

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY INSTITUTE

# NESTABILITA SPREJE U TRYSEK TYPU EFFERVESCENT

UNSTEADINESS IN SPRAYS OF EFFERVESCENT ATOMIZERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. ZBYNĚK BEINSTEIN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JAN JEDELSKÝ, Ph.D.**

*BRNO 2009*



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/09

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Beinstein Zbyněk, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

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

### **Nestability spreje u trysek typu effervescent**

v anglickém jazyce:

### **Unsteadiness in sprays of effervescent atomizers**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tzv. effervescent trysky patří k dvoumédiovým tryskám, které k atomizaci kapaliny (např. vody) používají pomocný plyn. Stabilita generovaného spreje je jedním z důležitých a tudíž i hodnocených parametrů trysek.

Cíle diplomové práce:

Úkolem je v programu Excel zpracovat existující postup výpočtu nestabilit spreje. Tento postup použít na data naměřená na konkrétní effervescent trysce. Provést analýzu vlivu provozních podmínek na stabilitu vodního spreje. Vyhodnocení výsledků měření. Výrobní dokumentace trysek.

Seznam odborné literatury:

- [1] A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Pub, February 1989, ISBN: 0891166033  
[2] S. D. Sovani, P. E. Sojka and A. H. Lefebvre, Effervescent Atomization, Progress in Energy and Comb. Science, vol. 27, pp. 483-521, 2001  
[3] Otáhal, J., Experimentální stanovení charakteristik effervescent trysek, Diplomová práce , Brno 2002

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne



*Zdeněk Skála*

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

*Miroslav Doupovec*

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývala výzkumem effervescent trysek. Effervescent trysky patří do skupiny dvoufázových rozprašovacích trysek, které se často využívají ve spalovacích aplikacích. Právě ve spalovacích aplikacích má míra stability spreje významný vliv na účinnost spalování a množství vzniklých exhalací. Hlavním cílem práce bylo zhodnotit míru nestabilit spreje v závislosti na konstrukci trysky a jejím provozním režimu. Vliv konstrukce byl zkoumán v závislosti na průměru a délce směšovací komory, a dále pak na velikosti, počtu a rozmístění aeračních otvorů. Různými kombinacemi těchto konstrukčních parametrů vzniklo 17 specifických variant zkušebních vzorků trysky. Každá tato varianta byla proměřena ve třech provozních režimech, reprezentovaných určitým tlakem kapaliny na vstupu do trysky a hmotnostním poměrem průtoku plynu ke kapalině (GLR). Pro vyhodnocení míry nestabilit spreje byla použita metodika, která porovnává ideální rozdělení částic do mezičásticových časových tříd, definovaných pro ideální (stabilní) sprej, s experimentálně zjištěným rozdělením. Pro určení experimentálního rozdělení bylo využito měření spreje pomocí laserového systému P/DPA (Phase Doppler Particle Analyser). Výsledkem srovnání ideálního a experimentálního rozdělení byl parametr  $\delta$ , který vyjadřuje míru nestabilit spreje pro konkrétní trysku a provozní režim. Pomocí zmíněného parametru bylo možno mezi sebou jednotlivé trysky porovnávat a určit přínos jednotlivých konstrukčních úprav. Z výsledků vyplynulo doporučení pro konstrukci trysky, vytvářející sprej s minimální mírou nestabilit spreje. Pro zkoumanou trysku a její jednotlivé konstrukční varianty byla zhotovena výkresová dokumentace.

## ABSTRACT

Master thesis focused on the research of the effervescent atomizers. Effervescent atomizers belong to a group of two-phase atomizers, which are often used in combustion applications. Right there in combustion applications, the degree of the stability sprays has a significant impact on combustion efficiency and exhaust gas emissions. The main aim of this work was to assess the level of spray unsteadiness depending on the atomizer design and its operating mode. The effect of construction was studied on the diameter and length of mixing chamber, and then on the size, number and location of aeration holes. Seventeen specific variants of the atomizer were constructed by different combinations of these design parameters. Each of these variants was measured in three operating modes, which were represented by a liquid pressure at the inlet to the atomizer and gas-to-liquid mass flow ratio (GLR). To evaluate the level of spray unsteadiness was used a methodology, which compares the ideal element's distribution into the interparticle time bin, defined for the ideal (stable) spray, with the experimentally observed distribution. The laser measurement system P/DPA (Phase Doppler Particle Analyzer) was used to determine the experimental interparticle distribution. The result of the comparison of the ideal and the experimental distribution was the parameter  $\delta$ , which expresses the level of spray unsteadiness for a specific atomizer and operating mode. With that parameter it was possible to compare the individual atomizers and determine to the benefit of various construction's correction of the atomizer. The results showed the recommendation for the modifications of the atomizer, creating a spray with a minimum level of spray's unsteadiness. For the surveyed atomizer and his individual construction's variations the drawing was made.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Atomizace, dvoufázová effervescent tryska, nestability spreje, P/DPA

## KEYWORDS

Atomization, two-phase effervescent atomizer, unsteadiness in sprays, P/DPA

## Bibliografická citace

BEINSTEIN, Z. *Nestability spreje u trysek typu effervescent*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 58 s, 21 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Nestability spreje u trysek typu effervescent* vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím práce a s využitím vlastních znalostí, odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů.

V Brně dne 28. dubna 2009

Bc. Zbyněk Beinstein

## Poděkování

Děkuji tímto Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za vedení mé práce, za připomínky a cenné rady, bez kterých bych svou diplomovou práci těžko vypracovával.

# Obsah

Úvod .....	11
1. Trysky.....	12
1.1. Princip atomizace.....	12
1.2. Faktory ovlivňující atomizaci .....	13
1.3. Nejběžnější druhy rozprašovacích trysek .....	15
1.3.1. Tlakové trysky .....	15
1.3.2. Rotační trysky.....	17
1.3.3. Trysky s přispěním vzduchu (air-assist).....	17
1.3.4. Airblast trysky .....	17
1.3.5. Další typy trysek.....	18
1.4. Využití trysek.....	19
2. Popis effervescent trysek.....	19
2.1. Úvod k effervescent tryskám .....	19
2.1.1. Princip effervescent trysek .....	19
2.1.2. Typy effervescent trysek .....	21
2.1.1. Výhody effervescent trysek.....	22
2.1.2. Provozní podmínky effervescent trysek .....	22
2.2. Experimentální tryska .....	25
2.2.1. Popis konstrukce.....	25
2.2.2. Geometrické parametry .....	26
2.3. Nestabilita spreje effervescent trysek .....	28
2.4. Dvoufázové proudění v trysce .....	30
3. Měření .....	33
3.1. Popis měřicího zařízení.....	33
3.1.1. Princip P/DPA systému .....	33
3.1.2. Konfigurace měřicího systému.....	36
3.2. Popis laboratoře a měřicí tratě .....	37
3.3. Naměřená data .....	39
4. Postup výpočtu .....	39
4.1. Teorie k výpočtu nestabilit spreje u trysek .....	39
4.2. Použitý postup výpočtu.....	40
4.3. Rozložení částic ve spreji .....	42

5.	Nestability spreje .....	46
5.1.	Vliv polohy ve spreji a velikosti částic .....	46
5.2.	Vliv geometrie trysky a provozního režimu.....	47
5.2.1.	Průměr směšovací komory.....	48
5.2.2.	Průměr aeračních otvorů .....	48
5.2.3.	Počet otvorů .....	49
5.2.4.	Délka směšovací komory .....	49
5.2.5.	Vliv provozního režimu .....	51
5.3.	Porovnání trysek mezi sebou.....	51
5.4.	Shrnutí vlivu geometrie trysky.....	52
6.	Výkresová dokumentace .....	52
	Závěr .....	54
	Seznam použitých zdrojů.....	56
	Seznam použitých veličin .....	57
	Seznam příloh .....	58



## Úvod

Rozprašovací trysky slouží k transformaci kapaliny na malé kapky, obvykle o velikosti menší než 300  $\mu\text{m}$ . Tomuto procesu se také říká atomizace. Princip atomizace spočívá v překonání sil povrchového napětí kapaliny, nejčastěji působením aerodynamických sil, které vzniknou při dosažení relativní rychlosti mezi kapalinou a okolním prostředím. U effervescent trysek je proces atomizace podpořen ještě dalšími vlivy, které budou podrobněji rozebrány později. Pro specifické požadavky při atomizaci kapalin bylo vyvinuto mnoho typů trysek, effervescent tryska patří do skupiny dvoufázových trysek, které používají pro rozprašování kapaliny pomocný plyn.

Zkoumaná tryska je používána v průmyslových hořácích pro atomizaci lehkého topného oleje, atomizačním plynem je vzduch. Výkon této trysky se pohybuje řádově v desítkách MW. Využití effervescent trysek ve spalovacích procesech přináší několik výhod. Jednak tryska umožňuje dosažení jemného spreje i při nízkých vstupních tlacích kapaliny a udržení takové kvality spreje v poměrně širokém rozsahu vstupního tlaku kapaliny, a tedy i průtoku kapaliny. Dalším pozitivem je, že přimíchávaný vzduch podporuje provzdušnění spalovacího prostoru. Důležitou vlastností trysky je i velký průměr výstupního otvoru, který zabraňuje možnému ucpávání trysky. Tryska je proto vhodná i pro spalování látek obsahující drobné mechanické příměsi, např. odpadní paliva. Problémem effervescent trysek je přítomnost nestabilit ve spreji, které přímo ovlivňují účinnost spalování a množství vzniklých exhalací. Oba tyto parametry jsou dnes pečlivě sledovány, a proto je snaha o minimalizaci nestabilit ve spreji přínosná z ekonomického i ekologického hlediska.

Vývoj effervescent trysek byl započat na konci 80. let minulého století a pokračuje doposud. Předpokladem dalšího vývoje byl rozvoj optických měřících metod, díky kterým je možné sledovat chování spreje detailně. V této práci bylo využito měření laserovým systémem P/DPA, který poskytuje informace o velikostním, rychlostním a časovém rozložení kapek ve spreji. Podle těchto dat byly částice rozděleny do mezičásticových časových tříd. Vyhodnocení míry nestabilit spreje probíhalo na základě porovnání experimentálního rozdělení částic do mezičásticových časových tříd s ideálním rozdělením, které je definované pro ideální (stabilní) sprej Poissonovým nehomogenním rozdělením. Výsledkem srovnání byl parametr  $\delta$ , který charakterizuje míru nestabilit spreje pro konkrétní trysku a provozní režim. Bylo předpokládáno, že míra nestabilit spreje je ovlivněna geometrií trysky. Na trysce bylo definováno 6 geometrických parametrů, které byly měněny, čímž vzniklo 17 konstrukčních variant trysky, které byly zkoumány.

Hlavním cílem diplomové práce bylo stanovení nestabilit spreje u trysek, které byly v laboratoři na zkušebním okruhu změřeny. V závěru práce jsem posoudil vliv jednotlivých geometrických parametrů na stabilitu spreje a vybral jsem trysky, které vytvářejí sprej s nejnižší mírou nestabilit. Podle těchto výsledků jsem také doporučil nejlepší kombinaci geometrických parametrů trysky. Vhodnost jejich kombinace je však nutné ověřit výrobou a novým zkušebním měřením. Pro zkoumanou trysku jsem vypracoval 3D model a z něj jsem vytvářel výkresy pro jednotlivé její části a konstrukční varianty.

# 1. Trysky

## 1.1. Princip atomizace

Atomizace je proces, při němž je objem kapaliny transformován do atmosféry v podobě drobných kapek, neboli spreje. Atomizace je důležitou součástí mnoha oblastí v průmyslu, zemědělství, meteorologii, medicíně, atd. Pro konkrétní aplikace bylo vyvinuto mnoho zařízení, která jsou označována jako atomizéry nebo trysky. Způsobů, kterými může být kapalina atomizována, je několik, ale některé principy jsou uplatněny téměř ve všech typech atomizérů. Základním předpokladem je většinou dostatečná relativní rychlosti kapek nebo proudu kapaliny vůči okolnímu prostředí. Pro urychlení kapaliny na potřebnou rychlost je nutné kapalině dodat energii. Ta může být dodána z tlakové energie samotné kapaliny, jež se ve výstupním otvoru přemění na kinetickou energii (tlaková tryska), nebo působením proudícího tlakového vzduchu (air-assist tryska). U dvofázových trysek je vedle tlakové energie kapaliny dalším zdrojem energie expanze plynu ve výstupním otvoru (effervescent tryska). Zcela samostatnou skupinou jsou trysky, u nichž je zdrojem atomizační energie mechanická energie dodávaná přes pohybující se část trysky (rotační nebo vibrační zařízení).

Pokud se zaměříme na nejjednodušší systém vzniku kapek, tj. přibližně statický vznik ve výstupním otvoru trysky, při kterém kapka vzniká pouze účinkem gravitace, dospějeme k závěru, že takto mohou vznikat pouze kapky větších rozměrů. Velikost kapky [1] v tomto případě závisí jen na průměru výstupního otvoru trysky a při známých vlastnostech kapaliny lze její velikost určit vztahem:

$$D = \left( \frac{6 \cdot d_0 \cdot \sigma}{\rho_L \cdot g} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

kde  $D$  je velikost kapky (m),  $d_0$  je průměr výstupního otvoru (m),  $\sigma$  je povrchové napětí (N/m),  $\rho$  je hustota kapaliny ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  je gravitační zrychlení ( $\text{m/s}^2$ ). V průmyslových aplikacích jsou vyžadovány kapky o rozměrech menších než  $300 \mu\text{m}$ , navíc v dostatečném množství, a proto má účinek gravitace zanedbatelný vliv na tvorbu kapek v tryskách.

Při generování spreje v tryskách je pro tvorbu kapek potřeba překonat scelující vliv povrchového napětí kapaliny, a to pomocí vnitřní nebo vnější síly. Bez působení takových sil má kapalina snahu držet se pohromadě ve tvaru s minimální plochou, a tedy minimální povrchovou energií nutnou pro její udržení. Takovým tvarem s minimální plochou při daném objemu je koule. Dalším faktorem ovlivňujícím tvorbu kapek je viskozita kapaliny, která má, stejně jako povrchové napětí, stabilizující vliv a brání jakýmkoliv změnám geometrie v objemu kapaliny. Čím větší je tedy viskozita, tím je náročnější přetransformovat kapalinu do malých kapek. Zpevňující vliv povrchového napětí a viskozity lze překonat působením aerodynamické síly, která může vyvolat rozpad kapaliny do malých kapek. Rozpad nastane, pokud velikost působících aerodynamických sil překoná stabilizující síly povrchového napětí a viskozity. Toho může být v tryskách dosaženo několika způsoby, a proto bylo vyvinuto několik typů trysek, přičemž každé řešení má určité výhody a je použitelné v konkrétní oblasti. [1]

Matematické řešení atomizace je složité, jelikož vyžaduje přesnou znalost rozložení aerodynamických tlaků na kapce. Je založeno na rovnováze tlaků [9] v každém bodě kapky podle vztahu:

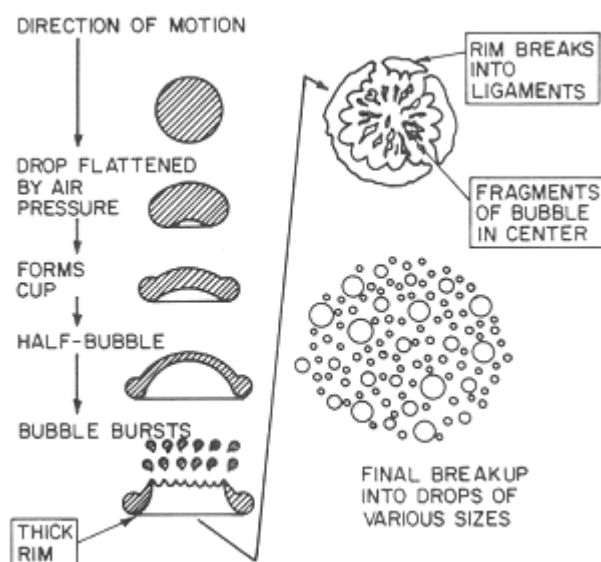
$$p_i = p_A + p_\sigma = konst, \quad (2)$$

kde  $p_i$  je tlak v bodě na povrchu kapky (Pa),  $p_A$  je tlak působící v daném bodě od aerodynamických sil (Pa),  $p_\sigma$  je tlak působící v daném bodě od povrchového napětí kapaliny (Pa), určené podle vzorce:

$$p_\sigma = \frac{4\sigma}{D}. \quad (3)$$

Ze vzorce vyplývá, že kapka bude stabilní, dokud změna tlaku  $p_A$  nevyvolá změnu tlaku  $p_\sigma$  a tím změnu velikosti povrchu kapky.

Na obr. 1 vidíme rozpad kapky při volném pádu urychleném pouze gravitační silou. V první fázi se kapka stává stále více plochou a uprostřed ní se začíná tvořit dutina, která se později zvětší tak, že je z kapky vytlačena ven. Rozpadem této vypouklé dutiny vzniknou malé kapky. Na okraji však v podobě tenkého prstence zůstává asi 70 % objemu původního kapky, která se rozpadají na mnohem větší kapky. Rozpad kapky zcela jiným způsobem nastává, pokud je náhle vystavena rychle proudícímu vzduchu. Proti předchozímu rozpadu při volném pádu dochází k deformaci kapky na opačnou stranu. Vypouklý povrch směřuje proti proudu vzduchu, okraje kapky jsou vzduchem taženy nejprve do tenké vrstvy, později do provazců, které se rozpadají na kapky. [1]



**Obr. 1: Rozpad padající kapky při interakci s okolním vzduchem [1]**

Výzkumem rozpadu kapek, proudů a provazců se zabývalo již mnoho prací, ve kterých bylo odvozeno mnoho vztahů popisujících jejich rozpad při různých podmínkách proudění. Shrnutí teoretických výsledků je v literatuře [1]. Pro konstrukci trysek však z uvedených výsledků nelze vyvodit jednoznačné závěry, pouze určitá doporučení. Na vznik proudů a provazců má totiž velký vliv proudění uvnitř trysky a ve výstupním otvoru, které se nedá matematicky přesně popsat.

## 1.2. Faktory ovlivňující atomizaci

Výsledné vlastnosti spreje jsou závislé na několika faktorech, zejména na geometrii trysky, dále pak na fyzikálních vlastnostech atomizované kapaliny a atomizačního plynu, který je

k atomizaci použit (nejčastěji vzduch). Vliv geometrie je hlavní náplní práce a bude blíže hodnocen v páté kapitole.

Z fyzikálních vlastností atomizované kapaliny je nejdůležitější hustota, viskozita a povrchové napětí. Teoreticky se podle Bernoulliho rovnice (4) hmotnostní průtok kapaliny mění s druhou odmocninou hustoty. V praxi je však obtížné měnit hustotu, a proto je potřeba brát tento teoretický vztah opatrně:

$$\frac{1}{2} \rho w^2 + h \rho g + p = konst, \quad (4)$$

kde  $w$  je rychlost (m/s),  $h$  je výška (m).

Povrchové napětí se u běžných kapalin pohybuje v rozsahu od 0,073 N/m pro vodu až po 0,021 N/m pro ropné produkty. Povrchové napětí je velmi závislé na teplotě, u většiny kapalin povrchové napětí klesá z rostoucí teplotou. Rozdíl mezi obsahem povrchu kapaliny před a po atomizaci můžeme použít jako hodnotící parametr. Před atomizací je povrch vyjádřen obsahem válce vystupujícího z výstupního otvoru trysky, po atomizaci je povrch vyjádřen jako suma povrchů všech drobných kapek, které atomizací vznikly. Povrchové napětí reprezentuje síly, které brání přeskupení kapaliny do nového, většího povrchu. Minimální energii potřebnou pro atomizaci lze vypočítat vynásobením povrchového napětí přírůstkem plochy povrchu kapaliny. Popsat vliv povrchového napětí na atomizaci [1] lze Weberovým číslem (5), které vyjadřuje poměr setrvačných sil k povrchovému napětí. Podle Weberova čísla lze v matematických vztazích určovat, kdy nastane rozpad tekutiny. Weberovo číslo je bezrozměrná veličina určená vztahem:

$$We = \frac{\rho \cdot w^2 \cdot l}{\sigma}, \quad (5)$$

kde  $w$  je rychlost (m/s),  $l$  je charakteristický rozměr, což je u kapek průměr (m),  $\rho$  je hustota tekutiny ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\sigma$  je povrchové napětí (N/m).

Hustota a povrchové napětí ovlivňují hlavně velikostní rozdělení kapek ve spreji. Viskozita navíc ovlivňuje průtok výstupním otvorem a výsledný tvar spreje. S rostoucí viskozitou klesá Reynoldsovo číslo, což brzdí vznik přirozených nestabilit v proudění kapaliny, které jsou potřebné pro rozpad proudu do kapek. Výsledkem je tedy zpoždění rozpadu kapaliny do kapek a zvýšení velikosti vzniklých kapek. Viskozita má nejprve příznivý vliv na proudění kapaliny ve výstupním otvoru, protože na jeho stěně vytvoří tenký film, a tím omezí vliv tření. Při dalším zvyšování viskozity však již dochází k opačnému efektu a průtok kapaliny klesá. Při velmi vysoké viskozitě se může typický kuželový sprej změnit v přímý proud tekutiny v podobě dlouhých vazů a velkých kapek. Velké zvýšení viskozity tedy vždy nepříznivě ovlivní atomizaci, protože část energie musí pokrýt viskózní ztráty a na vlastní atomizaci zbude méně energie. Dynamická viskozita se pohybuje v rozsahu od  $0,001 \text{ N/m}\cdot\text{s}^2$  pro vodu, až do  $0,5 \text{ N/m}\cdot\text{s}^2$  pro těžké oleje. Viskozita se u většiny kapalin s rostoucí teplotou snižuje, a proto se obvykle těžká paliva před spalováním zahřívají. To přináší hned dvě výhody - jednak se tím zlepší atomizace a navíc částečně klesne energie potřebná k čerpání paliva. [1]

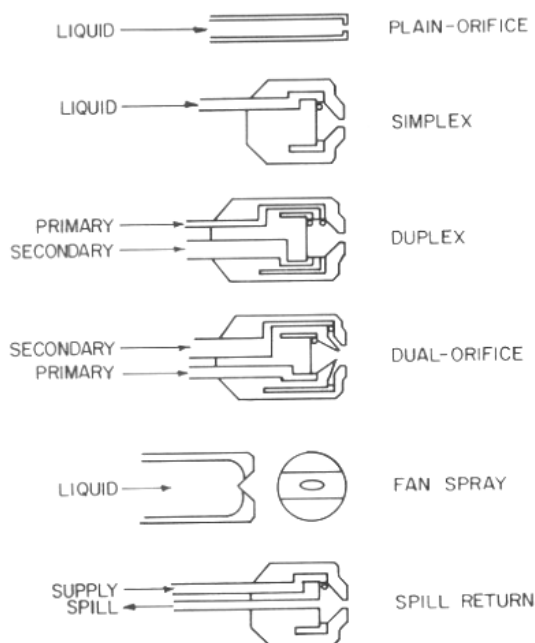
Plyn, který je v okolí trysky, může dosahovat velmi různých hodnot tlaku a teploty, což se projeví hlavně změnou hustoty plynu obklopujícího trysku. S tímto jevem se setkáme hlavně u spalovacích systémů. Vliv parametrů okolního plynu je při skutečném provozu důležitý, ale tato práce se jim zabývat nebude, a proto nebude dále popisován.

### 1.3. Nejběžnější druhy rozprašovacích trysek

Spreje mohou být generovány několika různými způsoby, ale některé základní procesy jsou společné pro všechny metody. V trysce dojde nejprve k vytvoření proudu tekutiny, provázeném malými poruchami. Po opuštění trysky tyto drobné poruchy nakonec vedou k rozpadu proudu kapaliny do provazců. Provazce kapaliny se následně rozpadají do kapek, přičemž velké kapky se mohou ještě dále rozpadat na menší kapky. Rozdělení trysek do následujících skupin a jejich popis byl převzat z literatury. [1]

#### 1.3.1. Tlakové trysky

Tlaková tryska je v základním provedení konstrukčně i provozně nejjednodušší a její použití je velmi časté. Kapalina proudí skrz malý otvor pod vysokým tlakem. Tlaková energie je ve výstupním otvoru přeměněna na kinetickou energii, tedy rychlost. Pro ilustraci, vstříkáním lehkého topného oleje pod tlakem 100 kPa dosáhneme při zanedbání tlakových ztrát (4) rychlost na výstupu 15,1 m/s. Pro dosažení kvalitnějšího spreje ve větším rozsahu průtoků bylo vyvinuto několik typů tlakových trysek a jejich souhrn je na obr. 2. Popis k jednotlivým typům je uveden níže.



Obr. 2: Tlakové trysky [1]

#### Tryska s jednoduchým otvorem (Plain-orifice)

Jedná se pouze o jednoduchý kruhový otvor, přes který proudí kapalina do okolního vzduchu jako jeden kruhový svazek. Nejlepší atomizace je dosaženo při malých průměrech výstupního otvoru. V praxi však nelze předpokládat dokonale čistou kapalinu bez pevných příměsí a proto bývá nejmenší použitelný průměr omezen na hodnotu okolo 0,3 mm [1]. Průtok média (6) závisí na tlakovém spádu trysky, průměru výstupního otvoru a výtokovém součiniteli  $C_D$ . Kde  $C_D$  je průtokový součinitel, který určuje skutečný průtok kapaliny vůči teoretickému průtoku beze ztrát. Je závislý na několika faktorech: tlakovém spádu, Reynoldsově čísle, poměru délky a průměru výtokového otvoru, zkosení před výtokovým otvorem.

$$m_L = C_D \cdot A_o \cdot (2 \cdot \rho_L \cdot \Delta p_L)^{0,5}, \quad (6)$$

kde  $A_O$  je průřez výstupního otvoru ( $m^2$ ),  $\Delta p_L$  je tlakový spád na trysce (Pa).

Při udávání středního průměru kapek [4] se v oblasti spalování uvažuje nejčastěji hodnota *SMD*, která se nazývá Sauterův střední průměr (Sauter mean diameter). Tato hodnota udává poměr objemu kapaliny k jejímu povrchu. Nahrazuje nehomogenní velikostní rozdělení kapek ve spreji stejný počtem kapek o středním průměru (*SMD*) tak, aby byl zachován celkový objem kapek. Obecný zápis *SMD* je pak následující:

$$SMD = \frac{\sum N_i \cdot D_i^3}{\sum N_i \cdot D_i^2} \quad (7)$$

Pro jednoduchou tlakovou trysku s hladkým otvorem je střední velikost kapek dána následujícím vztahem (8), definovaný dvojicí Merrington a Richardson's [10]:

$$SMD = \frac{500 \cdot d_0^{1,2} \cdot v_L^{0,2}}{w_L} \quad (8)$$

Jinou definici *SMD*, vycházející z tlakové difference, odvodil Elkotb [11] v následujícím tvaru (9):

$$SMD = 3,08 \cdot v_L^{0,385} \cdot (\sigma \cdot \rho_L)^{0,737} \cdot \rho_A^{0,06} \cdot \Delta p_L^{-0,54} \quad (9)$$

### **Tlaková-vířivá tryska (simplex)**

Kruhovému výstupnímu otvoru, který může být stejný jako v předchozím případě, předchází vířivá komora. V této komoře je kapalina vedena několika tangenciálními drážkami, tak aby po opuštění trysky vytvářela kužel vyplněný plynem, který se i dále od výstupního otvoru stále rozšiřuje. Výsledný sprej je tedy ve tvaru kónického kužele, který může mít úhel od 30° až po téměř 180°. Nejlepší atomizace je dosaženo při vysokém tlaku a širokém úhlu spreje.

### **Tryska duplex**

Konstrukce se podobá typu simplex, navíc jsou ve vířivé komoře dva různé typy tangenciálních drážek, primární a sekundární, přičemž primární drážky mají menší průřez než sekundární. Oba typy drážek jsou napojeny na přívod kapaliny samostatně, při nízkém průtoku kapaliny jsou v provozu pouze primární drážky, při zvýšení průtoku je otevřen ventil k sekundárním drážkám. Díky tomu může tryska pracovat v širokém rozsahu průtoků bez nutnosti nadměrného zvyšování tlaku kapaliny.

### **Tryska s dvojitým otvorem (Dual-orifice)**

Podobná konstrukce jako u trysky duplex, navíc je pouze přidána druhá vířivá komora, která je osově umístěna v první komoře. Při nízkém průtoku kapalina proudí pouze vnitřní komorou, při zvětšeném průtoku je otevřen ventil a kapalina proudí i vnější komorou. Obě komory mohou být navrženy pro jiný výstupní úhel spreje.

### **Tryska se zpětným návratem (Spill return)**

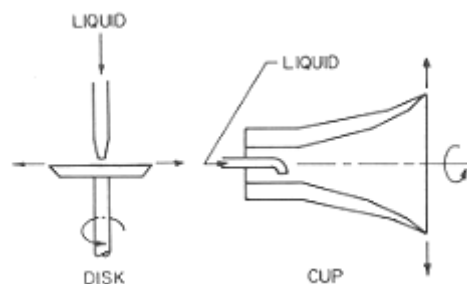
Obdoba trysky simplex, navíc je zde odvod kapaliny z vířivé komory zpět do systému. Tryska tedy může stále pracovat při vysokém tlaku, který je u tlakových trysek potřebný pro dobrou atomizaci. Výsledný průtok kapaliny z trysky je regulován ventilem na zpětném potrubí. Tryska vytváří sprej ve tvaru dutého kužele, jehož úhel se zvětšuje při snižování průtoku.

### Vějířový sprej (Fan spray)

Všechny předchozí trysky produkují sprej kuželovitého tvaru. Pro některé aplikace je vyžadován sprej jiného tvaru, např. plochý ve tvaru vějíře. Vyrobit sprej takového tvaru je možné několika způsoby. Jedním ze způsobů je vytvoření výstupního otvoru ve tvaru V drážky umístěné v dutině polokoule, kterou je tryska uzavřena. Výsledný sprej je přibližně elipsovitého tvaru. Další metodou je využití plochého kruhového otvoru, před kterým kapalina proudí přes zakřivené vychylovací desky. Zcela odlišnou metodou pro dosažení plochého spreje je kolize dvou klasických kuželovitých proudů. Pokud jsou proudy uspořádány tak, aby se po opuštění výstupního otvoru srazily, vznikne plochý proud kolmý na společnou výstupní rovinu obou proudů. Kvalita spreje není příliš vysoká, lze ji zvýšit pouze vysokými výstupními rychlostmi. U tohoto provedení je velmi důležité správné nasměrování obou proudů. Hlavní výhodou této metody je, že jsou kapaliny smíchány až při kolizi mimo trysku, což umožňuje směšování a atomizaci jinak nemísitelných kapalin.

### 1.3.2. Rotační trysky

Nejčastěji se rotační atomizéry skládají z rychle rotujícího kotouče, do jehož středu je přiváděna kapalina (obr. 3). Kapalina pak odstředivou silou proudí přes kotouč, až k jeho okraji, který opouští s vysokou rychlostí. Rotační kotouče mohou být hladké nebo pokryté drážkami pro vedení tekutiny, na okrajích mohou být zoubkovány. Kotouče je také možné nahradit rotujícími válci, které se směrem k výstupnímu otvoru rozšiřují (obr. 3). Pro tvarování spreje a podporu odvodu tekutiny z okraje může být použit vzduch proudící okolo válce. Výhodou rotačních atomizérů je, že umožňují nezávislou změnu otáček kotouče a průtoku kapaliny, čímž je možné měnit velikost spreje bez ohledu na průtok kapaliny.



Obr. 3: Rotační trysky [1]

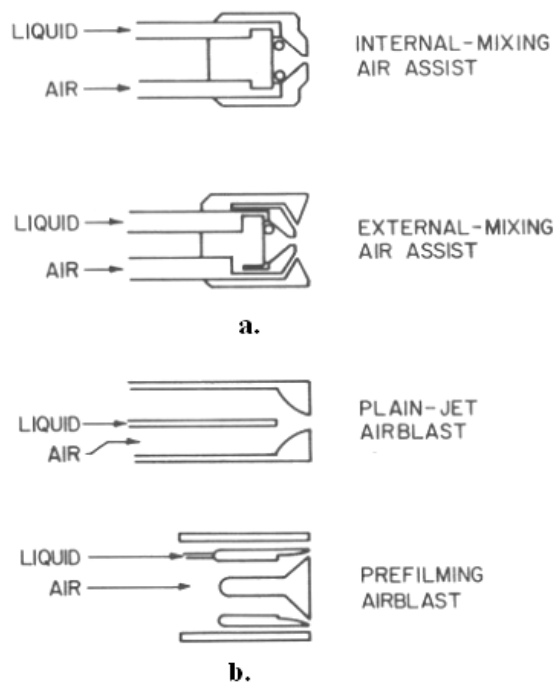
### 1.3.3. Trysky s přispěním vzduchu (air-assist)

V tryskách tohoto provedení (obr. 4a) je kapalina vystavena vzduchu nebo páře proudící vysokou rychlostí (obvykle až rychlostí zvuku). Ke směšování může docházet uvnitř trysky nebo mimo trysku. Obě varianty jsou energeticky poměrně neefektivní, varianta s vnějším směšováním ještě o něco více. Vnější směšování však umožňuje překonat problémy spojené se zpětným prouděním, které mohou v případě nevhodných tlaků nastat při vnitřním směšováním. Hlavní výhodou těchto trysek je, že umožňují atomizaci vysoce viskózních kapalin.

### 1.3.4. Airblast trysky

Trysky Airblast (obr. 4b) pracují podobným způsobem jako předchozí typ, hlavní rozdíl je v rychlosti a množství přimíchaného vzduchu. Do předchozího typu je dodáváno malé množství vzduchu s velmi vysokou rychlostí. V tomto provedení je množství přiváděného vzduchu mnohem větší, ale přiváděcí rychlost je nižší, obvykle menší než 100 m/s. Takové trysky jsou ideální pro použití při spalovacích aplikacích, třeba u plynové turbíny, kde vzduch

o těchto parametrech můžeme získat poměrně snadno. Vzduch může být s kapalinou směřován dvěma způsoby. Při běžném provedení se nejprve kapalina v trysce formuje do podoby tenkého kuželového listu, který je následně roztrhán proudem vysokorychlostního vzduchu, působícího z obou stran kužele. Druhým způsobem směřování je pouhé vstříknutí kapaliny do proudu vzduchu. Toto provedení je konstrukčně jednodušší, ale kvalita atomizace je horší.



Obr. 4: Trysky typu air-assist a airblast [1]

### 1.3.5. Další typy trysek

Pro specifické použití byly vyvinuty ještě další typy atomizérů. Následující výběr ukazuje, jak rozmanité může být využití trysek a v kolika různých podobách se můžou využívat.

#### Elektrostatická tryska

Na tenký proud nebo film kapaliny působí intenzivní elektrický tlak, který nutí kapalinu expandovat do větší plochy. Elektrostatické tryšky lze použít pouze pro malé průtoky kapaliny, proto je jejich využití omezeno, např. na malování nebo bezdotykový tisk.

#### Ultrazvuková tryska

Atomizovaná kapalina proudí přes stupňovitý trn, který vibrací na ultrazvukové frekvenci vydává krátké vlnové délky nezbytné pro dobrou atomizaci. Tento princip je vhodný pro aplikace, u nichž je vyžadována velmi dobrá kvalita spreje a nízká rychlost proudění. To je důležité např. v lékařství pro inhalační terapie, vyžadující velmi kvalitní sprej bez přítomnosti atomizačního plynu.

#### Zvuková tryska

Uvnitř zařízení je plyn urychlen a rychlostí zvuku naráží na desku nebo kruhovou dutinu. Vznikají zvukové vlny, které jsou odrazeny proti přicházející kapalině. Frekvence vln okolo 20 kHz umožňuje rozpad kapaliny na malé kapky. Celý proces je ovšem doprovázen

nepříjemnými zvukovými efekty. Existuje snaha navrhnout trysku tak, aby pracovala nad hranicí pro člověka slyšitelných frekvencí.

### **Větrný mlýn (Windmill)**

Při letecké aplikaci postřiků jsou kvůli správnému dávkování vyžadovány kapky v úzkém velikostním rozsahu, čehož je možno dosáhnout klasickým rotačním atomizérem, ale pouze při nízké rychlosti okolního proudění. Pokud disk na okraji radiálně nařizneme a špičky segmentů zkroutíme, vytvoříme trysku nazvanou větrný mlýn, která po vložení do proudícího vzduchu začne rychle rotovat. Je proto vhodná pro využití při letecké aplikaci postřiků.

## **1.4. Využití trysek**

Trysky nacházejí využití v mnoha oblastech. Každá oblast má pak své specifické požadavky, a proto bylo vyvinuto mnoho typů trysek, přičemž většinou se každý typ hodí jen pro své specifické určení.

Trysky nacházejí využití v oblasti spalování, v kotlích pro spalování oleje, v dieselových motorech s přímým vstřikem, v plynových turbínách, v raketových motorech s přímým vstřikem apod. Další oblasti využití nacházíme v procesech nanášení nátěrů, vysoušení a odpařování látek, chlazení, zvlhčování nebo čištění, pro rozstřík hnojiv a chemických postřiků v zemědělství. Velmi specifické je využití trysek např. v lékařství v inhalačních přístrojích.

I na dalších podobných příkladech je možno demonstrovat rozmanitost využití trysek a principů, podle kterých fungují. Trysky typu effervescent, které jsou hlavním tématem této práce, se využívají zejména ve spalovacích procesech, např. v kotlích na olej a jiná tekutá paliva. Jejich velkou výhodou je poměrně velký výstupní otvor, což umožňuje spalovat i kapaliny obsahující drobné mechanické příměse.

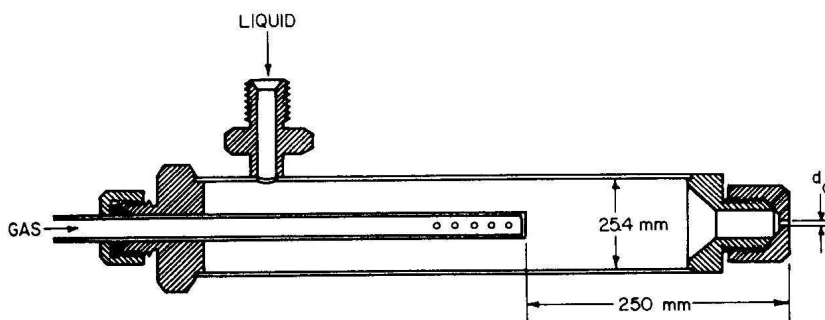
## **2. Popis effervescent trysek**

### **2.1. Úvod k effervescent tryškám**

#### **2.1.1. Princip effervescent trysek**

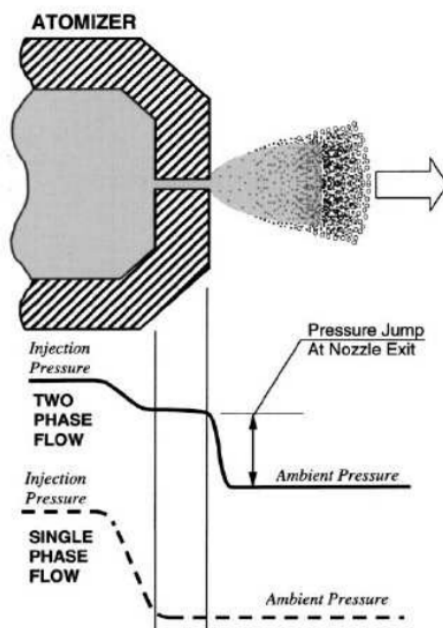
Effervescent trysky vyvinul na konci 80. let 20. století profesor Henri Lefebvre (1923 až 2003) a jeho tým působící na Purdue University v USA [2]. Ale již před ním se tryskami pracujícími na podobném principu zabývaly jiné studie. Při překladu do češtiny lze hovořit o tzv. šumivých, nebo perlivých tryškách. Český název je odvozen od režimu dvoufázového toku uvnitř trysky, ale zatím se využívá výhradně anglického názvosloví. Effervescent trysky lze charakterizovat jako dvoufázové s vnitřním směřováním. Od ostatních trysek, které do této kategorie také spadají, se však podstatně liší zejména způsobem směřování plynu s kapalinou a jejím přínosem pro atomizaci. V ostatních dvoufázových tryškách slouží plyn ke zlepšení atomizace, nebo je dokonce základní hnací silou pro atomizaci. U trysek airblast kapalina nejdříve vytvoří proud, který je až následně vystaven působení plynu proudícího vysokou rychlostí. V jiných provedeních je plyn do kapaliny přiveden ještě před výstupním otvorem a pro podpoření atomizace je snaha o jeho rozpuštění v kapalině. Pokud se plyn v kapalině rozpustí, atomizace se zlepší. U trysek využívajících tento způsob se však vyskytuje problém s pomalým růstem bublin, a proto je použití v praxi značně problematické. Effervescent trysky pracují na zmíněném principu, kdy je vzduch do kapaliny přiveden v určitém místě před výtokovým otvorem. Problém s pomalým růstem

bublin u nich nenastává, pro dobrou atomizaci totiž není potřeba vzduch v kapalině rozpustit, ale postačí, pokud je vytvořena dvoufázová směs.[1]



Obr. 5: Schematický náčrt nejjednoduššího provedení effervescent trysky [1]

Effervescent tryska v nejjednodušším provedení (obr. 5) vychází z tlakové trysky s jednoduchým výstupním otvorem, do níž je navíc vložena další trubice, kterou je do kapaliny v určitém místě přiveden plyn. Způsob, jakým se plyn dostává do kapaliny a mísí se s ní, je pro vlastnosti výsledného spreje velmi důležitý. Právě vlivem geometrie směřovací komory na stabilitu spreje se zabývá tato práce. Effervescent trysky pracují podle zcela jiných principů než podobné dvoufázové trysky, které používají plyn k podpoře atomizace. U effervescent trysek není snahou rozpustit plyn v kapalině. Plyn také neslouží jako zdroj kinetické energie, protože je do proudící kapaliny vstříkován při nízkém tlaku. Rozdíl mezi tlakem plynu a kapalinou je v absolutní hodnotě velmi malý. Větší tlak plynu slouží pouze pro překonání odporu pro vstup do kapaliny. Vstříknutý plyn se v trysce formuje do bublin a ve výstupním otvoru vytváří dvoufázovou směs. [1]

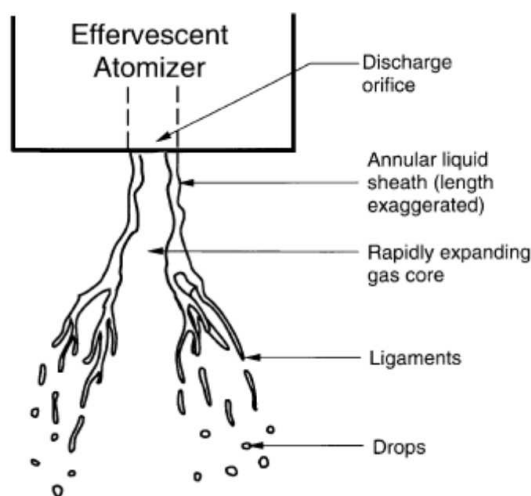


Obr. 6: Průběh tlaku ve výstupním otvoru trysky [12]

Mechanismus atomizace je velmi složitý a detailně ještě nebyl popsán. Předpokládá se však, že ve výstupním otvoru vzduchové bubliny vytlačují kapalinu do tenkých proudů a vazů. Tloušťka těchto elementů je důležitá pro tvorbu drobných kapek, protože je u tlakových trysek velikost kapek úměrná druhé odmocnině z počátečního průměru proudu. U effervescent trysky očekáváme, platí podobné zákonitosti, a proto čím více bublin proudí skrz výstupní otvor, tím je kapalina rozdělena na větší počet malých svazků, které se následně

rozpadají na kapky. Hlavní hnací silou rozpadu kapaliny je tedy expanze vzduchu za výtokovým otvorem, kde nastává velký tlakový skok (obr. 6). K velkému tlakovému skoku dochází v důsledku přítomnosti dobře stlačitelného vzduchu, na rozdíl od jednofázové směsi, až mimo trysku, kde má plyn možnost expandovat na okolní tlak. Tato expanze způsobí postupný rozpad kapaliny až na samotné drobné kapky. Atomizační plyn má tedy dvě hlavní funkce, dělí kapalinu na malé oblasti ve výtokovém otvoru a pak následně roztrhá při své expanzi na okolní prostředí. [4]

Na obr. 7 jsou znázorněny jednotlivé fáze rozpadu tekutiny po opuštění výtokového otvoru. Proces atomizace lze rozdělit na dvě části, primární a sekundární atomizaci. Primární atomizace nastává v bezprostřední blízkosti výtokového otvoru, kde expanze plynu formovaného v protáhlých bublinách rozdělí kapalinu do provazců (ligaments). Sekundární atomizace nastává ve větší vzdálenosti, kde způsobí rozpad provazců na drobné kapky. Podíl těchto fází atomizace určuje výslednou kvalitu spreje. Větší podíl primární atomizace znamená hrubý sprej, větší podíl sekundární atomizace znamená jemnější sprej. [4]



Obr. 7: Atomizace na effervescent trysce [13]

### 2.1.2. Typy effervescent trysek

Effervescent atomizéry s jedním jednoduchým výstupním otvorem lze dále dělit podle vnitřní konstrukce trysky na tři základní typy. Rozdíl mezi nimi je ve způsobu přívodu a směšování kapaliny s plynem. Jednoduchý náčrt všech třech typů znázorňuje obr. 8, jejich vlastností jsou popsány v následujících odstavcích. [8]

#### Typ A

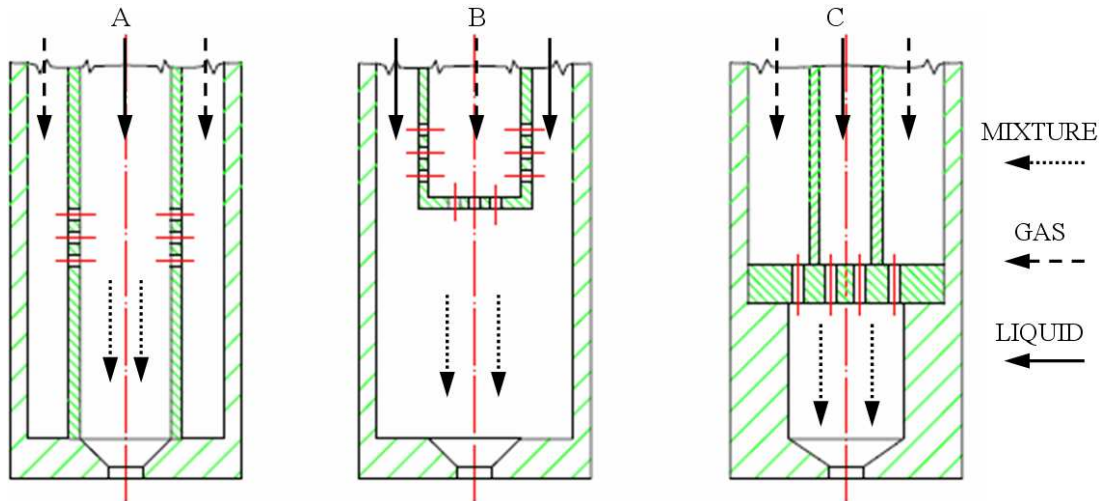
Při této konstrukci kapalina proudí vnitřní trubicí a plyn se do ní dostává z vnější komory přes malé otvory ve stěně vnitřní trubky. Toto je pravděpodobně nejčastější provedení effervescent trysek. Výhodou je, že je vhodné pro užití při velkém rozsahu průtoků kapaliny, přímý tok kapaliny zabraňuje jejímu ucpávání a tak je možné s ní atomizovat i kašovitě suspenze kapaliny. Typ lze nazvat jako tryska s „outside-in“ směšováním plynu. Možnost záměny připojení kapaliny a plynu byla zkoumána v práci Chin a Lefebvre (1995).

#### Typ B

V tomto uspořádání kapalina proudí prstencovým prostorem vytvořeným mezi vnitřní aerační trubicí a vnějším tělesem trysky. Plyn se do kapaliny dostává soustavou malých otvorů ve stěně a dnu aerační trubky. Opačné připojení kapaliny a plynu zatím nebylo zkoumáno.

## Typ C

Oba proudy vstupují jednotlivými otvory odděleně do směšovací komory, kde se smísí. Při této konfiguraci trysky je možné nezávisle kontrolovat vstupní rychlost a směr kapaliny i plynu. Pokud kapalina vstupuje do směšovací komory středovým otvorem vysokou rychlostí, dá se tato tryska zařadit do kategorie airblast trysek.



Obr. 8: Typy effervescent trysky podle proudění uvnitř [8]

Tryska zkoumaná v této práci patří do typu A, označovaném jako tryska s „outside-in“ směšováním plynu. Její uspořádání se jeví jako nejvýhodnější pro atomizaci lehkého topného oleje, případně odpadních paliv, které mohou obsahovat i drobné mechanické příměsi.

### 2.1.1. Výhody effervescent trysek

Hlavní výhodou effervescent trysek je dobrá atomizace i při nízkých tlacích a malém množství atomizačního plynu. Pro generování kvalitního spreje je důležité zajistit oddělený přívod atomizačního plynu (většinou vzduch nebo pára), při přesně dané tlakové diferencii mezi plynem a kapalinou. Rozdíl mezi tlakem vzduchu a kapaliny je jen několik stovek Pascalů a slouží k překonání odporu plynu při proudění do kapaliny. I malá změna v tlakové diferencii mezi vzduchem a palivem, v porovnání s absolutním tlakem, může způsobit problémy s regulací a stabilitou.

Další výhodou je velký průměr výstupního otvoru trysky, čímž se minimalizuje riziko jeho ucpání, vedoucího k nutnosti přerušit provoz kvůli rozebrání a pročištění trysky. Minimalizace možnosti ucpávání je důležitá zejména u spalování zbytkových a odpadních paliv. Jednoduchá konstrukce trysky bez pohyblivých částí a s velkým průřezem výstupního otvoru umožňuje vysokou spolehlivost při provozu, snadnou údržbu a nízké pořizovací náklady. Využití trysek tohoto typu v aplikacích spalování je obzvláště výhodné, protože atomizační vzduch pomáhá k lepšímu provzdušnění spalovací komory a tím umožňuje lepší prohořívání paliva, zvýšení účinnosti spalování a snížení množství exhalací.

### 2.1.2. Provozní podmínky effervescent trysek

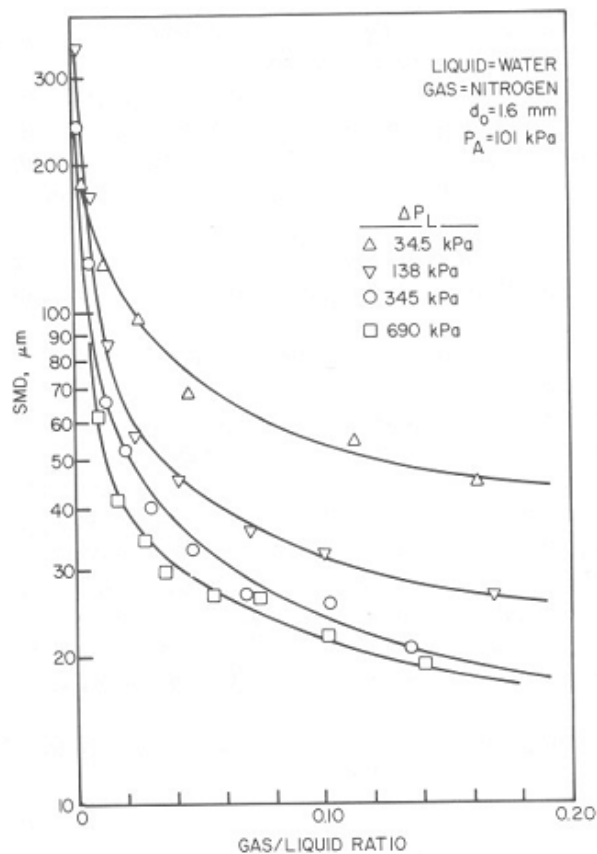
Provozní podmínky effervescent trysky se dají popsat dvěma nezávislými parametry, kterými může být průtok, tlak nebo poměr průtoků obou fází. V tomto výzkumu byl prvním parametrem hmotnostní poměr průtoků plynu ke kapalině označovaný zkratkou GLR, což je zkratka z anglických slov Gas to Liquid Ratio. GLR vyjadřuje poměr hmotnostního průtoků plynu k hmotnostnímu průtoků kapaliny [5]. Vztah pro jeho určení je následující:

$$GLR = \frac{\dot{M}_g}{\dot{M}_l} = \frac{\dot{V}_g \cdot \rho_g}{\dot{V}_l \cdot \rho_l}, \quad (10)$$

kde  $g$  je index pro plyn,  $l$  je index pro kapalinu,  $M$  je hmotnostní průtok (kg/s),  $V$  je objemový průtok (m<sup>3</sup>/s),  $\rho$  je hustota (kg/m<sup>3</sup>),  $GLR$  je bezrozměrný parametr.

Druhým parametrem byl tlak kapaliny na vstupu do trysky. Od tohoto tlaku je podle nastavené tlakové diference určen i tlak plynu. Zmíněné dva parametry jsou dostačující pro úplný popis provozních podmínek na zkušební trati, kde má okolní prostředí přibližně stálý tlak a teplotu. Zápis těchto dvou parametrů lze ve zjednodušené podobě, např. pro režim s tlakem kapaliny 0,1 MPa (1 bar) a hodnotou  $GLR$  2 % napsat jako: 1b-2pct.

Obecně lze říci, že s růstem obou provozních parametrů se zvyšuje kvalita spreje. Ve spalovacích i jiných aplikacích je snaha o dosažení kapek co nejmenšího průměru. Na obr. 9 je sledována střední velikost kapek  $SMD$  při atomizaci vody, v závislosti na vstupním tlaku kapaliny a parametru  $GLR$ . Střední velikost kapek  $SMD$  byla definována již dříve vztahem (7). S růstem tlaku kapaliny se zmenšuje velikost kapek, přičemž při nejnižších tlacích způsobí i malé zvýšení tlaku poměrně velké zmenšení kapek. Podobně se projevuje i zvýšení parametru  $GLR$ , nejdříve s jeho růstem velikost kapek klesá velmi rychle. Přibližně od 5 % výše se velikost kapek snižuje pozvolněji, ale plynule až do hodnot okolo 20 %. [1]



**Obr. 9: Vliv provozního režimu na velikost kapek [1]**

Množství atomizačního plynu (11) je závislé na hustotě plynu, výtokové rychlosti a poměrné části výtokového otvoru, který v něm plyn zaujímá. [1]

$$m_G = \rho_G \cdot A_G \cdot w_G, \quad (11)$$

kde  $\rho_G$  je hustota plynu ( $\text{kg/m}^3$ );  $S_G$  je plocha, kterou plyn zaujímá ve výstupním otvoru trysky ( $\text{m}^2$ );  $w_G$  je průměrná rychlost plynu ve výstupním otvoru ( $\text{m/s}$ );  $m_G$  je hmotnostní průtok plynu ( $\text{kg/s}$ ).

Podle tohoto vztahu, při konstantním hmotnostním průtoku plynu, vede snížení hustoty  $\rho_G$  ke zvětšení plochy plynu  $S_G$  ve výstupním otvoru nebo ke zvýšení výstupní rychlosti  $w_G$ , případně dojde ke zvýšení obou těchto parametrů současně. Zvýšení příčného průřezu plynu ve výstupním otvoru vede ke zmenšení prostoru pro proudící kapalinu a díky tomu je kapalina vytlačena do mnoha tenkých vazů, což je výhodné pro dobrou atomizaci. Zvýšení výstupní rychlosti kapaliny je rovněž výhodné, protože vyšší relativní rychlost mezi kapalinou a okolním prostředím vede k podpoře atomizace. [1]

Hmotnostní průtok kapaliny lze spočítat podle stejného vztahu (6) jako u jednoduché tlakové trysky, rozdíl je v určení výtokového součinitele  $C_D$  vztahem [4]:

$$C_D = c \cdot (1 - \beta)^{0,3} \cdot \left(1 + \frac{1}{GLR}\right)^{0,15}, \quad (12)$$

kde  $c$  je koeficient zahrnující vliv atomizovaného média a geometrii trysky [-], koeficient  $\beta$ , určený vztahem (13), je nazýván poměr fází a je určen poměrem objemového toku vzduchu  $V_G$  k celkovému objemovému toku tryskou  $V_{Celk}$ .

$$\beta = \frac{V_G}{V_{Celk}}. \quad (13)$$

Pro střední velikost průměru kapek u effervescent trysek Buckner a Sojka odvodili vztah:

$$SMD = \frac{12 \cdot \sigma_L}{\rho_L \cdot \left[ w_L^2 + \varepsilon \cdot GLR \cdot w_G^2 - \frac{(w_L + \varepsilon \cdot GLR \cdot w_G)^2}{1 + \varepsilon \cdot GLR} \right]}, \quad (14)$$

kde  $w$  je výstupní rychlost jednotlivých složek s indexem  $L$  pro tekutinu a indexem  $G$  pro plyn ( $\text{m/s}$ ),  $\sigma$  je povrchové napětí kapaliny ( $\text{N/m}$ ),  $\rho_L$  je hustota kapaliny ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\varepsilon$  určuje část atomizačního plynu (-), který svoji kinetickou energii předá kapalině. Koeficient  $\varepsilon$  je určen vztahem (15), ve kterém jsou exponenty  $A$  a  $B$  stanoveny experimentálně:

$$\varepsilon = 10^A \cdot GLR^B. \quad (15)$$

Při porovnávání jednotlivých trysek může být užitečné definovat účinnost atomizace [4]. Ta je stanovena na základě transformace tlakové energie na energii povrchového napětí kapaliny. Takto definovaný vztah je platný pro všechny trysky, kde je hlavní hnací silou atomizace tlaková energie jednotlivých fází. Platí tedy pro effervescent trysky a v limitním případě, při nulovém podílu plynné fáze, i pro tlakové trysky. Vstupní energie do atomizačního procesu je složena ze dvou částí, první částí je energie od stlačeného plynu  $E_G$ , která je pro zjednodušení definována potřebnou technickou prací pro ideálního izotermickou kompresi plynu z tlaku okolního prostředí na atomizační tlak. Druhou částí je energie  $E_L$  od stlačené kapaliny, která je definována technickou prací potřebnou pro ideální izochorickou kompresi. Výstupní energie je reprezentována pouze zvýšením plochy kapaliny a tedy povrchové energie kapaliny. Plocha je definována rozpadem kapaliny na kapky o středním poloměru  $IR_{20}$ . Následující vztah (16) pro výpočet účinnosti atomizace je definovaný podle výše zmíněných předpokladů:

$$\eta = \frac{3 \cdot V_i \cdot \sigma / IR_{20}}{E_G + E_L} = \frac{3 \cdot \sigma / IR_{20}}{p_L + GLR \cdot \frac{\rho_L}{\rho_G} \cdot (p_G + p_B) \cdot \ln\left(\frac{p_G + p_B}{p_B}\right)}, \quad (16)$$

kde  $p$  je tlak (Pa) s indexem  $G$  pro plyn,  $L$  pro kapalinu,  $B$  pro okolní prostředí.

Předchozí vztah lze použít i pro tlakové trysky, u kterých je  $GLR$  nulové, a proto se předchozí vztah výrazně zjednoduší na následující tvar (17), kde je účinnost atomizace nepřímo úměrná tlaku kapaliny a přímo úměrná velikosti vzniklých částic:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma / IR_{20}}{p_L}. \quad (17)$$

Ve vzorci pro stanovení účinnosti nefiguruje absolutní objemový průtok, pouze poměry průtoku, případně v limitním případě pro nulové  $GLR$  pouze tlak, a proto by se pro přesné srovnání účinnosti měly porovnávat režimy se stejným objemovým průtokem. Efektivita atomizačního procesu je celkově velice nízká, účinnost atomizace dosahuje hodnot maximálně okolo 0,1 %. Přesto, v porovnání s jinými dvoufázovými tryskami, vychází effervescent trysky z energetického hlediska jako neúčinnější. [4]

## 2.2. Experimentální tryska

### 2.2.1. Popis konstrukce

Měření a výpočty byly provedeny na trysce s jedním válcovým výstupním otvorem. Atomizovanou kapalinou byl lehký topný olej (LTO), atomizačním plynem byl vzduch. Fyzikální vlastnosti obou použitých médií jsou v tab. 1, navíc je přidána voda, která se v některých experimentech používá jako atomizovaná kapalina. Vnitřní uspořádání trysky, v závislosti na směšování plynu s kapalinou, je typu „outside-in“. Vzduch tedy z vnější komory proniká přes aerační otvory do kapaliny, proudící uvnitř aerační trubice.

Tab.1: Vlastnosti vzduchu, lehkého topného oleje (LTO) a vody při teplotě 20°C

Látka	Vzduch	LTO	Voda
Dynamická viskozita (N.s/m <sup>2</sup> )	-	0,0185	0,001
Povrchové napětí (N/m)	-	0,0297	0,0727
Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	1,23	874	1000
Index lomu (-)	1	1,488	1,333

Experimentální tryska je složena ze čtyř hlavních částí. Největší část je vlastní kruhové tělo trysky (Výkres 02), na které jsou připojeny další tři díly trysky, včetně přívodních hadic pro jednotlivá média. Do těla trysky je vložena aerační trubice (Výkres 03) a na ni pak navazuje výstupní otvor (Výkres 04). Aerační trubice a výstupní otvor jsou k tělu trysky zafixovány pomocí převlečené matice (Výkres 05). Mezi aerační trubicí, tělem trysky a výstupním otvorem jsou tři těsnící kroužky, které brání úniku oleje a vzduchu mimo požadovaná místa. Vstup lehkého topného oleje je osový do zadní strany těla trysky, kde je přes závit připojena hadice s přívodem oleje. Vzduch vstupuje do těla trysky z boku, rovněž hadicí připojenou přes závit. Celá tryska je přes přídržovací matici (Výkres 06) našroubovanou na vnějším závitě na těle trysky připevněna ke konstrukci zkušebního okruhu.

Výše uvedené výkresy i výkres celé sestavy (Výkres 01) platí pro verzi E21 a jsou vloženy jako samostatná příloha práce. Další varianty aeračních trubic a výstupních otvorů jsou uvedeny v příloze zařazené na konci práce.

Podrobný popis effervescent atomizace byl uveden již dříve, shrnutí funkce pro experimentální tryčku je následující. Olej proudí ze zadní strany těla tryčky celou tryčkou přímočaře v aerační trubici a v určeném místě se do něj přes soustavu aeračních otvorů začíná přimíchávat vzduch. Vytváří se tak dvoufázová směs. Tato směs dále pokračuje v přímočarém pohybu aerační trubicí a následně plynule přechází do výtokového otvoru. Jakmile dvoufázová směs opustí výtokový otvor a dostane se do prostředí s výrazně nižším tlakem, nastává mohutná expanze vzduchu, která roztrhá kapalinu do drobných kapek a tím se vytvoří vlastní sprej. Fotografie tryčky za provozu, včetně zobrazení spreje, přípojných hadic a upevnění ke konstrukci, vidíme na obr. 10.



Obr. 10: Tryčka v provozu

### 2.2.2. Geometrické parametry

Pro výzkum závislosti nestability spreje na konstrukci tryčky bylo nutné definovat geometrické parametry [6], u kterých se předpokládalo, že ovlivňují míru nestabilit spreje. V této práci byl zkoumán vliv velikosti směšovací komory a dále vliv velikosti a počtu aeračních otvorů. Pro posouzení vlivu změn geometrie tryčky byly definovány čtyři pomocné parametry  $r$ , které jsou určeny podle následujících vztahů (18 - 21).

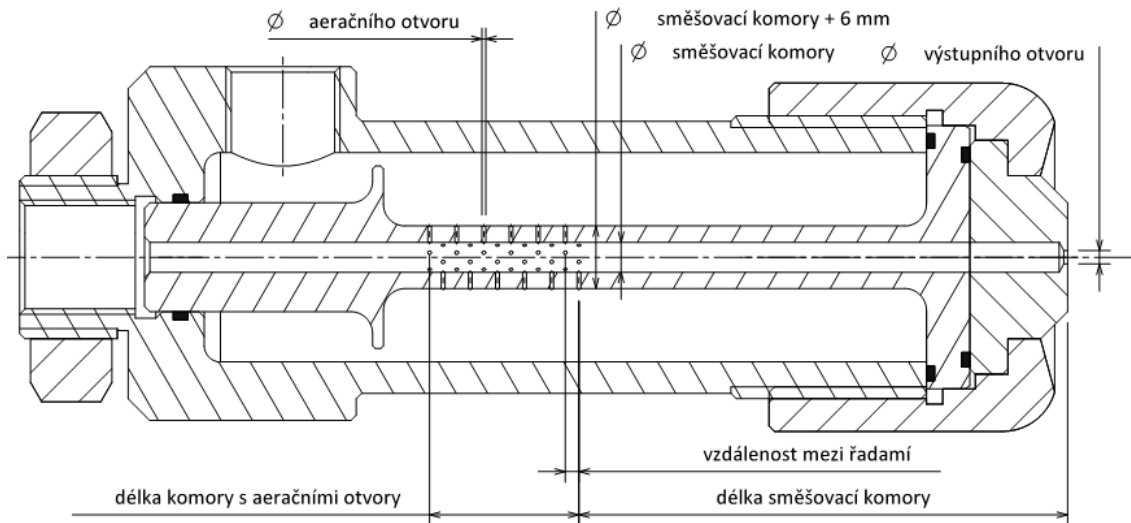
Objem směšovací komory je dán délkou  $l_c$  a vnitřním průměrem směšovací komory  $d_c$ . Délka  $l_c$  je určena nejkratší vzdáleností mezi poslední řadou aeračních otvorů a výstupním otvorem tryčky. Délka směšovací komory byla měněna v rozsahu 35 až 90 mm, průměr v rozsahu 8 až 14 mm. Parametrem  $r_{dc}$  byl sledován vliv vnitřního průměru aerační komory u trysek E22, E25 - E27. Výpočet tohoto parametru je podle následujícího vztahu:

$$r_{dc} = d_c / d_o, \quad (18)$$

kde  $d_o$  je průměr výstupního otvoru (mm).

Parametrem  $r_{lc}$  byl sledován vliv relativní délky směšovací komory  $l_c$ . Výpočet parametru je podle následujícího vztahu:

$$r_{lc} = l_c / d_c. \quad (19)$$



**Obr. 11: Schéma trysky s vyznačením důležitých geometrických parametrů**

Dále má na vznik nestability spreje vliv formování dvoufázové směsi, které je ovlivněno rozmístěním aeračních otvorů a jejich celkovou plochou. Počet aeračních otvorů byl měněn v rozsahu 8 až 80. Jednotlivé otvory byly rozděleny do jedné až dvanácti řad, ve kterých bylo 5, 6, nebo 8 otvorů. Jednotlivé řady otvorů byly mezi sebou natočeny o polovinu úhlu, který svírají mezi sebou dva sousední otvory. Například při počtu 8 otvorů v řadě, bylo natočení sousedních řad o  $22,5^\circ$ . Průměr aeračních otvorů se měnil v rozsahu 0,7, 1, 1,3, 1,5 mm. Na tryskách E29, E32, E35, E37 byl hodnocen vliv celkové plochy aeračních otvorů pomocí parametru  $r_a$ , který se vypočítá jako podíl plochy aeračních otvorů k ploše výstupního otvoru trysky podle následujícího vztahu:

$$r_a = n \cdot A_a / A_o = n \cdot (d_a / d_o)^2, \quad (20)$$

kde  $n$  je počet otvorů (-),  $A_a$  je plocha jednoho aeračního otvoru ( $\text{mm}^2$ ),  $A_o$  je plocha výstupního otvoru ( $\text{mm}^2$ ).

Parametrem  $r_n$  byl hodnocen podíl plochy jednoho aeračního otvoru na celkové aerační ploše. Na tryskách E21 - E24 byl měněn počet aeračních otvorů a jejich průměr, celková aerační plocha však zůstávala zachována. Výpočet byl proveden podle následujícího vztahu:

$$r_n = A_a / n \cdot A_a = 1/n. \quad (21)$$

Pro porovnání vlivu těchto parametrů na stabilitu spreje, které bude zmíněno později, byly vytvořeny skupiny trysek (tab. 5), přičemž některé trysky se vyskytují ve více skupinách. Kompletní seznam parametrů pro testované trysky, bez rozdělení do skupin, se nachází v tab. 2.

Další geometrické parametry zůstávaly neměnné u všech variant trysek. Ve všech variantách měl výstupní otvor stejné parametry, a to průměr na výstupu  $d_o$  2,5 mm a délku výstupní části 0,7 mm, před kterou bylo kónické zúžení pod úhlem  $120^\circ$ . U výstupního otvoru se měnil jen vnitřní průměr před kónickým zúžením tak, aby plynule navazoval na průměr aerační trubice  $d_c$ . Podrobná výkresová dokumentace trysky se nachází v příloze. Na obr. 11

je schematický řez tryskou se zakótovanými rozměry hlavních parametrů, které jsou důležité pro určení vnitřní geometrie jednotlivých trysek. Pro experimenty bylo tedy dostačující vyrobit tělo trysky, převlečenou matici a přídržovací matici pouze v jedné variantě. Výstupní otvor musel být vyroben ve třech variantách a aerační trubice musela být vyrobena v 17-ti variantách. Některé varianty však byly vyrobeny úpravou stávajících trubic, např. zalepením určité řady aeračních otvorů.

Tab. 2: Soupis parametrů jednotlivých trysek

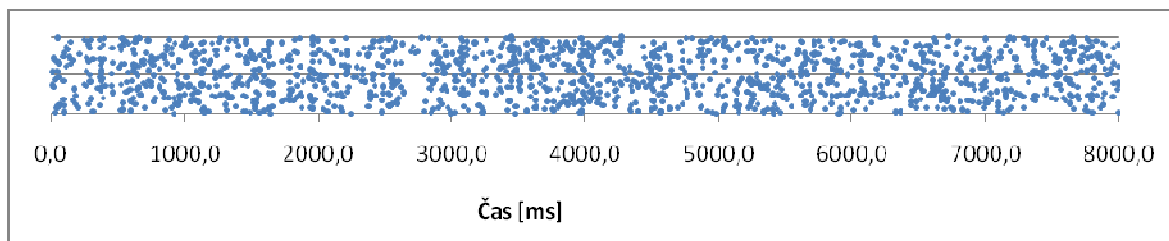
Tryska	$l_c$ (mm)	$\Delta\lambda$ (mm)	$d_c$ (mm)	$d_a$ (mm)	$n$ (-)	$n$ 1 řada (-)	$n$ řad (-)	$r_a$ (-)	$10 \cdot r_n$ (-)	$r_{dc}$ (-)	$rlc$ (-)
E21	90	27,5	5,5	0,7	60	5	12	4,7	0,17	2,2	16,4
E22	85	30	5,5	1	30	5	6	4,8	0,33	2,2	15,5
E23	85	25	5,5	1,3	18	6	3	4,87	0,56	2,2	15,5
E24	90	25	5,5	1,5	13	5	3	4,68	0,77	2,2	16,4
E26	85	30	8	1	30	5	6	4,8	0,33	3,2	10,6
E27	85	25	11	1	30	5	6	4,8	0,33	4,4	7,7
E28	85	40	14	1	30	5	6	4,8	0,33	5,6	6,1
E29	75	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	5,4
E30	55	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	3,9
E31	35	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	2,5
E32	65	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	4,6
E33	50	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	3,6
E34	35	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	2,5
E35	65	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	4,6
E36	45	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	3,2
E37	35	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	2,5
E38	35	45	14	1	80	8	10	12,8	0,13	5,6	2,5

Při všech měřeních byla tryska, pro vyloučení vlivu gravitace a zjednodušení zachycování spreje do nádoby, ve vertikální poloze. Sprej proudil ve směru shora dolů. Provozní podmínky byly pro každou trysku určeny dvěma parametry, zapisovanými ve zjednodušeně podobě. Například režim provozu při tlaku kapaliny 0,1 MPa (1 bar) s podílem atomizačního vzduchu 2 % byl zapsán jako *1b-2pct*.

### 2.3. Nestabilita spreje effervescent trysek

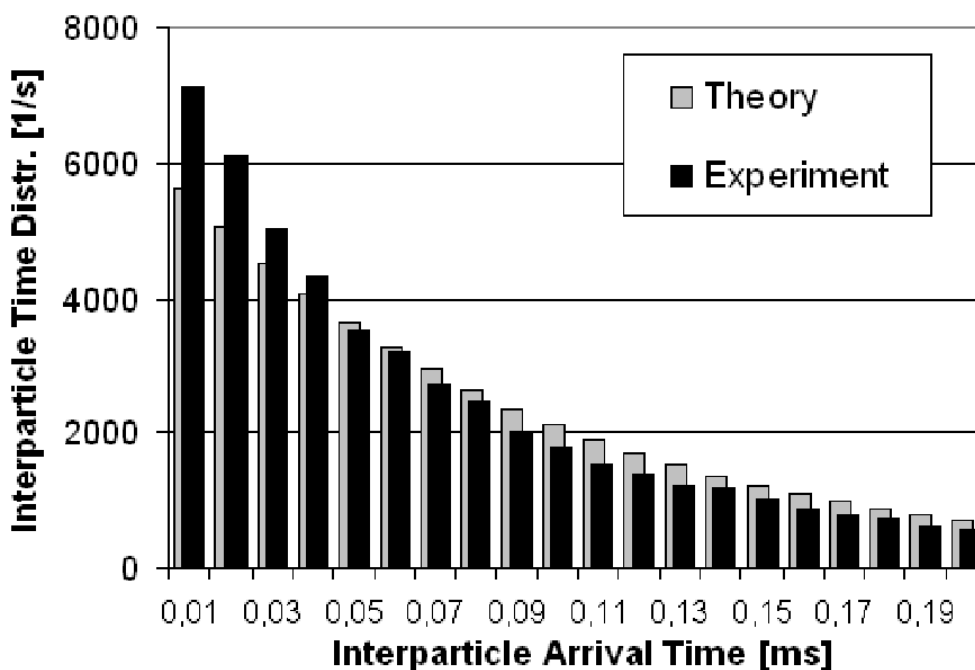
Většina trysek je navrhována pro stabilní režim provozu a jakékoliv nestability v chování spreje jsou pro provoz trysky nežádoucí. Míra nestability je určena porovnáním experimentálního rozdělení částic do mezičásticových tříd s ideálním rozdělením [8]. Na obr. 12 vidíme časové rozložení příletu jednotlivých kapek do měřicího místa. Z obrázku jsou zřejmé shluky částic a prázdná místa. Tato nerovnoměrnost v čase příletu kapek do měřicího místa ukazuje na neustálenost nebo nestabilitu spreje. Nestability spreje jsou při provozu effervescent trysek vždy přítomny, ale bylo prokázáno, že vhodnou konstrukcí trysky je lze minimalizovat. To je důležité např. trysek používaných v oblasti spalování, kde má stabilita spreje vliv na proces hoření, ovlivňuje účinnost spalování a množství vzniklých

škodlivých exhalací. Snížení nestabilit spreje v oblasti spalování je tedy ekonomicky i ekologicky výhodné.



Obr. 12: Znázornění nestabilit částic

Předpokládáme, že na vznik a míru nestabilit ve spreji má vliv zejména charakter proudění ve směšovací komoře a výtok přes výstupní otvor trysky. Dále pak také tvar spreje a přimíchávání okolního vzduchu do spreje. V souhrnu předpokládáme, že nestability spreje jsou ovlivněny parametry na vstupu do trysky (tlak, teplota a hodnota GLR), vlastnostmi kapaliny a atomizačního plynu a vnitřní geometrií trysky. Právě vlivem geometrie se zabývala tato práce, výsledky jsou shrnuty v páté kapitole.



Obr. 13: Rozložení částic v mezi-částicových časových třídách

Při porovnání experimentálního a teoretického rozdělení mezičásticových časů (obr. 13) bylo zjištěno, že v kratších mezi-částicových časových třídách se částice v experimentálním rozdělení vyskytují mnohem častěji, než podle teoretického předpokladu založenému na Poissonově nehomogenním rozdělení. To signalizuje shlukování kapek (droplet clustering), které je pro effervescent trysky typické. Na shlukování jsou náchylné hlavně nejmenší částice, jejichž velikost lze definovat podle Stokesova čísla ( $Stk$ ). Nejmenší částice (do 10  $\mu\text{m}$ ), u nichž je  $Stk \ll 1$ , mohou sledovat vzduchové turbulence, což může vést k jejich shlukování a vzniku nestabilit spreje. Větší částice (90 až 100  $\mu\text{m}$ ), u nichž je  $Stk \gg 1$ , již nemohou být vzduchovými turbulencemi významně ovlivněny. Výsledky však ukazují, že nestability se u effervescent sprejů projevují i u větších částic, a proto Luong and Sojka [8] dospěli k závěru, že nestability spreje nejsou řízeny vzduchovými turbulencemi, ale samotným procesem atomizace, na který má vliv zejména dvoufázové proudění uvnitř trysky. [1]

## 2.4. Dvoufázové proudění v trysce

Uvnitř trysky dochází k dvoufázovému proudění, které má zásadní vliv na výsledný sprej. Popsat matematicky proudění uvnitř trysky je poměrně složité, proto se k jeho popisu využívá empirických vztahů definovaných na základě průtoku, tlaku a fyzikálních vlastností obou médií, dále rozměru směšovacího kanálu a jeho prostorové orientace. Při vlastním provozu v kotli je tryska většinou instalována v horizontální poloze. Pro výzkum se, vzhledem ke zjednodušení měření a zpětného sběru spreje do nádoby, využívá vertikální polohy osy trysky. Vertikální umístění s prouděním shora dolů bylo použito i v této práci.

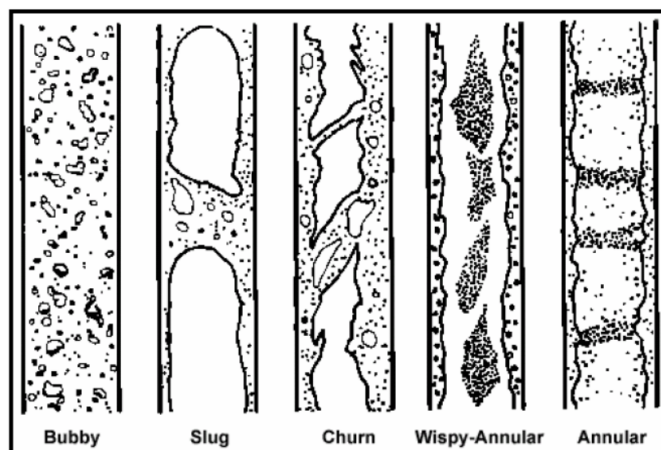
Umístění kanálu v horizontální poloze je popsáno podobnými režimy proudění, s tím rozdílem, že účinkem gravitace dochází ke stratifikaci proudění. To znamená, že lehčí vzduch má snahu zdržovat se v horní části kanálu. Vliv stratifikace se výrazně projeví hlavně při nízkých rychlostech proudění, při větších rychlostech má již malý vliv. V této práci nebyl jeho vliv řešen.

Pomocí empirických vztahů a diagramů, např. Bakerovy mapy (obr. 17), lze rozhodnout o typu proudění. Režimy dvoufázového proudění, které mohou při proudění ve vertikální poloze nastat, jsou zobrazeny na obr. 14. Popis jednotlivých režimů proudění převzatý z literatury [15] následuje dále.

**Bublínkový tok** (Bubly flow) – Tento režim nastane při malém obsahu plynu v kanálu. Bublíny vzduchu mají různý tvar a velikost, většinou jsou však kulové o mnohem menším rozměru než je průměr kanálu.

**Pomalý tok** (Slug flow) – Přejít na tento režim nastane při větším podílu vzduchu. Bublíny vzduchu jsou podstatně větší než v předchozím případě, obvykle dosahují velikosti průměru kanálu. Mezi bublinami a stěnou trubky ulpívá tenký film kapaliny. Tyto bubliny, označované jako Taylorovy, mají specifický tvar kulky s půlkulatým čelem. Oddělují souvislý objem kapaliny na jednotlivé oblasti s malými bublinami.

**Pěnivý tok** (Churn flow) – Při dalším zvýšení rychlosti proudění dochází ke vzniku nestabilit, které vedou k přeskupení fází a rozpadu Taylorových bublin. V kanálech o malém průřezu se nemusí tento režim vůbec vyvinout a rovnou dojde k přechodu na pomalý prstencový tok.



Obr. 14: Dvoufázové proudění ve vertikálním kanálu [15]

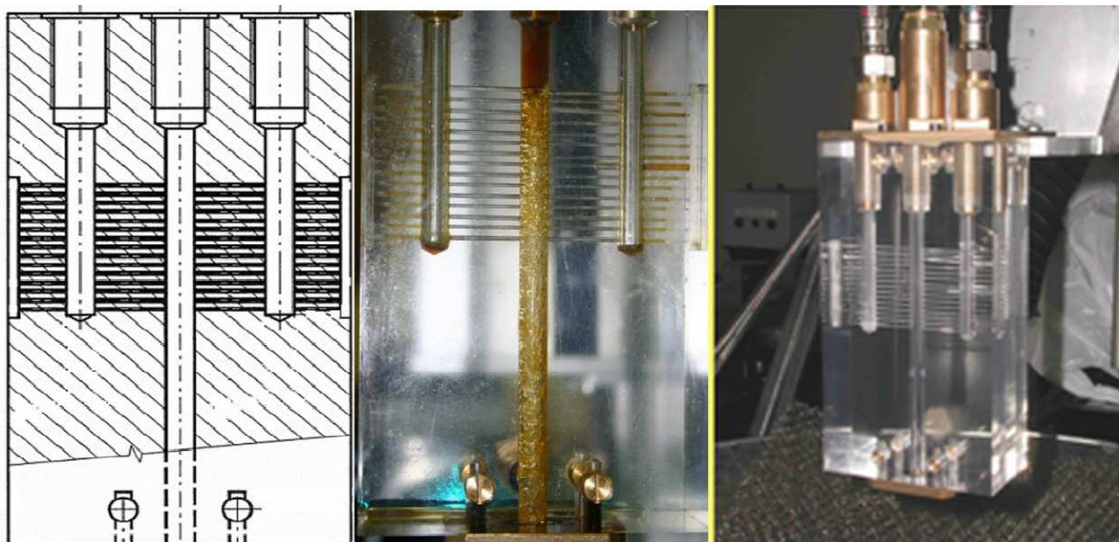
**Pomalý prstencový tok** (Wispy-annular flow) – Tento režim nastane při dalším zvýšení průtoku. Část kapaliny tvoří souvislý film na stěně kanálu, další část kapaliny tvoří shluky a proudí středem kanálu v proudu vzduchu.

**Prstencový tok** (Annular flow) – Tento režim se vyvine, pokud je dále zvyšován průtok plynu. Na stěně se vytvoří souvislá, přibližně rovnoměrná vrstva kapaliny, která může být na rozhraní mírně rozrušena. Ve středové oblasti se mohou vyskytovat drobné kapky kapaliny.

**Mlhový tok** (Mist flow) – Tento režim je opakem bublinkového toku (není zobrazen na obrázku). Mlhového toku je dosaženo při nejvyšších průtocích plynu, kdy je prstencová struktura kapaliny narušena a téměř veškerá kapalina je rozptýlena do proudu vzduchu.

### Proudění v průhledné trysce

Pro sledování chování dvoufázového proudění uvnitř trysky byla v laboratoři [14] zkonstruována průhledná tryska (obr. 15). V levé části je znázorněn řez tryskou, uprostřed je tryska při provozu, vpravo je celkový pohled na trysku. Průhledná tryska má jinou konstrukci než experimentální tryska. Je vyrobena z kvádrů plexiskla, do kterého byly vyvrtány díry pro připojení oleje a vzduchu. Výstupní otvor, který je vyrobený z kovu, je k trysce přišroubován. Přívod médií do trysky má stejné uspořádání jako u experimentální trysky. Středovou průchozí dírou proudí olej, do kterého proniká z boku přes soustavu aeračních otvorů vzduch.



Obr. 15: Průhledná tryska [14]

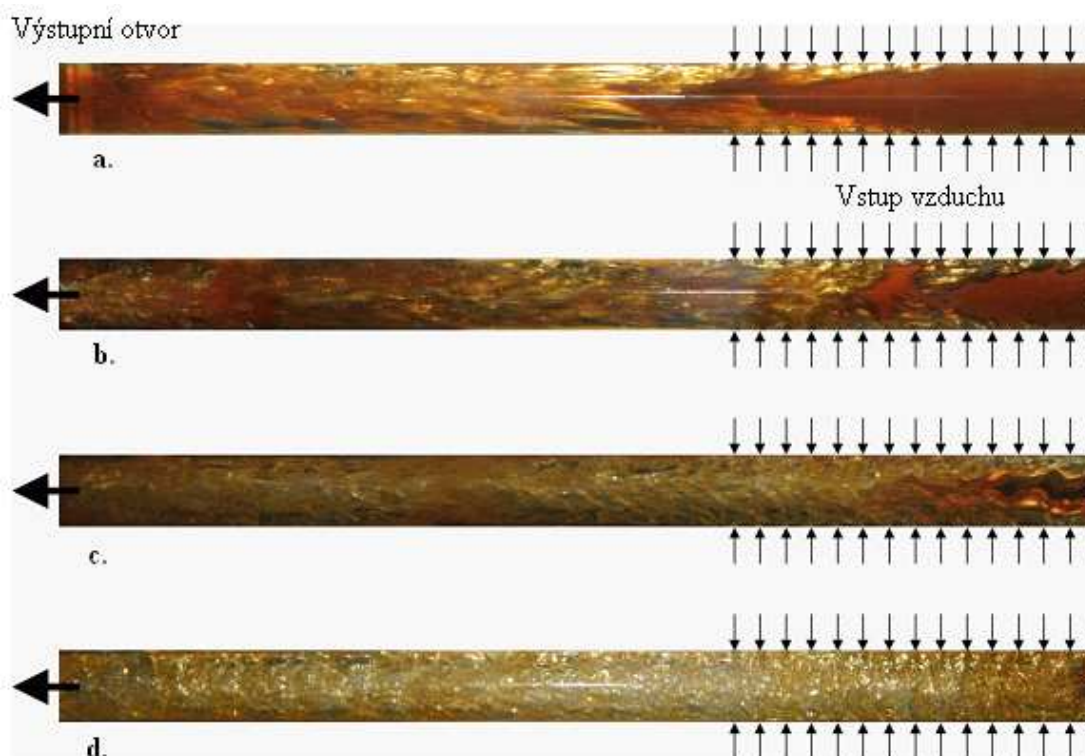
Předchozí rozdělení do jednotlivých režimů toku bylo v laboratoři zkoumáno na průhledné trysce a dokumentováno pomocí vysokorychlostní kamery. Na obr. 15 je znázorněn dvoufázový tok uvnitř průhledné trysky pro 4 provozní režimy, které jsou popsány níže [6]. Dvoufázový tok byl zkoumán při stálém tlaku plynu 0,4 MPa v závislosti na GLR, které se postupně zvyšovalo po hodnotách 0,5 %, 3 %, 14 % a 82 %.

Na obr. 16a je režim při 0,5 % GLR. Vzduch proniká do kapaliny malou rychlostí a tvoří bubliny, které kloužou podél stěn. Na tyto bubliny se váže vzduch z dalších aeračních otvorů. Dvoufázová směs je v podélním směru nehomogenní, což může být zdrojem nestabilit ve spreji. Podle Bakerovy mapy i pozorování lze tento režim zařadit do bublinkového, až pěnového toku.

Na obr. 16b je režim při 3 % GLR. Při tomto režimu proniká vzduch do kapaliny rychleji než v předchozím případě, dvoufázová směs je opět složena z velkého množství oddělených fází. I tento režim ještě spadá do bublinkového, až pěnového toku.

Na obr. 16c je režim při 14 % GLR. Dvofázová směs je mnohem více homogenní než v předchozích případech. Podle Bakerova diagramu režim spadá do prstencového toku, podle pozorování do pěnivého prstencového toku.

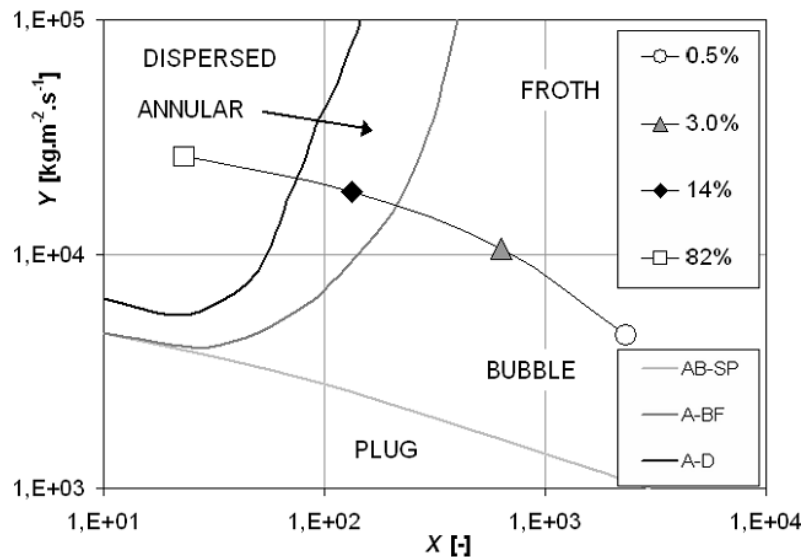
Na obr. 16d je režim při 82 % GLR. Vzduch vstupuje do kapaliny v malých bublinách téměř kolmo na osu trysky. Část kapaliny proudí v prstenci okolo stěny trubice, část proudí rozptýlena ve vzduchu středem trubice. Dvofázový tok se od aeračních otvorů dále již ani nerozvíjí, ani nemění. Podle Bakerova diagramu i pozorování režim spadá do rozptýleného toku (dispersed).



Obr. 16: Dvofázové proudění v trysce [6]

Zobrazení předchozích režimů v Bakerově diagramu je na obr. 17. Vztahy pro empirický výpočet typů proudění jsou uvedeny v literatuře [6]. Bakerova mapa je konstruována pro plně vyvinuté proudění, které se v effervescent tryskách nemusí vyvinout. Proto mohou být v některých případech výsledky pozorování odlišné od empirických výpočtů a zobrazení v Bakerově mapě.

Při shrnutí výsledků vyplývá, že při hodnotách GLR do 0,3 % je proudění v oblasti blízké pístovému toku (plug), v rozsahu 0,3 až 15 % je proudění v oblasti bublinkového až pěnivého toku (bubble – froth), v rozsahu 15 až 35 % je proudění v oblasti prstencového toku (annular) a dále nad 35 % je v oblasti rozptýleného toku (dispersed). Zkoumáním změny tlaku v rozsahu používaném v práci (0,1 – 0,5 MPa), při zachování konstantního GLR (10 %), nebyla změna režimu dvofázového toku tak významná, jako v případě změny GLR. Z výsledků pozorování dvofázového toku uvnitř trysky vyplývají dvě příčiny, které způsobují změnu plochy vzduchu ve výtokovém otvoru a mohou vést ke vzniku nestabilit spreje. První příčinou jsou příliš velké objemy jednotlivých oddělených fází (bubliny vzduchu, objemy kapaliny). Druhou příčinou je časová nestabilita dvofázového toku a jeho kolísání podél osy směšovací komory [6].



Obr. 17: Část Bakerova diagramu pro vertikální tok [6]

### 3. Měření

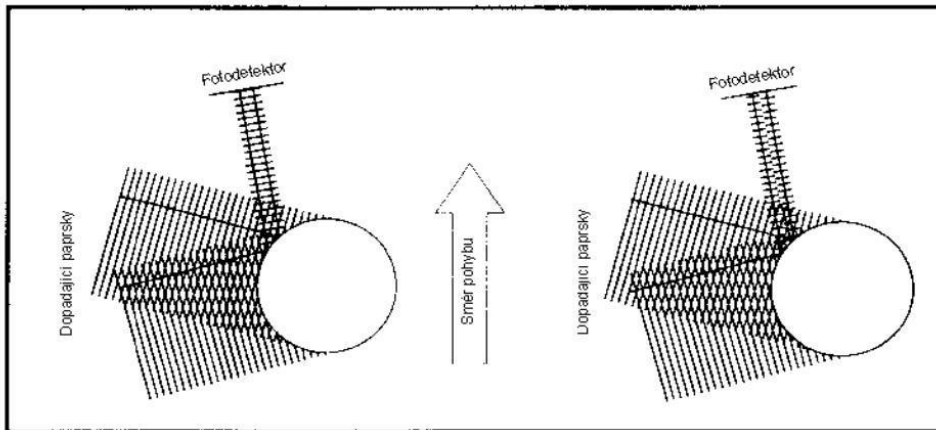
#### 3.1. Popis měřícího zařízení

K měření částic ve spreji bylo využito techniky „Phase/Doppler Particle Analyser“, označované zkratkou P/DPA. Jedná se o bodovou měřící techniku, kdy jsou úzkým laserovým paprskem zjišťovány charakteristiky v určeném místě proudového pole (v měřícím objemu). Pro tento výzkum bylo zjišťováno velikostní, rychlostní a časové spektrum kapek v určených bodech ve spreji.

##### 3.1.1. Princip P/DPA systému

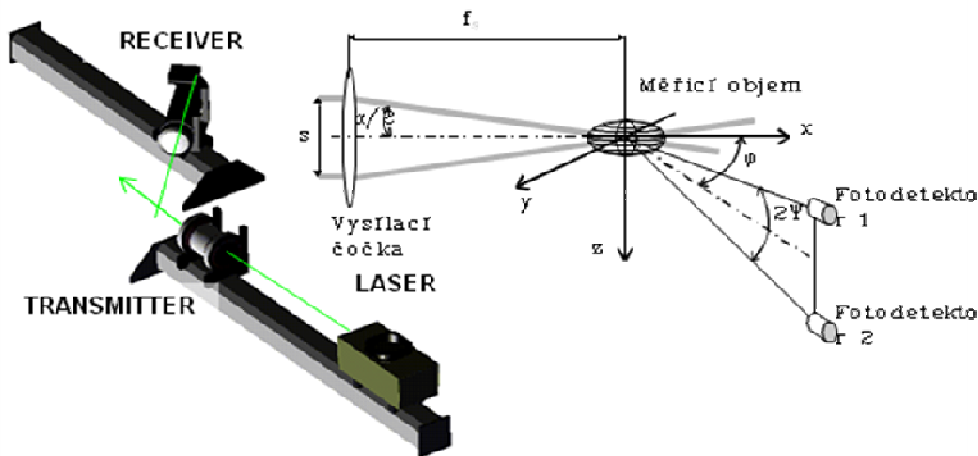
Systém P/DPA byl vyvinut z jednoduššího systému LDV (Laser Doppler Velocimetry), který umožňoval měřit pouze rychlost částic. Systém P/DPA lze využít pro měření dvoufázové soustavy s průhlednými nebo neprůhlednými částicemi, podmínkou však je, aby měřící prostředí bylo pro paprsek laseru transparentní a měřené částice měly kulový tvar. Právě lom světla na kulové ploše je pro systém P/DPA důležitý. Lom světla na kulové ploše je oproti lomu na rovinném rozhraní dvou ploch podstatně složitější. Nerozlišujeme zde jen lom a odraz, ale navíc lom 1. řádu, 2. řádu a pak dále lomy vyšších řádů. Pro správné měření je potřeba od sebe tyto lomy odlišit.

Nyní podrobně k principu měření [4]. Laser generuje paprsek, který je děličem rozdělen na dva koherentní paprsky. Ty se protínají v bodě měření pod úhlem  $\theta$  a v daném místě vytvářejí měřící objem. Na obr. 18 je vidět situace v jednodušším systému LDV. Pokud je fotodetektor nastaven na přijímání světla rozptýleného v měřícím objemu, bude přijímat dvě složky, pro každý paprsek samostatně. Protože původní paprsky laseru na kapku dopadají každý pod jiným úhlem, budou mít odražené paprsky různou fázi, která je dána Dopplerovým posunem. Oba odražené paprsky na fotodetektoru interferují a jako výsledek dostáváme pulzující světelnou intenzitu, podle níž můžeme vyhodnotit rychlost každé částice. V jednodušším LDV systému lze získat pouze rychlost kolmou na rovinu přicházejících paprsků laseru.



Obr. 18: Princip LDV systému [4]

Pro měření velikostního spektra je potřeba přidat druhý fotodetektor, tím již dostáváme systém P/DPA, jehož schéma je na obr. 19. Za podmínky dokonale kulových kapek, znalosti úhlů  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ , definovaných optických vlastnostech kapky a prostředí a znalosti vlnové délky generované laserem, lze vypočítat velikost každé kapky.



Obr. 19: Schéma P/DPA systému [4]

Vztah pro určení rychlosti kapky je stejný jako u systému LDV, s tím rozdílem, že u systému P/DPA lze libovolně použít jeden ze signálů a podle daného vztahu rychlost dopočítat:

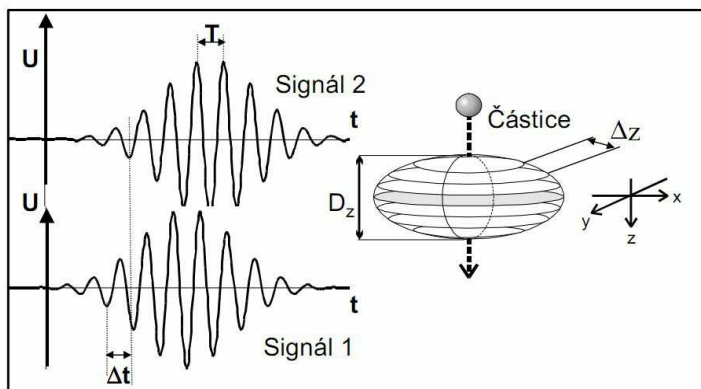
$$|w_z| = \frac{\Delta z}{T} = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \cdot f, \quad (22)$$

kde  $w_z$  je složka rychlosti kolmá na rovinu paprsků laseru (m/s),  $\Delta z$  je tloušťka interferenčního disku (m),  $T$  je perioda signálu (s),  $\lambda$  je vlnová délka použitého laseru (m),  $f$  je frekvence signálu (Hz),  $\theta$  je úhel mezi paprsky laseru přicházejícími do měřicího objemu ( $^\circ$ ).

Velikost částice lze určit na základě vyhodnocení fázového posuvu  $\Delta\Phi$  mezi signály ze dvou fotodetektorů (obr. 21). Pro stanovení velikosti částice platí vztah:

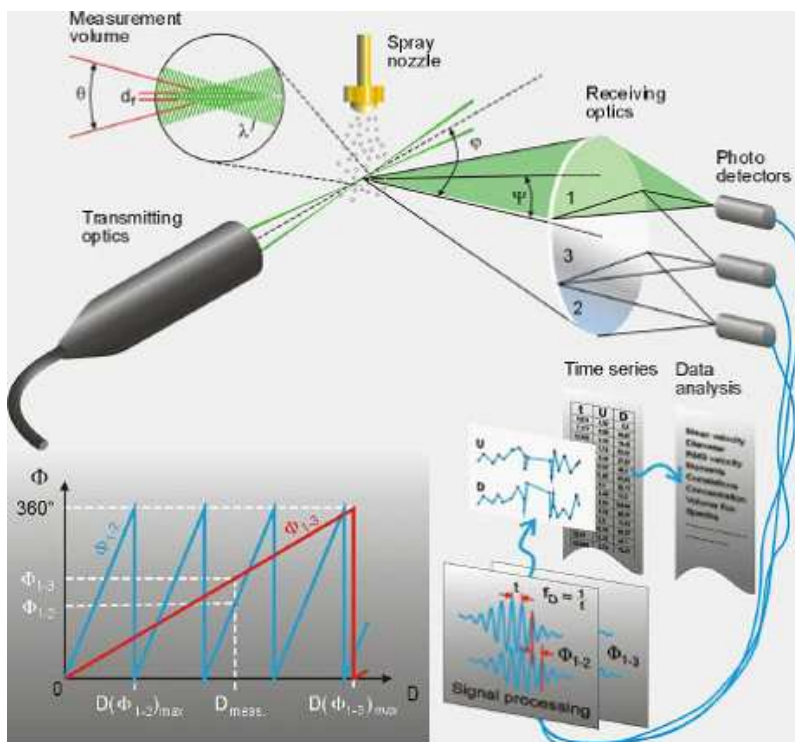
$$d = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \left( \frac{\lambda}{\pi \cdot n_c} \right) \cdot \Delta\Phi, \quad (23)$$

kde  $d$  je průměr částice (m),  $\lambda$  je vlnová délka laseru (m),  $n_c$  je reálná část indexu lomu na rozhraní kapalina – plyn (-),  $\Delta\Phi$  je fázový posun mezi signály ( $^\circ$ ),  $b$  je konstanta určující, zda jde o lomený, nebo odražený signál (-).



Obr. 20: Vyhodnocení signálu P/DPA [4]

Dokonalejšího měření je dosaženo se systémem, který obsahuje tři fotodetektory (obr. 21). Tento systém umožňuje filtrovat chybné hodnoty fázového posuvu, protože porovnává dvě hodnoty  $\Phi_{1,2}$  a  $\Phi_{1,3}$ , z nichž vyhodnocuje velikost částice. Pokud systém vyhodnotí, že rozdíl průměru částice je větší než stanovená odchylka  $\Delta D$ , pak tuto hodnotu považuje za chybovou a z měření ji automaticky vyřazuje.



Obr. 21: Schéma tří fotodetektorového systému [4]

Dopplerova frekvence je závislá pouze na rychlosti částice, nikoliv na orientaci rychlosti. Pro zjištění orientace rychlosti je potřeba systém upravit tak, aby byl jeden z paprsků fázově měněný s časem. Vlivem toho nebudou interferenční disky stacionární, ale budou se pohybovat konstantní rychlostí. Při pozorování stacionární částice se rozptýlené světlo laseru na fotodetektoru zobrazí jako pulsy o frekvenci dané fázovým posunem. Při pozorování pohybujících se částic dostaneme signál o frekvenci vyšší než je nastavená frekvence

fázového posunu, když se částice pohybuje proti směru pohybu interferenčních disků. Naopak, jakmile se částice pohybuje ve směru pohybu interferenčních disků, dostaneme signál o frekvenci nižší. Dosažení fázového posunu mezi jednotlivými paprsky slouží tzv. Braggova cela. [4]

### 3.1.2. Konfigurace měřicího systému

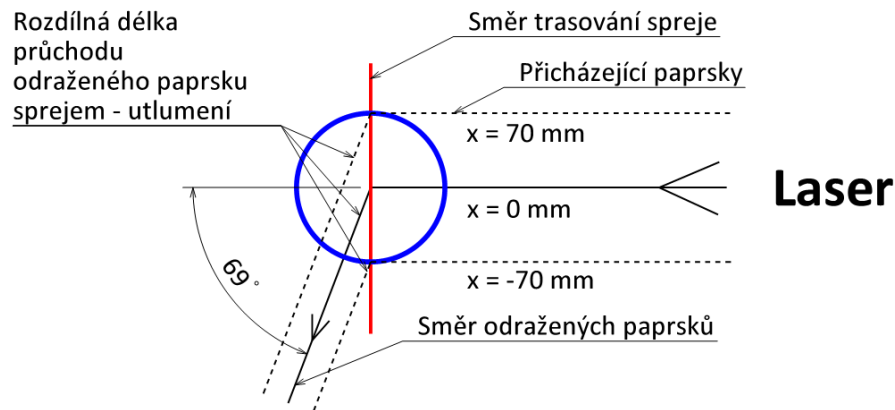
Při vlastním měření částic v jednotlivých bodech spreje bylo použito zařízení Dantec Phase/Doppler Particle Analyser (P/DPA), jehož hlavní parametry jsou uvedeny v tab. 3. Jedná se o 1D zařízení pracující s laserem Ar-Ion<sup>+</sup> 5500A-00, vyrobeným firmou Ion Laser Technology. Laser má maximální výkon 300 mW. Laser pracuje na vlnové délce 514,5 nm.

Světelný lom prvního řádu je snímán optickým zařízením Dantec 57X10, které má tři fotodetektory. Ohnisková vzdálenost je 500 mm a rozptylový úhel 69°. Tato konfigurace vede k separaci okraje 4,3 μm a snímaný objem je 0,4x0,4x6,67mm. Rozsah měření velikosti kapek závisí na poloze foto detektorů. V tomto experimentu bylo použito nastavení pro měření velikosti kapek do 350 μm, respektive do 163 μm. Procesor Dantec 58N50 umožňoval zpracování signálu pro měření rychlosti v rozsahu -25,8 až 128,9 m/s. Data byla vyhodnocována v programu BSA Flow Software 2.1. Přehled základních parametrů P/PDA systému popisuje tab. 3. Schéma měřicího systému P/PDA, se zvýrazněním měřicího objemu a základních úhlů, se nachází na obr. 20.

Tab. 3: Parametry P/PDA systému

	Jednotka	Hodnota
Laser		Ar-Ion 300mW
Přijímací optika		Dantec 58N10
Převodní optika		Dantec 57X10
Signálový procesor		Dantec 58N50
Vlnová délka	nm	514.5
Průměr paprsku	mm	0,82
Polarizace světla		Horizontální
Vzdálenost paprsků S	mm	60
Přijímací složka světla		Lom 1. řádu
Ohnisková vzdálenost vysílací a přijímací optiky	mm	500
Rozptylový úhel $\phi$	°	69,5
Polovina úhlu mezi paprsky $\theta/2$	°	3.43
Nastavení micrometer	mm	1.25
Výškový rozptylový úhel $\psi$	°	$\pm 0.68$

Měření jednotlivých bodů spreje probíhalo traverzováním podle obr. 22. Z obrázku je zřejmé, že v krajních bodech měření ( $x = 70$  mm) přicházel odražený paprsek k fotodetektorům přes nejdelší část spreje, čímž byl utlumen. To vysvětluje rozdíly ve výsledcích měření z pravé a levé poloosy.



## Detektory

Obr. 22: Utlumení paprsku laseru vlivem měřicí polohy

### 3.2. Popis laboratoře a měřicí tratě

Laboratoř, nacházející se v budově C3 areálu FSI v Brně, je spolu s měřicí sestavou a odsávacím zařízením zobrazena na obr. 23. Při provozu trysky dochází k rozstříku paliva a jeho odpařování do okolního prostoru. Proto je nutné zajistit zachytávání tohoto paliva a řádné odvětrání celé místnosti laboratoře. Pro zachytávání kapiček slouží speciální plechová nádoba, umístěná pod tryskou. Kapky jsou v ní zachyceny na stěnách a na krycím vrchním lemu, umístěném po obvodu nádoby. Shromážděné palivo je z nádoby čerpáno do hlavní zásobníkové nádrže pro opětovné použití. Vnitřní prostor nádoby je napojen na odsávací soustavu. K odsávací soustavě je napojen i horní zákryt nad tryskou. Vzduch odsávaný z obou těchto míst je znečištěn, obsahuje zbytky paliva, a proto musí kvůli ochraně životního prostředí projít přes speciální olejový separátor. Při modelování proudění v laboratoři programem CCM, v rámci jiného předmětu, se ukázalo, že hlavním přínosem pro odsávání znečištěného vzduchu z okolí trysky je spodní nádoba. Přívod vzduchu do laboratoře je proveden pomocí pěti kruhových vyústek, umístěných na stěně vedle dveří. Pro zlepšení proudění v místnosti je na stropě umístěn ještě jeden odvod vzduchu, který už není napojen na separátor olejových částic, ale přímo k výfuku odpadního vzduchu.



Obr. 23: Laboratoř s měřicí sestavou



jinými typy průtokoměrů. Jedná se opět o průtokoměry firmy Omega, s označením FTB – 901/FLSC 62 a FTB – 9509/FLSC 62. Přesnost měření průtoku paliva je  $\pm 2,5\%$ . Před přívodem paliva do tělesa trysky je připojen tlakoměr BD Sensors, s označením DMP 331 pracující s přesností  $\pm 0,5\%$  z rozsahu. Před přívodem paliva do trysky je připojen výše zmíněný diferenční tlakoměr. Odvod paliva ze sběrací nádoby zajišťuje vratné zubové čerpadlo Calpeda 1,25/4E. Měření teploty obou médií zajišťuje odporové čidlo RTD-NPT-89-E. Okruh je vybaven chladicím zařízením Kelvin KRA20DP AO689, kterým je možno snížit teplotu paliva, a tak simulovat různé viskozity paliva. [5]

### 3.3. Naměřená data

Data naměřená systémem P/DPA byla vyexportována do textových souborů. Ukázka hlavičky textového souboru a několika řádků s daty je v tab. 4. V hlavičce souboru je poznamenáno, pro jakou trysku, za jakých provozních podmínek a pro jaký bod bylo měření provedeno. Pro výpočty nestabilit jsou důležité jen dva sloupce, druhý a pátý. Druhý sloupec udává čas průletu částice daným místem. Z něj se pak pro každou kapku dopočítává mezičásticový čas. Pátý sloupec udává velikost částice, která právě v daný čas místem proletěla. Přínosná může být i informace ve čtvrtém sloupci, kde je zaznamenáno, jakou rychlost každá změřená částice měla.

Tab. 4: Ukázka formuláře s daty

DXEX v1						
c:\grant-GACR-Trysky 2006\E-prum AO\E21 prum 0.6mm\E-AO0.6mm-fční-1bar-2%GLR.lida						
No date/time available.						
0,00 mm;0,00 mm;150,00 mm						
PDA Status	PDA AT [ms]	PDA TT [us]	PDA U1 [m/s]	PDA D [um]	PDA P1-2 [deg]	PDA P1-3 [deg]
0	10,717	108,9	5,63	58,59	170,8	55,1
0	15,988	44,1	15,29	46,97	136,9	45,2
0	16,194	28,8	14,81	54,23	158,1	55,1
0	17,338	26,1	11,72	10,65	31,1	9,9
0	18,647	45,9	9,66	34,86	101,6	40,9
0	20,042	29,7	7,61	12,11	35,3	15,5
0	22,005	60,3	9,66	31,47	91,8	33,9
0	22,761	40,5	11,25	18,88	55,1	19,8

## 4. Postup výpočtu

### 4.1. Teorie k výpočtu nestabilit spreje u trysek

Pro vlastní výpočet nestabilit trysek bylo využito postupu vytvořeného dvojicí Edwards and Marks, publikovanou v práci [8]. Použitím daných postupů můžeme vyhodnotit, nakolik nestabilní sprej daná tryska vytváří. Podle míry nestabilit spreje můžeme jednotlivé trysky mezi sebou porovnávat a určit, která konstrukce trysky a za jakých provozních podmínek je nejvhodnější. Stabilita spreje je hodnocena podle statistického rozdělení mezičásticových časů (interparticle arrival time distribution). Experimentálně získané rozdělení by se v ideálním případě mělo shodovat s teoretickým rozdělením, které je definováno na základě Poissonova statistického rozdělení. Míra nestability spreje je počítána podle níže uvedených vztahů (24 – 29). [8]

Nejprve je potřeba rozdělit částice do správných mezičásticových tříd  $i$ . Použitím následujícího vztahu získáme horní hranici každé mezičásticové třídy:

$$\tau_j = T \left\{ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{\tau_{j-1}}{T} \right)^{n/\theta} - \frac{1}{Q} \right]^{\theta/n} \right\}, \quad (24)$$

kde  $T$  je čas měření (s),  $n$  je počet částic ve vzorku (-),  $\theta$  je počet realizací měření (-),  $Q$  je počet mezičásticových časových tříd (-), kterých bylo ve výpočtu vždy použito 19.

Experimentální rozdělení mezičásticových časů  $h_{exp}(\tau_j)$  je určeno podle vztahu:

$$h_{exp}(\tau_j) = \frac{H(\tau_j)}{N \cdot \Delta\tau_j}, \quad (25)$$

kde  $H(\tau_j)$  je experimentálně zjištěný počet částic v dané mezičásticové časové třídě (-),  $N$  je celkový počet částic (-),  $\Delta\tau_j$  je šířka mezičásticové časové třídy (s).

Vztah určující teoretické rozdělení mezičásticových časů  $h_{th}(\tau_j)$  je následující:

$$h_{th}(\tau_j) = \frac{\lambda^2 (T - \tau) \exp(-\lambda\tau)}{\lambda T - 1 + \exp(-\lambda T)}, \quad (26)$$

kde  $\lambda$  je intenzita částic (1/s),  $T$  je doba měření (s).

Jako nestabilní jsou hodnoceny ty spreje, kde je velká odchylka mezi teoretickým a experimentálním rozdělením mezičásticových časů. Pro porovnávání odchylky je vhodný chi-kvadrát test (27). Touto hodnotou můžeme určit, zda je daný sprej na dané hladině významnosti stabilní, nebo nestabilní. Nelze podle něj určit míru nestabilit spreje.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^Q \frac{(Nh_{exp,i} - Nh_{th,i})^2}{Nh_{th,i}}. \quad (27)$$

V práci je pro určování míry nestabilit spreje použita nová veličina  $\delta$  (28). Pomocí této veličiny můžeme porovnávat míru nestabilit spreje v různých polohách. Po přepočtu (29) pak slouží jako jediná srovnávací veličina mezi jednotlivými měřeními.

$$\delta = \sum_{i=1}^Q \frac{(Nh_{exp,i} - Nh_{th,i})^2}{(Nh_{th,i})^2}. \quad (28)$$

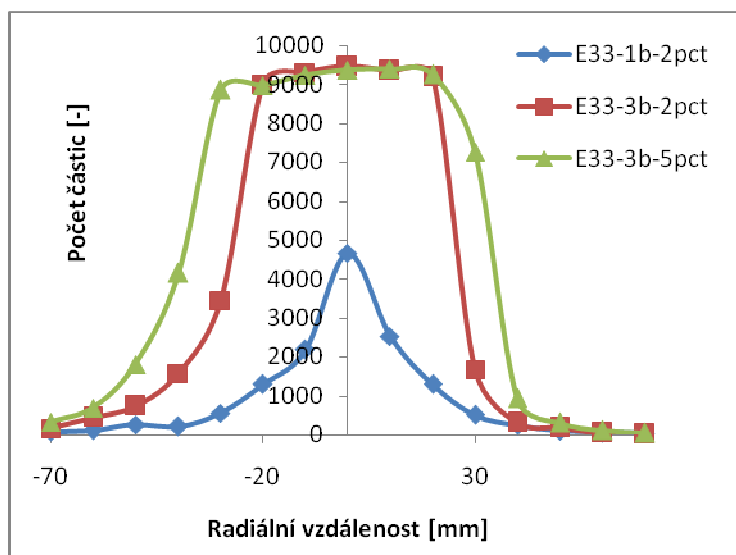
## 4.2. Použitý postup výpočtu

Pro vyhodnocení nestability spreje jednotlivých trysek bylo potřeba vypracovat v programu Excel výpočetní formulář a do něj zapracovat výše uvedené výpočetní vztahy. Program pracuje následujícím způsobem. Do listu nazvaného *Data* se kopírovaly hodnoty z textového souboru pro konkrétní trysku, polohu a režim. Z těchto dat je do samostatného sloupce vyhodnocen mezičásticový čas mezi jednotlivými částicemi dané velikostní třídy. Při celkovém hodnocení nestability spreje se nakonec pracovalo bez dělení částic do velikostních tříd, takže mezičásticový čas je získán odečtením času příletu dvou po sobě jdoucích částic. Na dalším listě *Výpočet* byly podle definovaných vzorců určeny hranice mezičásticových časových tříd. V každé této mezičásticové časové třídě byla určena skutečná četnost částic podle mezičásticových časů, vypočítaných na předchozím listu. Pro každou mezičásticovou časovou třídu byla také určena teoretická četnost. Skutečná a teoretická

četnost byla v každé mezičásticové časové třídě porovnávána a sumována do veličiny  $\delta$ , která určovala míru nestability spreje v daném bodě určité trysky. Tato veličina, spolu s dalšími charakteristickými veličinami pro daný soubor (maximální velikost částice, doba měření, počet částic, četnost částic za sekundu, chi-kvadrát), byla kopírována na list *Výsledky* pro další analýzu a vyhodnocení. V důsledku velkého množství dat, které bylo nutné vyhodnotit, bylo v programovacím jazyce Visual Basic vytvořeno makro. Takto mohly být do výpočetního formuláře k vyhodnocení automaticky načítány všechny textové soubory z určené složky a výsledky pro každý soubor kopírovány na určené místo v listu pro další analýzu, která již nebyla automatizována.

Vlastní zpracování výsledků probíhalo podle následujícího postupu. Data naměřená P/DPA systémem byla programem *BSA Flow Software v2.1* vyhodnocena a exportována do textového souboru (tab. 4). Každá tryska byla měřena ve čtyřech rovinách vzdálených od výstupního otvoru 50, 100, 150 a 200 mm. Tato měřicí poloha byla označována axiální se souřadnicí  $z$ . V každé této měřicí rovině bylo provedeno měření v patnácti vzdálenostech od osy trysky a to od polohy -70 mm do polohy +70 mm při posunu 10 mm. Tato měřicí poloha byla označována jako radiální, se souřadnicí  $x$ . Souřadnice  $y$  nebyla z důvodu symetrie spreje proměřována a ve všech měření byla značena  $y = 0$ . Pro zjednodušený zápis měřicí polohy ve vzdálenosti od výstupního otvoru 150 mm a radiální vzdálenosti od osy trysky 10 mm bylo použito značení *10, 0, 150 mm*. Celkově byl sprej u každé trysky změřen v 60-ti místech. Při počtu 18-ti trysek a třech provozních režimech u každé z nich dostáváme dohromady 3240 měření a tedy 3240 textových souborů s naměřenými daty. Pro efektivní posuzování bylo potřeba omezit počet zpracovávaných souborů na minimum, ale zároveň vyhodnotit všechna data, která jsou pro stanovení nestabilit spreje pro jednotlivé trysky potřebná.

Nejdříve došlo k redukci dat z radiálních měřicích bodů. Data z kladné a záporné měřicí poloosy by měla být shodná, protože u trysky s jedním jednoduchým výstupním otvorem, čekáme závislost pouze na radiální vzdálenosti od osy bez ohledu na směr. Na kladné straně poloosy ale bylo v absolutním počtu naměřeno méně kapek než na záporné straně (obr. 25). To je zapříčiněno P/DPA systémem měření (obr. 22). Z tohoto důvodu byla pro další vyhodnocení použita data jen z měřicích poloh v rozsahu radiálních vzdáleností -70 až 0 mm.



Obr. 25: Absolutní počet naměřených částic

Dále byl sledován vliv axiální vzdáleností měřicích bodů. V axiálních měřicích rovinách blízko výtakovému otvoru (50 mm, někdy i 100 mm) je sprej užší než měřený radiální rozsah, a proto byl u některých režimů v této měřicí vzdálenosti nedostatek naměřených částic

zejména v bodech dále od osy trysky. Při porovnávání dalších vzdáleností bylo vysledováno, že míra nestabilit spreje se zvětšující axiální vzdáleností jen mírně vzrůstá (obr. 30). Pro vzájemné porovnávání trysek byla použita data pouze z axiální roviny  $z = 150 \text{ mm}$ .

Pro porovnávání nestabilit mezi jednotlivými tryskami je přirozeně potřeba porovnávat data naměřená při stejném provozním režimu. Nestability jsou největší při nejnižším tlaku a parametru GLR. Při tomto nejvíce nestabilním režimu se rozdíl mezi jednotlivými tryskami projevily nejvýrazněji, a proto byly trysky porovnávány v režimu při provozním tlaku 0,1 MPa a hodnotě GLR 2 %, zkráceně zapsaném jako *1b-2pct*. Pro ilustraci vývoje nestability spreje srůstem provozních parametrů bylo uvedeno i porovnání pro režim *3b-2pct* a *3b-5pct*.

Při určování míry nestability spreje pro jednotlivé velikostní třídy bylo potřeba vytvořit hranice velikostních tříd tak, aby bylo v každé dostatek částic kvůli statistické platnosti testu. Pro platnost testu musí být v každé mezičásticové časové třídě minimální teoretická četnost 5 částic. Pro splnění této podmínky musely být sousední velikostní třídy slučovány až do dosažení potřebného počtu částic, a proto jsou hranice velikostních tříd pro různé měřící body odlišné. Při hodnocení výsledné míry nestabilit spreje v určitém bodě spreje však bylo potřeba započítat všechny částice bez ohledu na jejich velikost. Proto byl nakonec při celkovém hodnocení brán soubor s daty jako celek s nastaveným velikostním rozsahem částic 0 – 350  $\mu\text{m}$ .

Pro porovnávání míry nestabilit spreje mezi jednotlivými tryskami není možné vycházet z míry nestability spreje v jednotlivých bodech. Pro srovnávání výsledků je vhodnější použít jednu veličinu, která charakterizuje chování spreje v celém jeho rozsahu. K tomu byla použita veličina  $\bar{\delta}$  (30), která váží míru nestabilit spreje pro jednotlivé body skutečným počtem částic v tomto bodě a plochou, která k tomuto bodu přísluší. Skutečný počet částic je definován jako tok částic daným místem za jednu sekundu. Příslušná plocha ve spreji je po úpravě úměrná radiální vzdálenosti od osy trysky. Výsledná veličina  $\bar{\delta}$  je určena následujícím vztahem:

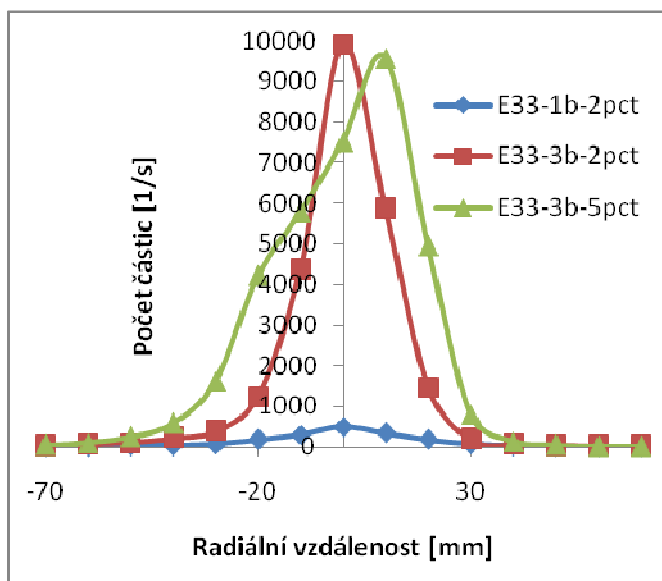
$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i f_i \pi [(r_i + \Delta r/2)^2 - (r_i - \Delta r/2)^2]}{\sum_{i=1}^n f_i \pi [(r_i + \Delta r/2)^2 - (r_i - \Delta r/2)^2]} \cong \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i f_i r_i}{\sum_{i=1}^n f_i r_i}, \quad (29)$$

kde  $r_i$  je radiální vzdálenost měřícího bodu od osy (mm),  $\Delta r$  je vzdálenost mezi měřícími body (mm),  $f_i$  je tok částic v  $i$ -té měřící poloze (1/s),  $\delta_i$  je míra nestabilit dané měřící poloze. Pomocí této veličiny je možné vyjádřit míru nestability spreje pro každou trysku pouze jedním číslem.

### 4.3. Rozložení částic ve spreji

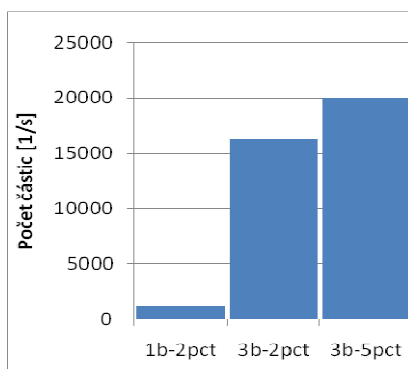
#### Rozložení počtu částic v radiálním směru

Obr. 24 znázorňuje rozložení absolutního počtu změřených částic v radiálním směru pro jednotlivé režimy v axiální vzdálenosti 150 mm. Obr. 26 znázorňuje tok částic měřenými body při různém provozním režimu. Z obou obrázků je zřejmé, že hodnoty na kladné poloose jsou zkresleny způsobem měření (obr. 22). Z tohoto důvodu byla pro další vyhodnocení použita data pouze z levé radiální poloosy. Dále je z obr. 26 zřejmé, jak závisí počet částic na provozním režimu. Největší vliv má provozní tlak na vstupu do trysky, který ovlivňuje celkový objemový průtok kapaliny, a tím tedy množství vzniklého spreje. Při zvětšení tlaku kapaliny z 1 baru na 3 bary došlo k několikanásobnému vzrůstu počtu částic.



Obr. 26: Radiální rozložení částic pro trysku E33, z=150mm

Zvětšením GLR, při zachování stejného tlaku kapaliny, se počet částic v ose trysky mírně snížil, ale v bodech dále od osy je nárůst počtu částic zřetelný a celkový počet částic bude vyšší než při nižším GLR. Tento efekt je dokumentován na obr. 27. Většího počtu částic, při zachování přibližně stejného celkového objemového průtoku kapaliny, lze dosáhnout pouze zmenšením jejich středního průměru. Toto zjištění potvrzuje, že parametr GLR má přímý vliv na velikost částic, a tedy i kvalitu spreje.



Obr. 27: Celkový počet změřených částic v jednotlivých režimech

### Rozložení počtu částic v závislosti na axiální a radiální poloze

Při vyhodnocování počtu částic v závislosti na poloze ve spreji nelze brát jejich absolutní počet a absolutní souřadnici, ale je nutné udělat přepočty kvůli respektování trajektorie částic. Pro zjednodušení je brán pohyb částic od výstupního otvoru jako přímočarý, s konstantní radiální rychlostí. Vztah pro přepočet na relativní polohu:

$$r_R = \frac{r}{z}, \quad (30)$$

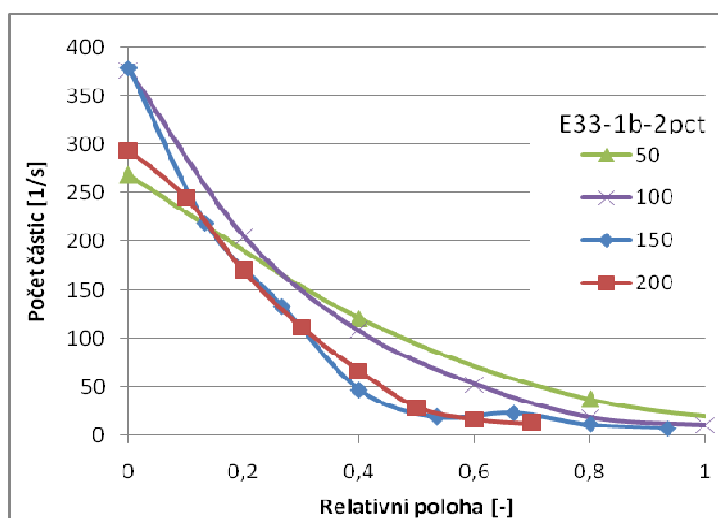
Kde  $r_R$  je relativní vzdálenost (-),  $z$  je skutečná vzdálenost od výstupního otvoru (mm),  $r$  je skutečná radiální vzdálenost (mm).

Vztah pro přepočet počtu částic respektující změnu plochy spreje s růstem axiální vzdálenosti:

$$n_R = n \cdot \frac{z}{z_S}, \quad (31)$$

kde  $n$  je počet naměřených částic (-),  $z$  je vzdálenost měřicí roviny (mm),  $z_S$  je vzdálenost porovnávací roviny (mm).

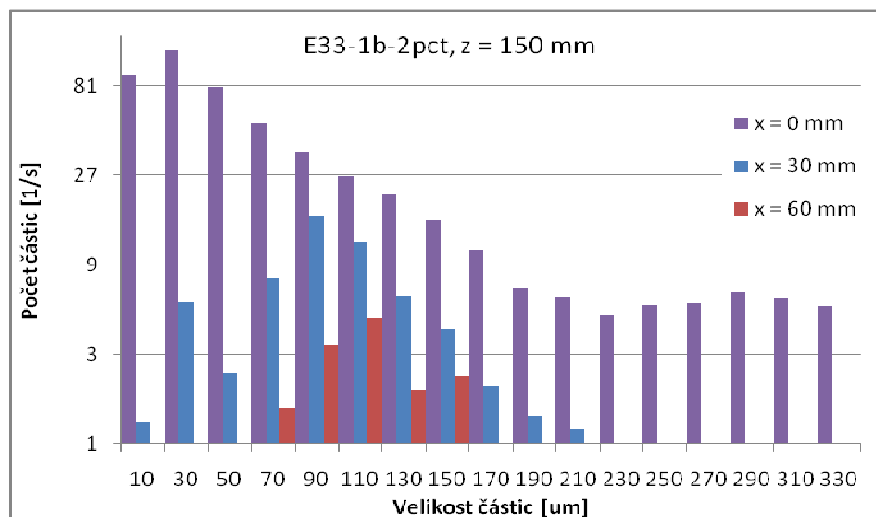
Na obr. 28 je znázorněno rozložení počtu částic v závislosti na relativní poloze ve spreji pro jednotlivé axiální vzdálenosti. Z obrázku není příliš zřejmá žádná závislost počtu částic na axiální vzdálenosti od výstupního otvoru. Ve spreji dochází k sekundárnímu rozpadu kapek, čímž by měl počet částic se vzdáleností vzrůstat. Tento proces je ale doprovázen také shlukováním částic, a proto není možné rozhodnout o vývoji počtu částic v závislosti na axiální vzdálenosti.



Obr. 28: Počet částic v závislosti na axiální poloze

### Velikostní rozdělení částic

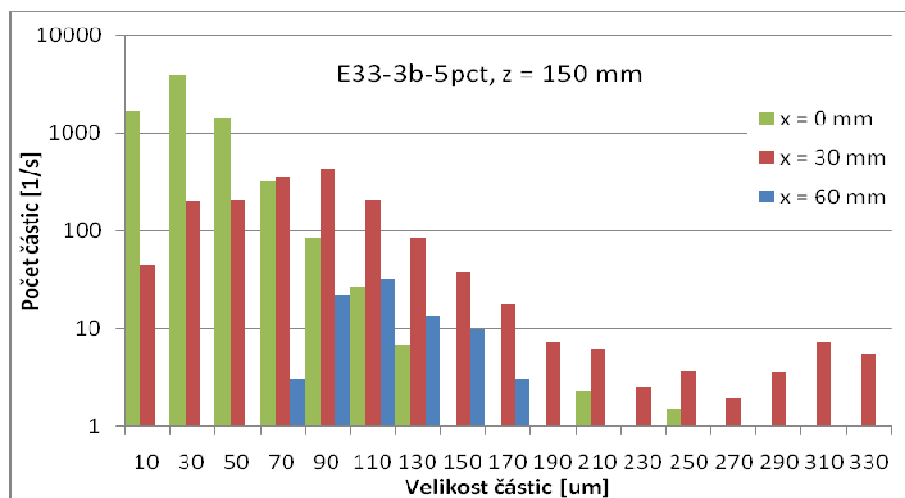
Analýza byla provedena pro trysku E33 v axiální vzdálenosti 150 mm pro tři radiální vzdálenosti (0, 30, 60 mm) a pro dva režimy provozu (1b-2pct a 3b-5pct).



Obr. 29: Počet částic ve velikostních třídách pro režim 1b-2pct

Na obr. 29 pro režim 1b-2pct je vidět, že v ose trysky jsou nejpočetněji zastoupeny částice v malých velikostních třídách okolo 30  $\mu\text{m}$ . V bodech dále od osy se maximum částic posouvá do větších velikostních tříd, v radiální vzdálenosti 30 mm je maximum částic

ve velikostních třídách okolo 90  $\mu\text{m}$ , v radiální vzdálenosti 60 mm je maximum okolo 110  $\mu\text{m}$ . Zjednodušeně řečeno, v ose trysky jsou nejmenší částice, směrem od osy přibývá částic větších, přičemž jejich celkový počet klesá.

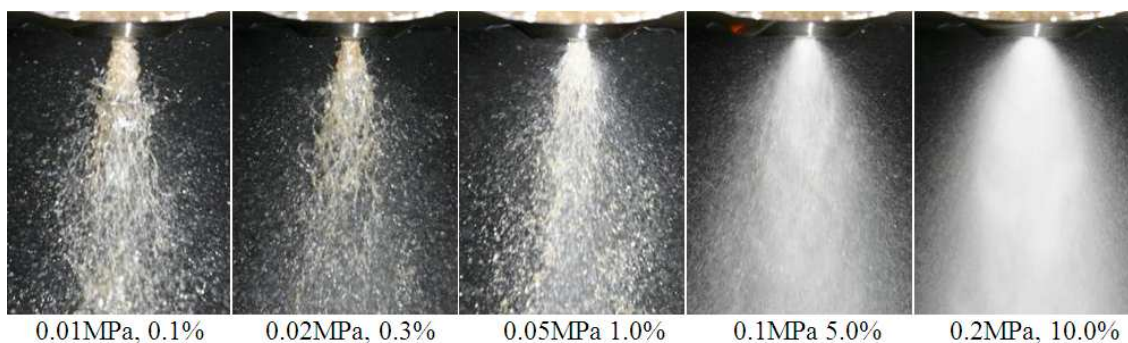


**Obr. 30: Počet částic ve velikostních třídách pro režim 3b-5pct**

Obr. 30 znázorňuje stejnou závislost jako předchozí obrázek pro režim *3b-5pct*. Zvýšením provozních parametrů dochází ke zjemnění spreje a zvýšení celkového počtu částic. Opět jsou v ose trysky nejpočetněji zastoupeny částice v malých velikostních třídách, směrem dále od osy se maximum počtu částic posouvá do větších velikostních tříd. Zvýšení celkového počtu částic oproti předchozímu režimu je velmi výrazné, asi 20-ti násobné (obr. 27).

### Tvar spreje

Obr. 29 znázorňuje sprej v blízkosti trysky při různých provozních režimech. Záznam byl pořízen fotoaparátem CANON EOS 300D s teleobjektivem CANON EF 100 mm. V režimu 1b-5pct a 2b-10pct je již tryska v oblasti s nadkritickým tlakovým poměrem a rychlost ve výstupním otvoru by měla dosahovat hodnot kritické rychlosti. U Lavalovy dýzy by byl další růst tlaku doprovázen růstem rychlosti, v reálu spíše klesá, protože roste objem, do kterého směs expanduje. Na fotografiích je jasně zřetelná změna charakteru spreje, který v oblasti nadkritické výtokové rychlosti obsahuje větší množství rovnoměrněji rozložených kapek.

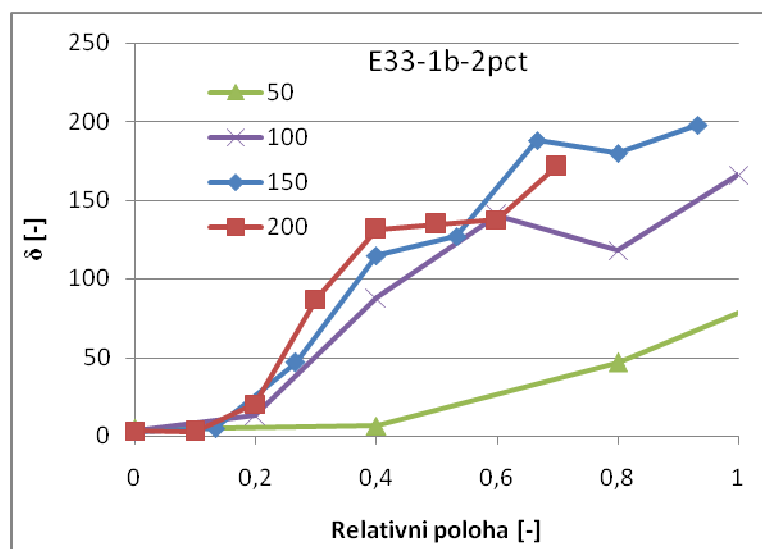


**Obr. 31: Struktura spreje při různých režimech**

## 5. Nestability spreje

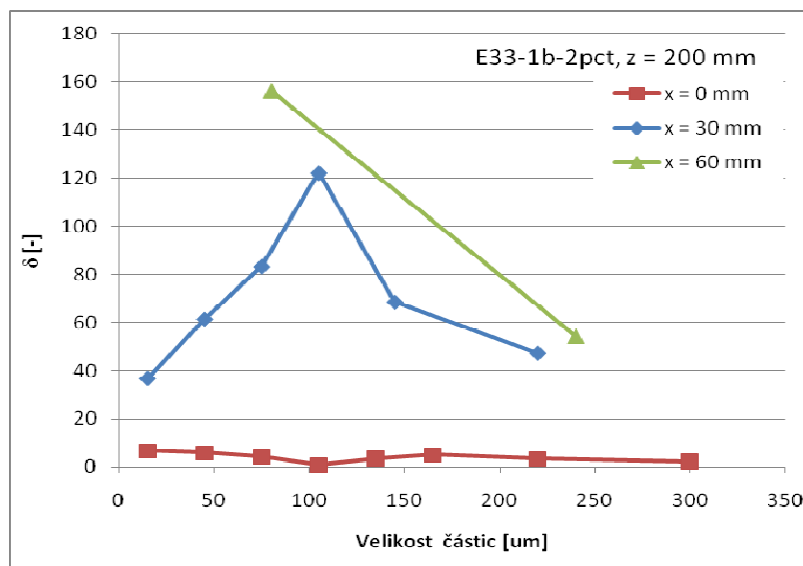
### 5.1. Vliv polohy ve spreji a velikosti částic

Poloha ve spreji, zejména radiální, ovlivňuje jednak početní a velikostní rozdělení částic ve spreji, jednak výrazně ovlivňuje úroveň nestability spreje. Obecně lze říci, že v ose se sprej chová nejstabilněji, směrem od osy nestability rostou a v krajních bodech spreje jsou největší. Tento jev dokumentuje obr. 32. Pro porovnávání dat je opět použitý přepočtený na relativní radiální vzdálenost (30), který respektuje úhel pohybu částic. Z porovnání dat vyplývá, že nestability spreje s axiální vzdáleností rostou zejména mezi rovinami 50 a 100 mm, dále jsou již řádově stejné. Tento efekt však může být částečně způsoben přepočtem na relativní polohu, při kterém je zejména v krajní oblasti předpoklad pohybu částic po přímce příliš zjednodušený. S radiální vzdáleností se míra nestabilit mění výrazněji, se zvětšující se vzdáleností od osy vždy podstatně roste. Podobný vliv závislosti nestabilit na poloze ve spreji byl zaznamenán u všech typů trysek a provozních režimů. Lze tedy usuzovat, že na vývoj nestabilit, v závislosti na poloze ve spreji, má hlavně povaha atomizačního procesu. Konstrukce trysky a provozní režim ovlivňuje výslednou míru nestabilit spreje, nikoliv ale její prostorové rozložení.



Obr. 32: Vliv polohy ve spreji

Na obr. 33 je znázorněna závislost  $\delta$  na velikosti částic. Snahou bylo rozdělit částice na co největší počet velikostních tříd, přičemž kvůli statistické platnosti musela být splněna podmínka minimálního počtu částic v každé třídě. V měřících bodech dále od osy je nižší počet částic, a proto musely být částice sloučeny do větších velikostních tříd. V ose trysky jsou nestability spreje celkově nejnížší a velikostní třída na ně nemá žádný vliv. V bodech dále od osy nestability spreje rostou a mezi jednotlivými velikostními třídami je rozdíl. Rozdíly ale jsou nahodilé a nelze z nich vyvozovat jakýkoliv trend. Z toho vyplývá, že velikost částice neovlivňuje míru nestabilit spreje. Toto zjištění je v souladu se zjištěním dvojice Sojka a Luong [7].



Obr. 33: Vliv velikosti částic

## 5.2. Vliv geometrie trysky a provozního režimu

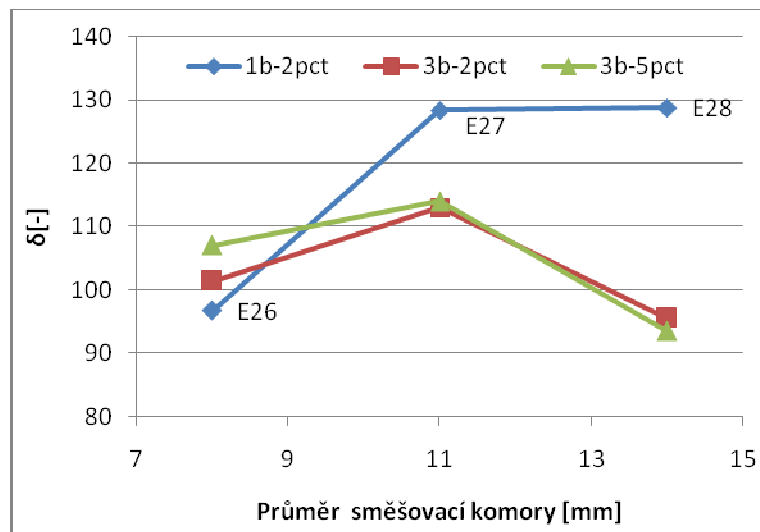
V následující tab. 5 jsou shrnuty výsledky míry nestabilit pro jednotlivé trysky. Trysky jsou rozděleny do několika skupin tak, aby se daly porovnávat jednotlivé měřené parametry. Z tabulky je zřejmé, jaké parametry byly u jednotlivých trysek měněny. Všechna vyhodnocení v této podkapitole jsou pro polohu měření v axiální vzdálenosti 150 mm.

Tab. 5: Míra nestabilit spreje  $\bar{\delta}$  pro jednotlivé trysky a parametry těchto trysek

Režim			$\bar{\delta}$			$l_c$ (mm)	$\Delta l$ (mm)	$d_c$ (mm)	$d_a$ (mm)	n (-)	$n_{1\text{ řada}}$ (-)	$n_{\text{řad}}$ (-)	$r_a$ (-)	$10 \cdot r_n$ (-)	$r_{dc}$ (-)	$r_{lc}$ (-)
			1b-2pct	2b-5pct	3b-5pct											
E26	$d_c$	8	147,7	151,2	154,1	85	30	8	1	30	5	6	4,8	0,33	3,2	10,6
E27	(mm)	11	155,2	158,6	161,5	85	25	11	1	30	5	6	4,8	0,33	4,4	7,7
E28		14	127,3	160,1	157,3	85	40	14	1	30	5	6	4,8	0,33	5,6	6,1
E21	$d_a$	0,7	116,8	154,6	142,5	90	27,5	5,5	0,7	60	5	12	4,7	0,17	2,2	16,4
E22	(mm)	1	117,6	161,7	152,1	85	30	5,5	1	30	5	6	4,8	0,33	2,2	15,5
E23		1,3	135,7	151,4	145,7	85	25	5,5	1,3	18	6	3	4,87	0,56	2,2	15,5
E24		1,5	150,4	163,2	141,4	90	25	5,5	1,5	13	5	3	4,68	0,77	2,2	16,4
E30	n	8	134,7	171,3	158,3	55	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	3,9
E33	(-)	24	91,2	150,0	145,5	50	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	3,6
E36		40	104,0	157,2	155,8	45	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	3,2
E38		80	101,5	130,1	163,3	35	45	14	1	80	8	10	12,8	0,13	5,6	2,5
E31	$l_c$	35	96,0	166,5	162,0	35	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	2,5
E30	(mm)	55	134,7	171,3	158,3	55	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	3,9
E29		75	163,2	159,2	160,7	75	0	14	1	8	8	1	1,28	1,25	5,6	5,4
E34	$l_c$	35	110,7	146,6	153,5	35	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	2,5
E33	(mm)	50	91,2	150,0	145,5	50	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	3,6
E32		65	140,9	163,0	156,1	65	10	14	1	24	8	3	3,84	0,42	5,6	4,6
E37	$l_c$	35	109,5	133,7	146,3	35	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	2,5
E36	(mm)	45	104,0	157,2	155,8	45	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	3,2
E35		65	122,2	159,2	161,7	65	20	14	1	40	8	5	6,4	0,25	5,6	4,6

### 5.2.1. Průměr směšovací komory

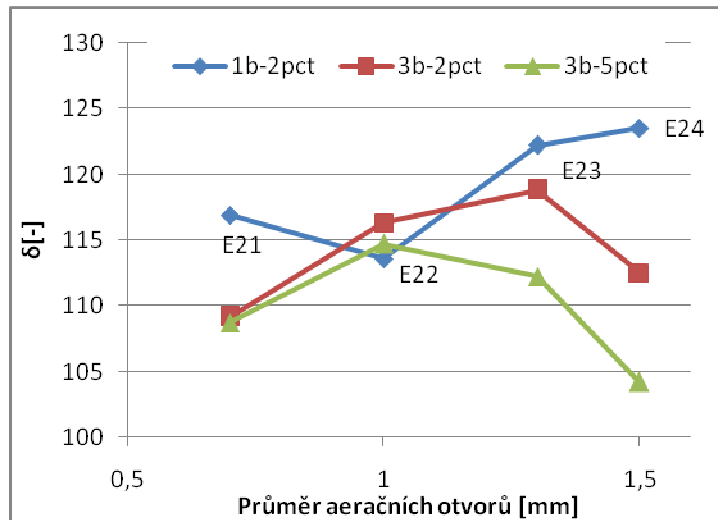
Průměr směšovací komory  $d_c$  byl zkoumán na tryskách E26 – E28. U těchto trysek byla zachována celková délka směšovací komory (85 mm), počet (30) a velikost (1 mm) aeračních otvorů. Měnil se jen průměr směšovací komory v rozsahu 8, 11 a 14 mm a vzdálenost mezi řadami aeračních otvorů, která rostla spolu s průměrem. Vliv změny vzdálenosti mezi řadami aeračních otvorů nelze u této skupiny trysek zatím prokázat. Jako nejvýhodnější podle výsledků (obr. 34) vychází malý průměr směšovací komory 8 mm, kde se míra nestability pohybuje okolo  $\delta = 100$ . Z výsledků vyplývá výrazná závislost mezi průměrem směšovací komory a tlakem na vstupu do trysky. Pro provoz při nízkém tlaku, a tedy průtoku, není vhodná tryska s velkým průměrem směšovací komory. Naopak s komorou malého průměru lze dosáhnout stabilního provozu i při vyšších provozních tlacích. Je škoda, že kvůli chybnému zapsání dat chybí v této skupině tryska E25 s průměrem 5,5 mm, protože by bylo přínosné sledovat chování nestabilit spreje v této krajní variantě.



Obr. 34: Vliv průměru směšovací komory u trysek E26 – E28

### 5.2.2. Průměr aeračních otvorů

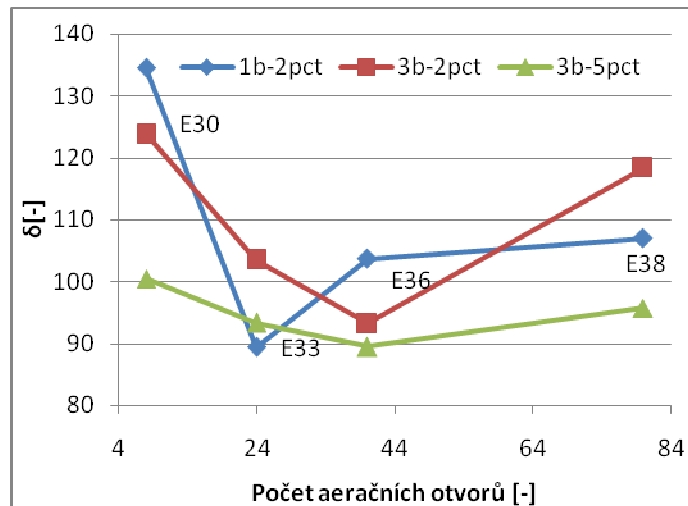
Průměr aeračních  $d_a$  otvorů byl zkoumán na tryskách E21 – E24. U těchto trysek byl zachován průměr (5,5 mm), délka směšovací komory (90 mm) a celková plocha aeračních otvorů ( $r_a = 4,7$ ). Změna průměru aeračních otvorů byla kvůli zachování stejné celkové plochy kompenzována jejich počtem. Průměr byl měněn v rozsahu 0,7, 1, 1,3, 1,5 mm. Z výsledků vyplývá, že nejvhodnější je použít větší počet aeračních otvorů s malým průměrem. Malý průměr aeračních otvorů vyhovuje i pro vyšší provozní režimy, celková míra nestability spreje se v provedení s aeračním otvorem průměru 0,7 mm pohybuje okolo  $\delta = 110$ .



Obr. 35: Vliv průměru aeračních otvorů u trysek E21 – E24

### 5.2.3. Počet otvorů

Počet aeračních otvorů  $n$  a jejich celková plocha byla zkoumána na tryskách E30, E33, E36, E38. U těchto trysek byl zachován průměr směšovací komory (14 mm) a průměr aeračních otvorů (1 mm), zbylé parametry se měnily. Počet aeračních otvorů byl měněn v rozsahu 8, 24, 40 a 80. Z vyhodnocení obr. 34 vyplývá, že nejvýhodnější počet otvorů je v rozsahu od 24 do 40, což odpovídá celkové ploše otvorů definované parametrem  $r_a$  mezi 3,8 až 6,4. V tomto rozsahu počtu otvorů se míra nestability spreje u všech režimů pohybuje okolo  $\delta = 95$ . Podle zjištění v předchozím odstavci je výhodnější využít většího počtu aeračních otvorů s malým průměrem.

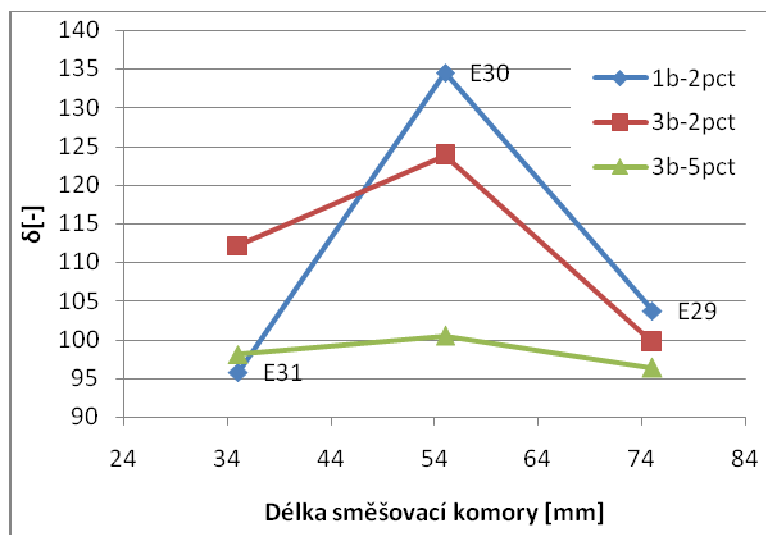


Obr. 36: Vliv počtu aeračních otvorů u trysek E30, E33, E36 a E38

### 5.2.4. Délka směšovací komory

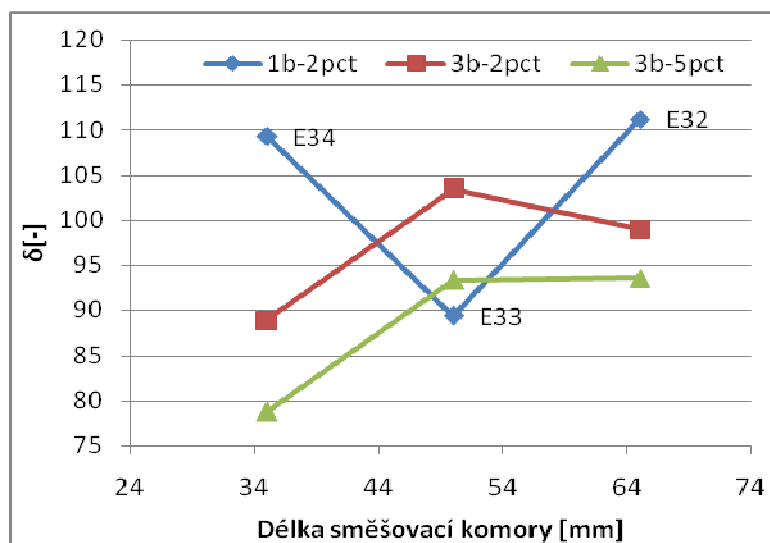
Délka směšovací komory je dána nejkratší vzdáleností od poslední řady aeračních otvorů k výstupnímu otvoru trysky. Vliv tohoto parametru byl zkoumán na tryskách E29 – E37. Všechny zmíněné trysky měly stejný průměr směšovací komory (14 mm) a průměr aeračních otvorů (1 mm). Podle počtu (8, 24, 40) aeračních otvorů byly rozděleny na tři skupiny, ve kterých byl porovnáván vliv délky směšovací komory samostatně.

Na obr. 37 je zobrazena úroveň nestability spreje pro první skupinu, ve které byly trysky E29, E30 a E31. Tyto trysky mají 8 aeračních otvorů umístěných v jedné řadě a velmi nízký parametr celkové jejich plochy  $r_a = 1,3$ . Při tomto malém počtu otvorů, umístěných specificky pouze v jedné řadě, nejsou výsledky nijak průkazné a přinášejí dva rozdílné závěry. Při provozu v nejvyšším režimu 3b-5pct nemá délka směšovací komory téměř žádný vliv. Při provozu v nižších režimech jsou rozdíly významnější, ale nejednoznačné. Nejstabilnější sprej v rozsahu všech tří režimů s hodnotou  $\delta$  přibližně 100 vytváří tryska E29 s délkou směšovací komory 75 mm. Při provozu v nejnižším a nejvyšším režimu je vhodné využít krátkou směšovací komoru 34 mm.



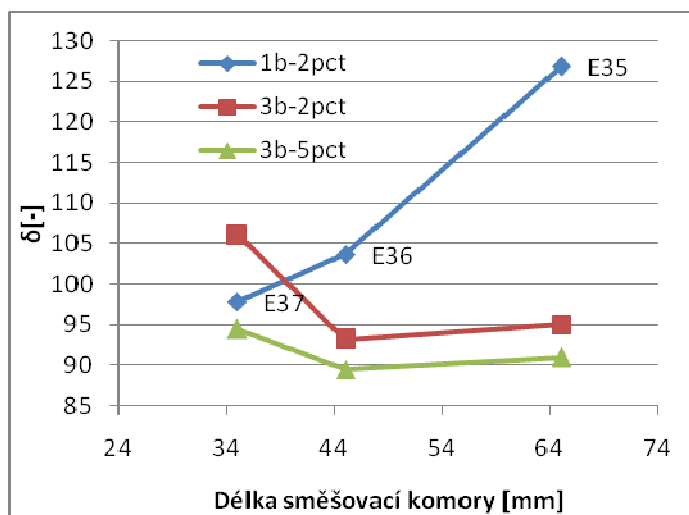
Obr. 37: Vliv délky směšovací komory u trysek E29 – E31

Na obr. 38 je zobrazena úroveň nestabilit spreje pro druhou skupinu, ve které byly trysky E32, E33 a E34. Tato skupina trysek má 24 aeračních otvorů ve třech řadách a parametr celkové plochy  $r_a = 3,8$ . Z této skupiny vychází při provozu v širokém rozsahu provozních režimů nejvýhodnější krátká komora 35 mm. Při provozu v nejnižším provozním režimu vychází lépe komora délky 50 mm, ale tato varianta není vhodná pro provoz v širokém rozsahu provozních parametrů.



Obr. 38: Vliv délky směšovací komory pro trysky E32 – E34

Na obr. 39 je zobrazena nestabilita spreje pro třetí skupinu trysek, kde byly trysky E35, E36 a E37. Tyto trysky mají 40 aeračních otvorů, umístěných v pěti řadách, s parametrem celkové plochy  $r_a = 6,4$ . Trysky v této skupině tedy mají největší celkovou plochu aeračních otvorů ze všech tří skupin. Z výsledků této skupiny trysek vyplývá, že nejvýhodnější je opět využít krátkou směšovací komoru 35 mm. Ta vykazuje míru nestabilit spreje okolo hodnoty  $\delta = 100$  v širokém rozsahu provozních režimů. Při provozu trysky, zejména ve vyšších provozních režimech, je možné využít i delší směšovací komory 45 mm.



Obr. 39: Vliv délky směšovací komory u trysek E35 – E37

Obecně lze říci, že míru nestabilit spreje ovlivňuje délka směšovací komory v závislosti na provozním tlaku a celkové ploše aeračních otvorů. Pro trysku s větší plochou aeračních otvorů ( $r_a$  okolo 3,8) je při provozu v širokém rozsahu provozních režimů nejvhodnější krátká směšovací komora 35 mm. S růstem parametru  $r_a$  na 6,4 je vhodné komoru prodloužit na 45 mm.

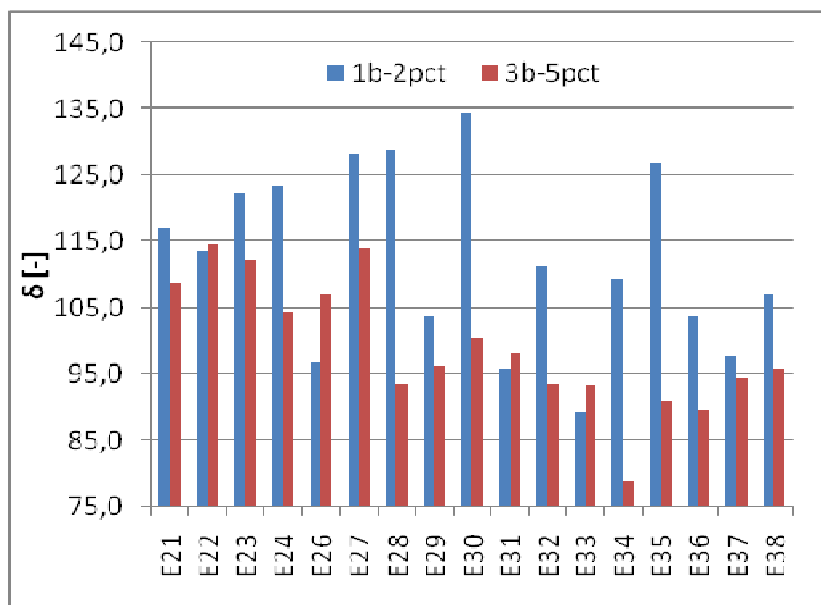
### 5.2.5. Vliv provozního režimu

Z výše uvedených výsledků míry nestabilit spreje pro jednotlivé geometrické parametry je vliv provozního režimu zřejmý. Provoz trysek při vyšším tlaku a GLR generuje ve většině případů stabilnější sprej. Při zkoumání přínosu některých konstrukčních úprav se však vyskytují rozdílné výsledky, z čehož lze usuzovat, že vliv provozního režimu může být na každé konstrukční úpravě specifický. Zejména při provozu v nejnižším provozním režimu jsou některé parametry přímo nevhodné, např. velký průměr směšovací komory a aeračních otvorů. Při provozu s vyšším provozním režimem se účinek jednotlivých konstrukčních úprav na nestabilitu spreje snižuje. Snahou při navrhování jednotlivých konstrukčních úprav je snížit míru nestabilit spreje při provozu v širokém rozsahu provozních režimů.

### 5.3. Porovnání trysek mezi sebou

Při porovnání hodnoty míry nestability spreje  $\bar{\delta}$  pro všechny trysky současně, bez ohledu na jejich geometrické parametry, dostáváme následující výsledky (obr. 40). Pro porovnání byl zvolen režim *1b-2pct* a *3b-5pct*. Při provozu v nejnižším režimu se nestabilita spreje projevuje nejvýrazněji a při porovnání s nejvyšším provozním režimem je zhodnocena vhodnost trysky pro použití ve větším rozsahu provozních parametrů. Jako nejlepší zde vychází tryska E33, těsně za ní pak trysky E31 a E37. Tyto tři trysky jsou vhodné pro provoz v širokém rozsahu provozních režimů. Některé trysky, např. E28, E35 jsou vhodné pro provoz ve vysokém provozním režimu, ale při nízkém provozním režimu vykazují velkou míru nestabilit spreje.

Při použití zkoumaných variant trysek v provozu je důležité vzít v úvahu provozní parametry, při kterých bude tryska pracovat, a podle toho vybrat vhodnou trysku.



Obr. 40: Porovnání  $\delta$  pro jednotlivé trysky

#### 5.4. Shrnutí vlivu geometrie trysky

Průměr směšovací komory má na nestabilitu spreje výrazný vliv, zejména při nízkém provozním režimu, pro který je vhodný jen malý průměr. Při vyšším provozním režimu se nestability spreje vyrovnávají. Pro provoz trysky v širokém rozsahu provozních režimů lze doporučit malý průměr směšovací komory (8 mm) s parametrem  $r_{dc}$  okolo hodnoty 3,2.

Průměr aeračních otvorů je vhodné volit pro provoz v širokém rozsahu provozních režimů co nejmenší (0,7 mm). Celkovou plochu aeračních otvorů lze doporučit v rozsahu parametru  $r_{as}$  3,8 až 6,4 s tím, že větší hodnotu lze doporučit pro provoz při vyšších provozních parametrech, nižší hodnotu pro provoz v celém rozsahu provozních parametrů.

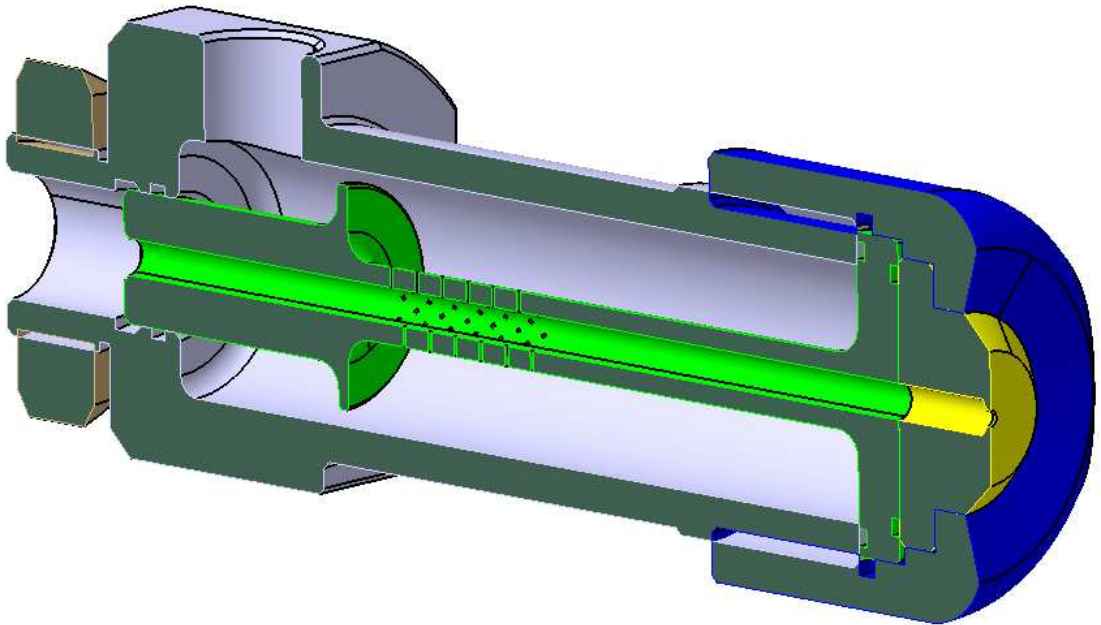
Pro provoz trysky při malé míře nestabilit spreje je vhodná krátká směšovací komora. Optimální délka komory je závislá na celkové ploše aeračních otvorů, pro parametr  $r_a$  je nejvhodnější délka 35 mm, s růstem parametru  $r_a$  je výhodné zvýšit délku komory na 45 mm.

Podle výsledků této práce lze pro provoz trysky v širokém rozsahu provozních parametrů a při minimální míře nestability spreje navrhnout trysku následující geometrie. Průměr směšovací komory 8 mm ( $r_{dt} = 3,2$ ), délka komory 35 mm ( $r_{tc} = 6,4$ ), průměr aeračního otvoru 0,7 mm, při počtu 50-ti otvorů ( $r_a = 3,9$ ,  $10 \cdot r_n = 0,2$ ). Podle dosavadních výsledků nelze rozhodnout o rozmístění aeračních otvorů, ty lze rozdělit do deseti řad po pěti otvorech, nebo do šesti řad po osmi otvorech. Kombinaci těchto parametrů je však nutné ověřit novou výrobou trysky, proměřením a vyhodnocením dat.

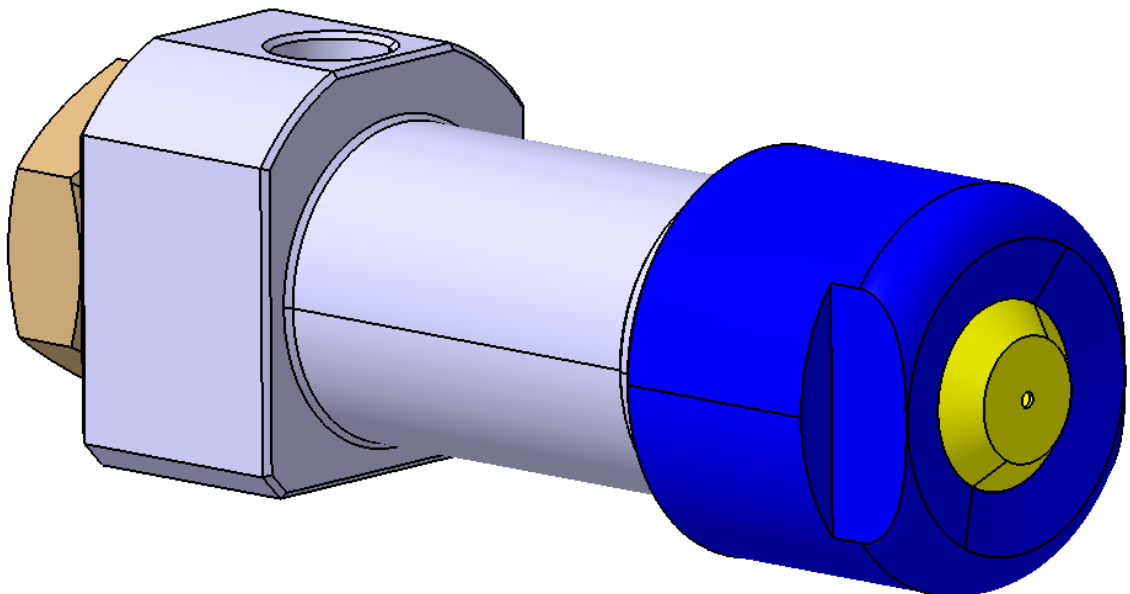
## 6. Výkresová dokumentace

Kompletní výkresová dokumentace byla vypracována pro trysku E21, jelikož má pro názornost dostatečný počet aeračních otvorů a změnu průměru na aerační trubici. Pro tuto trysku jsou zhotoveny samostatné výkresy umístěné v příloze. Výkresy pro části trysky s měněnou geometrií, tedy pro aerační trubici a výtokový otvor, jsou v příloze na konci práce

jako součást pevné vazby. Seznam všech výkresů je uveden v seznamu příloh. Tryska byla namodelována ve 3D programu Catia V5. Změny geometrie pro jednotlivé typy trysky byly řízeny tabulkou, a proto je jednoduché provést jakoukoliv úpravu geometrie pouhým výběrem v tabulce, případně do tabulky přidat zcela novou geometrii. Řez modelem sestavy trysky je znázorněn na obr. 41, pohled na celou trysku znázorňuje obr. 42.. Z tohoto modelu byly postupně generovány výkresy, které zůstávají s modelem i nadále propojeny. Předností práce s 3D modelem je možnost provádět v něm velice rychle jakékoliv změny geometrie, které se pak automaticky přenášejí do výkresů při jejich znovunačtení. Takto získané výkresy byly převedeny do formátu dwg, pro možnost jejich otevření v běžněji dostupném programu AutoCad a jsou součástí elektronické verze diplomové práce.



Obr. 41: Řez 3D modelem trysky



Obr. 42: 3D model trysky

## Závěr

Práce byla zaměřena na výzkum effervescent trysek. Effervescent trysky spadají do kategorie dvoufázových trysek s vnitřním směřováním. Na 17 zkušebních tryskách byl posuzován vliv vnitřní geometrie trysky na nestabilitu generovaného spreje. Posuzování míry nestabilit spreje bylo založeno na statistickém vyhodnocení časových intervalů mezi jednotlivými kapkami, procházejícími měřícím objemem laserového systému P/DPA. Nestability spreje se vyskytují u všech effervescent trysek, ale bylo prokázáno, že jejich míra je závislá i na konstrukci trysky. Cílem výzkumu effervescent trysek je snížit vhodnou geometrií trysky míru nestabilit spreje na minimální hodnotu. Zkoumaná effervescent tryska je primárně určena pro spalovací aplikace, kde má míra nestabilit spreje vliv na spalovací proces, ovlivňuje výslednou účinnost spalování a množství vzniklých exhalací. Proto je pro ekonomický a ekologický provoz trysky důležité nestability spreje minimalizovat.

Na začátku práce byla provedena podrobná rešerše literatury, která poskytla informace o tryskách obecně, o principech a využití jednotlivých druhů trysek. Bylo popsáno zařazení effervescent trysky do patřičné kategorie trysek. Dále již byla popisována jen effervescent tryska s důrazem na její odlišnost od jiných typů. Podrobně byl popsán její princip a výhody, které tímto přináší. Byl také popsán dvoufázový tok uvnitř trysky, který má podstatný vliv na nestabilitu spreje. Dále byl v rešeršní části podrobně popsán princip měření pomocí P/DPA metody, kterým byly pro práci získány informace o časovém, velikostním a rychlostním rozdělení částic ve spreji.

Při vyhodnocení počtu částic v jednotlivých měřících bodech nebyla zjištěna závislost na axiální vzdálenosti. Počet částic ale výrazně závisí na radiální poloze, v ose trysky je částic nejvíce, směrem k okraji spreje jejich počet rychle klesá. Celkový počet částic ve spreji je ovlivněn hlavně provozním režimem. S rostoucím tlakem kapaliny roste počet částic řádově, s rostoucím parametrem GLR se počet částic tolik nezvyšuje, dojde hlavně k jejich zjemnění. Při analýze počtu částic v jednotlivých velikostních třídách byla zaznamenána závislost na poloze ve spreji. V ose trysky jsou nejpočetněji zastoupeny malé částice (okolo 30  $\mu\text{m}$ ), dále od osy se postupně nejpočetnější zastoupení částic posouvá do větších velikostních tříd, na okraji spreje jsou nejpočetněji zastoupeny větší částice (okolo 110  $\mu\text{m}$ ).

Míra nestabilit spreje je výrazně závislá na radiální poloze ve spreji, v ose trysky je sprej nejstabilnější, s rostoucí vzdáleností od osy se nestability spreje zvyšují. Vliv axiální vzdálenosti není významný, s rostoucí axiální vzdáleností byl zaznamenán jen mírný růst nestabilit spreje. Při sledování vlivu velikosti částic na míru nestabilit spreje nebyla zaznamenána žádná závislost. Při posuzování vlivu provozního režimu byl potvrzen předpoklad, že se zvyšujícím se tlakem a parametrem GLR se nestability spreje snižují. Bylo však prokázáno, že některé konstrukční varianty trysky jsou vhodné pouze pro nízký tlak a GLR. S růstem tlaku a GLR u nich míra nestabilit spreje proti všeobecným předpokladům roste.

Vliv jednotlivých geometrických parametrů na míru nestabilit spreje je výrazně závislý na provozním režimu, zejména na vstupním tlaku do trysky, kterým je vlastně udán celkový průtok kapaliny tryskou. Obecně lze shrnout výsledky tak, že pro nízké provozní tlaky je vhodná jen tryska s malou směšovací komorou a malými aeračními otvory. Při zvyšování provozních parametrů zůstává tato kombinace i nadále příznivá. Pro vyšší provozní tlaky by se hodila směšovací komora a aeračními otvory větší velikosti, ale při snižování provozního tlaku vykazuje tato varianta zvýšenou míru nestabilit spreje. Pro využití trysky v širším rozsahu provozních parametrů je tedy vhodná pouze první varianta.

Podle předchozích výsledků byla doporučena následující konstrukce trysky: směšovací komora malého průměru a délky, větší počet aeračních otvorů o malém průměru. Tato kombinace by měla vykazovat nízkou míru nestabilit spreje při použití v širokém rozsahu provozních parametrů. Pro ověření vhodnosti této kombinace je ale nutné trysku vyrobit a znovu v laboratoři proměřit.

Programem Catia V5 byl vytvořen 3D model trysky a z něj pak byly vytvořeny výkresy. Pro trysku E21 byla vypracována kompletní výkresová dokumentace, která je na samostatných výkresech umístěna v příloze. Pro aerační trubici a výstupní otvor, jejichž geometrie byla v jednotlivých typech trysek měněna, byly vytvořeny zjednodušené výkresy, zobrazující jejich specifické parametry. Tyto výkresy jsou v příloze v závěru práce.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] LEFEBVRE, A. H. *Atomization and sprays*. [s.l.] : [s.n.], 1989. 420 s.
- [2] JEDELSKY, Jan, et al. Design of effervescent atomizer for industrial oil burner. *In Flucame 2007 Tallahassee, Florida*. [s.l.] : [s.n.], 2007. s. 11.
- [3] JEDELSKY, Jan, et al. Unsteadiness in Effervescent sprays: Influence of operational conditons and atomizer design. *In ICLASS 2009*. [s.l.] : [s.n.], 2007. s. 11.
- [4] OTÁHAL, Jan. *Experimentální výzkum dvoufázového proudění v effervescent tryskách*. [s.l.], 2008. 123 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.
- [5] OTÁHAL, Jan. *Experimentální stanovení charakteristik effervescent trysek*. [s.l.], 2002. 47 s. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.
- [6] JEDELSKY, Jan, JICHA, Miroslav. *Unsteadinnes in effervescent sprays – a new evaluation method and the influence of operatonal conditions*. [s.l.] : [s.n.], 2004. 61 s.
- [7] LUONG, J.T.K., SOJKA, P.E. *Atomization and Sprays: Unsteadiness in Effervescent Sprays*. [s.l.] : [s.n.], 1999. s. 87-109.
- [8] EDVARDS, C.F., MARX, K.D. *Atomization and Sprays: Multipoint statistikal structure of the ideal spray*. [s.l.] : [s.n.], 1995. s. 435-505.
- [9] KLUSENER, O. *The injection process in compressorless diesel engines*. 1933.
- [10] MERRINGTON, A.C. RICHARDSON, E.G. *The break-up of liquid jets*. 1947. s.1-13.
- [11] ELKOTB, M.M. *Fuel atomization for spray modeling*. 1982. s. 71-91.
- [12] SOVANI, P.J., SOJKA, P.E., LEFEBVRE, A.H. *Effervescent atomization: Progress in energy and combustion science*. 2001. s. 483-521.
- [13] BRUCKNER, H.N.,SOJKA, P.E., LEFEBVRE, A.H. *Effervescent atomization of non-Newtonian single phase liquids*. 1990.
- [14] JEDELSKY, Jan, JICHA, Miroslav. Characteristics of a Two-phase Flow Inside the Mixing Chamber of an Effervescent Atomizer. *Proceedings of 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa Italy*. 2004.
- [15] THOME, J.R. *Engineeniring data book III*. 2004-2007.

## Seznam použitých veličin

### Popis atomizace

L	-	atomizační kapalina (liquid)
G	-	atomizační plyn (gas)
GLR	-	hmotnostní poměr průtoku plynu a kapaliny
T	s	doba měření
n	-	počet částic ve vzorku
$\theta$	-	počet realizací měření
Q	-	počet mezičásticových tříd
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	hustota
$\sigma$	N/m	povrchové napětí
g	m/s <sup>2</sup>	gravitační zrychlení
d <sub>0</sub>	mm	průměr výstupního otvoru trysky
D, d	m	velikost kapky
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematická viskozita
$\mu$	N.s/m <sup>2</sup>	dynamická viskozita
$\eta$	-	účinnost
$\pi$	-	Ludolfovo číslo
w	m/s	rychlost
p	Pa	tlak
SMD	-	Sauterův střední průměr
E	J	energie

### Popis trysky

l <sub>c</sub>	mm	délka směšovací komory
$\Delta l$	mm	délka části trubice s aeračními otvory
d <sub>c</sub>	mm	průměr směšovací komory
d <sub>a</sub>	mm	průměr aeračního otvoru
n	-	počet aeračních otvorů
n <sub>řada</sub>	-	počet aeračních otvorů v jedné řadě
n <sub>řad</sub>	-	počet řad aeračních otvorů
r <sub>a</sub>	-	podíl plochy aeračních otvorů proti ploše výstupního otvoru
r <sub>n</sub>	-	podíl plochy jednoho aeračního otvoru na jejich celkové ploše
r <sub>dc</sub>	-	podíl průměru směšovací komory proti průměru výstupního otvoru
r <sub>lc</sub>	-	podíl délky směšovací komory proti jejímu průměru
$\delta$	-	míra nestability spreje

### Popis měřicího systému PDA

$\Delta z$	m	tloušťka interferenčního disku
T	s	perioda
F	Hz	frekvence
$\theta$	°	úhel mezi paprsky přicházejícími do měřicího objemu
$\lambda$	m	vlnová délka paprsku
$\Phi$	°	fázový posun mezi jednotlivými paprsky

## Seznam příloh

### Svázané přílohy

Příloha 1 - 17      Výkresy aeračních trubíc E21 – E38

Příloha 18 – 21    Výkresy výstupních otvorů

### Samostatné přílohy

Výkres 1            Sestava trysky

Výkres 2            Tělo trysky

Výkres 3            Aerační trubice

Výkres 4            Výstupní otvor

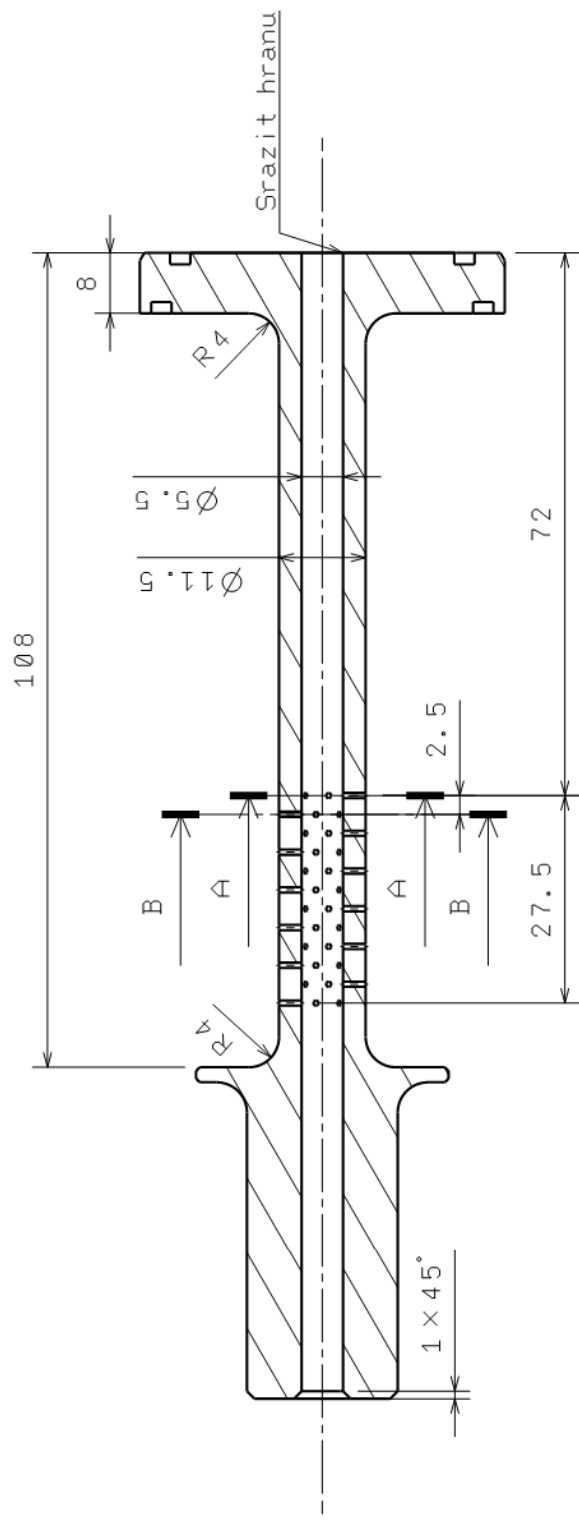
Výkres 5            Převlečná matice

Výkres 6            Přidržovací matice

Schéma trysky

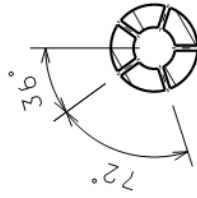
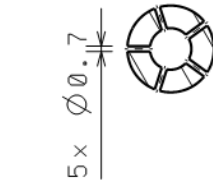






Řez B-B

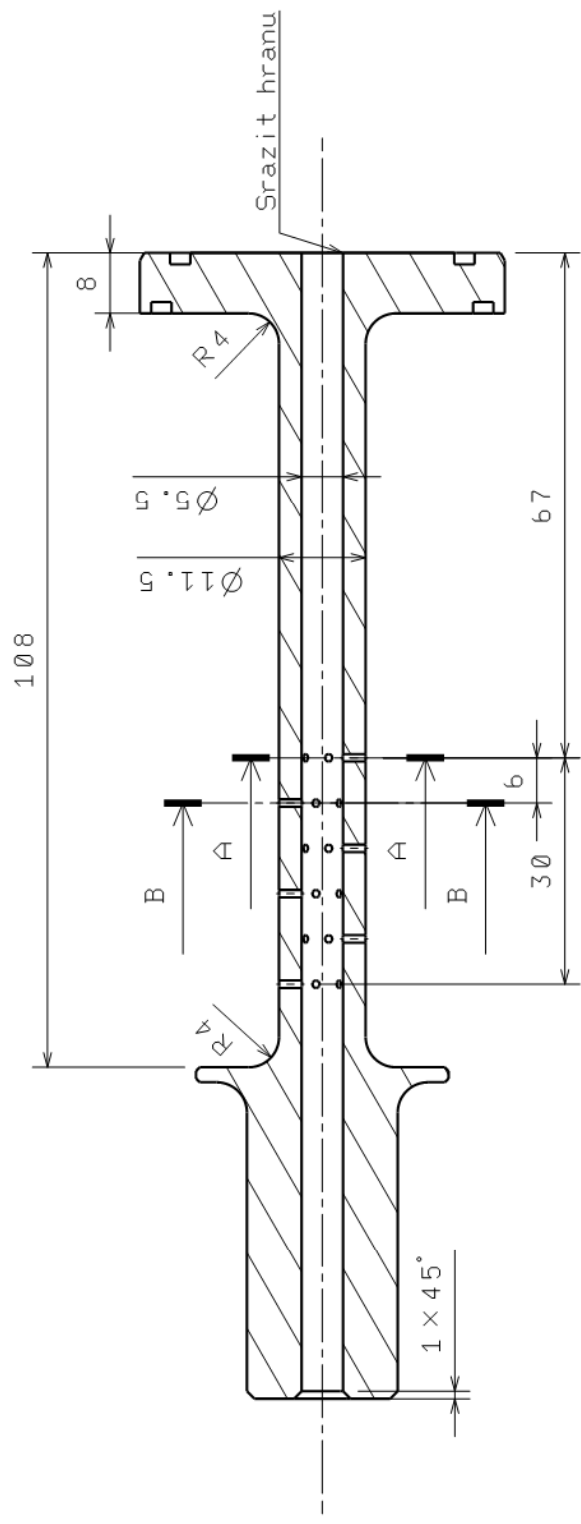
Řez A-A



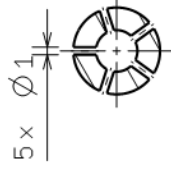
Typ trysky	E21
Délka směšovací komory (mm)	90
Průměr směšovací komory (mm)	5,5
Průměr aeračních otvorů (mm)	0,7
Celkový počet otvorů	60
Počet otvorů v řadě	5
Počet řad	12
Počet řad A	6
Počet řad B	6
Vzdálenost mezi řadami (mm)	2,5
Úhel mezi řadami (°)	36

**Chybějící kóty: Výkres Ø3 E21**

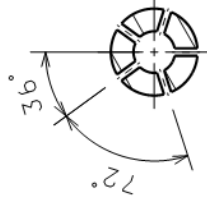




Řez B-B



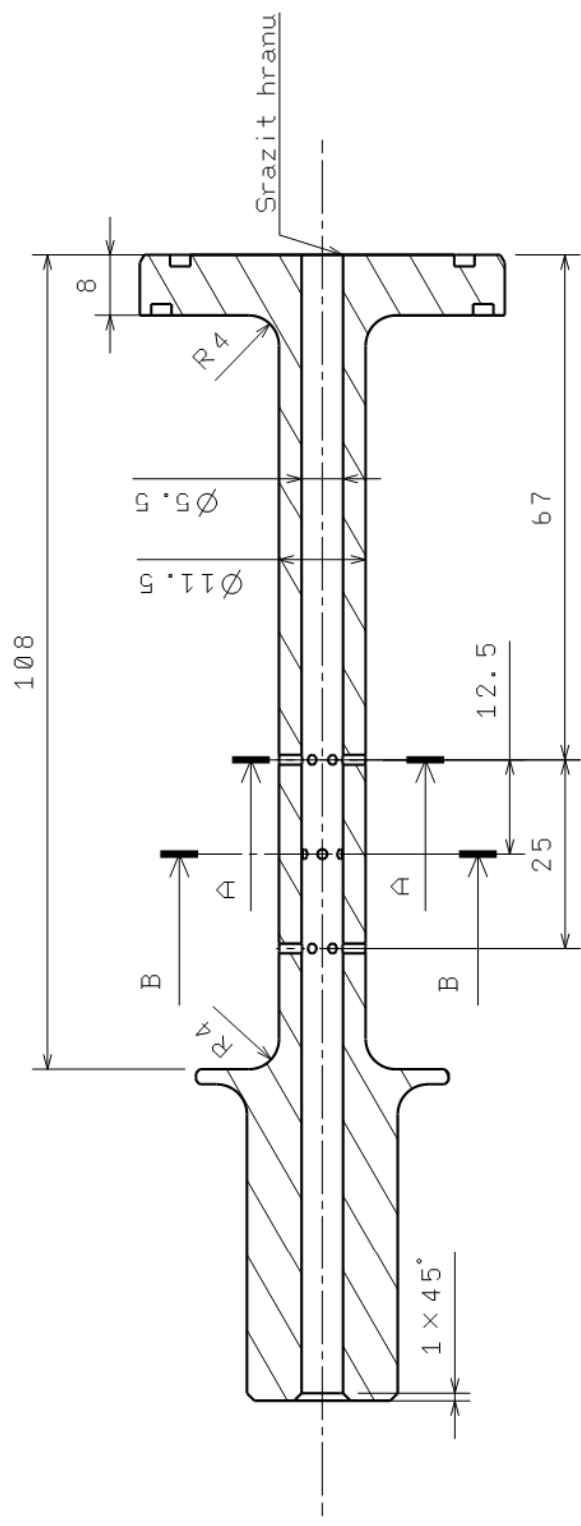
Řez A-A



Typ trysky	E22
Délka směšovací komory (mm)	85
Průměr směšovací komory (mm)	5,5
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	30
Počet otvorů v řadě	5
Počet řad	6
Počet řad A	3
Počet řad B	3
Vzdálenost mezi řadami (mm)	6
Úhel mezi řadami (°)	36

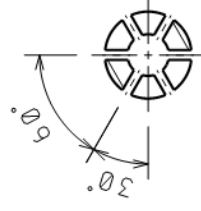
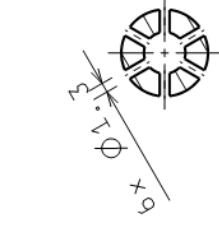
## Chybějící kóty: Výkres Ø3 E22





Řez B-B

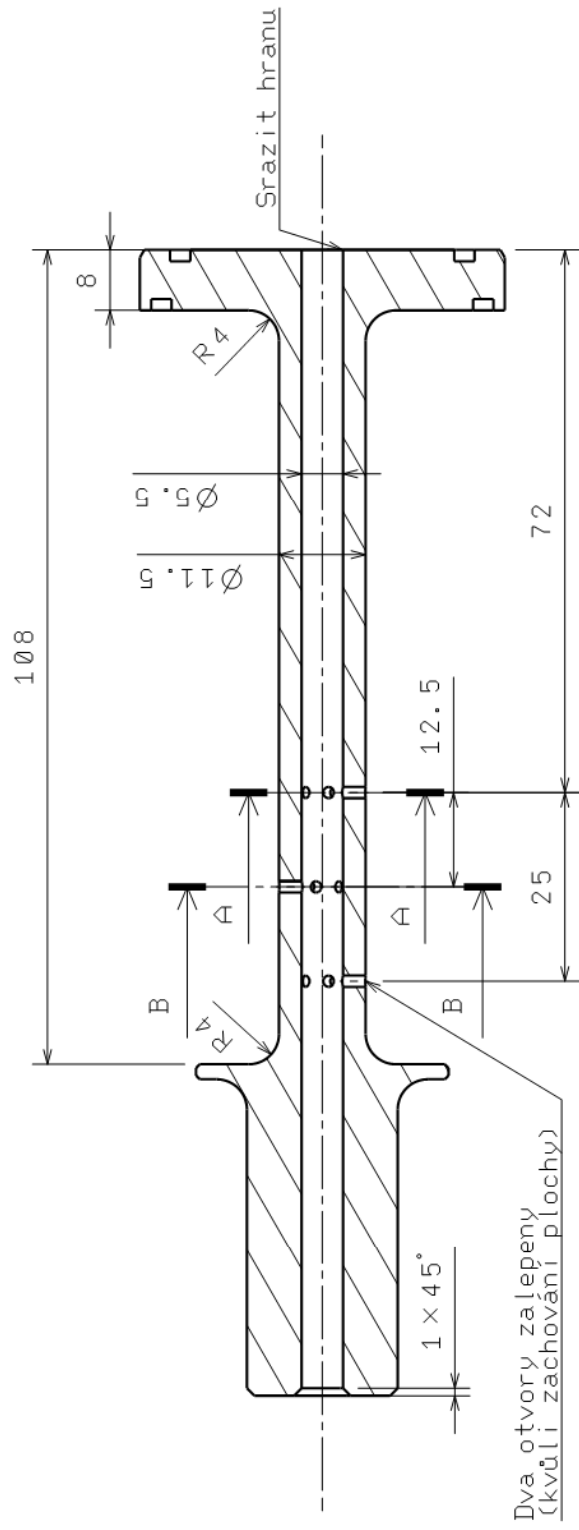
Řez A-A



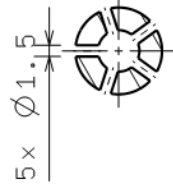
Typ trysky	E23
Délka směšovací komory (mm)	85
Průměr směšovací komory (mm)	5,5
Průměr aeračních otvorů (mm)	1,3
Celkový počet otvorů	18
Počet otvorů v řadě	6
Počet řad	3
Počet řad A	2
Počet řad B	1
Vzdálenost mezi řadami (mm)	12,5
Úhel mezi řadami (°)	30

## Chybějící kóty: Výkres Ø3 E23

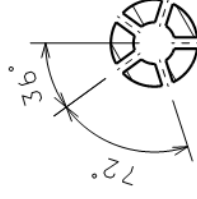




Řez B-B



Řez A-A



Typ trysky	E24
Délka směšovací komory (mm)	90
Průměr směšovací komory (mm)	5,5
Průměr aeračních otvorů (mm)	1,5
Celkový počet otvorů	13
Počet otvorů v řadě	5
Počet řad	3
Počet řad A	2
Počet řad B	1
Vzdálenost mezi řadami (mm)	12,5
Úhel mezi řadami (°)	36

**Chybějící kóty: Výkres Ø3 E24**



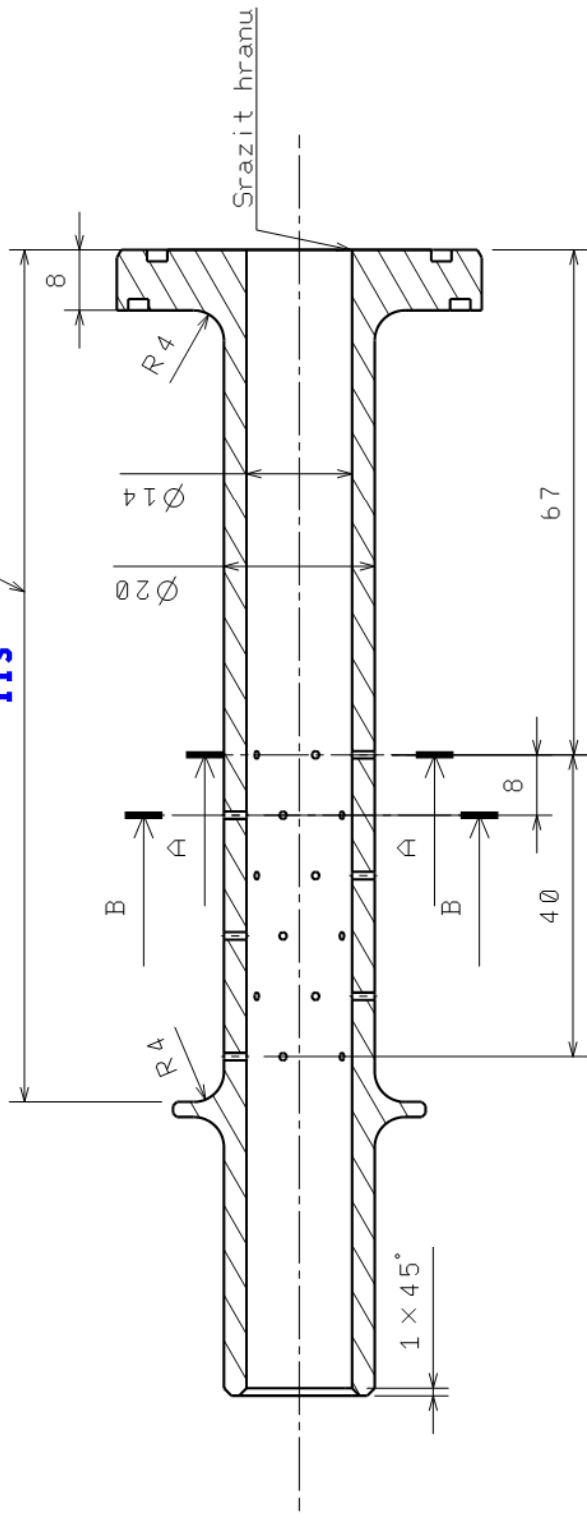






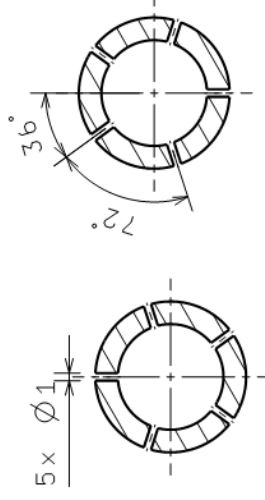


**113** Změna



Řez B-B

Řez A-A



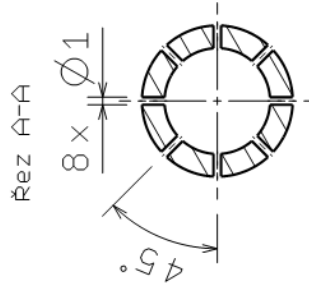
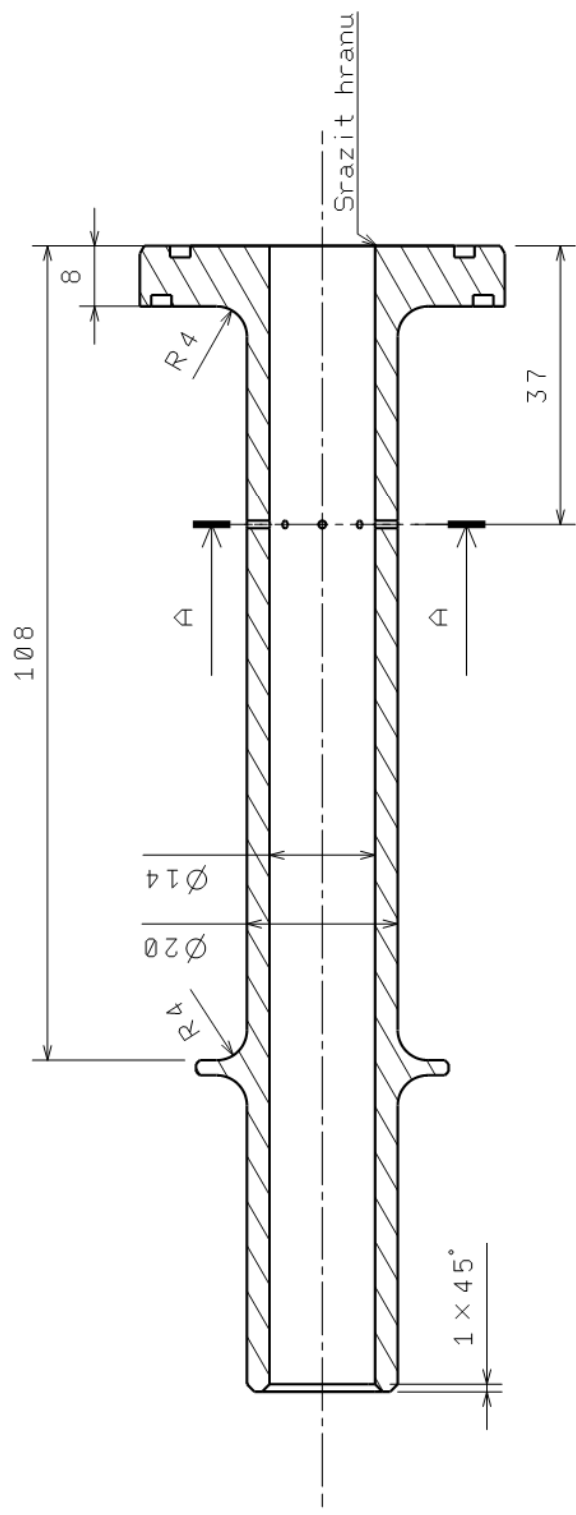
Typ trysky	E28
Délka směšovací komory (mm)	85
Průměr směšovací komory (mm)	14
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	30
Počet otvorů v řadě	5
Počet řad	6
Počet řad A	3
Počet řad B	3
Vzdálenost mezi řadami (mm)	8
Úhel mezi řadami (°)	36

Chybějící kóty: **Výkres Ø3**  
**E28**





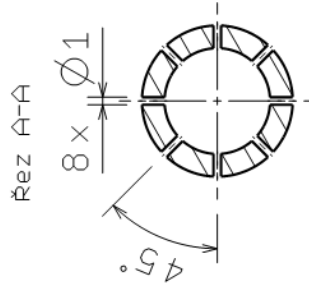
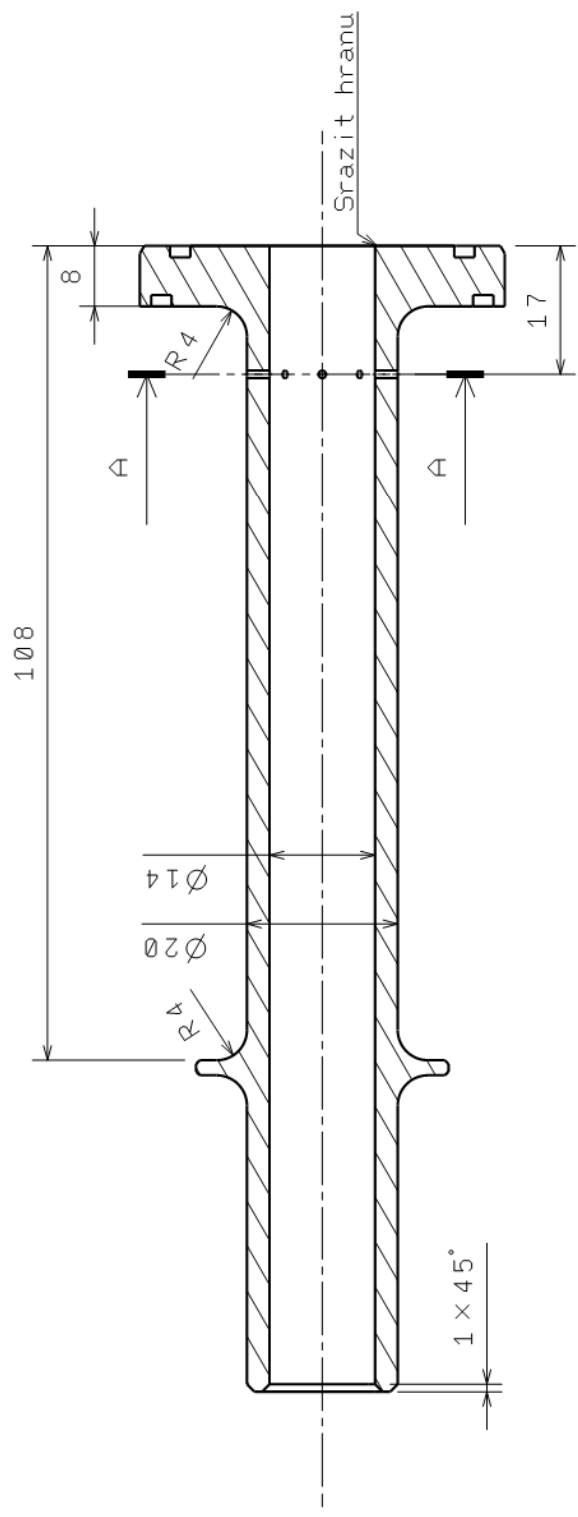




Typ trysky	E30
Délka směšovací komory (mm)	55
Průměr směšovací komory (mm)	14
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	8
Počet otvorů v řadě	8
Počet řad	1
Počet řad A	1
Počet řad B	-
Vzdálenost mezi řadami (mm)	-
Úhel mezi řadami (°)	-

**Chybějící kóty: Výkres 03**  
**E30**

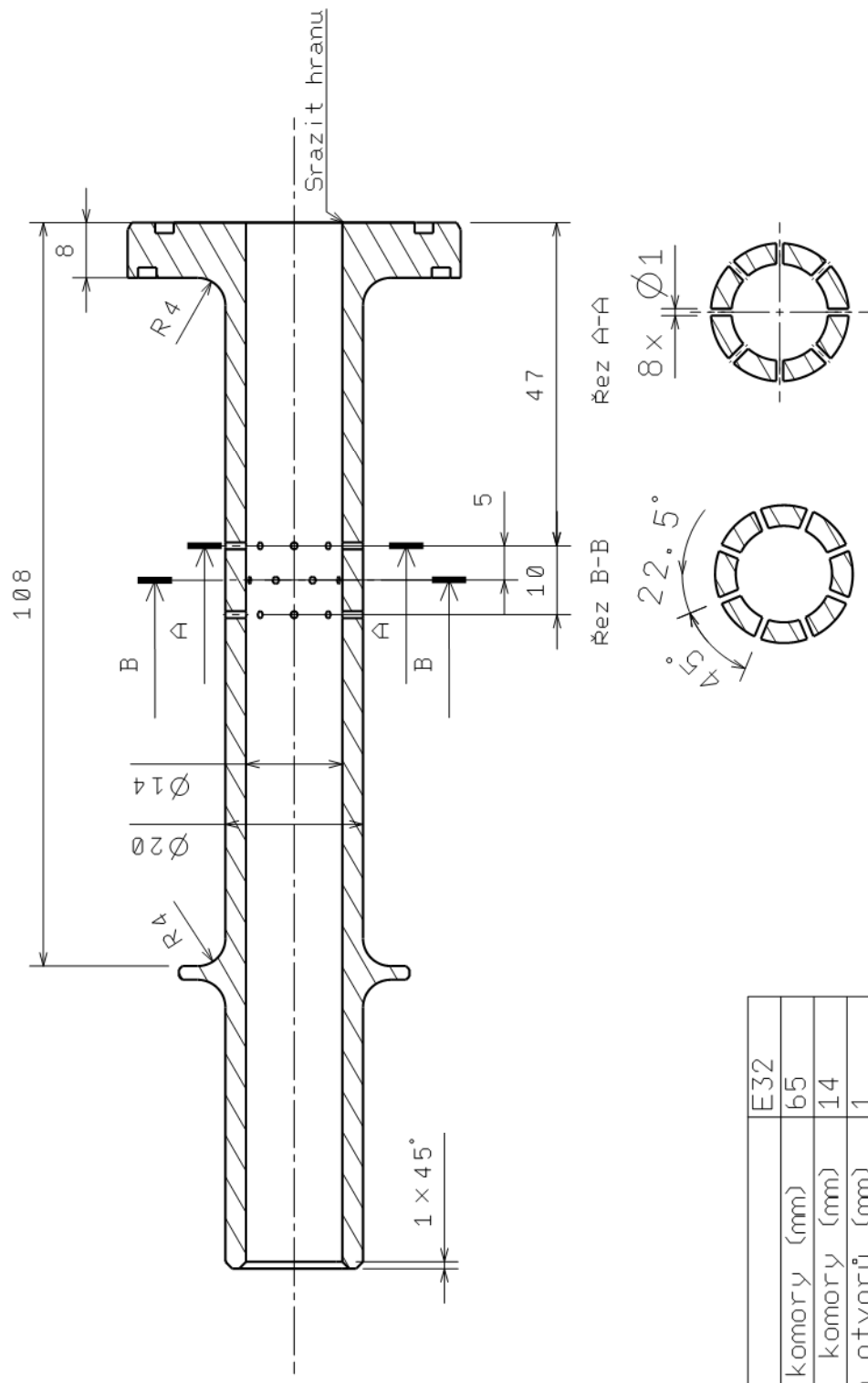




Typ trysky	E31
Délka směřovací komory (mm)	35
Průměr směřovací komory (mm)	14
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	8
Počet otvorů v řadě	8
Počet řad	1
Počet řad A	1
Počet řad B	-
Vzdálenost mezi řadami (mm)	-
Úhel mezi řadami (°)	-

**Chybějící kóty: Výkres 03**  
**E31**





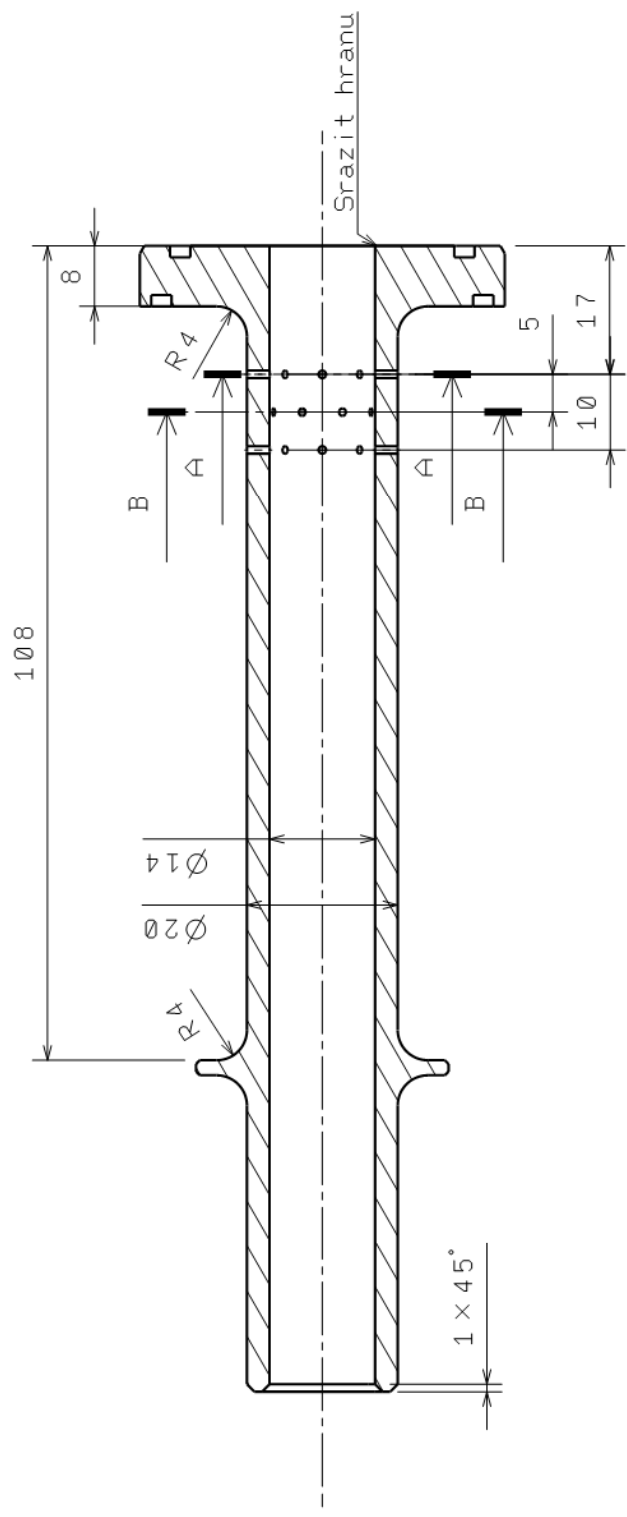
Typ trysky	E32
Délka směšovací komory (mm)	65
Průměr směšovací komory (mm)	14
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	24
Počet otvorů v řadě	8
Počet řad	3
Počet řad A	2
Počet řad B	1
Vzdálenost mezi řadami (mm)	5
Úhel mezi řadami ( $^\circ$ )	22,5

**Chybějící kóty: Výkres 03**  
**E32**

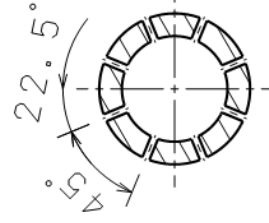




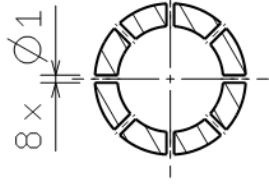




Řez B-B



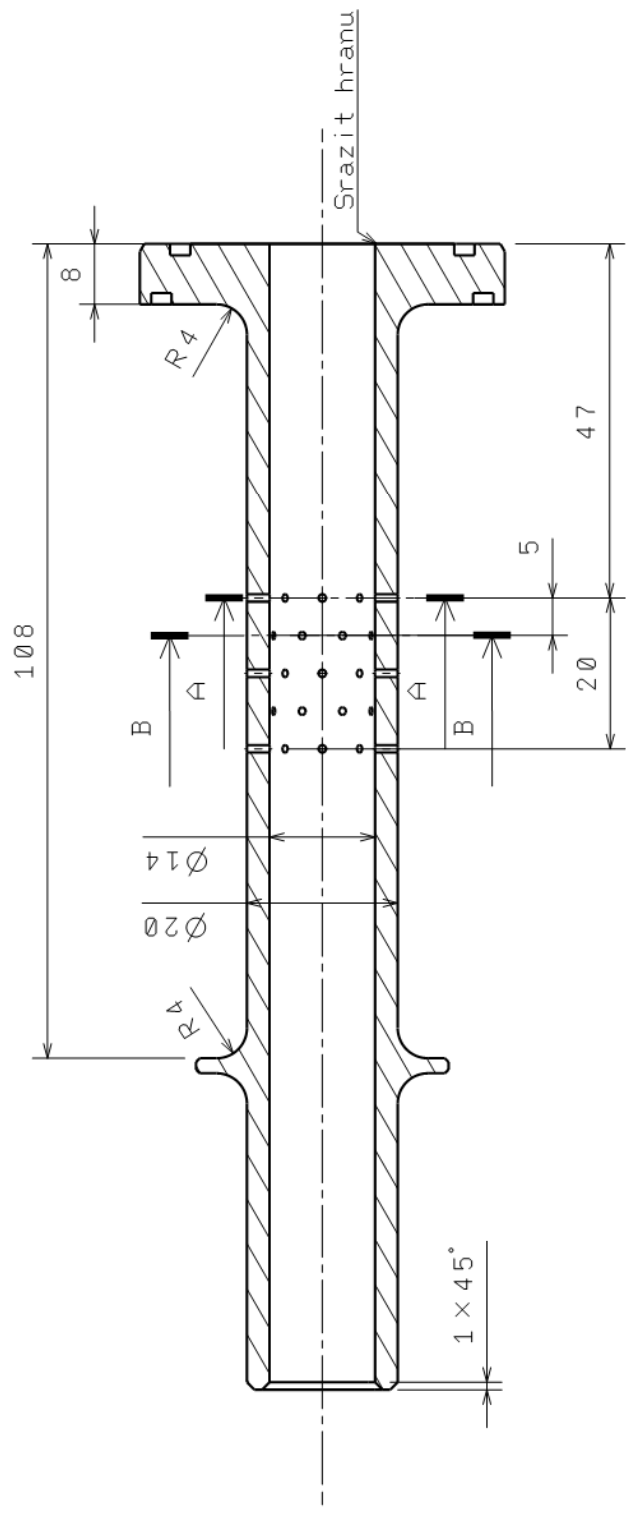
Řez A-A



Typ trysky	E34
Délka směšovací komory (mm)	35
Průměr směšovací komory (mm)	14
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	24
Počet otvorů v řadě	8
Počet řad	3
Počet řad A	2
Počet řad B	1
Vzdálenost mezi řadami (mm)	5
Úhel mezi řadami (°)	22,5

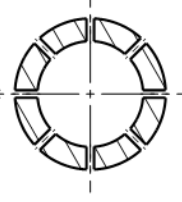
**Chybějící kóty: Výkres 03**  
**E34**





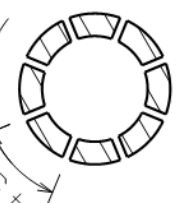
Řez A-A

8 x  $\varnothing 1$



Řez B-B

22,5°



Typ trysky	E35
Délka směšovací komory (mm)	65
Průměr směšovací komory (mm)	14
Průměr aeračních otvorů (mm)	1
Celkový počet otvorů	40
Počet otvorů v řadě	8
Počet řad	5
Počet řad A	3
Počet řad B	2
Vzdálenost mezi řadami (mm)	5
Úhel mezi řadami (°)	22,5

**Chybějící kóty: Výkres 03**  
**E35**





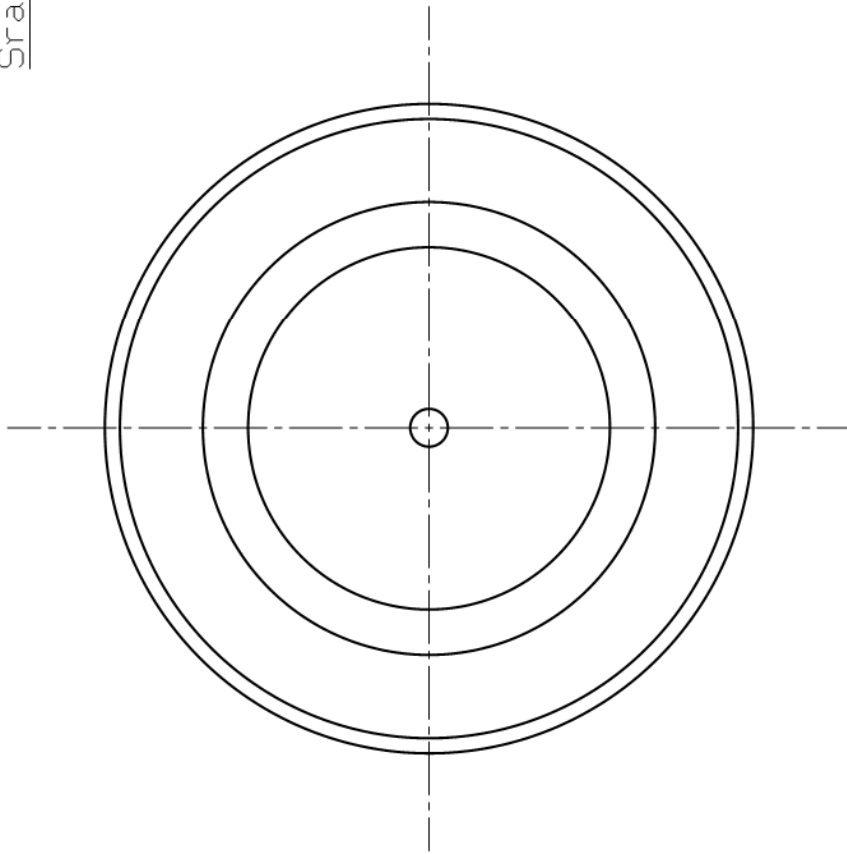
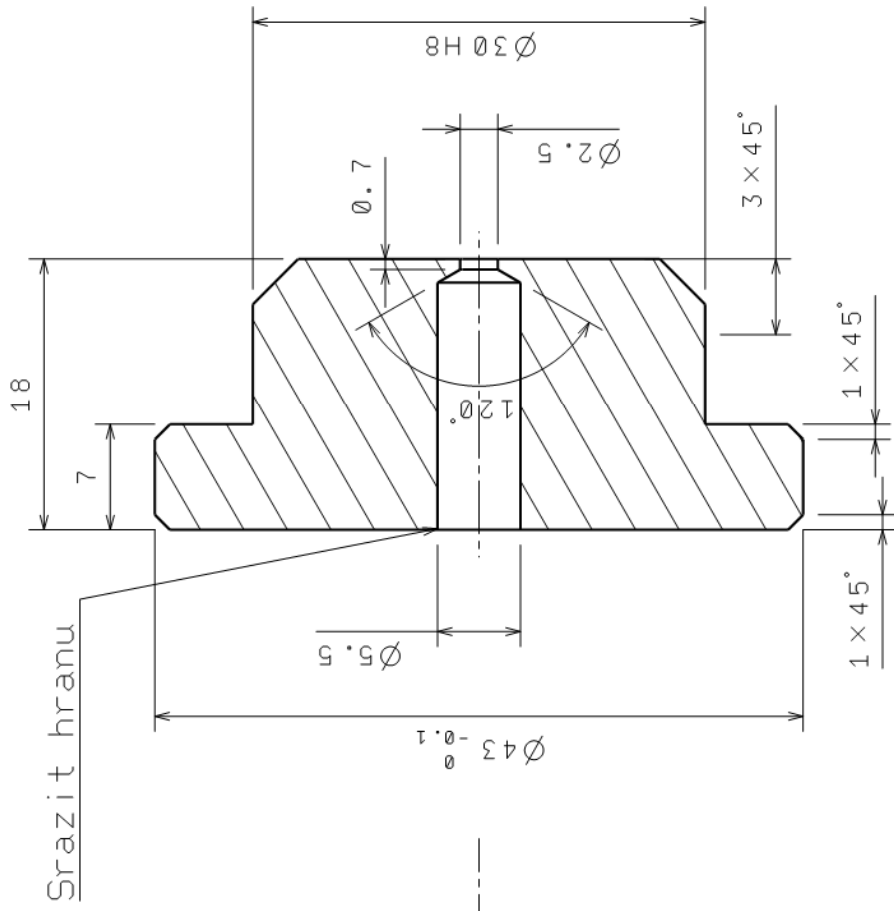












1,6/ (A)

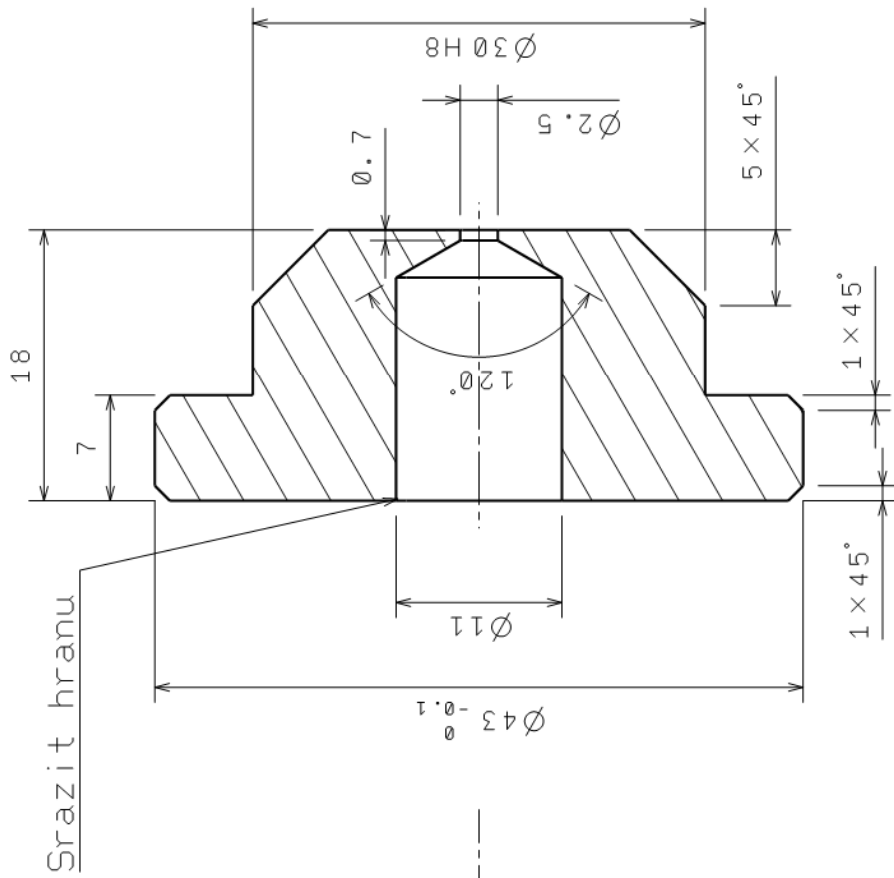
Typ trysky	E21 - E24
Průměr směšovací komory (mm)	5,5
Průměr výstupního otvoru (mm)	2,5
Délka výstupního otvoru (mm)	0,7
Délka výstupní trysky (mm)	18
Úhel rozšíření (°)	120

Chybějící kóty: Výkres Ø4  
E21-E24









1,6 (A)

Typ trysky	E27
Průměr směšovací komory (mm)	11
Průměr výstupního otvoru (mm)	2,5
Délka výstupního otvoru (mm)	0,7
Délka výstupní trysky (mm)	18
Úhel rozšíření (°)	120

**Chybějící kóty: Výkres Ø4**  
**E27**



