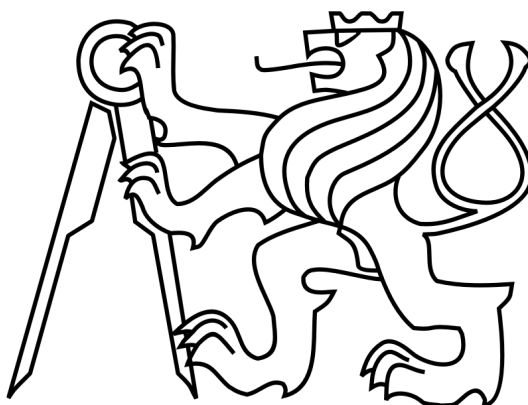


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta Strojní**

**Ústav Letadlové Techniky**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH STANDU  
PRO MĚŘENÍ PALIVOVÝCH TRYSEK**

**DESIGN OF TEST STAND FOR MEASURING SPRAY CHARACTERISTICS OF  
FUEL NOZZLES**

**Jan BENEŠ**

**2018/2019**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu §60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Datum: .....

.....  
podpis

Zadání práce  
(semka přijde ten list který dostaneš od ČVUTu)

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem zkušebního zařízení pro měření sprejových charakteristik palivových trysek pro turbínové motory. V první části se práce zaměřuje na zdůvodnění důležitosti těchto měření, popisuje dnes používané techniky měření, zasazuje je do historického kontextu, dává obraz o možnostech zpětné separace rozprášeného paliva a diskutuje požární rizika spjatá s konstrukcí takového zařízení. Druhá část popisuje konstrukci zařízení tak, jak dle vytvořené výkresové dokumentace vzniklo v laboratořích Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s..

## **Klíčová slova**

sprejové charakteristiky, palivová tryska, fázová Dopplerovská anemometrie, PDA, separace aerosolu

## **Abstract**

The subject of this master thesis is engineering design of test rig allowing to measure spray characteristics of jet engine fuel nozzles. The first part focuses on explanation of why spray characteristics are of such importance, describes current measurement techniques, place them in historical context, gives a picture of fuel mist separation possibilities and discusses fire hazards linked with such devices. The second parts describes the designed test rig as it was built in the laboratories of Czech Aerospace Research Centre, VZLU.

## **Keywords**

spray characteristics, fuel nozzle, phase Doppler anemometry, PDA, fuel mist separation

## **Poděkování**

Tato diplomová práce vznikala na Útvaru turbínových motorů Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu. Rád bych vyjádřil vděk za pomoc a cenné rady rady jeho zaměstnanců, zejména pak Ing. Vojtěchu Bětákovi, PhD., Ing. Janu Dobřichovskému, Ing. Tomáši Jamrůzovi a Ing. Janu Slancovi, PhD..

Za podnětné rady děkuji svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Tomáši Čenskému, PhD., který byl vždy konzultacím otevřen.

Je samozřejmostí, že vypracování této práce by nebylo možné bez podpory mé rodiny.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	8
<b>2</b>	<b>Palivové trysky turbínových motorů</b>	9
2.1	Sprejové charakteristiky trysky	9
2.2	Procesy ve spalovací komoře a důvod měření sprejových charakteristik	9
2.3	Trysky s tlakovým rozprašováním	10
2.3.1	Jednoduché axiální palivové trysky	10
2.3.2	Trysky s vírovou komůrkou	10
2.4	Air-assist a Air-blast trysky	11
2.4.1	Air-assist	11
2.4.2	Air-blast	12
2.5	Odpařovací trysky	12
2.6	Rozstříkovací kroužky	13
<b>3</b>	<b>Metody měření sprejových charakteristik</b>	13
3.1	Metody založené na měření průtočného objemu	14
3.2	Optické měřicí metody	15
3.2.1	Particle Image Velocimetry	16
3.2.2	Interferometric Particle Imaging	16
3.2.3	Fázová Dopplerovská Anemometrie	17
<b>4</b>	<b>Zkušební zařízení pro měření palivových trysek</b>	20
<b>5</b>	<b>Specifika zařízení pracujících s výbušnou atmosférou</b>	23
5.1	Požární bezpečnost	23
5.2	Metody separace aerosolu	23
5.2.1	Princip funkce koalescenčních filtrů	24
<b>6</b>	<b>Úvod do konstrukční části</b>	25
6.1	Organizace výkresové dokumentace a kusovníku	26
6.2	Konstrukce zkušebního zařízení	27
6.3	Rozdělení do zón dle nebezpečí výbuchu	29
<b>7</b>	<b>Návrh 3-osého traverzéro</b>	32
7.1	Přesnost traverzéro	34
7.2	Alternativní návrhy traverzéro	35
7.3	Odstínění krokových motorů	37
7.4	Návrh uchycení palivové trysky	37
7.4.1	Utahovací moment šroubu upínky	38
7.4.2	Deformace upínky trysky vyvolaná utahovacím momentem	40
<b>8</b>	<b>Vzduchové cesty</b>	41
8.1	Separace palivové mlhy	42
8.1.1	Technologické zpracování separátoru	43

8.1.2 Koalescenční patrona . . . . .	44
<b>9 Technologie výroby a výběr materiálů . . . . .</b>	<b>47</b>
9.1 Průhledová stěna . . . . .	47
9.2 Těsnění . . . . .	48
9.3 Výběr kovových materiálů . . . . .	49
9.4 Technologické úpravy při výrobě . . . . .	50
<b>10 Upevnění měřicího zařízení . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>11 Odvod paliva . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>12 Konstrukční úpravy při montáži . . . . .</b>	<b>54</b>
12.1 Vyztužení konstrukce standu . . . . .	54
12.2 Vyztužení konstrukce optické lavice . . . . .	55
<b>13 Závěr . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Seznam použitých značek a symbolů . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>Seznam použité literatury a zdrojů . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>Seznam použitého SW . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>Seznam příloh . . . . .</b>	<b>65</b>

# 1 Úvod

Téma této diplomové práce vzniklo ve spolupráci s Výzkumných a zkušebním leteckým ústavem, a.s. jako součást projektu pro vývoj spalovací komory turbínového motoru. Cílem této diplomové práce je provést konstrukční návrh zkušebního zařízení pro měření rychlostních polí palivových trysek.

Spalování je v tepelných motorech alfou a omegou jejich činnosti. Spalovací procesy probíhající ve spalovací komoře a její návrh je minimálně stejně důležitý jako je návrh kompresoru nebo turbíny.

Honba za nízkými emisemi, rovnoměrností teplotního pole na výstupu ze spalovací komory a vstupu do turbíny, účinností motoru a dalších parametrů, staví konstruktéry spalovacích komor leteckých turbínových motorů do nelehké pozice. Fyzikální a chemické procesy ve spalovací komoře, jako jsou proudění, hoření, přenos tepla a jiné, jsou jen limitně zvládnutelné výpočetními metodami, její návrh není jednoduchá věc a obsahuje velké množství empirie. Finální návrh se tedy neobejde bez zkoušek, které ověří, zda navrhnutá část opravdu dosahuje potřebných parametrů.

Spalovací komoru je nutné chápat jako celek, jejíž části tak musí být také navrženy. Je to systém fungující na termodynamické vazbě mezi jejími částmi, ale také mezi částmi, které na ni navazují. Je evidentní, že pro sladění funkce takto složitě termodynamického systému je nutné testovat funkce komponent na nejnižší úrovni a postupně přecházet k vyšším sestavám.

Palivové trysky se zkouší nejen při vývoji komory, ale jejich zkoušením je také možné zjistit dodržení výrobních tolerancí a postupů před jejich uvedením do provozu. Ukazatelem, jak jsou trysky ve spalovací komoře namáhány a opotřebený, je jejich zkoušení při rozborce motoru. Tato práce se zabývá konstrukcí zkušebního zařízení pro měření sprejových charakteristik palivových trysek. Mimo tato měření sprejového kužele vířivé tlakové trysky, se také někdy měří rovnoměrnost spreje všech trysek v palivové rampě.

Konstrukci zkušebních zařízení si výrobci drží jako své know-how a vývoj těchto zařízení tak probíhá většinou od základu. V následujících kapitolách bude návrh tohoto zkušebního zařízení, jeho systémů a principů funkce detailně rozebrán.



## 2 Palivové trysky turbínových motorů

Letecké turbínové motory pracují na kapalná paliva. Palivem je letecký petrolej, také nazývaný kerosin, popř. obchodním názvem JET-A1. Pro přípravu směsi - mísení paliva se vzduchem se používají palivové trysky. V této kapitole bude čtenář v krátkosti seznámen s procesy ve spalovací komoře, typy trysek a jejich měřenými charakteristikami.

### 2.1 Sprejové charakteristiky trysky

Sprejové charakteristiky jsou soubor parametrů trysky, které ji definují. Jedná se zejména o rychlost a velikost kapiček spreje a tvar, rozložení a úhel kužele spreje. V následujících kapitolách, sloužících jako teoretická opora při návrhu, bude čtenář seznámen se současností i historií měření těchto sprejových charakteristik, používanými metodami a konstrukcí zařízení umožňujících jejich měření.

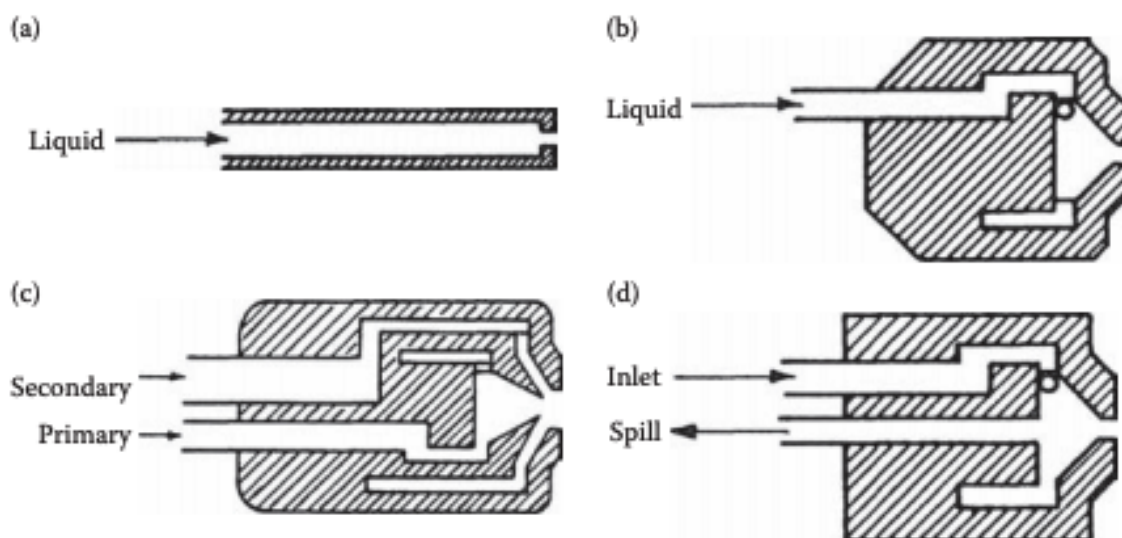
### 2.2 Procesy ve spalovací komoře a důvod měření sprejových charakteristik

Proces hoření nejen ve spalovací komoře turbínového motoru je silně závislý na připravené směsi. U turbínového motoru spalujícího letecký petrolej, pro civilní letectví nejčastěji používaný typ JET-A1, se do spalovací komory palivo dodává palivovou tryskou. Pro dosažení vysoké účinnosti hoření, rovnoměrného teplotního pole vystupujícího ze spalovací komory a nízkých emisí je důležité kvalitní rozprášení paliva. Rozprášení paliva, tzv. atomizace, je proces, kdy je tekutina rozložena na shluk malých kapiček s vysokým poměrem povrchu kapičky ku její hmotnosti pro rychlé odpaření paliva. K odpaření paliva musí dojít dříve, než hořlavá směs palivo - vzduch dosáhne zóny hoření ve spalovací komoře. V opačném případě by nemuselo dojít k úplnému shoření paliva, z toho plynoucích vysokých emisí, ochabnutí výkonu, nehomogenitě výstupního teplotního pole a částečné karbonizaci paliva. Atomizace je dosaženo vysokým rozdílem rychlostí vstříkovaného paliva a proudu vzduchu procházejícím spalovací komorou. Některé trysky používají k dosažení vysokého rozdílu těchto rychlostí vstříkování paliva do komory velkou rychlostí vzhledem k poměrně menší rychlosti ve spalovací komoře, jiné používají naopak proud paliva o relativně malé rychlosti k proudu vzduchu spalovací komorou. Zástupcem první kategorie trysek jsou například air-assist a air-blast trysky nebo roztrhací kroužky. Mezi zástupce druhé kategorie patří jedno a dvoukomůrkové trysky, které přeměňují energii paliva podáváného pod vysokým tlakem a prostupující malým otvorem na energii kinetickou, tedy rychlostní. Dále existují tzv. odpařovací trysky, kdy palivo přechází do plynného skupenství dodáním

tepla ze spalovací komory. V následujících podkapitolách rozvedu některé druhy trysek podrobněji. [1]

## 2.3 Trysky s tlakovým rozprašováním

Jak již název napovídá, trysky s tlakovým rozprašováním používají palivo pod vysokým tlakem, který se mění na kinetickou energii ve výstupním otvoru trysky. Dle konstrukce je můžeme rozdělit na jednoduché axiální tlakové trysky a trysky s vírovou komůrkou.



**Obř. 1:** Principy fungování tlakových trysek: a) Jednoduchá axiální tryška. b) Palivová tryška s vírovou komůrkou. c) Dvoukomůrková tryška. d) Tryška se zpětným odtokem. Zdroj: [2]

### 2.3.1 Jednoduché axiální palivové trysky

Atomizace paliva je dosaženo tlačení paliva skrz malý otvor, ve kterém se tlaková energie paliva mění na kinetickou. Tyto trysky jsou výrobně i principiálně nejjednodušší. Atomizace paliva je závislá na vstupním tlaku paliva. Při nízkém tlaku tvoří vystupující palivo paprsek. Při postupně se zvyšujícím tlaku se paprsek od středu otevírá a přes tzv. bubble a tulip shape nabývá tvaru kužele [2]. Tyto trysky se používají například u přídavného spalování nebo jako součást dalších typů trysek. [6]

### 2.3.2 Trysky s vírovou komůrkou

Přidáním tangenciální složky rychlosti palivu před výstupem z trysky dokážeme dosáhnout širšího kužele rozprašení z důvodu odstředivé síly kapiček působící od osy trysky. Tyto trysky můžeme dále rozdělit na:

### **Jednokomůrkové trysky**

Jednokanálový přístup paliva u tohoto typu trysek způsobuje problémy při změně režimů motoru. Průtok paliva tryskou roste s druhou mocninou tlaku. Dle [6] lze takto dosáhnout pouze  $4 \div 5$  krát většího průtoku paliva, než je hodnota při tlaku, při kterém je kvalita rozprášení ještě dostatečná. Tento rozsah je přijatelný u jednorežimových motorů, avšak pro pohonné motory je nedostatečný. Tento fakt vedl k vývoji vícerežimových trysek. Příkladem takovýchto trysek jsou trysky dvoukomůrkové nebo trysky ze zpětným odtokem.

### **Trysky se zpětným odtokem**

Trysky se zpětným odtokem mají podobný design jako trysky jednokomůrkové, avšak zadní stěna vírové komůrky je otevřená a palivo se tudy vrací zpět do palivového systému. Tlak v trysce je vždy dostatečně vysoký zajišťující dobré rozprášení paliva. Negativem těchto trysek je nutnost použití vysokotlakých čerpadel mající vysokou hmotnost a velké variace úhlu kužele spreje při změně průtoku tryskou.

### **Dvoukomůrkové trysky**

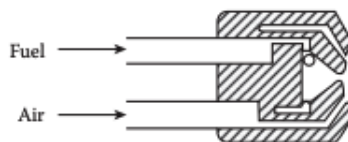
Dvoukomůrková tryska je tvořena dvěma koncentricky složenými jednokomůrkovými tryskami - primární a sekundární. Primární tryska, zpravidla vnitřní, je v provozu při nízkých otáčkách motoru, tedy malém průtoku paliva, se zvyšujícími se otáčkami motoru a tedy rostoucím průtokem paliva se připojuje tryska sekundární. Takováto tryska dokáže při stejném růstu tlaku zvýšit průtočné množství paliva 5 krát oproti trysce jednokomůrkové [2]. Tyto trysky jsou u dnešních turbínových motorů hojně používány.

## **2.4 Air-assist a Air-blast trysky**

Dvojici těchto typů trysek spojuje přítomnost rychle proudícího vzduchu strhávajícího kapičky pomaleji proudícího paliva. Rozdílný je však poměr vzduch/palivo.

### **2.4.1 Air-assist**

Řešením problému jednokomůrkových trysek, kdy je omezen poměr mezi nejnižším tlakem, kdy je palivo ještě dostatečně rozprašováno a maximálním tlakem, který je možné vyvinout z důvodu výkonu čerpadel a těsnosti palivového systému se přistupuje k využití kinetické energie vzduchu. Tento vzduch je povětšinou přiváděn kanálem rovnoběžně s palivem a při i při nízkých tlacích paliva dává dobré rozprášení. Technických provedení těchto trysek existuje mnoho. V případě air-assist trysek je vzduch přiváděn v nižším poměru vzhledem k palivu než u trysek air-blast a používá vzduch o vyšší rychlosti zpravidla vedený od kompresoru [2].



**Obr. 2:** Air-assist palivová tryška. Zdroj: [38].

### 2.4.2 Air-blast

Na obr. 3 si u řezu air-blast tryškou můžeme všimnout kanálu přívodního vzduchu středem tryšky. Palivo ústí z mezikruží kolem ústí středového kanálu vzduchu. Další proud vzduchu s tangenciální složkou rychlosti je přiváděn kanálem na vnějším mezikruží. Trysky mívají tangenciální rychlosti paliva a proudů vzduchu s různými smysly rotace. Proud vzduchu na vnější obvodu je přiváděn v malé vzdálenosti za ústí tryšky paliva, aby nedocházelo ke karbonování výstupního otvoru tryšky. Air-blast tryšky mají nesporné výhody oproti jednokomůrkovým palivovým tryškám. Produkují jemnější sprej a palivo nemusí být dodáváno pod příliš vysokým tlakem. Promísení směsi je kvalitnější z důvodu vyššího stupně víření za tryškou.

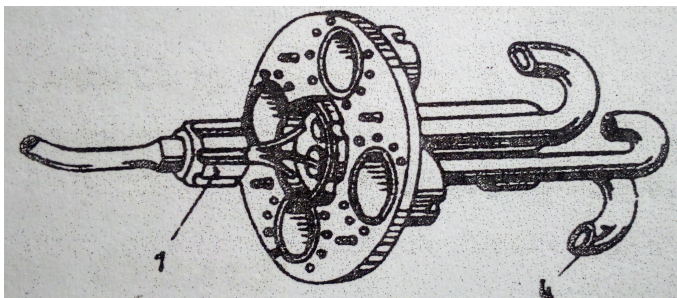


**Obr. 3:** Řez Air-blast palivovou tryškou. Zdroj: [2].

## 2.5 Odpařovací tryšky

Zajímavým typem palivových trysek jsou tzv. odpařovací tryšky. Palivo je podáváno do odpařovací trubky jednoduchou axiální tryškou, do které vstupuje společně se vzduchem proudícím od kompresoru. Odpařovací trubka zasahuje do horké oblasti spalovací komory a teplem ze spalování se palivo v této trubce odpařuje. Palivo poté vstupuje většinou v

protiproudém směru do spalovací komory. Problémy těchto trysek bývají při rychlém zvýšení otáček, při kterém je do odpařovací trubky dopraveno velké množství paliva a to se vlivem ochlazení od změny skupenství nestací odpařit, to vede k poklesu účinnosti spalování a kouřivosti. Dalšími problémy jsou spouštění za letu a karbonování uvnitř trubek. [7] Výhodami je jejich výrobní jednoduchost a malé nároky na přesnost.



**Obr. 4:** Odpařovací palivová tryska. Číslem 1 je označena jednoduchá axiální tryska dodávající palivo do odpařovací trubky pod označením 4. Zdroj: [7].

## 2.6 Rozstříkovací kroužky

Tento systém rozprašování paliva používá nízkotlaké čerpadla dodávající palivo dutou hřídelí motoru do prostoru spalovací komory, kde je otvory v hřídeli odstředivou silou rozstříkováno. Otvory bývají zpravidla v jedné nebo i dvou řadách a jejich průtočná kapacita nekolinásobně převyšuje průtok při maximálních otáčkách motoru. Toto opatření zabrání blokaci děr nečistotami. Při výrobě musí být kladen důraz na přesnou výrobu děr a vnitřní geometrie duté hřídele v případě dvouřadého uspořádání. V opačném případě by některé trysky dodávaly více paliva a tvořily tak rotující hot-spot, který má za následek nadměrné čerpání životnosti turbíny. Tento typ trysek se používá zejména u malých motorů s prstencovou spalovací komorou a plamencem, například u motoru tuzemské výroby Walter M-601, současného GE H80.

## 3 Metody měření sprejových charakteristik

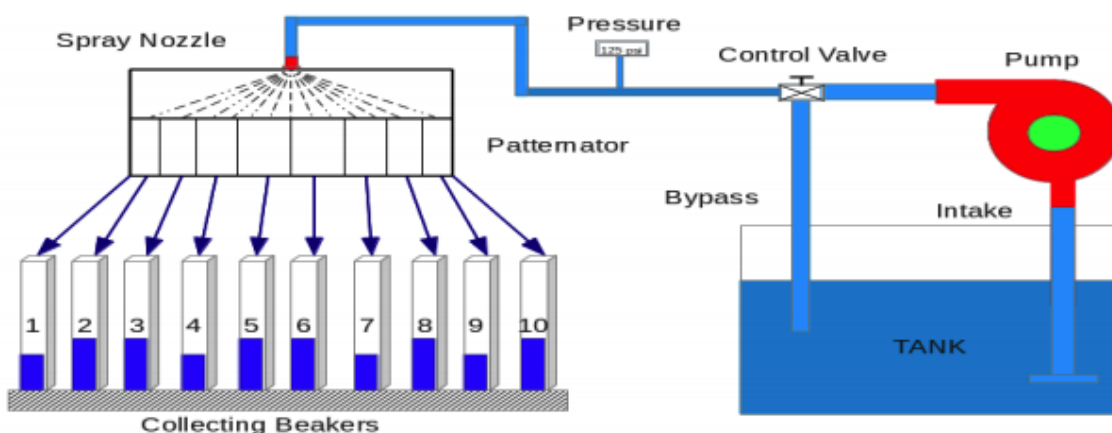
Jak již bylo zmíněno, sledovanými veličinami u palivových trysek rozumíme tzv. sprejové charakteristiky - rychlost a velikosti kapiček a tvar, rozložení a úhel kužele spreje. Úhel sprejového kužele je definován v různých zdrojích různě, proto jako názornou a jednoduchou uvedu definici dle [10], kde je tento úhel definován jako úhel mezi dvěma přímkami, které prochází středem výstupního otvoru trysky a jsou tečné na vnější povrch spreje v určitém řezu a vzdálenosti od výstupního otvoru trysky. Všechny tyto parametry jsou závislé na tlaku paliva vstupujícího do trysky a samotném typu trysky. Sprej jednodukové

palivové trysky (tedy trysky stejného typu, která bude zkoušena na konstruovaném zařízení) v turbínovém motoru má zpravidla tvar dutého kužele. Toho je dosaženo tangenciálním roztočením paliva v komůrce trysky před jeho výstupem otvorem trysky. Úhel sprejového kužele bývá nejčastěji v rozmezí  $70^\circ \div 110^\circ$ , ale samozřejmě se můžeme setkat i jinými hodnotami.

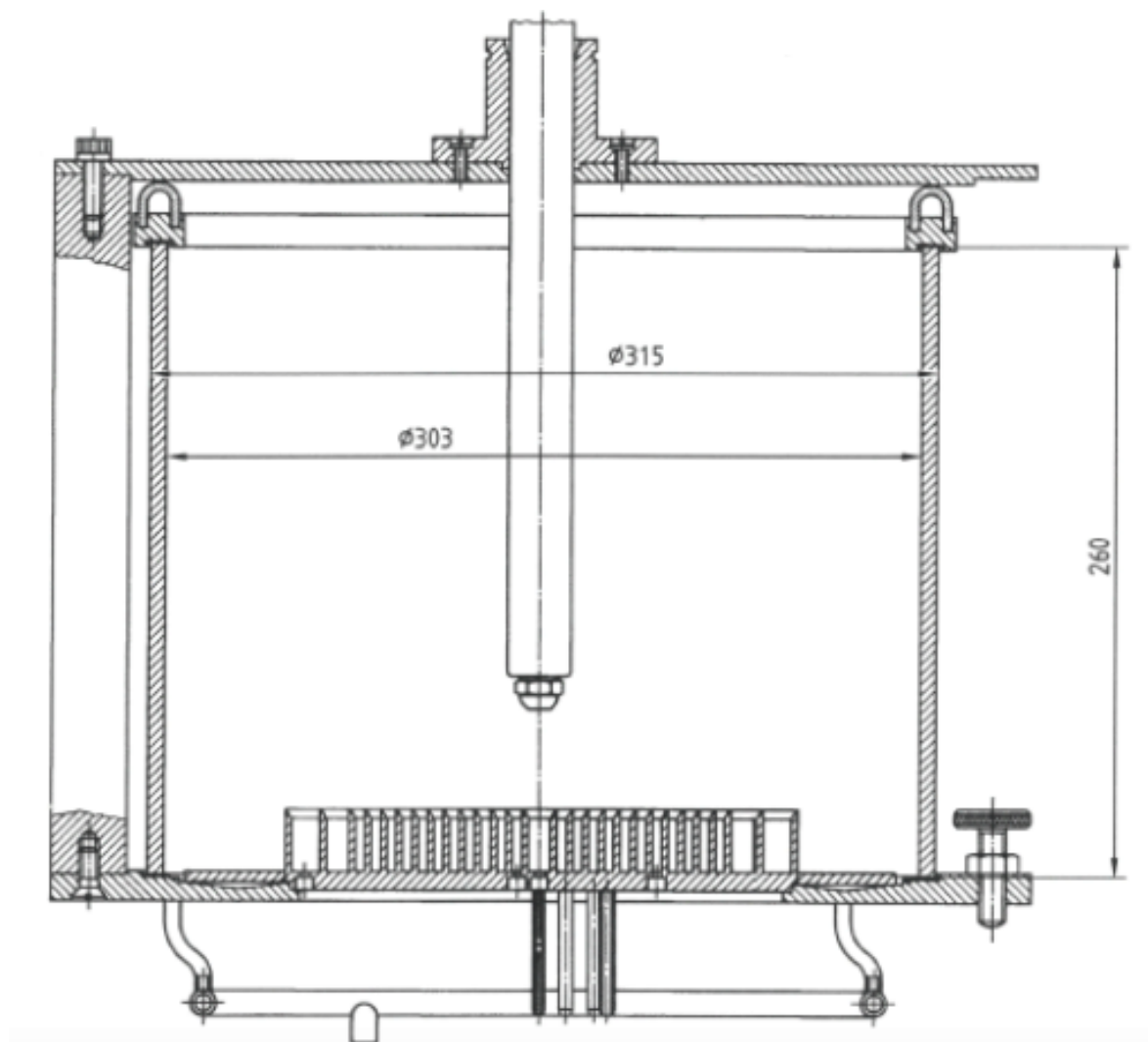
Metody používané pro měření rychlostních polí sprejů můžeme rozdělit na metody, které se opírají o měření průtočného objemu, tedy množství tekutiny nashromážděné v odměrném válci za časový interval a metody, které mají svůj základ v optických metodách. V následující kapitole budou obě tyto skupiny metod rozebrány.

### 3.1 Metody založené na měření průtočného objemu

V minulosti, kdy nedospělost výpočetních systému zabraňovala v použití optických metod měření, se uplatnila metoda měření paternace spreje pomocí odměrných válců vyskládaných do soustředného terčíku. Tryska je v tomto případě zavěšena v definované výšce nad tímto terčíkem a po stanovenou dobu uvedena do provozu. Po uplynutí doby se tryska odstaví z provozu a sprejový obrazec se zjistí z množství tekutiny v jednotlivých válcích. Tato metoda poté dá obraz o rozložení hmotnostního toku paliva jednotlivými částmi spreje v jednom řezu, nedává však žádnou informaci o lokálních rychlostech a hustotách spreje v jednotlivých bodech sprejového kužele nebo velikosti kapiček. Norma [3] nespecifikuje rozložení odměrných válců. Česká norma [4] udává rozmístění odměrných válců. Obě normy poté zavádí své vyhodnocení charakteristik spreje. Konkrétní rozmístění není pro tuto rešerši důležité a cílem tohoto odstavce je upozornit na jistou benevolenci ve volbě měřícího postupu a následného vyhodnocení dat, které může sloužit jako analogie volby a způsobu měření optickými metodami. Obrázky 5 a 6 ilustrují možná uspořádání měřících zařízení.



**Obr. 5:** Schéma experimentu provedeného metodou odměrných válců. Zdroj: [10]



**Obr. 6:** Schéma měření dle české normy z roku 2010. Zdroj: [4]

Kalibrace nebo i samotné měření je možné provádět se substituční tekutinou, kterou může být kupříkladu MIL-C-7024 type II, také nazýván angl. Stoddard Solvent Calibration Fluid. Použití takovéto tekutiny snižuje požární nebezpečí při současném zachování (nebo tolerovaném odklonu) fyzikálních vlastností leteckého paliva JET-A1. [3]

### 3.2 Optické měřicí metody

Substitucí odměrných metod měření popsaných v předchozích odstavcích je zavedení metod optických, které nabízí kromě větší přesnosti měření i rozsáhlé možnosti práce s naměřenými veličinami. Mezi hlavní používané metody patří Particle Image Velocimetry (zkráceně PIV), Fázová Dopplerovská Anemometrie (PDA) a Interferometry Particle Imaging (IPI). Tyto tři metody v krátkosti popíšu a zhodnotím vhodnost použití.

### 3.2.1 Particle Image Velocimetry

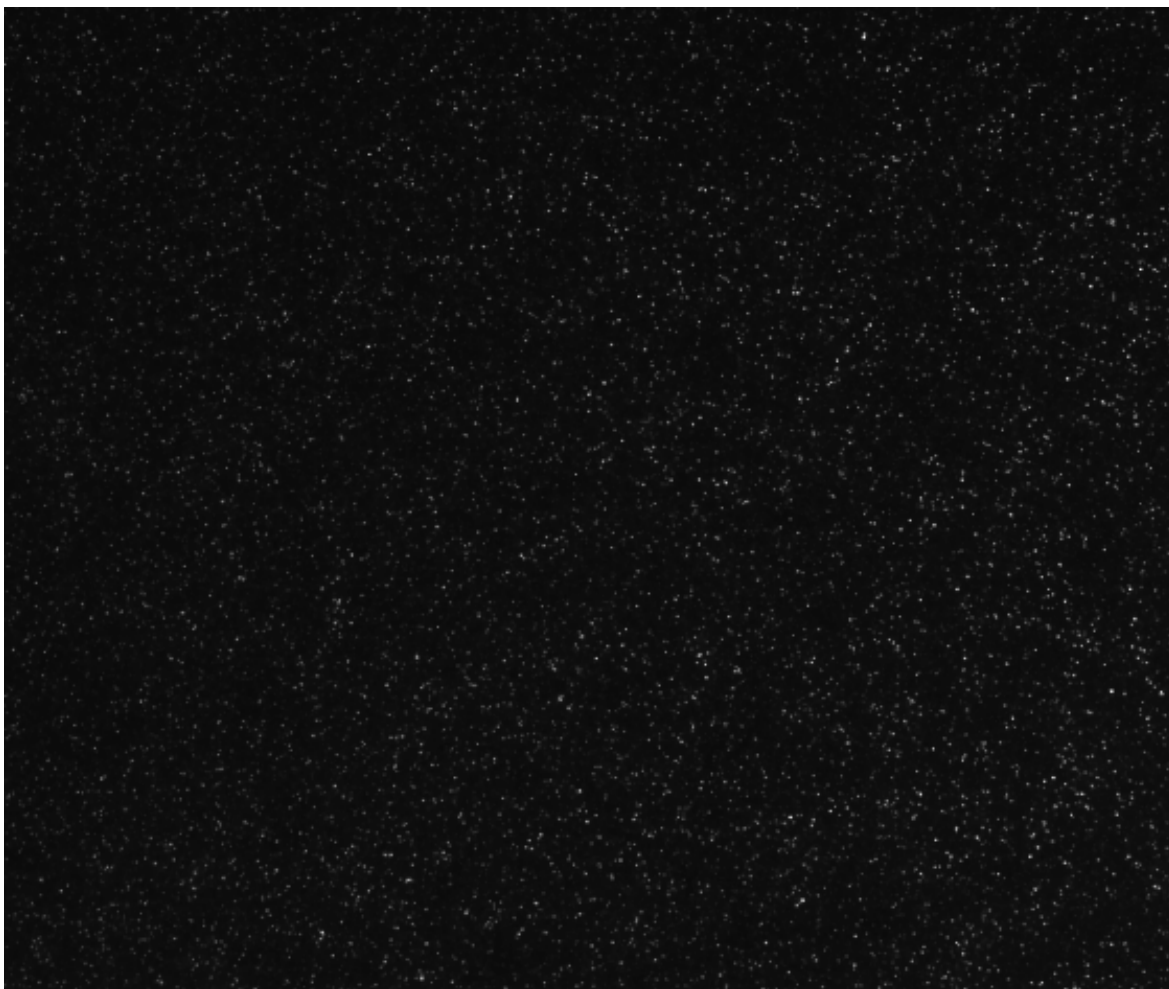
Metoda PIV je metoda experimentální mechaniky tekutin, která se používá k určení rychlostních polí za pomoci částic rozptýlených v médiu a nedokáže zjistit přesnou velikost částic spreje. Metoda využívá výkonný laser roztažený ze svazku do roviny do tvaru tzv. laserového nože. Aparatura dále obsahuje vysokorychlostní kameru, která snímá sledovaný prostor ve dvou po sobě jdoucích okamžicích. Dva po sobě jdoucí snímky jsou rozřezány na obdélníkovou síť menších snímků a z těch je přes kroskorelační funkci určeno natočení a posunutí shluku nasnímaných částic, které přisoudí vektor rychlosti příslušný tomuto výřezu. Celé rychlostní pole se poté skládá z takto získaných vektorů rychlosti. Jako částice slouží ve vzduchu kapičky různých kapalin, v kapalinách jsou to poté pevné částice. Obecně je snaha o použití trasovacích částic s hustotou co nejbližší hustotě měřeného média, aby tyto částice, podle nichž se rychlostní pole určuje, svým pohybem dostatečně reprezentovaly pohyb tekutiny. Tato metoda se používá i u měření sprejů, jako je to například v [11] a zde se za trasovací částice používají jednotlivé kapičky spreje. Její výhodou oproti PDA je velké prostorové rozlišení, které dovoluje zjistit makroskopické útvary proudění. Rychlost snímání je však odvislá od snímkovací frekvence kamery a frekvence laseru. Diskutabilní je vhodnost použití kvůli vysoké energii laserů, která není do výbušného prostředí vhodná. Dále také u hustých sprejů může PIV podávat o proudění zkreslené informace z důvodu nedostatečného nebo nestejněho prosvícení zkoumaných částí spreje. S tím souvisí také špatné výsledky, které tato metoda podává u ústí trysky, kde je sprej příliš hustý. Problém je také obtížnost nastavení softwaru, z jakých částic má proudové pole počítat. Obecně má z principu metody problém v polích s velkými gradienty rychlosti.

### 3.2.2 Interferometric Particle Imaging

Interferometric Particle Imaging (IPI) je další optická metoda svým uspořádáním podobná PIV, která však kromě rychlostního pole dává také představu o velikosti částic spreje. Podmínkou pro její použití je transparentnost, kulovost a stejnoměrnost částic ve zkoumaném proudění, lze tedy použít pro spreje, proudění s bublinami nebo např. proud vody s pevnými průhlednými kuličkami. Měřicí aparatura sestává z laserového nože a dvou kamer namířených do stejného výřezu v rovině laserového nože. Rychlost částice se určuje pomocí první kamery zaostřené na rovinu laserového nože a princip určení rychlosti částice je stejný jako u PIV - tedy porovnání dvou po sobě jdoucích pozic částice a ze známého času mezi těmito dvěma snímky a spočtené vzdálenosti si určí rychlost. Pomocí druhé kamery, která není zaostřena, se určuje velikost částice na základě interferometrického obrazce. Vzdálenost interferenčních pruhů je přímo úměrná velikosti částice. [19]

Všeobecně je tato metoda měření sprejů používána řádově méně, než zvolené PDA. Její použití by pravděpodobně ušetřilo automatizaci měření pomocí traverzéry, avšak mohly





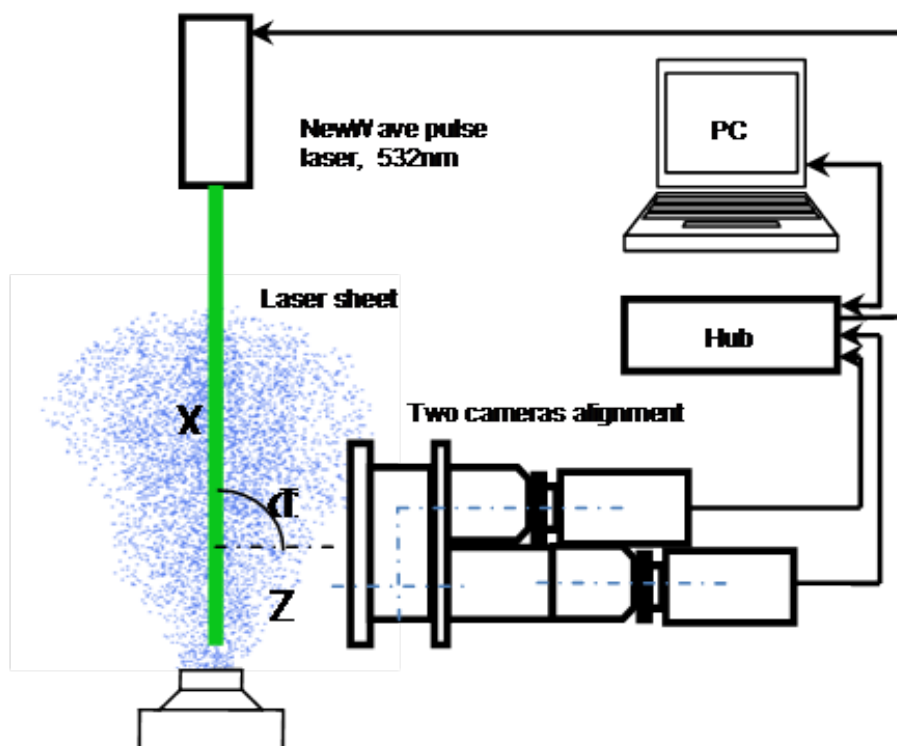
**Obr. 7:** Snímek z PIV měření turbulence v turbulentní cele, který byl součástí bakalářské práce [13]. Měřeným médiem je voda a trasovací částice jsou melaminové kuličky o průměru  $50\mu m$ . Můžeme si všimnout postupné ztráty světlosti zprava doleva. Zleva byl měřící prostor nasvícen laserovým nožem. Předpokládá se, že tento jev by v hustém spreji byl ještě markantnější, což by znemožnilo měření.

by nastat podobné problémy, jaké byly zmíněny u PIV. Také nelze zaručit dostatečnou transparentnost leteckého petroleje. Definitivní rozhodnutí o upřednostnění metody PDA poskytl zadavatel práce.

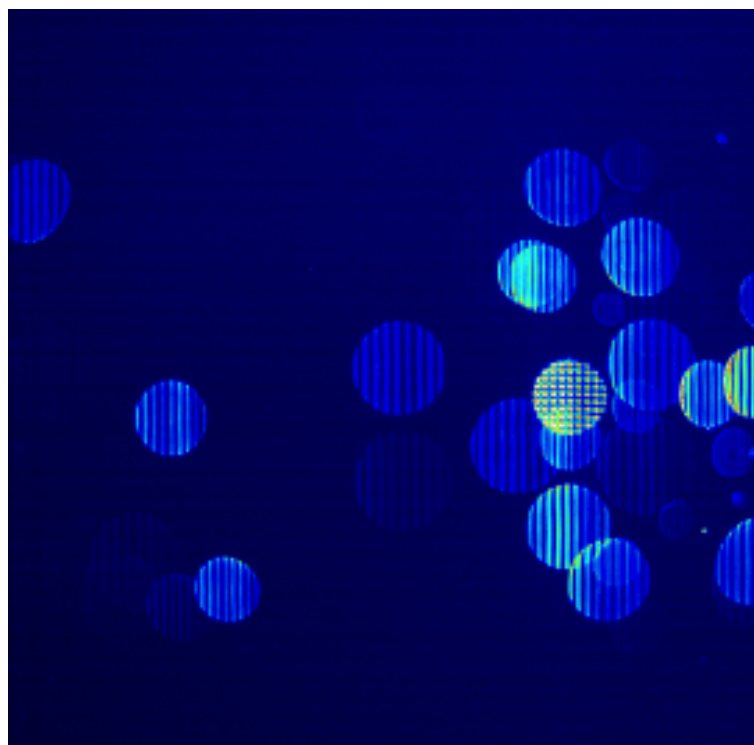
### 3.2.3 Fázová Dopplerovská Anemometrie

Fázová Dopplerovská anemometrie, dále již jen PDA, se používá ke zjištění rychlostního pole a velikosti částic dvoufázového proudění. Jedná se o optickou neinvazivní metodu s vysokou přesností bez potřeby kalibrace. Důvodem upřednostnění této metody je schopnost

- Měření hustého spreje.
- Měření dvou komponent vektoru rychlosti.
- Možnost automatizace - proměření kužele spreje bod po bodu synchronizací měřícího



**Obr. 8:** Uspořádání měřicí techniky metody IPI. Úhel  $\phi$  se nastaví dle indexu odrazu světla kulových částic. Zdroj [12].

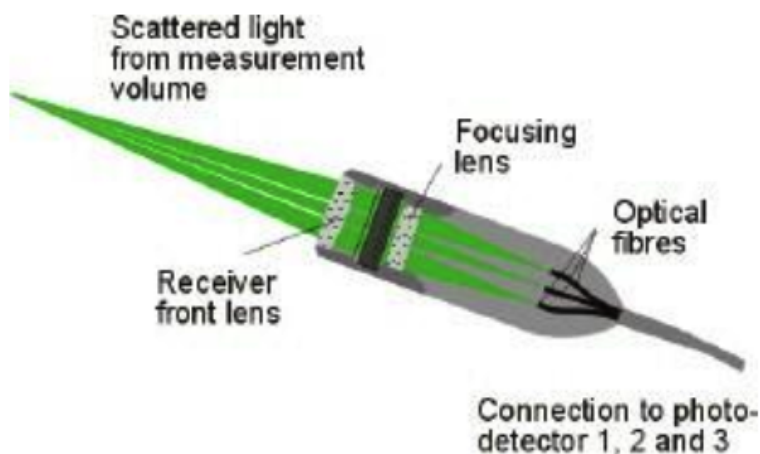


**Obr. 9:** Interferenční obrazce na kapičkách aerosolu při měření metodou IPI. Zdroj [24].

softwaru a krokových motorů traverzéry.

- Měření velikosti částic spreje.

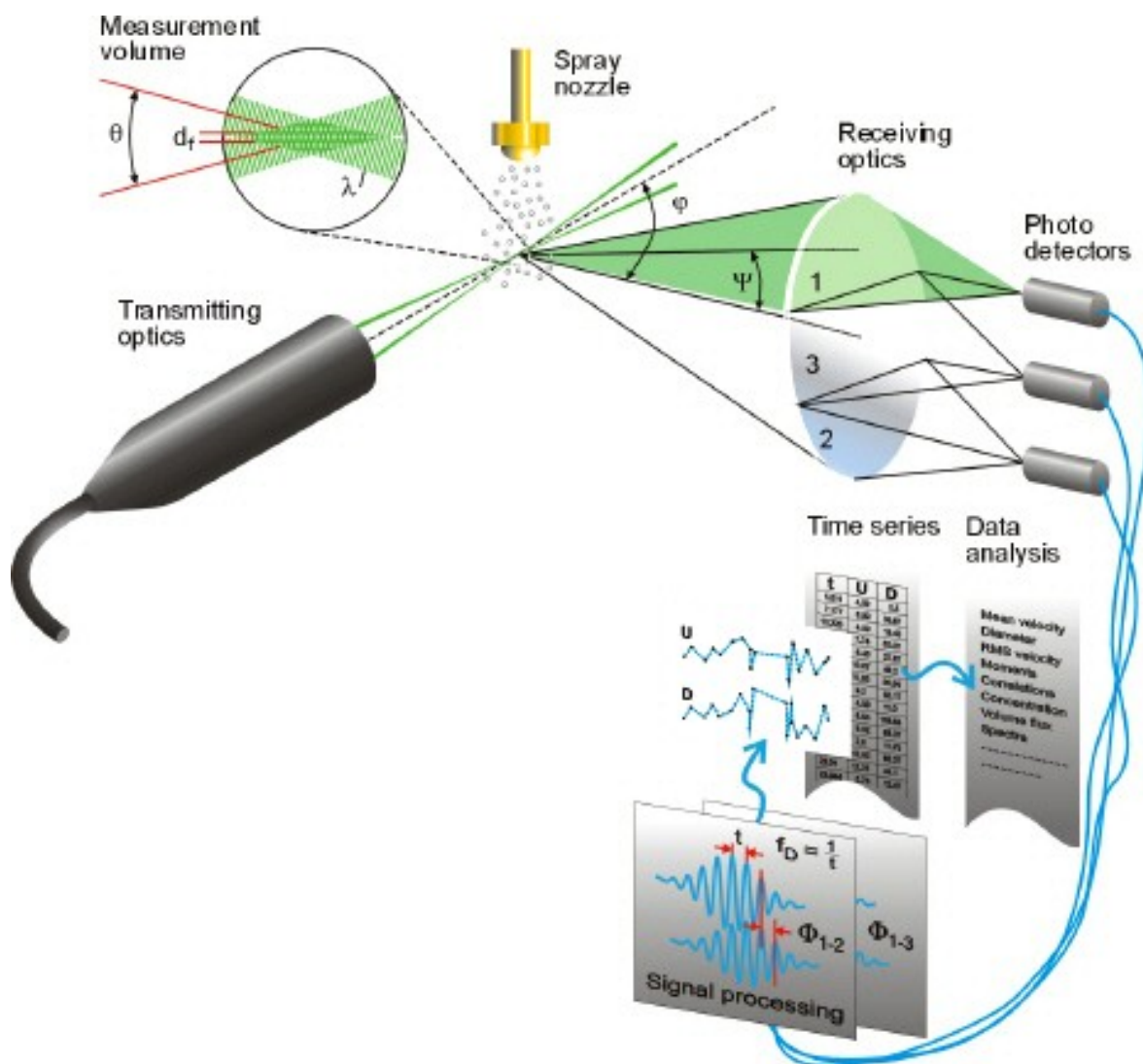
Principem PDA je Dopplerův efekt, který udává vztah mezi změnou frekvence vlnění a vzájemnou (nenulovou) rychlostí přijímače a vysílače – v tomto případě je vysílačem částice, od které se odráží vlnění. Jako zdroj vlnění je použit LASER, z něhož vystupující paprsek je rozdělen na dva a tím je zaručena koherence – tedy vzájemný nulový fázový posuv obou paprsků vůči sobě. Oba paprsky jsou zaostřeny do jednoho bodu, kde se protnou a interferují. Částice prolétající tímto bodem toto vlnění odráží a následně je zachyceno v detektoru. Odražené světlo má proměnlivou intenzitu s frekvencí, která je lineárně úměrná rychlosti částice v rovině tvořené původními paprsky. Fázové posunutí odražených paprsků je poté úměrné průměru částice. Použitá měřicí sestava FlowExplorer od společnosti Dantec Dynamics umožňuje měření dvou komponent vektoru rychlosti - vertikálního a horizontálního.



**Obr. 10:** Optická sonda FlowExplorer. Zdroj [18].

Podmínky pro použití PDA dle [18] jsou:

- Optický přístup do měřicího prostoru (ze dvou stran).
- Měřené částice mají kulovitý tvar (kapičky, bublinky, pevné kulaté částice).
- Známý index lomu částic/kapiček/bublin a okolního média.
- Vhodná velikost částic je dle [18] asi  $0,5\mu m$  až několik  $mm$



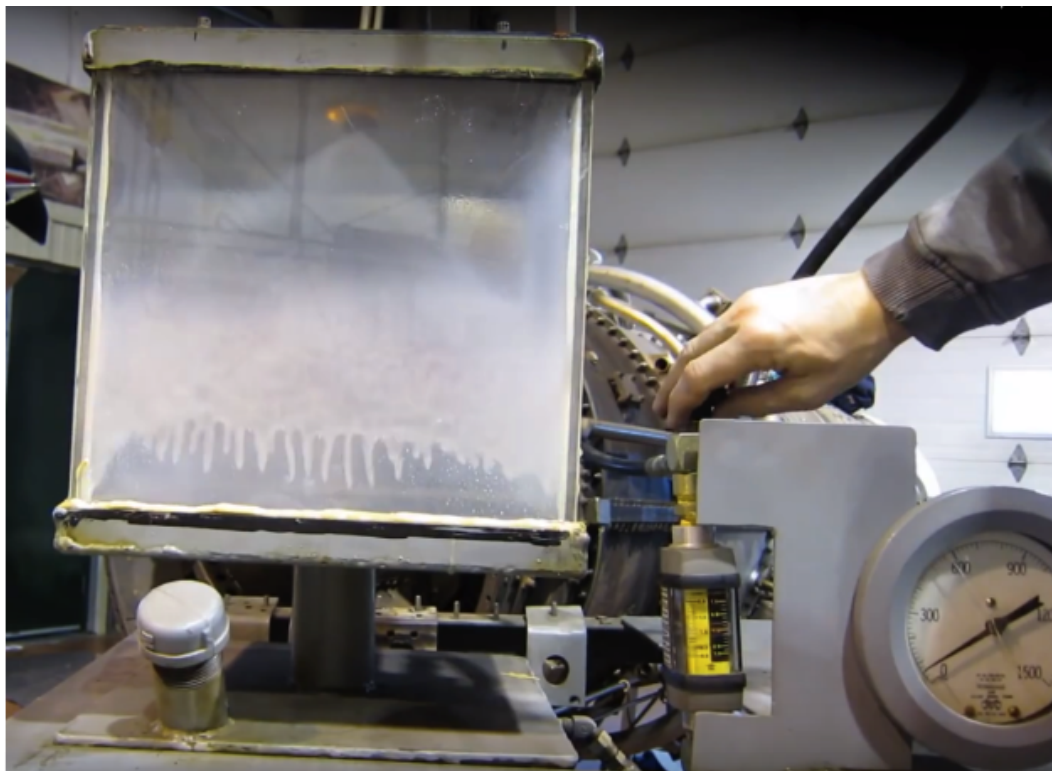
**Obr. 11:** Princip měření pomocí PDA. Úhel  $\varphi$ , tedy úhel mezi vysílající a přijímací optikou, je třeba nastavit pro konkrétní parametry spreje. Zdroj: [18].

## 4 Zkušební zařízení pro měření palivových trysek

V této kapitole se čtenář dočte o konstrukci podobných zařízení, které sloužily jako vodítko k návrhu a byly obsaženy v dostupných zdrojích. První je třeba si uvědomit, že podobných zařízení existují po světě desítky. Každý výrobce strojů s turbínovým jádrem má vlastní zkušebnu trysek, popř. si externě nechává tyto zkoušky provádět. Zároveň si konstrukci v rámci konkurenčního boje chrání. Následující fotografie, které byly v různých formách dostupné na internetu, posloužily jako inspirace pro konstrukci vlastního zařízení. Ke každé z následujících fotografií uvedu krátký popis a zdůvodnění, proč je tato fotka relevantní.

První fotografií [obr. 12] je printscreen z videa youtube kanálu dílny, která se zabývá renovací starých turbínových motorů pro historické stroje. Z videa (fotografie) je patrné těsnění silikonovým tmelem, které bylo také užito na konstruovaném zařízení. Ač toto uspořádání působí veskrze amatérsky, obsahuje všechny důležité prvky pro vizuální kontrolu spreje

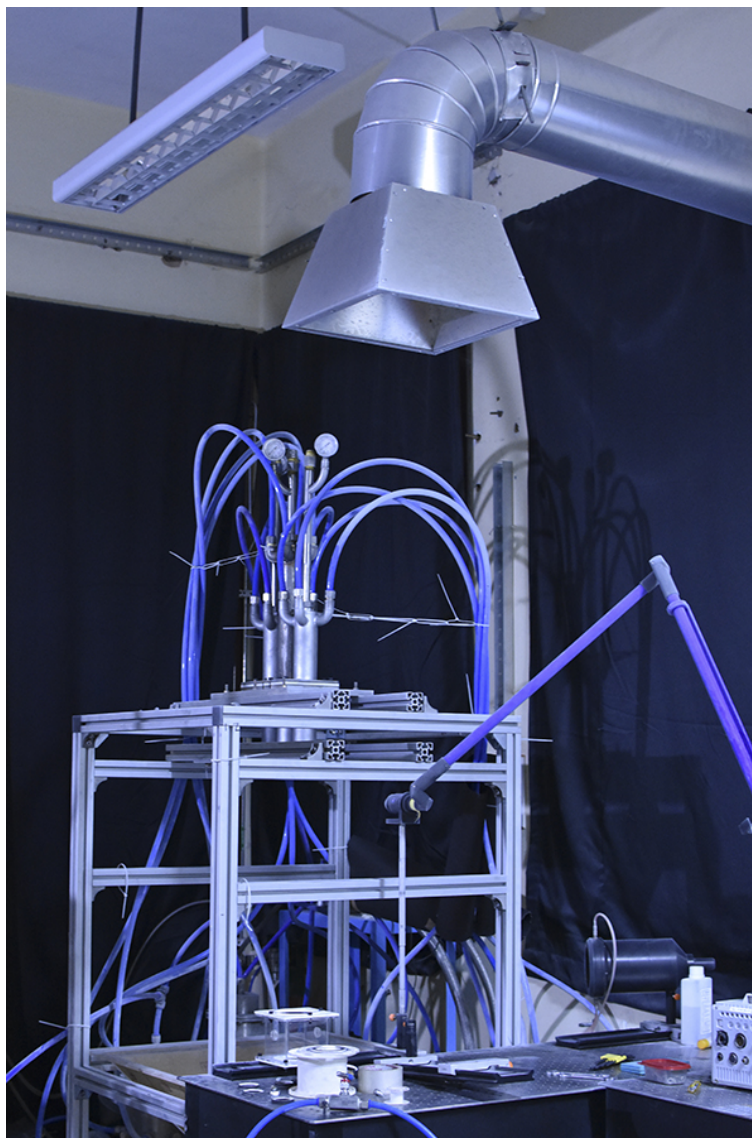
trysky - komoru s optickým přístupem, držák trysky a odtokové potrubí do uklidňovací nádrže odkud se potom čerpadlem s tlakoměrem podává zpět do trysky.



**Obr. 12:** Zařízení pro optickou kontrolu spreje palivové trysky. Zdroj: [33]: .

Druhý obrázek [obr. 13] ilustruje zařízení pro zkoušení měřících optik ve společnosti WTtech, která byla zároveň dodavatelem měřícího softwaru a softwaru pro ovládání krokových motorů. Toto uspořádání dává jasnou vizi o tom, jak by mělo být konstruované zařízení uspořádáno. Vyobrazené zařízení nedisponuje žádným stíněním ani protipožárním opatřením jelikož rozprašovaným médiem byla voda.

Poslední inspirací [obr. 14] je zařízení umístění v laboratoři sprejů VUT v Brně. Toto zařízení je použito pro testování trysek na letecký petrolej. Na fotografii vidíme odsávání aerosolu ze sběrného koše pod tryskou. To je poté vedeno do odstředivého separátoru. S ohledem na požární bezpečnost a hodnocení konkrétních požárních rizik byl v konstruovaném zařízení zvolen jiný způsob separace palivového spreje.



**Obr. 13:** Zkušební zařízení jež se podobá zmiňovanému zařízení ve Zkušebnách WTtech Poděbrady. Zdroj: [35]



**Obr. 14:** Laboratoř sprejů VUT v Brně. Zdroj: [21]

## 5 Specifika zařízení pracujících s výbušnou atmosférou

Pro certifikaci provozu zkušebního zařízení je nutné, aby splňovalo v dostatečné míře požární předpisy. V této kapitole popíšu, jak se dělí prostředí s nebezpečím výbuchu a jaké jsou možnosti eliminace produkovaného výbušného aerosolu.

### 5.1 Požární bezpečnost

Jedním z největších rizik při provozu tohoto zkušebního zařízení je jeho požární bezpečnost. Bylo vynaloženo co nejvyšší úsilí pro splnění požárních předpisů v co nejširším rozsahu. Posouzení, na kolik byly tyto předpisy splněny, přísluší řádným orgánům pro certifikaci před předáním zkušebního zařízení zákazníkovi, proto se jakéhokoliv hodnocení zdržím.

Prostředí s nebezpečím výbuchu (nebo bez něj) lze dle normy [5] rozdělit do čtyř zón.

- **Zóna bez nebezpečí výbuchu** - v této zóně nemůže dojít k nahromadění výbušných par za žádných okolností, a to ani v případě poruchy zařízení.
- **Zóna 2** - v této zóně nelze očekávat výskyt výbušné směsi při provozu v běžných provozních podmínkách; v případě poruchy zařízení se v této zóně však vyskytnout může.
- **Zóna 1** - v této zóně existuje zvýšené riziko výskytu výbušné směsi.
- **Zóna 0** - v této zóně lze očekávat častý nebo dokonce trvalý výskyt výbušné směsi.

Elektrická zařízení přítomná v zónách výbuchu musí být pro příslušnou zónu certifikována notifikovaným orgánem nebo zkušebnou. [26]

### 5.2 Metody separace aerosolu

Existuje několik metod separace aerosolu. V průmyslu se běžně setkáváme se separátory olejů a řezných kapalin v kovoobráběcích provozech. V petrochemickém průmyslu jsou naopak používány regenerátory palivových par. V obou případech se jedná částečně o formu kondenzace a sesbírání kapiček odlučované kapaliny z filtrovaného média. Metody v petrochemickém průmyslu jsou extrémně účinné, avšak zařízení, která k tomuto účelu slouží, nabývají velkých rozměrů a tím i ekonomické náročnosti. Pro regeneraci palivových par se zde používají zejména filtrační věže s aktivními prvky, předně aktivním uhlím. Na tyto zařízení se zde však soustředit nebudeme.

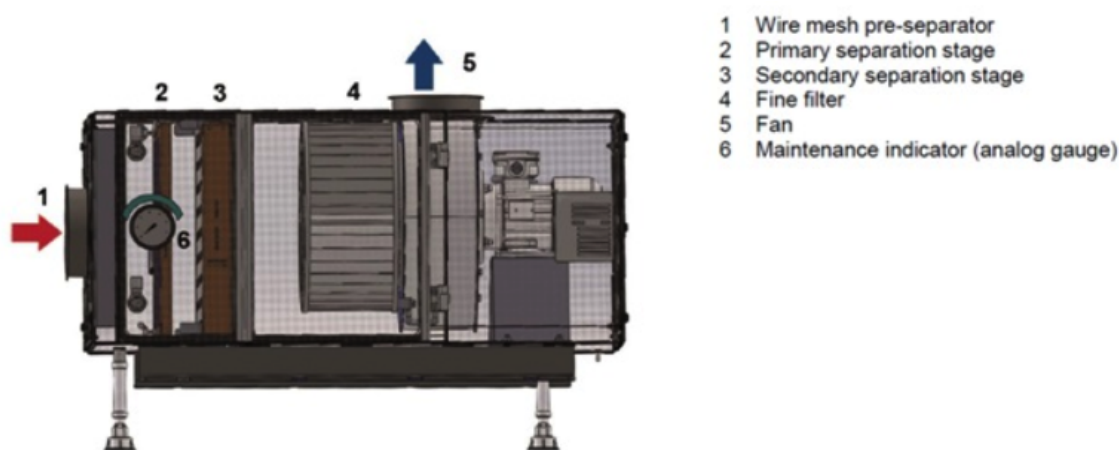
Kategoricky lze letecký petrolej svými vlastnosti zařadit k naftě. Letecký petrolej není svými

vlastnostmi vzdálený ani oleji. Pro olej již existují více či méně kompaktní separátory olejové mlhy. Dle principu odloučení je můžeme dělit na:

- odstředivé odlučovače
- elektrostatické odlučovače
- koelescenční filtry
- složené filtry

nebo jejich různé kombinace.

Žádné z komerční zařízení však není určeno do zóny s nebezpečím výbuchu 0, 1 nebo 2. Proto je použití prvních dvou metod nereálné, jelikož bychom museli navrhnout vlastní zařízení, které je velmi komplexní záležitostí. Složené filtry, jako je např. [15], je možné použít, ale žádný výrobce nezajistí jejich použití v zóně 0. Použité v zóně 2 je možné. Ekonomicky nejvíce dosažitelným řešením, které je možné použít v zóně s nebezpečím výbuchu 0 je vlastní konstrukce separátoru s použitím komerčních koalescenčních vložek. O konstrukci tohoto separátoru bude pojednáno později, v kapitole 8.1.



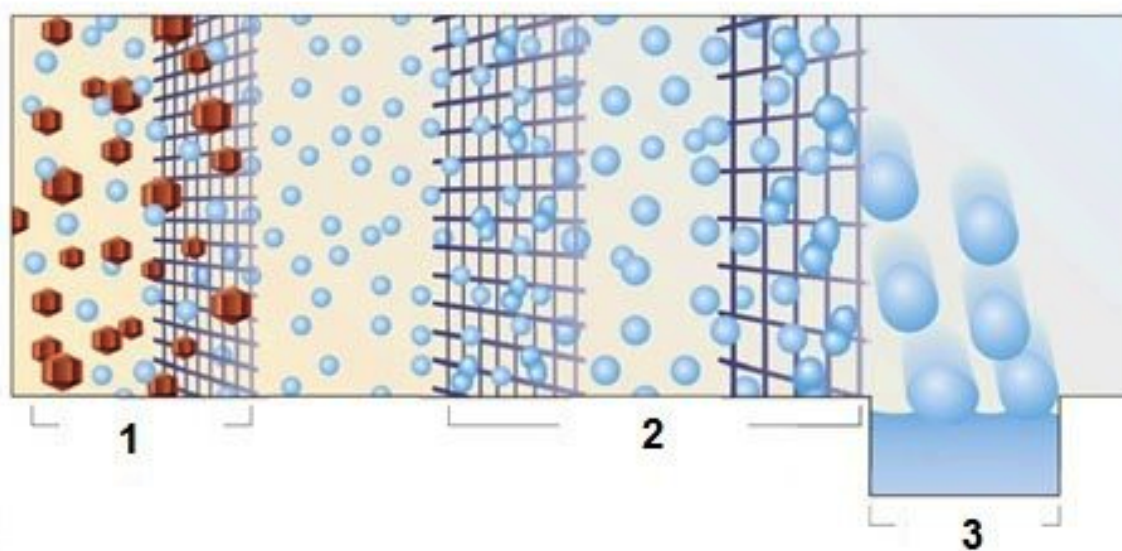
**Obr. 15:** Skládaný filtr pro separaci olejové mlhy. Na vstupu pod označením 1 se nachází hrubé síto pro oddělení makronečistot, dále 2 a 3 znázorňuje koalescenční filtry o klesající průchodnosti s následným filtrem pod položkou 4. Vzduch je nasáván integrovaným ventilátorem (č. 5) a průchodnost filtru je indikována tlakovou diferencí na vstupu a výstupu. Zdroj: [14]

### 5.2.1 Princip funkce koalescenčních filtrů

Koalescenční filtry separují dvě složky aerosolu na dvě fáze. Aerosol je proháněn skrz několik vrstev filtru - směrem od osy filtru k jeho vnějšímu obvodu. Střední velikost pórů filtru se s roztoucím poloměrem zvětšuje a tak kapičky kapalné složky ulpívající na vlákněch filtrační látky spolu s průchodem filtrem rostou dokud nedospějí na okraj filtru, kam jsou proudem vzduchu tlačeny a odkud následně gravitací odpadávají. Jednotlivé vrstvy filtru mají nesmáčivou úpravu, aby zajistily odchod kapaliny. Takovéto filtry mají většinou



účinnost vyšší než 99,99% a ve vystupujícím vzduchu by koncentrace částic kapaliny neměla přesáhnout 0,003ppm.



**Obr. 16:** Princip funkce koalescenčního filtru. V oblasti označené 1 dochází k filtraci pevných nečistot, kterou v našem případě zajišťuje síto na vstupu do separátoru, abychom zabránili hromadění nečistot ve filtru. V oblasti 2 postupně roste velikost kapek a v oblasti 3 jsou kapky na základě gravitace odděleny od filtru. Schéma přejato z: [34]

## 6 Úvod do konstrukční části

Zadáním diplomové práce bylo navrhnout zařízení umožňující proměření kužele spreje palivové trysky – získání 2 komponent vektoru rychlosti s požadovaným prostorovým krokem 0,1mm. Zadavatelem bylo předepsáno použití měřicí metody PDA. Pro proměření celého kužele spreje je nutná traverzace tryskou, protože měřicí metoda PDA zjišťuje parametry spreje pouze v jednom bodě, do kterého je zaměřena. Traverzace trysky byla opět zadavatelem předepsána tryskou, nikoliv měřicí aparaturou z důvodu již vyvinutého měřicího softwaru. Pro dodržení požární bezpečnosti bylo nutné zajistit odvod výbušné atmosféry aerosolu, který tryska produkuje. Vstupními daty pro konstrukci byly rozměry zkušební místnosti pro umístění zkušebního zařízení a geometrie trysky, která je zobrazena na obr. 17.

### Údaje o palivové trysce:

Typ trysky:	tlaková vířivá tryska
Typ paliva:	JET A1
Tlak paliva:	0 ÷ 35 bar
Průtok:	0 ÷ 3.5l/min
Teplota paliva:	-20°C ÷ 35°C



**Obr. 17:** Uvažovaná geometrie palivové trysky.

V dalších částech diplomové práce následuje popis konstrukce zařízení. Pro přehlednost se budu odkazovat na díly a sestavy jejich číslem výkresu a názvem. Tyto díly a jejich hierarchii je možné dohledat v kusovníku a výkresech sestav v příloze. Následuje vysvětlení číslování výkresové dokumentace.

## 6.1 Organizace výkresové dokumentace a kusovníku

Tomuto projektu byl přidělen interní kód M244. Hierarchické číslování výkresů, sestav a podsestav je koncipováno následovně:

- Díly mají koncové označení třemi čísly.
- Podsestavy mají koncové označení dvěma čísly.
- Počáteční označení M244 je přidělený kód.

Např. tedy díl M244.02.001 je pořadově první díl druhé podsestavy hlavní sestavy zkušebního zařízení M244.

Výkresová dokumentace je vedena v anglickém jazyce. Kusovník sestavy je veden v prostředí *MS Excel* a je možné do něj nahlédnout v příloze.

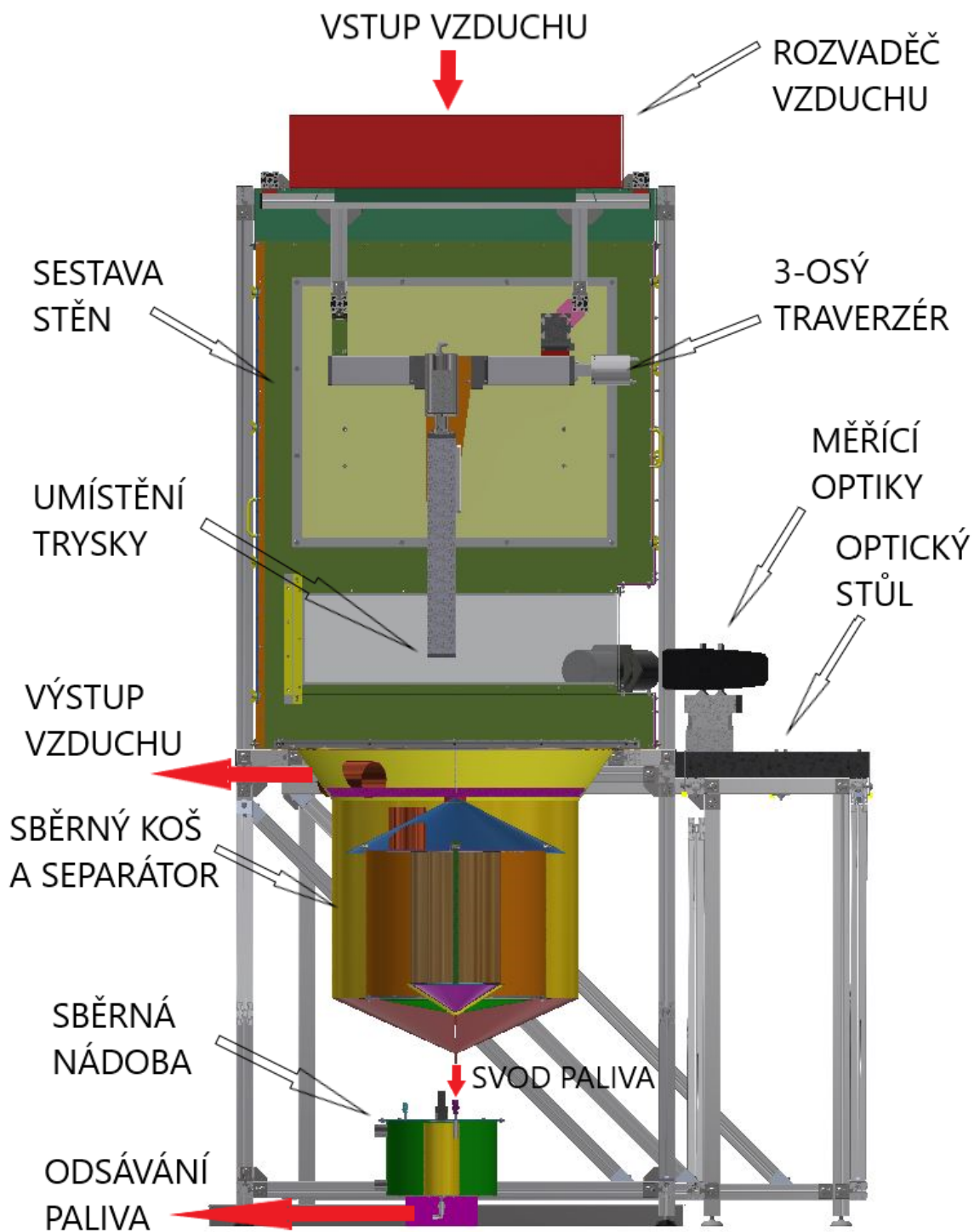
Protože má být zařízení provozováno v motorové zkušebně, jsou normalizované konstrukční prvky, jako je spojovací materiál, konstrukční profily a podobně, bráno dle německých norem DIN, které jsou dostupné jak v České republice, tak mezinárodně.

## 6.2 Konstrukce zkušebního zařízení

Pro pochopení na první pohled přehnaně složité konstrukce zařízení, je nutné mít na paměti, že veškeré části zkušebního zařízení podléhají přísným předpisům o požární bezpečnosti. Kostra zařízení je poskládaná z hliníkových stavebnicových profilů 45x45mm s drážkou 10mm. Tyto profily dosahují dostatečné tuhosti a jejich výhodou je snadná konfigurovatelnost v případě potřeby konstrukčních změn. Profily jsou standardně spojovány výrobcem dodávanými spojkami s T-šroubem a přírubovou maticí nebo maticí (kamenem) a libovolným šroubem. Zkušební zařízení na obr. 18 můžeme rozdělit na tyto části (odshora):

- Rozvaděč vzduchu rozvádějící vzduch podél stěn.
- Pod ní zavěšený traverzér s palivovou tryskou.
- Sestava stěn oddělující měřící prostor od okolí.
- Optický stůl s měřícími optikami.
- Sběrný koš na palivo se separátorem palivové mlhy.
- Sběrná nádrž na palivo, které proudí ze sběrného koše.

Pod zkušebním zařízením je umístěna záchytná vana z nerezového plechu pro případ odkapu tekutin.



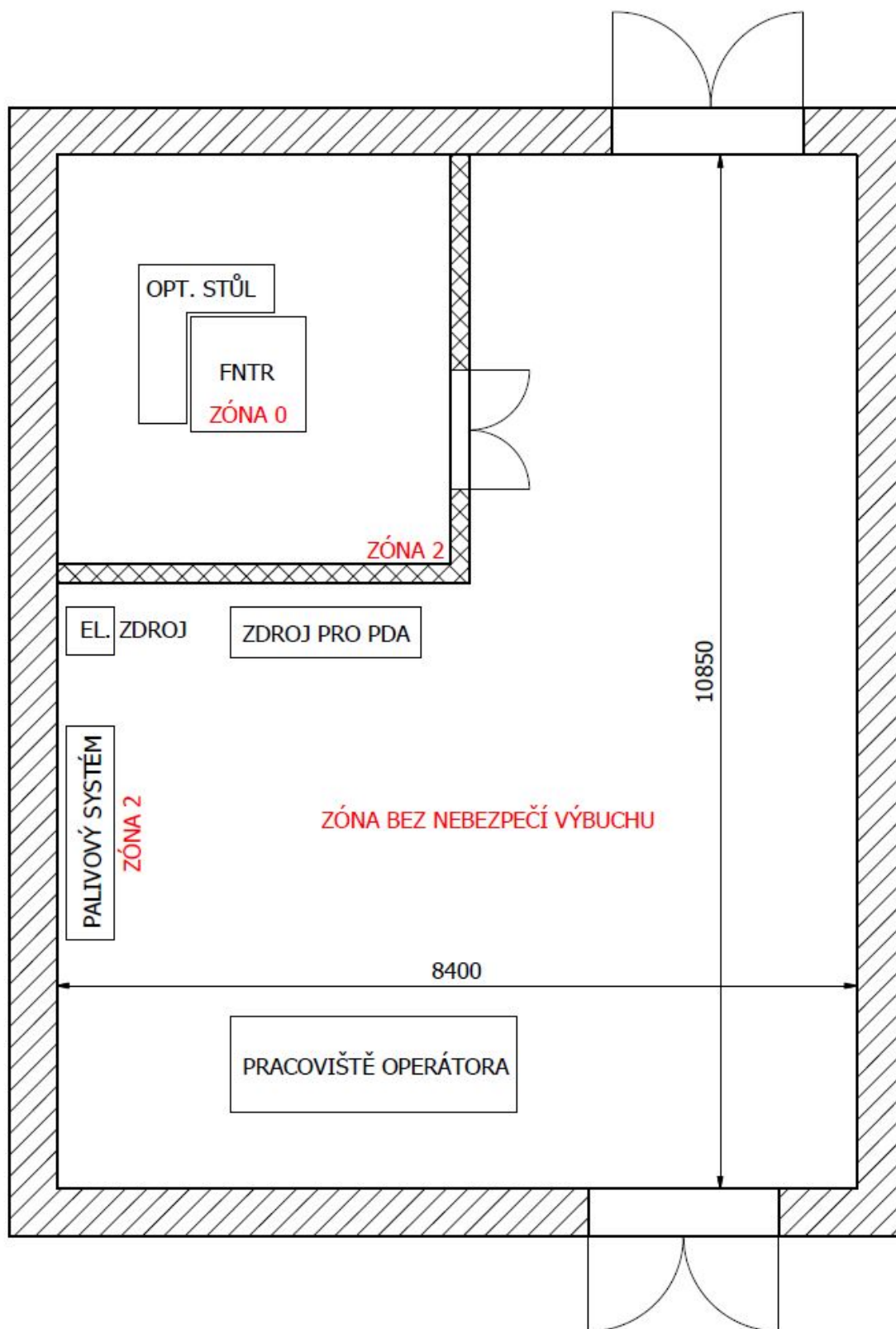
Obr. 18: Hlavní části zkušebního zařízení.

### 6.3 Rozdělení do zón dle nebezpečí výbuchu

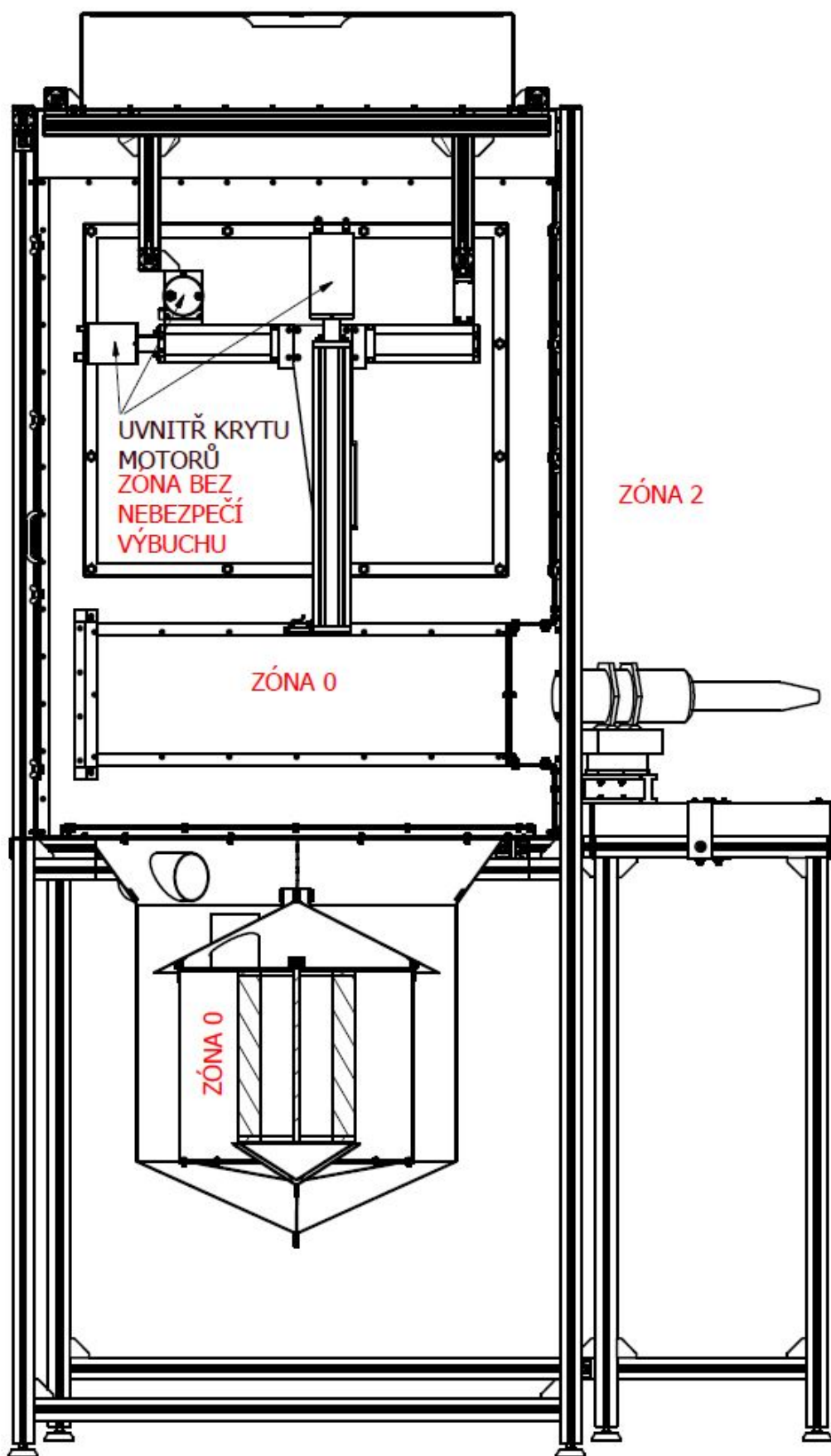
V podkapitole 5.1 bylo rozebráno dělení zařízení do zón dle nebezpečí výbuchu. Podle tohoto dělení můžeme celý stand a zkušební místnost rozdělit na tyto oblasti:

- **Zóna bez nebezpečí výbuchu** - do této zóny spadají prostory zkušebny, vyjma fyzicky ohraničeného prostoru zkušebního zařízení. Ohraničení je provedeno fyzickou bariérou, kterou může být například cihlová nebo sádkartonová zeď. Dále do této zóny spadá odstíněná oblast s krokovými motory. Odstínění je dvojitě jištěno. Prvně je kryt hermeticky uzavřen (těsněn o-kroužkem) a pro případ netěsnosti je přetlakován. Výbušná směs se tedy ani při netěsnosti krytu dovnitř nedostane.
- **Zóna 2** - V zóně 2 se nachází uzavřená sestava palivového systému, jejíž návrh není součástí této diplomové práce, a měřicí oblast zkušebního zařízení.
- **Zóna 1** - Zóna 1 se v oblasti standu ani zkušební místnosti nenachází.
- **Zóna 0** - do zóny 0 spadají vnitřní prostory zkušebního zařízení. Spadá zde také celá vzduchovodná trať, kterou se ze zkušebního zařízení skrze koalescenční filtr odsává vzduch s párami leteckého petroleje. Vnitřní prostory zkušebního zařízení jsou od vnějších prostor nacházejících se v zóně 2 odděleny plechovou stěnou, jejíž spoje jsou těsněny pryžovým těsněním odolným petroleji, šrouby mají hlavu podmazanou silikonovým tmelem.

Rozvržení zkušební místnosti a standu do zón je patrné z obr. 19 a 20.



**Obr. 19:** Rozdělení prostor zkušební místnosti do zón dle nebezpečí výbuchu.



Obr. 20: Rodělení prostor zkušebního zařízení dle zón nebezpečí výbuchu.

## 7 Návrh 3-osého traverzéro

Traverzér dodávaný společností DantecDynamics k měřicí aparatuře nesplňuje požadavky kladené na stand. Z uzavřené geometrie standu plyne podmínka, že traverzováno musí být s tryskou a pohyb měřicí aparatury – laseru a sondy, není možný vzhledem k jejich dané ohniskové vzdálenosti a úhlu vzájemného nastavení.

Z těchto důvodů byl proveden návrh traverzéro pohybuujícího s tryskou, které jsou poháněny stejnými krokovými motory, jaké jsou použity u traverzéro od DantecDynamics. Jedná se o soustavu tří lineárních os k sobě navzájem kolmých s odlehčující kolejnicí zabraňující torznímu namáhání jedné z os. Z obr. 21 je patrné jejich uspořádání.

Lineární osy HepcoMotion SDM 80-20 s kuličkovým šroubem pro přesný posun a minimalizaci tření o délkách 620 mm (horizontální posuvy) a 540 mm (vertikální posuv) jsou poháněny krokovými motory ISEL ms200 ht-2. Krokový motor pro vertikální posuv je s brzdou, která slouží k fixaci pozice ve vertikálním smyslu. Lineární kolejnice HepcoMotion Linear Axes Rail MLG20L je připojena k ose přes navrženou spojku tvaru "I". Stejně tak spojení horizontálního a vertikálního pojezdu je realizováno pomocí navržené spojovací příložky.

Dodávané motory poskytují maximální moment při cca 1000pps o velikosti 135Ncm. Pro ověření, že tyto motory mají dostatečný moment na zdvih nejvíce zatížené vertikální osy provedu výpočet dle katalogu HepcoMotion [28].

S koeficienty odečtenými z katalogu na obr. 22 hmotnost osy vypočítáme jako:

$$m = 9,75 \cdot L + 2,86 + m_v$$

kde  $m_v$  je hmotnost vozíku, která činí 2kg.

Po dosazení je hmotnost vertikální osy

$$m = 9,75 \cdot 0,54 + 2,86 + 2 = 10,125kg$$

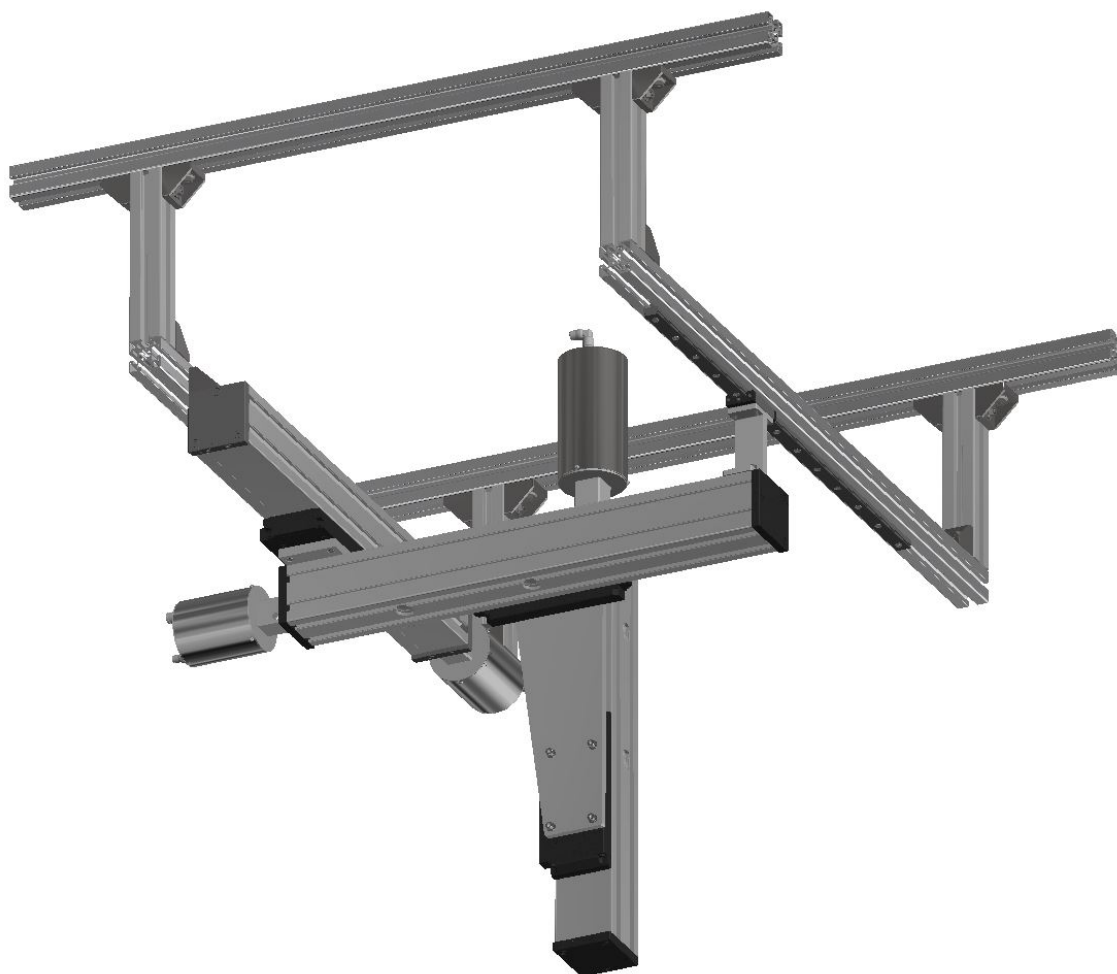
Sílu na vozík spočteme z rovnice udané na obr. 23 jako

$$F = C_f \cdot \tau - D_c$$

Kde  $\tau$  je moment na hřídeli,  $C_f$  je silový koeficient,  $D_c$  je celkový odpor vozíku na ose. Moment na hřídeli budeme počítat jako maximální možný moment krokového motoru, což je pro přibližný výpočet dostačující. Dle katalogu tedy dosadíme do rovnice

$$F = 1131 * 1,35 - 40 + 0,01 * 10,125 = 1486N$$





**Obr. 21:** 3D model 3-osého traverzéro poskládaného z lineárních os s kuličkovým šroubem od společnosti HepcoMotion. Traverzér je sestaven spolu s rámem ze stavebnicových profilů, přes který je uchycen ke kostře zkušebního zařízení.

SDM Unit Weights (kg)				Mass of Carriage (kg)
<b>SDM 20-80</b>	Standard Carriage	Standard	9.75 x L + 2.86	2.00
		Cleanroom	9.75 x L + 3.09	2.22
	Long Carriage	Standard	9.75 x L + 3.72	2.85
		Cleanroom	9.75 x L + 3.95	3.09
<b>SDM 30-100</b>	Standard Carriage	Standard	16.1 x L + 5.41	3.99
		Cleanroom	16.1 x L + 5.69	4.27
	Long Carriage	Standard	16.1 x L + 7.13	5.71
		Cleanroom	16.1 x L + 7.37	5.95

**Obr. 22:** Výpočet hmotnosti osy z katalogu HepcoMotion. Zdroj: katalog výrobce HepcoMotion, [28].

Maximální síla na vozíku je tedy  $1486N$ , což je mnohem vyšší síla než je síla potřebná ke zdvihu osy o hmotnosti  $10,125kg$ . I s dynamickými vlivy a přidávanou hmotností trysky a přívodní palivové hadice by měly být motory dostatečně silné.

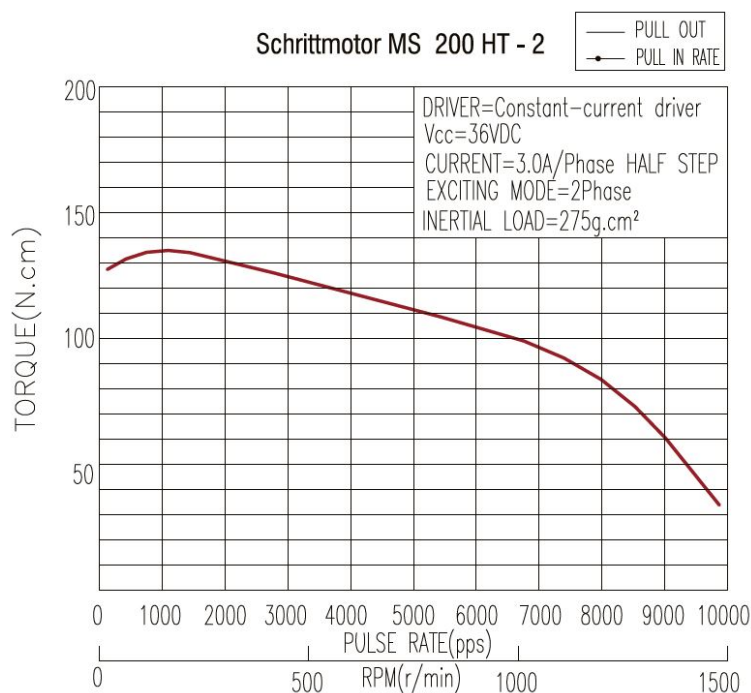
SDM Force Coefficient $C_f$					
	SDM20-80			SDM30-100	
Screw pitch /mm	5	10	16	5	20
Force Coefficient $C_f$	1131	565	353	1131	283

SDM Composite Drag $D_c$		
	Standard Carriage	Long Carriage
SDM 20-80	$40 + 0.01 \times LA$	$50 + 0.01 \times LA$
SDM 30-100	$55 + 0.01 \times LA$	$70 + 0.01 \times LA$

Where LA is load applied to the carriage

$$\text{Linear Force (N)} = C_f \times T - D_c$$

**Obr. 23:** Odečet koeficientů pro výpočet síly na vozík. Zdroj: katalog výrobce [28].



**Obr. 24:** Momentová charakteristika krokových motorů. Zdroj: katalog výrobce krokových motorů Isel, [29].

## 7.1 Přesnost traverzéry

Přesnost pohybu v jedné ose je dána součtem přesností pohybu jednotlivých komponent, kterými jsou lineární osa s kuličkovým šroubem, hřídelová hvězdicová spojka a krokový motor.

chyba kuličkového šroubu	0,01mm na posuv o 300mm [28]
chyba hvězdicové spojky	maximálně 1,5° [37]
chyba krokového motoru	5% nejmenšího kroku 1,8° [29]

Chyba šroubu na délku posuvu 600mm je  $\delta_o = 0,02mm$ . Stoupání šroubu lineární osy SDM 20-80 je  $p = 5mm$ . Úhlová chyba spojky ES Roba  $\delta_s^\circ = 1,5^\circ$  na jednu otáčku dává chybu lineárního pojezdu

$$\delta_s = \frac{p \cdot \delta_u^\circ}{360^\circ} = \frac{5 \cdot 1,5}{360} = 0,021mm$$

Stejně tak úhlová chyba motoru

$$\delta_m^\circ = 0,05 \cdot 1,8^\circ = 0,09^\circ$$

která dává chybu pojezdu

$$\delta_m = \frac{\delta_m^\circ \cdot p}{360} = \frac{0,09 \cdot 5}{360} = 1,25 \cdot 10^{-3}$$

Celkovou chybu posuvu dostaneme sečtením těchto sériově spojeným členů.

$$\delta = \delta_o + \delta_s + \delta_m$$

$$\delta = 0,02 + 0,021 + 1,25 \cdot 10^{-3} = 0,042mm$$

Tato chyba posuvu byla schválena zadavatelem jako dostatečně nízká. Použitím levnějších os s ozubeným řemenem bychom požadované přesnosti nedosáhli.

## 7.2 Alternativní návrhy traverzéro

Byly provedeny tři nezávislé návrhy traverzéro na základě dodavatele lineárních os. Následně byla zhodnocena jejich cena, praktičnost, vhodnost použití z hlediska mazání, kvality krytí osy, hmotnosti. Při výběru dodavatele os bylo osloveno 5 společností o nabídku ceny na odběr příslušných os a spojovacího materiálu pro traverzéro. Následně byly vyhodnoceny tři obdržené nabídky od společností HepcoMotion, Bosh a Raveo.

Traverzéro sestavený z os od společnosti Bosh měl horší krytí pojezdových vozíků. Upnutí pomocné kolejničky bylo možné přímo na druhou svislou osu bez potřeby adaptéru. Cenově vycházel traverzéro druhý v pořadí za traverzéroem od HepcoMotion.

Traverzéro společnosti Raveo působil velmi tuhým dojmem, kdy by pravděpodobně nebylo za potřeby použít odlehčovací lineární pojezd. Zároveň osy dosahovaly velkých hmotností, což bylo dáno jejich čtvercovým průřezem. Cenově však nebyla nabídka od firmy Raveo atraktivní.

Finančně nejvýhodnější nabídka od společnosti HepcoMotion obsahovala tři lineární osy s kuličkovým šroubem, jednu lineární kolejničku s vozíkem a 1ks adaptéru pro spojení dvou horizontálních os. Pro spojení vertikální a horizontální osy s lineárním pojezdem byly navrženy adaptéry a návrh byl konzultován s distributorem HepcoMotion. Kromě finančního hlediska byly osy shledány nejlépe chráněné proti vniku aerosolu od trysky. Pro konstrukci traverzéro byl použit materiál od této společnosti.



**Obr. 25:** Alternativní návrh traverzéry s osami od společnosti Raveo.



**Obr. 26:** Alternativní návrh traverzéry s osami od společnosti Bosh Rexroth.

### 7.3 Odstínění krokových motorů

Vzhledem k faktu, že uvnitř standu je zóna požárního nebezpečí 0, je třeba oddělit krokové motory pohánějící traverzér od vnitřní atmosféry standu. Za tímto účelem byl navržen kryt motoru s přírubou a hřídelovou spojkou.

Stínění motorů je s dvojitým jištěním. Vnitřní prostor je hermeticky uzavřen vůči pracovnímu prostoru zkušebního zařízení a zároveň je přetlakován, aby bylo zamezeno vniknutí výbušného aerosolu. Duralová příruba je osazena o-kroužkem, přes který je převlečen kryt - svařenec z nerezového plechu tloušťky 1 mm - víčka a nerezové trubky. Ten je na přírubě pojištěn třemi radiálně umístěnými šrouby. V krytu jsou vypáleny tři díry, ve kterých jsou umístěny rychlospojky pro připojení hadic o průměru 6 a 10 mm a jedna hadice pro přívod kabelů k motorům. Koncovky jsou staženy přes plechový kryt šestihrannými maticemi.

Chladicí a přetlakující vzduch bude veden tlustší hadicí dovnitř. Hadicí s menším průměrem bude vzduch volně odváděn. Rozdíl v průměrech hadic zabezpečí zaškrcení průtoku v přetlakovaném prostoru motoru. Uvnitř duralové příruby je umístěna hvězdicová hřídelová spojka, která svěrným spojem spojuje hřídele elektromotoru a lineární osy traverzéro. Zvolena byla spojka ES ROBA. Pro montáž je třeba hřídelovou spojkou první upnout na motor. Odšroubovat průhledový šroub v přírubě a natočit hřídelovou spojkou svým utahovacím šroubem proti tomuto otvoru. Poté se spojka nastrčí na druhou hřídel lineární osy a krokový motor přišroubuje k přírubě. Dále se utáhne šroub na hřídelové spojnici na výrobcem předepsaný moment a otvor se uzavře šroubem. Plechový svařenec a příruba s montážním otvorem je vyobrazena na obr. 27.

Pro výrobu krytů motorů byla použita svařovaná nerezová trubka 80x2, její vnitřní průměr byl soustružen na přípojný průměr příruby M244.07.001 FLANGE. Kruhovitost svařovaných trubek není dostatečná a proto bylo slícování s přírubou spíše klempířskou záležitostí. Při výrobě třetího krytu, který je určen pro vertikální osu traverzéro a motor obsahuje brzdu a je tedy větší, byla použita bezešvá trubka 88,9x3,2 mm u níž byla výroba méně pracnější. Váha trubky byla snížena úběrem 2 mm na průměru trubky. Úběr materiálu z obvodu dodal krytu mimo jiné estetickou hodnotu.

### 7.4 Návrh uchycení palivové trysky

Požadavkem pro uchycení palivové trysky k traverzovacímu zařízení je její snadná odnímatelnost a dostatečně pevné ukotvení proti odpadnutí. Upínka musí také umožnit natočení kolem obou horizontálních os. Rotace kolem osy kolmé na čelo lineární osy se provede natočením upínky a utažením šroubů. Rotace kolem osy rovnoběžné s čelem lineární osy se provede podložním upínkem v místě kontaktu s lineární osou spárovými měrkami. Na základě požadavků byla navržena svorka na obr. 29.



**Obr. 27:** Fotografie krytů motorů osazených hadicovými rychlospojkami a přírub motorů.

#### 7.4.1 Utahovací moment šroubu upínky

Utahovací moment pro šroub  $M4 \times 0,7$  pevnostní třídy 12.9 a tuto aplikaci byl zvolen  $M_u = 2,5 Nm$ .

Síla ve šroubu se spočte jako

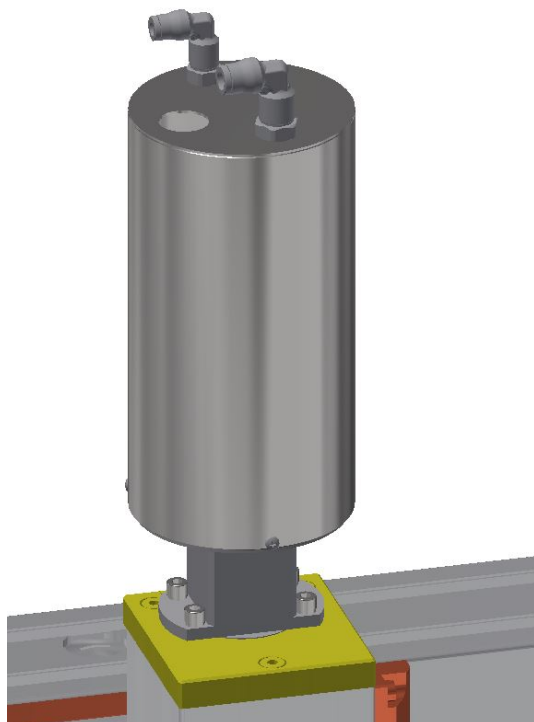
$$F = \frac{2 \cdot M_u}{\frac{D_H + d_d}{2} \cdot f_H + d_2 \cdot \left( \frac{p}{\pi d_2} + \frac{f_z}{\cos(\beta/2)} \right)}$$

kde  $M_u$  je utahovací moment šroubu,  $D_H$  je průměr hlavy šroubu,  $d_d$  je průměr díry pro šroub,  $f_z$  je třecí součinitel v závitu,  $f_H$  je třecí součinitel pod hlavou,  $d_2$  je střední průměr závitu,  $p$  je stoupání a  $\beta$  je úhel stoupání závitu.

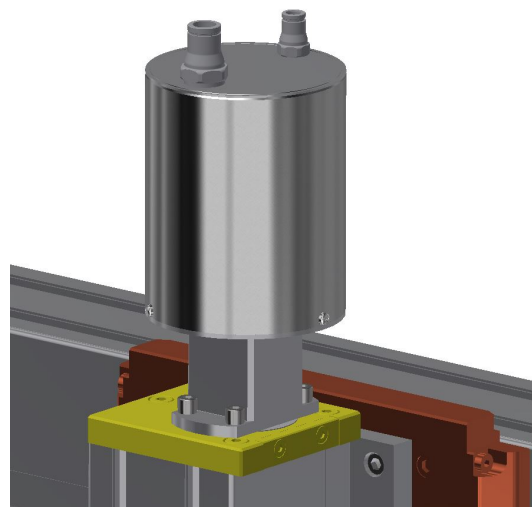
$$F = \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^3}{\frac{9+4,3}{2} \cdot 0,15 + 3,545 \cdot \left( \frac{0,7}{\pi 3,545} + \frac{0,15}{\cos(60/2)} \right)} = 2725 N$$

Síla vyvolá ve šroubu napětí o velikosti

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{0,25 \cdot \pi \cdot \frac{d_3^2}{4}} = \frac{2725}{0,25 \cdot \pi \cdot \frac{3,141^2}{4}} = 310 MPa$$

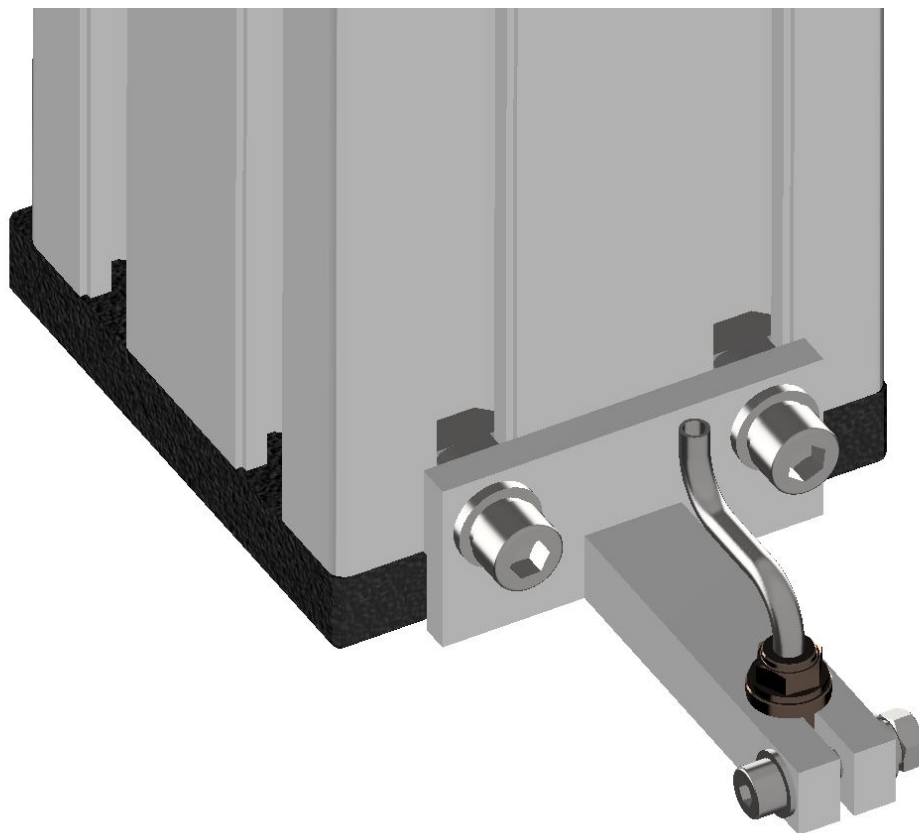


(a) Stínění motoru vertikální osy.



(b) Stínění motoru horizontálních os.

**Obr. 28:** Porovnání stínění motorů horizontálních a vertikální osy.



**Obr. 29:** Model upínky trysky.

Jelikož se jedná o standardizovaný utahovací moment šroubu [15], je samozřejmě napětí v dříku šroubu menší než než dovolené napětí. Dovolené napětí pro šrouby pevností třídy 12.9 je dle [36]

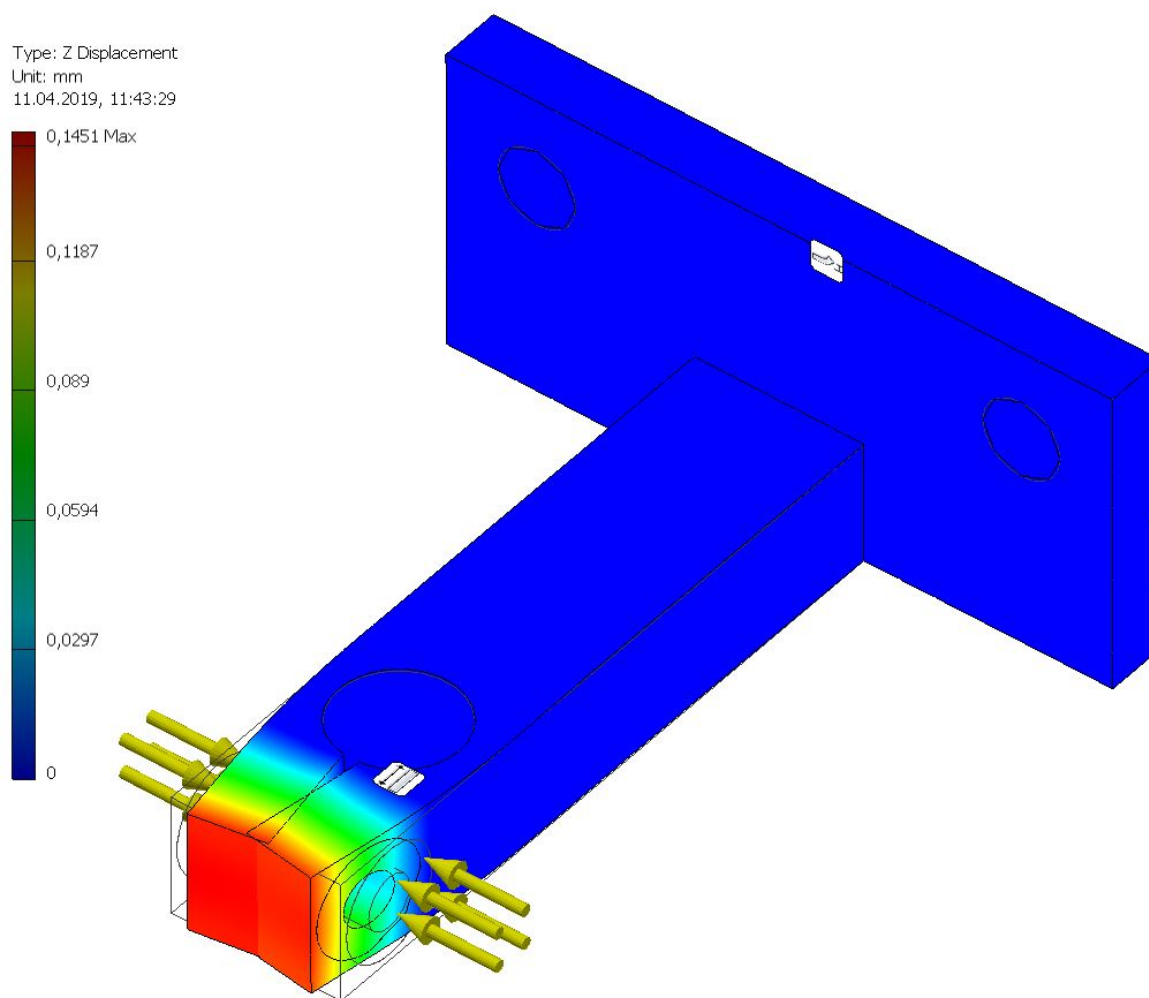
$$\sigma_d = 0,8Re = 0,8 \cdot 1100 = 880MPa$$

#### 7.4.2 Deformace upínky trysky vyvolaná utahovacím momentem

Pro ověření, že nedojde k přílišné deformaci poměrně měkkého duralového materiálu od utažení šroubu, je proveden MKP výpočet v nadstavbě konstrukčního softwaru Autodesk Inventor 2017. Plocha pod podložkou matice a hlavou šroubu je zatížena tlakem

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{0,25 \cdot \pi \cdot (d_H^2 - d_d^2)} = \frac{2725}{0,25 \cdot \pi \cdot (9^2 - 4,3^2)} = 55MPa$$

kde  $D_H$  je průměr hlavy šroubu podložky matice  $d_d$  je průměr díry pro šroub. Z MKP výpočtu na obr.30 je vidět, že v místě nejvyšší deformace se konec každé svorky ohne směrem k ose o  $0,145mm$ . Deformace je tedy zanedbatelná a nebrání ve funkci svorky.



**Obr. 30:** Výpočet deformace upínky trysky od utažení šroubu.



Pro výpočet byla udělena podmínka, že válcová část svorky (místo upnutí trysky) je neměnné geometrie – tedy že tryska z mnohem pevnějšího materiálu, kterým bývá povětšinou Inconel 625 o pevnosti  $\sigma_m = 800 \div 1100 MPa$  (zdroj: [30]) není deformována a doplnění statické určitosti je dáno vetknutím do lineární osy.

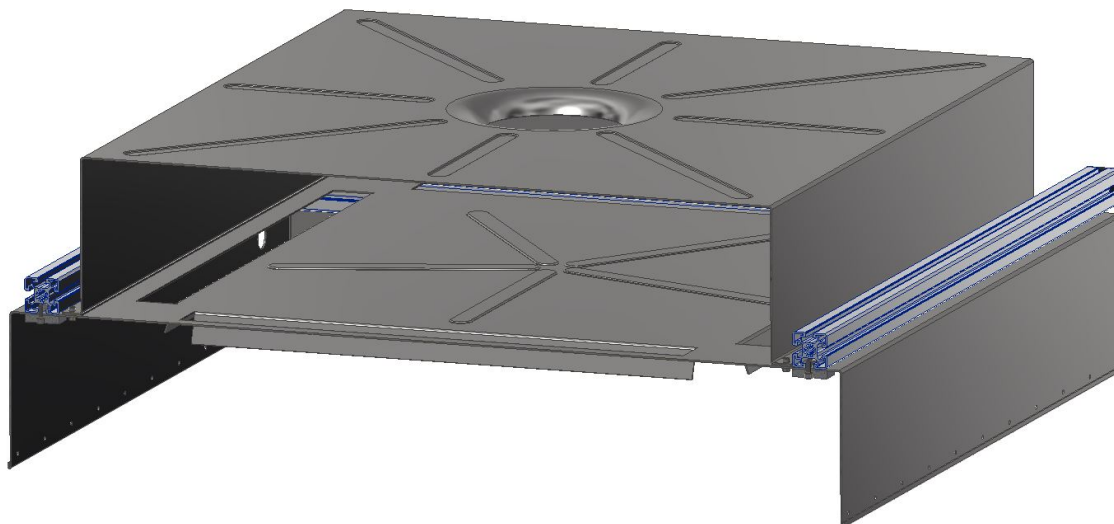
## 8 Vzduchové cesty

Hromadění výbušného aerosolu palivo - vzduch je nutné zamezit a to odsáváním vnitřní atmosféry zkušebního zařízení. Systém, jakým je vzduch odsáván z měřicí oblasti a přísáván z okolí je patrný z obr. 18.

Podtlakem vzduchu, který je způsoben odsáváním vzduchu skrz separátor, dochází k nasávání vzduchu skrz tvarované otvory v horní části standu. Vstup vzduchu je tvořen dvěma plechovými díly. Sestavení je patrné z obr. 31. Díl M244.02.02.002 AIR BOX má za úkol uklidnit vzduch před jeho vstupem skrz díl M244.02.02.001 CEILING COVER. Zároveň také tvoří labyrint, který stěžuje únik par při vypnutém zařízení a dává možnost díru v červeném dílu v době nečinnosti zařízení zakrýt, což úniku par zamezí úplně. Rovněž se pracuje s variantou, že vzduch vstupující tímto otvorem do zkušebního zařízení v době jeho činnosti a větrající ven v době nečinnosti, bude přiváděn/odváděn potrubím z prostor mimo zkušební místnost. Tato varianta ale stále není potvrzena a bude o ní rozhodnuto při finální montáži.

Na obou dílech jsou patrné prolisy pro zvýšení tuhosti pro zabránění možné rezonance dílů v důsledku proudění nebo vibrací přenesených z rotační částí pomocných systémů (palivové hospodářství, odtah vzduchu, atp.). Tyto prolisy nebyly vyrobeny z kapacitních důvodů společnosti obstarávající výpalky tvaru a ohyby. Alternativní vyztužení konstrukce diskutují v kapitole 9.4.

Z výpočtu proudění vzduchu standem provedeného výpočtovým oddělením VZLÚ (na obr. 32), je patrné, že pravděpodobně dojde k mírné cirkulaci vzduchu v oblasti měřené trysky. Vypočtený rozdíl vertikálních rychlostí asi  $0,5 m/s$  považuji za nevýznamný pro účel měření. Problémem pro měření by mohlo být omývání průhledů pro měření zvířeným aerosolem a tím nanášení kapiček paliva na tyto povrchy. V případě, že tato skutečnost nastane, navrhuji ofukovat sklo vzduchovým nožem ve vertikálním směru a vytvořit tak vrstvu vzduchu zamezující kontaktu paliva se sklem. Další možností je úprava otvorů (popř. přidání dalších) v dílu M244.02.02.001 CEILING COVER, který vzduch rozvádí.

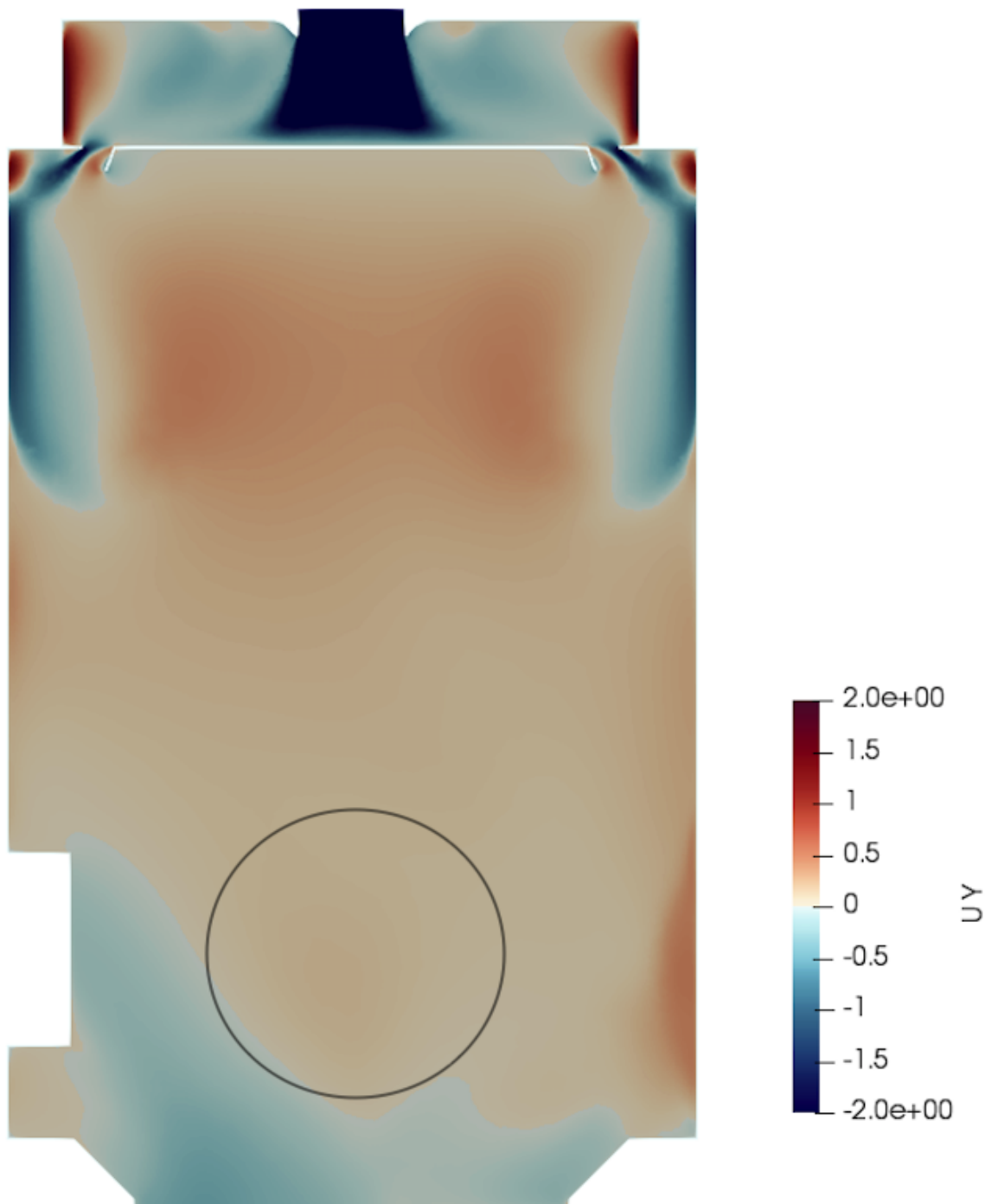


**Obr. 31:** Sestava vstupu vzduchu. Na horním díle M244.02.02.002 AIR BOX jsou patrné prolisy pro zvýšení tuhosti a taktěž tvarovaný vstup vzduchu. Ve spodním díle M244.02.02.001 CEILING COVER jsou vidět prořezané otvory pro směrování vzduchu.

## 8.1 Separace palivové mlhy

Atomizované palivo tvořící aerosol v měřicí oblasti zkušebního zařízení tvoří vysoce výbušnou směs. Vzhledem k požadavkům zákazníka, kdy má být testovací zařízení umístěno v uzavřené místnosti, je nutné palivovou mlhu separovat na její dvě složky - palivo a vzduch, a parami kontaminovaný vzduch i palivo odvádět. Palivo se bude vracet do palivové nádrže a parami kontaminovaný vzduch bude odsáván skrz ventilátor pryč (místo, kam bude tento vzduch proudit není blíže specifikováno).

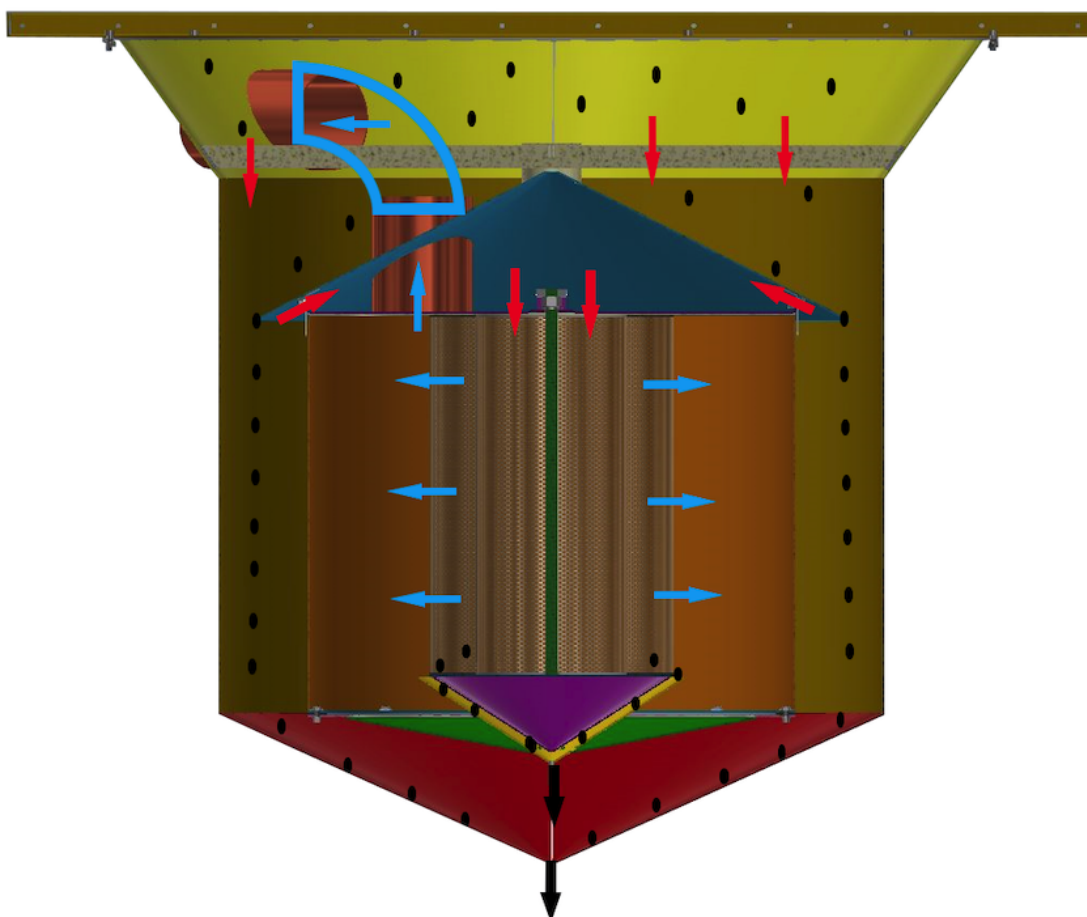
Do navrženého separátoru aerosolu vstupuje směs palivo-vzduch shora. Hnací silou je gravitace a unášivá síla vzduchu, který je z pracovního prostoru standu vysáván ven skrz koalescenční patronu. Princip práce je patrný z obr. 33 a následuje detailní dovysvětlení probíhajících jevů. Větší kapičky a část kondenzace probíhá na sítu, které je umístěno horizontálně s počátkem koše. Odtud kapičky odkapávají na kužel M244.04.02.006 DROPPLET SHIELD (na obr. 33 znázorněn modře), po kterém stékají a odkapávají dolů, odkud je palivo odsáváno. Zbylé palivo obsažené v palivové mlze je přisáváno skrz mezikruží mezi tímto kuželem a válcem M244.04.05 CARTRIDGE CONTAINER a shora vstupuje do vnitřního prostoru skrz otvor v koalescenční vložce. Průchodem stěnou této patrony se palivo rozdělí na dvě složky – palivo a vzduch. Palivo gravitací stéká porézními stěnami patrony k jejímu spodnímu okraji odkud odkapává do prostoru mezi kuželovými díly M244.04.03 CARTRIDGE CONE WELDMENT a M244.04.04 DRIP CONE WELDMENT, odkud je odsáváno. Palivo, které by se z nějakého důvodu do tohoto mezikuželí nedostalo, je svedeno po kuželi M244.04.04.003 BOTTOM CONE (na obr. 33 znázorněn zeleně), kde je dírkami v kuželi M244.04.04.001 CONE GUIDE 2 (žlutě) také odsáto.



**Obr. 32:** CFD simulace proudění vzduchu uvnitř měřícího prostoru s přibližně vyznačenou oblastí pohybu trysky. Barva znázorňuje rychlost v transversálním směru, jednotkou je m/s. Obrázek převzat z: [8].

### 8.1.1 Technologické zpracování separátoru

Separátor je svařenec, kde je vnější část tvořená horním tácem, kuželem a válcem vyrobena z nerezového plechu tloušťky 2mm. Zbylá část plechových dílů je vyrobena z nerezového plechu tloušťky 1mm. Konstrukce je rozebíratelná a umožňuje vysunutí vnitřního koše směrem nahoru a po sejmutí spodní části je možné odšroubovat samotnou patronu. Patrona



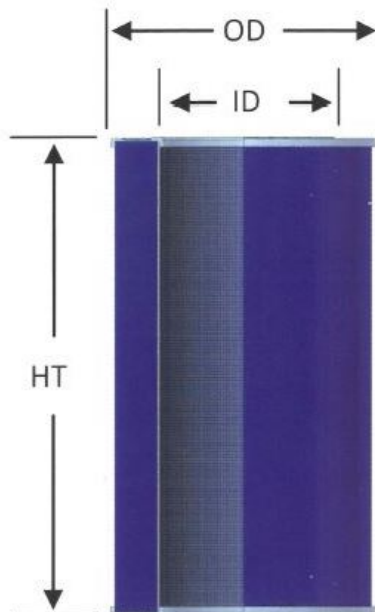
**Obr. 33:** Separátor palivové mlhy s koalescenčním filtrem. Černou barvou jsou vyznačeny palivové kapky, červené šipky znázorňují tok palivové mlhy a modré šipky tok přefiltrovaného vzduchu.

je uchycena ve spodní části svařencem M244.04.03 CARTRIDGE CONE WELDMENT tvořeným kuželem M244.04.03.003 CONE GUIDE, plechovým kruhem M244.04.03.002 CARTRIDGE CAP a závitovou tyčí. V horní části nádoby je stažena maticí na závitové tyči. Všechny dosedací plochy jsou zatěsněny pryžovým těsněním tloušťky 2mm.

### 8.1.2 Koalescenční patrona

Koalescenční patrona je typ PSG344 od společnosti Solberg, která ji nabízí jako náhradní díl pro své separátory. Z hlediska firemního know-how byla společností poskytnuta tlaková ztráta jako samostatné číslo pro odhadnutý průtok  $360\text{m}^3/\text{hod}$ . Typ PSG344 je určen pro průtok  $850\text{m}^3/\text{hod}$ . Naddimenzování patrony je záměrné vzhledem k nejasným pochodům uvnitř zkušebního zařízení a možnosti případně zvýšit odsávané množství vzduchu dle potřeby. Tlaková ztráta bude na takto naddimenzované patroně nižší z důvodu nižší rychlosti média proudícího skrz její stěnu. Pro průtok vzduchu  $360\text{m}^3/\text{hod}$  byla výrobcem poskytnuta tlaková ztráta o hodnotě  $30\text{inWC} \div 40\text{inWC}$ , která odpovídá  $7473\text{Pa} \div 9963\text{Pa}$ .

Koalescenční patrony jsou určeny pro eliminaci olejové mlhy. Použití v aplikaci s leteckým



**Obr. 34:** Geometrie koalescenční patrony PSG344. Rozměry jsou patrné z obr. 35.

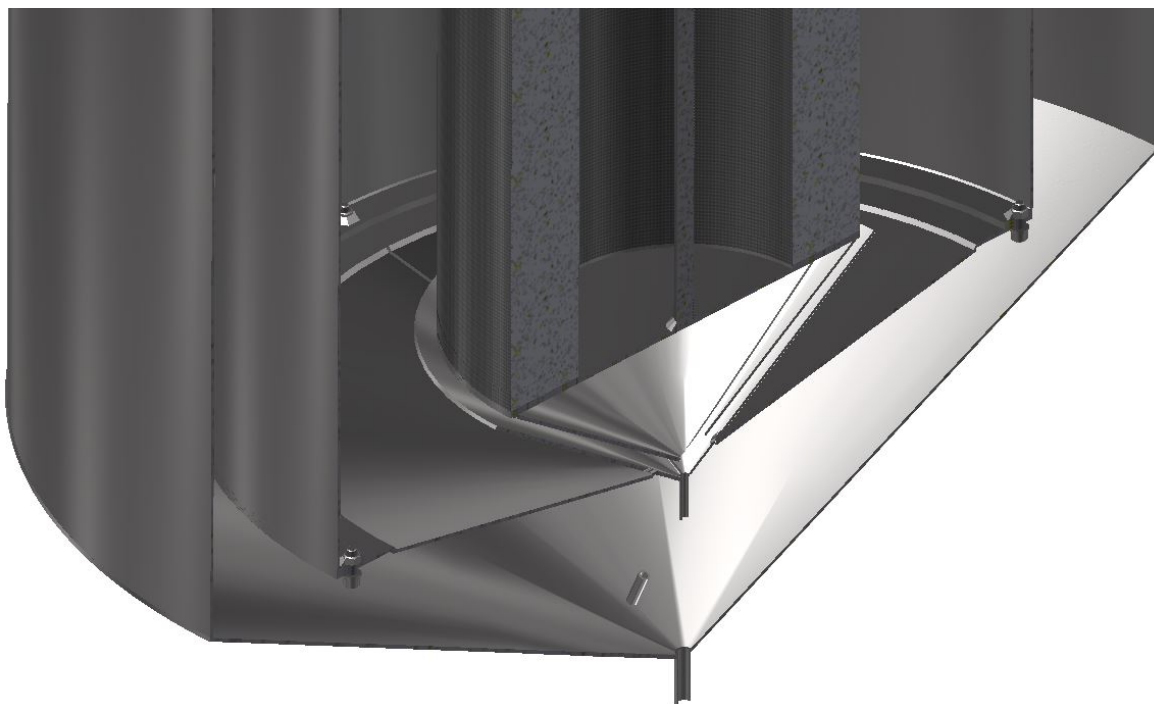
Element	Element m <sup>3</sup> /h	Dimensions - mm			Features
Part Number	Rating	ID	OD	HT	
FG3	7	32	57	54	MW
FG5	8	32	57	76	MW
FG7	12	32	57	102	MW
FG9	27	76	102	102	MW
FG10	41	76	102	152	MW
FG11	51	98	127	108	MW
FG20	75	203	229	121	MW
GL910	7	13	46	36	DW
GL915	17	19	59	60	DW
PSG925	35	38	76	124	GBP
PSG848	85	65	127	121	GP
PSG850/1	215	89	149	222	GBP
PSG145	300	65	127	362	GP
PSG860/1	340	89	149	356	GBP
PSG244/2	510	152	248	244	GBP
PSG344/2	850	152	248	359	GBP
PSG374/2	1360	203	298	359	GBP
PSG474/2	1870	203	298	546	GBP
PSG476	3060	229	371	546	GP

**Obr. 35:** Výběr z datalistu koalescenčních patron PSG. Zvolená patrona je typ PSG344.

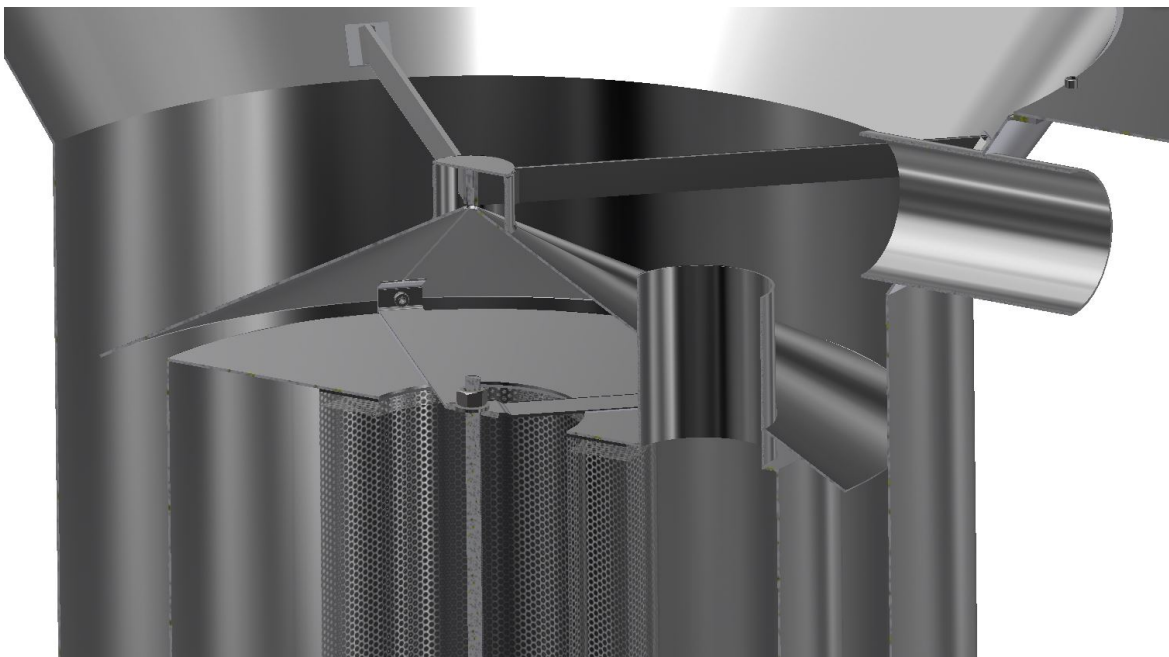
palivem JET-A1 je tedy experimentální a je možné, že nebude díky nižší viskozitě leteckého paliva ( $1cST \div 2cST$  při teplotě  $20^{\circ}C$ ) (zdroj. [17]) oproti oleji (řádově 10 cST v závislosti na

typu oleje) fungovat správně. Faktem je, že olejová mlha se zpracovává v provozech, kde její teplota dosahuje vyšších hodnot (např. obrábění, odvodušnění převodovek, ... ) a tehdy má olej nižší viskozitu, řádově i jednotky cST, a i tehdy je filtrace úspěšná. Taktéž bývají řezné kapaliny a chladicí kapaliny emulze minerálních olejů s vodou, která opět snižuje celkovou viskozitu následného aerosolu.

Případná špatná funkce separátoru bude odhalena při zkušebním provozu zkušebního zařízení před předáním zákazníkovi a řešila by se operativně. Průhledná antistatická hadice odvádějící vzduch ze separátoru bude ohnuta do tvaru "U" a hromadění kondenzátu by bylo viditelné. Možným řešením problému je snížení viskozity (ochlazením aerosolu), sériovým zařízením zařízení pro eliminaci výparů (molekulární síta nebo patrony s aktivním uhlím) nebo nahrazení filtrační patrony patronou pro jiné viskozity - např. koalescenční patronou pro řezné kapaliny. Možnou disfunkci je těžké předpovídat a bude řešena při zkušebním provozu.



**Obr. 36:** Detail svodu paliva ze separátoru.



Obr. 37: Odsávání vzduchu z nádoby s koalescenční patronou.

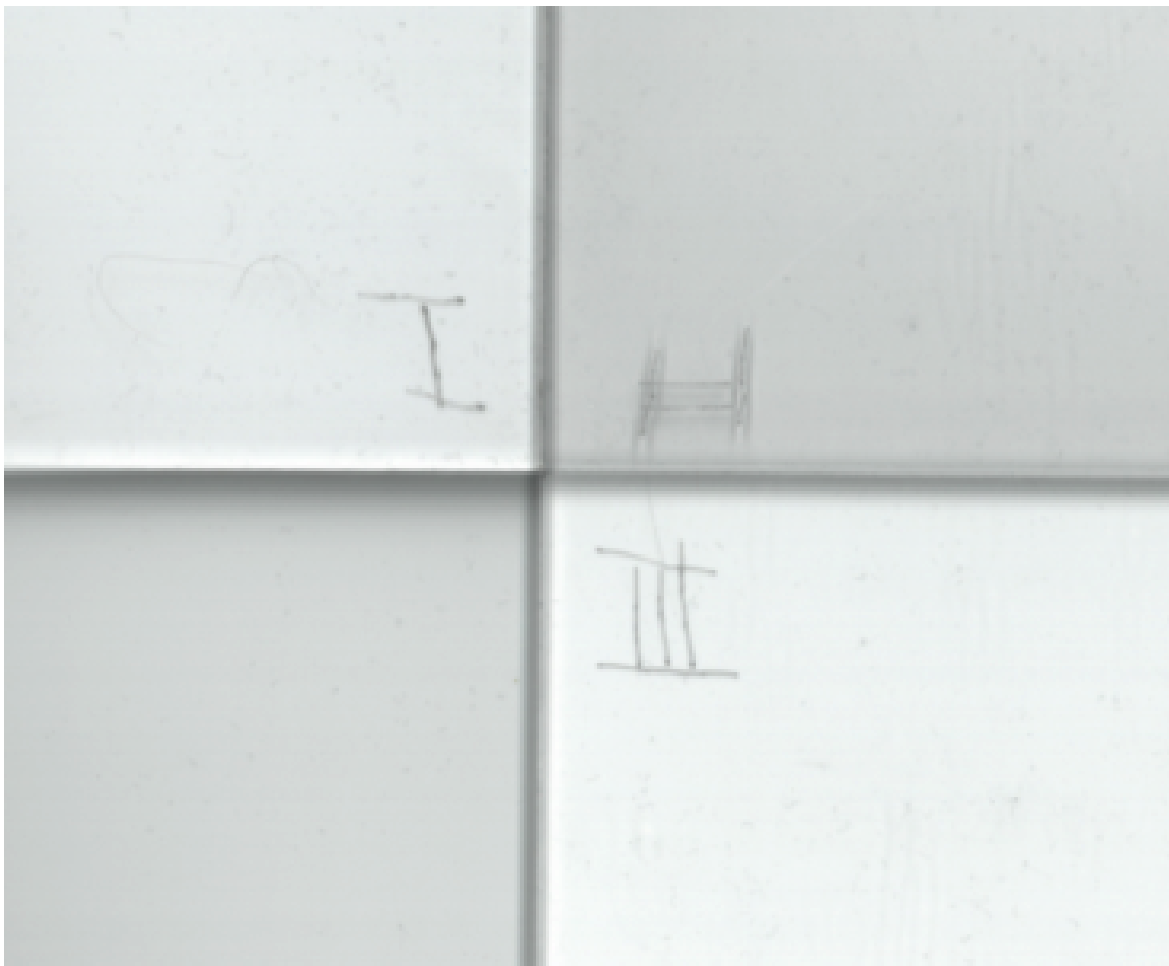
## 9 Technologie výroby a výběr materiálů

Konstrukci byla ponechána svoboda v podobě výběru technologie výroby a volbě výrobce. Dominantní část konstrukce je tvořena plechovými díly. Jelikož VZLÚ nedisponuje laserovým řezacím strojem, byla výroba poptána v jiných společnostech, které touto technologií disponují. Bohužel většina společností zabývajících se kovovýrobou nemá prostředky pro klempířské doobrobení některých dílů a tudíž prvky jako prolisy a vyklepané tvary, které je potřeba vyrobít před ohybem nemohly být provedeny. Tyto prvky sloužily ke zvýšení tuhosti plechových ploch a pokud bude konstrukce shledána nedostatečně tuhou budou substituovány alternativní metodou. Z důvodu velkých rozměrů plechových dílů a jejich slícování bylo potřeba některé díly klempířsky doobrobit pro výrobu svařenců. Jedná se zejména o zakroužené válce a kužely. Neplechové díly byly navrženy tak, aby je bylo možné obrobit konvenčními metodami. Dvě skleněné tabule zajišťující optický přístup do zkušebního zařízení byly vyrobeny z ESG skla - kaleného skla se zvýšenou odolností proti mechanickému a tepelnému namáhání.

### 9.1 Průhledová stěna

Pro vizuální kontrolu měřicího prostoru je navržena průhledná stěna z polykarbonátu vsazeného ve svařeném rámečku. Polykarbonátová deska sedí na pryžovém těsnění a je upevněna osmi šrouby. Výběr materiálu pro průhledovou stěnu z plexiskla byl konzultován ve společnosti MK-plexi s.r.o. a byly poskytnuty vzorky polykarbonátu, polykarbonátu s ochrannou vrstvou proti poškrábání a plexiskla. V materiálovém listu je uvedena “omezená”

odolnost vůči petroleji u plexiskla i polykarbonátu. Proto byly vzorky polykarbonátu, plexiskla a plexiskla s ochrannou vrstvou ponořeny na měsíc do paliva JET-A1. U žádného ze vzorků se neprojevila viditelná změna mechanických vlastností ani ztráta průhlednosti (zažloutnutí), jak je patrné z obrázku 38. Přesto byl jako materiál desky zvolen polykarbonát s ochrannou vrstvou proti poškrábání v tloušťce 3mm dodávaný společností MK plexi s.r.o. pod označením Polycarbonat Sapphire.



**Obr. 38:** Vzorky polykarbonátu (I), polykarbonátu Sapphire (II) a plexiskla (III) po vyjmutí z petroleje, ve kterém byly ponořeny 1 měsíc. Ani na jednom vzorku není patrné zažloutnutí. Šedý odstín vzorku II je dán jeho nižší tloušťkou 3mm oproti tloušťce 5mm vzorků I a III.

## 9.2 Těsnění

Pro dodatečné zatěsnění netěsností byl použit tmel Veidec TechnoSil. Dle výrobce se jedná o tmel s výbornou tepelnou a chemickou odolností vhodný pro těsnění motorů, převodovek, pecí, skel, plasových a gumových povrchů [31]. Aspektem pro použití tohoto tmelu byla i jednoduchost použití, kdy je tmel dodáván v přetlakované kartuši s aplikátorem. Tento tmel je také použit pro nalepení pryžových těsnění k nerezové konstrukci. Pryžová těsnění byla zhotovena z pryže P534 (datasheet dostupný z: [32]) dodávané společností GUMEX,



kteřá byla dle popisu funkce doporučena referentkou společnosti. Dle datalistu je pryž dobře odolná benzínu, olejům a dalších ropných produktům. Těsnění byla u této společnosti nařezána na požadované tvary dle výkresové dokumentace z pryžové desky o tloušťce 2mm.

### Fyzikální vlastnosti

Chemický základ	Acetoxysilikon
Zápach	Mírně štiplavý po kyselině octové
Barva	Černá
Hustota	1,28 g/cm <sup>3</sup>
Teplota aplikace	+5 až +35 °C
Doba vytvrzení	2,0 mm/24 hod.
Doba vytvoření slupky	7 minut
Teplotní stálost, dlouhodobá	-60 až +285 °C
Teplotní stálost, krátkodobá	-60 až +300 °C
Prodloužení do přetržení	500 % (DIN 53504)
Pevnost v tahu (DIN 53504)	2,5 N/mm <sup>2</sup>
Vratnost deformace	> 80 %
Tvrdość (DIN 53505)	20 ± 5 Shore A
E-modul při 100% (DIN 53504)	0,77 N/mm <sup>2</sup>
Schváleno NSF registrací	Certifikát č. 140535 klasifikace P1

Obr. 39: Datalist silikonu Veidec Technosil.

### 9.3 Výběr kovových materiálů

Pro výrobu plechových dílů byla zvolena chrom-niklová austenitická ocel DIN 1.4541, ekvivalent dle ČSN 17 247. Tato nerezová ocel je svařitelná metodou TIG. Na rozdíl od DIN 1.4301 je odolnější mezikrystalické korozi v tepelně ovlivněných místech, tedy v oblasti svarů. U všech materiálů a především u nerezů vznikají při svařování zejména v nevyztužených místech výrazné deformace. Ocel DIN 1.4541 je svařitelná s konstrukčními prvky (šrouby, matice, atp.), které jsou standardně vyrobeny z materiálu DIN 1.4301.

Pro díly obráběné konvenčními metodami byl zvolen materiál EN AW 2024, tzv. superdural pro svoji snadnou obrobiteľnost a eloxovatelnost pro zvýšení korozní odolnosti. Tento materiál byl použit u dílů zejména v sestavě traverzěru a upevnění palivové trysky z důvodu úspory hmotnosti a z toho plynoucí nižší setrvačné síle pohyblivých částí.

## 9.4 Technologické úpravy při výrobě

Vzhledem k vytíženosti společností zajišťující kovovýrobu, nebylo možné uskutečnit všechny požadavky kladené ve výrobní dokumentaci. Jedná se zejména o prolisy, kdy dodavatel plechových výpalků ani společnost provádějící ohyb nedisponovala strojem pro jejich vyrobění a dodatečná výroba již není možná, jelikož nástroj pro tvorbu těchto prolisů, tzv. signovačka, má omezenou maximální výšku lisovaného plechu a ohranění znemožňuje najetí tlačítkové rolny do obrobku. Po svaření dílů a sestavení sestav bude rozhodnuto, jestli mají plechové díly standu dostatečnou tuhost či nikoliv a případné vyztužení bude provedeno jednou ze dvou metod:

- Nabodování nerezových L-profilů diagonálně přes čtvercové díly.
- Vyztužení ruční signovačkou, která má však omezený dosah od kraje plechu a přímost prolisu závisí na šikovnosti obsluhy - klempíře.

Z kapacitních důvodů klempířské výroby nebyl vyroben ani nákržek na dílu M244.02.002 AIR BOX. O náhradě tohoto prvku ještě není rozhodnuto, protože je možné, že tento otvor pro přívod vzduchu bude opatřen vzduchotechnickou hadicí pro přívod vzduchu zvenčí. Některé svary, zejména ty, které nemají nosnou funkci, byly nahrazeny bodovými z důvodu úspory času při výrobě a redukci deformací vzniklých svařováním. Takto nahrazené svary budou dotěsněny silikonem Veidec Technosil.

Zakružování kuželů bylo provedeno klempířskými metodami. První se výpalky rozvinu kužele proválely všemi směry na zakružovacích válcích pro dosažení lepší tvárnosti nerezového plechu. Následným upnutím (navařením šroubu na vrchol kužele) a jeho protažením trubkou o průměru většího průměru kužele bylo dosaženo deformace do přibližně kuželového tvaru. Načež byl rozvin kužele uzavřen postupným bodováním směrem od menšího průměru k většímu. Svařování nerezových plechů vnáší do konstrukce velké deformace. Kontrolovat velikost deformací je možné vhodnou konstrukcí. Konstrukčními opatřeními použitými pro snížení deformace bylo:

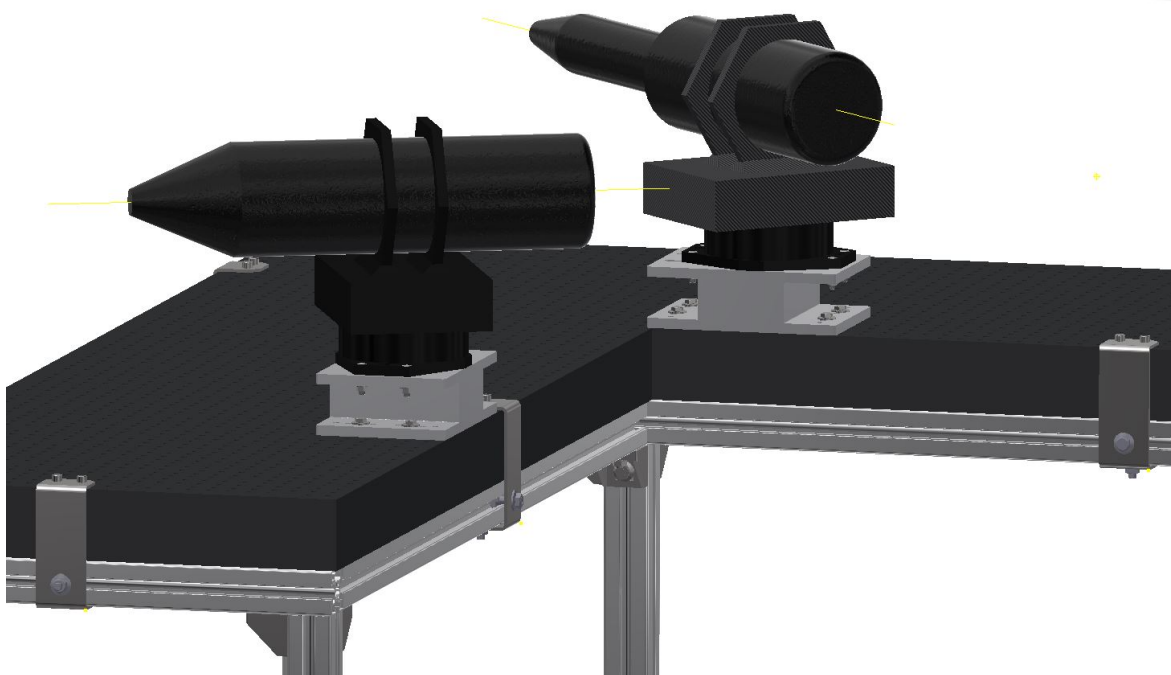
- Umístění svarů do míst, které mají vyšší tuhost.
- Zvolení bodových svarů namísto dlouhých svarových housenek.

Při vzniku deformací je možné klempířsky dopravit díl.

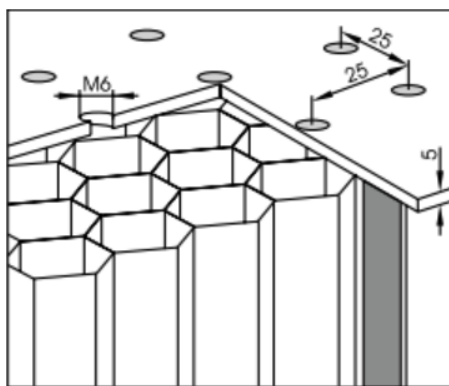
## 10 Upevnění měřicího zařízení

Měřicí aparatura, tedy vysílající a přijímající optika, je uchycena na optickou desku Safibra voštinové konstrukce o tloušťce 70mm. Deska je osazena čtverečnou sítí závitových děr M6 s roztečí 25mm, která umožní doladění polohy měřicí techniky do požadované polohy.

Optická deska je uchycena k rámu ze stavebnicových profilů pomocí plechové svorky. Mezi samostatně stojícím optickým stolem a standem bude vymezena mezera aby nedocházelo k přenosu vibrací. K uchycení a přesnému polohování měřících optik slouží adaptér, který kompenzuje jinou osovou rozteč děr na optické desce a na upínce optiky a dovoluje posuv optiky o 30mm, který kompenzuje příliš velkou rozteč děr na optickém stole. Tento posuv je možný pouze ve dvou směrech. Samotná upínka optiky již jeden posuv umožňuje a optika jde tedy ve vodorovné rovině přesně napolohovat. Krom posuvu upínka optik umožňuje rotaci kolem svislé osy a náklony kolem dvou horizontálních os. V průběhu dokončování této práce byla konstrukce adaptéru nepatrně změněna.



**Obr. 40:** Model optického stolu s měřícími optikami. Optické desky jsou k rámu upnuty plechovými spojkami.



**Obr. 41:** Voštinová konstrukce optické desky s upínacími otvory na pracovní ploše. Zdroj: [27]



Obr. 42: Optická deska. Zdroj: [27]

## 11 Odvod paliva

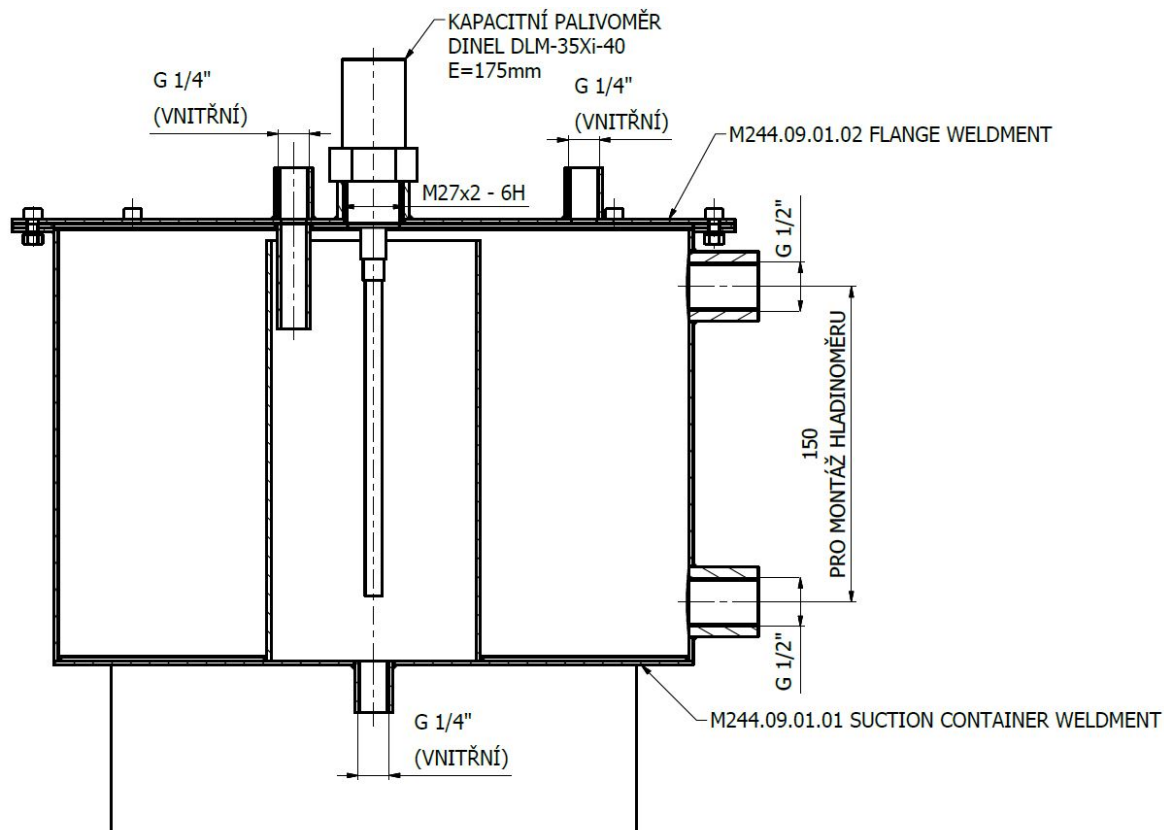
V kapitole 8 jsme objasnili pohyby vzduchu skrze zkušební zařízení a principy separace paliva. Separované palivo je nutné ze zkušebního zařízení odvádět zpět do palivové nádrže v palivovém hospodářství. Systém palivového hospodářství bude diskutován pouze ve velmi omezené míře, jelikož nebyl předmětem této práce.

Komplikací v odvodu / odsávání paliva ze zkušebního zařízení je fakt, že palivo je odváděno ze dvou míst o odlišném tlaku. Tlakový rozdíl v těchto místech je roven tlakové ztrátě na koalescenčním filtru, která byla diskutována v kapitole 8.1.2. Prvním místem odvodu paliva je nejnižší bod sběrného koše, odkud je palivo gravitačně vedeno do sběrné nádoby nacházející se pod zkušebním zařízením. Tato sběrná nádoba je tvořena svařencem dvou souose svařených trubek. Menší z trubek slouží jako nádrž, kde je palivo hromaděno, dokud nebude kapacitním palivoměrem signalizována taková úroveň hladiny, aby došlo k sepnutí odsávacího čerpadla. Odsávací čerpadlo odsaje palivo nahromaděné v této nádrže skrze hadici připojenou na navařenou mufnu ve dně nádoby. Prostor mezi vnějším a vnitřním válcem slouží jako přepad, kam by v případě poruchy signalizace hladiny přeteklo palivo. Přetečení paliva přes přepad by bylo signalizováno palivoměrem připojeným opět ke dvěma navařeným mufnám po stranách nádoby.

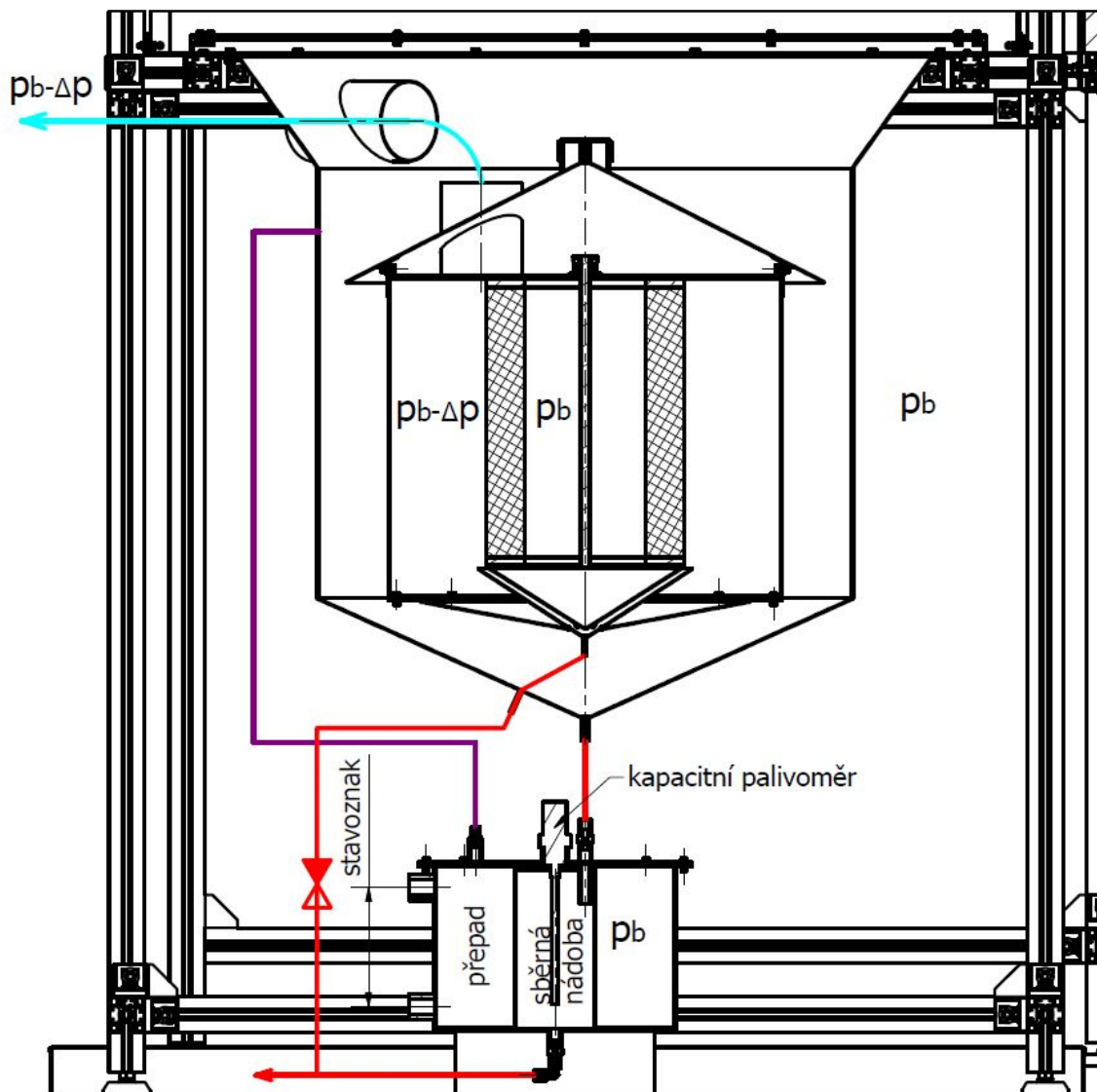
Odvzdušnění sběrné nádoby je realizováno z prostor sběrného koše uvnitř standu. Odvzdušnění slouží pro odvod par, které budou následně odsáty přes dříve popsanou vzduchovou cestu zkušebního zařízení.

Druhým místem, odkud se odvádí palivo je prostor mezikuželí, nad kterým sedí koalescenční patrona. Zde hromaděné palivo je produkt separace složek aerosolu v koalescenčním filtru. Tato cesta je napojena na odvod paliva ze sběrné nádoby a aby nedocházelo nasávání paliva do prostoru mezikuželí, kde je tlak poníženy o tlakovou ztrátu na koalescenční patroně, je na hadici zařazen jednocestný ventil, který neumožňuje výtlak paliva (možná unášeného

vzduchem přítomném v potrubí) vzhůru nebo zamezení prosávání vzduchu touto cestou. Tento jednocestný ventil bude automaticky otevřen v případě, že bude odsávacímu čerpadlu kapacitním palivoměrem signalizováno, že v nádrži ve sběrné nádobě je hladina dostatečně vysoko k odsávání. Schematický náčrt vzduchové a palivové cesty je patrný z obr. 44.



**Obr. 43:** Detail sběrné nádoby na palivo z obr. 44. Válcová nádoba v ose má přepad do vnější nádoby, kde je případná hladina signalizována na přípojném hladinoměru.

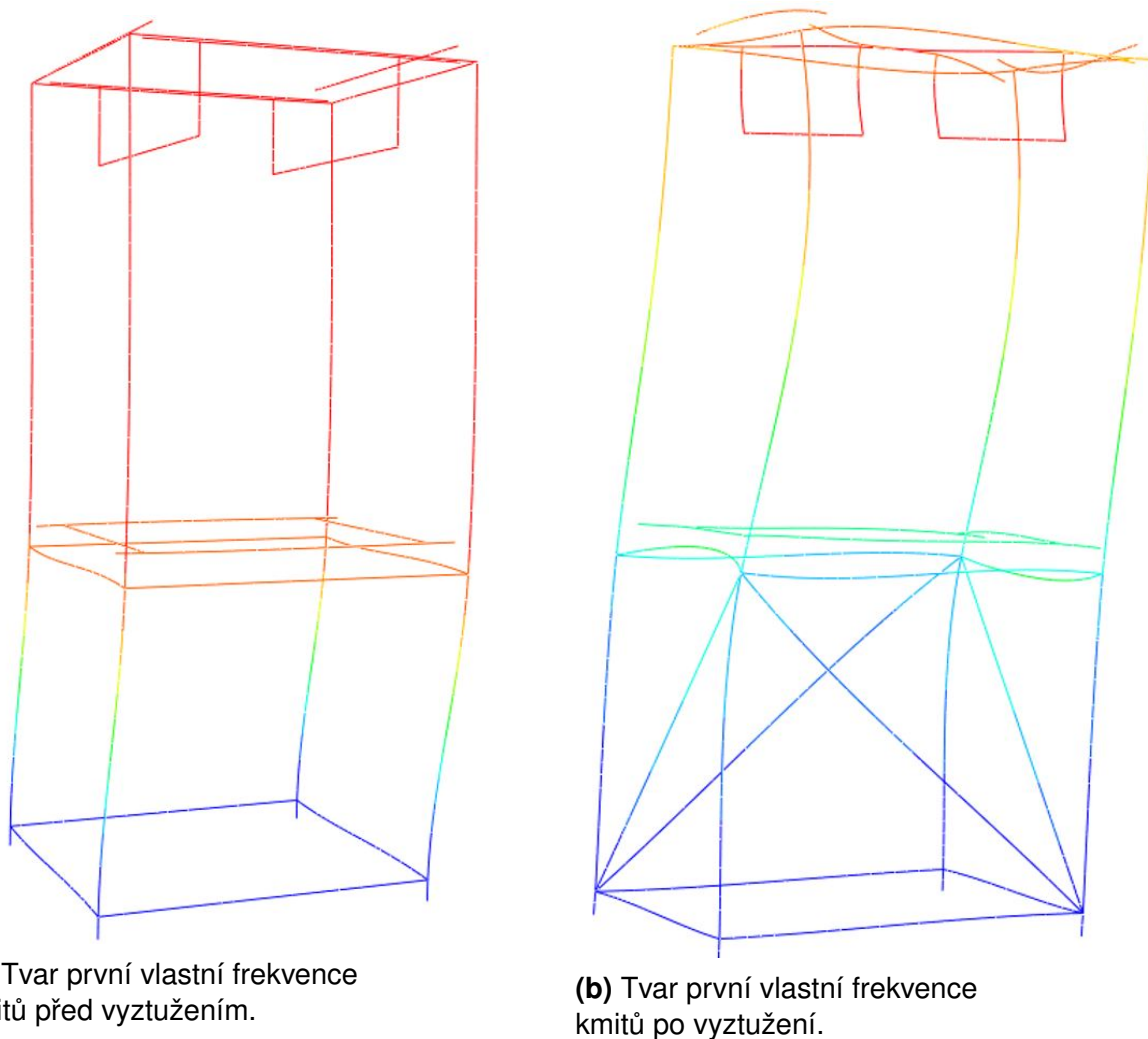


**Obr. 44:** Tlakové poměry, vzduchová a palivová cesta týkající se odvodu paliva. Dva základní tlaky jsou denominovány  $p_b$  pro barometrický tlak a  $\Delta p$  pro tlakovou ztrátu na koalescenčním filtru. Modře je znázorněn vzduch odsávaný ze zkušebního zařízení skrze koealescenční patronu. Fialová cesta je odvzdušnění sběrné nádoby. Červená cesta je odvod paliva po zkapalnění ať už v prostorách zkušebního zařízení nebo na koalescenčním filtru.

## 12 Konstrukční úpravy při montáži

### 12.1 Vyztužení konstrukce standu

V průběhu montáže zkušebního zařízení byla zjištěna nedostatečná tuhost konstrukce. Bylo navrženo zavětrování do míst, ve kterých docházelo k výrazným viditelným deformacím. Tyto deformace se objevovaly ve spodních částech konstrukce. Navržené opatření spočívalo v umístění diagonálních příček přes všechna spodní pole konstrukce, jak je vidět na obr. 46. Dodatečně byla provedena modální analýza konstrukce výpočtovým oddělením útvaru motory VZLÚ, při kterém byla ověřena efektivita vyztužení. Toto vyztužení přineslo zvýšení



**Obr. 45:** Modální analýza rámu. Zdroj:[9].

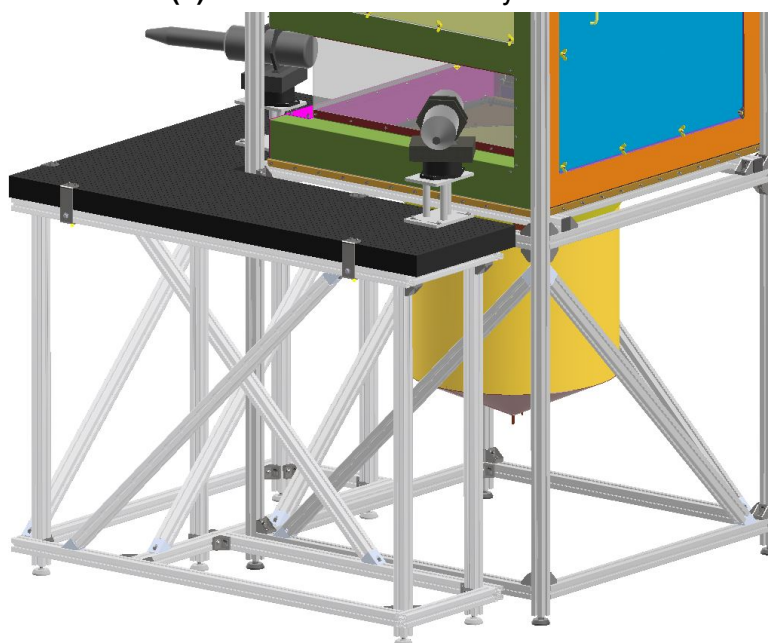
první vlastní frekvence konstrukce na  $68,8\text{Hz}$  z původní  $16,5\text{Hz}$  [9]. Tvary prvních vlastních frekvencí kmitů jsou vyobrazeny na obr. 45.

## 12.2 Vyztužení konstrukce optické lavice

U konstrukce optické lavice se objevil stejný problém, jako u konstrukce standu - vysoko položené těžiště na nedostatečně tuhé konstrukci. Takto poddajná konstrukce nebyla pro měření optickou metodou PDA vhodná a došlo k jejímu vyztužení. Vyztužení provedené na optické lavici i standu je vyobrazeno na obr. 46b.



(a) Rám konstrukce bez vyztužení.



(b) Rám konstrukce s vyztužením.

Obr. 46: Porovnání vyztužené a nevyztužené konstrukce standu a optické lavice.



## 13 Závěr

Tato diplomová práce měla za cíl navrhnout zkušební zařízení pro měření sprejových charakteristik palivových trysek. Podle vytvořené dokumentace bylo zařízení vyrobeno a sestaveno v laboratořích Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s..

Zvláštní požadavky byly kladeny na požární bezpečnost zkušebního zařízení. Z tohoto důvodu bylo nutné měřicí oblast, ve které se nachází výbušný aerosol vzduch-kerosin, oddělit od vnějšího prostředí a stínit krokové motory pohybující s traverzérům tryšky.

Vznikající aerosol bylo nutné průběžně ze zkušebního zařízení odvádět. Odvod aerosolu byl proveden prostřednictvím koalescenčních filtrů, na kterých jsou složky aerosolu odděleny a dále samostatně odváděny - palivo do sběrné nádoby a dále do palivové nádrže a vzduch s párami skrze ventilátor ven ze zkušební místnosti.

Navržený traverzér pro polohování měřené tryšky byl navržen s dostatečnou přesností posuvu. Po uvedení do provozu nebyly viditelné kmity zkušebního zařízení vyvolané posuvy traverzéro. Po sestavení však musela být konstrukce ze stavebnicových profilů dodatečně vyztužena, jelikož vykazovala nízkou tuhost ve spodní části. Taktéž byla vyztužena konstrukce optického stolu.

Součástí práce nebyl výběr měřicí techniky, návrh palivového systému ani elektronického zabezpečení. Tuto činnost měla na starosti jiná oddělení VZLÚ.

## Seznam použitých značek a symbolů

PIV	Měřicí metoda Particle Image Velocimetry
IPI	Měřicí metoda Interferometric Particle Imaging
PDA	Měřicí metoda Phase Doppler Anemometry
DIN	Německá Národní Norma
ČSN	Česká Státní Norma

Symbol	Jednotka	Význam
$A$	$[mm^2]$	plocha (obecně)
$C_f$	[1]	silový koeficient, určen z katalogu výrobce os traverzéro
$d_2$	$[m]$	střední průměr závitu
$d_3$	$[m]$	malý průměr závitu šroubu
$D_c$	$[N]$	odpor vozíku na ose, určen z katalogu výrobce os traverzéro
$d_d$	$[m]$	průměr díry pro šroub
$D_H$	$[m]$	průměr hlavy šroubu
$F$	$[N]$	síla (obecně)
$M_u$	$[Nm]$	utahovací moment
$m$	$[kg]$	hmotnost osy traverzéro
$m_v$	$[kg]$	hmotnost vozíku osy traverzéro
$L$	$[m]$	délka osy traverzéro
$p$	$[mm]$	stoupání šroubu
$p_b$	$[MPa]$	barometrický tlak
$Re$	$[N \cdot mm^2]$	mez kluzu
$\beta$	$[^\circ]$	úhel stoupání závitu
$\Delta p$	$[MPa]$	tlaková ztráta na koalescenčním filtru
$\delta_s^\circ$	$[^\circ]$	úhlová chyba spojky
$\delta_s$	$[mm]$	chyba spojky promítnutá na posuv vozíku
$\delta_m^\circ$	$[^\circ]$	úhlová chyba krokového motoru
$\delta_m$	$[mm]$	chyba krokového motoru promítnutá na posuv vozíku
$\delta_o$	$[mm]$	chyba kuličkového šroubu lineární osy traverzéro
$\delta$	$[mm]$	celková chyba posuvu vozíku lineární osy traverzéro
$\sigma$	$[N \cdot mm^2]$	napětí (obecně)
$\sigma_d$	$[N \cdot mm^2]$	dovolená napětí (obecně)
$\varphi$	$[^\circ]$	úhel mezi přijímací a vysílající optikou metody PDA

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] SARAVANAMUTTO, Herbert I.H., ROGERS, G.F.C., COHEN, Henry, STRAZNICKY, Paul. *Gas Turbine Theory*. North York: Pearson Education Canada, 2008. 608 stran. ISBN 0132224372.
- [2] LEFEBRE, Arthur H., BALLAL, Dillip R.. *Gas Turbine Combustion*. Boca Raton: CRC Press, 2010. 560 stran. ISBN 978-1-4200-8604-1.
- [3] ARP4865. *Gas Turbine Engine Fuel Nozzle Test Procedures*. SAE International, 2013. 32 stran.
- [4] ČSN EN 299. *Trysky na kapalná paliva s tlakovým rozprašováním - Stanovení úhlů a charakteristik rozprašování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 12 stran.
- [5] CSN EN 60079-0 ed.4. *Výbušné atmosféry - Část 0: Zařízení - Obecné požadavky*. Praha: řad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2013. 100 stran. Třídící znak 332320.
- [6] LINHART, Zdeněk. *Konstrukce leteckých motorů: Konstrukce hlavních částí motoru*. Brno: VA, 1978. ASK.
- [7] RŮŽEK, Josef. *Teorie leteckých motorů I: Kompresory, turbíny a spalovací komory*. Brno: VA, 1979.
- [8] CFD Simulace zkušebního zařízení pro měření charakteristik palivové trysky. Interní zpráva VZLU a.s., referenční označení R-7037. NEVEŘEJNÁ.
- [9] FEM analysis of the combustion chamber and of the Fuel Nozzle Test Stand. Interní zpráva VZLU a.s., referenční označení R-7041. NEVEŘEJNÁ.
- [10] MAGESH,V., KIRUBAKARAN,V.. *Spray Characterization of an Pressure Swirl Atomizer*. Kaveri Aerospace Journal of Engineering and Technology - KAJET. 2013, Vol.1, Issue 1. 9 stran. Dostupné z: <http://www.kaveriaerospace.com/wp-content/uploads/2018/03/KAJET01V1.pdf>
- [11] DURDINA, Lukáš. *MEASUREMENT OF SPRAY CHARACTERISTICS USING OPTICAL MEASUREMENT METHODS*. Brno, 2012. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [12] JASIKOVA, D., KOTEK, M., KOPECKY, V., "The Investigation of the Industrial Spray Systems Using Interferometry Particle Imaging Method." *American Journal of Mechanical Engineering* 1, no. 7 (2013): 384-389. doi: 10.12691/ajme-1-7-46.
- [13] BENEŠ, Jan. *Měření parametrů proudu v turbulentní cele*. Praha, 2016. Bakalářská práce, České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní.

- [14] Filtration Group, Separátory olejové mlhy. [www.filtrationgroup.cz](http://www.filtrationgroup.cz) [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://filtrationgroup.cz/produkt/separatory-olejove-mlhy/>
- [15] Heyman, acces fastenning solutions. [online]. [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: <https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische-angaben/utahovací-momenty.pdf?f=1>
- [16] INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL. [www.inoxspol.cz](http://www.inoxspol.cz) . [online]. [cit. 2018-09-05]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14541.html>
- [17] Bezpečnostní list a data list leteckého petroleje. MOL Česká Republika. [www.molcesko.cz](http://www.molcesko.cz) . [online]. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <https://molcesko.cz/images/mol-cz/pdf/produkty/pro-partnery/bezpecnostni-listy/letecky-petrolej-jet-a-1.pdf>
- [18] DantecDynamics, měřící metoda PDA. [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com). [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/phase-doppler-anemometry>
- [19] DantecDynamics, měřící metoda IPI. [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com). [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/interferometric-particle-imaging>
- [20] Wikipedia. Sprejové charakteristiky. [online]. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Spray-characteristics>
- [21] Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Laboratoř sprejů. [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/spray-laboratory/>
- [22] Nederman, Filtrace olejové mlhy. [www.nederman.com](http://www.nederman.com). [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://www.nederman.com/cs-cz/industry-solutions/metalworking/oil-mist-filtration>
- [23] Wemac, Odsávání a filtrace olejových a emulzních aerosolů, mlhovin a prachu. [www.wemac.cz](http://www.wemac.cz). [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://www.wemac.cz/principy-filtrace/principy-filtrace/>
- [24] LaVision. [www.smart-piv.com](http://www.smart-piv.com) . [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.smart-piv.com/en/techniques/shadow-imi/index.php>
- [25] wikipedia - Elektrická zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu. [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrická-zařizení-v-prostředí-s-nebezpečím-výbuchu>

- [26] Igniscon, Rozdíly v certifikaci zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu. [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://www.igniscon.cz/o-nas/clanky/rozdily-v-certifikaci-zarizeni-do-prostredi-s-nebezpecim-vybuchu/>
- [27] Safibra, Optické stoly, webová stránka výrobce měřicí techniky. [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/opticke-stoly>
- [28] HepcoMotion, webová stránka dodavatele lineárních os a stavebnicových profilů. [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.hepcotion.com/>
- [29] Isel, výrobce krkokových motorů. [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: [www.isel.com](http://www.isel.com)
- [30] Special Metals, [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com). [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [31] Datasheet těsnění Veidec Technosil, [www.veidec.com](http://www.veidec.com). [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://www.veidec.com/fileadmin/webshop/cz/Technosil.pdf>
- [32] Datasheet pryžového těsnění Gumex P534, [www.gumex.cz](http://www.gumex.cz). [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/Files/ProductDocuments/13-Katalogove-listy/00414xxx-pryz-p534-EN.pdf>
- [33] Jet Fuel Nozzles 3, Youtube kanál uživatele AgentJayZ. [www.youtube.cz](http://www.youtube.cz). [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=5fRBokXvAK0&t=696s>.
- [34] Výrobce filtračních vložek, [newfilter.com](http://newfilter.com). [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://newfilter.com.ua/en/compressed-air/oil-water-coalescing-filters.html>
- [35] Spray Solutions. [bngspraysolutions.com](http://bngspraysolutions.com). [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://bngspraysolutions.com/rd-center/>
- [36] ŠroubaMatka.cz, Oborový informační server. [online]. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <https://www.sroubamatka.cz/cs/technicke-informace/mechanicke-vlastnosti-ocelovych-sroubu.html>
- [37] Katalog hřídelových spojek Mayr ES Roba. [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.mayr.com/>
- [38] Aeronautics Guide. [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/engine-fuelsystem-components-main-fuel.html>

# Seznam obrázků, grafů a tabulek

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Principy fungování tlakových trysek: a) Jednoduchá axiální tryska. b) Palivová tryska s vírovou komůrkou. c) Dvoukomůrková tryska. d) Tryska se zpětným odtokem. Zdroj: [2]	10
Obrázek 2	Air-assist palivová tryska. Zdroj: [38].	12
Obrázek 3	Řez Air-blast palivovou tryskou. Zdroj: [2].	12
Obrázek 4	Odpařovací palivová tryska. Číslem 1 je označena jednoduchá axiální tryska dodávající palivo do odpařovací trubky pod označením 4. Zdroj: [7].	13
Obrázek 5	Schéma experimentu provedeného metodou odměrných válců. Zdroj: [10]	14
Obrázek 6	Schéma měření dle české normy z roku 2010. Zdroj: [4]	15
Obrázek 7	Snímek z PIV měření turbulence v turbulentní cele, který byl součástí bakalářské práce [13]. Měřeným médiem je voda a trasovací částice jsou melaminové kuličky o průměru $50\mu m$ . Můžeme si všimnout postupné ztráty světlosti zprava doleva. Zleva byl měřicí prostor nasvícen laserovým nožem. Předpokládá se, že tento jev by v hustém spreji byl ještě markantnější, což by znemožnilo měření.	17
Obrázek 8	Uspořádání měřicí techniky metody IPI. Úhel $\Phi$ se nastaví dle indexu odrazu světla kulových částic. Zdroj [12].	18
Obrázek 9	Interferenční obrazce na kapičkách aerosolu při měření metodou IPI. Zdroj [24].	18
Obrázek 10	Optická sonda FlowExplorer. Zdroj [18].	19
Obrázek 11	Princip měření pomocí PDA. Úhel $\varphi$ , tedy úhel mezi vysílající a přijímací optikou, je třeba nastavit pro konkrétní parametry spreje. Zdroj: [18].	20
Obrázek 12	Zařízení pro optickou kontrolu spreje palivové trysky. Zdroj: [33].	21
Obrázek 13	Zkušební zařízení jež se podobá zmiňovanému zařízení ve Zkušebnách WTtech Poděbrady. Zdroj: [35]	22
Obrázek 14	Laboratoř sprejů VUT v Brně. Zdroj: [21]	22
Obrázek 15	Skládaný filtr pro separaci olejové mlhy. Na vstupu pod označením 1 se nachází hrubé síto pro oddělení makronečistot, dále 2 a 3 znázorňuje koalescenční filtry o klesající průchodnosti s následným filtrem pod položkou 4. Vzduch je nasáván integrovaným ventilátorem (č. 5) a průchodnost filtru je indikována tlakovou diferencí na vstupu a výstupu. Zdroj: [14]	24

Obrázek 16	Princip funkce koalescenčního filtru. V oblasti označené 1 dochází k filtraci pevných nečistot, kterou v našem případě zajišťuje síto na vstupu do separátoru, abychom zabránili hromadění nečistot ve filtru. V oblasti 2 postupně roste velikost kapek a v oblasti 3 jsou kapky na základě gravitace odděleny od filtru. Schéma přejato z: [34]	25
Obrázek 17	Uvažovaná geometrie palivové trysky.	26
Obrázek 18	Hlavní části zkušebního zařízení.	28
Obrázek 19	Rozdělení prostor zkušební místnosti do zón dle nebezpečí výbuchu.	30
Obrázek 20	Rodělení prostor zkušebního zařízení dle zón nebezpečí výbuchu.	31
Obrázek 21	3D model 3-osého traverzéro poskládaného z lineárních os s kuličkovým šroubem od společnosti HepcoMotion. Traverzér je sestaven spolu s rámem ze stavebnicových profilů, přes který je uchycen ke kostře zkušebního zařízení.	33
Obrázek 22	Výpočet hmotnosti osy z katalogu HepcoMotion. Zdroj: katalog výrobce HepcoMotion, [28].	33
Obrázek 23	Odečet koeficientů pro výpočet síly na vozík. Zdroj: katalog výrobce [28].	34
Obrázek 24	Momentová charakteristika krokových motorů. Zdroj: katalog výrobce krokových motorů Isel, [29].	34
Obrázek 25	Alternativní návrh traverzéro s osami od společnosti Raveo.	36
Obrázek 26	Alternativní návrh traverzéro s osami od společnosti Bosh Rexroth.	36
Obrázek 27	Fotografie krytů motorů osazených hadicovými rychlospojkami a přírub motorů.	38
Obrázek 28	Porovnání stínění motorů horizontálních a vertikální osy.	39
Obrázek 29	Model upínky trysky.	39
Obrázek 30	Výpočet deformace upínky trysky od utažení šroubu.	40
Obrázek 31	Sestava vstupu vzduchu. Na horním díle M244.02.02.002 AIR BOX jsou patrné prolisy pro zvýšení tuhosti a taktéž tvarovaný vstup vzduchu. Ve spodním díle M244.02.02.001 CEILING COVER jsou vidět prořezané otvory pro směrování vzduchu.	42
Obrázek 32	CFD simulace proudění vzduchu uvnitř měřicího prostoru s přibližně vyznačenou oblastí pohybu trysky. Barva znázorňuje rychlost v transversálním směru, jednotkou je m/s. Obrázek převzat z: [8].	43
Obrázek 33	Separátor palivové mlhy s koalescenčním filtrem. Černou barvou jsou vyznačeny palivové kapky, červené šipky znázorňují tok palivové mlhy a modré šipky tok přefiltrovaného vzduchu.	44
Obrázek 34	Geometrie koalescenční patrony PSG344. Rozměry jsou patrné z obr. 35.	45
Obrázek 35	Výběr z datalistu koalescenčních patron PSG. Zvolená patrona je typ PSG344.	45
Obrázek 36	Detail svodu paliva ze separátoru.	46
Obrázek 37	Odsávání vzduchu z nádoby s koalescenční patronou.	47

Obrázek 38	Vzorky polykarbonátu (I), polykarbotánu Sapphire (II) a plexiskla (III) po vyjmutí z petroleje, ve kterém byly ponořeny 1 měsíc. Ani na jednom vzorku není patrné zažloutnutí. Šedý odstín vzorku II je dán jeho nižší tloušťkou 3mm oproti tloušťce 5mm vzorků I a III. . . . .	48
Obrázek 39	Datalist silikonu Veidec Technosil. . . . .	49
Obrázek 40	Model optického stolu s měřicími optikami. Optické desky jsou k rámu upnuty plechovými spojkami. . . . .	51
Obrázek 41	Voštinová konstrukce optické desky s upínacími otvory na pracovní ploše. Zdroj: [27] . . . . .	51
Obrázek 42	Optická deska. Zdroj: [27] . . . . .	52
Obrázek 43	Detail sběrné nádoby na palivo z obr. 44. Válcová nádoba v ose má přepad do vnější nádoby, kde je případná hladina signalizována na přípojném hladinoměru. . . . .	53
Obrázek 44	Tlakové poměry, vzduchová a palivová cesta týkající se odvodu paliva. Dva základní tlaky jsou denominovány $p_b$ pro barometrický tlak a $\Delta p$ pro tlakovou ztrátu na koalescenčním filtru. Modře je znázorněn vzduch odsávaný ze zkušebního zařízení skrze koalescenční patronu. Fialová cesta je odvodušnění sběrné nádoby. Červená cesta je odvod paliva po zkapalnění at' už v prostorách zkušebního zařízení nebo na koalescenčním filtru. . . . .	54
Obrázek 45	Modální analýza rámu. Zdroj:[9]. . . . .	55
Obrázek 46	Porovnání vyztužené a nevyztužené konstrukce standu a optické lavice. . . . .	56

## Seznam použitého SW

- Autodesk Inventor 2017
- Autodesk Autocad 2017
- MS Office 2010
- MiKTeX ( $\LaTeX$ )



## Seznam příloh

1. Příloha Kusovník sestavy M244 FUEL NOZZLE TEST RIG
2. Příloha Výkres sestavy M244 FUEL NOZZLE TEST RIG
3. Příloha Výkres sestavy M244.02 CEILING ASSEMBLY
4. Příloha Výkres sestavy M244.02.01 TRAVERSE SYSTEM
5. Příloha Výkres sestavy M244.02.02 AIR INLET ASSEMBLY
6. Příloha Výkres sestavy M244.03 WALL ASSEMBLY
7. Příloha Výkres sestavy M244.04 COLLECTING BASKET
8. Příloha Výkres sestavy M244.05 OPTICAL BENCH ASSEMBLY
9. Příloha Výkres sestavy M244.09.01 SUCTION CONTAINER
10. Příloha Výkres sestavy M244.07 MOTOR SHIELDING
11. Příloha Výkres sestavy M244.11 MOTOR SHIELDING 2