAPALNÉHO FILMU

Tlakové trysky mění potenciální energii kapaliny dodávané do trysky za přetlaku na kinetickou energii (Obr. 3 vpravo). Zavření kapaliny v případě TVT trysek umožňuje vytvoření tenkého kapalného filmu za tryskou, a interakce proudícího filmu s okolním prostředím vede k dezintegraci kapaliny na sprej (Obr. 3 vlevo).

Pro tloušťku kapalného filmu na výstupu trysky lze odvodit podle [9] a [18]:

$$t_o = \frac{\dot{m}_l}{\pi d_o} \sqrt{\frac{\rho_l}{2\Delta p_l \eta_n}} = d_o \left(1 - \sqrt{1 - C_D / \sqrt{\eta_n}} \right) / 2, \quad (5)$$

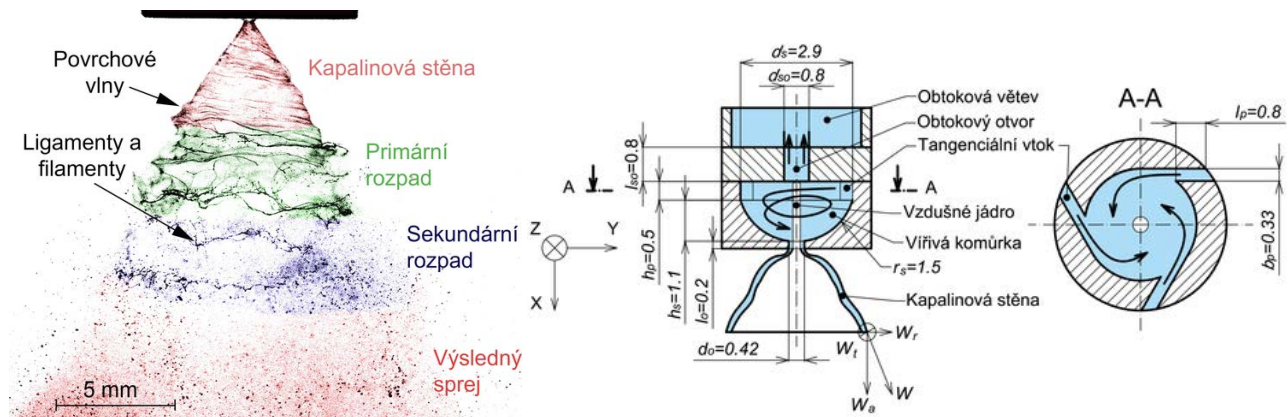
kde \dot{m}_l je průtok kapaliny tryskou, d_o průměr výstupního otvoru a C_D výtokový součinitel. Účinnost trysky $\eta_n = c_w^2 = \rho_l w_{lo}^2 / 2\Delta p_l$ představuje účinnost převodu tlakové energie na kinetickou na výstupu z trysky a souvisí s tzv. rychlostním koeficientem c_w .

Kapalný film se vlivem rozšiřování kuželové povrchy (vrcholový úhel, $ÚKS$) směrem od trysky ztenčuje a při dosažení shody mezi disruptivními a konsolidačními silami rozpadá ve vzdálenosti z na fragmenty a následně na kapky při tloušťce filmu [9]:

$$t(z) = \frac{t_o d_o}{d_o + 2z \cdot tg \, ÚKS / 2}. \quad (6)$$

Použití obtokového otvoru (OO) v horní stěně vířivé komůrky umožňuje odvést část přiváděné kapaliny zpět do nádrže a tím snížit množství rozstříkované kapaliny (resp. zvýšit regulační

rozsah³) a tato je stále dodávaná do vířivé komory pod vysokým tlakem. To zajišťuje stálou kvalitu spreje při změně průtoku. Touto inovací vznikly ve 40. letech 20. století tzv. TVTO. Dalšími výhodami této koncepce je výrobní jednoduchost, spolehlivost a odolnost vůči ucpávání. TVTO lze použít i pro aplikace vyžadující velmi malé průtoky a nízké tlaky, jako mazání, nanášení barev či velmi malé spalovací komory. Limitující je průměr výstupního otvoru, jehož minimální rozměr je asi 0,2 mm [12].



Obr. 3 Struktura TVTO spreje (vlevo) a vnitřní uspořádání trysky (vpravo).

Na kvalitu TVTO spreje mají vliv zejména provozní parametry (vstupní tlak Δp_1 , průtok kapaliny \dot{m}_l , hustota okolního prostředí ρ_a a ε) geometrie trysky a reologické vlastnosti použité kapaliny (viskozita μ_l , povrchové napětí σ a hustota ρ_l). Vliv některých faktorů lze snadno vyjádřit [19]:

$$D_{32} = a_1 \cdot \sigma^{a_2} \cdot \mu_l^{a_3} \cdot \rho_l^{a_4} \cdot \rho_g^{a_5} \cdot \Delta p_1^{a_7} \cdot \dot{m}_l^{a_6} \quad (7)$$

a hodnoty koeficientů a_i stanovit experimentálně.

Velikost kapek je přímo úměrná tloušťce kapalného filmu v místě jeho rozpadu na menší frakce $D_{32} \propto t_o^{0.4}$ [20], jde o tzv. *primární rozpad* kapaliny. Ze vztahu (5) a (6) plyne:

$$t(z) = \frac{d_o^2 \left(1 - \sqrt{1 - C_D / \sqrt{\eta_n}} \right)}{2d_o + 4z \cdot \text{tg } \alpha / 2}, \quad (8)$$

a z tohoto je zřejmé, že pro co nejjemnější sprej je zásadní při tomto jevu maximalizovat rozpadovou vzdálenost $z = z_b$ a η_n , a minimalizovat výtokový součinitel. Parametry d_o a \dot{m}_l jsou dány požadavky aplikace a podobně i C_D z nich plyne dle vztahu (16) níže. Dále pro zajištění konstantního průtoku lze odvodit $C_D d_o^2 = \text{const}$. Pokud pomineme η_n , zbývá možnost ovlivnit z_b . Při pohybu kapalného filmu na jeho formování působí 1) disruptivní síly vznikající aerodynamickou interakcí kapalinové stěny s okolním prostředím [21] a 2) nestabilit ve vlastním filmu. Stabilita filmu klesá např. s přítomností příčného okolního proudění. Charakter a míra nestabilit kapalného filmu jsou dány vnitřním prouděním [22].

Teoretický přístup dle [23, 24] využívá pro řešení rozpadu kapalného filmu u TVT zjednodušené lineární teorie. Současné modely uvažují pouze infinitezimální nestability [25] rozložené spojitě ve frekvenčním spektru. Reálné proudění je zdrojem nestabilit i na diskretních kmitočtech a mají konečnou velikost (Obr. 4 vlevo). Toto téma je v dostupné literatuře zmíněno jen okrajově, a vzhledem k jeho důležitosti se mu na EÚ podrobně věnujeme [26]. Na TVTO

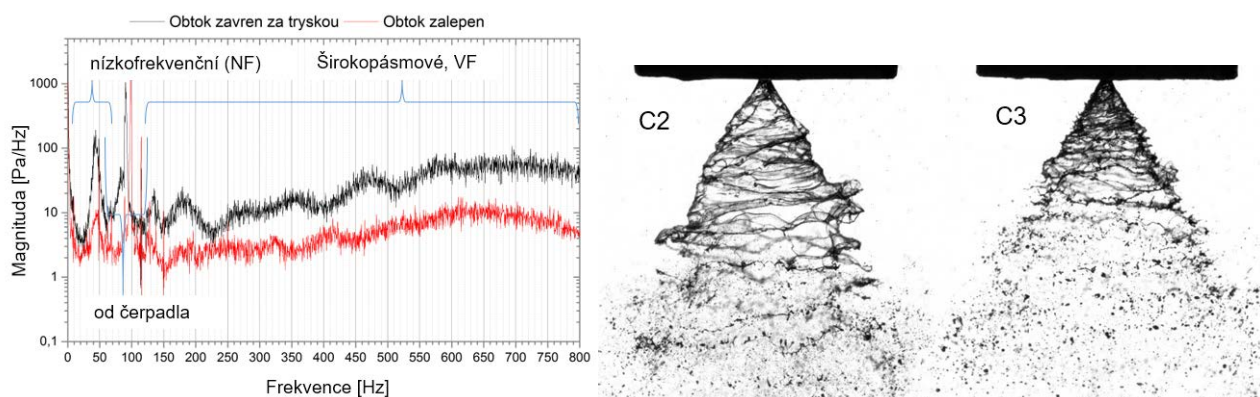
³ Regulační rozsah lze vyjádřit poměrem maximálního průtoku, při němž lze trysku provozovat vůči minimálnímu průtoku, při němž ještě vyhovuje kvalita spreje.

s pouze zavřeným, a se zaslepeným (tedy jako TVT) OO lze izolovat tyto typy pulzací resp. fluktuací:

- nízkofrekvenční pulzace: vznikají interakcí zavířené kapaliny s OO,
- na zubových frekvencích čerpadla: přenáší se ze vstupního potrubí,
- širokopásmové (vysokofrekvenční) fluktuace: tyto fluktuace souvisí s kvalitou vzdušného jádra (VJ) a se samotným vnitřním prouděním.

Je zřejmé, že TVT tryska má při stejném režimu provozu podstatně nižší úroveň NF i VF fluktuací vnitřního proudění, které jsou transportovány do vnějšího kapalného filmu a umožní tak jeho pozdější rozpad. Došlo k plošnému snížení amplitud pulzací o cca 1 řád s výjimkou pulzací od zubových frekvencí čerpadla (zvýšená impedance). To je dokumentováno na (Obr. 4 vlevo). Tryska s geometrií C2 (Obr. 4 vpravo) generuje pouze mírně zvlněný kapalný film, který až po výrazném ztenčení podléhá nestabilitám při interakci s okolním vzduchem při rozpadové vzdálenosti 5 mm. Vizually je sprej zcela stabilní. Tryska C3 tvoří film již od počátku nestabilní, rozpadá se ve vzdálenosti 1,5 mm a D_{32} má větší asi o 20 %. Detailní popis a simulaci vnitřního proudění s nestabilitami VJ uvádíme v [27] a dále je tento problém řešen v Kap. 4.3 a 5.

Při dostatečné relativní rychlosti mezi kapkami a okolním vzduchem dochází k *sekundárnímu rozpadu* těchto kapek [28]. Mechanismy *sekundárního rozpadu* byly podrobně studovány v [29] a [30], avšak pouze pro izolované kapky. Zde je tento jev blíže popsán v Kap. 6.



Obr. 4 Vlevo: typy pulzací a fluktuací vnitřního proudění, TVTO se zavřeným a se zaslepeným OO; vpravo: rozpad kapalného filmu u trysek s různou geometrií OO.

3.4. PLATNOST DOSTUPNÝCH PODKLADŮ

Od 60tých let jsou publikovány vztahy pro odhad velikosti kapek ve spreji v závislosti na různých parametrech. Tyto vztahy jsme pro TVT trysky sumarizovali v [19]. Ve starších výzkumech byly pro stanovení D_{32} používány fotogrammetrické metody, které značně nadhodnocují výsledky. Později nastoupila laserová diagnostika; laserové difrakční metody vedly ke zpřesnění výsledků. Ty pro měření velikosti kapek používají rozšířený laserový paprsek procházející celým sprejem, takže stanoví D_{32} vážený koncentrací kapek v daném průřezu, tedy podél celé, např. radiální osy (přímky kolmé k ose výstupního otvoru, viz Obr. 5 vlevo) [9]. Oproti tomu FDA (Kap. 7.1.1) provádí měření v bodech podél této radiální osy v jednotlivých polohách s indexy i ve vzdálenosti r_i od osy výstupního otvoru, a platí:

$$0 \leq r_1 < r_2 < \dots < r_i < r_{i+1} < \dots < r_n. \quad (9)$$

Je nutno připomenout, že vlastnosti TVT spreje (velikost, koncentrace a rychlost kapek, viz Obr. 12, 13, 16, 17 a 19) jsou prostorově proměnlivé. V každém bodě je u FDA vyhodnocen střední plošný a objemový průměr kapek $D_{20,i}$, a $D_{30,i}$ dle vztahu:

$$D_{qri} = q^{-r} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n D_{ij}^q}{\sum_{j=1}^n D_{ij}^r}} \quad (10)$$

pro $q = 2$ resp. 3 a $r = 0$. Pro celkový D_{32} přes celý sprej platí [31]:

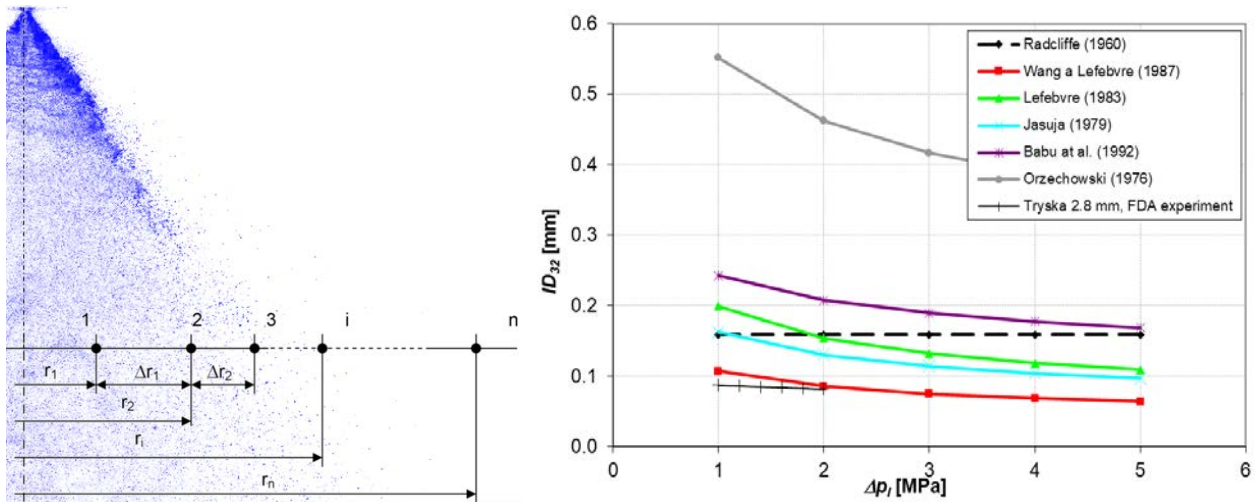
$$ID_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i \cdot D_{30,i}^3 \cdot f_i)}{\sum_{i=1}^n (r_i \cdot D_{20,i}^2 \cdot f_i)}, \quad (11)$$

kde f_i je frekvence průchodu kapek měřicím objemem. V případě laserové difrakce ve vztahu (11) místo f_i figuruje koncentrace kapek c_i a neobsahuje váhový faktor r_i , který v rovnici (11) zahrnuje změnu plochy s radiální vzdáleností. Výsledky obou metod se tedy liší již z principu [32] a to ve prospěch metody FDA, bez ohledu na to, že obě metody mají své systematické chyby.

Optické metody se v současnosti intenzivně vyvíjí. Moderní FDA přístroje díky zvětšenému průměru přijímací optiky lépe detekují malé kapky a volitelné prostorové filtry umožňují měření v hustých sprejích. Starší FDA signálové procesory používaly metodu kovarianční analýzy, zatímco nová generace má implementovanou spektrální analýzu založenou na více-bitové detekci signálu při průchodu částic a zpracování signálu pomocí FFT [8]. Tento upgrade zajišťuje robustnější detekci všech úrovní signálu [33] a nejmodernější přístroje, jako námi užívaný FDA (Kap. 7.1.1), jsou schopny detekovat i o dva řády menší kapky, než to bylo před několika desetiletími [2]. Velmi důležité jsou proto nová měření sprejů s využitím moderní techniky a revize starších výsledků. Platnost starších dostupných podkladů lze demonstrovat na porovnání výsledků našich měření TVT trysek s údaji jiných autorů [34-39] v Obr. 5 vpravo. Ze vztahu (7) je

$$ID_{32} \propto \Delta p_1^{a_7} \quad (12)$$

a to je podle výsledků měřicí technikou dostupnou v současnosti nižší než uvádí většina starších korelací, a také absolutní hodnoty jsou dle různých prací velmi odlišné; např. dle [39] je $a_7 = -0.397$ a dle [36] dokonce -0.625 , zatímco dle našich současných měření je $a_7 = -0.1$ [9].



Obr. 5 Vlevo: TVT sprej a měřicí body FDA; vpravo: vliv Δp_1 na ID_{32} dle různých autorů.

4. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ROZSTŘÍK KAPALINY

Znalost funkční závislosti charakteristik spreje jako regulovaných parametrů na řídicích faktorech je nutná při aplikaci trysek v různých procesech a pro jejich optimalizaci. Řídicími faktory jsou, jak plyne ze vztahu (7), kromě provozních podmínek také konstrukce trysky a reologické vlastnosti rozstříkované kapaliny.

4.1. REGULAČNÍ CHARAKTERISTIKY TRYSEK

Kvalita spreje, $\dot{U}KS$, rychlost kapek a zejména průtok kapaliny tryskou jsou u TVT závislé na Δp_1 , jak plyne z rovnic (7) a (16). U TVTO jsou navíc tyto faktory také funkcí ε . Výsledky naměřené v Laboratoři sprejů v rámci projektu GAČR 18-15839S (Charakterizace vnitřního proudění a spreje u nových modifikací TVTO) pro vybranou trysku ukazují, že prakticky všechny charakteristiky závisí výrazně jak na tlaku, tak i na ε , přičemž často nejde o závislost lineární ani monotónní. Z údajů pro ID_{32} a $\dot{U}KS$ plyne, že tyto jsou navíc závislé na vzdálenosti od výstupního otvoru trysky. Z dat uvedených v Tab. 2 lze vliv Δp_1 a ε popsat funkcí

$$ID_{32} \propto \Delta p_1^{a_7} (1 + a_8 \varepsilon^2), \quad (13)$$

kde je $a_7 = -0.09$ a $a_8 = -0.02$. Plyne z toho, že zdvojnásobením Δp_1 lze snížit ID_{32} o 6 %. Současně dojde k růstu dodávaného množství (dle rovnice (16)), které je nutné redukovat buď obtokem (zvýšení ε) nebo scalingem trysky. Pak lze s využitím vztahů (16) a (20) předpokládat snížení ID_{32} o 20–24 %.

Tab. 2 Základní charakteristiky trysky v závislosti na Δp_1 a ε , $D_o = 0.46$ mm, $D_c = 3$ mm, obtoková varianta C1 (Obr. 9), testovací kapalina Jet A1.

Δp_1	Δp_3^a	m_1	m_3^a	m_2	ε	C_D	ID_{32}^b	ID_{32}^c	$\dot{U}KS^b$	$\dot{U}KS^c$	η_a
[bar]	[bar]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[-]	[-]	[μ m]	[μ m]	[°]	[°]	[%]
2,5	2,5	4,9	0,0	4,91	0,00	0,49	59,8	50,1	48,5	61,2	1,1
2,5	2,3	6,2	1,9	4,31	0,31	0,44	57,3	50,5	47,5	58,3	0,8
2,6	1,8	9,4	5,7	3,70	0,61	0,37	60,2	50,1	49,9	61,6	0,4
2,5	0,0	14,2	11,4	2,78	0,80	0,28	64,7	58,7	50,5	58,6	0,2
5,0	5,0	6,7	0,0	6,66	0,00	0,47	56,2	49,9	52,6	61,8	0,6
4,9	4,7	7,8	2,2	5,57	0,28	0,40	49,7	44,6	56,4	68,3	0,5
5,0	4,1	10,8	6,3	4,44	0,59	0,32	49,8	45,4	60,0	72,1	0,3
5,1	0,1	19,1	16,3	2,89	0,85	0,20	51,0	47,6	63,4	76,9	0,1
10,1	10,0	9,1	0,0	9,09	0,00	0,45	49,6	43,4	53,8	61,8	0,3
10,0	9,6	10,9	3,5	7,41	0,32	0,37	45,2	41,8	58,4	65,2	0,3
10,1	8,4	14,8	9,0	5,87	0,60	0,29	43,1	41,4	63,6	72,2	0,2
10,0	0,0	25,1	21,0	4,08	0,84	0,20	41,4	40,1	70,1	80,6	0,1

^aúdaje na obtoku, ^bměřeno ve vzdálenosti 25 mm od výstupního otvoru trysky, ^cměřeno ve vzdálenosti 12,5 mm od výstupního otvoru trysky

$\dot{U}KS$ je stanoven jako vrcholový úhel virtuálního kužele, který pokrývá 90 % objemového toku kapaliny uvnitř spreje

$$\dot{U}KS = 2 \arctg \left(\frac{0,9 - q_{i8} \frac{r_{i9} - r_{i8}}{z}}{q_{i9} - q_{i8}} \right) \quad (14)$$

s využitím radiálního profilu normalizovaného kumulativního rozložení hmoty kapaliny ve spreji:

$$q_i = \frac{\sum_{i=1}^i f_i D_{30i}^3 \left((r_r + \Delta r/2)^2 - (r_r - \Delta r/2)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n r_i f_i D_{30i}^3 \left((r_r + \Delta r/2)^2 - (r_r - \Delta r/2)^2 \right)} \quad (15)$$

kde $r_1 = 0$ je radiální poloha v ose spreje, r_n je poslední měřená radiální poloha, Δr je krok mezi následnými radiálními polohami, q_{i8} a q_{i9} je první hodnota pod a nad hranicí 90 % objemu kapaliny ve spreji, a r_{i8} a r_{i9} jsou jejich příslušné radiální vzdálenosti, z je axiální vzdálenost od výstupního otvoru trysky.

4.2. REOLOGICKÉ VLASTNOSTI KAPALINY

Základními reologickými vlastnostmi rozstříkované kapaliny jsou μ_l , σ a ρ_l . Běžně používanými kapalinami je voda a její roztoky a dále pak zejména uhlovodíková paliva. V rámci projektu TAČR TA03011285, Vývoj spalovacího systému malého leteckého turbínového motoru na alternativní paliva jsme se v letech 2013–2016 soustředili na několik druhů paliv, která by mohla nahradit letecký petrolej (Jet A1) v určitých aplikacích spalovacích turbín, viz Tab. 3. Dále byla tato problematika řešena u nanokapalin ve spolupráci s Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal [40]. Hustota ovlivňuje především výtokovou rychlost a následně průtok dle Bernoulliho rovnice, z toho pak plyne

$$\dot{m}_l = C_D A_o w_l = C_D A_o (2\Delta p_l / \rho_l)^{0.5}. \quad (16)$$

Při vyšší rychlosti kapaliny vůči okolí roste velikost sil odporu vzduchu oproti konsolidačním silám (viskózní disipace a síly povrchového napětí), což lze vyjádřit pomocí Reynoldsova a Weberova čísla

$$Re_l = w_l D / \mu_l, \quad We_g = \rho_g (w_l - w_g)^2 D / \sigma, \quad (17, 18)$$

kde D je velikost kapalně struktury a $(w_l - w_g)$ rozdíl rychlosti kapek a okolí. Vzhledem k tomu, že ρ_l je málo závislé na použité kapalině (viz Tab. 3), její se vliv při změně kapaliny neprojevuje. Mnohem výrazněji se mění σ , resp. μ_l . Jejich vzájemný vliv lze vyjádřit porovnáním hodnot Re a We [41]: $We_l / Re_l = w_l \mu_l / \sigma$.

Tab. 3 Reologické vlastnosti a charakteristiky trysky pro různé kapaliny při $\Delta p_l = 1$ MPa a teplotě 20 °C, upraveno dle [42] a doplněno.

Kapalina	ρ_l [kg/m ³]	μ_l [mPa·s]	σ_l [mN/m]	C_D [-]	D_{32} [μm]	η_n [-]	t_0 [μm]	t_z [μm]	We_0/Re_0 [-]	We_z/Re_z [-]
Jet A1	785	1,9	31	0,45	47,3	0,42	80	31	0.54	0.14
Arktická nafta	810	3,2	29	0,49	50,6	0,4	95	36	1.09	0.29
Zimní nafta	830	4,4	23	0,51	52,1	0,38	105	38	2.03	0.52
Bionafta	831	4,6	27	0,51	52,7	0,35	113	41	1.86	0.47
Palmový olej	771	5,2	29	0,52	51,6	0,37	111	40	2.06	0.52
LTO	885	19,2	35	0,64	65,7	0,29	110	43	5.15	1.40
Voda	997	1,1	71	0,42	62,0	0,53	63	21	0.11	0.02

Je vidět, že tento poměr je pro většinu kapalin v místě výstupního otvoru blízký hodnotě 1, tedy vliv obou faktorů je srovnatelný⁴. Výjimkou je LTO, který má vysokou μ_l a voda s vysokým σ . V místě rozpadu kapalněho filmu je poměr We_l / Re_l podstatně menší, což odráží vliv snižující se tloušťky filmu a jeho rychlosti. V tomto místě tedy dominuje σ nad viskozními silami u všech kapalin a rozpad filmu je řízen σ , výjimkou je LTO, kde vliv μ_l stále přetrvává.

Z výsledků uvedených v Tab. 3 plyne

$$D_{32} \propto \sigma^{0,41} \cdot \mu_l^{0,13} \quad (19)$$

⁴ Oba faktory dále závisí také na provozních podmínkách, např. vstříkovacím tlaku a s jeho růstem roste i výstupní rychlost a tedy i poměr We_l / Re_l .

s korelačním koeficientem $R^2 = 0,91$. Dominantní je tedy vliv σ . Výrazný vliv má reologie také na výtokový součinitel a je nutné s tím počítat při návrhu trysky. Při vnitřním proudění se uplatňuje prakticky jen vliv μ_l , která způsobuje snížení vířivé složky rychlosti a tím zvyšuje tloušťku kapalného filmu na výstupu trysky. Tento jev pak vede paradoxně k růstu průtočného množství tryskou s růstem μ_l . V [18] jsme ověřili platnost vztahu dle [43], který byl odvozen pro málo viskózní kapaliny. Výsledky pro širší rozsah μ_l z Tab. 3 umožňují tento vztah korigovat na vliv μ_l :

$$C_D = 0.35(A_p/D_s d_o)^{0.5} (D_s/d_o)^{0.25} \mu_l^{0.15} \quad (20)$$

při $R^2 = 0,997$. Oba další reologické faktory se podílí na změně C_D nevýznamně. Výsledky v Tab. 3 ukazují, na první pohled nelogické, zvýšení C_D s rostoucí μ_l . Tento jev je způsoben viskózními ztrátami v trysce, což způsobuje zmenšení r_{ac} , zvětšení tloušťky kapalinového filmu na výstupu, a tudíž i růst průtoku tryskou.

V praktickém provozu je pak nutné uvážit vliv teploty na změnu reologických vlastností: přehřev u vysoce-viskózních kapalin nebo např. ochlazení u leteckých paliv při dosažení letové výšky. Mrazové zkoušky turbínových motorů, které simulují tyto podmínky, probíhají při $-35\text{ }^\circ\text{C}$, kdy povrchové napětí:

$$d\sigma/dT = -1 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}\cdot\text{K} \quad (21)$$

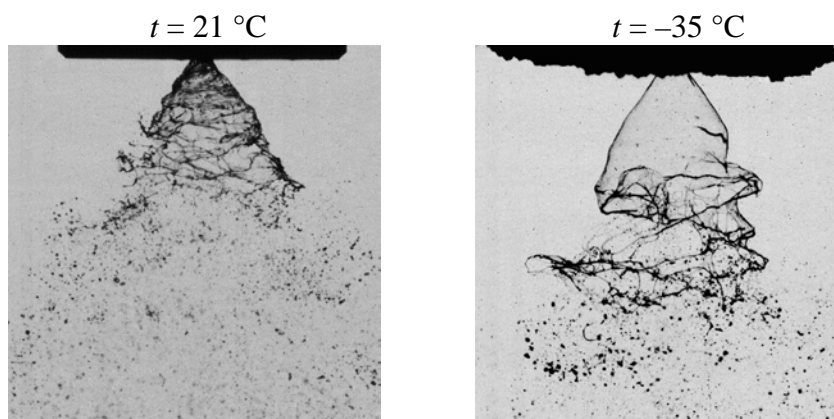
také mírně poklesne, avšak kinematická viskozita [36]

$$\nu_l = A \cdot \exp(Ev/k \cdot T), \quad (22)$$

která je u Jet A1 při pokojové teplotě $2 \text{ mm}^2/\text{s}$, při ochlazení na $-35\text{ }^\circ\text{C}$ vzroste $5,5\times$ na $11 \text{ mm}^2/\text{s}$. Pro hustotu uhlovodíkových paliv platí teplotní závislost dle [44]:

$$\rho_l = -0.000172 t^2 - 0.377 t + 882. \quad (23)$$

Tento vliv je poměrně malý, v rozsahu teplot $t = 0-200\text{ }^\circ\text{C}$ se změní hustota Jet A1 ze 799 na 881 kg/m^3 . Celkově se při změně teploty projeví vliv změny viskozity, což dokumentuje Obr. 6, kde se ochlazením výrazně změnil charakter rozpadu kapalného filmu a velikost kapek i ÚKS.



Obr. 6 Vliv teploty na charakter spreje.

4.3. GEOMETRICKÉ PARAMETRY TRYSKY

Vliv základních geometrických faktorů TVT, jako je průměr a délka výstupního otvoru a vířivé komory nebo průřez vstupních otvorů, byly zkoumány mnoha autory [45] [46] [2] [47], avšak TVTO a zejména konfigurace obtokové části trysky nebyla systematicky studována. Standardně používaná konfigurace s jedním osově orientovaným otvorem se ukázala jako nevhodná kvůli nestabilitě VJ [48]. Autor navrhl řešení s použitím několika mimoosých otvorů, přičemž vliv jejich počtu, průměru, délky, radiální polohy, a úhlu vůči ose trysky (v radiálním a tang. směru) není znám. Při návrhu trysky je tak nutné zohlednit další parametry. Dále také není zřejmý vliv tvaru vířivé komory a úhlu přechodu do výstupního otvoru. Vliv geometrie TVTO na sprej byl proto předmětem výzkumu našeho pracoviště a je jim věnována pozornost v této kapitole.

Funkcí vstupních kanálů je přívod kapaliny do vířivé komory v tečném směru a její zavíření. Jejich počet (n_p) ovlivňuje obvodovou rovnoměrnost rozložení kapaliny ve spreji [1] [49] [12]. Trysky s různým n_p byly testovány v [50], kde jsme zjistili, že vliv n_p na hlavní charakteristiky spreje (D_{10} , D_{20} , a D_{32}) a $\dot{U}KS$ byl poměrně malý (viz Tab. 4). Změna velikosti obtékaného povrchu však dle rovnice (1) v [9] ovlivňuje hydraulické ztráty (Δp), platí pak, že $\Delta p \sim n_p^{3/2}$ a s růstem n_p klesá C_D .

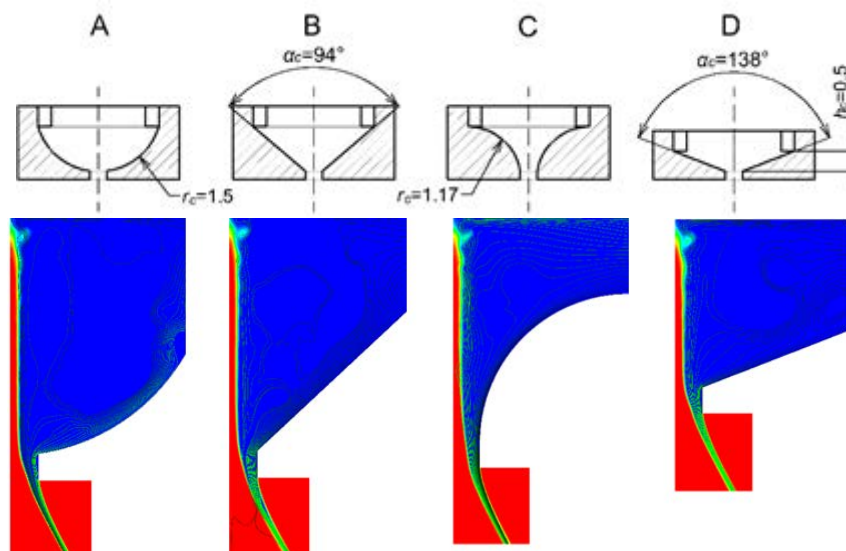
Tab. 4 Vliv n_p , komora A, $d_o = 0.45$ mm, $h_p = 0.5$ mm, $\Delta p_I = 1$ MPa, upraveno z [50].

n_p	b_p	C_D	$\dot{U}KS$	C_v	ID_{32}
[-]	[mm]	[-]	[°]	[-]	[μ m]
2	0,5	0,36	67,0	0,15	48,0
3	0,33	0,35	67,3	0,15	47,9
4	0,25	0,31	69,3	0,14	47,1

Tab. 5 Vliv tvaru vířivé komory na vnitřní proudění a sprej, TVT, $d_o = 0.45$ mm, $h_p = 0.5$ mm, $\Delta p_I = 1$ MPa, upraveno z [50] a doplněno.

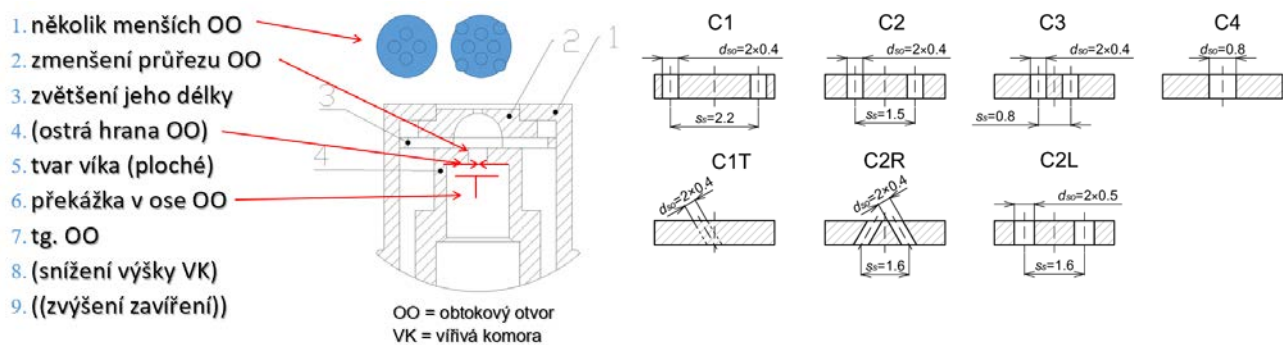
Tvar (Obr. 7)	C_D		$\dot{U}KS$		ID_{32}
	CFD	Exp.	CFD	Exp.	
	[-]	[-]	[deg]	[deg]	[μ m]
A	0,45	0,45	66	61	51,7
B	0,48	0,45	68	63	49,7
C	0,47	0,43	62	62	48,9
D	0,44	0,45	64	63	51,9

Vířivá komora má obvykle válcový tvar s přechodovou zúženou částí do výstupního otvoru. Tato přechodová část mívá různý tvar, typicky: konický, zakřivený (konvexní nebo konkávní), případně plochý. Vnitřní proudění je poměrně složité [51, 52], trojrozměrné s dominantní vířivou složkou rychlosti a víry různého typu (Obr. 7). Z několika prací plyne vliv tvaru komory na vnitřní proudění [53] [54] [55], avšak tento vliv ani vliv na sprej nebyl systematicky posuzován. V práci [50] jsme navrhli několik variant komor a provedli CFD simulace vnitřního proudění a experimenty s měřením vlastností spreje paternací a metodou FDA (vysvětleno v Kap. 7.1.1). Je zřejmé, že simulace jsou v dobré shodě s experimenty, viz hodnoty C_D a $\dot{U}KS$ v Tab. 5. Charakter proudění se s tvarem komory mění (Obr. 7) a ovlivňuje sprej, tedy zejména $\dot{U}KS$ a mírně i ID_{32} . Tyto výsledky ukazují perspektivu další optimalizace trysek.

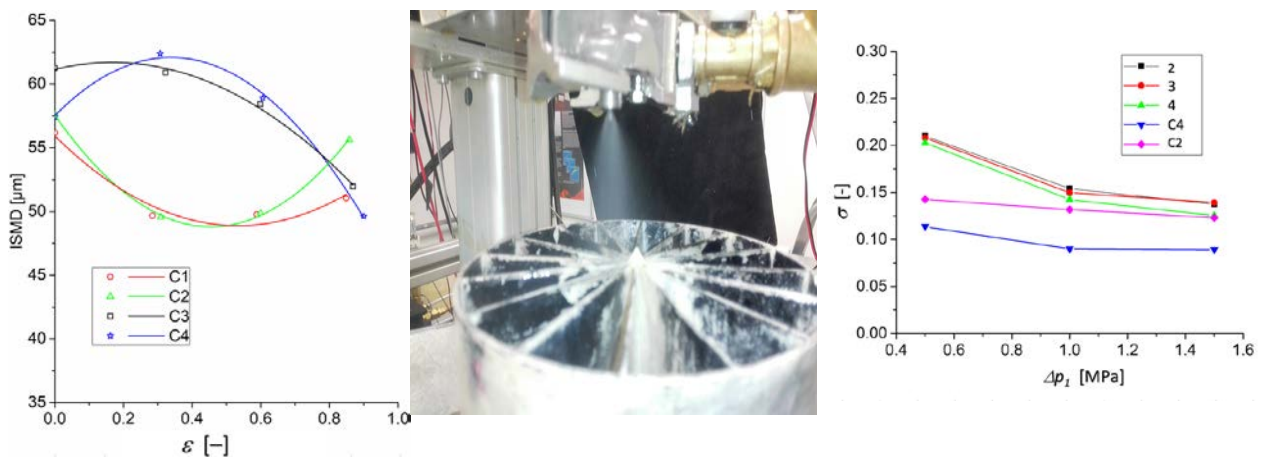


Obr. 7 Navržené tvary vířivé komory: A) konvexní, B) konický, C) konkávní, D) plochý (nahore); výsledky num. simulací vnitřního proudění s proudnicemi, vzduch = červená, kapalina = modrá (dole).

Již z dřívější praxe používání TVTO se středovým OO bylo známo, že sprej u této trysky se stává nestabilní při snižování ε a je nepoužitelný při $\varepsilon = 0$. Dostupné publikace ke geometrickým a dynamickým charakteristikám VJ [56] [57] [58] [59] [60] [61], se týkají pouze TVT, nikoli TVTO. Byly však východiskem pro další postup. Naše porovnávací studie nejdříve na produkčních TVT a TVTO [48] a později na zvětšeném průhledném modelu [27] ukázaly, že u TVTO v režimech se $\varepsilon = 0$ vzniká v OO recirkulační zóna. Ta způsobuje přísávání kapaliny do VJ a jeho periodické zaplňování a zánik. To vede k silným pulzacím spreje až do $\varepsilon = 0,15$. Simplexní tryska měla v celém provozním rozsahu plně vyvinuté a stabilní VJ válcového tvaru. Později byly experimentální výsledky detailněji studovány pomocí CFD [27]. Z analýzy příčin nestabilit spreje jsme vyvodili několik možných opatření úprav trysky ke zlepšení stability, resp. zkrácení VJ (Obr. 8). Některá z těchto opatření byla zavržena z důvodu zhoršení jiných charakteristik trysky (2, 3: zvýšení tlakových ztrát na obtoku, 9: změna geometrie spreje), jiné byly realizovány, ale nepřinesly dostatečný efekt (5, 7) nebo byly příliš složité (6).



Obr. 8 Navržená opatření úprav trysky ke zlepšení stability VJ. **Obr. 9** Navržené varianty OO, C1, C2, C2L a C3 s rovnoběžnými OO a různou vzdáleností od osy trysky, C4 má středový OO, C1T má OO tang. skloněné a C2R radiálně skloněné [62].



Obr. 10 Vlevo: vliv tvaru komory a ε na kvalitu spreje, upraveno z [62]; uprostřed: mechanická paternace spreje; vpravo: vliv n_p a konfigurace obtoku na rovnoměrnost rozložení kapaliny ve spreji (značení dle Obr. 7 a 9) pro $\varepsilon = 0$ [48].

Tyto práce vedly ke studiu vlivu mimoosého umístění OO. Pro dané průtočné množství tryskou oproti osovému obtoku vzniká řada geometrických parametrů, jejichž optimální hodnotu je nutné stanovit, zejména počet, průměr, umístění a orientaci OO. Naše studie ukázaly, že umístění a konfigurace OO má vliv nejen na stabilitu spreje, ale podstatně také na regulační charakteristiky trysky a na geometrii spreje [62]. Navrhli jsme několik variant OO s různou velikostí, vzdáleností

OO od osy trysky a náklonem (viz Obr. 9). Bylo zjištěno, že mimoosé umístění OO 1) zmenšuje regulační rozsah, 2) stabilizuje sprej a 3) s rostoucí vzdáleností OO od osy trysky klesá D_{32} (viz Obr. 10 vlevo). Velký vliv má umístění OO na ε resp. průtok kapaliny. Podstatné je zjištění, že pro určitou hodnotu vstřikovaného množství lze změnou Δp_I a ε dosáhnout různé hodnoty ID_{32} pro optimalizaci dané aplikace. Uvedené výsledky vysvětlují kontroverzně vynírající výsledky Rizka a Lefebvra [63] vzhledem k práci Daie a Lefebvra [64], když první autoři pozorovali pokles ID_{32} s růstem ε a druzí opačný jev.

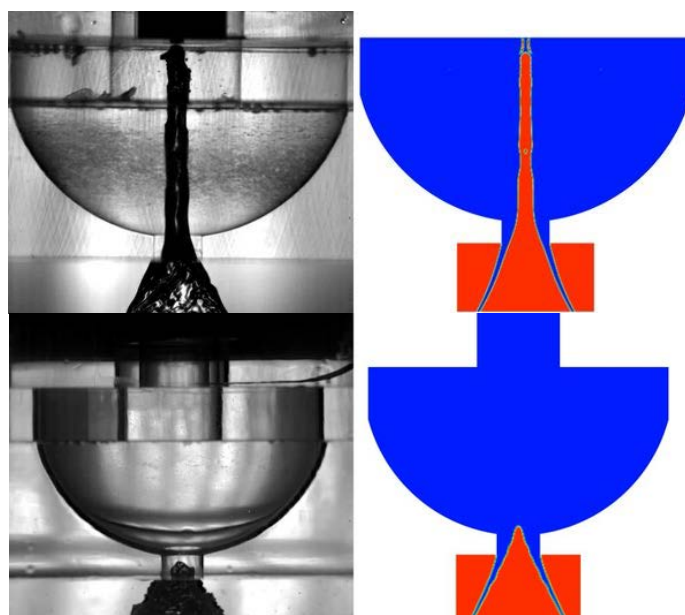
Rovnoměrnost rozložení hmoty kapaliny ve spreji je velmi důležitým parametrem pro zajištění homogenní směsi u spalovacích motorů nebo rovnoměrnosti chlazení či rozstřiku barev. Toto rozložení lze hodnotit pomocí tzv. paternátorů; používají se mechanické a optické (podrobněji se věnujeme v [65]) metody. Pro hodnocení rovnoměrnosti rozložení hmoty kapaliny po obvodu spreje byla navržena jednoduchá, úhlově sektorovaná nádoba (Obr. 10 uprostřed), tzv. mechanický paternátor se 16 sektory klínového tvaru o objemu 60 ml. Tento byl umístěn 50 mm pod trysku a byl proveden odběr rozstřikované kapaliny. Z objemu kapaliny v každém segmentu byla vypočtena standardní odchylka jako parametr popisující nerovnoměrnost rozstřiku:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{\bar{y}} - 1 \right)^2} / \frac{2}{n}, \quad (24)$$

kde n je počet sektorů (16), y_i je objem kapaliny v i -tém sektoru a \bar{y} je průměrný objem kapaliny. Výsledky opakovaných měření pro různé konfigurace trysky a Δp_I ukazuje Obr. 10 vpravo. Je zřejmé, že s růstem n_p ze dvou na čtyři se zlepšuje rovnoměrnost obvodového rozložení kapaliny o cca 10 %. Podstatný je vliv Δp_I a konfigurace obtoku. Detailněji je tato problematika řešena v [48].

5. VNITŘNÍ PROUDĚNÍ

Charakter kapalných struktur na výstupu z trysky, formování kapalného filmu a výsledný sprej závisí především na vnitřním proudění, geometrie výstupního otvoru a interakce s okolním prostředím jsou dalšími faktory. Tvar a stabilita VJ uvnitř trysky přímo ovlivňuje geometrické charakteristiky kapalinové stěny a její stabilitu. Pro pochopení dějů v kapalném filmu a zejména při studiu nestabilit je proto je nutné získat informace o proudovém poli ve vířivé komoře.



Obr. 11 Vnitřní proudění v modelu trysky (vlevo) a v simulaci (vpravo); simplexní tryska (nahore) a TVTO (dole). Jet A1, $\Delta p_I = 10$ kPa.

Kapalina po vstupu do vířivé komory tangenciálně orientovanými otvory vytvoří vířivé proudění, jehož hlavním účelem je formování tenkého kapalného filmu na výstupu trysky. Míra zavíření je určena vírovým číslem, které udává poměr momentu od vířivé složky rychlosti $w_1 = Q/A_1$ ku axiální $u_o = Q/\pi r_o^2$:

$$S = \frac{w_1 R}{u_o r_o} = \frac{\pi r_c r_o}{A_1}, \quad (25)$$

kde A_i je průřez vstupních otvorů, r_c a r_o jsou poloměry vířivé komůrky a výstupního otvoru. Vírové číslo tedy závisí na geometrii trysky resp. lze vyjádřit pomocí rozměrové konstanty trysky

$$K = \frac{A_i}{4r_o r_c}. \quad (26)$$

Charakter proudění závisí na Re (poměr hybnosti a viskozních sil) a nevýznamně na We (poměr hybnosti a sil povrchového napětí), viz rovnice (17, 18), kde je uvažovaná jako v rychlost kapaliny vstupující do komory a $D = D_c$ je její průměr. U větších trysek a zvětšených modelů je důležité i Froudeho číslo

$$Fr = \frac{Q}{2\pi(r_o^2 - r_{ac}^2)\sqrt{r_o g}}, \quad (27)$$

jež popisuje vliv gravitačních sil na proudění. Zde je r_{ac} poloměr VJ, Q je průtok kapaliny a g gravitační zrychlení.

Starší teoretické práce předpokládaly vnitřní proudění jako neviskózní volný vír [66] a s uvažováním Bernoulliho rovnice pro ideální kapalinu se zanedbáním potenciálního členu a radiální složky rychlosti, rovnice kontinuity lze pro něj psát:

$$\frac{Q^2}{2\pi^2(r_o^2 - r_{oac}^2)^2} + \frac{Q^2(r_c - r_i)^2}{2A_i^2 r_{oac}^2} = \frac{p_i}{\rho_l}, \quad (28)$$

kde r_i je poloměr vstupních portů a r_{oac} poloměr VJ ve výstupním otvoru. Pro řešení se předpokládá princip maximálního průtoku, tj. r_{oac} se přizpůsobí tak, že průtok bude vždy maximální: $\delta Q / \delta r_{oac} = 0$. Neviskózní popis proudění byl revidován v [66-68] a uznán jako vhodný pouze pro pochopení podstaty proudění, resp. předběžný návrh trysky. Neshody experimentů s neviskózní teorií a vedly ke korekcím tohoto modelu [43] [69] [70] [71] [72] a komplexnějším analytickým přístupům [73] [42] [74], které však nedosahují přesnosti CFD modelů.

Pro měření rychlosti pohybu kapaliny v modelu trysky jsme jako nejvhodnější z optických metod využili LDA. Vybrané výsledky ukazují tvar rychlostního profilu pro tečnou složku rychlosti. Charakter proudového pole uvnitř trysky lze posoudit ze simulací (Obr. 7 a 11), LDA měření (Obr. 22) a vizualizace (Obr. 18c).

6. INTERAKCE MEZI KAPKAMI A OKOLNÍM PROSTŘEDÍM

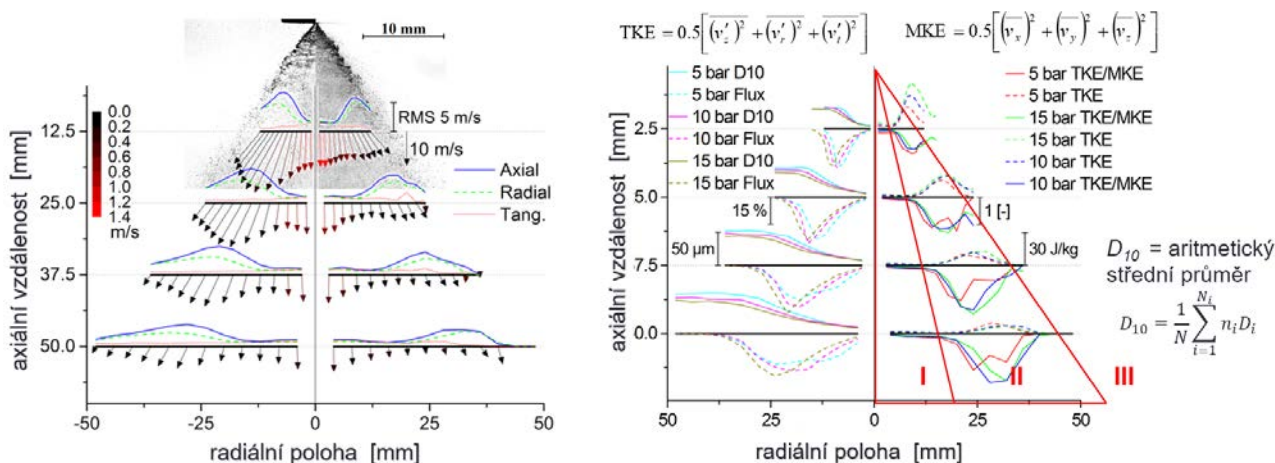
Výtok kapaliny z trysky probíhá do plynného prostředí o určitém tlaku, teplotě a parametrech proudění. Okolní prostředí ovlivňuje vývoj spreje a jeho charakteristiky (geometrii i průběh rozpadu kapaliny), ale zejména dochází k přenosu hybnosti z kapek kapaliny na okolní plyn. Okolní prostředí tedy nejen ovlivňuje *primární rozpad* kapaliny, ale také celkovou morfologii spreje. Pohyb prostředí indukovaný sprejem pak ovlivní pohyb menších kapek a jejich transport.

Kromě toho může docházet k interakci mezi kapkami navzájem – jejich srážení (kolizím), které vedou k následnému sloučení kapek nebo jejich tříštění. To ovlivňuje velikostní spektrum již vzniklého spreje a zejména střední velikost kapek, přesto, že již nepodléhají *sekundárnímu rozpadu*.

6.1. INTERAKCE MEZI KAPALINOU A OKOLÍM

Výsledky v [18] ukazují, že kapalina vytéká z trysky jako tenký kuželovitý film, který se ztenčuje a rozpadá vlivem dlouho- resp. krátkovlnných sinusových nestabilit ve vzdálenosti kratší než predikují teoretické modely na fragmenty a nakonec kapky ve směru proudění. Třísloužkovým měřením rychlosti metodou FDA s využitím pokročilé analýzy dat byla získána představa o rychlostním poli v kapalině a v okolním vzduchu (Obr. 12 vlevo) a vyhodnoceny energetické poměry tohoto dvoufázového proudění (Obr. 12 vpravo).

Ze Stokesova čísla $Stk = \rho_l \bar{D}_p^2 \Delta v / 18 \mu_g L$ pro jednotlivé velikostní třídy kapek plyne, že kapky $< 5 \mu\text{m}$ podléhají proudění vzduchu a byly tedy použity k odhadu místní rychlosti okolního proudění. Kapky mají na počátku rychlost kapalného filmu a tak $v_p - v_g > 0$, se pohybují při velmi malém Re (pro všechny případy Δp_l a ε i polohy ve spreji platí $Re < 100$) a zpomalují dle Stokesova zákona $dv_p/dt = -18\mu_g(v_p - v_g)/\rho_l d_p^2$, což působí pozitivní korelaci mezi jejich velikostí a rychlostí. Interakce fragmentů a kapek se vzduchem vlivem viskózního odporu indukuje jeho proudění, které je vysoce anizotropní, fluktuuje přednostně ve svislém směru a lze ho rozdělit do tří oblastí s různým charakterem (Obr. 12 vpravo). Stk roste s velikostí kapek a klesá s jejich vzdáleností od trysky, takže $Stk \approx 1$ pro 20–40 μm kapky a největší kapky s velikostí 80–160 μm mají $Stk > 10$) se pohybují balisticky [75].



Obr. 12 Vlevo: rychlostní pole kapek a vzduchu ve spreji, $\Delta p_l = 1 \text{ MPa}$, upraveno z [18, 75]; vpravo: rozložení velikosti kapek, hmotových toků, střední a turbulentní kinetické energie ve spreji, upraveno z [18].

6.2. KOLIZE MEZI KAPKAMI

Pohyb kapek různé rychlosti a směru vede k jejich kolizím, a následně buď k sloučení, odrazu nebo rozpadu, podle podmínek jevu, jak popsáno pro binární kolize vodních [76] nebo uhlovodíkových kapek [77]. Pro praktické hodnocení kolizí mezi kapkami ve spreji lze využít dva experimentální přístupy: VR zobrazování událostí kolize a měření metodou FDA. Oba přístupy se vzájemně doplňují.

Srážky kapek byly pozorovány VR kamerou Photron FASTCAM SA-Z se zpětným osvětlením při snímkové frekvenci 120 000 FPS na ploše $1,7 \times 1,5 \text{ mm}$. Vybrané výsledky shrnuje Tab. 6. Pro každý případ (tlak, poloha ve spreji) bylo analyzováno 2000 snímků (Obr. 18f). Byly identifikovány čtyři kategorie kolizních událostí:

1) Kolize mezi velmi velkou a malou kapkou ($40 \mu\text{m} < D_1 \gg D_2$): kontakt byl obvykle mimoosý a malá (obvykle podstatně pomalejší) kapka byla zachycena a absorbována, změna

hybnosti způsobila protažení povrchu velké kapky v kontaktním bodě a tvorbu kapalného mostu, který se trhal a dělil na malé kapičky.

2) Srážky kapek různých velikostí ($D_1 > 1,5 D_2$) mají různý charakter a výsledky se pohybují od případu 1 až po případ 3.

3) Kolize srovnatelně velkých kapek ($D_1 \cong D_2$) vedou ke koalescenci i separačním kolizím.

4) Kolize kapek mimo oblast obrazu, mohou být příčiny mimochodem důsledkem některého z předchozích tří případů, kdy příčina nemohla být posouzena.

5) rozpad velké kapky bez zřejmé příčiny (může jít o *sekundární rozpad* kvůli 5a) smykové síle nebo turbulenci nebo 5b) kolize s kapkou příliš malou pro detekci kamerou.

Tab. 6 Frekvence různých kolizních událostí při $\Delta p_1 = 1 \text{ MPa}$, upraveno dle [78] a doplněno.

$r [-]$	0					0.4					0.56				
	událost				f [Hz]	událost				f [Hz]	událost				f [Hz]
	#1	#2	#3	#4		#1	#2	#3	#4		#1	#2	#3	#4	
12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	132	76	20	156	13680
25	0	3	1	0	240	18	43	9	44	4200	19	12	10	32	2460
50	0	1	0	2	60	1	5	1	9	420	0	1	0	3	60

Analýzu kolizí kapek s využitím dat z FDA lze provést dle metodiky [79]. Početní koncentrace kapek:

$$C_{Ni} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{\forall jk} tt_{ijk}}{Vol_i}, \quad (29)$$

kde Δt je čas měření v každé poloze, Vol_i je objem FDA sondy pro každou velikost kapek a tt_{ijk} je tranzitní čas každé velikostní třídy kapek, směru pohybu a třídy rychlosti. Obr. 13a ukazuje, jak se C_{Ni} mění s polohou ve spreji, přičemž maximum je v oblasti odpovídající směru rozpadu kapalného filmu. Kolizní událost dvou kapek nastává v kolizním válci určeném průřezem: $\pi(D_1+D_2)^2/4$ a délkou $|v_{D1}+v_{D2}|\Delta t_{12}$. Kapky o průměru D_1 a D_2 se pohybují rel. rychlostí $|v_{D1}+v_{D2}|$ a se zpožděním mezi sebou Δt_{12} . Pak je kolizní frekvence

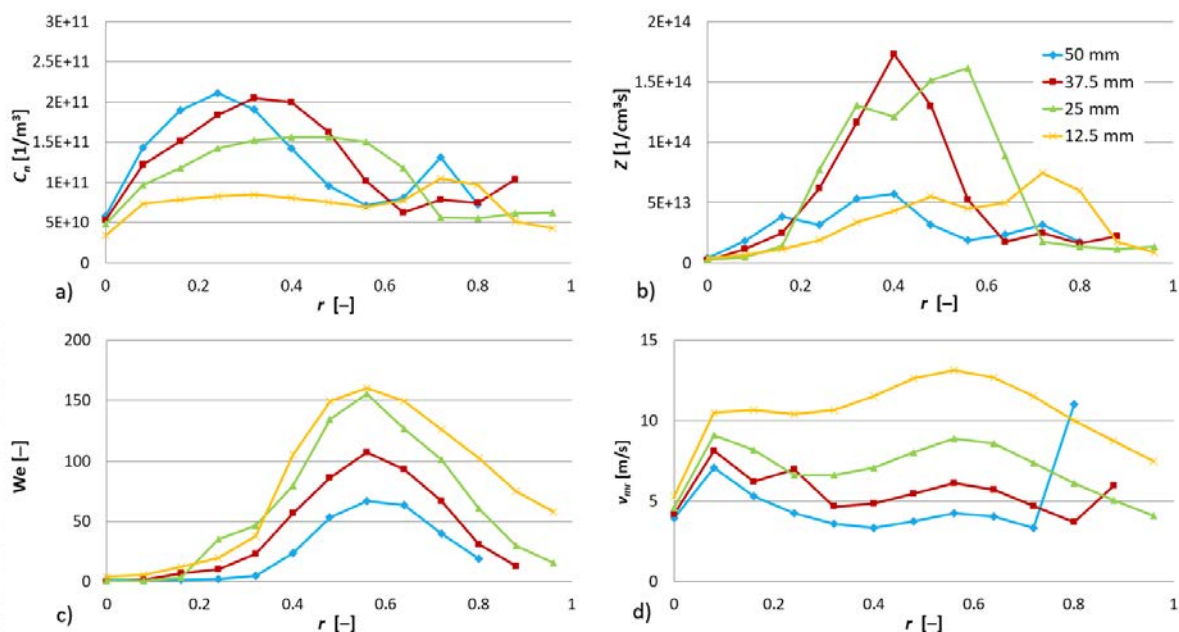
$$Z_{ii'} = \sum_{\forall jk'j'k'} Z_{ijk'j'k'} = \sum_{\forall jk'j'k'} \frac{\pi}{4} (D_i + D_{i'})^2 |v_{Djk} - v_{Dj'k'}| C_{Nijk} C_{Ni'j'k'}, \quad (30)$$

kde C_{Nijk} a $C_{Ni'j'k'}$ jsou početní koncentrace každé velikostní třídy kapek, směru pohybu a třídy rychlosti. Celková kolizní frekvence velikostní třídy kapek i je $Z_i = \sum_{\forall i'} Z_{ii'}$. Její průběh (Obr. 13b)

odpovídá profilu C_{Ni} (Obr. 13a). Kolizní We dle vztahu (18) je

$$We_{ijk'j'k'} = \rho_l \cdot (D_i + D_{i'}) \cdot |v_{Djk} - v_{Dj'k'}|^2 / (2 \cdot \sigma) \text{ a } We_{ii'} = \sum_{\forall jk'kk'} (We_{ijk'j'k'} \cdot Z_{ijk'j'k'}) / Z_{ii'}$$

Průměrné We (Obr. 13c) tedy závisí na kolizní frekvenci a relativní rychlosti kapek, kterou lze posoudit z Obr. 13d. Je zřejmé, že nejvyšších hodnot dosahuje We pro radiální polohy $r = R/Z$ odpovídající směru rozpadu kapalného filmu ($r = 0.32-0.5$). Magnituda We závisí výrazně na osově vzdálenosti od trysky Z a pro $Z = 12,5-37,5 \text{ mm}$ dosahuje pro $r = 0.32-0.5$ hodnot nad 75, zatímco pro $Z = 50 \text{ mm}$ méně. Při porovnání s tranzitní hodnotou $We = 65,6$ (pro čelní kolize 20 μm kapek dle [80]) vyplývá, že tyto kolize povedou k rozpadu na menší kapky a tedy velikost kapek bude do polohy $Z = 37,5 \text{ mm}$ vlivem kolizí mírně klesat, zatímco dále od trysky poroste díky jejich shlukování.



Obr. 13 a) střední koncentrace kapek, b) celková kolizní frekvence, c) Kolizní We , d) střední rychlost kapek v závislosti na radiální a axiální poloze ve spreji, $\Delta p_I = 1$ MPa.

7. PŘÍSTUPY PŘI VÝZKUMU SPREJŮ A SOUVISEJÍCÍCH JEVŮ

Jak plyne z Tab. 1 jsou v současnosti s převahou uplatňovány metody experimentálního výzkumu, numerické simulace však podléhají rychlejšímu vývoji a mají potenciál dalšího rozšiřování.

7.1. EXPERIMENTÁLNÍ METODY

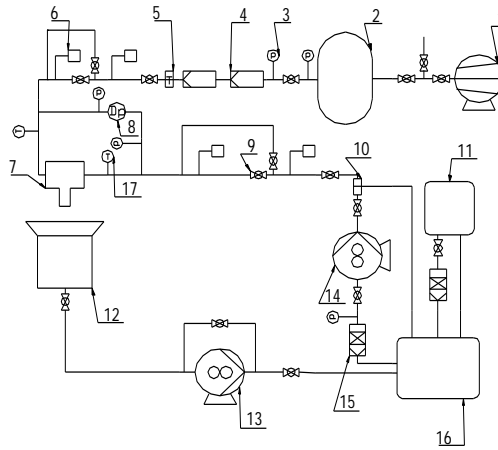
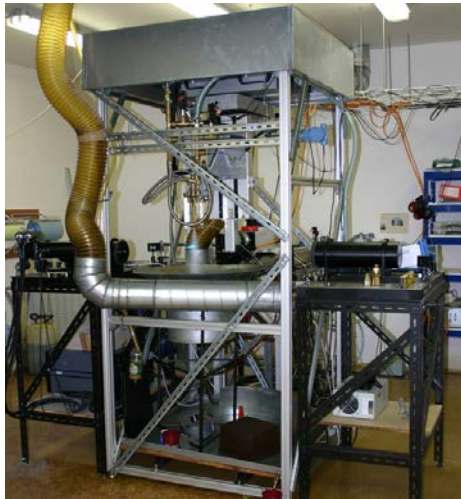
Pro experimentální výzkum a vývoj trysek je OTTP EÚ autor od roku 1998 provozuje Laboratoř sprejů, která je v ČR unikátním pracovištěm s vybavením srovnatelným s jinými špičkovými evropskými pracovišti. V roce 2012 byla rozšířena zejména z prostředků projektů „NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství)“ s reg. číslem CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a v rámci projektu „NETME Centre TechUp“ s reg. číslem CZ.1.05/2.1.00/19.0397 dovybavena novými přístroji. Laboratoř je navržena ke zkoušení tlakových, dvou- a tří-médiových trysek ve velkém rozsahu vstupních tlaků, průtoků a teplot na „studeném“ zkušebním zařízení s komplexním měřením jejich vlastností (Obr. 14). Součástí zařízení je regulace teploty okolního vzduchu i rozprašované kapaliny, počítačově řízený 3D manipulátor trysky pro optická měření, odtah a zpracování rozprášené kapaliny a par. Zkušebna umožňuje provoz trysek zejména s uhlovodíkovými kapalinami (různé druhy paliva maziv), vodou a suspenzemi s pevnými částicemi. Experimenty a sběr dat jsou počítačově řízené v prostředí National Instruments LabVIEW.

V současnosti jsou pro výzkum sprejů používány zejména neintruzivní optické a vizualizační metody. V Laboratoři sprejů jsou pro zkoumání kvality rozprašování aplikovány moderní laserové diagnostické metody (FDA, LDA, PIV, optická paternace a VR vizualizace). Vybavení je prezentováno na <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore> a <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni>.

7.1.1. Dopplerovská anemometrie

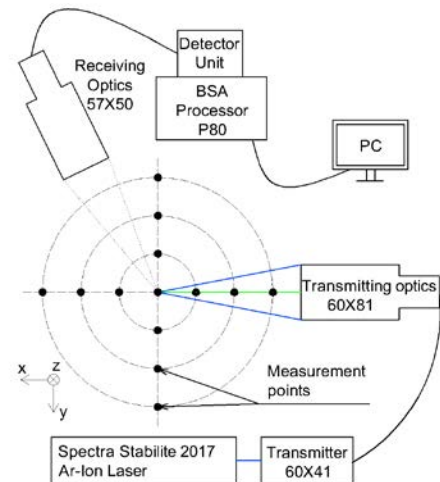
Výzkum metodami laserové a fázové Dopplerovské anemometrie má na OTTP EÚ více než 20letou tradici. Autor se od počátku podílel na instalaci, zprovoznění a aplikaci FDA v laboratoři

sprejů (Obr. 15). Tyto metody jsou velmi vhodné pro neintruzivní časově a prostorově rozlišená měření ve dvoufázovém prostředí, tedy zejména ve sprejích. Umožňují současné měření velikosti (pouze FDA), rychlosti a času detekce jednotlivých částic (kapek, bublin) na základě odrazu a lomu světla v malém měřicím objemu. Tyto optické metody provádí bodové měření; traverzováním v 2D nebo 3D síti je proměřena celá sledovaná oblast. Měřicí objem optické sondy je typicky menší než 1 mm^3 .



1. Kompresor
2. Vzdušník
3. Tlakový snímač
4. Vzduchový filtr
5. Regulační ventil
6. Průtokoměr
7. Tryska
8. Snímač tlak. dif.
9. Ball ventil
10. Safety ventil
11. Chladič
12. Sběrací nádoba
13. Vratné čerpadlo
14. Podávací čerpadlo
15. Palivový filtr
16. Palivová nádrž
17. Teplotní snímač

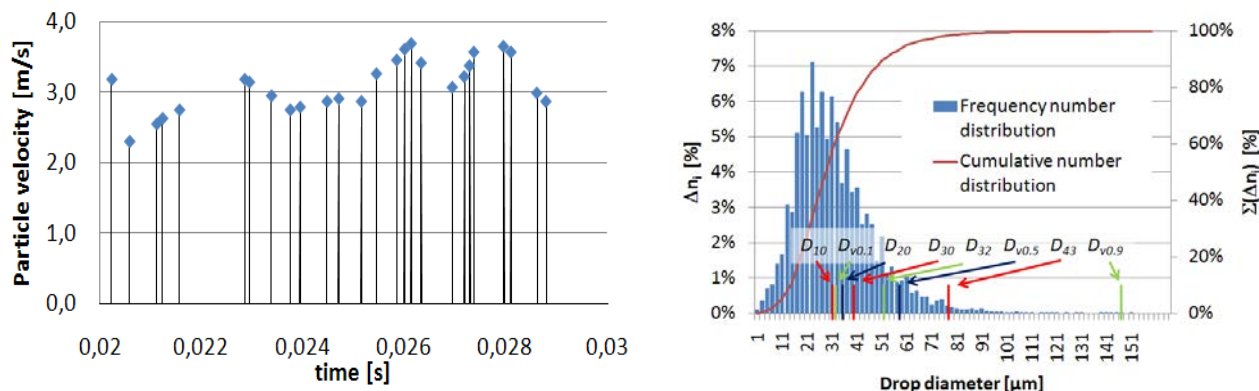
Obr. 14 Pohled na zařízení pro zkoušení trysek v laboratoři sprejů na EÚ OTTP (vlevo); schéma zařízení pro zkoušení tlakových a dvoumédiových trysek TVTO (vpravo).



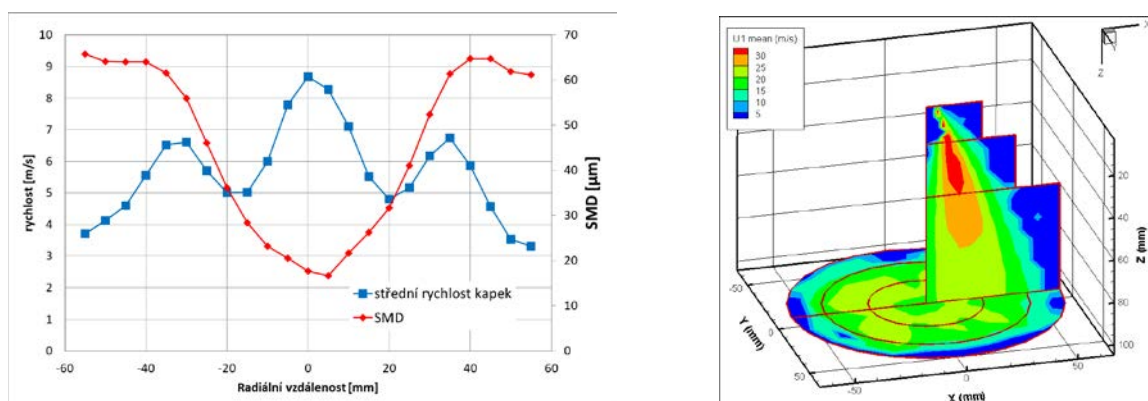
Obr. 15 FDA v Laboratoři sprejů EÚ OTTP (vlevo); typické uspořádání FDA při měření spreje (vpravo) [62].

Pracoviště má k dispozici 2D FDA Dantec Dynamics A/S s vláknovou optikou a výkonným 6W laserem a velkou variabilitou nastavení vhodnou pro laboratorní výzkum. Přístroj umožňuje velmi přesné jedno- a dvou-složkové bodové měření rychlosti částic až $\pm 180 \text{ m/s}$ při frekvenci měření až $100\,000 \text{ vzorků/sec}$ a průměru měřených částic $0,5 \div 2000 \mu\text{m}$. Z těchto dat pak lze získat histogramy velikosti a rychlosti kapek (viz Obr. 16 vpravo), statistiky rychlosti a velikosti částic (střední průměry kapek, např. D_{32} nebo de Brouckeho průměr, střední a rms složky rychlosti, intenzitu turbulence, viz Obr. 17c). Lze provádět libovolné vzájemné korelace těchto veličin s filtrací dat, výpočet dalších odvozených veličin, odhad koncentrací a hmotových toků [81]. Skenováním je proměřen radiální profil spreje a dále řezy objemem spreje (Obr. 17d).

LDA je vhodný např. pro měření rychlostního pole uvnitř trysky. FDA je v současnosti jedinou metodou vhodnou pro současná a prostorově rozlišená měření velikosti a rychlosti jednotlivých kapek v hustých sprejích. Metoda FDA je velmi náročná na zvládnutí a vyžaduje kvalifikovanou obsluhu, zřejmě i proto ji v ČR používá pouze naše pracoviště. Princip metody a některé další aspekty jsou popsány v [27].



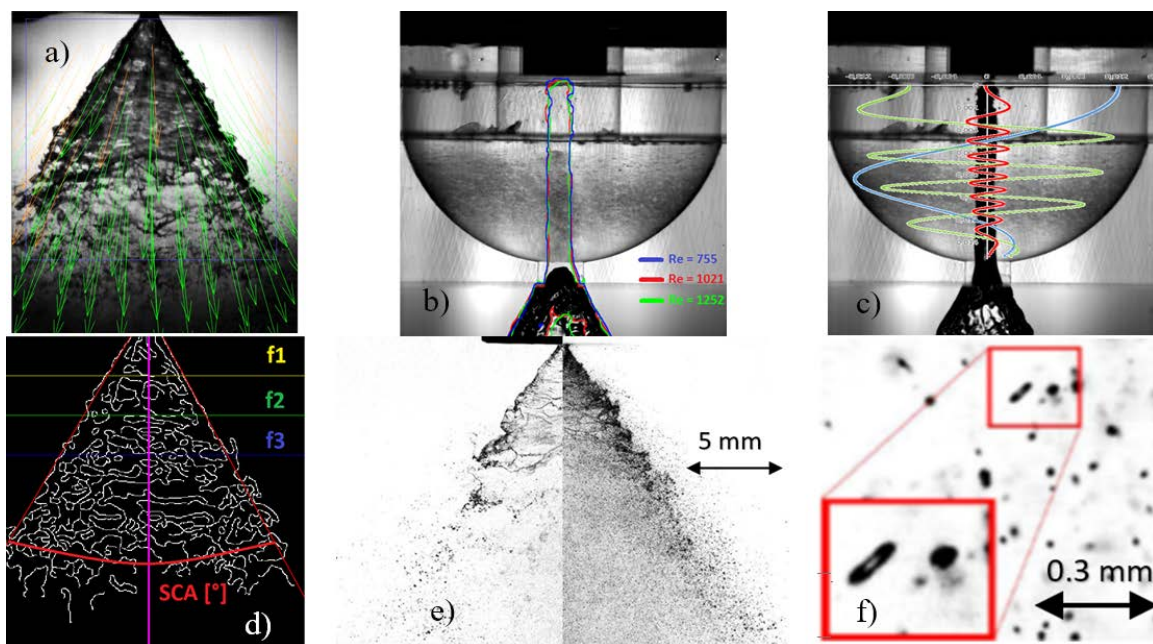
Obr. 16 Vlevo: časová řada naměřených dat; vpravo: histogram velikosti kapek.



Obr. 17 Vlevo: velikost a rychlost kapek v závislosti na radiální poloze ve spreji; vpravo: plošné skeny střední rychlosti kapek ve dvou řezech spreje [19].

7.1.2. Vysokorychlostní vizualizace

Před kvantitativním hodnocením dějů je nezbytné získat představu o charakteru těchto jevů a o rozsahu sledovaných parametrů. Vzhledem k časovým a prostorovým měřítkům ve spreji nestačí spoléhat na přímé pozorování, ale je nutný záznam VR kamerou s dostatečným přiblížením. Na pracovišti využíváme VR kameru Photron SA-Z, která umožňuje zaznamenat 20 000 snímků za sekundu při rozlišení 1024×1024 pixelů a až 2,1 milionu snímků za sekundu při sníženém rozlišení. Její využití je jak při vizualizaci vnitřního proudění v trysce (Obr. 11, 18b, c), tak při makro- (Obr. 18f) a mikroskopickém pozorování sprejů (Obr. 3, 4 a 6). Analýzou obrazu lze ze záznamu určit např. *ÚKS* (Obr. 18d) a jeho fluktuační vzdálenost, rychlost pohybu (Obr. 18a) posoudit charakter rozpadu kapaliny nebo velikost struktur po *primárním rozpadu*. Při vizualizaci je podstatné zajistit vhodný způsob osvětlení experimentu. Je použito zadní podsvícení 100W LED panelem (Obr. 3, 4, 6 a 18e vlevo) a laserovou stěnou (4 ns impulz, Obr. 18e vpravo) z laseru Nd:YAG Gemini (NewWave Research). Statické snímky jsou prováděny fotoaparátem DSLR Canon 70D vybaveným objektivem Macro Canon 100 mm f/2.8 USM a 32mm distančními kroužky.



Obr. 18 a) rychlostní pole ve spreji [82], vyhodnoceno v software PIVlab, b) tvar VJ pro různé Re [83], c) trajektorie částic (proudnice) při vnitřním proudění, upraveno z [83], d) vyhodnocení ÚKS s využitím detekce hran v programu MATLAB [84], e) obraz spreje při použití zadního podsvícení (vlevo) a řez laserovou stěnou s inverzí jasu (vpravo), f) pozorování kolize kapek ve spreji, upraveno z [78].

7.1.3. Obrazová anemometrie

EÚ OTTP již od roku 2000 používá pro zkoumání a diagnostiku proudění tekutin výkonný, zakázkově řešený laboratorní PIV systém firmy TSI inc. PIV (particle image velocimetry) neboli rovinná laserová anemometrie je moderní a dnes už rozšířená optická vizualizační a měřicí metoda užívaná v laboratořích i komerčních provozech. Jedná se o kamerový systém doplněný pulzním laserem, který vytváří světelnou rovinu, jíž osvětluje sledovanou oblast proudění (Obr. 19 nahoře vlevo). Ze dvou po sobě jdoucích záznamech obrazů částic je vyhodnocena vektorová mapa rychlostí proudového pole (Obr. 19 nahoře vpravo).

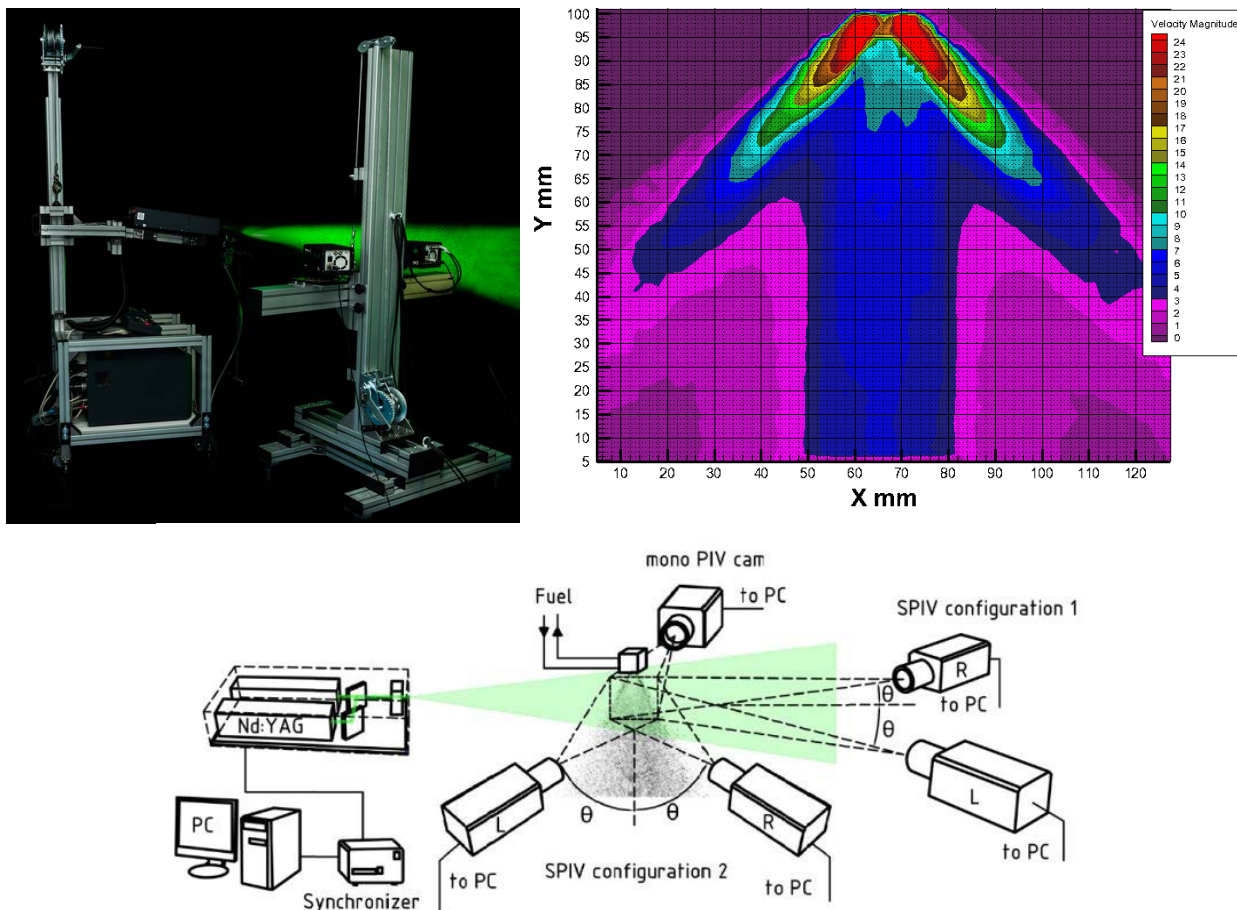
Námi užívaný PIV systém je variabilní a umožňuje např. stereoskopické uspořádání kamer se Scheimpflug optikou pro stanovení dvou až tří složek rychlosti v rovině (Obr. 19 dole). V kombinaci s metodou LIF (Laser Induced Fluorescence), kterou EÚ OTTP také disponuje, lze vyhodnocovat i koncentrace a hmotnostní toky kapaliny ve spreji [65]. Výsledky měření vývojových TVT metodou PIV a FDA jsou shrnuty v pracích [86, 87].

7.1.4. Modely trysek a modelové kapaliny

Produkční trysky umožňují provádět experimenty, při nichž jsou vyhodnocovány regulační charakteristiky trysek a vlastnosti spreje. Tyto testy lze v Laboratoři sprejů provádět přímo s provozními kapalinami (viz Tab. 3) s přihlédnutím k požadavkům na bezpečnost při práci s hořlavinami a chemikáliemi. Vizualizaci vnitřního proudění však není možné vzhledem k velikosti produkční trysky a použitým materiálům provádět přímo. Tyto testy proto provádíme na modelu zvětšeném v poměru 10:1. Bylo nutno zvolit vhodný materiál modelu a modelovou kapalinu [88]. Základními požadavky na model byla snadná výroba, dokonalá průhlednost a dostatečná mechanická i chemická odolnost. Na kapalinu pak byl stanoven soubor požadavků, který zahrnoval zejména: dostatečnou průhlednost výsledné směsi, možnost dosažení shody s indexem lomu modelu nízkou chemickou reaktivitu vůči materiálu modelu. Dalšími, méně striktními, požadavky byly: nízká cena a dostupnost, malé zdravotní rizika, nízká volatilita, a

změna vlastností při rozstříku (např. oxidace, stárnutí), nízká pěnovost, snadné čištění ploch po rozstříku, vhodné reologické vlastnosti pro dosažení požadovaných bezrozměrných kritérií (s možností regulace teploty kapaliny od -20 do 50 °C a při pracovním tlaku kapaliny od 0 do 0,15 MPa).

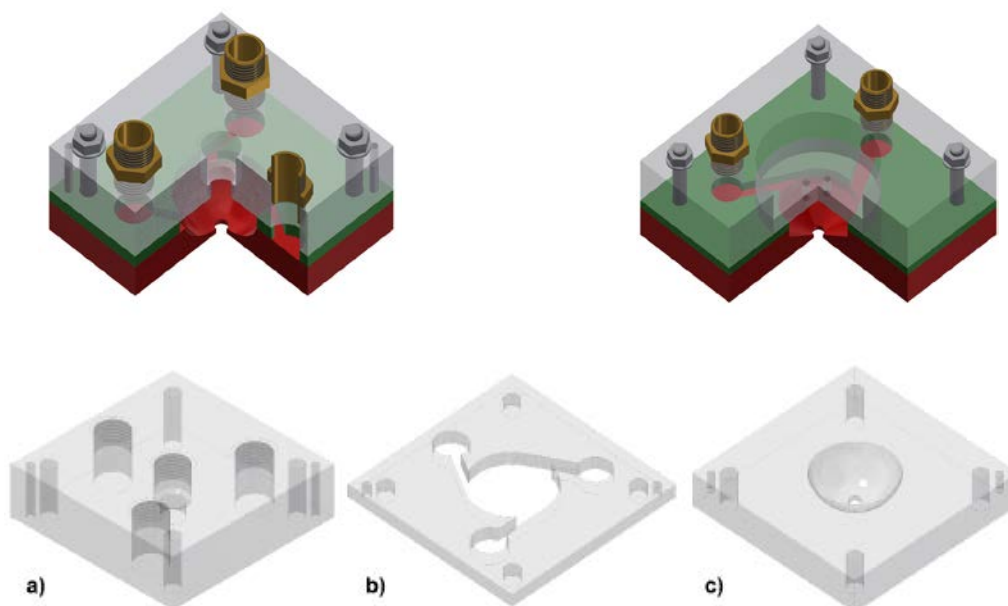
Ze zvažovaných 12 různých materiálů pro model byl vybrán litý PMMA (plexisklo) s opracováním obráběním, broušením a leštění (Obr. 20). V [88] a [82] bylo posuzováno 22 kapalin popsaných v dřívějších pracích, 12 z nich bylo dlouhodobě testováno z hlediska vlivu na materiál modelu. Žádná kapalina, ani směs vytvořená z několika základních kapalin nesplnila požadavky bez kompromisu. Testy ukázaly jako nejvhodnější kapalinu 1) p-cymen, 2) Jet A1, 3) směs Jet A1 a bromnaftalenu.



Obr. 19 Laboratorní PIV systém firmy TSI inc. na EÚ OTTP (nahore, vlevo); rychlostní pole v TVT spreji (nahore, vpravo); typické konfigurace PIV: mono- (MPIV) a stereoskopické uspořádání kamer (SPIV) (dole) [85].

Kritéria proudění

Pro zajištění shody charakteru proudění mezi produkční tryskou a jejím modelem je nutno dle Tab. 1 a 7 respektovat zachování shody Re_l , S a dostatečně vysokou hodnotu Fr . Shoda S u produkční trysky a modelu je zajištěna geometrickou podobností obou objektů.



Obr. 20 Řez sestaveným modelem původní (vlevo nahoře) a nově navržené trysky (vpravo nahoře); díly pův. modelu; a) horní díl se vstupy a závity pro armatury, b) střední díl s tangenciálními vstupními otvory, c) spodní díl s vířivou komorou trysky, dle [88].

Tab. 7 Kritéria proudění, dle [88].

Δp_1 / [MPa]	Re_l / [-]	Fr / [-]		
		Předloha, Jet A1	Model, p-cymen	Model, Jet A1
0,5	755	137	3,4	6,9
1	1021	293	4,7	9,3
1,5	1252	360	5,7	11,4

Pro shodu Re_l platí $Re_{l1} = Re_{l2}$ a tedy s využitím vztahu (17)

$$w_{l01} D_1 / \mu_{l1} = w_{l02} D_2 / \mu_{l2}, \quad (31)$$

kde $D_2/D_1 = M$ je měřítko modelu vůči předloze, které jsou označeny indexy 1 a 2. Při substituci rychlosti proudění kapaliny ve výstupním otvoru vztahem $w_{l0} = C_D \sqrt{2\Delta p_1 / \rho_l}$ ve vztahu (31) je

$$\frac{\Delta p_{l1}}{\Delta p_{l2}} = \frac{\rho_{l1}}{\rho_{l2}} \left(M \frac{C_{D2}}{C_{D1}} \frac{\mu_{l1}}{\mu_{l2}} \right)^2. \quad (32)$$

Pokud uvažujeme obdobné hodnoty ρ_l obou kapalin a obdobné hodnoty C_D obou trysek, přičemž tyto hodnoty jsou dány konstrukcí trysky a její aplikací, je možné dosáhnout shody Re_l nastavením p_l a změnou μ_l (teperace nebo míšení různých kapalin). Vzhledem k omezeným možnostem změny μ_l je nutné pro $M = 10$ výrazně snížit p_l . To se projeví snížením hodnoty Froudeho čísla:

$$Fr = w_{l1} / \sqrt{g \cdot D_c}, \quad (33)$$

kde uvažujeme jako w_l rychlost proudění na vstupu do trysky $w_{l1} = w_{l1} A_o / A_l$ a A_o a A_l jsou výstupní a vstupní průřezy. Z hlediska dostatečně vysoké hodnoty Fr (Tab. 7) lze za vyhovující v modelu trysky považovat Jet A1, u p-cymenu už se může začít uplatňovat vliv gravitace a je nutné posoudit tento vliv detailněji.

Index lomu světla

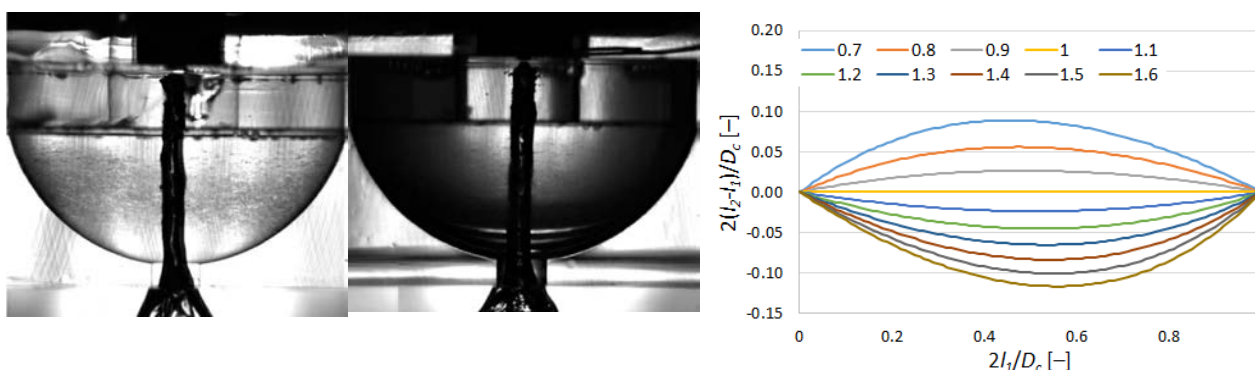
Z literatury je známo, že pro kvalitní měření rychlosti proudění optickými metodami v modelech je nutno zajistit shodu indexu lomu kapaliny a modelu s přesností 0,01 [89]. Index lomu PMMA $n_1 = 1,49$ je shodný s indexem lomu p-cymenu. Jet A1 má $n_2 = 1,45$. I tento malý rozdíl mezi n_1 a n_2 vede k podstatným, i na pohled zřejmým, změnám v průchodu světelného paprsku modelem, jak patrně z Obr. 21. Tyto rozdíly již zhoršují kvalitu vizualizací proudění vlivem poklesu kontrastu v obraze. Optická měření (LDA, PIV) vyžadují korekci polohy měřeného bodu [90]:

$$l_2 = \frac{D_c/2}{1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{D_c}{2l_1} - 1 \right)} \quad (34)$$

kde l_1 je poloha měřeného bodu bez vlivu indexu lomu na průchod světelného paprsku modelem. Pro výrazně odlišné poměry indexu lomu n_1/n_2 jsou korekce nezbytné, viz Obr. 21 vpravo. Podobně je nutno korigovat naměřené výsledky tečné a radiální rychlosti koeficienty:

$$k_r = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{a} \quad k_t = 1 + \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \frac{2l_2}{D_c}. \quad (35)$$

Detailněji je problematika měření v modelu trysky studována v [83, 88, 91].



Obr. 21 TVT při $Re = 755$: p-cymen (vlevo); b) Jet A1 (uprostřed); Optická korekce pro různé poměry indexu lomu n_1/n_2 v závislosti na poloze v modelu. (vpravo).

7.2. VÝZNAM A VYUŽITÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ

S nárůstem výpočetního výkonu a rozvojem CFD metod v posledních dvou dekadách vzrostl počet prací zabývajících se numerickou simulací dějů v tryskách, zejména vnitřního proudění. Vzhledem ke složitosti modelování dvoufázového a často turbulentního proudění u TVTO je v současnosti ale ještě neefektivní provádět pro běžné použití simulace *primárního* a *sekundárního rozpadu* kapaliny. Úspěšně lze simulovat interakci již vytvořených kapek s okolním prostředím. Data o vlastnostech spreje po dokončeném *sekundárním rozpadu* kapaliny, a případně i informace o průběhu *primárního rozpadu* je však vhodné získat prostřednictvím experimentů.

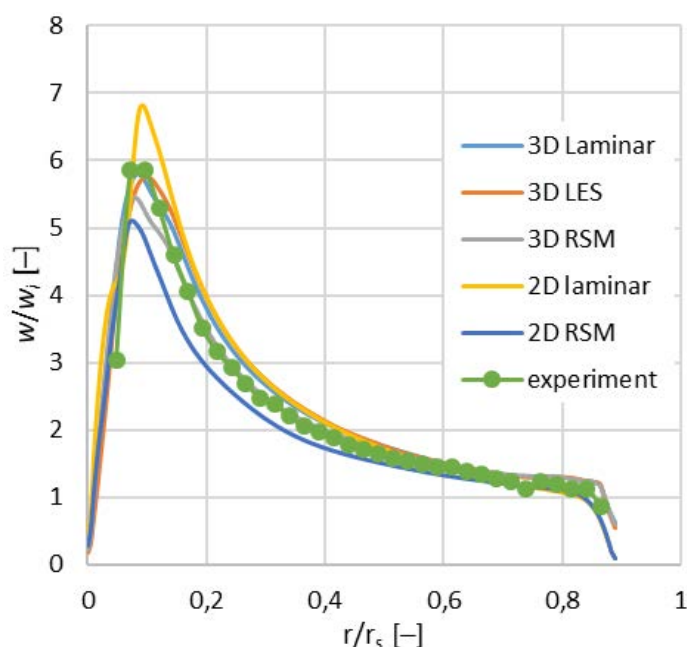
Numerické simulace TVTO jsou na našem pracovišti také omezeny na vnitřní proudění. Vzhledem k absenci publikací k TVTO vycházíme z informací k TVT [92] [93] [94] [95] [96], přičemž v převážné většině byl použit komerční software Ansys Fluent, pro 2D řešení s laminárním modelem „turbulence“. Pouze práce [57] [97] [94] použily 3D model. Výjimkou byl $k-\varepsilon$ [96] a RSM [98] [99] model turbulence.

Vnitřní proudění simulujeme metodami CFD (URANS, případně LES) v komerčním software Ansys Fluent [27]. Proudění je řešeno jako dvoufázové pomocí modelu Volume of Fluid. K dispozici je výpočetní cluster (50×PC) s podrobnosti uvedenými zde:

Předpokladem pro důvěryhodné využití výsledků numerických modelů je jejich validace experimentem. U transientních simulací je provedena validace časově průměrovaných hodnot: rychlostní profily (výsledky získané metodou LDA [27], Obr 22), geometrie VJ a ÚKS využitím VR vizualizace (Obr 18b, c, d), C_D (viz Tab. 5) a validace časově proměnných veličin (frekvence a amplituda vln na povrchu VJ a fluktuací ÚKS).

Pro simulace TVT lze použít jednoduché 2D řešení s využitím osy symetrie trysky. Tento přístup nelze aplikovat na TVTO s mimoosovým obtokem, které je nutné řešit striktně ve 3D. V případě, že VJ vykazuje stabilní chování a je symetrické vůči ose trysky, lze ve 3D využít periodicitu dle počtu vstupních a obtokových otvorů [82]. Simulace TVTO včetně popisu modelu, sítě, testu nezávislosti sítě a validace s experimentem jsou uvedeny v [27].

Obr. 22 ukazuje porovnání různých numerických modelů s LDA daty z experimentu na průhledném modelu TVTO. Je zřejmé, že všechny modely byly schopny predikovat tvar rychlostního profilu, polohu a s různou přesností i hodnotu maxima rychlosti. 2D modely byly méně přesné; laminární 2D model nadhodnotil o 15 %, zatímco 2D RSM o 15 % podhodnotil. Podobně je to u charakteristik VJ (Tab. 1 v [82]).

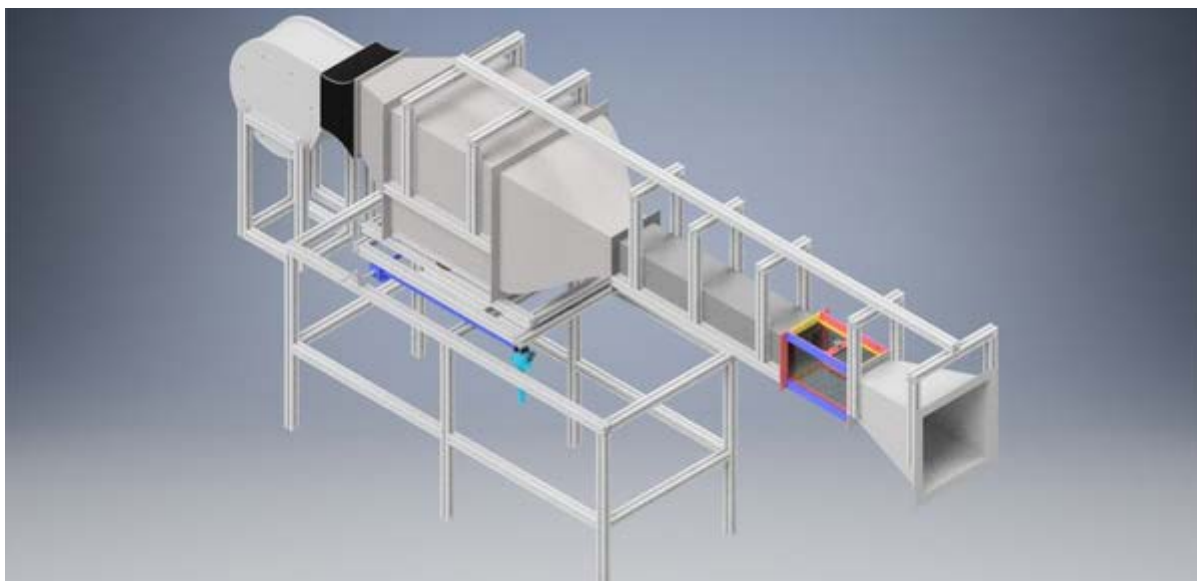


Obr. 22 Porovnání profilu vířivé složky rychlosti na poloze v modelu numerické modely vs. LDA data [82].

7.3. SOUČASNÉ TRENDY A FORMULACE NOVÝCH CÍLŮ VE VÝZKUMU

Předložené výsledky popisují výzkum zaměřený na samotné chování trysek a rozstřík spreje v tzv. „chladných“ atmosférických podmínkách, jak je to běžné na jiných výzkumných pracovištích. V mnoha aplikacích je sprej ovlivněn působením okolí, ať jde o proudění okolního plynu, zvýšený nebo snížený tlak a teplotu, chemické reakce kapaliny apod. Vlastnosti „izolovaného“ spreje se liší od reálné aplikace. Naše pracoviště soustavně připravuje vybavení pro výzkum sprejů za „realistických“ podmínek, v současnosti je dokončována stavba malého větrného tunelu pro optická měření trysek za přítomnosti souproudu a příčného proudu vzduchu (Obr. 23). Kooperativně, formou studentských stáží, jsou řešena témata vstřiku kapaliny za zvýšeného tlaku a teploty (v přetlakové temperované komoře) (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Germany), podobně i reaktivní spreje (Budapest University of Technology

and Economics), i zde autor předpokládá vlastní řešení pro zvýšení konkurenceschopnosti pracoviště. Ve výhledu je vybudování zkušebny pro testy spalovací komory turbínových motorů.



Obr. 23 Větrný tunel pro optická měření trysek v proudícím prostředí (návrh Bc. Ondřej Cejpek).

8. ZÁVĚR

Předkládané teze dokumentují přístupy a prezentují vybrané výsledky prací zaměřených na téma TVTO, které autor získal, nebo se na nich podílel v rámci řešení výzkumných projektů, úkolů hospodářské spolupráce a vedení kvalifikačních prací. Z několika témat, kterým se autor věnuje bylo vybráno toto téma pro prezentaci přístupů a metod řešení problémů.

Jsou zde zdůrazněny problémy TVTO, kterými se naše pracoviště systematicky zabývá a popsány vybrané výsledky experimentů a CFD simulací k charakteristikám spreje a vlivu konstrukčních úprav trysek. Je z nich patrné, že přes široké použití TVT je stále podstatný potenciál pro nová řešení, zejména TVTO. Mezi nejdůležitější výsledky výzkumné práce, které byly v této práci zmíněny, patří:

- analýza účinnosti a transferu energií při rozstříku v porovnání s jinými metodami rozprašování kapalin,
- výzkum vlivu reologických vlastností vybraných kapalin na rozprašování a charakteristiky TVTO,
- vůbec první experimentální i CFD výsledky ukazující vnitřní proudění v TVTO a zejména vliv obtokového systému,
- objasnění příčin nestabilit vnitřního toku a spreje a jejich potlačení,
- detailní analýza interakce mezi kapalinou a okolním prostředím,
- vysvětlení charakteru *primárního* a *sekundárního rozpadu* kapalin,
- návrh nových konfigurací TVTO s lepšími vlastnostmi, než původní trysky, objasnění vlivu geometrie na vnitřní proudění, vlastnosti spreje a provozní charakteristiky trysky.

Soustavná práce v oblasti rozstříku kapalin vedla k vybudování laboratoře, která snese srovnání s jinými zahraničními pracovišti a umožnila získat unikátní původní výsledky o charakteristikách sprejů a dalších vlastnostech různých typů trysek.

Autor dlouhodobě formuje a vede výzkumný tým, jehož podstatným úkolem je výcvik mladých výzkumných pracovníků a umožňuje studentům doktorského, MS a BS studia získat zkušenosti a dovednosti ve vědeckovýzkumné práci. Důležitým aspektem je motivace a získávání

talentovaných studentů pro tuto práci a podpora jejich profesního růstu. Projektová práce v laboratoři umožňuje individuální přístup ke studentům v rámci vedení jejich kvalifikačních prací.

Uvedený přehled výsledků je pouze malou částí práce autora a jeho výzkumného týmu v oblasti TVTO. Podrobněji, a ve větší šíři jsou výsledky k TVTO a jiným výzkumným aktivitám uvedeny v publikacích autorského týmu. Z uvedeného je zřejmá potřeba týmové práce i význam mezinárodní spolupráce. Práce ukazuje na symbiózu mezi výzkumnou a výukovou činností. Velkou část výzkumných činností bylo možno řešit v rámci kvalifikačních prací. Různé výstupy výzkumu současně slouží i k výukovým účelům, což se týká např. využití výzkumné infrastruktury nebo ukázek vybraných výsledků.

Poděkování

Poděkování patří prof. Ing. Miroslavu Jíchovi, CSc., který autora k tématice rozprašování a sprejů přivedl. Předložené výsledky výzkumu a vývoje by nevznikly bez přispění a spolupráce řady studentů a kolegů, zejména jmenuji Ing. Milana Malého (experimenty s LDA, FDA pro řadu TVT a TVTO, vizualizace proudění, numerické simulace), dr. Grahama Wigleyho (FDA), Ing. Jaroslava Slámu (numerické simulace), Ing. Marcela Sapíka (průhledný model TVTO a modelové kapaliny), Ing. Ladu Janáčkovou (vizualizace proudění a měření s LDA), Ing. Matouše Zarembu, Ph.D. (experimenty s LDA, FDA, skripty v Matlabu), Ing. Lukáše Ďurdinu (experimenty s PIV, FDA) a Noé Pinto del Corrala (skripty pro vyhodnocení FDA dat). V neposlední řadě patří poděkování mojí ženě za její bezmeznou trpělivost.

SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

- [1] Y. Khavkin, The Theory and Practice of Swirl Atomizers, Taylor & Francis 2004.
- [2] A.H. Lefebvre, Atomization and sprays, Hemisphere Pub. Corp., New York, 1989.
- [3] M. Milkvik, P. Stähle, H.P. Schuchmann, V. Gaukel, J. Jedelsky, M. Jicha, Twin-fluid atomization of viscous liquids: the effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size, International Journal of Multiphase Flow.
- [4] M. Zaremba, L. Weiß, M. Malý, M. Wensing, J. Jedelský, M. Jicha, Low-pressure twin-fluid atomization: Effect of mixing process on spray formation, International Journal of Multiphase Flow 89 (2017) 277-289.
- [5] M. Zaremba, J. Kozák, M. Malý, L. Weiß, P. Rudolf, J. Jedelský, M. Jicha, An experimental analysis of the spraying processes in improved design of effervescent atomizer, International Journal of Multiphase Flow 103 (2018) 1-15.
- [6] J. Jedelský, M. Jicha, Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomisers for industrial burners, Applied Thermal Engineering 96 (2016) 286-296.
- [7] J. Jedelsky, M. Jicha, Unsteadiness in effervescent sprays: A new evaluation method and the influence of operational conditions, Atomization and Sprays 18(1) (2008) 49-83.
- [8] A. Urbán, M. Zaremba, M. Malý, V. Józsa, J. Jedelský, Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization, International Journal of Multiphase Flow 95 (2017) 1-11.
- [9] J. Jedelsky, M. Jicha, Energy considerations in spraying process of a spill-return pressure-swirl atomizer, Applied Energy 132(0) (2014) 485-495.
- [10] J. Jedelsky, M. Jicha, Energy conversion during effervescent atomization, Fuel 111 (2013) 836-844.
- [11] A. Urbán, M. Zaremba, M. Malý, V. Józsa, J. Jedelský, Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization, International Journal of Multiphase Flow in press (2017).
- [12] L. Bayvel, Z. Orzechowski, Liquid Atomization, Taylor & Francis Inc. 1993.
- [13] S.M. Rivette, Compound port fuel injector nozzle droplet sizes and spray patterns, (1996).

- [14] C. Dumouchel, J. Cousin, K.I. Triballier, On the role of the liquid flow characteristics on low-Weber-number atomization processes, *Experiments in Fluids* 38(5) (2005) 637-647.
- [15] M. Loffler-Mang, W. Leuckel, Atomization with Spill-Controlled Swirl Pressure-Jet Nozzles, ICLASS-91, Gaithersburg, MD, USA (1991) 431-440.
- [16] R. Petela, Exergetic analysis of atomization process of liquid, *Fuel* 63(3) (1984) 419-422.
- [17] X.G. Wang, Z.H. Huang, O.A. Kuti, W. Zhang, K. Nishida, Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 31(4) (2010) 659-666.
- [18] J. Jedelsky, M. Maly, N. Pinto del Corral, G. Wigley, L. Janackova, M. Jicha, Air-liquid interactions in a pressure-swirl spray, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 121 (2018) 788-804.
- [19] J. Jedelsky, M. Jicha, Optimization of Pressure-Swirl Atomizer for a Burner Retrofit, Proceedings of the 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chania, Greece, Mediterranean Agronomic Institute of Chania, 2013, pp. 1 - 8.
- [20] S.M. Hosseinalipour, R. Ghorbani, H. Karimaei, Effect of liquid sheet and gas streams characteristics on the instability of a hollow cone spray using an improved linear instability analysis, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 11(1) (2016) 24-33.
- [21] N. Ashgriz, SpringerLink (Online service), Handbook of atomization and sprays: Theory and applications, Springer, New York, 2011, pp. xvi, 935 p.
- [22] J. Chinn, D. Cooper, A. Yule, G. Nasr, Stationary rotary force waves on the liquid-air core interface of a swirl atomizer, *Heat and Mass Transfer* (2015) 1-14.
- [23] M. Horvay, W. Leuckel, LDA-measurements of liquid swirl flow in converging swirl chambers with tangential inlets, 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, 1985, p. 11.
- [24] M. Horvay, W. Leuckel, Experimental and theoretical investigation of swirl nozzles for pressure-jet atomization, *German chemical engineering* 9(5) (1986) 276-283.
- [25] P.K. Senecal, D.P. Schmidt, IRutland, C.JReitz, R.DCorradini, M.L, Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization, *International Journal of Multiphase Flow* 25(6-7) (1999) 1073-1097
- [26] M. Maly, J. Jedelsky, M. Sapik, o. Cejpek, J. Slama, G. Wigley, Effect of spill orifice geometry on performance of spill-return pressure-swirl atomizers, ICLASS18, Chicago, 2018, p. 8.
- [27] M. Maly, J. Jedelsky, J. Slama, L. Janackova, M. Sapik, G. Wigley, M. Jicha, Internal flow and air core dynamics in Simplex and Spill-return pressure-swirl atomizers, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 123 (2018) 805-814.
- [28] A.H. Lefebvre, V.G. McDonell, Atomization and sprays, CRC press 2017.
- [29] D.R. GuILDENBECHER, C. López-Rivera, P.E. Sojka, Secondary atomization, *Experiments in Fluids* 46(3) (2009) 371-402.
- [30] G.M. Faeth, L.P. Hsiang, P.K. Wu, Structure and breakup properties of sprays, *International Journal of Multiphase Flow* 21 (1995) 99-127.
- [31] J. Jedelsky, M. Jicha, J. Slama, J. Otahal, Development of an Effervescent Atomizer for Industrial Burners, *Energy & Fuels* 23 (2009) 6121-6130.
- [32] N. Fdida, J.B. Blaisot, A. Floch, D. Dechaume, Drop-Size Measurement Techniques Applied to Gasoline Sprays, *Atomization and Sprays* 20(2) (2010) 141-162.
- [33] G. Wigley, M. Goodwin, G. Pitcher, D. Blondel, Imaging and PDA analysis of a GDI spray in the near-nozzle region, *Exp. Fluids* 2004, pp. 565-574.
- [34] A.H. Lefebvre, Gas turbine combustion, Hemisphere Pub. Corp., Washington, 1983.
- [35] A. Radcliffe, Fuel Injection, High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion, 1960.
- [36] X.F. Wang, A.H. Lefebvre, Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles, *Journal of Propulsion and Power* 3(1) (1987) 11-18.

- [37] A.K. Jasuja, Atomization of crude and residual fuel oils, *Journal of Engineering for Power-Transactions of the Asme* 101(2) (1979) 250-258.
- [38] R.K. Babu, M.V. Narasimhan, K. Karayanaswamy, Prediction of Mean Drop Size of Fuel Sprays from Swirl Spray Atomizers, *Proceedings of the second International Conference on Liquid Atomisation and Spray Systems*, Madison, Wisconsin, 1982, pp. 99-106.
- [39] Z. Orzechowski, Liquid atomization, (In Polish) ed., WNT, Warsaw, 1976.
- [40] M. Malý, A.S. Moita, J. Jedelsky, A.P.C. Ribeiro, A.L.N. Moreira, Effect of nanoparticles concentration on the characteristics of nanofluid sprays for cooling applications, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2018).
- [41] A.J. Yule, J.J. Dunkley, *Atomization of Melts: For Powder Production and Spray Deposition*, Oxford University Press, USA, 1984.
- [42] M. Malý, L. Janáčková, J. Jedelský, M. Jícha, R. Lenhard, K. Kaduchová, Impact of alternative fuel rheology on spraying process of small pressure-swirl atomizer, *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2016, p. 020031.
- [43] N.K. Rizk, A.H. Lefebvre, Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers, *Journal of Propulsion and Power* 1(3) (1985) 193-199.
- [44] Powley, *Crude oil density versus temperature and pressure*. <http://www.searchanddiscovery.net/documents/2006/06015powley/images/a09.htm>. (Accessed 19 Oct. 2006).
- [45] D.R. Carlisle, Communication on the Performance of a Type of Swirl Atomizer, by A. Radcliffe, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1955, p. 101.
- [46] W. Tipler, A.W. Wilson, *Combustion in Gas Turbines*, CIMAC, Paris, 1959, pp. 897 – 927.
- [47] M.M. Elkotb, N.M. Rafat, H.M. A., The Influence of Swirl Atomizer Geometry on the Atomization Performance., *Proceedings of the first ICLASS*, Tokyo, 1978, pp. 109 – 115.
- [48] M. Maly, L. Janackova, J. Jedelsky, M. Jicha, The influence of spill-line geometry on a spray generated by a pressure-swirl atomizer, *EPJ Web of Conferences* (2016).
- [49] S. Chen, A. Lefebvre, J. Rollbuhler, Factors influencing the circumferential liquid distribution from pressure-swirl atomizers, *Journal of engineering for gas turbines and power* 115(3) (1993) 447-452.
- [50] J. Jedelsky, M. Malý, L. Janáčková, M. Jícha, Effect of Geometric Factors on Spray Characteristics and Stability for Small Spill-Return Pressure-Swirl Atomizers, *ILASS 2016*, Brighton, In press, p. 12.
- [51] A. Yule, I. Widger, Swirl atomizers operating at high water pressure, *International journal of mechanical sciences* 38(8) (1996) 981-999.
- [52] E. Von Lavante, U. Maatje, Investigation of unsteady effects in pressure swirl atomizers, *Zaragoza* 9 (2002) 11.
- [53] D. Cooper, A. Yule, J. Chinn, Experimental measurements and computational predictions of the internal flow field in a pressure swirl atomizer, *Proc. ILASS-Europe*, 1999.
- [54] J. Xue, M.A. Jog, S.M. Jeng, E. Steinthorsson, M.A. Benjamin, Effect of geometric parameters on simplex atomizer performance, *Aiaa Journal* 42(12) (2004) 2408-2415.
- [55] W. Qian, X. Hui, C. Zhang, Q. Xu, Y. Lin, C.-J. Sung, A Numerical Study of the Internal Flow in a Pressure Swirl Atomizer, (50848 C2 - Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air) (2017) V04AT04A070-C1 - Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions.
- [56] S. Kim, T. Khil, D. Kim, Y. Yoon, Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector, *Measurement Science and Technology* 20(1) (2009) 015403.
- [57] B. Sumer, N. Erkan, O. Uzol, I. Tuncer, Experimental and Numerical Investigation of a Pressure Swirl Atomizer.
- [58] S. Dash, M. Halder, M. Peric, S. Som, Formation of air core in nozzles with tangential entry, *Journal of fluids engineering* 123(4) (2001) 829-835.

- [59] E.J. Lee, S.Y. Oh, H.Y. Kim, S.C. James, S.S. Yoon, Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers, *Experimental thermal and fluid science* 34(8) (2010) 1475-1483.
- [60] M. Halder, S. Dash, S. Som, Initiation of air core in a simplex nozzle and the effects of operating and geometrical parameters on its shape and size, *Experimental thermal and fluid science* 26(8) (2002) 871-878.
- [61] S. Moon, E. Abo-Serie, C. Bae, Air flow and pressure inside a pressure-swirl spray and their effects on spray development, *Experimental Thermal and Fluid Science* 33(2) (2009) 222-231.
- [62] M. Maly, J. Jedelsky, M. Sapik, O. Cejpek, J. Slama, G. Wigley, Effect of spill orifice geometry on performance of spill-return pressure-swirl atomizers, In proceedings of ICLASS 2018, 14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1 - 8.
- [63] N.K. Rizk, A.H. Lefebvre, Spray characteristics of spill-return atomizers, *Journal of Propulsion and Power* 1(3) (1985) 200-204.
- [64] X.F. Dai, A.H. Lefebvre, J. Rollbuhler, Spray Characteristics of a Spill-Return Airblast Atomizer, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 111(1) (1989) 63-69.
- [65] J. Jedelsky, M. Jicha, Spatially and temporally resolved distributions of liquid in an effervescent spray, *Atomization and Sprays* 22(7) (2012) 603-626.
- [66] A.J. Yule, J. Chinn, Swirl atomizer flow: classical inviscid theory revisited, *International Conference on Liquid Atomization and Sprays, ICLASS-94, Rouen, France, 1994.*
- [67] J.J. Chinn, An appraisal of swirl atomizer inviscid flow analysis, Part 1: The principle of maximum flow for a swirl atomizer and its use in the exposition and comparison of early flow analyses, *Atomization and Sprays* 19(3) (2009).
- [68] J.J. Chinn, An appraisal of swirl atomizer inviscid flow analysis, part 2: inviscid spray cone angle analysis and comparison of inviscid methods with experimental results for discharge coefficient, air core radius, and spray cone angle, *Atomization and Sprays* 19(3) (2009).
- [69] A. Jones, Design optimization of a large pressure-jet atomizer for power plant, *Proceedings of the Second International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 1982, p. 181.*
- [70] J. Ballester, C. Dopazo, Discharge coefficient and spray angle measurements for small pressure-swirl nozzles, *Atomization and sprays* 4(3) (1994).
- [71] M. Benjamin, A. Mansour, U. Samant, S. Jha, Y. Liao, T. Harris, S. Jeng, Film thickness, droplet size measurements and correlations for large pressure-swirl atomizers, *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, American Society of Mechanical Engineers, 1998, pp. V003T06A050-V003T06A050.*
- [72] A. Sakman, M. Jog, S. Jeng, M. Benjamin, Parametric study of simplex fuel nozzle internal flow and performance, *AIAA journal* 38(7) (2000) 1214-1218.
- [73] L. Craig, N. Barlow, S. Patel, B. Kanya, S.P. Lin, Optimal and Nonoptimal Flows in a Swirl Atomizer, *Atomization and Sprays* 19(12) (2009) 1113.
- [74] G. Amini, Liquid flow in a simplex swirl nozzle, *International Journal of Multiphase Flow* 79 (2016) 225-235.
- [75] Jedelsky, J., Maly, M., Holub, M., Jicha, M., Some aspects of desintegration of annular liquid sheet in pressure-swirl Sprays, *The 16th International Conference on Fluid Flow Technologies (CMFF'15), Budapest, Hungary, 2015*
- [76] N. Ashgriz, J.Y. Poo, Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops, *Journal of Fluid Mechanics* 221 (2006) 183-204.
- [77] K.G. Krishnan, E. Loth, Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes, *International Journal of Multiphase Flow* 77 (2015) 171-186.
- [78] A. Červenec, Zpracování a analýza vysokorychlostních videozáznamů procesu rozprašování u tlakových vířivých trysek, Brno, *Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 2017, p. 38. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.*

- [79] E. Calvo, J.A. García, I. García, L.A. Aísa, Errors analysis in the evaluation of particle concentration by PDA on a turbulent two-phase jet: application for cross section and transit time methods, *Experiments in Fluids* 47(3) (2009) 489-508.
- [80] J. Qian, C.K. Law, Regimes of coalescence and separation in droplet collision, *Journal of Fluid Mechanics* 331 (1997) 59-80.
- [81] J. Jedelsky, F. Lizal, M. Jicha, Characteristics of turbulent particle transport in human airways under steady and cyclic flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 35 (2012) 84-92.
- [82] M. Malý, J. Slama, M. Sapík, J. Jedelsky, 2D and 3D numerical modelling of internal flow of Pressure-swirl atomizer., In *Proceedings of the International conference Experimental Fluid Mechanics 2018*. Accepted for presentation., Praha, 2018.
- [83] L. Janáčková, Vizualizace a optická měření vnitřního a vnějšího dvoufázového proudění u tlakových vířivých trysek, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018, p. 70. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [84] M. Malý, Experimentální studie vlastností spreje a funkčnosti malých tlakových vířivých trysek, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016, p. 84. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [85] L. Durdina, Measurement of Spray Characteristics Using Optical Measurement Methods, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, p. 81. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [86] L. Durdina, J. Jedelsky, M. Jicha, Spray structure of a pressure-swirl atomizer for combustion applications, *Efm11 - Experimental Fluid Mechanics 2011/2012*.
- [87] L. Durdina, J. Jedelsky, M. Jicha, Investigation and comparison of spray characteristics of pressure-swirl atomizers for a small-sized aircraft turbine engine, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 78(0) (2014) 892-900.
- [88] M. Sapík, Testování průhledného modelu tlakové vířivé trysky, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018, p. 100. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [89] F. Lizal, J. Jedelsky, K. Morgan, K. Bauer, J. Llop, U. Cossio, S. Kassinos, S. Verbanck, J. Ruiz-Cabello, A. Santos, E. Koch, C. Schnabel, Experimental methods for flow and aerosol measurements in human airways and their replicas, (1879-0720 (Electronic)). *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 113 (2018) 95–131.
- [90] Z. Zhang, LDA application methods laser doppler anemometry for fluid dynamics, *Experimental fluid mechanics*, Springer, Berlin ; London, 2010, p. p.
- [91] M. Malý, M. Sapík, J. Jedelský, L. Janáčková, M. Jicha, G. Wigley, Internal flow characteristics in scaled pressure-swirl atomizer, *Proceedings of the International conference Experimental Fluid Mechanics 2017*, Mikulov, Czech Republic, 2017.
- [92] A. Yule, J. Chinn, Pressure swirl atomizer internal flow and performance, *Proceedings of the 10th annual conference on liquid atomization and spray systems ILASS, Americas, 1997*, pp. 205-209.
- [93] J.J. Chinn, *The numerics of the swirl atomizer. Atomization and sprays*, 2000.
- [94] J. Madsen, B.H. Hjertager, T. Solberg, Numerical simulation of internal flow in a large-scale pressure-swirl atomizer, *Proc. ILASS-Europe 2004* (2004) 183-188.
- [95] A. Nouri-Borujerdi, A. Kebriaee, Numerical simulation of laminar and turbulent two-phase flow in pressure-swirl atomizers, *AIAA journal* 50(10) (2012) 2091-2101.
- [96] A. Datta, S. Som, Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl spray pressure nozzle, *International journal of heat and fluid flow* 21(4) (2000) 412-419.
- [97] S. Shaikh, U. Banaszak, E. Von Lavante, D. Cooper, A. Yule, CFD prediction of the Effects of Viscosity on the Internal Flow of a Scale Pressure-swirl Atomiser, *Proc. ILASS-Europe, 2004*.

[98] D. Donjat, J. Estivalezes, M. Michau, A description of the pressure swirl atomizer internal flow, ASME, 2002.

[99] A. Ibrahim, Comprehensive study of internal flow field and linear and nonlinear instability of an annular liquid sheet emanating from an atomizer, University of Cincinnati, 2006.

ABSTRACT

The thesis deals with the topic of liquid atomization conducted by assoc. prof. Ing. Jan Jedelský, Ph.D. at the Spray laboratory, Energy department, FME BUT Brno as a part of his fluid mechanic's research. The focus is given to pressure-swirl (PS) atomizers; complex basic research of the advanced spill-return version of the PS atomizers is provided with the aim to improve the understanding of the phenomena related to the spraying process of these rarely studied spraying devices and to advance their performance with innovative designs.

The PS atomizers are widely used in industrial, domestic, agricultural and other applications. Their popularity due to their high atomization efficiency and competitive design-adjustable spray characteristics in conjunction with the recent advances in experimental instrumentation (whole field velocity measurements, droplet sizing capabilities, HS cameras, etc.), analysis methods as well as the increasing numerical simulation power demonstrate the potential for further advancements in the PS sprays. The thesis shows that several topics are insufficiently explored and solved using the present techniques and the formerly acquired results need a revision.

The author's approaches and methods used for the research were classified with the justification for the importance of the experimental approaches and present abilities of numerical simulations.

The spraying processes are decomposed into the fundamental mechanisms, that are treated individually in the following text. Selected original findings of the author's team and also the documentation of the present experimental infrastructure used to acquire the results are presented.

The effect of operating conditions as well as the rheological properties of the sprayed liquid on the spray characteristics are elucidated, and new empirical corrections to the equations for their effects are presented as exemplary results. An investigation of the effect of selected geometrical characteristics (spill line configuration, inlet ports and shape of the convergent part of the swirl chamber) on the atomizer performance at a defined range of operating regimes is provided.

Particular focus is given to the internal flow investigation. The character of the internal flow and formation of the liquid sheet outside the atomizer is investigated experimentally in a transparent model made of cast PMMA (Poly-methyl methacrylate) (using phase- and laser-Doppler anemometry, Particle image velocimetry and high-speed imaging) and numerically (with computational fluid dynamics tools using 2D/3D URANS simulations). The interaction of the sprayed liquid with surrounding fluid as well as the mutual interactions between droplets are explained using the Doppler-based methods and high-speed imaging.

In conclusion, the need for the study of the spraying process under realistic conditions with the presence of the external cross/coo-flow and elevated pressure/temperature is addressed. The thesis underlines the power of the team work and international collaboration. A link between the scientific research and education of students follows from the references used in the thesis. Selected results of this fluid mechanics topic are used for tuition at the author's department.