



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV PŘESNOSTI A ZPŮSOBU VÝROBY NA ROZPRAŠOVÁNÍ KAPALIN POMOCÍ TLAKOVÝCH VÍŘIVÝCH TRYSEK

INFLUENCE OF MANUFACTURING PROCESS AND PRECISION ON QUALITY OF LIQUID ATOMIZATION
FROM PRESSURE-SWIRL ATOMIZERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kryštof Lebeda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Malý,
Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Kryštof Lebeda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Malý, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Vliv přesnosti a způsobu výroby na rozprašování kapalin pomocí tlakových vířivých trysek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tlakové vířivé trysky (TVT) jsou používány v mnoha aplikacích, např. pro rozprašování paliv ve spalovacích motorech různých typů. Tato klasická koncepce podléhá i v současnosti inovacím pro zvýšení technické hodnoty motoru jako celku. Struktura a geometrie spreje, velikost a rychlost generovaných kapek patří mezi důležité a sledované parametry trysek, které budou zkoumány na konkrétních tryskách vyrobených jak konvenčním obráběním, tak moderním 3D tiskem. Mezi sledované a historicky málo prozkoumané parametry bude patřit kvalita povrchu či nepřesnosti ve výrobě výstupního otvoru.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše relevantních publikací k TVT se zaměřením na zkoumané parametry
- analýza výsledků z optických metod
- vyhodnocení vlivu provozních podmínek a typu výroby na sprej
- určení a popis rozdílů ve výtoku kapaliny z trysky pomocí vysokorychlostní kamery
- porovnání dat z jednotlivých trysek mezi sebou

Seznam doporučené literatury:

BAYEL, L., ORZECOWSKI, Z., Liquid atomization, Taylor & Francis, Washington, D.C., 1993

KHAVKIN, Y., The Theory and Practice of Swirl Atomizers, Taylor & Francis, 2004

LEFEBVRE, A. H., and MCDONELL, V. G., 2017, Atomization and sprays, CRC press

ZHANG, Z., LDA Application Methods: Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics (Experimental Fluid Mechanics), Springer, ISBN: 9783642135132, 2010

BSA Flow Software user guide v6.5, Skovlunde, 2017

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Práce se zabývá vlivem nepřesností a způsobu výroby na kvalitu rozprašování u tlakových vířivých trysek. Nejprve jsou nastíněny základní principy atomizace. Poté jsou zmíněny sledované parametry rozprašování, u tlakových vířivých trysek. Následuje rešerše dostupných studií, zkoumajících ovlivnění vybraných parametrů nepřesnostmi a způsobem výroby. V praktické části bylo provedeno vyhodnocení dat z měření tlakových vířivých trysek s vadami na výstupním otvoru, trysek s různou drsností povrchu a trysek vyrobených pomocí 3D tisku. Náklon a vyosení výstupního otvoru trysky významně snížily kvalitu rozprašování. Vliv drsnosti u konvenčně vyráběných trysek na kvalitu atomizace nebyl zaznamenán. Použitím 3D tisku pro výrobu trysek došlo ke zhoršení jemnosti atomizace. Sražení hrany výstupního otvoru podporovalo rozevření kužele spreje, avšak nemělo vliv na jemnost atomizace.

Klíčová slova

Tlaková vířivá tryska, simplex, atomizace, rozprašování, drsnost povrchu, nepřesnosti výroby, 3D tisk, výstupní otvor.

Abstract

The thesis deals with the effects of manufacturing inaccuracies and manufacturing method on the spray quality of pressure-swirl atomizers. First, basic principles of atomization are outlined. In the next section, observed atomization parameters of pressure swirl atomizers are discussed. This is followed by a research of available studies investigating influence of inaccuracies and manufacturing methods on selected parameters. In the practical part, evaluation of measured data of pressure-swirl atomizers with defects at discharge orifice, different surface roughness and atomizers made by 3D printing was carried out. Skewness and misalignment of discharge orifice significantly reduced spray quality. No effect of surface roughness for conventionally manufactured nozzles was found. The use of 3D printing for nozzle production resulted in a deterioration of atomization fineness. Chamfering of discharge orifice promoted larger spray cone angle but did not affect the atomization fineness.

Keywords

Pressure-swirl atomizer, simplex, atomization, spraying, surface roughness, manufacturing precision, 3D printing, discharge orifice.

Citace

LEBEDA, Kryštof. *Vliv přesnosti a způsobu výroby na rozprašování kapalin pomocí tlakových vířivých trysek*. Brno, 2022. 44s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Milan Malý, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Milana Malého, Ph.D. a uvedl uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, z kterých jsem použité informace čerpal.

.....

Kryštof Lebeda
20. května 2022

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Milanovi Malému, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a za poskytnutá data z měření. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za neustálou podporu v průběhu studia.

Obsah

Úvod	3
1 Atomizace	4
1.1 Proces atomizace	4
1.2 Trysky	4
1.2.1 Tlakové trysky	4
1.2.2 Rotační trysky	6
1.2.3 Dvumédiové trysky	6
1.3 Princip atomizace u tlakových vířivých trysek	6
1.3.1 Rozpad kapalinového filmu	7
1.4 Typy tlakových vířivých trysek	8
1.4.1 Simplex	8
1.4.2 Duplex	9
1.4.3 Tryska s dvojím otvorem	9
1.4.4 Tryska s obtokem	9
1.5 Vliv vlastností kapaliny a okolního prostředí	10
2 Kvalita spreje u tlakových vířivých trysek	11
2.1 Úhel rozevření kužele spreje	11
2.2 Součinitel výtoku	12
2.3 Tloušťka kapalinového filmu	12
2.4 Rozdělení velikosti kapek	12
2.4.1 Rosin-Rammlerovo rozdělení	13
2.5 Reprezentativní střední průměry	13
2.6 Vliv naklonění a vyosení výstupního otvoru	14
2.7 Vliv drsnosti povrchu a výroby aditivní metodou	16
2.8 Vliv zkosené hrany a Coandův efekt	18
3 Nastavení experimentu	21
3.1 Vysokorychlostní vizualizace	21
3.2 Fázová Dopplerovská anemometrie (PDA)	21
3.3 Popis měřící tratě	22
4 Výsledky měření	24
4.1 Vliv nesouososti výstupního otvoru	24
4.2 Vliv náklonu výstupního otvoru	27
4.3 Vliv drsnosti povrchu trysky	29
4.4 Vliv sražené hrany výstupního otvoru	31

Závěr	34
Seznam použitých zkratek a symbolů	35
Literatura	36

Úvod

Rozprašování kapalin neboli atomizace nachází své uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, zejména tam, kde je cílem zajištění co největší plochy kontaktu kapaliny s okolním prostředím. Pro různorodost aplikací a rozprašovaných kapalin bylo vyvinuto velké množství druhů trysek. Jedním z nejpoužívanějších typů trysek jsou, díky své konstrukční jednoduchosti a kvalitě rozprašování, tlakové vířivé trysky. V praxi jsou využívány pro rozprašování paliva ve spalovacích hořácích a motorech, hnojiva v zemědělství, či vody v chladicích zařízeních.

Kvalita rozprašování a vhodnost použití trysek byly rozsáhle zkoumány a popsány na základě geometrie trysky. Vzniklo několik matematických popisů, pomocí kterých se dá kvalita rozprašování trysky předpovídat. Zmíněné rovnice však již nepočítají s drsností povrchu vnitřních částí trysky, či s rozměrovými a geometrickými nepřesnostmi výroby. Tato oblast zůstává do dnešní doby málo prozkoumaná. Pro zjištění chování spreje v závislosti na kvalitě výroby je třeba experimentální studie. Cílem této práce je popsat a vysvětlit výsledky měření vybraných vlivů výroby na sprej. Zkoumané nepřesnosti výroby zahrnují nesouosost výstupního otvoru a vířivé komory, ať už vlivem posunutí výstupního otvoru, či jeho nakloněním. Je také zkoumán vliv sražené hrany výstupního otvoru a drsnosti povrchu vířivé komory u konvenčně vyráběných trysek a trysek vyrobených pomocí 3D tisku. Cíle má být dosaženo pomocí následujících bodů:

- provedení rešerše relevantních publikací k tlakovým vířivým tryskám, se zaměřením na zkoumané parametry,
- provedení analýzy výsledků z optických metod,
- vyhodnocení vlivu provozních podmínek a typu výroby na sprej,
- určení a popis rozdílů ve výtoku kapaliny z trysky pomocí vysokorychlostní kamery,
- porovnání dat z jednotlivých trysek mezi sebou.

Pro vhled do problematiky a předání základních informací o rozprašování kapalin slouží kapitola 1. V kapitole 2 jsou zmíněny sledované parametry spreje u tlakových vířivých trysek, sloužící k vyhodnocení kvality rozprašování a vhodnosti použití trysky. Následně je provedeno shrnutí dosavadních poznatků o vlivu přesnosti a způsobu výroby na kvalitu rozprašování. Kapitola 3 obsahuje popis experimentu měření vybraných trysek. Měření bylo provedeno laboratoří sprejů na Odboru termomechaniky a techniky prostředí VUT Brno a data poskytnuta k vyhodnocení, v rámci této práce. V kapitole 4 bylo provedeno vyhodnocení poskytnutých dat z měření.

Kapitola 1

Atomizace

Atomizace je proces přeměny objemu kapaliny na kapky. Při tomto procesu dochází k porušení povrchového napětí kapaliny, působením vnějších a vnitřních sil v případě, že velikost sil podněcujících rozpad kapaliny přesáhne sílu povrchového napětí. Realizace rozpadu kapaliny na sprej probíhá pomocí trysek.

1.1 Proces atomizace

Rozpad kapaliny je značně usnadněn, pokud se kapalina nachází v méně stabilním stavu. Nejnáchylnější k porušení je kapalina ve formě proudu či kapalinového filmu, jelikož má v těchto případech největší povrchovou energii [2]. Proces atomizace se dělí na dvě hlavní části: primární a sekundární atomizaci. Primární atomizace probíhá v blízkosti otvoru trysky a spočívá v rozpadu kapaliny ve formě proudu či kapalinového filmu na více částí různých tvarů. V následné sekundární atomizaci dochází k dalšímu dělení těchto částí na menší kapky. Sekundární atomizace je zakončena zformováním spreje [3]. Celý proces je názorněji popsán na obrázku 1.1

1.2 Trysky

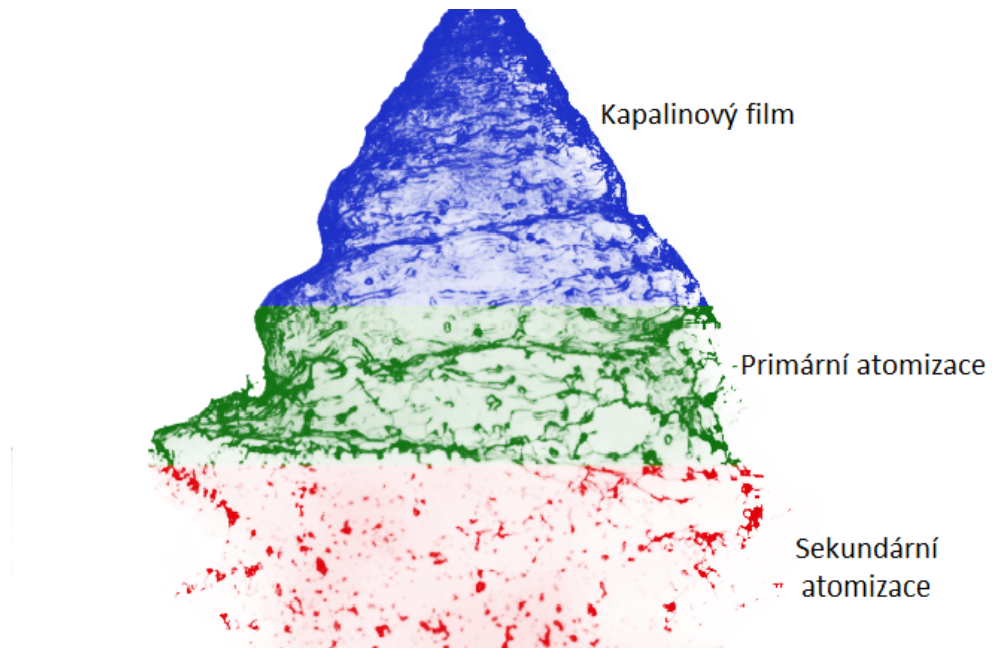
V praxi existuje velké množství typů trysek rozdílných vlastností. Trysky je možné klasifikovat dle principu zajištění atomizace. S ohledem na zaměření této práce bude dostatečně zmínění nejpoužívanějších typů trysek. Kromě zmíněných typů, existuje celá řada trysek využívající jiné principy pro atomizaci kapaliny. Použití těchto trysek je však omezeno pouze na speciální případy.

1.2.1 Tlakové trysky

U tlakových trysek je atomizace dosaženo velké relativní rychlosti mezi rychle se pohybující kapalinou a okolním vzduchem či plynem. Kinetickou energii kapalina získá přeměnou z energie tlakové.

Trysky s jednoduchým otvorem

Kapalina je hnána výstupním otvorem do okolního prostředí ve formě proudu. Zmenšením průměru výstupního otvoru je dosaženo jemnější atomizace. Z důvodu nebezpečí ucpání



Obrázek 1.1: Popis procesu atomizace u tlakové vířivé trysky.

trysky se většinou nepoužívá průměr výstupního otvoru menší než 0,3 mm [11]. Výhodou je velmi jednoduchá a levná konstrukce, nevýhodou pak úzký kužel spreje.



Obrázek 1.2: Tlaková tryska s jednoduchým otvorem [10].

Tlakové vířivé trysky

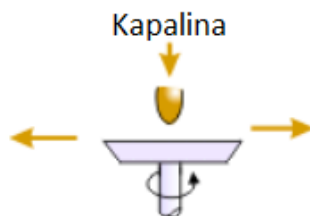
Před výstupní otvor trysky je navíc umístěna vířivá komora. Kapalina je do komory přiváděna tak, aby se pohybovala po jejím obvodu. Pomocí odstředivých sil kroužící kapaliny vzniká sprej tvaru kužele, jehož úhel rozevření se může pohybovat v rozmezí 30 až skoro 180° [11].



Obrázek 1.3: Tlaková vířivá tryska typu simplex [10].

1.2.2 Rotační trysky

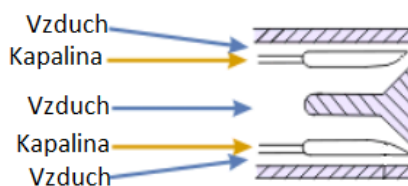
Rotační trysky používají k atomizaci odstředivé síly, stejně jako tlakové vířivé trysky. Princip spočívá v přívodu proudu kapaliny do středu rotujícího disku. Výhodou je možnost měnit rychlost otáčení disku, což přidává větší flexibilitu v úpravě vlastností spreje.



Obrázek 1.4: Rotační tryska [10].

1.2.3 Dvumédiové trysky

Atomizace je způsobena střetem a smíšením kapaliny s rychle proudícím vzduchem či plynem. Tento střet může být realizován uvnitř i vně trysky. Tento typ trysek umožňuje kvalitní atomizaci, a to i u viskózních kapalin. Nevýhodou je pak energetická neefektivita trysek.



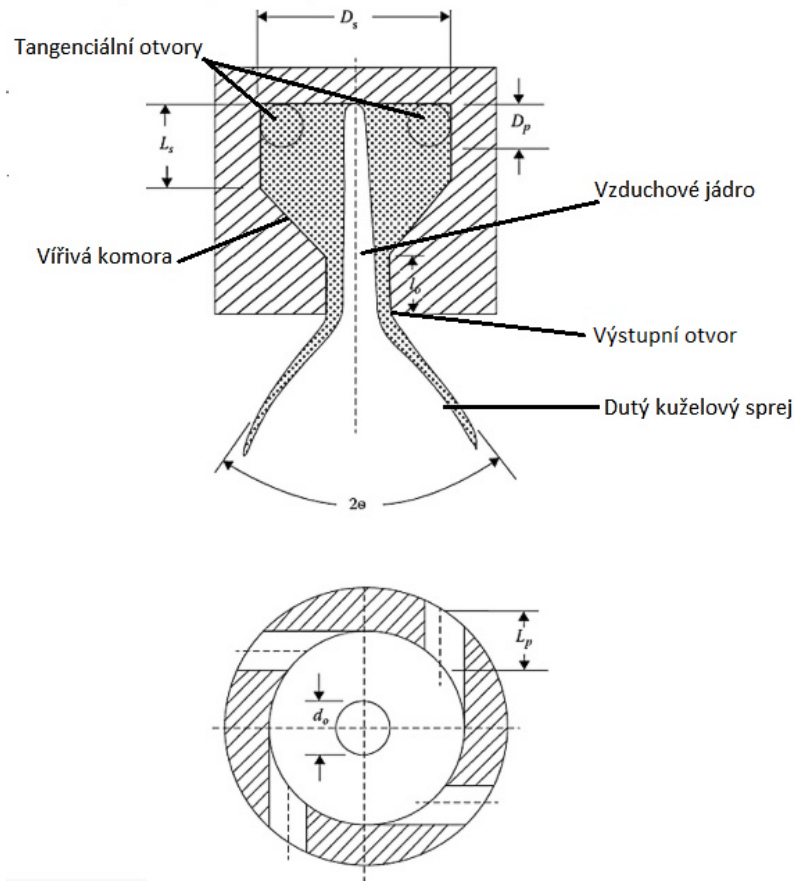
Obrázek 1.5: Dvumédiová tryska [10].

1.3 Princip atomizace u tlakových vířivých trysek

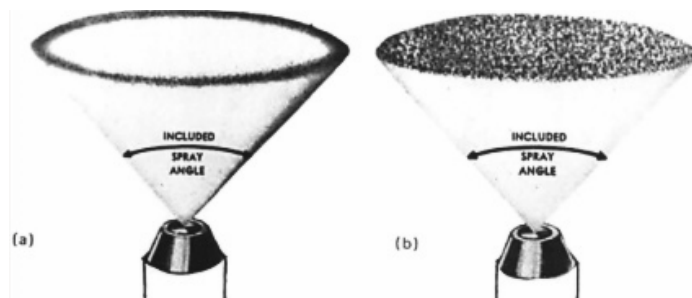
Tlakové vířivé trysky jsou typem tlakových trysek s přidanou vířivou komorou. Díky své jednoduché, levné a spolehlivé konstrukci, schopnosti dobré atomizace a nízkým energetickým nárokům jsou hojně užívaným typem trysek. Své využití nacházejí například v industriálních i domácích spalovacích zařízeních, leteckých motorech nebo klimatizacích.

Průběh rozprašování u tlakových vířivých trysek začíná přívodem kapaliny pomocí tangenciálních portů do vířivé komory, kde kapalina krouží s vysokou obvodovou rychlostí. Vysoká obvodová rychlost kapaliny, kroužící po stěně vířivé komory, umožňuje vzniku víru se vzduchovým jádrem. Kapalina tak opouští trysku ve formě kuželového kapalinového filmu a po střetu s okolním vzduchem vytváří dutý kuželový sprej.

Kromě dutého kuželového spreje je možné úpravou trysky vytvořit i plný kuželový sprej. Dutý kuželový sprej však poskytuje jemnější atomizaci, která je pro většinu aplikací (včetně vstřikování paliva u spalovacích motorů) žádanější [19].



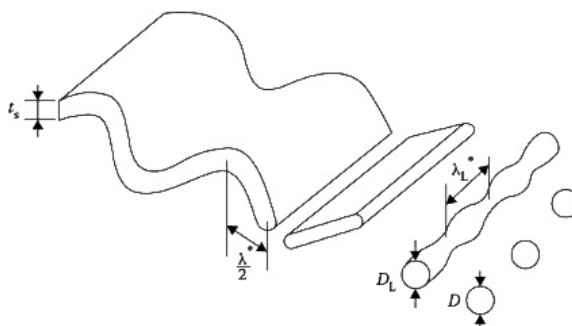
Obrázek 1.6: Popis atomizace u tlakových vířivých trysek [11].



Obrázek 1.7: a) dutý a b) plný kuželový sprej [19]

1.3.1 Rozpad kapalinového filmu

U tlakových vířivých trysek dochází k atomizaci reakcí kapalinového filmu s okolním prostředím. V primární atomizaci dochází k rozpadu kapalinového filmu na menší části, z důvodu jeho zvětšujícího se vlnění. V rámci sekundární atomizace se odtržené části formují do tvaru proudu, který se následně rozpadá na jednotlivé kapky [11]. Tento proces lze vidět na obrázku 1.8.



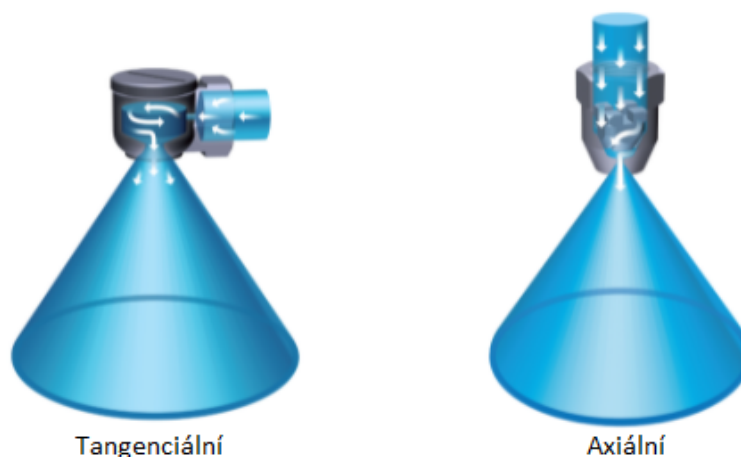
Obrázek 1.8: Fáze ideálního rozpadu kapalinového filmu [11].

Průběh rozpadu kapalinového filmu je z velké části ovlivněn relativní rychlostí kapaliny vůči okolnímu vzduchu, tedy i vstupním tlakem trysky. Se vzrůstajícím tlakem a rychlostí kapaliny se primární atomizace objevuje blíže k trysce [2].

1.4 Typy tlakových vířivých trysek

1.4.1 Simplex

Nejrozšířenějším a nejjednodušším typem tlakových vířivých trysek je simplex. Trysky simplex lze rozdělit, podle způsobu jakým vytváří vířivý pohyb v trysce, na tangenciální a axiální. U tangenciálního typu je kapalina přiváděna do vířivé komory kolmo na směr vývodu spreje pomocí tangenciálních portů. U axiálního typu je kapalina přiváděna souose s výstupním otvorem, avšak pro zajištění víření je třeba přidat vířivou vložku. Přidaná vložka u axiálního typu zvyšuje náchylnost k ucpání trysky [2].

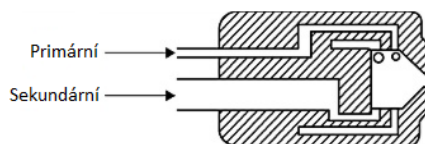


Obrázek 1.9: Tangenciální a axiální přívod kapaliny [9].

Chceme-li zvýšit průtok v trysce simplex dvojnásobně, je třeba zajistit čtyřnásobné zvýšení vstupního tlaku. Právě tato hlavní nevýhoda trysek simplex vedla k vývoji dalších typů vířivých trysek jako jsou duplex, vířivé trysky s dvojitým otvorem nebo vířivé trysky s obtokem. Zmíněné trysky vykazují menší závislost průtoku na vstupním tlaku [11].

1.4.2 Duplex

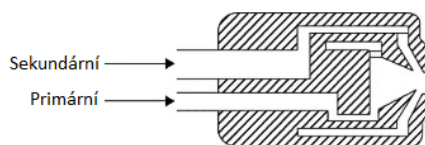
Tryska duplex zajišťuje dobrou atomizaci pro velké rozpětí vstupních tlaků, a to kombinací dvou sad tangenciálních vstupů do společné vířivé komory. Vnější vstup je nazýván primární a vnitřní vstup sekundární. V případě nízkých hodnot průtoku je používána pouze primární část trysky a sekundární vstup je zneprůstředněn tlakovým ventilem. Při vyšších hodnotách průtoku proudí většina kapaliny sekundární částí trysky [5].



Obrázek 1.10: Tryska duplex [11].

1.4.3 Tryska s dvojitým otvorem

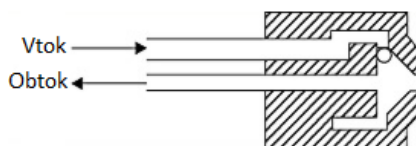
Konstrukce této trysky je podobná trysce duplex. Vířivá komora je však rozdělena a vznikají tak dva kruhové otvory. Při nízkých hodnotách průtoku je kapalina hnána pouze primární částí. Při větších hodnotách průtoku se otevře tlakový ventil na sekundárním otvoru. Po otevření tlakového ventilu se kvalita atomizace výrazně sníží, a začne se zlepšovat až se vzrůstajícím průtokem sekundární části [11].



Obrázek 1.11: Vířivá tryska s dvojitým otvorem [11].

1.4.4 Tryska s obtokem

Tryska s obtokem je v zásadě tryska simplex s obtokovým otvorem v zadní stěně vířivé komory. Kapalina je do trysky přiváděna za stálého tlaku. Parametry spreje jsou ovlivněny otevíráním a zavíráním obtokové komory. Jelikož tryska funguje za stálého vysokého tlaku, zajišťuje efektivní atomizaci i za nízkých hodnot průtoku. Nevýhodou trysky s obtokem je výrazná změna úhlu kužele spreje při změně hodnot průtoku. Dalším problémem může být obtížné měření průtoku a potřeba vyššího výkonu čerpadla z důvodu přečerpávání recirkulačního oběhu [11].



Obrázek 1.12: Vířivá tryska s obtokem [11].

1.5 Vliv vlastností kapaliny a okolního prostředí

Vlastnosti rozprašované kapaliny a okolního prostředí významně ovlivňují kvalitu atomizace. Hustota, viskozita a povrchové napětí jsou tři základní vlastnosti kapaliny, které ovlivňují kvalitu spreje. Hustota kapaliny je definována jako:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad (1.1)$$

kde ρ_k je hustota kapaliny, m_k hmotnost kapaliny a V_k je objem kapaliny. Kapaliny s větší hustotou mají větší kinetickou energii, následkem je tvorba kapek menších rozměrů [2]. V praxi je vliv hustoty kapaliny snížen tím, že většina atomizovaných kapalin vykazuje malé rozdíly v hustotě [11].

Viskozita kapaliny charakterizuje vnitřní tření kapaliny. Její velikost je závislá na přitažlivých silách mezi částicemi. Větší viskozita kapaliny obecně oddaluje rozpad kapaliny, atomizace tedy probíhá ve větší vzdálenosti od trysky, což má za výsledek větší rozměry kapek spreje [11]. Tečné napětí vnitřního tření je pro Newtonskou kapalinu vyjádřeno vztahem:

$$\tau = \mu_k \frac{dv}{dy} \quad (1.2)$$

kde $\frac{dv}{dy}$ je gradient rychlosti, τ tečné napětí a μ_k dynamická viskozita.

Povrchové napětí formuje objem kapaliny do tvaru s nejnižší povrchovou energií, tedy nejmenší plochou (koule). Je definováno jako:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (1.3)$$

kde σ je povrchové napětí, F je tečná síla na povrchu kapaliny a l úsečka délky povrchu. Povrchové napětí tedy vyjadřuje minimální energii potřebnou k atomizaci kapaliny.

K vyjádření vlivu vnějších aerodynamických sil na povrch kapaliny, v poměru k povrchovému napětí, se využívá Weberova čísla [19]:

$$We = \frac{\rho_p U_A^2 D_k}{\sigma} \quad (1.4)$$

kde ρ_p je hustota okolního prostředí, U_A je relativní rychlost kapaliny vůči okolnímu plynu, D_k průměr kapky a σ povrchové napětí.

Nejdůležitějším parametrem prostředí v němž atomizace probíhá je jeho hustota, tedy tlak. U tlakových vířivých trysek dochází zvýšením hustoty okolního prostředí k zúžení úhlu rozevření kužele spreje. Při zvýšení okolního tlaku dochází u tlakových vířivých trysek nejprve produkci větších kapek. Po překročení určité hodnoty tlaku se velikost vzniklých kapek se zase pomalu zmenšuje [11].

Kapitola 2

Kvalita spreje u tlakových vířivých trysek

Kvalitu atomizace lze určit na základě několika parametrů. Hlavními parametry kvality atomizace jsou výtokový součinitel, úhel rozevření kužele spreje, rozdělení velikosti kapek a Sauterův střední průměr. Vlastnosti rozprašované kapaliny, vlastnosti okolního prostředí a geometrie trysky hrají zásadní roli v ovlivnění zmíněných parametrů. Znehodnocení geometrie výrobou může mít za následek nesprávnou velikost výsledných kapek, ovlivnění úhlu rozevření kužele spreje, nerovnoměrnost produkovaného spreje, či jeho vychýlení z požadovaného směru.

2.1 Úhel rozevření kužele spreje

Úhel rozevření spreje je důležitým parametrem ovlivňujícím kvalitu atomizace kapaliny. Obecně lze říci, že s větším úhlem rozevření je rozprašovaná kapalina lépe vystavena reakci s okolním prostředím. U spalovacích procesů je lepším smíšením paliva se vzduchem zlepšena efektivita spalování a sníženy emise. Z rovnice 2.2 je patrný výrazný vliv geometrie trysky na kužel spreje. Podle teorie pro neviskózní kapalinu lze úhel rozevření vyjádřit pouze na geometrii trysky pomocí bezrozměrné geometrické konstanty trysky K [6]:

$$K = \frac{A_s}{D_s D_o} \quad (2.1)$$

kde A_s je plocha tangenciálních vstupních portů vířivé komory, D_s je průměr vířivé komory a D_o je průměr výstupního otvoru trysky. Rizk a Lefebvre [16] popsali závislost úhlu spreje 2α právě na konstantě K , velikosti otvoru trysky a vlastnostech kapaliny:

$$2\alpha = 6K^{-0,15} \left(\frac{\Delta p_k D_o^2 \rho_k}{\mu^2} \right)^{0,25} \quad (2.2)$$

kde Δp_k je pokles tlaku kapaliny neboli vstupní tlak, ρ_k je hustota kapaliny a μ_k je dynamická viskozita kapaliny. Z rovnice lze pozorovat, že zvýšení vstupního tlaku má vliv na rozevření kužele spreje.

2.2 Součinitel výtoku

Součinitel výtoku je poměr skutečného průtoku k ideálnímu průtoku kapaliny na vyústění trysky. Naznačuje velikost třecích ztrát v systému. Matematicky lze vyjádřit jako [11]:

$$C_d = \frac{\dot{m}_k}{A_o \sqrt{2 \Delta p_k \rho_k}} \quad (2.3)$$

Kde \dot{m}_k je hmotnostní průtok kapaliny, A_o je celková plocha otvoru trysky, Δp_k je vstupní tlak a ρ_k je hustota kapaliny. Rizk a Lefebvre [15] zavedli rovnici pro predikci výtokové součinitele v závislosti na geometrii vířivé trysky:

$$C_d = 0,35 \sqrt{K} \sqrt[4]{\frac{1}{N}} = 0,35 \sqrt{\frac{A_p}{D_s D_o}} \sqrt[4]{\frac{D_s}{D_o}} \quad (2.4)$$

kde A_p je plocha tangečních vstupních portů vířivé komory, D_o je průměr otvoru vyústění trysky a D_s je průměr vířivé komory.

U tlakových vířivých trysek se můžeme většinou setkat s nízkými hodnotami C_d , jelikož velká část výtokového otvoru je blokována vzduchovým jádrem. Hodnota C_d není výrazně ovlivněna změnou Reynoldsového čísla kapaliny. Tryska si tedy zachovává podobnou hodnotu C_d pro celý rozsah provozních tlaků.

2.3 Tloušťka kapalinového filmu

Důležitým parametrem ovlivňujícím atomizaci kapalinového filmu je jeho tloušťka. S větší tloušťkou filmu jsou následně odtržené části objemnější, čímž dochází k hrubší atomizaci. Pro predikci tloušťky kapalinového filmu na základě geometrie trysky a vlastností kapaliny lze použít rovnici, kterou navrhli Suyari a Lefebvre [17]:

$$t = 2,7 \left(\frac{D_o F N \mu_k}{(\Delta p_k \rho_k)^{0,5}} \right)^{0,25} \quad (2.5)$$

kde t je tloušťka kapalinového filmu, D_o průměr výstupního otvoru, μ_k dynamická viskozita kapaliny, Δp_k vstupní tlak, ρ_k hustota kapaliny a $F N$ je průtokový faktor dle rovnice [11]:

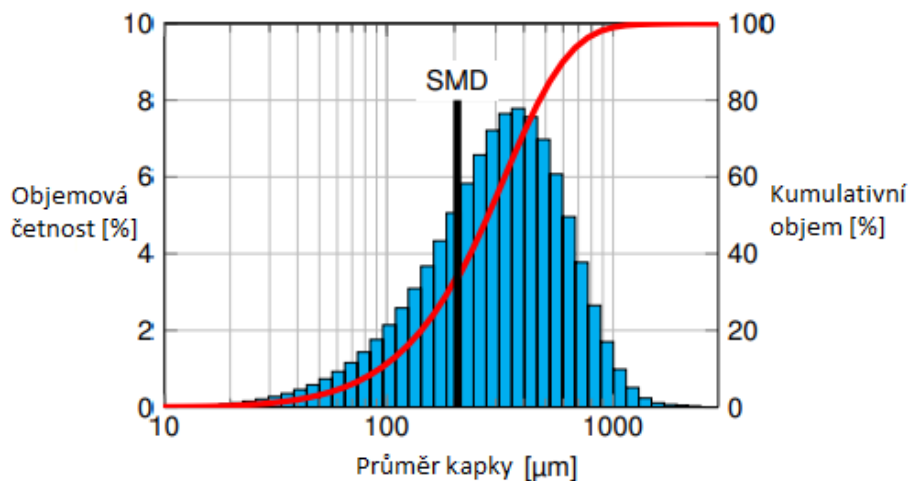
$$F N = \frac{\dot{m}_k}{\Delta p_k^{0,5} \rho_k^{0,5}} \quad (2.6)$$

kde \dot{m}_k je hmotnostní průtok kapaliny, Δp_k vstupní tlak a ρ_k hustota kapaliny

Rovnice 2.5 indikuje, že tloušťka kapalinového filmu roste s průměrem výstupního otvoru, hmotnostním průtokem a viskozitou kapaliny a klesá s větší hustotou kapaliny a vstupním tlakem.

2.4 Rozdělení velikosti kapek

Jelikož je atomizace velmi složitý a chaotický proces vzniká při něm zákonitě velká různorodost vzniklých kapek. Většina běžně užívaných trysek produkuje kapky o velikosti od několika jednotek mikrometrů až do stovek mikrometrů [11]. Pro základní zobrazení rozdělení velikosti kapek lze použít histogram. Ten však pouze udává počet kapek ve vybraných intervalech průměru kapky. Pro lepší porovnání a popsání distribuce kapek byla zavedena celá řada matematických funkcí.



Obrázek 2.1: Zobrazení rozdělení velikosti kapek pomocí histogramu se Sauterovým středním průměrem (*SMD*) [12].

2.4.1 Rosin-Rammlerovo rozdělení

V praxi velmi rozšířená funkce rozdělení velikosti byla navržena Rosinem a Rammlerem v roce 1933.

$$1 - Q = \exp\left(-\frac{D}{X}\right)^q \quad (2.7)$$

kde Q je zlomek celkového objemu kapaliny spreje v kapkách o průměru menšího než D . X a q jsou konstanty určené experimentálně. Tato funkce umožňuje popis spreje pomocí dvou parametrů X a q . Parametr q udává míru rozptylu kapek. Čím větší je hodnota q , tím menší je rozsah vzniklých velikostí kapek. Pro většinu sprejů se hodnota q pohybuje v intervalu 1,5 až 4. Parametr X je reprezentativní průměr [11].

2.5 Reprezentativní střední průměry

Pro většinu inženýrských aplikací je dostatečný popis rozdělení velikostí kapek pomocí dvou parametrů. Jedním je rozsah velikostí kapek a druhým pak reprezentativní průměr. Pro zvolení reprezentativního průměru je k dispozici více možností. Každá z nich má smysl pro jinou praktickou aplikaci. V tabulce 2.1 lze vidět vhodnost použití reprezentativních středních průměrů pro různé aplikace.

Tabulka 2.1: Tabulka označení a použití jednotlivých typů průměrů. Převzato z [1].

Průměr	Název středního průměru	Oblast použití
D_{10}	Aritmetický	Vypařování
D_{20}	Plošný	Plošná kontrola (absorpce)
D_{30}	Objemový	Objemová kontrola (hydrologie)
D_{21}	Plošně-délkový	Adsorpce
D_{31}	Objemově-délkový	Vypařování, molekulární difúze
D_{32}	Sauterův	Studie účinnosti, přenos hmoty, reakce
D_{43}	De Broukeův	Rovnováha při spalování

V mnoha výpočtech přenosu hmoty je často výhodné pracovat pouze se středním průměrem. V praxi se často využívá Sauterův střední průměr (SMD), který popisuje průměr kapky, jejíž poměr povrchu k objemu je stejný jako poměr povrchu k objemu celého spreje. Pomocí SMD se nejlépe charakterizuje jemnost atomizace a je zvláště důležitý ve výpočtech, kde je hraje roli aktivní povrchová plocha (např. spalování). Je tedy hlavním používaným popisným parametrem u tlakových vířivých trysek [11]. Čím menší je hodnota SMD , tím je menší velikost vzniklých kapek. SMD lze zapsat jako:

$$SMD = D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^2} \quad (2.8)$$

Hodnoty SMD lze na základě vlastností kapaliny, okolního prostředí a úhlu rozevření spreje predikovat například dle rovnice [18]:

$$SMD = 4,52 \left(\frac{\sigma \mu_k^2}{\rho_g \Delta p_k^2} \right)^{0,25} (t \cos \alpha)^{0,25} + 0,39 \left(\frac{\sigma \rho_k}{\rho_g \Delta p_k} \right)^{0,25} (t \cos \alpha)^{0,75} \quad (2.9)$$

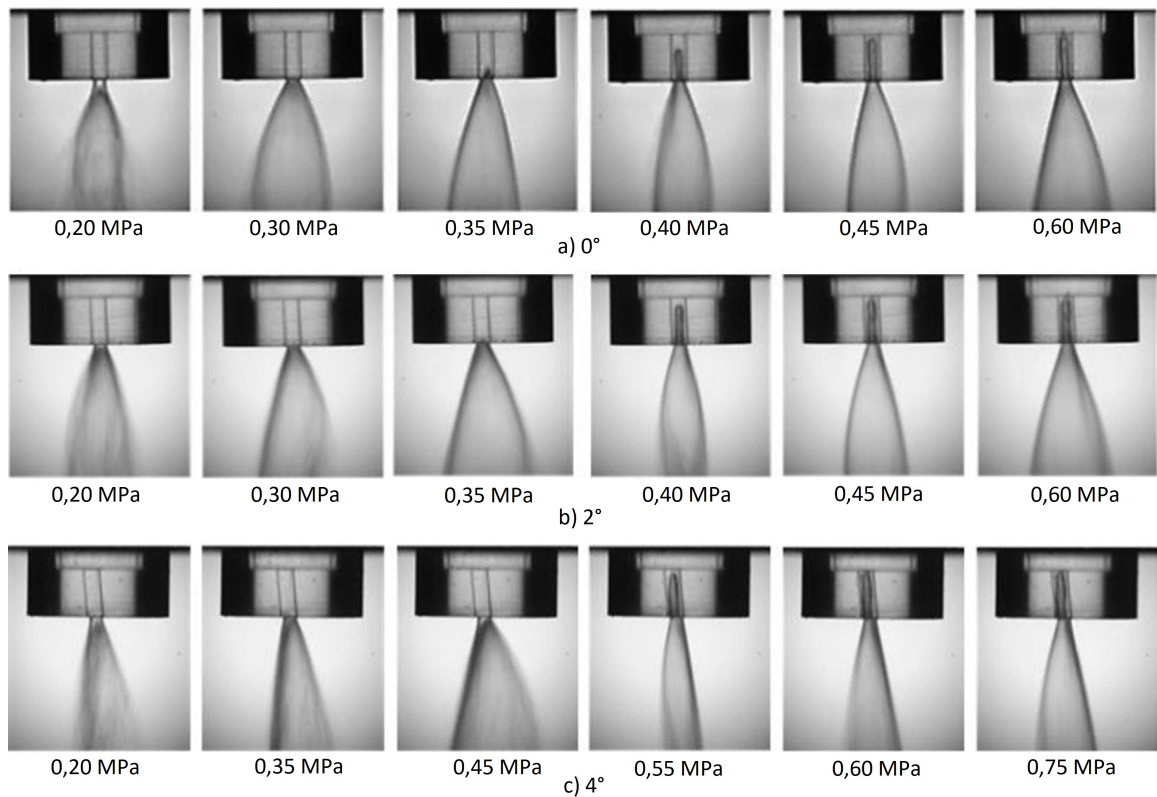
kde σ je povrchové napětí, μ_k dynamická viskozita kapaliny, ρ_g hustota okolního prostředí, Δp_k vstupní tlak, t tloušťka kapalinového filmu dle rovnice 2.5, α polovina úhlu rozevření spreje dle rovnice 2.2 a ρ_k hustota kapaliny.

Lze pozorovat, že rovnice 2.2, 2.3, 2.4 a 2.9 počítají pouze s geometrií trysky, vlastnostmi rozprašované kapaliny, případně vlastnostmi okolního prostředí. Vliv drsnosti povrchu či výrobních nepřesností není při výpočtu uvažován. Pro popis zmíněných vlivů je třeba experimentálního měření.

2.6 Vliv naklonění a vyosení výstupního otvoru

Doposud bylo v práci zmíněno několik parametrů ovlivňujících kvalitu rozprašování. Tyto parametry byly však v minulosti již rozsáhle zkoumány a popsány, z toho důvodu je tato práce zaměřena na výzkum historicky méně probádaných parametrů. Ve studii [4] byl zkoumán vliv úchylek v geometrii výstupních otvorů vířivých trysek na sprej. Na zkoumaných tryskách bylo provedeno naklonění výstupního otvoru 2° respektive 4°. Průměr výstupního otvoru trysek byl 400 μm . Pro srovnání byla pro stejné vstupní tlaky zkoumána i tryska se stejným průměrem výstupního otvoru, avšak bez naklonění. Při náklonu 2° a 4° se ukázalo, že se zvýší kritická hodnota tlaku, potřebného k vytvoření vzduchového jádra. Tvorba vzduchového jádra u trysky bez náklonu byla zaznamenána při tlaku 0,37 MPa, u trysky s náklonem 2° při tlaku 0,40 MPa a u trysky s náklonem 4° při tlaku 0,50 MPa. Naklonění

výstupního otvoru též způsobilo asymetrický sprej, což mělo za následek nepravidelnou distribuci kapek. Vývoj spreje v závislosti na tlaku daného měření, lze pozorovat na obrázku 2.2.

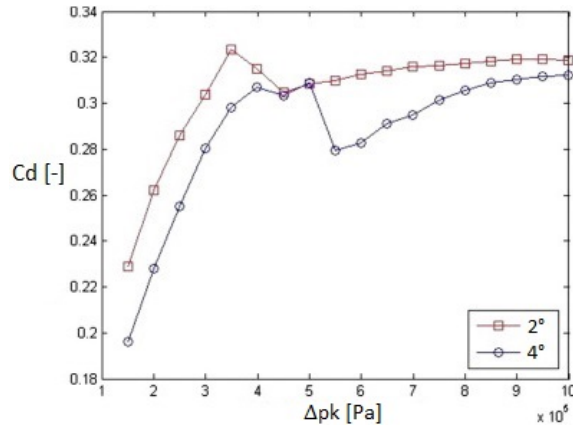


Obrázek 2.2: Zobrazení spreje v závislosti na tlaku u výstupního otvoru s náklonem. a) otvor bez náklonu b) náklon 2° , c) náklon 4° [4].

Vliv naklonění byl patrný i na hodnotách výtokového součinitele. Vývoj C_d v závislosti na tlaku je zobrazen v grafu 2.3. Se zvyšujícím se tlakem rostla i hodnota výtokového součinitele. Po dosažení kritické hodnoty tlaku pro tvorbu vzduchového jádra došlo ke skokovému poklesu, jelikož výtoková plocha byla náhle z části zablokována vzduchovým jádrem. S dalším zvýšením tlaku došlo k ustálení hodnot výtokového součinitele. U vyšší hodnoty náklonu bylo možné pozorovat nižších hodnot a většího skokového poklesu C_d .

Hodnoty SMD byly obecně větší u trysky s větším náklonem. Při hodnotě tlaku 0,40 MPa došlo v trysce s náklonem 2° k tvorbě vzduchového jádra, což způsobilo zvětšení rozdílu hodnot SMD . Po překročení hodnoty tlaku 0,50 MPa a vytvoření vzduchového jádra v obou tryskách se rozdíl zmenšil. Oproti trysce bez náklonu došlo u trysky s náklonem 2° a 4° k nárůstu SMD o zhruba 5% respektive 10%.

Přestože není tato informace v [4] zmíněna, lze na fotkách trysek pozorovat, že způsob jakým bylo zešíkmení u trysek provedeno, způsobilo zároveň vyosení výstupního otvoru na vířivé komoře. V práci [21] zabývající se defekty sprejového kužele, lze pozorovat nekonzistentní kvalitu produkovaného spreje u trysek s nesouosostí vířivé komory a výstupního otvoru. Kužel spreje nebyl symetrický a docházelo též k jeho kmitání. Bylo také možné pozorovat podobnost defektů u nesouososti s defekty u zešíkmení výstupního otvoru.



Obrázek 2.3: Závislost výtokového součinitele na tlaku u trysek s náklonem výstupního otvoru [4].

2.7 Vliv drsnosti povrchu a výroby aditivní metodou

Vliv jakosti povrchu na kvalitu rozprašování kapalin nebyl do dnešní doby výrazně prozkoumán a popsán. Obecně lze říct, že drsnost povrchu snižuje kinetickou energii kapaliny, tedy i efektivitu trysky. Nižší výtoková rychlost má přímý vliv na tloušťku kapalinového filmu a úhel rozevření kužele spreje. Výrazné nerovnosti na povrchu, hlavně na výstupním otvoru, ovlivňují také způsob proudění kapaliny, což může mít za následek nesouměrnost spreje, například v koncentraci kapaliny do paprsku v části kužele spreje [21].

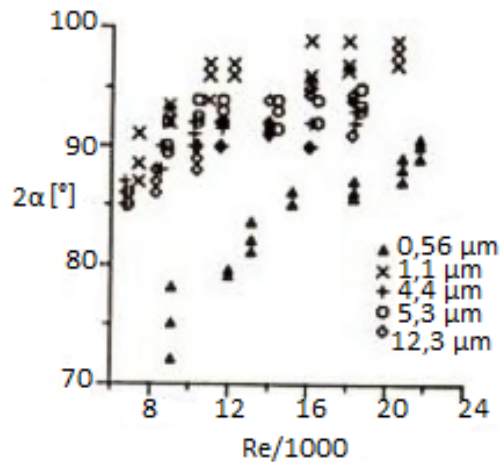
Ramamurthi a spol. [14] provedli měření ovlivnění drsnosti povrchu výstupního otvoru na rozprašování pomocí tlakových vířivých trysek. Měření zahrnovalo trysky s drsností povrchu výstupního otvoru od 0,2 do 12 μm . Průměr výstupního otvoru byl 4 mm a jeho délka pak 10 mm. Pro měření byla použita voda. Průtok byl regulován pomocí změny vstupního tlaku v rozmezí od 0,02 do 1,2 MPa. Reynoldovo číslo rozprašované vody tak nabývalo hodnot v rozmezí od 6000 do 24000.

Graf 2.4 ukazuje závislost úhlu rozevření kužele spreje na Reynoldově čísle pro různé hodnoty drsnosti povrchu. Lze vidět, že úhel rozevření (2α) klesal se zvýšením drsnosti povrchu z 1,1 na 4,4 a poté na 12,3 μm . Vyšší hodnoty drsnosti povrchu snížily rychlost rotace proudící kapaliny, což mělo za následek užší kužel spreje. Avšak u trysky s drsností 0,56 μm bylo možné pozorovat výrazně užší kužel spreje, který se s rostoucím Reynoldsovým číslem rychle rozšiřoval. Ve studii byl uveden předpoklad, že u této trysky mohlo docházet ke kavitaci, která skokově snížila úhel kužele spreje.

Tento postřeh se odrazil i na hodnotách C_d , kde bylo možné pozorovat zvýšení hodnot u trysky s drsností povrchu 0,56 μm . Snížená rychlost rotace kapaliny měla za následek zmenšení vzduchového jádra a tím zvýšení hodnoty výtokového součinitele. Pro hodnoty od 1,1 do 12,3 μm již nebyly zaznamenány výrazné rozdíly v hodnotách C_d .

Vzdálenost rozpadu byla zhruba stejná pro drsnosti povrchu 0,56 a 1,1 μm , ale nižší pro hodnoty 4,4, 5,3 a 12,3 μm . Rozložení povrchových nerovností pro drsnosti povrchu 0,56 a 1,1 μm bylo náhodné, zatímco pro hodnoty drsností 4,4, 5,3 a 12,3 μm periodické.

Pomocí optických metod bylo zaznamenáno větší vlnění kapalinového filmu u trysek s vyšší hodnotou drsnosti povrchu. Mechanickým paternátorem byla měřena homogenita spreje. Při zvýšené drsnosti povrchu bylo možné pozorovat vyšší azimutální nesouměrnost

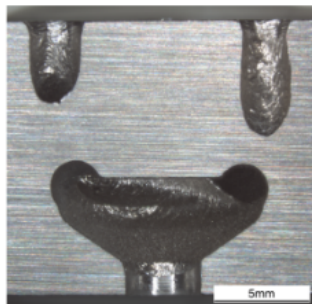


Obrázek 2.4: Závislost velikosti úhlu rozevření kužele spreje na Re [14].

hmotnostního toku. Nesouměrnost byla způsobena zvýšenou vířivostí kapaliny šířící se od stěn s vyšší drsností.

V posledních letech se výrazně zdokonalily aditivní metody výroby součástí. 3D tisk umožňuje produkci tvarově náročnějších trysek, jejichž výroba by s běžnými obráběcími nástroji byla složitá, či nemožná. Zahnutí složitějších geometrických prvků může zajistit plynulý průtok tryškou a minimalizovat tlakovou ztrátu. Dále je odstraněna potřeba montáže složených součástí a je tak zlevněna celková produkce. Velkou nevýhodou je horší jakost povrchu.

Ve studii [12] byla porovnána konvenční a aditivní výroba trysek. Trysky A a B reprezentovaly konvenčně vyráběné trysky. Pro srovnání vlivu drsnosti povrchu byly trysky A a B reprodukovány pomocí aditivní metody selective laser melting (SLM). Tryska C byla speciálně navržena pro výrobu 3D tiskem a také vyrobena pomocí aditivní metody SLM. Vnitřní prostor tryšky C neobsahoval žádné ostré hrany a vstupní porty vířivé komory byly tangenciální. Průřez tryškou C lze vidět na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Průřez tryškou C [12].

Rozměry trysek nejsou v práci zmíněny. V tabulce 2.6 lze pozorovat, že trysky vykazovaly různé hodnoty průtoku, což značí různé rozměry trysek, jelikož měření byla provedena za stejných podmínek. Pro možnost porovnání trysek byly hodnoty SMD škálovány na hodnotu průtoku $\dot{m}_k = 11,2 \text{ kg/min}$, a to pomocí rovnice:

$$SMD^{(2)} = SMD^{(1)} \left(\frac{\dot{m}_k^{(2)}}{\dot{m}_k^{(1)}} \right)^x \quad (2.10)$$

kde parametr $x = 0,359$ pro hodnotu $\Delta p_k = 0,61$ MPa. Parametr x byl zjištěn experimentálně.

V tabulce 2.6 jsou uvedeny hodnoty průtoku, úhel rozevření kužele spreje 2α a hodnoty SMD , které byly škálovány, dle již zmíněného postupu. Na základě hodnot v tabulce lze tedy porovnat vliv výroby pomocí SLM, pro každou z trysek A a B zvlášť a vliv geometrie trysky C, navržené pro 3D tisk, na hodnoty SMD , oproti tryskám A a B vyrobených aditivní metodou. U trysek A a B bylo možné pozorovat vliv drsnosti povrchu, po výrobě pomocí SLM, na zúžení kužele spreje a též hodnotě SMD , jež se zvýšila o 10% respektive 25%. U trysky B byl zaznamenán zvýšený průtok tryskou po výrobě pomocí SLM. Vyšší drsnost povrchu zvyšuje tloušťku kapalinového filmu a tedy i hmotnostní průtok tryskou. U trysky A je možné naopak pozorovat snížení hmotnostního průtoku. Ve studii bylo předpokládáno, že tento jev byl způsoben neforemným vnitřkem trysky A po výrobě pomocí SLM, jelikož tryska nebyla původně pro výrobu aditivní metodou navržena. Významně se projevil návrh trysky C, která i s vysokou drsností povrchu vykazovala hodnotu SMD porovnatelnou s konvenčně vyráběnými tryskami.

	konvenční			SLM		
	\dot{m} [kg/min]	2α [°]	SMD [μm]	\dot{m} [kg/min]	2α [°]	SMD [μm]
Tryska (A)	13.8	36.9	184	10.9	36.5	202
Tryska (B)	8.1	43.6	174	9.7	39.5	218
Tryska (C)	–	–	–	11.2	34.8	179

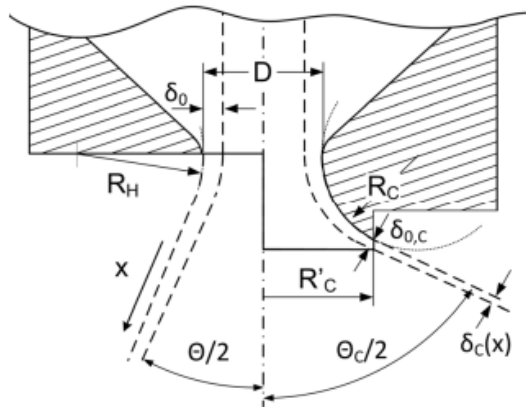
Obrázek 2.6: Výsledky experimentu měření trysek pro $\Delta p_k = 0,61$ MPa [12].

2.8 Vliv zkosené hrany a Coandův efekt

Jak již bylo zmíněno, úhel rozevření kužele spreje ovlivňuje velikost kapek. S větším úhlem rozevření dochází k jemnější atomizaci a tvorbě kapek menších rozměrů. Dle 2.2 je zřejmé, že lze úhel rozevření zvýšit zrychlením víření a to změnou rozměrů trysky či zvýšením vstupního tlaku. Vyšší intenzita víření s sebou však nese i zvýšení třecích ztrát. Většího úhlu rozevření spreje, bez nutnosti zvýšení tlaku či změny vnitřního proudění, lze dosáhnout pomocí Coandova efektu. Dle Coandova efektu má proudící tekutina tendenci se přidržovat obtékaného konvexního povrchu.

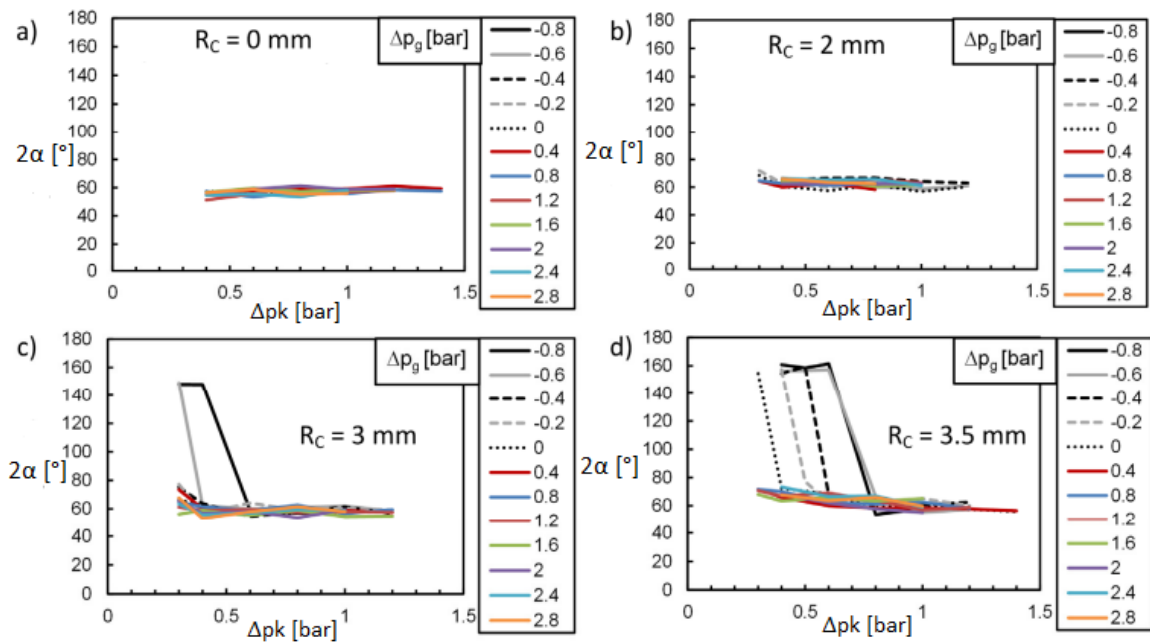
Možnosti ovlivnění spreje pomocí zakřivení výstupního otvoru byly zkoumány v [13]. Ve studii byly porovnány trysky využívající Coandova efektu pomocí zaoblení výstupního otvoru $R_c = 2, 3$ a $3,5$ mm oproti trysce s ostrou hranou. Průměr výstupního otvoru byl 6 mm. Měření bylo provedeno pro různé vstupní tlaky kapaliny Δp_k a různé pře-/pod-tlaky okolního prostředí Δp_g . Na obrázku 2.7 lze vidět porovnání geometrie výstupního otvoru trysky s ostrou hranou a trysky využívající Coandova efektu.

Z grafů 2.8 je vidět účinek vychylujícího zaoblení na úhel kužele spreje. U konvenční trysky byl úhel kužele zhruba 60° za všech provozních tlaků. U zaoblení $R_c = 2$ mm bylo možné pozorovat malé zvýšení rozevření kužele na 70° za nízkého vstupního tlaku. Kapalinový film se ze zakřiveného povrchu odděloval příliš brzy. Při průměru $R_c = 3$ mm bylo



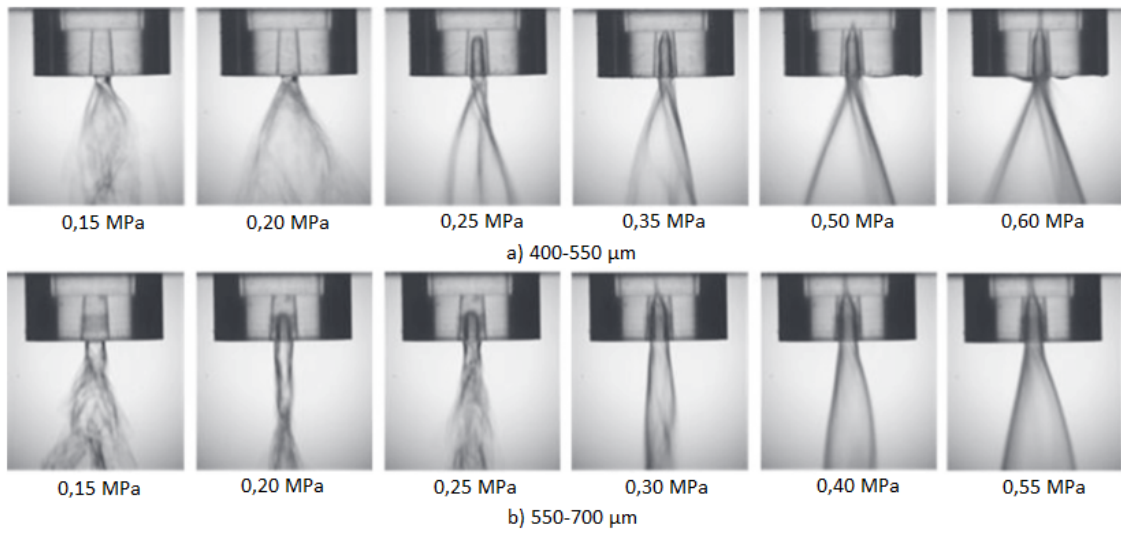
Obrázek 2.7: Na levo: konvenční tryska s ostrou hranou otvoru, na pravo: tryska s otvorem se zaoblením využívající Coandova efektu [13].

možné, u podtlaků okolního prostředí $-0,8$ a $-0,6$ bar, pozorovat výrazné rozšíření kužele spreje až na 140° . Dalším zvýšením zaoblení na $R_C = 3,5$ mm dosáhl úhel rozevření až 160° a to pro větší interval tlaků okolního prostředí $-0,8 \leq \Delta p_g \leq 0$ bar. Možné vlivy tlaku okolního prostředí na výsledné rozevření kužele byly diskutovány v [13].



Obrázek 2.8: Závislost úhlu kužele spreje na tlaku kapaliny Δp_k pro různé tlaky okolního prostředí Δp_g . Každý graf odpovídá různému zaoblení výstupního otvoru trysky R_C [13].

Ve studii [4] byly zkoumány efekty zkosení výstupního otvoru. Výstupní otvor byl zkosný po celé délce, bylo tedy dosaženo divergentního kónického otvoru. Byly testovány dvě trysky s rozdíly vnitřních a vnějších průměrů výstupních otvorů. Hodnoty vnitřního - vnějšího průměru trysky u testovaných trysek byly $400-550 \mu\text{m}$ a $550-700 \mu\text{m}$. Na snímcích 2.9 lze pozorovat, jak kónický tvar výstupního otvoru podporoval vznik vzduchového jádra, již za nižších tlaků.



Obrázek 2.9: Snímky vývoje spreje v závislosti na tlaku u trysek s kónickým otvorem [4].

Kapitola 3

Nastavení experimentu

V rámci měření byly testovány trysky se záměrně vytvořenými vadami a trysky vyrobené pomocí 3D tisku. Následně bylo provedeno měření fázovou Dopplerovskou anemometrií (PDA) pro vybrané trysky. Pro záznam charakteru a defektů sprejového kužele byly pořízeny snímky pomocí vysokorychlostní kamery. Pro rozprašování byla použita voda. Všechny trysky byly testovány pro 4 tlakové režimy $\Delta p_k = 0,75, 1,5, 3$ a 6 bar. Měření bylo provedeno laboratoří sprejů na Odboru termomechaniky a techniky prostředí a data byla poskytnuta k vyhodnocení v rámci této práce. Z dat byly vybrány hodnoty SMD , úhlu rozevření kužele, výtokového součinitele a snímky spreje, v závislosti na daných tlakových režimech.

3.1 Vysokorychlostní vizualizace

Z pozorování vzniklého spreje lze poměrně snadno vyčíst velké množství kvalitativních informací. Pro vysoké rychlosti a malé velikosti sledovaných jevů je zapotřebí vysokorychlostní kamery. Z kamery lze získat informace o úhlu rozevření kužele spreje, vzdálenosti počátečního rozpadu kapalinového filmu, nesouměrnosti a vady spreje nebo i rychlostní pole kapaliny. K dokumentaci prostorového a časového vývoje rozprašované kapaliny bylo použito stejné zařízení jako v práci [8] nebo [20], a to kamera FASTCAM SA-Z HS (Photron, Japonsko) s dálkovým mikroskopovým 12X Zoom objektivem (NAVITAR, USA), který se skládá z 2X F-mount adaptéru, 12 mm F.F zoom objektivu společně a 0.25X objektivu. Pozadí spreje bylo osvětlováno LED světlem model HPLS-36DD18B (Lightspeed Technologies, USA) s dobou trvání světelného impulsu 400 ns. Snímková frekvence kamery byla 60 000 snímků za sekund a rychlost závěrky 1 μs . Pro každou snímkovou sekvenci bylo pořízeno 4000 snímků. Každý byl zvlášť analyzován a výsledky následně zprůměrovány.

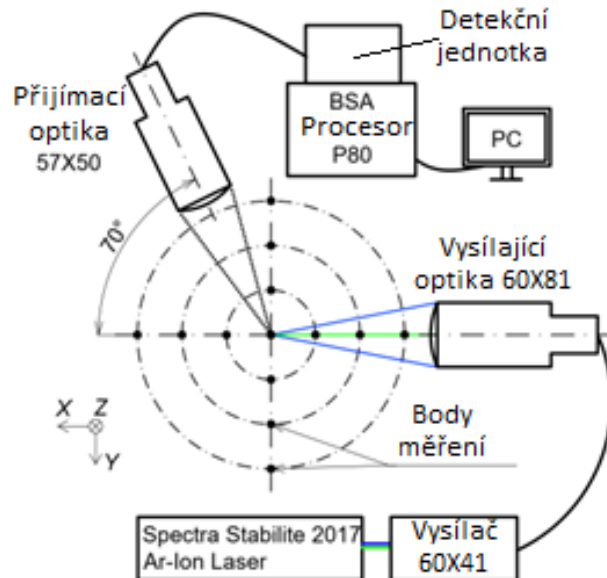
3.2 Fázová Dopplerovská anemometrie (PDA)

Jedná se o neintruzivní optickou měřicí metodu založenou na principu Dopplerova efektu. Umožňuje současné měření rychlosti, velikosti a času detekce částic měřeného objemu. PDA systémy se skládají většinou ze tří fotodetektorů rozmístěných v prostoru. Každý fotodetektor zaznamenává světlo rozptýlené stejnou částicí. Detektory převádí získaný signál na Dopplerův signál s frekvencí úměrnou rychlosti částic. Fázový posun mezi dopplerovskými signály z různých detektorů je použitelný k měření průměru částic. Získané výsledky měření pomocí PDA jsou histogramy velikosti, rychlosti a času průletu částic a statistiky rychlosti

a průměru částic (například SMD). Velikost a rychlost kapek byla sledována pomocí dvou-
složkového vláknového komerčního PDA (Dantec Dynamics A/S Skovlunde, DK) [8].

3.3 Popis měřicí tratě

Měřicí trať byla použita také ve studii [8] s odlišným systémovým nastavením. Voda byla do trysky přiváděna odstředivým čerpadlem z nádrže. Hmotnostní průtok \dot{m}_k byl regulován změnou otáček čerpadla. Průtok byl měřen Coriolisovým hmotnostním průtokoměrem Mass 2100 Di3 (Siemens AG, GE) s přesností $\pm 0,1$ % skutečného \dot{m}_k . Tlak Δp_k byl měřen piezorezistivním snímačem tlaku DMP 331i (BD SENSORS s.r.o, ČR) s přesností $\pm 0,05$ kPa. Přívodní potrubí bylo vybaveno teplotním čidlem PR-13 (OMEGA Engineering, INC., USA) s chybou $\pm 0,2$ °C. Součinitel výtoku byl vypočten dle vztahu 2.3 s nejistotou $\pm 0,25$ % skutečné hodnoty. Tryska byla namontována na polohovací systém s chybou menší než $\pm 0,1$ mm. Úhel rozevření spreje 2α byl detekován pomocí kódu v programu MATLAB založeného na Cannyho hranovém detektoru. Opakovatelnost měření 2α byla lepší než ± 2 %.



Obrázek 3.1: Schéma měřicí tratě PDA [8].

Tabulka 3.1: Systémové parametry.

Parametr	Hodnota
Výstupní výkon laseru	0,3 W (celkem)
Vlnová délka	488 a 514,5 nm
Ohnisková vzdálenost optiky	800 mm (vysílající) a 500 mm (přijímací)
Úhel rozptylu	70°
Maska přijímače	B
Prostorový filtr přijímače	0,2 mm

Tabulka 3.2: Nastavení procesoru

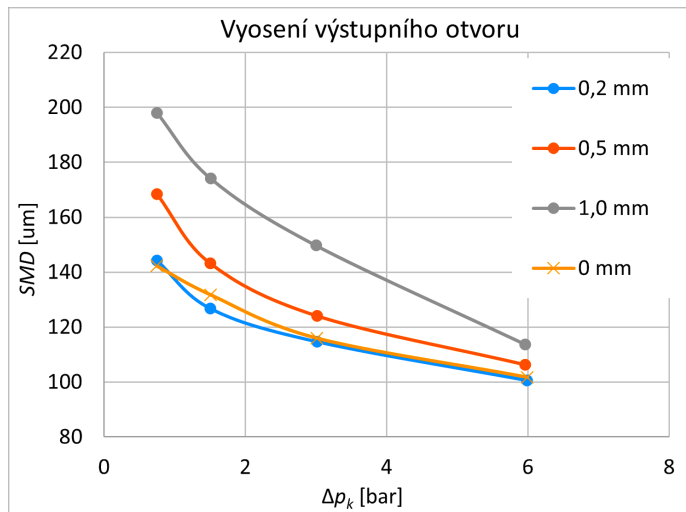
Parametr	Axiální hodnota	Radiální hodnota
Střed rychlosti	20 m/s	0 m/s
Rozpětí rychlosti	41 m/s	20 m/s
Citlivost	850 V	1000 V
SNR	0 dB	0 dB
Zesílení signálu	14 dB	20 dB
Poměr validace úrovně	8	2

Integrální Sauterův střední průměr (ID_{32} nebo $ISMD$) poskytuje globální reprezentaci SMD na celém radiálním profilu [7].

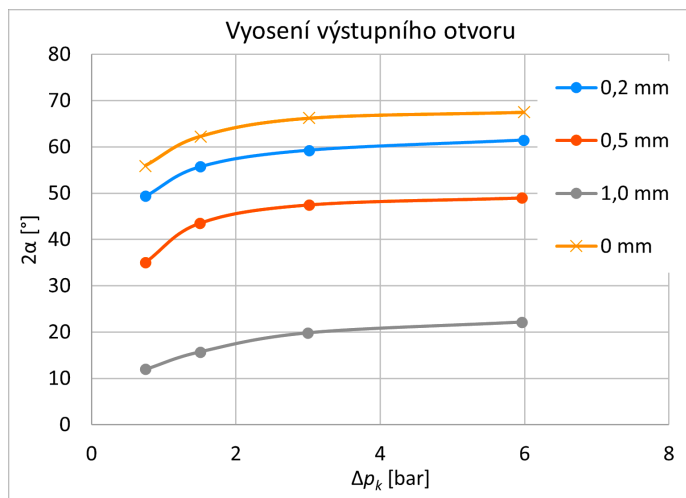
$$ISMD = ID_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} r_i f_i D_{30,i}^3}{\sum_{i=1}^{N_i} r_i f_i D_{20,i}^2} \quad (3.1)$$

kde r_i je radiální vzdálenost od osy spreje, f_i je rychlost přenosu dat, D_{30} je objemový střední průměr a D_{20} plošný střední průměr. Opakovatelnost měření $ISMD$ byla lepší než ± 2 %.

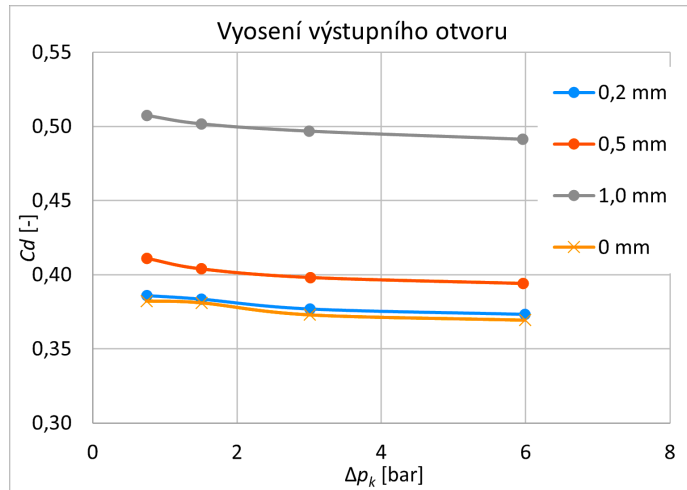
pouze malé zvýšení hodnoty C_d . Při posunu 0,5 mm došlo k nárůstu C_d o 8%. Tryska s největším posunutím výstupního otvoru 1 mm vykazuje nárůst C_d o 32%. Zvýšení hodnoty výtokového součinitele je způsobeno narušením vířivého pohybu na konci vířivé komory. Dochází ke shlukování kapaliny do formy proudu, čímž je zvýšen objemový průtok tryskou.



Obrázek 4.2: Vliv vyosení výstupního otvoru na SMD .

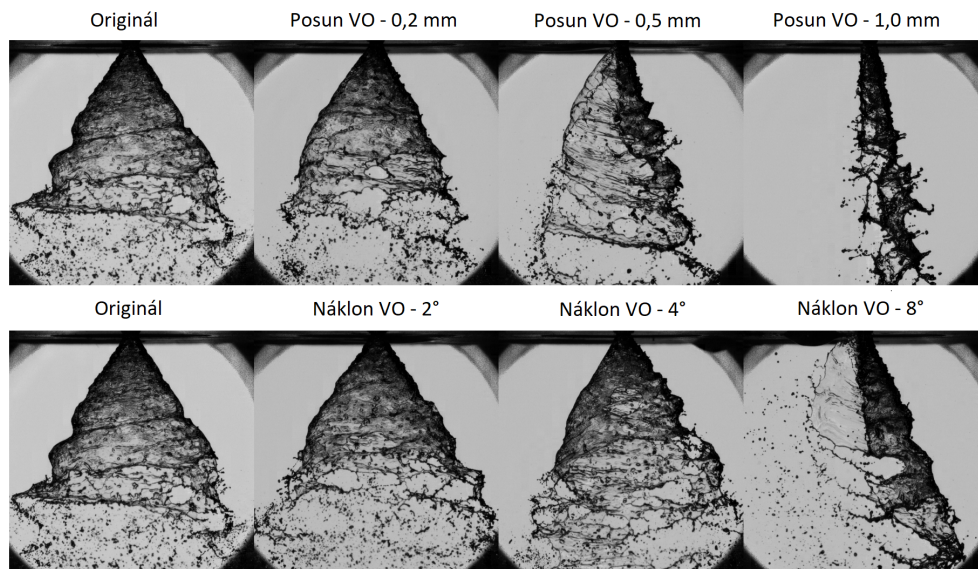


Obrázek 4.3: Vliv vyosení výstupního otvoru na úhel rozevření kužele spreje (SCA).



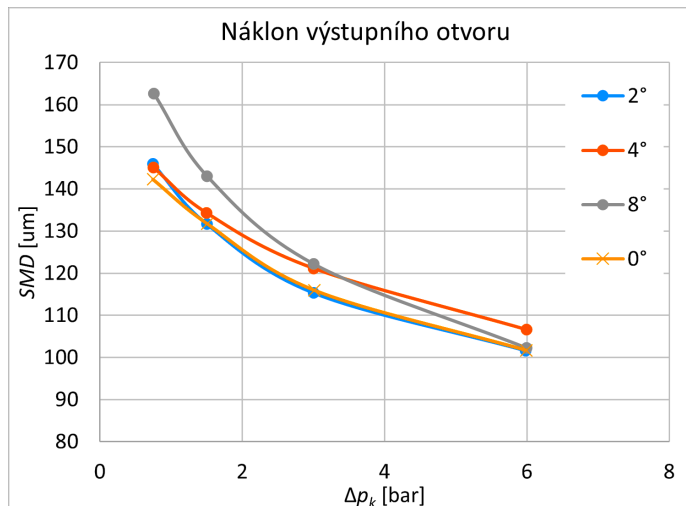
Obrázek 4.4: Vliv vyosení výstupního otvoru na výtokový součinitel.

Výrazné rozdíly trysky s vyosením otvoru o 1 mm, lze vysvětlit pomocí snímků 4.5. Na snímcích lze pozorovat výrazně nesouměrný kužel spreje. S větším vyosením otvoru dochází ke koncentraci objemu kapaliny do části kužele spreje. Výsledkem je vznik kapalinového proudu. Při posunutí 1 mm se nacházel otvor celou plochou mimo osu vířivé komory. Celý objem kapaliny byl koncentrován do proudového paprsku v místě otvoru a došlo tak k výraznému zmenšení, až možnému zániku vzduchového jádra. To zapříčinilo vysokou hodnotu výtokového součinitele trysky a malý úhel rozevření kužele spreje. Z důvodu větší tloušťky kapalinového filmu jsou produkovány kapky o větším průměru a tím i zvýšena hodnota *SMD*. Na snímcích lze dále pozorovat zkrácení vzdálenosti rozpadu kapalinového filmu, u trysek s posunutím otvoru. V místě posunutého otvoru a koncentrace kapaliny do paprsku lze pozorovat zvýšené vlnění a nerovnosti na povrchu filmu, které iniciují dřívější rozpad filmu. Zaznamenané vady souhlasí se studií [21], která sprejové defekty zkoumala.

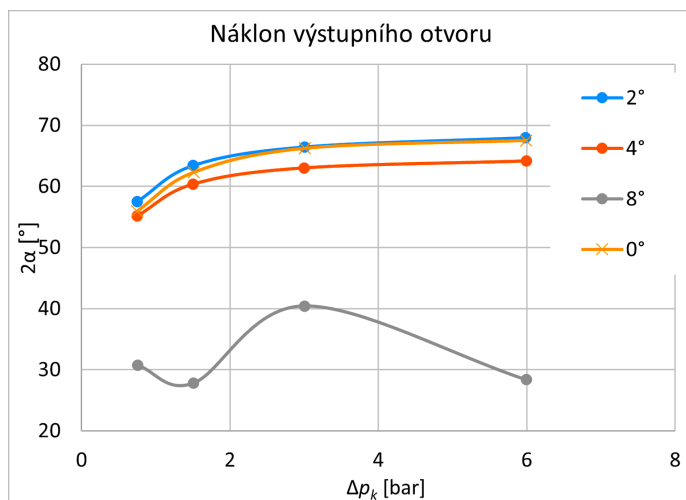


Obrázek 4.5: Snímky kužele spreje z vysokorychlostní kamery pro posun a náklon výstupního otvoru.

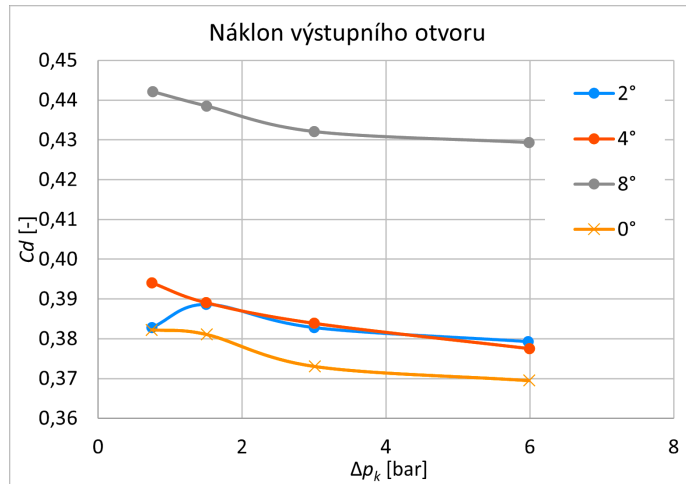
znamnou část výtokové plochy otvoru. Oproti měření 2.3 hodnoty C_d se zvýšením vstupního tlaku mírně klesly. U náklonu 8° bylo zaznamenáno o 16% vyšších hodnot C_d , než u trysky bez náklonu. To lze, podobně jako u posunutí výstupního otvoru, vysvětlit shlukováním kapaliny do proudového paprsku a zmenšením, až možným zánikem, vzduchového jádra.



Obrázek 4.7: Vliv naklonění výstupního otvoru na SMD .



Obrázek 4.8: Vliv naklonění výstupního otvoru na úhel rozevření kužele spreje (2α).



Obrázek 4.9: Vliv naklonění výstupního otvoru na výtokový součinitel.

4.3 Vliv drsnosti povrchu trysky

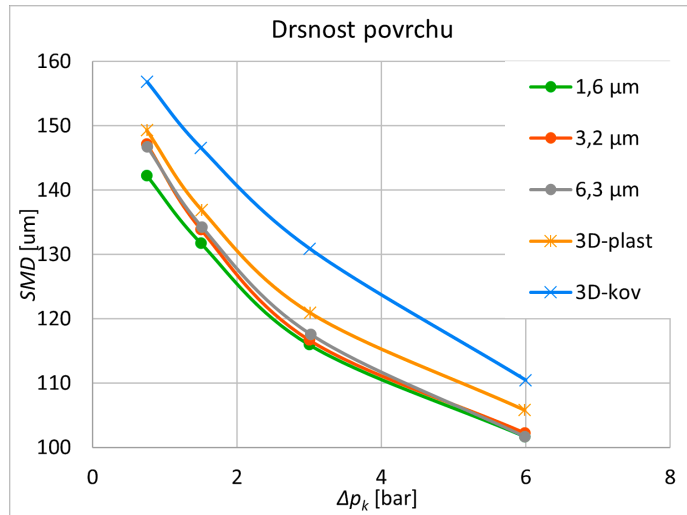
Porovnání vlivu drsnosti povrchu vířivé komory bylo provedeno na obráběných tryskách s různou drsností povrchu vířivé komory $Ra = 1,6, 3,2$ a $6,3 \mu\text{m}$. Pro srovnání vlivu drsnosti povrchu u 3D tisku byla vybrána dvojice trysek, jedna plastová druhá kovová. Na těchto dvou tryskách bylo provedeno měření aritmetického průměru posuzovaného topografického povrchu Sa , jenž je rozšířením parametru Ra na plochu. Plastová tryska zhotovená 3D tiskem má hodnotu $Sa = 3,0 \mu\text{m}$, ocelová pak $16,0 \mu\text{m}$.

Z grafů 4.10 lze pozorovat, že u běžně vyrobených trysek nebylo zaznamenáno výrazných rozdílů v hodnotách SMD . U tištěné plastové trysky bylo možné pozorovat lehce vyšších hodnot SMD . Pouze ocelová tryska zhotovená 3D tiskem vykazovala, podle předpokladu, výrazně vyšší hodnoty SMD . Při větší drsnosti povrchu vzrůstá zvýšením vířením kapaliny tloušťka kapalinového filmu, což má za následek produkci větších kapek. Lze vidět, že pro obráběné trysky nebyl rozdíl v drsnosti povrchu dostačný pro projevení zmíněného jevu. U tištěných trysek byl však tento trend již zjevný. Tištěná ocelová tryska vykazovala nárůst hodnot SMD až o 13%.

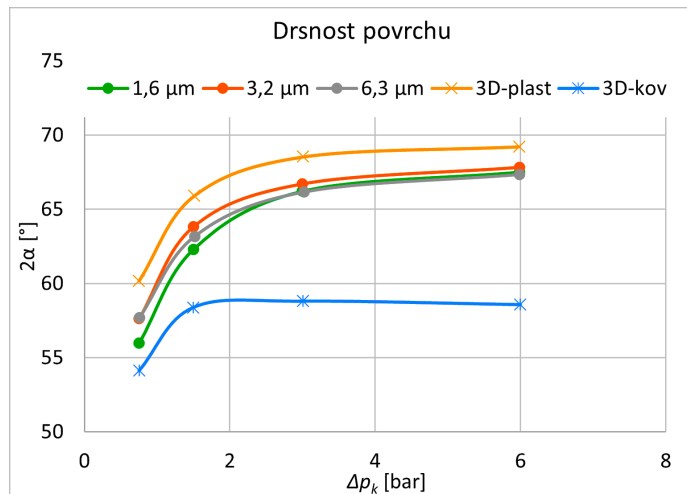
Graf 4.11 ukazuje, že úhel rozevření 2α byl u plastové trysky, i přes vyšší drsnost povrchu, větší než u obráběných trysek. Ocelová tištěná tryska měla výrazně užší kužel spreje. Při vstupním tlaku 6 bar byl úhel rozevření kužele této trysky o 13% menší. Vyšší drsnost povrchu způsobuje větší ztráty v kinetické energii kapaliny. Kapalina proudí z trysky s nižší rychlostí rotace, což mělo za následek zúžení kužele spreje. Pro měření za tlaku 0,75 bar nebylo na této trysce, i přes zvyšování tlaku, zaznamenáno rozšíření kužele spreje. Oproti studii [14] se rozdíl v drsnosti povrchu projevil méně. Ve zmíněné práci byla však studována drsnost výstupního otvoru. Je tedy možné, že drsnost povrchu výstupního otvoru, hraje větší roli na rozevření kužele spreje než drsnost povrchu vířivé komory, porovnávaná v této práci. Pro ověření této teorie by však bylo nutné provést měření na tryskách stejných rozměrů.

Drsnost povrchu se zajímavě projevila na hodnotách C_d na grafu 4.12. Pro největší drsnost povrchu z konvenčních trysek $Ra = 6,3 \mu\text{m}$ byly naměřeny nejnižší hodnoty C_d . Jelikož se na hodnotách SMD ukázal vliv drsnosti povrchu jako zanedbatelný, je pravděpodobné, že součinitel výtoku u této trysky byl ovlivněn jinými faktory, jako například rozměrovými

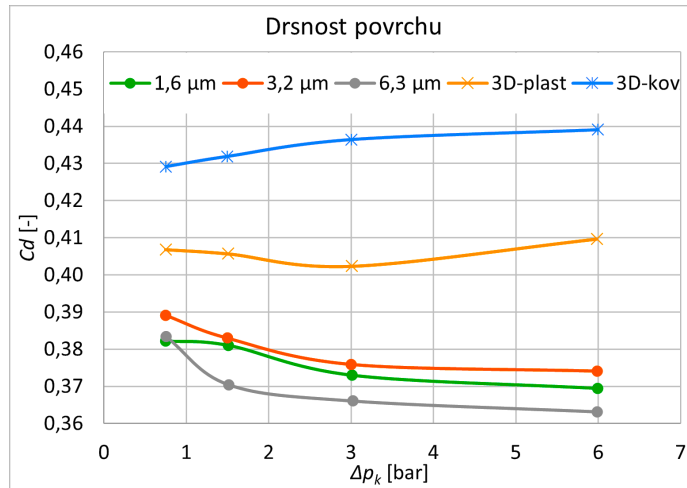
nepřesnostmi a nepřesnostmi v měření. U trysek vyrobených pomocí 3D tisku byl vliv drsnosti povrchu již znatelnější. Dle předpokladu vykazovaly nejvyšší hodnoty C_d . Větší tloušťka kapalinového filmu má za následek i zvýšení průtoku tryskou a tedy i zvýšení výtokového součinitele. U ocelové tištěné trysky lze však pozorovat změnu chování trendu hodnot z konvexního na konkávní. Podobné chování trendu bylo možné pozorovat i ve studii [4] na grafu 2.3. Tuto změnu trendu se nepodařilo zdůvodnit.



Obrázek 4.10: Vliv drsnosti povrchu na SMD .



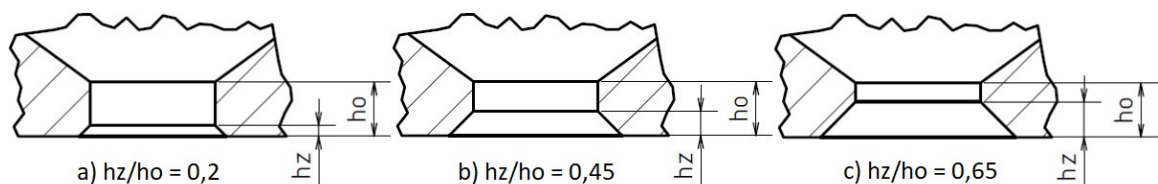
Obrázek 4.11: Vliv drsnosti povrchu na úhel rozevření spreje 2α .



Obrázek 4.12: Vliv drsnosti povrchu na výtokový součinitel.

4.4 Vliv sražené hrany výstupního otvoru

Posledním zkoumaným parametrem byl vliv sražené hrany výstupního otvoru. Sražení bylo provedeno vrtákem s vrcholovým úhlem 45° o různých hloubkách zavrtání. Byly vytvořeny 3 hloubky zavrtání s poměrem délky zkosení hrany a délky výstupního otvoru (hz/ho) 0,2, 0,45 a 0,65. S větší hloubkou zavrtání se zvětšoval průměr vnější hrany výstupního otvoru a délka zkosení. Schématicky je sražení znázorněno na obrázku 4.13.



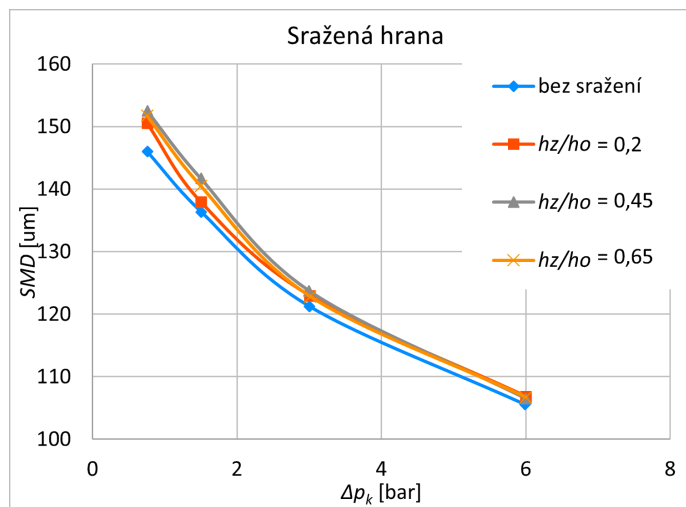
Obrázek 4.13: Schéma poměrů délky zkosení hrany (hz) a délky výstupního otvoru (ho).

Z grafu 4.14 lze pozorovat, že úprava hrany neměla na hodnoty SMD výrazný vliv. Graf 4.15 pak ukazuje vliv zkosení hrany na úhel rozevření kužele spreje. U trysky s poměrem $hz/ho = 0,2$ nebylo zaznamenáno výrazné rozšíření kužele spreje. Při prodloužení zkosení lze, podobně jako ve studii [13], pozorovat výrazné rozšíření kužele spreje u zkosené hrany, a to zejména u nižších vstupních tlaků. Při tlaku 0,75 bar a $hz/ho = 0,45$ bylo zaznamenáno rozšíření úhlu spreje oproti originální tryce o skoro 18%. Při $hz/ho = 0,65$ došlo k rozšíření úhlu rozevření kužele spreje až o 29%. Při zvyšování vstupního tlaku se úhel rozšiřuje razantněji u trysek s menším zkosením. U délkového poměru 0,45 nebylo od tlaku 1,5 bar zaznamenáno výrazné rozšíření kužele spreje. Rozdíly mezi tryškami se při zvýšení vstupního tlaku zmenšují. U trysky s největší hloubkou sražení hrany bylo, při tlaku 6 bar, dosaženo rozevření úhlu kužele spreje až 77° . Výrazného rozšíření kužele spreje u této trysky je dosaženo pomocí zvětšení průměru vnější hrany výstupního otvoru. Dalším důvodem může být, podobně jako u Coandova efektu, ulpívání vytékající vody na zkoseném povrchu výstupního otvoru. Bylo zaznamenáno podobné chování rozšíření kužele spreje jako ve studii [13], kde se vliv zaoblení projevil nejvýrazněji za nízkých vstupních tlaků. Tryska

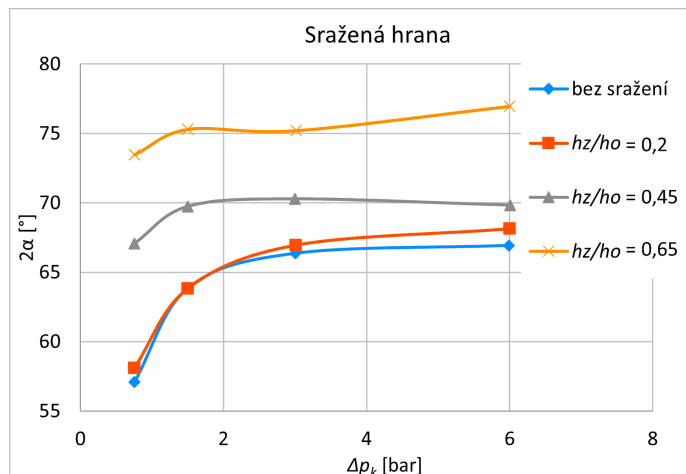
se zkosením o poměru $hz/ho = 0,65$ je vhodná pro použití v aplikacích neumožňujících vysokého vstupního tlaku.

Dle předpokladu vidíme na grafu 4.16 nárůst hodnoty C_d u trysek s výraznějším zkosením hrany. Poměr sražení $hz/ho = 0,2$ nebyl dostatečný pro ovlivnění chování spreje. U trysek s poměrem 0,45 a 0,65 došlo k nárůstu C_d o 2,5 respektive 8%.

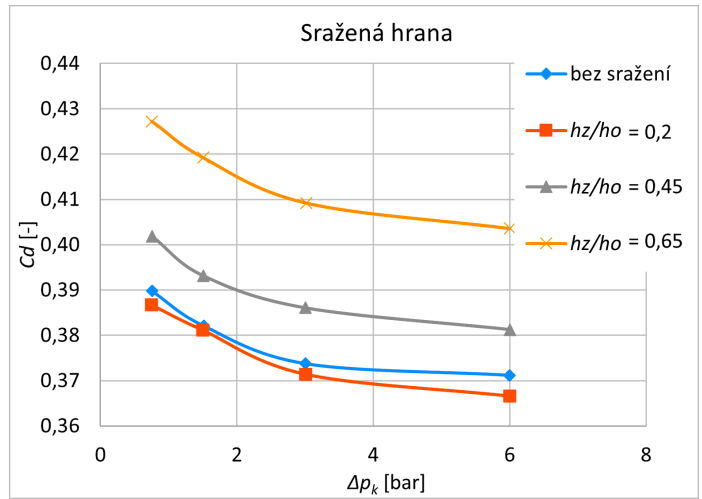
Jak již bylo zmíněno, s větším rozevřením kužele spreje dochází k jemnější atomizaci. U trysek s vyšším poměrem zkosení, jež zapříčiňuje i zvýšení hodnot 2α , však nebyla změna jemnosti atomizace na hodnotách SMD zaznamenána. Trysky s větším poměrem zkosení vykazují i zvýšení výtokového součinitele. Vyšší výtokový součinitel je způsobený větší tloušťkou kapalinového filmu, jež má za následek tvorbu objemnějších kapek spreje. Lze tedy předpokládat, že vliv rozšíření kužele spreje na jemnost atomizace je vyrušen větší tloušťkou kapalinového filmu, jež má na jemnost atomizace, tedy i hodnoty SMD , opačný vliv.



Obrázek 4.14: Vliv sražení hrany na SMD .



Obrázek 4.15: Vliv sražení hrany na úhel rozevření kužele spreje.



Obrázek 4.16: Vliv sražení hrany na výtokový součinitel.

Závěr

V rámci práce bylo zjištěno, že nepřesnosti v poloze a náklonu výstupního otvoru vůči ose vířivé komory mají signifikantní vliv na kvalitu spreje. Již při posunutí 0,2 mm bylo možné pozorovat zúžení kužele spreje a kratší vzdálenost rozpadu kapalinového filmu. Při náklonu 8° a posunutí výstupního otvoru o 1 mm docházelo ke zhroucení kužele spreje a koncentraci kapaliny do proudového paprsku. Tato skutečnost byla zobrazena a vysvětlena na snímcích z vysokorychlostní kamery.

Pro drsnosti povrchu vířivé komory 1,6-6,3 μm , u konvenčně vyráběných trysek, nebyl z dat zaznamenán rozdíl v kvalitě rozprašování. Pro lepší zjištění vlivu drsnosti by bylo vhodné rozšíření intervalu drsností povrchu. Možným rozšířením studie by také mohlo být porovnání závažnosti vlivu drsnosti u trysek různých rozměrů a srovnání vlivu drsnosti vířivé komory a drsnosti výstupního otvoru. U tištěných trysek zvýšila drsnost a struktura povrchu hodnoty *SMD* až o 13%. U tištěné ocelové trysky byla zaznamenána změna trendu vývoje výtokového součinitele. V rámci práce se nepodařilo dojít k vysvětlení změny trendu. Vliv struktury povrchu na vývoj výtokového součinitele, v závislosti na změně vstupního tlaku, se tedy jeví vhodným předmětem dalšího zkoumání.

Zkosení hrany výstupního otvoru se významně projevilo na rozevření kužele spreje, zejména při nízkém vstupním tlaku. Tryska s největším poměrem délky zkosení ku délce výstupního otvoru dosáhla rozevření kužele spreje až 77°. Trysky se zkosením hrany výstupního otvoru se jeví vhodné při nutnosti použití nízkého vstupního tlaku.

V úvodu byly vytyčeno několik cílů práce. Zmíněných cílů bylo dosaženo v těchto kapitolách:

- rešerše relevantních publikací k tlakovým vířivým tryškám, se zaměřením na zkoumané parametry, byla provedena v kapitolách 1 a 2.
- Analýza výsledků z měření pomocí optických metod byla provedena v rámci kapitoly 4.
- Vyhodnocení vlivu provozních podmínek a typu výroby na sprej bylo provedeno, v rámci rešerše, v kapitole 2 a z naměřených dat v kapitole 4, na základě parametrů *SMD*, úhlu rozevření kužele spreje a výtokového součinitele.
- Určení a popis rozdílů ve výtoku kapaliny z trysky, pomocí vysokorychlostní kamery, bylo provedeno v kapitole 4. Tyto snímky se ukázaly důležitým podkladem pro vyhodnocení trysek s posunutím a náklonem výstupního otvoru.
- Porovnání dat z jednotlivých trysek mezi sebou bylo uskutečněno v rámci kapitoly 4. Trysky byly porovnány mezi sebou v rámci zkoumaného parametru a též s originální tryskou.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotka	Název
Q	[-]	Zlomek celkového objemu kapaliny spreje v kapkách
D_{ki}	[μm]	Průměr kapky
X	[-]	Experimentálně určená konstanta
q	[-]	Experimentálně určená konstanta
SMD	[μm]	Sauterův střední průměr
K	[-]	Geometrická konstanta trysky
A_s	[mm^2]	Plocha tangenciálních vstupních portů vířivé komory
D_s	[mm]	Průměr vířivé komory
D_o	[mm]	Průměr výstupního otvoru trysky
2α	[$^\circ$]	Úhel rozevření kužele spreje
δp_k	[Pa]/[bar]	Rozdíl v tlaku na trysce, také vstupní tlak
ρ_k	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Hustota kapaliny
η_k	[Pa.s]	Dynamická viskozita kapaliny
C_d	[-]	Výtokový součinitel trysky
\dot{m}_k	[$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]	Hmotnostní průtok kapaliny tryskou
δ	[μm]	Tloušťka kapalinového filmu
We	[-]	Weberovo číslo
d	[mm]	Průměr výstupního otvoru trysky
m_k	[kg]	Hmotnost kapaliny
V_k	[m^3]	Objem kapaliny
τ	[Pa]	Tečné napětí
σ	[$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]	Povrchové napětí
F	[N]	Tečná síla na povrchu kapaliny
l	[m]	Úsečka délky povrchu
ρ_p	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Hustota okolního prostředí
U_A	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Relativní rychlost kapaliny vůči okolnímu prostředí
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
$ISMD$	[μm]	Integrální Sauterův střední průměr
r_i	[μm]	radální vzdálenost od osy spreje
f_i	[bps]	Rychlost přenosu dat
D_{30}	[μm]	Objemový střední průměr
D_{20}	[μm]	Plošný střední průměr
hz	[mm]	Délka zkosení hrany výstupního povrchu
ho	[mm]	Délka výstupního otvoru
t	[mm]	tloušťka kapalinového filmu
FN	[-]	průtokový faktor

Literatura

- [1] AZZOPARDI, B. J. *Sauter mean diameter* [online]. [cit. 20.03.2022]. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/1108/>.
- [2] BAYVEL, L. a ORZECOWSKI, Z. *Liquid Atomization*. CRC Press, 2019. ISBN 9781351434959.
- [3] BERROCAL, E. *Spray description* [online]. [cit. 20.02.2022]. Dostupné z: <https://spray-imaging.com/spray-description.html>.
- [4] CUI, J., LAI, H., LI, J. a MA, Y. Visualization of internal flow and the effect of orifice geometry on the characteristics of spray and flow field in pressure-swirl atomizers. *Applied Thermal Engineering*. sv. 127, s. 812–822. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.103>.
- [5] DAFSARI, R. A., CHANDRAHASAN, R., AHN, C. a LEE, J. Effect of Internal Geometry of the Pressure-swirl Duplex Nozzle on the Atomization Characteristics of Jet A-1 fuel. *Atomization and Sprays*. 2020, sv. 30. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2020031921. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/342457981_Effect_of_Internal_Geometry_of_the_Pressure-swirl_Duplex_Nozzle_on_the_Atomication_Characteristics_of_Jet_A-1_fuel.
- [6] GHAFAR, Z. A., KASOLANG, S. a HAMID, A. H. A. Characteristics of Spray Angle and Discharge Coefficient of Pressure-Swirl Atomizer. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021, sv. 85, s. 107–114. Dostupné z: <https://doi.org/10.37934/arfmts.85.2.107114>.
- [7] JEDELSKY, J., JICHA, M., SLAMA, J. a OTAHAL, J. Development of an Effervescent Atomizer for Industrial Burners. *Energy Fuels*. 2009, 23(12), s. 6121–6130. DOI: 10.1021/ef900670g.
- [8] JEDELSKY, J., MALÝ, M., JÍCHA, M., SLÁMA, J. a WIGLEY, G. Importance of Geometrical Factors on Spray Characteristics of Spill-Return Atomizers. *Journal of Propulsion and Powers*. 2020, 37(3). DOI: 10.2514/1.B38066. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.B38066>.
- [9] LECHLER. *Spray pattern classifications* [online]. [cit. 20.03.2022]. Dostupné z: <https://www.lechlerusa.com/en/resources/spray-facts/spray-pattern-classifications>.
- [10] LEFEBVRE, A. H. *Atomization* [online]. [cit. 14.03.2022]. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/573/>.

- [11] LEFEBVRE, A. H. a McDONELL, V. G. *Atomization and sprays*. 2. vyd. CRC Press, 2017. ISBN 9781351647236.
- [12] LÜSCHER, P., BOCHSLER, J., WEISS, D., HUBER, M., LÖFFEL, K. et al. Numerical and experimental investigation of pressure-swirl nozzles produced by additive manufacturing. In: . 2019.
- [13] MUSEMIC, E. a WALZEL, P. Swirl Atomizers with Coanda Deflection Outlets. *12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. 2012.
- [14] RAMAMURTHI, K., THARAKAN, T. J., PATNAIK, S. a BALAKRISHNAN, M. Experiments on swirled annular liquid sheets formed by orifices with varying surface roughness. *7th Asian Congress on Fluid Mechanics*. sv. 2, s. 677–680.
- [15] RIZK, N. K. a LEFEBVRE, A. H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers. *Journal of Propulsion and Power*. 1985, sv. 1, s. 193–199. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/3.22780>.
- [16] RIZK, N. K. a LEFEBVRE, A. H. Prediction of Velocity Coefficient and Spray Cone Angle for Simplex Swirl Atomizers. *International Journal of Turbo and Jet Engines*. 1987, sv. 4, s. 65–74. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/TJJ.1987.4.1-2.65>.
- [17] SUYARI, M. a LEFEBVRE, A. H. Film thickness measurements in a simplex swirl atomizer. *Journal of Propulsion and Power*. 1986, sv. 2, s. 528–533. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/3.22937>.
- [18] WANG, X. F. a LEFEBVRE, A. H. Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles. *Journal of Propulsion and Power*. 1987, 3(1), s. 11–18. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/3.22946>.
- [19] WILLIAMS, A. *Combustion of Liquid Fuel Sprays*. Elsevier Science, 2013. ISBN 9781483101583.
- [20] ZAREMBA, M., WEISS, L., MALÝ, M., WENSING, M., JEDELSKÝ, J. et al. Low-pressure twin-fluid atomization: Effect of mixing process on spray formation. *International Journal of Multiphase Flow*. 2017, sv. 89, s. 277–289. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.015>.
- [21] ZIRAKSAZ, M., OMMI, F. a GANDJI, D. Experimental investigation of swirl atomizer spray defections. *Meccania*. 2014, sv. 49, s. 2747–2755. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11012-014-0036-5>.