



FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE

## Ústav letadlové techniky

**Dodávka pracovních látek pro  
zážehové zařízení raketového motoru**

**Propellant feed for rocket engine  
igniter**

**Bakalářská práce**

**2021/22**

**Kryštof Hájek**

**Studijní program:** B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Klesa, Ph.D.

---

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hájek** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **491289**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Dodávka pracovních látek pro zážehové zařízení raketového motoru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Propellant feed for rocket engine igniter**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- Proveďte rešerši zážehových zařízení raketových motorů
- Pro stacionární edukační raketový motor na kyslík-isopropylalkohol o tahu 2-5 kN a tlaku v komoře 2,5 MPa:
  - Vytvořte koncepční návrh systému dodávky pracovních látek pro "spark torch igniter" (hořákový zážehovač s elektrickou iniciací)
  - Určete přibližnou spotřebu pracovních látek na jeden zážeh s ohledem na dosažení dobře definovaného složení zážehové směsi

Seznam doporučené literatury:

George P. Sutton, Oscar Biblarz: Rocket propulsion elements, 9th ed., Wiley, 2017  
Dieter K. Huzel, David H. Huang: Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engines, AIAA, 1992  
Luis E. Sanchez: Development and Testing of Oxygen/Methane Torch Igniter Technologies for Propulsion Systems, disertační práce, University of Texas at El Paso, 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Klesa, Ph.D. ústav letadlové techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jan Klesa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## PROHLÁŠENÍ

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního 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).

V Praze dne:

.....

Kryštof Hájek

---

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mé rodině a přátelům za vytrvalou a obětavou podporu, kterou mi poskytli nejen při tvorbě této práce, ale během celé doby mého studia. Rád bych také velmi poděkoval panu Ing. Janu Klesovi, Ph.D. za všechny cenné rady a připomínky, kterými mě provázel během tvorby této práce a bez niž by její dokončení bylo o mnoho složitější. Dále bych rád ještě poděkoval raketovému studentskému spolku Czech Rocket Society a všem jeho členům, kteří mě k tématu této práce motivovali.

---

## ANOTACE

V této bakalářské práci je stručně popsána funkce raketového motoru a jejich základní rozdělení podle použitého paliva. Dále jsou v práci popsány příklady existujících řešení zážehových zařízení. Na základě poznatků z existujících řešení je v práci objasněna volba pochodňového zážehového zařízení. Po odůvodnění volby tohoto typu zařízení pokračuje jeho návrh. Nejprve jsou určovány jeho pracovní parametry jako jsou provozní tlaky, výkon a spotřeba pracovních látek. Ze znalosti těchto parametrů jsou dále provedeny návrhové výpočty pro regulační clonky řídicí přesné hmotnostní průtoky paliva a okysličovačla, návrhové a kontrolní výpočty palivové nádrže a potrubí.

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Autor:</b>                    | Kryštof Hájek  |
| <b>Název bakalářské práce:</b>   | Dodávka pracovních látek pro zážehové zařízení raketového motoru   |
| <b>Rok vyhotovení:</b>           | 2022   |
| <b>Univerzita:</b>               | České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní   |
| <b>Studijní program:</b>         | B2342 Teoretický základ strojního inženýrství  |
| <b>Obor studia:</b>              | 2301R000 Studijní program je bezoborový  |
| <b>Ústav:</b>                    | Ústav letadlové techniky   |
| <b>Vedoucí bakalářské práce:</b> | Ing. Jan Klesa, Ph.D.  |
| <b>Bibliografické údaje:</b>     | Počet stran: 71<br>Počet obrázků: 21<br>Počet grafů: 1<br>Počet tabulek: 7   |
| <b>Klíčová slova</b>             | Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou, Regulační clonka, Návrh palivové nádrže, Zážeh raketového motoru |

---

**ABSTRACT**

In this bachelor thesis, the function of a rocket engine and their basic classification according to the fuel used is briefly described. Furthermore, examples of existing ignition solutions are written in the thesis. Based on the knowledge of the existing solutions, the choice of a flare ignition device is explained in the thesis. First, its working parameters such as operating pressures, power and consumption of working substances are determined. From the knowledge of these parameters, design calculations for the control orifices controlling the exact mass flow rates of fuel and oxidizer, design and control calculations for the fuel tank and piping are then performed.

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Author:</b>                   | Kryštof Hájek  |
| <b>Title of bachelor thesis:</b> | Propellant feed for rocket engine igniter  |
| <b>Academic year:</b>            | 2022   |
| <b>University:</b>               | Czech Technical University in Prague Faculty of mechanical engineering                     |
| <b>Study program:</b>            | B2342 Theoretical fundamentals of mechanical engineering                                   |
| <b>Field of study:</b>           | 2301R000 The study programme is without specialisation                                     |
| <b>Department:</b>               | Department of Aerospace Engineering  |
| <b>Supervisor:</b>               | Ing. Jan Klesa, Ph.D.  |
| <b>Extent:</b>                   | Number of pages: 71<br>Number of figures: 21<br>Number of graphs: 1<br>Number of tables: 7 |
| <b>Keywords</b>                  | Spark torch igniter, Precision orifice, Fuel tank design, Rocket engine ignition           |

---

## OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| Seznam použitých zkratk a symbolů.....   | 7         |
| <b>1 Úvod .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2 Základní charakterizace raketových motorů .....</b>                               | <b>11</b> |
| 2.1 Motory na tuhá paliva.....   | 11        |
| 2.2 Motory na kapalná paliva.....  | 11        |
| 2.3 Hybridní motory .....  | 12        |
| <b>3 Funkce zážehového zařízení .....</b>  | <b>13</b> |
| 3.1 Zdroje tepla .....   | 13        |
| 3.1.1 Chemické zdroje .....  | 13        |
| 3.1.2 Fyzikální zdroje .....   | 13        |
| 3.2 Požadavky na opakované zážehování motorů .....                                     | 13        |
| <b>4 Zážehová zařízení pro motory na tuhá paliva .....</b>                             | <b>15</b> |
| 4.1 Zážehové zařízení pro modelové rakety .....  | 15        |
| 4.1.1 Zápalnice .....  | 15        |
| 4.1.2 Palník .....   | 16        |
| 4.2 Zážehové zařízení pro urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu .....           | 17        |
| 4.2.1 Funkce zážehového zařízení pro urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu .... | 17        |
| <b>5 Zážehová zařízení v hybridních motorech.....</b>                                  | <b>20</b> |
| 5.1 Plazmové zážehové zařízení .....   | 20        |
| 5.1.1 Princip tvorby plazmatu a funkce zařízení .....                                  | 21        |
| 5.2 Laserové zařízení .....  | 21        |
| 5.2.1 Funkce .....   | 22        |
| <b>6 Zážehová zařízení pro motory na kapalná paliva .....</b>                          | <b>24</b> |
| 6.1 Zážehové zařízení na bázi katalytického rozkladu.....                              | 24        |
| 6.1.1 Funkce .....   | 24        |
| 6.1.2 Katalyzátor.....   | 25        |
| 6.2 Zážehová zařízení používající hypergolické a pyroforické látky .....               | 26        |
| 6.2.1 Funkce pyroforického zážehového zařízení .....                                   | 26        |
| 6.3 Pochodňová zážehové zařízení používající dvousložkové pohonné látky .....          | 27        |
| 6.3.1 Funkce .....   | 28        |
| 6.4 Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou (Spark Torch Igniter) .....     | 28        |
| 6.4.1 Funkce pochodňového zařízení se zapalovací svíčkou .....                         | 28        |
| 6.5 Pochodňové zážehové zařízení se žhavicí svíčkou.....                               | 30        |
| <b>7 Volba zážehového zařízení .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>8 Popis zážehového zařízení.....</b>  | <b>34</b> |
| 8.1 Pracovní látky .....   | 34        |
| 8.2 Výkon.....   | 35        |
| <b>9 Určení spotřeby pracovních látek.....</b>   | <b>36</b> |

---



|        |   |    |
|--------|---|----|
| 9.1    | Určení chemické rovnováhy .....                     | 36 |
| 9.2    | Stanovení průtoku pracovních látek .....            | 36 |
| 10     | Koncepční návrh palivového systému .....            | 39 |
| 10.1   | Požadavky na palivový systém .....                  | 39 |
| 10.2   | Rozvržení palivového systému.....                   | 41 |
| 10.2.1 | Část pro dodávku oksyličovaďla .....                | 43 |
| 10.2.2 | Část pro dodávku paliva .....                       | 45 |
| 10.2.3 | Dusíková část palivového systému.....               | 46 |
| 11     | Parametry palivového systému .....                  | 48 |
| 11.1   | Návrh regulačních clonek .....                      | 48 |
| 11.1.1 | Návrhové výpočty regulační clonky pro GOX .....     | 48 |
| 11.1.2 | Návrhové výpočty pro regulační clonku pro IPA ..... | 52 |
| 12     | Konstrukce palivového systému .....                 | 54 |
| 12.1   | Nádrže.....   | 54 |
| 12.1.1 | Návrh nádrže na izopropylalkohol .....              | 54 |
| 12.2   | Volba fitinek .....                                 | 57 |
| 12.3   | Volba ventilů .....                                 | 57 |
| 12.3.1 | Manuální ventily.....                               | 58 |
| 12.3.2 | Solenoidové ventily .....                           | 59 |
| 12.3.3 | Přetlakový ventil.....                              | 60 |
| 12.4   | Volba potrubí a hadic.....                          | 60 |
| 12.4.1 | Potrubí.....  | 61 |
| 12.4.2 | Hadice.....   | 62 |
| 12.5   | Konstrukce regulačních clonek .....                 | 62 |
| 13     | Závěr.....  | 64 |
|        | Seznam použité literatury .....                     | 66 |
|        | Seznam použitých obrázků .....                      | 69 |
|        | Seznam použitých tabulek .....                      | 70 |
|        | Seznam použitých grafů.....                         | 71 |

---



**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

| <b>zkratka<br/>symbol</b> | <b>anglický výraz</b>                                     | <b>český výraz</b>  | <b>jednotky</b>           |
|---------------------------|---|---|---------------------------|
| <b>SRB</b>                | Solid rocket booster                                      | Urychlovací motor na tuhá paliva                          |                           |
| <b>NSI</b>                | NASA Standard initiator                                   | NASA standardní iniciátor                                 |                           |
| <b>NASA</b>               | National Aeronautic and space Administration              | Národní úřad letectví a kosmonautiky                      |                           |
| <b>GOX</b>                | Gaseous oxygen  | Plynný kyslík   |                           |
| <b>IPA</b>                | Isopropyl Alcohol   | Isopropylalkohol  |                           |
| $\dot{n}$                 | Molar flow rate   | Molární průtok  | $[mol \cdot s^{-1}]$      |
| $\dot{Q}_{\Delta T_p}$    | Heat flow   | Tepelný tok   | $[kW]$                    |
| $\Delta H_c$              | Enthalpy of combustion of liquid at standard conditions   | Standartní spalné teplo                                   | $[J \cdot mol^{-1}]$      |
| $\dot{m}_{IPA}$           | Mass flow of isopropyl alcohol in the spark torch igniter | Hmotnostní tok isopropylalkoholu v pochodňovém zapalovači | $[kg \cdot s^{-1}]$       |
| $\dot{m}_{GOX}$           | Mass flow of GOX in the spark torch igniter               | Hmotnostní tok plynného kyslíku v pochodňovém zapalovači  | $[kg \cdot s^{-1}]$       |
| $k$                       | Safety coeficient   | Koeficient bezpečnosti                                    | $[-]$                     |
| $C_{d_{GOX}}$             | Discharge coeficient for gaseous oxygen                   | Ztrátový koeficient pro plynný kyslík                     | $[-]$                     |
| $T_0$                     | Termodynamic temperature                                  | Termodynamická teplota                                    | $[K]$                     |
| $\kappa$                  | Poisson constant  | Poissonova konstanta                                      | $[-]$                     |
| $R_m$                     | Specific gas constant                                     | Měrná plynová konstanta                                   | $[J \cdot kg^{-1}K^{-1}]$ |
| $p_0$                     | Initial pressure  | Počáteční tlak  | $[Pa]$                    |
| $A_{GOX}$                 | GOX precision orifice cross section area                  | Průřez otvoru regulační clonky pro GOX                    | $[m^2]$                   |



|               |   |  |                         |
|---------------|---|--|-------------------------|
| $\Delta p$    | Pressure drop                               | Tlaková ztráta                           | [Pa]                    |
| $p_1$         | Final pressure                              | Konečný tlak                             | [Pa]                    |
| $p_c$         | Chamber pressure                            | Tlak v komoře                            | [Pa]                    |
| $d_{GOX}$     | GOX precision orifice diameter              | Průměr otvoru regulační clonky           | [m]                     |
| $\rho$        | Density                                     | Hustota                                  | [kg · m <sup>-3</sup> ] |
| $C_{d_{IPA}}$ | Discharge coefficient for isopropyl alcohol | Ztrátový koeficient pro isopropylalkohol | [-]                     |
| $d_{IPA}$     | IPA precision orifice diameter              | Průměr otvoru regulační clonky pro IPA   | [m]                     |
| $R_{m_{0,2}}$ | yield tensile strength                      | Smluvní mez kluzu                        | [MPa]                   |
| $d_1$         | Inner diameter                              | Vnitřní průměr                           | [mm]                    |
| $l$           | Lenght                                      | Délka                                    | [mm]                    |
| $\sigma_D$    | Allowed stress                              | Dovolené napětí                          | [MPa]                   |
| $f$           | Weld coeficient                             | Součinitel nehomogenity svaru            | [-]                     |
| $p_{max}$     | Maximal pressure                            | Maximální tlak                           | [MPa]                   |
| $t$           | Wall thickness                              | Tloušťka stěny                           | [mm]                    |
| $v$           | Flow velocity                               | Rychlost proudění                        | [m · s <sup>-1</sup> ]  |
| $d_p$         | Tube inner diameter                         | Vnitřní průměr potrubí                   | [mm]                    |
| $p_p$         | Pipe overpressure                           | Přetlak v potrubí                        | [MPa]                   |
| $p_a$         | Ambient pressure                            | Tlak okolí                               | [MPa]                   |
| $\sigma_r$    | Radial stress                               | Radiální napětí                          | [MPa]                   |
| $\sigma_t$    | Tangent stress                              | Tečné napětí                             | [MPa]                   |
| $\sigma_o$    | Axial stress                                | Osové napětí                             | [MPa]                   |



---

$\sigma_{red}^{\tau_{max}}$

Reduced stress

Redukované napětí

[MPa]

---

## 1 Úvod

Raketové motory jsou schopné generovat až neuvěřitelné množství energie. Činí tak přeměnou chemické energie svého paliva na kinetickou energii, a to spalováním tohoto paliva. Konstrukce nosné rakety je ve své podstatě z většiny pouze zásobníkem tohoto paliva a jen její malá část konstrukce je určena pro užitečné zatížení. Raketové motory však toto obrovské množství chemické energie přemění na kinetickou energii během několika málo minut. To znamená že k chemické reakci uvnitř motoru dochází v obrovském množství za krátký čas. Tato chemická reakce uvnitř motoru potřebuje impuls, který ji započne. Z tohoto důvodu, je součástí každé konstrukce raketového motoru i zážehové zařízení.

Tato práce se zabývá koncepčním návrhem dodávky pracovních látek zážehového zařízení pro edukativní raketový motor. Konstrukce takového zařízení je velice blízce vázaná ke konstrukci konkrétního motoru a samotné konstrukci rakety. Zařízení navrhované v této práci je určené pro hypotetický model raketového motoru. Pro přesnou podobu a konkrétní konstrukci zážehového zařízení proto chybí spousta vstupních parametrů. Proto je navrhované zařízení uvažováno spíše jako statický demonstrátor.

V práci bude nejprve provedena rešerše na existující řešení takovýchto zařízení. Na základě této rešerše bude rozhodnuto, pro jaký typ zážehového zařízení bude navrhována dodávka pracovních látek. Dále v práci budou určeny základní pracovní parametry zařízení. Bude se jednat zejména o spotřebu pracovních látek, provozní tlaky v palivovém systému a uspořádání tohoto systému. Dále bude proveden návrh a volba jednotlivých částí systému, jako jsou ventily, fitinky, systém řízení dodávky pracovních látek a nádrže.

## 2 Základní charakterizace raketových motorů

Pro cesty do vesmíru, ať už pro suborbitální nebo pro orbitální lety, jsou raketové motory stále jedinou možností pohonu. Raketové motory dokážou uvolnit během poměrně krátké doby, obrovské množství energie a využít jí pro pohon rakety. Tuto energii, která je před startem a během letu uchovaná, jako chemická energie ve formě paliva, raketové motory přemění na vnitřní energii plynu vysokotlakým spalováním. K tomuto spalování dochází ve spalovací komoře motoru. Díky tomuto spalování vznikají v komoře plyny o velmi vysoké teplotě a vysokém tlaku. Díky Lavalově trysce se termodynamickou expanzí přemění vnitřní energii horkých plynů na energii kinetickou [1].

Raketové motory se v základu dělí podle použitého paliva, a to na tři skupiny. Raketové motory na kapalná paliva, na tuhá paliva a hybridní motory [1].

### 2.1 Motory na tuhá paliva

Jak z názvu vyplývá, tyto motory používají paliva v tuhém skupenství. Toto palivo je již zakomponované v komoře. Palivo, které je do komory motoru odlité, se říká zrno. Jsou v něm obsažené všechny chemické látky, které jsou potřeba ke spalování. Po zapálení paliva zrno odhořívá rovnoměrně na všech odkrytých plochách. Jak se motor jednou zapálí, hoří do té doby, než spotřebuje veškeré své palivo. Hořením zrna se v komoře tvoří spaliny o vysoké teplotě a vysokém tlaku. Jak tyto spaliny proudí skrze Lavalovu trysku jsou urychlovány na nadzvukové rychlosti a generují tah. Díky tomu, že motory na tuhá paliva nepotřebují žádný palivový systém, patří mezi nejlevnější raketové motory a jejich konstrukce je značně jednodušší na rozdíl od kapalinových a hybridních motorů [1].

### 2.2 Motory na kapalná paliva

Tyto motory své pohonné látky mají do komory dodávané ve formě tekutin. To znamená, že tento druh motorů potřebuje ke své funkci palivový systém. Tento palivový systém může být velmi složitý, a to díky velkým hmotnostním průtokům paliva. Velké raketové motory mohou mít hmotnostní průtok i několik stovek či dokonce tisíců kilogramů pohonných látek za sekundu a z tohoto důvodu musí být palivový systém takového motoru vybaven velmi výkonnými čerpadly, které zprostředkují dodávku pohonných látek do komory motoru. Turbočerpadla pro raketové motory jsou konstrukčně velice komplexní a složitá zařízení, a proto jsou značně drahá. To vnáší vysokou cenu do celého systému raketového motoru na

kapalná paliva. Tyto motory mají však řadu výhod oproti motorům na tuhá paliva. Jednou z jejich hlavních výhod, je možnost opakovaných zážehů. Jelikož jsou pohonné látky do komory dodávány, je možné tuto dodávku přerušit a následně obnovit. Pokud je motor vybaven vlastním zážehovým zařízením, lze tento motor restartovat. U kapalinových motorů je také možné do určité míry řídit jejich výkon během letu. Geometrie komory a trysky jsou sice optimalizované na určité výkony, ale přesto je možné v malých mezích výkon motoru kontrolovat množstvím dodávaných pracovních látek do motoru. Tyto a další výhody převyšují nad vysokou cenou a u velkých nosných raket jsou kapalinové motory používané velmi často a začínají se stávat výzvou i pro studentské projekty [1].

### 2.3 Hybridní motory

Tyto motory používají jak kapalně, tak tuhé složky paliva. Obvykle používají tuhé palivo a kapalně, či plynné oxidizační činidlo. Kombinují z části nevýhody kapalinových motorů a motorů na tuhá paliva, ale stejně tak kombinují i jejich výhody. U hybridních motorů je palivo stejně jako u motorů na tuhá paliva již odlišeno do komory motoru. Rozdíl je ten, že tato látka v komoře není v hybridních motorech kompletní. Chybí v ní složka oxidizační. Jak již bylo řečeno toto oxidizační činidlo je do komory dodáváno v kapalném nebo plynném skupenství. Proto hybridní motory potřebují stejně jako kapalinový palivový systém, který zajistí dodávku oxidizačního činidla do komory. Palivový systém pro hybridní motor je ale poloviční v porovnání s palivovým systémem pro kapalinový motor, protože do komory dodává pouze oxidizační činidlo. Hybridní motory mají stejně jako kapalinové motory možnost opakovaného zážehu. Díky tomu, že oxidizační činidlo musí být do komory těchto motorů dodáváno z nádrží, mají stejně jako kapalinové motory možnost tuto dodávku přerušit a tím zastavit svou činnost. Pokud je motor vybaven vlastním zážehovým zařízením, stejně jako u kapalinových motorů také lze dodávku oxidizačního činidla obnovit a motor znovu zažehnout [1].

### 3 Funkce zážehového zařízení

Úkolem zážehových zařízení je zážeh pohonných látek v hlavní spalovací komoře raketového motoru. Na rozdíl od běžných spalovacích motorů, které se používají v automobilech toho nelze docílit jen pouhou jiskrou zapalovací svíčky. Je zapotřebí dodat více energie. Tuto energii je zapotřebí dodat do komory v podobě tepla. U návrhů těchto zařízení se vychází z předpokladu, že je zapotřebí dodat tolik tepla, aby se pohonné látky proudící uvnitř komory ohřáli na teplotu samovznícení.

#### 3.1 Zdroje tepla

Toto teplo může mít mnoho zdrojů. Lze využít chemických reakcí, tedy spalování látek, nebo také katalytického rozkladu. Jako tepelný zdroj lze také využít fyzikálních jevů.

##### 3.1.1 Chemické zdroje

Jako zdroj tepla je možné použít chemické reakce. Může se jednat o hoření, nebo katalytický rozklad. Pro obojí je zapotřebí pracovní látky, která bude nositelem chemické energie. V případě spalování se bude jednat o hořlavou látku, která může být v tuhém nebo kapalném skupenství. Látky v kapalném skupenství se používají například vodík, metan, kerosin, etanol a jiné. Jako tuhé palivo se může použít polybutadien-akrylonitril (PBAN), nebo směs sorbitolu a nitridu draselného (KNSB). Volba, které látky bude zařízení používat ke generování tepla, záleží hlavně na druhu pracovních látek raketového motoru.

Pro katalytický rozklad se používá peroxid vodíku. Zde teplo nevzniká hořením. Peroxid vodíku proudí přes katalyzátor, který ho rozloží na vodík a kyslík a při tomto procesu vzniká teplo.

##### 3.1.2 Fyzikální zdroje

Představiteli fyzikálních zdrojů mohou být laser, plazma či elektrický oblouk. Obecně tyto zdroje využívají fyzikálních jevů ke generování tepla, které je následně použité k zážehu pohonných látek motoru.

#### 3.2 Požadavky na opakované zážehování motorů

V kosmickém průmyslu čím dál více roste poptávka po motorech s možností opakovaného zážehu. Z toho plyne velký rozvoj v technologiích zážehových zařízení. Motor s možností opakovaného zážehu na druhém stupni je dnes standardem a čím dále více firem se pokouší o motorická přistání s prvními stupni svých nosných raket. Proto musí mít i motory na prvním stupni možnost být

opakovaně zažehnuty. Dříve bylo běžné, že zážehové zařízení motorů prvního stupně nosné rakety bylo součástí pozemního zařízení. Takovéto zařízení lze dnes pozorovat například u raket Sojuz. Vlastnost motoru, být opakovaně zažehnutý, ale nezávisí jen na tom, zdali je zážehové zařízení součástí konstrukce motoru. Záleží také na tom, o jaký typ motoru a typ zážehového zařízení se jedná. Motory na tuhá paliva nelze restartovat, avšak i některé motory na tuhá paliva mají velice zajímavá zážehová zařízení, a proto jsou v práci popsána také.

V této práci jsou v následujících kapitolách popsána zážehová zařízení rozdělená podle toho, pro který druh motoru je daný exemplář zařízení určen. Tato zařízení jsou často velmi specifická pro daný typ motoru. To ovšem neznamená, že jejich princip nelze použít i u ostatních druhů raketových motorů.



## 4 Zážehová zařízení pro motory na tuhá paliva

Motory na tuhá paliva nelze opakovatelně zapalovat. Jak jsou jednou tyto motory zažehnuté, přestanou pracovat až spotřebují veškeré své palivo. Z toho plyne, že motor nejen nelze znovu zažehnout, ale nelze jej ani zastavit. Tyto motory mají ovšem výhodu v nízké ceně a jednoduché konstrukci. Toto je výhoda zejména pro použití u studentských projektů.

Podle velikosti a vospělosti motoru se odvíjí i sofistikovanost jejich zážehových zařízení. Nejmenší motory, které mají hlavní uplatnění v modelářství, mají také ty nejjednodušší zážehová zařízení. Jak se motory zvětšují, jejich zážehová zařízení se stávají sofistikovanějšími, ale často adoptují principy zážehových zařízení pro menší motory, nebo dokonce tato zařízení používají jako základní stavební prvek. Protože motory na tuhá paliva nelze opakovaně zastavit ani zažehnout, zážehová zařízení těchto motorů jsou často na jedno použití.

### 4.1 Zážehové zařízení pro modelové rakety

Raketové motorky pro modely jsou pravděpodobně ty nejmenší a nejjednodušší na které lze narazit. Jejich jednoduchost je důležitá z důvodu nízké ceny. To platí i pro zážehové zařízení takového motoru. K zažehnutí modelových motorů se běžně používají dva způsoby. Jedním je zápalnice a druhým je elektrický palník [2].

#### 4.1.1 Zápalnice

Zápalnice, kterou lze vidět na obrázku 1 je jedno z nejvíce používaných zážehových zařízení pro zážeh raketových motoru pro modelové rakety. Funkce tohoto zařízení je velice jednoduchá. Jedná se o provázek, který je nasycený černým nebo střeným prachem. Primární funkcí zápalnice je přenášet plamen z jednoho místa na druhé [2].

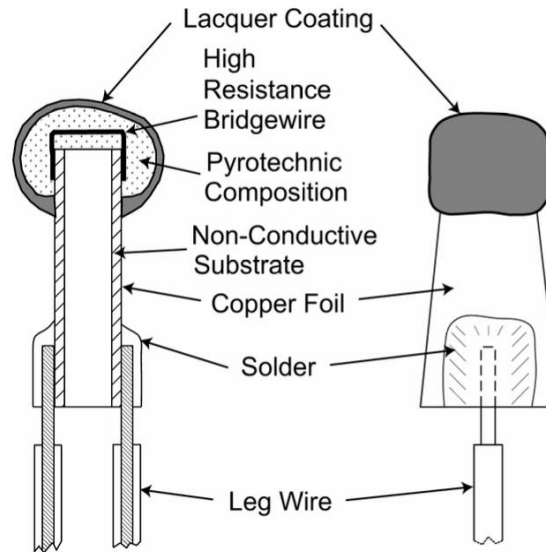


*Obrázek 1 – Hořící zápalnice [3]*

#### **4.1.2 Palník**

Palník je podobně jako zápalnice také velmi rozšířeným zážehovým zařízením. Ve své nejjednodušší formě se používá zejména pro modelové raketové motory, ale ve svých složitějších podobách se může objevovat i jako součást složitějších systémů pro zažehování větších raketových motorů.

Jak je vidět na obrázku 2, jeho konstrukce je poměrně jednoduchá. Jedná se o odporový drátek, který je obalený pyrogenem, tedy pyrotechnickou složící, která hoří velmi rychle a vysokou teplotou. Když přes odporový drátek protéká elektrický proud, drátek se rozžhává a pyrogen se vznítí. Pyrogen se podobně jako raketová paliva skládá z okysličovadla a paliva. Jako okysličovadlo se běžně používá chloristan draselný, nebo dusičnan draselný. Jako palivo se používá titan, hydrid titany, zirkonium, nebo bor [4] [5].



Obrázek 2 - Schéma elektrického palníku [5]

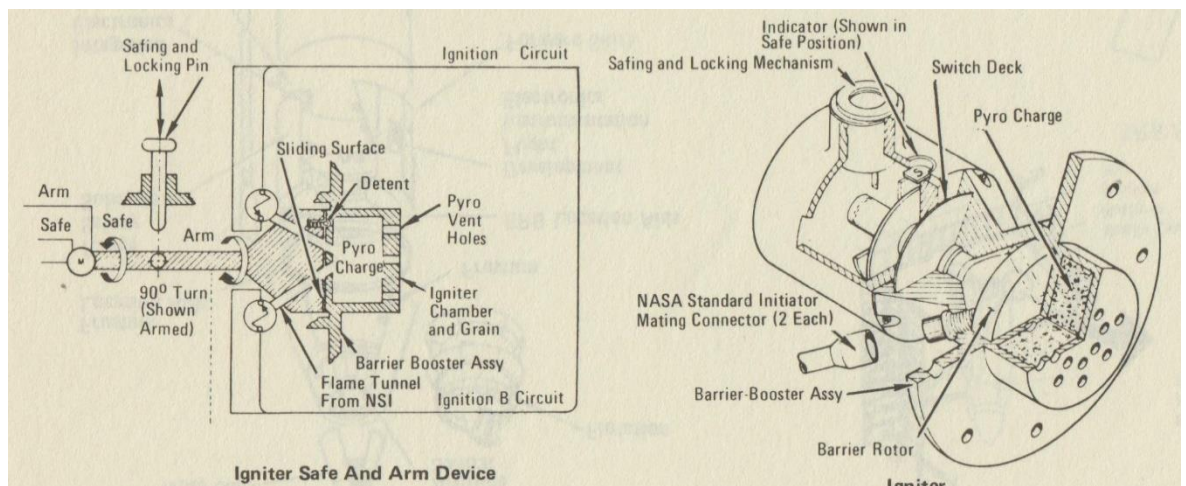
## 4.2 Zážehové zařízení pro urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu

Urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu (dále jako SRB, z anglického Solid Rocket Booster) má přibližně milionkrát větší tah než běžný modelářský motorek. To znamená že jeho konstrukce je neporovnatelně složitější, a to platí i pro jeho zážehové zařízení. Jak modelové motory, tak i SRB, jak již vyplývá z názvu, jsou raketové motory na tuhá paliva. To znamená, že palivo je do motoru odlito. Proto je motor při manipulaci již „natankovaný“. Kdyby došlo k nečekanému zážehu u malého modelářského motoru, může dojít k vážným zrněním, ale následky by neměly být smrtelné a materiální škody takového incidentu by byli v řádech stovek maximálně tisíců korun. Podobný incident by v případě SRB znamenal v nevhodnou chvíli životy obslužného personálu a materiální škody by byli v řádech miliard korun. Zároveň je na zážeh jen jediný pokus. Jeden pokus, aby byl motor zažehnut správně. Proto musí být zážehové zařízení pro takto velký a složitý motor na tuhá paliva nejen spolehlivý z pohledu zážehu, ale také musí zafungovat jen a tehdy, kdy je to žádoucí. U tohoto zařízení je selhání absolutně nepřípustné. To konstrukci zážehového zařízení komplikuje [6] [7].

### 4.2.1 Funkce zážehového zařízení pro urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu

SRB je až milionkrát výkonnější než modelové motory, a proto je pro jeho zažehnutí potřeba mnohem více energie ve formě tepla, než je potřeba k zažehnutí

modelového motoru. Toto zážehové zařízení je proto několikastupňové. Systém je založen na tom, že zařízení podobné palníku zapálí nejprve pyrotechnickou slož, která zažehne další, ta další a ta teprve má na starosti zážeh hlavní palivové složky v komoře SRB. Na obrázku 3 jsou vyobrazeny první dva stupně systému, které jsou opatřeny bezpečnostními prvky. První stupněm zařízení je NASA Standard Initiator (NSI) a druhým je pyrotechnická slož iniciátoru. Jak je vidět na obrázku 3 NSI je oddělen od pyrotechnické slož iniciátoru otočnou bariérou. Ta je tvořena diskem z masivního materiálu, ve kterém jsou vyvrtané kanálky, které po správném pootočení spojí NSI se slož. Toto zabezpečení tedy mechanicky zabrání spalinám z NSI aby zažehly slož, i kdyby došlo k nežádoucí aktivaci NSI. Otočná bariéra je dále připojena na hřídel, která je při manipulaci zajištěna bezpečnostním kolíčkem v neprůchozí pozici bariéry. Systém je také vybaven indikátorem polohy. Systém nabývá dvou poloh, a to sice Safe (zajištěno) a Arm (odjištěno) [6] [7].

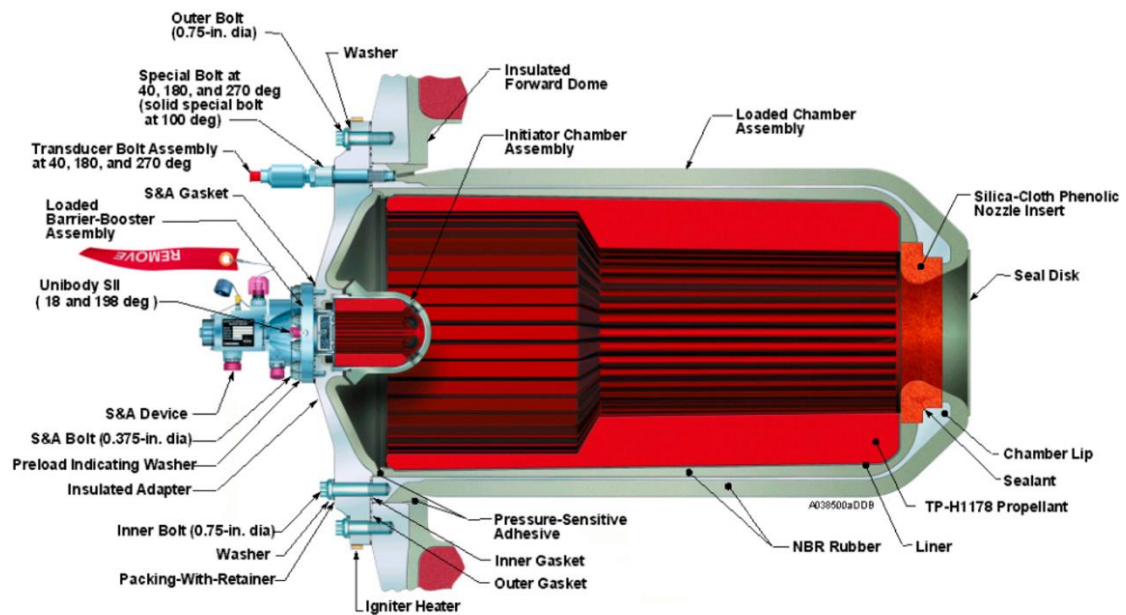


Obrázek 3 – Pojistné zařízení [6]

NSI neboli NASA Standard Initiator, je součástka, která má stejnou funkci jako elektrický palník. Jedná se o zařízení, které je v NASA využíváno jako běžný detonátor. Princip jeho funkce je velmi podobný elektrickému palníku. Jediný rozdíl je ve velikosti a dále v tom, že NASA tomuto zařízení dala standardizované připojovací rozměry [7].

Na obrázku 4 je znázorněno již celé zážehové zařízení včetně malé a velké komory. Iniciátor obsahující veškeré bezpečnostní prvky, je napojen na malou komoru, která funguje v podstatě jako další detonátor. Jeho úkol je znásobit výkon

iniciátoru a tím zapálit velkou komoru. Ta má následně za úkol vytvořit dostatek horkých spalin, které zažehnou palivo v komoře SRB.



Obrázek 4 – Zážehové zařízení pro urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu [6]



## 5 Zážehová zařízení v hybridních motorech

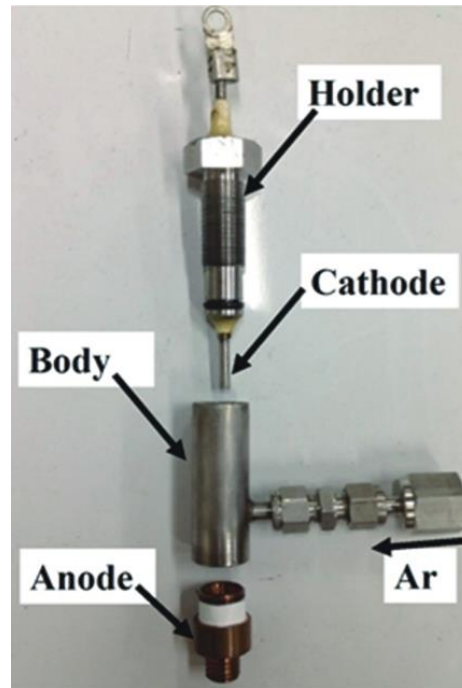
Hybridní motory mají na rozdíl od motorů na tuhá paliva možnost opakovaného zážehu. Lze je i během jejich hoření zastavit. Oba typy sice mají palivo odlité v komoře, ale hybridní motory mají oksličovadlo dodávané z nádrže. Díky tomu lze reakci v motoru zastavit a pokud má motor vhodné zážehové zařízení i obnovit. Tato zážehová zařízení se opět velice liší podle velikosti a určení motoru. Pokud je ovšem požadavkem na motor jeho opakovaný zážeh, pak je zapotřebí aby zážehové zařízení bylo také znovupoužitelné. To eliminuje použití pyrotechnických zařízení, která jsou jen na jedno použití [1] [8].

Použitelnost zážehových zařízení pro hybridní a kapalinové motory se často překrývá. Některá z těchto zařízení pro hybridní motory lze použít i pro kapalinové motory. V této práci jsou zařízení rozdělená podle toho, pro jaký motor byl použit vzor daného zařízení.

### 5.1 Plazmové zážehové zařízení

Zařízení používá jako zdroj tepla plazma. Tedy horký ionizovaný plyn. Běžně se používají u hybridních motorů. Paliva v hybridních motorech, jako je třeba vosk, polybutadien ukončený hydroxylovou skupinou, nebo polyetylen jsou obecně neexplosivní. Navíc jak již bylo řečeno hybridní motory jsou opakovaně zažehnutelné. Paliva do motoru na tuhá paliva jsou sice také neexplosivní, ale motory na tuhá paliva nejsou opakovaně zažehnutelné. Proto je plazmové zařízení pro jejich použití příliš komplikované, a tudíž i drahé. Kapalinové motory jsou na druhou stranu opakovaně zažehnutelné, ale jejich paliva, respektive paliva a oksličovadla jsou po smíchání často explozivní [9].

Jak je vidět na obrázku 5 zařízení je sestaveno z katody, trysky a těla. Tryska slouží jako anoda a katoda je umístěná do těla. Dále toto zařízení potřebuje palivový systém, který zajistí dodávku pracovního plynu. Jako pracovní plyn lze použít například argon, nebo třeba helium. V praxi by se častěji používalo helium, protože je často u raket použito jako tlakovací plyn pro tlakování nádrží na paliva a oksličovadla [9].



Obrázek 5 – Plasmové zážehové zařízení [9]

### 5.1.1 Princip tvorby plazmatu a funkce zařízení

Jak již bylo řečeno, zařízení je osazeno katodou a anodou. Jako katoda slouží tyč, která je umístěná v podélné ose těla zařízení. Kolem katody proudí pracovní plyn a dále pak vede tryskou do komory motoru. Tryska slouží jako anoda. Výboj elektrického oblouku mezi katodou a anodou způsobí, že se část proudícího pracovního plynu ionizuje a přemění se na plazma. Toto plazma následně proudí do komory motoru, kde zapálí hlavní palivové složky [9].

## 5.2 Laserové zařízení

Zážehová zařízení využívající laser mají řadu výhod. Na rozdíl od pyrotechnických zařízení, která využívají horkých plynů vzniklých při spálení tuhé palivové složky, jsou laserová zařízení znovupoužitelná. Také jsou oproti těm pyrotechnickým bezpečnější při manipulaci ve výrobě a sestavování rakety a při manipulaci na startovní rampě. To samé platí ve srovnání se zapalovacími systémy, které k zapálení pohonných látek v komoře používají hypergolická paliva. Hořáková zážehová zařízení se problému se znovupoužitelností vyhýbají, protože většinou používají dvousložková paliva, jejichž hořením vznikají horké plyny, které následně zapálí palivo a okysličovadlo v hlavní komoře. K zapálení paliva a okysličovadla v komoře hořáku se často používá elektrická zapalovací svíčka, nebo žhavící svíčka. Proto lze toto zařízení použít opakovaně. Nevýhodou hořákových

zapalovacích zařízení oproti laserovým je jejich vysoká hmotnost a složitost jejich konstrukce, protože hořáková zapalovací zařízení potřebují ke své funkci vysokotlaký palivový systém, obsahující mnoho ventilů, regulátorů a potrubí. Použití přímých zapalovacích svíček v kapalinových raketových motorech představuje cenově výhodnou alternativu, ale zatím postrádá buď provozní robustnost, nebo jednoduchost integrace do motoru. Laserové zážehové zařízení lze vidět na obrázku 6 [10].



*Obrázek 6 – Laserové zážehové zařízení [10]*

### **5.2.1 Funkce**

Jak z názvu vyplývá, toto zařízení využívá jako zdroj energie laser. Obecně lze u kapalinových a hybridních raketových motorů použít dva různé typy laserových zapalovacích zařízení. Systémy, které zaměřují laserový paprsek na vhodný cílový materiál a generují plazmovou jiskru z interakce laseru s cílovým materiálem. Tento systém lze provozovat nezávisle na proudění v komoře motoru a kombinaci pohonných hmot [10].

Princip funkce druhého typu je velmi podobný. Pokud je ve spalovací komoře vhodný nosný plyn pod dostatečně vysokým tlakem, lze jej použít jako materiál k vytvoření plazmové jiskry. V těchto systémech s takzvaným rozkladem plazmatu vede vysoká hustota energie v ohnisku laseru k ionizaci nosného plynu, jak je vidět na obrázku 7. Následná expanze vysokoenergetické tlakové vlny plazmatu působí jako zdroj vznícení pohonných hmot.





*Obrázek 7 - Ionizace nosného plynu v ohnisku laseru [10]*

## 6 Zážehová zařízení pro motory na kapalná paliva

Kapalinové motory mají vlastnost opakovaného zážehu. Na druhých stupních nosných raket se v dnešní době používají zpravidla motory na kapalnou pohonnou látku. Horní stupně raket provádí i několik zážehů během jednoho letu, a proto musí být vybavené spolehlivým zážehovým zařízením.

Tato zážehová zařízení musí být nejen spolehlivá, ale zároveň musí být lehká. Některá zařízení používají stejné pohonné látky jako motor, ale jsou i taková řešení, která používají své vlastní pracovní látky [1] [8].

### 6.1 Zážehové zařízení na bázi katalytického rozkladu

Většina moderních restartovatelných raketových motorů na kapalná paliva používá buď zážehové zařízení se zapalovací svíčkou (spark torch igniter), nebo pyroforický (hypergolický) zapalovač. Zážehové zařízení se zapalovací svíčkou spalují směs paliva a okysličovadla, které získává z hlavních nádrží pohonných hmot rakety nebo ze samostatného palivového systému. To vyžaduje mnoho ventilů, trubic a poměrně složitou řídicí elektroniku. Pyroforové zapalovače se používají k zážehování kapalinových motorů a fungují tak, že se do spalovací komory vstříkne třetí chemická látka, která samovolně reaguje s kyslíkem. Tyto chemické látky jsou často vysoce toxické a při styku se vzduchem se samovolně vznítí, což ztěžuje jejich výrobu, skladování a manipulaci s nimi [11].

Zapalovač založený na katalytickém rozkladu peroxidu vodíku vyžaduje méně složitou konstrukci než pochodňové zapalovače, protože potřebuje pouze jednu větev palivového systému a polovinu ventilů. Použití jednosložkového paliva a katalyzátoru také odstraňuje potřebu elektroniky pro četné ventily a zapalovací či žhavicí svíčku. Na rozdíl od vodíku nebo kyslíku lze peroxid vodíku skladovat při vysoké hustotě za okolní teploty a tlaku. Peroxid vodíku má také na rozdíl od pyroforických látek nízkou toxicitu a jeho reaktivní produkty jsou netoxické [11].

#### 6.1.1 Funkce

Adiabatickým rozkladem peroxidu vodíku o koncentraci 90 % vzniká horký plyn o teplotě okolo 1033 K. Tato teplota je dostatečně vysoká na to, aby došlo k samovznícení dvousložkových paliv jako je zkapalněný kyslík a zkapalněný vodík, nebo zkapalněný kyslík a kerosen. Zároveň je ale natolik nízká, že není zapotřebí zařízení aktivně chladit [11].

Zážehové zařízení využívající rozklad peroxidu vodíku se skládá ze tří hlavních částí. První částí je vstup pro peroxid vodíku, který lze vidět na obrázku 8. Jedná se o jednoduchý vstřikovač, který zároveň slouží jako zátka komory zapalovače, na kterou je dále vstřikovač napojen. V hlavní komoře dochází ke katalytickému rozkladu peroxidu vodíku, a to díky katalyzátoru, který je v komoře umístěn. Z komory dále vede tryska. Tryska je tvořena trubičkou. Ta vede horký plyn, který vznikl jako produkt katalýzy do hlavní komory motoru, kde tento plyn zapálí hlavní palivové složky [11].



*Obrázek 8 - Součásti zapalovače využívající katalytický rozklad peroxidu vodíku [11]*

### **6.1.2 Katalyzátor**

Jako materiál katalyzátoru je zvoleno stříbro, a to na základě vysoké reaktivity a snadné zpracovatelnosti. Stříbro je v katalyzátoru v podobě plochých sítěk. Tato síťka jsou vidět na obrázku 8. Katalyzátor začíná vstřikovací deskou, která obsahuje přibližně 200 otvorů o průměru 1,5 mm, což znamená, že otevřená plocha činí přibližně 20 %. Spolu se vstřikovací deskou jsou v katalyzátoru celkem 4 síťky z nerezové oceli sloužící jako difuzor, který má za úkol rovnoměrně rozptýlit peroxid vodíku po volné ploše katalyzátoru [11].

Produktem katalýzy je horký plyn, z velké části skládající se z kyslíku. U 90 % koncentrovaného peroxidu vodíku je to přibližně 40 % hmotnosti. Reaktivita horkého kyslíku vede ke snadnějšímu zapálení, než jakého by bylo možné dosáhnout samotným inertním plamenem, zejména proto, že palivové směsi v raketových motorech jsou obvykle bohaté na palivo. Tato zařízení mají ovšem nevýhodu v ceně

katalyzátoru. V katalyzátorech se používají drahé kovy. To cenu zařízení zvyšuje [11].

## 6.2 Zážehová zařízení používající hypergolické a pyroforické látky

Hypergolické pohonné hmoty jsou velmi spolehlivé a lze je snadno použít k zážehu. Jsou definované jako dvě látky, které se při vzájemném kontaktu samovolně vznítí. Pyroforické látky jsou takové látky, které se při kontaktu s kyslíkem samovznítí. Rakety, které používají hypergolická paliva jako hlavní pohonné látky, tak teoreticky nepotřebují žádné zážehové zařízení. U motorů na tyto paliva funguje jako zážehové zařízení vstřikovač. Hypergolická paliva však mají jednu zásadní nevýhodu. Patří mezi nejnebezpečnější paliva a okysličovadla běžně používaná k pohonu raketových motorů. Většina hypergolických paliv je extrémně náchylná ke vznícení, protože se vznítí nejen s jinými tradičními hypergolickými okysličovadly, ale je velmi pravděpodobné, že se vznítí při kontaktu i s jinými okysličovadly. To znamená, že s těmito palivy se musí manipulovat pouze ve velmi kontrolovaném prostředí. Jednou z kombinací hypergolických paliv je hydrazin jako palivo a tetroxid dusíku jako okysličovadlo. Kromě toho, že jsou obě tyto látky nebezpečné z pohledu nežádoucího vznícení či exploze, jsou také obě velice toxické. Při reakci tetroxidu dusíku a kůže dochází ke vzniku kyseliny dusičné a dusité, které mohou způsobit vážné poškození tkání. Při vdechnutí výparů může dojít k vážnému poškození plic, a dokonce i ke smrti. Hydrazin naproti tomu může způsobit těžké chemické popáleniny a je považován za karcinogen. Z tohoto důvodu se od hyperbolických paliv jako od hlavních pohonných látek ustupuje. Jsou nahrazovány klasickými kryogenními palivy, jako jsou kapalný vodík, kapalný metan, nebo třeba kerosin a jako okysličovadlo se nejčastěji používá kapalný kyslík. Tyto směsi sice nejsou hypergolické, ale hypergolických zapalovačů se využívá stál [12] [13].

### 6.2.1 Funkce pyroforického zážehového zařízení

Namísto použití hypergolického paliva jako hlavní pohonné látky hlavního motoru, lze jeho malé množství použít jako látku, která zajistí zapálení motoru. Zážehové zařízení používá tedy jako zdroj tepla hypergolické látky, zatímco motor používá ke svému pohonu konvenční dvousložková paliva. Pracovní látky pro zapalovač a pro motor jsou rozdílné, ale nemusí být odlišné obě složky, tedy okysličovadlo i palivo. Jedna ze složek může být společná pro zapalovač i pro motor. To znamená, že zážehové zařízení může používat hypergolickou látku, která

reaguje s palivem motoru, nebo s okysličovadlem motoru. Ve starých německých motorech pro rakety V2 byly hypergolické zápalné látky dodávány mimo raketu. Skrze hrdlo trysky se prostrčil zásobník s hypergolickou látkou až do spalovací komory. Tento způsob má však mnoho nevýhod. Pokud je motor zažehován tímto způsobem, motor není restartovatelný, a dokonce i samotné zážehové zařízení není pravděpodobně znovupoužitelné. Tyto nevýhody se však dají eliminovat [12] [13].

Mnoho Moderních raketových motorů jako je třeba raketový motor Merlin, hlavní motor rakety Falcon 9 od firmy SpaceX, používá ke svému zapálení hyperbolické, či pyroforické látky. Motory Merlin jsou poháněné směsí kapalného kyslíku a kerosenu. K jejich zapálení se používají pyroforické látky. Tedy takové látky, které se po kontaktu s kyslíkem samy vznítí. V případě motorů Merlin se jedná o triethylhliník a triethylboran. Obě tyto látky se samy vznítí, když ve spalovací komoře přijdou do kontaktu s kapalným kyslíkem. Součástí zážehového zařízení pro tento motor je palivový systém s nádrží, který má zajistit dodávku pyroforické látky. Díky tomu že zařízení potřebuje speciální zápalnou látku, má motor s tímto systémem sice omezený počet opakovaných zážehů, ale restartovatelný je. Zařízení je navrženo jako speciální vstřikovač, který vstřikuje pyroforickou látku do hlavní komory. Jakmile se v komoře setká s kapalným kyslíkem, dojde k zážehu. Tento zážeh vyprodukuje dostatek tepla, aby se vznítila i směs kerosenu a kyslíku a motor se může rozeběhnout. Nevýhodou tohoto zařízení je, že ke své funkci potřebuje jinou látku, než jsou palivo a okysličovadlo pro hlavní motor. Nevýhoda spočívá v omezeném počtu opakovaných zážehů a dále v hmotnosti přídavné látky. Výhodou samotného zařízení je ale jeho jednoduchost. Zařízení sice potřebuje vlastní palivový systém, ten ale není komplikovaný a zařízení funguje jako vstřikovač do hlavní komory motoru, tudíž samotná konstrukce také není příliš složitá [12] [13].

### **6.3 Pochodňová zážehové zařízení používající dvousložkové pohonné látky**

Tato zařízení využívají jako zdroj tepelné energie spalování dvousložkových paliv. Tedy paliva a okysličovadla. Tyto složky mohou mít mnoho kombinací. Palivové složky se spalují ve spalovací komoře. Pokud není kombinace paliv hypergolická, je zapotřebí zapalovač vybavit nějakým zařízením, které složky paliva zažehne. Existuje mnoho způsobů, jak docílit zažehnutí pohonných látek v komoře pochodňového zapalovače. Lze využít například pyrotechnický iniciátor, jako je

třeba elektrický palník, ale takové řešení není znovupoužitelné a z toho důvodu se nepoužívá. V praxi se již mnohokrát osvědčily zapalovače se zapalovací nebo žhavicí svíčkou.

### 6.3.1 Funkce

Jak již bylo řečeno, tato zážehová zařízení využívají jako zdroj tepla spalování paliva a okysličovadla ve spalovací komoře. Zařízení tedy potřebuje vlastní palivový systém, který zajistí dodávku pohonných látek do komory z nádrží. V případě, že zařízení používá stejné pohonné látky jako hlavní motor, může mít motor i zážehové zařízení společné nádrže. Pokud zážehové zařízení používá jiné pohonné látky než motor, musí mít nádrže vlastní [13] [14].

Palivový systém tedy dodá palivo a okysličovadlo do komory a v komoře dojde k jeho vznícení. Toho lze docílit pomocí zapalovací svíčky, nebo žhavicí svíčky. Zařízení je vybaveno tryskou, která vede horké spaliny z komory zapalovače do hlavní komory motoru. Zde již horké spaliny ze zapalovače zapálí hlavní palivovou směs.

## 6.4 Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou (Spark Torch Igniter)

Jak z názvu vyplývá, toto zařízení využívá k zapálení palivové směsi ve své komoře zapalovací svíčku. Systém se zapalovací svíčkou je složitější než pyroforický zapalovač, či pochodňový zapalovač na hypergolická paliva. Hypergolická paliva bývají často extrémně toxická a karcinogenní. Z tohoto důvodu se od těchto paliv rychle ustupuje co by od hlavních pohonných hmot raket, stejně tak jako nejsou vhodná pro použití na studentských projektech. Proto se čím dál více objevují zážehová zařízení se zapalovací či žhavicí svíčkou [13] [14].

### 6.4.1 Funkce pochodňového zařízení se zapalovací svíčkou

Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou používá jako pracovní látky dvousložková paliva. Tyto paliva skládající se z okysličovadla a paliva mohou a nemusí být stejné směsi jako hlavní pohonné látky motoru. Výraznou výhodou pro použití stejných pohonných látek pro zapalovač i motor je, že mohou mít společné nádrže. V případě odlišných směsí, musí mít zážehové zařízení vlastní nádrže. Tyto nádrže musí být v reálné aplikaci co nejmenší, a to z důvodu hmotnostní optimalizace. Z toho plyne, že raketa si sebou veze omezené množství pracovních látek pro zapalovací zařízení. To znamená, že může dojít jen k pár opakovaným

zážehům a pak pracovní látky dojdou. Proto se v praxi zpravidla používají paliva pro motory a zážehové zařízení stejná. Dokud je v hlavních nádržích dostatek paliva, aby se motor mohl rozeběhnout a požadovanou dobu dodávat tah, pak je v nádržích i dostatek paliva pro zážehové zařízení, aby mohl být motor znovu zažehnut. Pokud již v nádržích nezůstává žádné palivo, které by mohlo pohánět zážehové zařízení, pak už nemá smysl motor zažehovat, neboť již není palivo ani pro něj [13] [14].

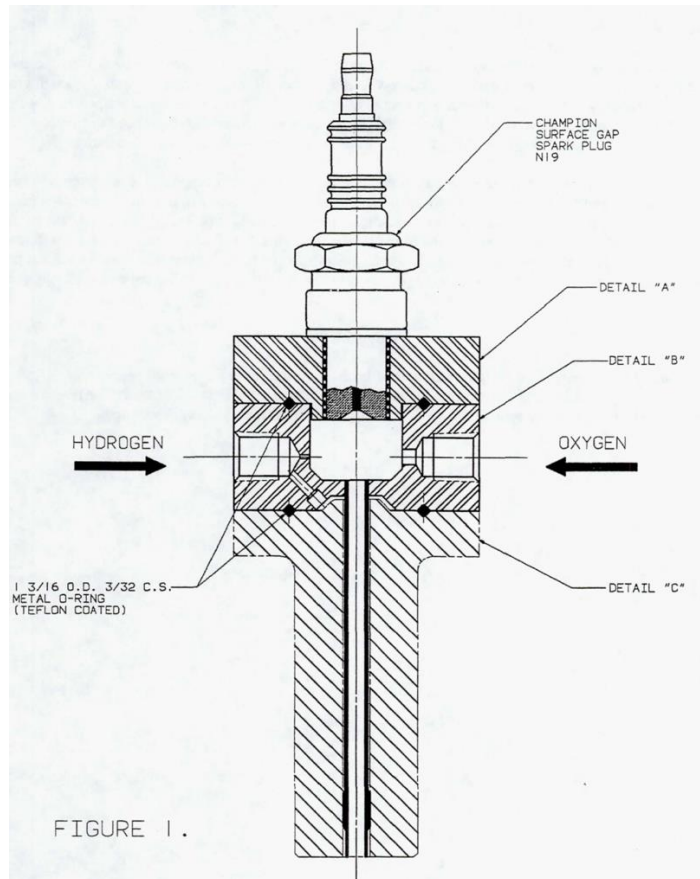
Součástí zážehového zařízení je jeho vlastní palivový systém. Ten má za úkol dodat palivové složky do komory zážehového zařízení z nádrží. Palivové nádrže raket jsou zpravidla tlakované, a proto není za potřebí mít palivová čerpadla pro zážehové zařízení. Tento palivový systém se skládá z ventilů, palivového potrubí a případně nějaké kontrolní elektroniky. Poté co palivový systém dopraví palivo do komory zážehového zařízení, dojde k zapálení palivové směsi zapalovací svíčkou.

Stejně jako ostatní zážehová zařízení, musí být i toto vždy pečlivě nadimenzované pro daný motor, který má zapalovat. Zařízení se může lišit ve své velikosti a může mít především jiný výkon. Tento výkon se odvíjí od spotřeby pohonných hmot. Pro větší a výkonnější motory mají i zařízení větší komoru a mají větší palivové průtoky. Tyto průtoky se z důvodu jednoduchosti palivového systému často regulují tlakem v nádržích, a především škrťacími clonkami, které se umístí před komoru. Pro správnou funkci zařízení se musí provádět spousta výpočtů a následně i spousta testů [13] [14].

Jak je vidět na obrázku 9 Komora zařízení obsahuje jednoduchý vstřikovač, který slouží jako přívod pohonných látek a často jsou jeho součástí již zmíněné regulační clonky. V komoře je otvor pro zapalovací svíčku, která palivové složky zapaluje. Samotná komora zážehového zařízení je pak namontovaná na hlavní komoru motoru, a to buď z boku vedle hlavního vstřikovače, nebo je zakomponovaná do vstřikovače samotného.

Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou má o něco složitější palivový systém v porovnání se zařízením využívajícím katalytického rozkladu peroxidu vodíku, má ale také spoustu výhod. Jednou z nich je jeho možný počet použití během jednoho letu, nebo také to, že nepotřebuje vlastní nádrže [13] [14].





Obrázek 9 - Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou [14]

## 6.5 Pochodňové zážehové zařízení se žhavicí svíčkou

Tento druh zařízení funguje na stejném principu jako pochodňový zapalovač se zapalovací svíčkou. Jak vyplývá z názvu, je mezi nimi jeden rozdíl. Místo zapalovací svíčky, toto zařízení využívá žhavicí svíčku. Konstrukce palivového systému může být pro toto zařízení stejná jako pro zážehové zařízení se zapalovací svíčkou a komora může být také velice podobná ne-li stejná [13].

Zařízení funguje tak, že palivový systém dodá pohonné látky do komory zapalovače, kde dojde k jejich zapálení pomocí žhavicí svíčky. Spalováním paliva a okysličovadla vznikají horké spaliny, které zapálí palivové složky v hlavní komoře motoru [13].



## 7 Volba zážehového zařízení

Výběr zážehového zařízení se řídí především tím, pro jaký motor bude použito a jaké jsou na něj nároky. Jak již bylo řečeno, jedná se o zážehové zařízení pro stacionární edukativní motor na směs plynného kyslíku a kapalného isopropylalkoholu. Tento motor má tah 2,5 až 5 kN. Motor je navrhnutý jako znovupoužitelný a měl by mít vlastnost opakovaného zážehu. Porovnání jednotlivých zážehových zařízení je uvedeno v Tabulce 1, ve které jsou zohledněny poznatky z předešlých kapitol.

- **Pyrotechnická zážehová zařízení:** Tato zařízení jsou velmi spolehlivá a jejich konstrukce je velmi jednoduchá. Pro motory na tuhá paliva jsou ideální volbou, ale pro motory na kapalná paliva a hybridní motory jsou nevhodná především protože nejsou znovupoužitelná. Dále jsou tato zařízení při manipulaci nebezpečná, a to z důvodu pyrotechnických látek.
- **Plazmové zážehové zařízení:** Tato zařízení jsou velice výkonná, ale ke své funkci potřebují velmi výkonný elektrický systém. Tato zařízení mohou používat jako pracovní plyn helium, které se u raket často používá jako tlakovací plyn pro tlakování nádrží, a proto by v praxi nemuselo mít vlastní nádrže. Z důvodu vysoké ceny helia se ale často u studentských projektů používá k tlakování dusík. Takže by zařízení v této aplikaci muselo mít i vlastní nádrž na helium nebo argon. Toto řešení pak není vhodné z důvodu hmotnostní a finanční optimalizace.
- **Laserové zážehové zařízení:** Tato zařízení mají výhodu ve své kompaktní a lehké konstrukci. Zážeh pomocí koncentrované energie do jednoho bodu je velice efektivní. Tato zařízení jsou ale velice drahá na vývoj a konstrukci. Také nejsou příliš ozkoušená v praxi.
- **Zážehové zařízení s využitím katalytického rozkladu peroxidu vodíku:** Toto zařízení je velmi efektivní díky tomu, že produktem rozkladu peroxidu vodíku je z velké části horký kyslík, který velmi pomůže zažehnutí palivových složek v komoře motoru. Jeho nevýhodou je ale poměrně drahý a složitý vývoj katalyzátoru. Dále toto zařízení také potřebuje vlastní palivový systém.

- **Pyroforická zážehová zařízení:** Tato zařízení mají velice jednoduchou konstrukci a i jejich palivový systém je velice jednoduchý. Lze s nimi provádět opakované zážehy, ale jejich velká slabina je skrytá v toxicitě pyroforických látek. Tato zařízení ke své funkci používají velice toxické látky. Proto jsou tato zařízení nevhodná pro použití v edukativních aplikacích.
- **Pochodňová zážehová zařízení:** Tato zařízení jsou hojně používaná a ozkoušená. Jejich nevýhodou je složitější palivový systém. Tuto nevýhodu lze kompenzovat alespoň z části tím, že zařízení bude používat stejné pracovní látky jako motor. Poté může mít zapalovač a motor společné nádrže. Díky tomu je palivový systém omezen jen na dodávku pracovních látek z těchto nádrží do komory zařízení. S těmito zařízeními také lze provádět opakované zážehy. Zařízení je vybaveno vlastním zápalným zařízením v podobě zapalovací, nebo žhavicí svíčky.

*Tabulka 1 - Porovnání zážehových zařízení*

| Zařízení                            | Vlastní nádrže | Opakovaný zážeh | Výhody                  | Nevýhody                    |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|
| Pyrotechnické zařízení              | Ne             | Ne              | Jednoduchost konstrukce | Nebezpečí při manipulaci    |
| Plazmové zařízení                   | Ano            | Ano             | Vysoký výkon            | Potřeba výkonné elektroniky |
| Laserové zařízení                   | Ne             | Ano             | Nízká hmotnost          | Cena                        |
| Katalytický rozklad peroxidu vodíku | Ano            | Ano             | Efektivita zážehu       | Cena, Složitá konstrukce    |
| Pyroforická zařízení                | Ano            | Ano             | Jednoduchost konstrukce | Toxicita pracovních látek   |
| Pochodňové zařízení                 | Ano            | Ano             | Prověřená technologie   | Palivový systém             |

Na základně těchto vlastností bylo zvoleno pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou. Pyrotechnická a pyroforická zařízení byla vyřazena z výběru na základně jejich nebezpečnosti pro použití v edukativní aplikaci. Pyrotechnické zařízení dále není akceptovatelné z důvodu nemožnosti opakovaného použití. Dále byla vyřazena zařízení laserová a zařízení používající katalytický rozklad peroxidu vodíku, a to kvůli složité konstrukci a vysoké ceně. Plazmové zařízení bylo vyřazeno na základně vysoké ceny pracovních látek a také na základě potřeby složité a vysoko napěťové elektroniky.

## 8 Popis zážehového zařízení

Do této práce bylo zvoleno pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou. Jak již bylo řečeno, jedná se o zážehové zařízení pro stacionární edukativní motor na směs plynného kyslíku a kapalného isopropylalkoholu. Tento motor má tah 2,5 až 5 kN.

### 8.1 Pracovní látky

Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou bylo zvoleno také na základě toho, že se jedná o kapalinový motor na dvousložková paliva. Z toho plyne, že motor bude mít dvě oddělené nádrže. Jednu na kyslík a druhou na isopropylalkohol. Tyto palivové složky může využívat i zážehové zařízení. Jelikož se jedná o teoretický návrh demonstrativního zážehového zařízení, palivový systém pro zapalovač bude mít nádrže vlastní. V reálné aplikaci by mělo zařízení společné nádrže s motorem. Ušetřila by se tak hmotnost i snížila cena.

Zážehové zařízení bude tedy používat jako palivo izopropylalkohol (IPA). Jedná se o bezbarvou těkavou látku, která se používá například v kosmetice, či jako ředící alkohol. Jedná se ale také o velmi dobré raketové palivo. V Tabulce 2 jsou vypsány vybrané chemické a fyzikální vlastnosti [15].

*Tabulka 2 - Fyzikální vlastnosti Isopropylalkoholu*

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Hustota [kg/m <sup>3</sup> ] | 786    |
| Bod varu [°C]                | 82,5   |
| Bod tání [°C]                | -89    |
| Molární hmotnost [kg/mol]    | 0,0601 |

Jako okysličovadlo bude použit plynný kyslík (GOX). Jedná se o jedno z nejvíce používaných okysličovadel pro raketové motory. Častěji se používá v kapalném skupenství, ale s kapalným kyslíkem se pracuje obtížněji. Jelikož teplota varu kyslíku je okolo -182 °C musí se aktivně chladit, aby se udržel v kapalném skupenství. Proto byl zvolen plynný kyslík. Praxi by se dal použít v plynné formě i kdyby se jako okysličovadlo pro motor používal kapalný. Nádrže na kapalný kyslík se musí ventilovat, tedy musí se upouštět vypařený kyslík, jinak by

došlo k poškození nádrží. Při tomto upouštění by se dal použít tento plynný kyslík k pohonu zapalovače. V Tabulce 3 jsou vypsány vybrané vlastnosti kyslíku.

*Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti kyslíku*

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| Hustota [kg/m <sup>3</sup> ] | 1,429                       |
| Bod varu [°C]                | -182,95                     |
| Bod tání [°C]                | -218,79                     |
| Molární hmotnost [kg/mol]    | 0,032 (Pro O <sub>2</sub> ) |

## 8.2 Výkon

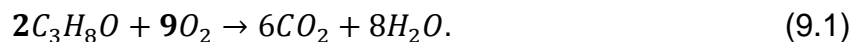
Pro úspěšné zapálení motoru není zapotřebí, aby byla zapálena veškerá palivová směs v komoře motoru. Lze vycházet z toho, že pokud se podaří zapálit dostatečně velkou část palivových složek, teplo vyprodukované hořením této části ohřeje zbytek palivových složek na teplotu samovznícení v komoře motoru a dojde tedy k úspěšnému zažehnutí motoru. Tato část palivových složek byla určena jako 10 % hmotnosti palivových složek, které protečou každou sekundu komorou. Určení tohoto výkonu není součástí této práce. Tepelný výkon pro toto zážehové zařízení, aby došlo k vznícení 10 % objemu komory, byl určen jako  $\dot{Q}_{\Delta T_p} = 103,899 \text{ kW}$ . Tento výkon bude dále použitý pro výpočet spotřeby pracovních látek v komoře zážehového zařízení. Tato hodnota je tedy pro podobu palivového systému velice důležitá.

## 9 Určení spotřeby pracovních látek

Určení spotřeby pracovních látek je velice kritické jak pro funkci zařízení, tak pro návrh palivového systému. Zařízení musí dodávat daný tepelný výkon do komory motoru a tento výkon se odvíjí od spotřebovaných pracovních látek. Výkon zážehového zařízení je ovlivněn několika faktory. Jedním z nich je směšovací poměr okysličovadla ku palivu GOX/IPA. Ten však nemá vliv pouze na výkon ale také na další vlastnosti zařízení. Jedním z nich je životnost. Protože směšovací poměr má vliv na teplotu hoření, má tedy nepřímo vliv i na životnost komory. Volba správného směšovacího poměru bude diskutována později. Jakmile bude zvolen správný směšovací poměr a budou určeny hmotnostní průtoky zařízením, lze začít s návrhem palivového systému. Celý palivový systém a velká většina jeho vlastností se odvíjí od hmotnostních průtoků pracovních látek.

### 9.1 Určení chemické rovnováhy

Pro určení správných hmotnostních průtoků pracovních látek, je zapotřebí znát jejich chemickou rovnováhu spalování. Z této rovnováhy je možné získat molární směšovací poměr paliva a okysličovadla. Pro tuto chemickou rovnováhu je zapotřebí znát chemickou rovnici probíhající reakce v komoře zážehového zařízení. Tato chemická rovnice je



Z této rovnice plyne, že molární směšovací poměr je  $\frac{O}{F(mol)} = \frac{9}{2} = 4,5$  [16].

### 9.2 Stanovení průtoku pracovních látek

Aby bylo možné určit správné hodnoty hmotnostních průtoků paliva a okysličovadla, je zapotřebí znát molární průtok. Ten lze zjistit z výkonu zážehového zařízení a standardního spalného tepla isopropylalkoholu. Standardní spalné teplo IPA je  $\Delta H_c = 2005100 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$  [17].

Po dosazení hodnot do rovnice lze získat

$$\dot{n} = \frac{\dot{Q}_{\Delta T_p}}{\Delta H_c} = \frac{103\,899}{2\,005\,100} = 0,0518 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (9.2)$$

Z této rovnice vyplývá, že molární průtok je  $\dot{n} = 0,0518 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$ . Díky této hodnotě nyní lze zjistit hmotnostní průtoky paliva a okysličovadla. K tomu je

zapotřebí znát jen jejich molární hmotnosti. Ty byly uvedeny v Tabulce 2 a Tabulce 3. Po dosazení hodnot do rovnic vznikne

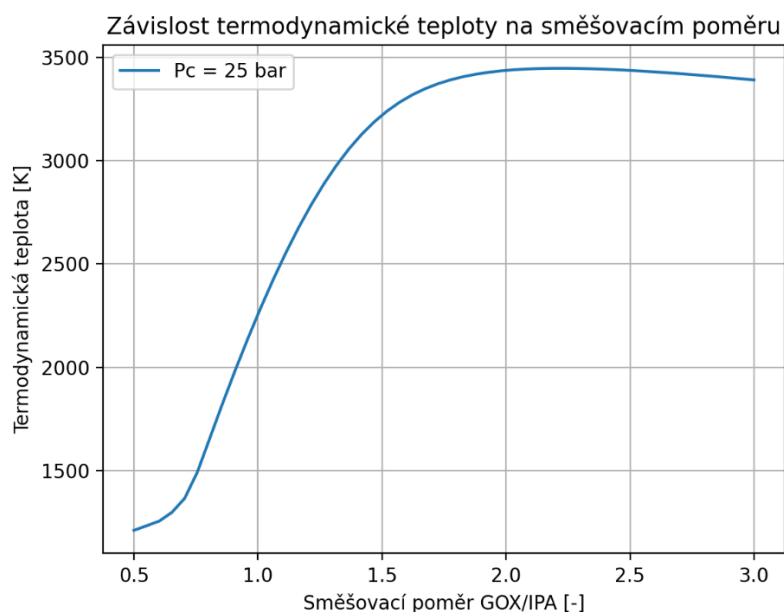
$$\dot{m}_{IPA} = \dot{n} \cdot M_{IPA} = 0,0518 \cdot 0,0601 = 0,0031 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (9.3)$$

$$\dot{m}_{GOX} = \dot{n} \cdot \frac{O}{F_{(mol)}} \cdot M_{GOX} = 0,0518 \cdot 4,5 \cdot 0,032 = 0,0076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (9.4)$$

Nyní jsou známé hmotnostní průtoky paliva a okysličovadla. Jak již bylo diskutováno dříve, poměr hmotnostního průtoku okysličovadla k palivu je velmi důležitý. Z těchto hodnot lze získat ideální chemický směšovací poměr

$$O/F = \frac{\dot{m}_{GOX}}{\dot{m}_{IPA}} = \frac{0,0076}{0,0031} = 2,45. \quad (9.5)$$

Tento poměr hmotnostních průtoků je sice chemicky ideální, ale to neznamená že je ideální i pro konstrukci zážehového zařízení. Důvod je ten že zážehové zařízení musí vydržet vysoké teploty. Tento ideální směšovací poměr je z pohledu zážehu velmi vhodný vzhledem k vysoké teplotě spalování, ale konstrukci zařízení tento poměr lehce komplikuje. Zařízení musí být nějak chlazeno, protože jinak by komora nevydržela vysoké teploty. V programu NASA Chemical Equilibrium Application byl proveden výpočet teploty v komoře v závislosti na směšovacím poměru. Výsledkem tohoto výpočtu je Graf 1.



Graf 1 - Závislost termodynamické teploty na směšovacím poměru

Jak je z Grafu 1 vidět, teplota pro tento ideální směšovací poměr je  $\sim 3430\text{ K}$  což je velmi vysoká teplota, vzhledem k teplotě tání běžných konstrukčních materiálů. Toto lze vyřešit chlazením komory. Navrhnout optimálně fungující regenerativní chlazení je velice náročná věc, a proto tento způsob nepřichází v úvahu. Pro chlazení komory bylo zvoleno chlazení filmem. Tedy filmem spalin o nižší teplotě, který proudí po vnitřních stěnách komory a tím částečně ochrání komoru před spalinami o velmi vysoké teplotě. K tomuto chlazení musí být komora uzpůsobena, a to nejen co se geometrie týče. Je zapotřebí vytvořit tyto chladnější spaliny. Toho lze dosáhnout snížením směšovacího poměru. Zároveň ho ale nelze zmenšit příliš, protože horké spaliny jsou zapotřebí k dobrému zážehu. Jak je vidět v Grafu 1, teplota je dostatečně vysoká v rozmezí směšovacího poměru  $O/F = 1,6 \div 2$ . Tím že se zvolí nižší směšovací poměr, zůstane ve spalinách nespálené palivo, které sníží jejich teplotu. Proto je pro výpočet finálních hmotnostních průtoků zvolen směšovací poměr  $O/F = 1,6$ . Teplota u tohoto poměru je  $\sim 3280\text{ K}$ , což je dostatečně vysoká teplota pro funkci zážehového zařízení, ale zároveň o něco nižší teplota oproti ideálnímu chemickému směšovacímu poměru. Komora bude dále přizpůsobena k filmovému chlazení.

Nyní lze vypočítat finální hmotnostní průtok paliva. Hodnota průtoku okysličovadla zůstane stejná. Přidáním paliva dojde ke spálení jen takového množství paliva, dokud v soustavě nedojde okysličovadlo. Poté zbydou horké spaliny a přebytečné palivo. Výkon tedy zůstane stejný. Kdyby se naopak zachoval průtok paliva a ubralo se okysličovadlo, výkon by se zmenšil.

Finální hmotnostní průtoky paliva a okysličovadla jsou

$$\dot{m}_{GOX} = 0,0076\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (9.6)$$

$$\dot{m}_{IPA} = \frac{\dot{m}_{GOX}}{O/F} = \frac{0,0076}{1,6} = 0,0048\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (9.7)$$



## 10 Koncepční návrh palivového systému

Volba správného rozvržení palivového systému je kritická pro jeho funkci. Návrh takového palivového systému musí zohledňovat veškeré požadavky, které jsou na palivový systém kladeny. Hlavním požadavkem tohoto systému je samozřejmě dodávka palivových složek do komory zážehového zařízení, ale tento palivový systém bude mít i vedlejší požadavky, které budou diskutovány v následující podkapitole.

### 10.1 Požadavky na palivový systém

Hlavní požadavky jsou zřejmé, ale pro tento systém byly určeny další vedlejší požadavky, které přispívají bezpečnosti, nebo výkonům zážehového zařízení.

- **Hlavní požadavky**

- **Dodávka pracovních látek:** Palivový systém musí zabezpečit dodávku paliva a okysličovadla, a to v přesném množství. Ke správné funkci zařízení je zapotřebí hmotnostní průtok paliva  $\dot{m}_{IPA} = 0,0048 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  a hmotnostní průtok okysličovadla  $\dot{m}_{OPA} = 0,0048 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . Takto přesných průtoků lze docílit použitím regulačních clonek.
- **Bezpečnost:** Tento požadavek je poměrně obecný, avšak na podobě palivového systému se odrazí značně. Silným argumentem ve prospěch bezpečnosti je předpoklad, že je zařízení navrženo správně. Do celého systému bude však zaneseno několik bezpečnostních prvků. Jednou z nejvíce nebezpečných částí v tomto systému je tlaková palivová nádrž. Proto bude navržena s bezpečností nejméně  $k = 3$  a bude vybavena přetlakovým ventilem.
- **Elektronicky ovládané ventily:** Díky elektronicky ovládaným řídicím ventilům může být obslužný personál v bezpečné vzdálenosti.

- **Vedlejší požadavky**

- **Měření tlaku před komorou:** Pro zpětnou analýzu funkce zařízení je vhodné znát co nejvíce dat. Jedněmi z nejdůležitějších dat jsou tlaky paliva a okysličovadla před vstupem do komory.

- **Možnost proplachu komory:** Jedná se o požadavek zvyšující bezpečnost. Během testování takovýchto zařízení se často dělají takzvané Cold flow testy, tedy studené testy. Během těchto testů se skrze komoru zařízení nechají proudit palivo i oksličovadlo, ale nedojde k zažehnutí směsi zapalovací svíčkou. Po skončení takového testu se palivový systém a komora profouknou inertním plynem, často tím, kterým se tlakují nádrže, aby byla jistota, že v komoře a potrubí palivového systému nezůstaly žádné pracovní látky, které by mohly nechtěně vzplanou.
- **Regulační clonky těsně před komorou:** Z pohledu měření tlaků se jedná o nepříliš vhodný požadavek, protože měření před regulačními clonkami je méně vypovídající. Tento požadavek má však svůj důvod. Tím důvodem je to, že jelikož mají oksličovadlo i palivo velice malé hmotnostní průtoky, otvory v regulačních clonkách budou mít velice malý průměr, a proto lze clonky použít zároveň jako vstřikovač do komory.

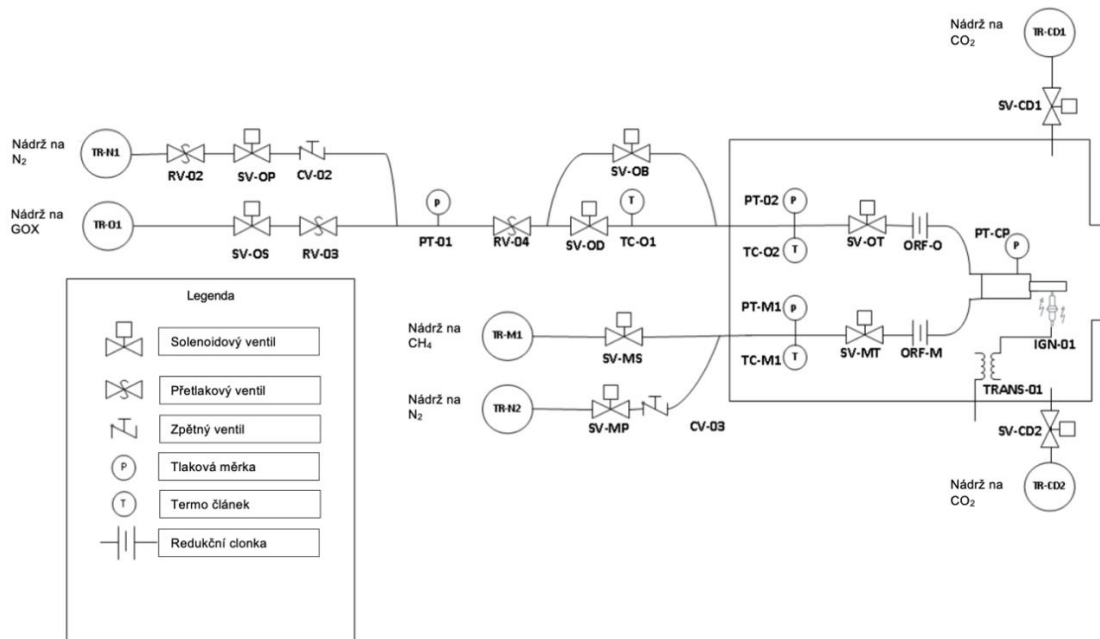
Každý z těchto požadavků se odráží na konečné podobě palivového systému. Pro přehlednost, co z jednotlivých požadavků plyne pro konečnou podobu, jsou požadavky a jejich důsledky uvedeny v Tabulce 4.

*Tabulka 4 - Požadavky na palivový systém*

| Požadavek                        | Důsledek  |
|----------------------------------|---|
| Přesné palivové průtoky          | V systému musí být přesné regulační clonky  |
| Bezpečnost palivové nádrže       | Přetlakový ventil na palivové nádrži a bezpečnost $k = 1,5$                               |
| Elektronicky ovládané ventily    | Ventily budou solenoidové   |
| Měření tlaku před komorou        | Systém musí být vybaven měřícími body   |
| Možnost proplachu komory         | Struktura větve pro tlakovací plyn bude muset být napojen na větev okysličovadla a paliva |
| Regulační clonky jako vstřikovač | Regulační clonky musí být v podstatě v komoře a jsou posledním členem před komorou        |

## 10.2 Rozvržení palivového systému

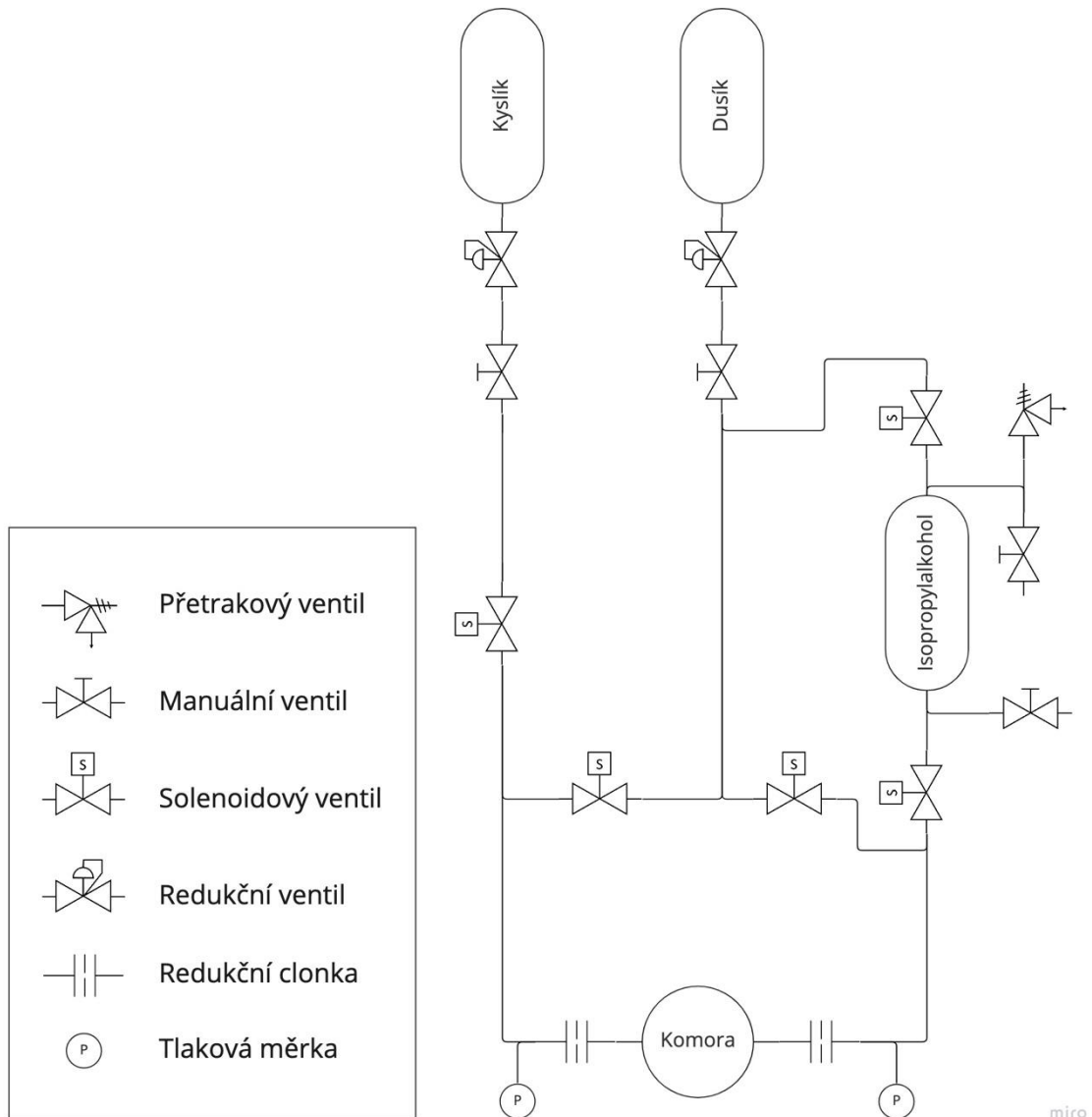
Na obrázku 10 je vidět příklad rozvržení palivového systému pro pochodňové zážehové zařízení, které používá jako pracovní látky plynný kyslík GOX a metan CH<sub>4</sub>.



Obrázek 10 – Příklad uspořádání palivového systému pro zážehové zařízení na GOX/CH<sub>4</sub> [13]

Tento palivový systém má mnoho společných prvků s palivovým systémem navrhovaným v této práci. Lze vidět, že má stejně jako zařízení navrhované v této práci možnost proplachu komory. To lze usoudit z přítomnosti dvou dusíkových nádrží, jedné na větvi okysličovadla a druhé na větvi palivové. Dále mají obě zařízení průtok pracovních látek řízený pomocí regulačních clonek a solenoidových ventilů. Obě zařízení také měří tlak v potrubí jak paliva, tak okysličovadla, avšak v palivovém systému zobrazeném na obrázku 10 se tento tlak měří před posledními solenoidovými ventily a regulačními clonkami. V palivovém systému navrhovaném v této práci se tlak bude měřit těsně před regulačními clonkami, které budou v podstatě součástí komory.

Palivový systém navrhovaný v této práci je o něco jednodušší. Jeho schéma je vyobrazeno na obrázku 11.



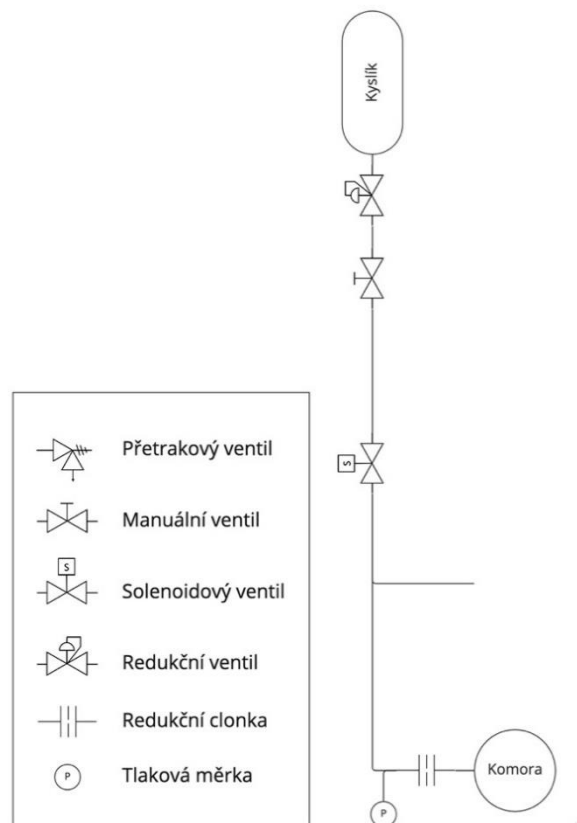
Obrázek 11 - Návrh uspořádání palivového systému

Jak lze ze schématu vidět, na rozdíl od palivového systému na obrázku 10 má tento systém pouze jednu nádrž na dusík. Má také méně ovládacích ventilů. Systém je vybaven pěti solenoidovými ventily. Jeden pro řízení přívodu kyslíku, druhý pro řízení přívodu isopropylalkoholu, další dva pro ovládání proplachu a poslední pro řízení tlakování palivové nádrže. Na schématu lze také vidět, že u nádrže je přetlakový ventil a dva manuální ventily, které budou sloužit jako napouštěcí a vypouštěcí ventil.

### 10.2.1 Část pro dodávku oksyličovadla

Palivový systém pro GOX je nejjednodušší ze všech tří částí, ale na rozdíl od zbylých dvou jsou na tuto část kladeny speciální nároky. Jak je vidět na obrázku 12, z nádrže na plynný kyslík vede kyslík do regulačního ventilu, který zajistí že bude

kyslík v potrubí proudit za správného tlaku. Dále povede do manuálního ventilu, který slouží jako hlavní bezpečnostní uzel. Pokud bude se zařízením jakkoliv manipulováno, bude ventil uzavřen, aby bylo zajištěno že nedojde k nechtěnému úniku kyslíku. Dále bude kyslík veden k solenoidovému ventilu, který již bude řídit, zda kyslík do komory proudí, nebo neproudí. Z tohoto ventilu už je kyslík veden jen přes měřící bod, kde dojde k zaznamenání tlaku a následně přes regulační clonku bude proudit do spalovací komory zážehového zařízení. Regulační clonka bude mít za úkol zajistit správný hmotnostní průtok kyslíku, aby bylo dosaženo optimálního výkonu zařízení. Mezi solenoidovým ventilem a měřícím bodem bude na kyslíkovou větev připojena větev dusíku, která bude mít na starosti proplachování komory a potrubí.



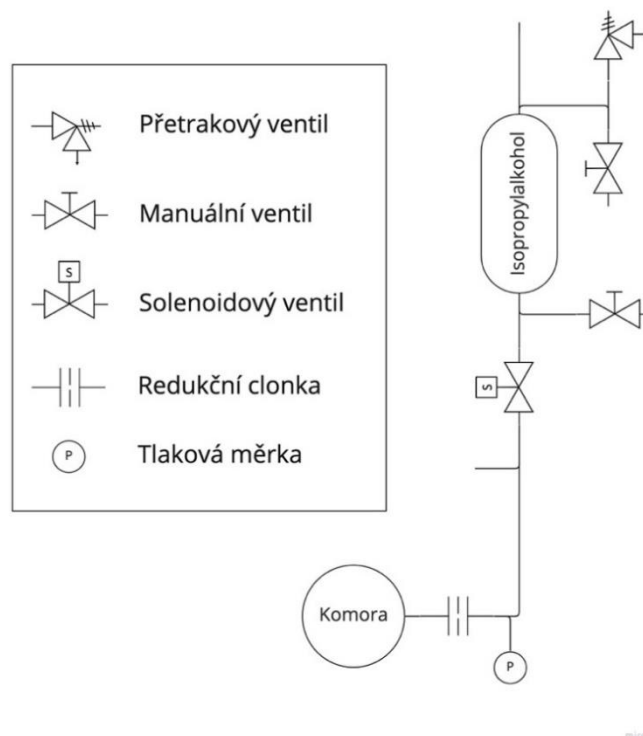
*Obrázek 12 - Větev okysličovadla*

Tato část palivového systému je nejjednodušší, ale jsou na ni kladeny speciální požadavky. Těmito požadavky je čistota veškerých součástí, se kterými přijde kyslík do kontaktu. Plynný kyslík je vysoce reaktivní a v případě kontaktu s mastnotou, může dojít ke samovznícení. Proto musí být minimálně ta část palivového systému, která slouží pro dodávku kyslíku velice pečlivě vyčištěná

a odmaštěná. Dále zde musí být pečlivě zváženo, které materiály přijdou s kyslíkem do kontaktu.

### 10.2.2 Část pro dodávku paliva

Tato část palivového systému má na starosti dodávku paliva. Zde na rozdíl od kyslíku je dodávaná látka v kapalně formě. Do této části palivového systému musí být zakomponovaná jistá bezpečnostní opatření. Palivová nádrž bude navržena v této práci. Tato nádrž bude tlakovaná dusíkem. Tlakování nádrží je ověřený způsob, jak hnát kapalné látky skrze potrubí. Alternativou by byla čerpadla, ale jejich konstrukce je velice složitá a komplikovaná, proto bylo pro toto zařízení zvoleno tlakování nádrží. Z důvodu tlakování nádrže musí být tato část palivového systému vybavena přetlakovým ventilem. Ten v případě přetlaku v palivové nádrži uvolní tlak, aby nedošlo k poškození systému. Jak je vidět na obrázku 13, nádrž je dále vybavena dvěma manuálními ventily, které budou sloužit jako ventil napouštěcí a vypouštěcí.



Obrázek 13 - Část palivového systému pro dodávku paliva

Jak je vidět na obrázku 13, palivo proudí ze sestavy palivové nádrže přes řídicí solenoidový ventil a dále přes regulační clonku, která zajistí správný hmotnostní

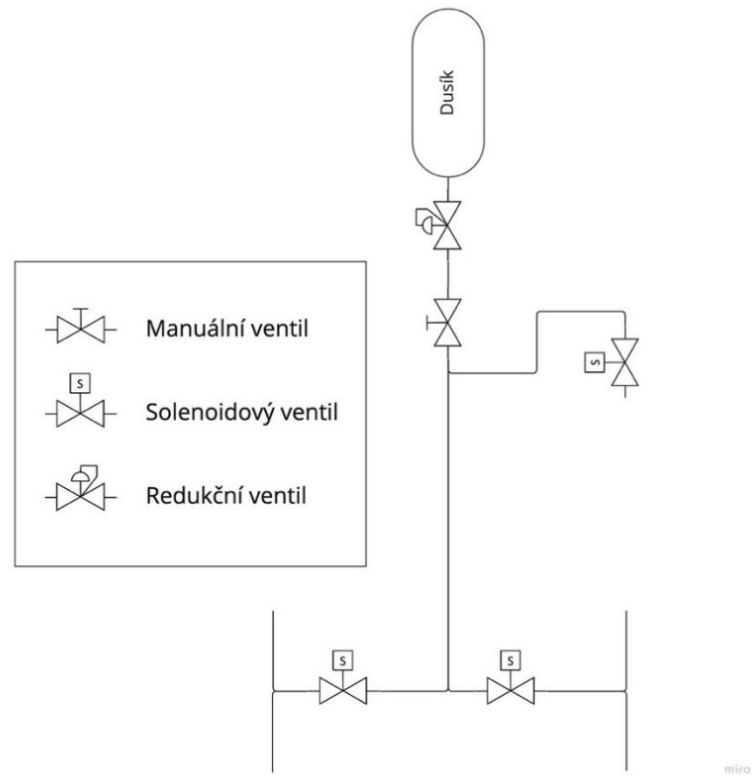
průtok. Tato část palivového systému není na rozdíl od kyslíkové části vybavena hlavním manuálním ventilem. Stejnou funkci zastává možnost, že nádrž není natlakovaná. Tím je palivová část bezpečná. Proto tímto manuálním ventilem je vybavená dusíková část, která má na starosti tlakování palivové nádrže.

### 10.2.3 Dusíková část palivového systému

Tato část má na starosti dva úkoly. Tím hlavním je tlakování palivové nádrže. Tím druhým je proplach komory. Jak lze vidět na obrázku 14 dusík je stejně jako kyslík veden z nádrže přes regulační ventil k hlavnímu manuálnímu ventilu. Ten má stejně jako manuální ventil na kyslíkové větvi za úkol zabezpečit systém v případě manipulace. Tím že se uzavře nemůže dojít k natlakování palivové nádrže a tím se systém zabezpečí a nemůže dojít k únikům isopropylalkoholu skrze palivovou část palivového systému. Dusíková část palivového systému se dále větví do dvou částí. Jedna část má za úkol tlakování nádrže a druhá má na starosti proplach komory. Tlakovací část pokračuje od rozvětvení k solenoidovému ventilu, který bude řídit tlakování nádrže. Dokud se tento ventil neotevře nemůže dojít k natlakování nádrže. Dále již následuje nádrž.

Část určená k proplachu komory dále pokračuje k dalšímu rozvětvení. Zde dojde k rozdělení na proplachovou větev palivové části a části pro dodávku oksyličovadla. Každá z těchto dvou větví má svůj vlastní řídicí solenoidový ventil. Důvodem pro použití dvou ventilů místo jednoho je ten, aby bylo možné proplachovat kyslíkovou a palivovou větev nezávisle na sobě. Za těmito řídicími ventily vede dusík již přímo do palivového a kyslíkového potrubí.





Obrázek 14 - Dusíková část palivového systému

## 11 Parametry palivového systému

Pro volbu správných rozměrů součástí palivového systému je zapotřebí znát jeho pracovní parametry. Těmito parametry jsou myšleny především pracovní tlaky v palivovém systému. Od tlaku v potrubí se budou odvíjet rozměry potrubí. Tlaky jsou závislé na vlastnostech regulačních clonek.

### 11.1 Návrh regulačních clonek

Tlak v palivovém systému se odvíjí od rozměrů a funkce regulačních clonek. Jak pracovní látka prochází skrze regulační clonku klesá v ní tlak. Proto je zapotřebí, aby byl tlak před regulační clonkou větší než požadovaná hodnota za clonkou. Pro určení tlaků, je zapotřebí znát vnitřní průměr regulačních clonek. Pro jejich návrh se použijí dva rozdílné výpočty, protože okysličovadlo je v plynném skupenství a palivo v kapalném. To znamená že okysličovadlo je stlačitelné a palivo není.

#### 11.1.1 Návrhové výpočty regulační clonky pro GOX

Okysličovadlo je v plynném skupenství. Velikost vnitřního průměru clonky bude vypočten ze znalosti hmotnostního průtoku. Následující výpočty se řídí rovnicí

$$\dot{m}_{GOX} = C_{d_{GOX}} \frac{p_0 \cdot A_{GOX}}{\sqrt{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R_m} \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (11.1)$$

kde  $\dot{m}_{GOX}$  je hmotnostní průtok plynného kyslíku,  $C_{d_{GOX}}$  je ztrátový koeficient pro clonku okysličovadla,  $p_0$  je tlak v potrubí před clonkou,  $A_{GOX}$  je průřez otvoru clonky pro okysličovadlo,  $T_0$  je teplota,  $R_m$  je měrná plynová konstanta a  $\kappa$  je poissonova konstanta [17].

Z tohoto vzorce lze vyjádřit  $A_{GOX}$  a tím vznikne rovnice

$$A_{GOX} = \frac{\dot{m}_{GOX} \cdot \sqrt{T_0}}{C_{d_{GOX}} \cdot p_0 \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R_m} \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}} \quad (11.2)$$

Hodnoty veličin, které budou dosazeny do tohoto vzorce jsou vypsány v Tabulce 5.

*Tabulka 5 - Vlastnosti plynného kyslíku pro výpočet průřezu otvoru clonky*

|                         |                                   |          |
|-------------------------|-----------------------------------|----------|
| Hmotnostní průtok       | $\dot{m}_{GOX} [kg \cdot s^{-1}]$ | 0,0076   |
| Teplota                 | $T_0 [K]$                         | 293,15   |
| Ztrátový koeficient     | $C_{d_{GOX}} [-]$                 | 0,88     |
| Měrná plynová konstanta | $R_m [J \cdot kg^{-1}K^{-1}]$     | 259,8125 |
| Poissonova konstanta    | $\kappa [-]$                      | 1,395    |

V tabulce chybí pouze jedna hodnota, která je potřeba k výpočtu průřezu otvoru clonky a tou je tlak v potrubí před clonkou  $p_0$ . Cílem této kapitoly je získat právě tuto hodnotu, ale přesto je tato hodnota potřeba k výpočtu. Hodnota tlaku tedy byla zjištěna iterační metodou. Byla zvolena výchozí hodnota tlaku, pro tu byl vypočten průřez otvoru clonky a následně zpětně vypočten tlak za clonkou. Bylo tak učiněno podle následujících výpočtů. Jako výchozí hodnota tlaku před clonkou byla zvolena  $p_0 = 3000000 Pa$ . Tato hodnota a hodnoty z Tabulky 5 byly dosazeny do vzorce (11.2) a tím vznikne

$$A_{GOX} = \frac{0,0076 \cdot \sqrt{293,15}}{0,88 \cdot 3000000 \cdot \sqrt{\frac{1,395}{259,8125} \cdot \left(\frac{2}{1,395 + 1}\right)^{\frac{1,395+1}{1,395-1}}}} = 1,161719 \cdot 10^{-6} m^2.$$

Pro výpočet rozdílů tlaků před clonkou a za ní je také potřeba znát hustotu kyslíku při daném tlaku, kterou lze získat z rovnice

$$\rho = \frac{p_0}{R_m \cdot T_0} = \frac{3000000}{259,8125 \cdot 293,15} = 39,389 kg \cdot m^{-3}. \quad (11.3)$$

Hodnoty hustoty a průřezu otvoru clonky byly dosazeny do vzorce pro výpočet rozdílů tlaků:

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{GOX}}{C_{d_{GOX}} \cdot A_{GOX}}\right)^2}{2 \cdot \rho} = \frac{\left(\frac{0,0076}{0,88 \cdot 1,161719 \cdot 10^{-6}}\right)^2}{2 \cdot 39,389} = 701549,286 Pa \quad (11.4)$$

Z hodnoty rozdílu tlaků lze již následně vypočítat tlak za clonkou  $p_1$ , a to podle rovnice

$$p_1 = p_0 - \Delta p = 3000000 - 701549,286 = 2298450,714 \text{ Pa.} \quad (11.5)$$

Ze zadání vyplývá, že zážehové zařízení musí mít tlak v komoře  $p_c = 2,5 \text{ MPa}$ . Z toho plyne že tlak za regulační clonkou  $p_1$  musí být větší než tato hodnota. Proto je zapotřebí tlak před regulační clonkou zvýšit. Aby byla zjištěna správná hodnota vstupního tlaku, byl proveden iterační výpočet, který se řídil stejnými vzorci jako předchozí výpočty. Proměnnou je vstupní tlak před regulační clonkou, který se mezi jednotlivými iteracemi změní tak, že je vždy zvětšen o  $200000 \text{ Pa}$ . Iterace budou prováděny tak dlouho, dokud hodnota  $p_1$  nebude větší než požadovaný tlak v komoře  $p_c$ . Mezivýsledky jednotlivých iterací jsou vyobrazeny v Tabulce 6.

*Tabulka 6 - Výsledky iteračních výpočtů*

| Číslo iterace | Vstupní tlak $p_0$ [Pa] | Průřez otvoru $A_{GOX}$ [m <sup>2</sup> ] | Rozdíl tlaků $\Delta p$ [Pa] | Výstupní tlak $p_1$ [Pa] |
|---------------|-------------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| 1             | 3200000                 | $1,089112 \cdot 10^{-6}$                  | 748319,239                   | 2451680,761              |
| 2             | 3400000                 | $1,025046 \cdot 10^{-6}$                  | 795089,191                   | 2604910,808              |
| 3             | 3600000                 | $9,680993 \cdot 10^{-7}$                  | 841859,144                   | 2758140,856              |

Jak je z výsledků v Tabulce 6 vidět, již hodnota tlaku před clonkou  $p_0 = 3400000 \text{ Pa}$  stačí na to, aby byl výstupní tlak vyšší než tlak v komoře. Důvod pro to, aby byl výstupní tlak clonky vyšší, než je tlak v komoře je ten, aby nedošlo ke zpětnému zahoření do otvoru clonky, což by mohlo clonku poškodit. Vstupní tlak v druhé iteraci tuto podmínku splňuje, ale pro vyšší bezpečnost bude zvolena hodnota vstupního tlaku  $p_0 = 3600000 \text{ Pa}$ . To že je hodnota výstupního tlaku pak o něco více vyšší, než u hodnoty druhé iterace nijak spalování v komoře neovlivní, a proto bude z bezpečnostních důvodů zvolena hodnota  $p_0 = 3600000 \text{ Pa}$ . Pro tuto

hodnotu budou tedy určeny parametry regulační clonky, a to podle předchozích výpočtů.

Do vzorce (11.2) je dosazena hodnota vstupního tlaku  $p_0 = 3600000 \text{ Pa}$  a tím lze zjistit hodnotu průřezu otvoru clonky

$$A_{GOX} = \frac{0,0076 \cdot \sqrt{293,15}}{0,88 \cdot 3600000 \cdot \sqrt{\frac{1,395}{259,8125} \cdot \left(\frac{2}{1,395+1}\right)^{\frac{1,395+1}{1,395-1}}}} = 9,680993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.$$

Z této hodnoty lze následně vypočítat průměr regulační clonky, a to podle rovnice

$$d_{GOX} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{GOX}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,680993 \cdot 10^{-7}}{\pi}} = 1,110235 \cdot 10^{-3} \text{ m} \doteq 1,11 \text{ mm}. \quad (11.6)$$

Nyní lze vypočítat hustotu pro daný tlak a to podle rovnice

$$\rho = \frac{p_0}{R_m \cdot T_0} = \frac{3600000}{259,8125 \cdot 293,15} = 47,266 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Hodnota hustoty je potřeba k určení rozdílu tlaků. Nyní lze dosadit do vzorce pro získání hodnoty rozdílu tlaků

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{GOX}}{C_{d_{GOX}} \cdot A_{GOX}}\right)^2}{2 \cdot \rho} = \frac{\left(\frac{0,0076}{0,88 \cdot 9,680993 \cdot 10^{-7}}\right)^2}{2 \cdot 47,266} = 841859,144 \text{ Pa}.$$

Díky této hodnotě je možné dopočítat podle následujícího výpočtu hodnotu výstupního tlaku za regulační clonkou

$$p_1 = p_0 - \Delta p = 3600000 - 841859,144 = 2758140,856 \text{ Pa}.$$

Tato hodnota výstupního tlaku splňuje podmínku  $p_1 > 2500000 \text{ Pa}$ .

Těmito výpočty byli určeny základní parametry pro návrh regulační clonky pro oksličovadlo. Těmito základními parametry je průměr otvoru clonky, který byl vypočítán jako  $d_{GOX} = 1,11 \text{ mm}$  a vstupní tlak před regulační clonkou, jehož hodnota byla stanovena na  $p_0 = 3600000 \text{ Pa}$ .

### 11.1.2 Návrhové výpočty pro regulační clonku pro IPA

Na rozdíl od plynného kyslíku je izopropylalkohol v kapalném skupenství. Z toho plyne mnoho výhod pro návrh regulační clonky. Jedná se totiž o nestlačitelnou látku. To výpočet vlastností clonky zjednodušuje. Stejně jako u clonky pro okysličovadlo, lze vycházet ze znalosti hmotnostního průtoku. Výchozí vztah je definován jako

$$\dot{m}_{IPA} = C_{d_{IPA}} \cdot \pi \cdot \frac{d_{IPA}^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_0 - p_1)}. \quad (11.7)$$

Kde  $\dot{m}_{IPA}$  je hmotnostní průtok paliva,  $C_{d_{IPA}}$  je ztrátový koeficient,  $d_{IPA}$  je průměr otvoru clonky pro palivo,  $\rho$  je hustota paliva,  $p_0$  je vstupní tlak před clonkou a  $p_1$  je výstupní tlak za clonkou [1].

U tohoto vzorce jsou určujícími faktory jak tlak vstupní  $p_0$  tak tlak výstupní  $p_1$ . Z toho vyplývá, že zde na rozdíl u výpočtu clonky pro okysličovadlo lze zvolit jak vstupní, tak výstupní tlak a není třeba výpočet ztrátového tlaku. Oba tlaky budou zvoleny tak aby odpovídaly přibližně tlakům, které jsou na regulační clonce pro okysličovadlo. Je vhodné, aby vstupní tlaky byli přibližně stejné jak na palivové části palivového systému, tak na části pro okysličovadlo, protože lze pak volit stejné, nebo velice podobné komponenty. Proto byl vstupní tlak zvolen jako  $p_0 = 3600000 \text{ Pa}$  a výstupní jako  $p_1 = 2800000 \text{ Pa}$ . V Tabulce 7 jsou popsány hodnoty vlastností isopropylalkoholu potřebné pro výpočet.

*Tabulka 7 - Vlastnosti isopropylalkoholu [1] [17] [19]*

|                     |   |        |
|---------------------|---|--------|
| Hustota             | $\rho \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$          | 786    |
| Ztrátový koeficient | $C_d \text{ [-]}$                                       | 0,61   |
| Hmotnostní průtok   | $\dot{m}_{IPA} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$ | 0,0048 |

Nyní jsou známy všechny hodnoty, které jsou potřebné k výpočtu průřezu otvoru clonky. Rovnici (11.7) lze přepsat pro získání hodnoty průřezu clonky. Dosazením hodnot vznikne rovnice

$$d_{IPA} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_{IPA}}{\pi \cdot C_{d_{IPA}} \cdot \sqrt{2 \cdot (p_0 - p_1) \cdot \rho}}} = \quad (11.8)$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0048}{\pi \cdot 0,61 \cdot \sqrt{2 \cdot (3600000 - 2800000)} \cdot 786}} = 0,000529 \text{ m} \doteq 0,53 \text{ mm} .$$

Jak již bylo řečeno, výpočet vlastností palivové regulační clonky je jednodušší v porovnání s výpočtem clonky pro oksličovadlo. Vstupní tlak pro palivovou regulační clonku byl zvolen stejný jako pro oksličovadlo a byl stanoven jako  $p_0 = 3600000 \text{ Pa}$ . Výpočtem byl také stanoven průměr otvoru clonky. Ten byl stanoven jako  $d_{IPA} = 0,53 \text{ mm}$ .

## 12 Konstrukce palivového systému

V předchozích kapitolách byli definovány důležité parametry palivového systému jako jsou například tlaky v potrubí nebo samotné rozložení tohoto systému. Tyto vlastnosti je nezbytné znát před samotným návrhem jednotlivých součástí palivového systému. Součásti jako jsou ventily budou podle těchto vlastností voleny, zatímco potrubí bude muset být pevnostně ověřeno, zda vydrží požadovaný tlak. Dále je zapotřebí určit jaké se budou používat fitinky a určit jaké se použijí nádrže.

### 12.1 Nádrže

Nádrž na izopropylalkohol bude navržena přímo pro použití na tom to zařízení. Nádrže na plynný kyslík a dusík navrhované nebudou. Namísto návrhu nádrží pro tyto dva plyny budou použity přímo tlakové lahve, ve kterých se plyny dodávají, či které se používají při svařování či řezání autogenem. Pro toto řešení je více důvodů. Jedním z nich je bezpečnost. Tlakové lahve, ve kterých jsou tyto plyny dodávány jsou navrženy s velkou bezpečností a jsou přímo určeny pro skladování těchto plynů. Dalším důvodem je to, že by se navrhované nádrže museli plnit právě z takovýchto lahví a toto plnění by mohlo být nebezpečné. Pro izopropylalkohol se žádné takové nádrže nevyrábí, a proto je zapotřebí palivovou nádrž navrhnout.

#### 12.1.1 Návrh nádrže na izopropylalkohol

Díky tomu, že palivová nádrž bude navržena přímo pro použití na tomto zařízení, lze zvolit její objem. Hmotnostní průtok paliva je  $\dot{m}_{IPA} = 0,0048 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . Doba zážehu bude nejdéle 5 sekund, protože zařízení není aktivně chlazené, a proto by se při delších zážezích mohla poškodit komora. Při jednom zážehu se tedy spotřebuje přibližně  $3,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  isopropylalkoholu. V reálné aplikaci, kdy by toto zařízení bylo součástí konstrukce rakety za předpokladu že by nádrž nebyla společná s nádrží pro motor, by byl objem palivové nádrže velice pečlivě optimalizován, neboť zbytečně velká nádrž by znamenala přebytečnou zátěž. Jelikož se ale jedná o koncepční návrh, pak lze udělat palivovou nádrž větší. Palivová nádrž bude mít objem  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Výroba menší nádrže by byla komplikovanější.

Nádrž samotná bude svařena z nerezové oceli. Bude se jednat o válcovou nádobu s eliptickými dny. Jako hlavní válcová část bude použita trubka a na tuto trubku se navaří dvě kupovaná eliptická dna. Tato nádrž bude tlakovaná dusíkem, a proto bude muset být navržena na konkrétní tlak. Tento tlak musí být dostatečné



vysoký na to, aby bylo dosaženo požadovaného vstupního tlaku k regulační clonce pro palivo. Tlak ale bude muset být o něco větší, než je hodnota vstupního tlaku, protože v palivovém systému bude docházet ke ztrátám tlaku. Tyto ztráty se ověří experimentem, neboť jejich výpočet je komplikovaný a může být nepřesný. Proto nádrž bude muset být navržena na vyšší tlak. Ztráty nebudou velké, ale přesto pro bezpečnost bude nádrž navržena na maximální přetlak  $p_0 = 5 \text{ MPa}$ . Jako konstrukční materiál nádrže byla zvolena běžná nerezová ocel 1.4307. Rozměry válcové části byli určeny podle objemu na vnitřní průměr nádrže  $d_1 = 66 \text{ mm}$  a délku  $l = 280 \text{ mm}$ .

Následující výpočty jsou provedeny podle doporučení normy ČSN 13445 pro návrh a výpočty netopných tlakových nádob. Podle normy byl určen součinitel bezpečnosti, a to podle zvoleného materiálu. Doporučený součinitel bezpečnosti je  $k = 3$ , a to pro austenitické oceli s vyšším poměrným prodloužením než  $A \geq 35 \%$  pro výpočet z meze pevnosti. Zvolený materiál má poměrné prodloužení  $A = 45 \%$  mez pevnosti  $R_m = 500 \text{ MPa}$  [20] [21]

Nejprve bylo spočteno dovolené napětí. To bylo vypočteno ze meze pevnosti a bezpečnosti v souladu s normou (ČSN 13445) podle rovnice

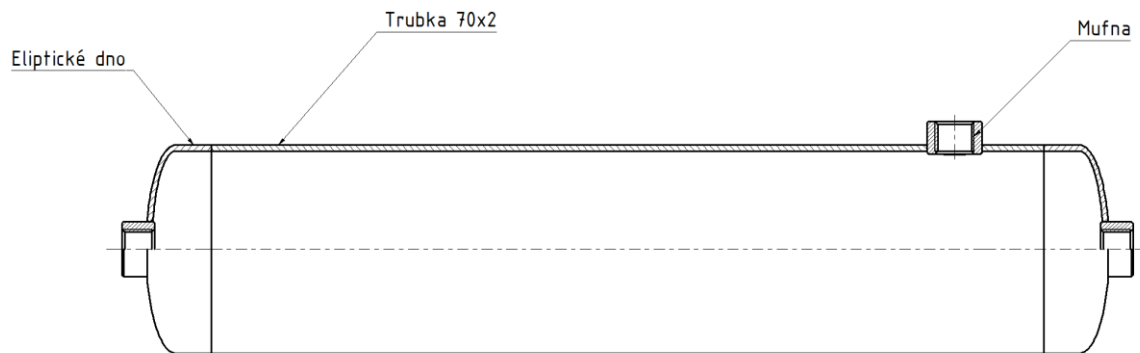
$$\sigma_D = \frac{R_m}{k} = \frac{500}{3} = 166,7 \text{ MPa.} \quad (12.1)$$

Tato a zbylé hodnoty budou následně dosazeny do vzorce pro výpočet minimální tloušťky stěny tlakové nádoby. Pro tento výpočet je potřeba znát součinitel nehomogenity svaru  $f = 0,80$ . Dosazením do vzorce vznikne rovnice

$$t_{min} = \frac{p \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_D \cdot f - p} = \frac{5 \cdot 66}{2 \cdot 166,7 \cdot 0,8 - 5} = 1,26 \text{ mm.} \quad (12.2)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že minimální tloušťka stěny nádrže je  $t_{min} = 1,26 \text{ mm}$ . Výsledná tloušťka stěny bude zvolena  $t = 2 \text{ mm}$  a to z důvodu volby vhodného polotovaru. Jako tento polotovar byla zvolena svařovaná nerezová trubka podle normy EN 10217-7 v rozměru  $\varnothing 77 \times 2$ , vyrobená z materiálu 1.4307. Do obou eliptických den budou navařeny mufny, které budou sloužit jako vstupní a výstupní otvory do nádrže. Dále bude jedna mufna navařena do stěny válcové

části nádrže a bude sloužit jako vstupní bod pro tlakovou měрку, aby bylo možné měřit tlak v nádrži. Schéma nádrže je vyobrazené na obrázku 15.



Obrázek 15 - Schéma nádrže

Dále bude ověřena pevnost navržené nádoby. Rovnici (12.2) lze přepsat pro získání napětí. Tím vznikne rovnice

$$\sigma = \frac{p \cdot (d_1 + t)}{2 \cdot t \cdot f} = \frac{5 \cdot (66 + 2)}{2 \cdot 2 \cdot 0,8} = 106,25 \text{ MPa.} \quad (12.3)$$

Jak z výpočtu vyplývá, napětí je  $\sigma = 106,25 \text{ MPa}$ . Úpravou rovnice (12.1) lze získat hodnotu celkové bezpečnosti pro přetlak v nádrži  $p_0 = 5 \text{ MPa}$ . Dosazením lze získat

$$k = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{500}{106,25} = 4,7. \quad (12.4)$$

Nyní lze vypočítat ještě maximální dovolený přetlak v nádrži, a to podle rovnice

$$p_{max} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot f \cdot t}{d_1 + 2 \cdot t} = \frac{2 \cdot 166,7 \cdot 0,8 \cdot 2}{66 + 4} = 7,62 \text{ MPa.} \quad (12.5)$$

Navržená nádrž má tedy dostatečnou rezervu pro maximální přetlak a při normálním použití má dostatečnou bezpečnost.

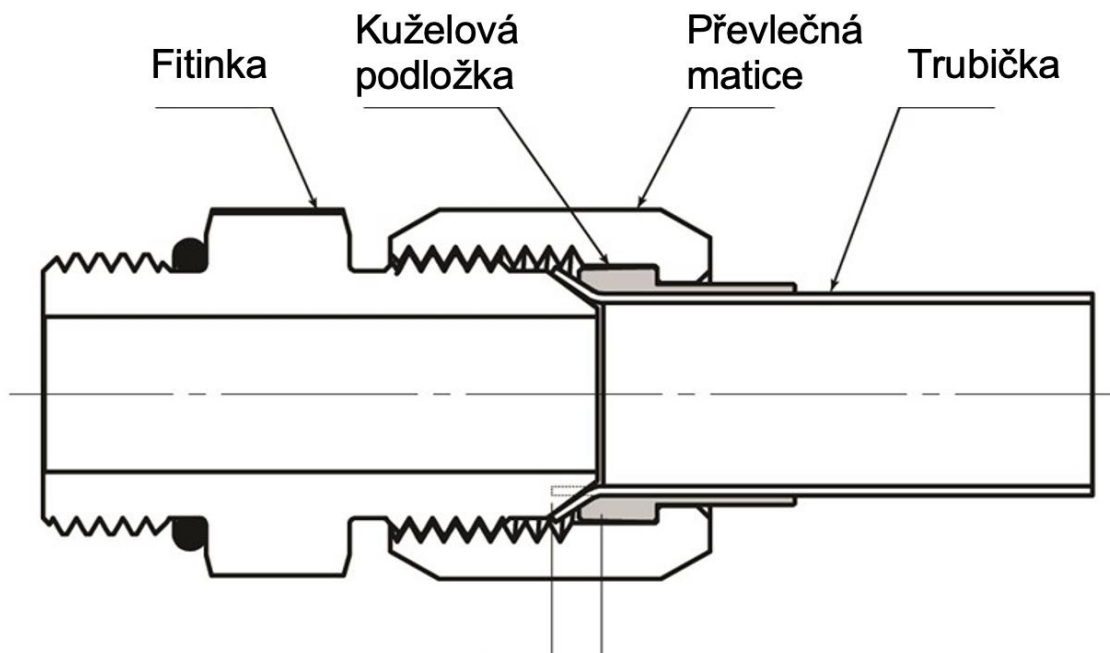
Navržená nádoba bude podle normy ČSN 13445 zkušena na zkušební přetlak, který je určen vztahem vyplývajícím z normy [21].

Ten má podobu

$$p_{zk} = 1,25 \cdot p_0 = 1,25 \cdot 5 = 6,25 \text{ MPa.} \quad (12.5)$$

## 12.2 Volba fitinek

V palivovém systému bude potřeba mnoho fitinek, které budou sloužit jednak jako rozhraní mezi potrubím a součástkami jako jsou ventily či komora, ale také v systému budou různá T šroubení, kolénka atd. Hlavním faktorem v otázce fitinek je jejich vzájemná těsnost. Existuje mnoho systémů šroubení a jejich těsnost je realizována různými způsoby. Nejtradičnější způsob těsnění je pomocí pryžových těsnění. Ten má ale uplatnění spíše u systému s nižšími přetlaky. Pro systémy s vysokými přetlaky se nejčastěji používají hydraulické fitinky SAE/ISO 37°. Tyto fitinky mají těsnění realizované pomocí kuželových dosedacích ploch. Schéma těchto fitinek lze vidět na obrázku 16.



Obrázek 16 - Schéma SAE/ISO 37° [22]

## 12.3 Volba ventilů

Palivový systém používá čtyři různé druhy ventilů. Část pro dodávku kyslíku a dusíková část mají manuální ventily pro úplné uzavření dodávky těchto plynů a dále jsou dva manuální ventily na sestavě palivové nádrže. Na tlakových lahvích

je zapotřebí regulačních ventilů, které zajistí že plyny budou v potrubí proudit pod správným tlakem. V systému se nachází pět solenoidových ventilů. Tyto ventily mají řídicí funkci. Ventily na kyslíkové a palivové části řídí, zda palivo a okysličovadlo do komory proudí, či neproudí. Další dva solenoidové ventily jsou na dusíkové části palivového systému. Ty řídí proplach komory a fungují nezávisle na sobě a je tedy možné proplachovat pouze kyslíkovou část nebo naopak pouze palivovou nebo obě najednou. Poslední solenoidový ventil je před vstupem dusíku do palivové nádrže, který bude řídit její tlakování. Správný tlak v nádrži bude řízen regulačním ventilem na dusíkové lahvi, který má na starosti zachování správného tlaku v potrubí. Poslední druh ventilu je přetlakový. Tento ventil funguje automaticky a jeho úkolem je zajistit, že přetlak v nádrži nepřesáhne maximální dovolenou hodnotu. Rozložení těchto ventilů v palivovém systému lze vidět na obrázku 11.

### **12.3.1 Manuální ventily**

Jak již bylo řečeno, tyto ventily jsou v celém palivovém systému čtyři. Dva z nich jsou na dusíkové a kyslíkové části palivového systému a zbylé dva jsou u palivové nádrže. Jelikož přijde jeden z manuálních ventilů do styku s plynným kyslíkem bude muset být velice pečlivě vyčištěn. Již bylo zvoleno, že palivový systém bude používat SAE/ISO 37° fitinky, a proto budou muset mít manuální ventily přípojovací rozměry odpovídající těmto standardům. Manuální ventil, který by bylo možné použít v navrhovaném palivovém systému je vyobrazen na obrázku 17.



*Obrázek 17 – Manuální ventil [23]*

### 12.3.2 Solenoidové ventily

Solenoidové ventily mají řídicí funkci. Dělí se obecně na dva druhy. Na normálně zavřené nebo normálně otevřené. To udává stav ventilu, když solenoidem neprochází elektrický proud. Když ventilem neprochází proud, normálně zavřený ventil je uzavřený a normálně otevřený zůstane otevřený. Solenoidové ventily pro ovládání dodávky okysličovačla a dodávky paliva musí být ventily normálně zavřené. Ventil se z bezpečnostních důvodů v případě poškození systému a výpadku řídicí elektroniky musí zavřít. Ventily pro ovládání proplachu potrubí a komory by mohly být voleny jako normálně otevřené. Argumentem pro tuto volbu by mohlo být to, že v případě výpadku řídicí elektroniky dojde k tomu, že ventily zůstanou otevřené a dusík tak vytlačí všechny nebezpečné pohonné látky z potrubí a z komory. Nevýhodou tohoto řešení by byla skutečnost, že by došlo k úplnému vypuštění dusíkové nádrže. Proto by bylo možná vhodnější volit i pro proplach ventily normálně zavřené.

Solenoidové ventily musí tedy stejně jako manuální ventily odpovídat připojovacími rozměry zvoleným fitinkám. Příklad solenoidového ventilu je zobrazen na obrázku 18.



Obrázek 18 – Solenoidový ventil [24]

### 12.3.3 Přetlakový ventil

Tento ventil má za úkol zajistit, že nádrž nepřesáhne zvolený tlak. Ventil funguje automaticky. Nádrž byla navržena na maximální pracovní přetlak  $p_0 = 5 \text{ MPa}$ . Z toho plyne že by ventil měl být navržen také na tuto hodnotu. Na obrázku 19 je vyobrazen příklad takového přetlakového ventilu.



Obrázek 19 - Přetlakový ventil [25]

### 12.4 Volba potrubí a hadic

K dodávce paliva a okysličovadla z nádrží do komory je zapotřebí potrubí, nebo hadic ve kterých pracovní látky budou vedeny. Pevné potrubí je bezpečnější a lepší volbou pro dodávku pracovních látek, které mohou být nebezpečné. Avšak jeho nevýhodou je jeho nepoddajnost. Jak již bylo řečeno, jako nádrže pro kyslík a dusík budou použity tlakové lahve, které proto nebudou přímo součástí konstrukce palivového systému. Proto bude dodávka kyslíku a dusíku mezi nádrží a následujícími komponentami realizovaná pomocí hadice. Použití hadic zajistí systému jistou flexibilitu a poloha tlakových lahví tak nemusí být striktně definovaná. Zbývající komponenty dále budou propojeny pomocí pevného potrubí.

### 12.4.1 Potrubí

Volba vnitřního průměru potrubí se odvíjí od rychlosti proudění. V případě isopropylalkoholu je zacházeno s hořlavou látkou a volba rychlosti proudění není zcela benevolentní. Doporučená maximální rychlost proudění pro hořlavé látky v potrubí je  $v = 1 \div 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [26].

Vnitřní průměr potrubí byl zvolen jako  $d_p = 4 \text{ mm}$  a to v závislosti na velikosti připojovacích rozměrů fitinek, ale je zapotřebí ověřit, zda rychlost v potrubí odpovídá doporučení. Proto bude rychlost proudění v potrubí ověřena podle následujících výpočtů. Hodnoty, které jsou potřeba k těmto výpočtům jsou uvedeny v Tabulce 7. Po dosazení vznikne

$$v_p = \frac{4 \cdot \frac{\dot{m}_{IPA}}{\rho}}{\pi \cdot d_p^2} = \frac{4 \cdot \frac{0,0048}{786}}{\pi \cdot 0,004^2} = 0,463 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (12.6)$$

Jak z výpočtu vyplývá, podmínka doporučené rychlosti proudění je splněna. Jako polotovar k výrobě potrubí jsou zvoleny hydraulické bezešvé trubky podle normy EN 10305-4 a jsou vyrobené z materiálu E235+N. Zvolené trubičky mají předepsaný maximální tlak  $p = 39,6 \text{ MPa}$ . Okolní tlak bude uvažován jako  $p_a = 0,1 \text{ MPa}$  maximální přetlak uvnitř potrubí bude  $p_p = 5 \text{ MPa}$  Pevnost trubiček lze ověřit následujícím výpočtem, ve kterém bude určeno maximální napětí trubičky  $\sigma_{red}^{\tau_{max}}$ . Z tohoto napětí bude následně vypočtená bezpečnost. Vnitřní průměr je  $r_1 = 2 \text{ mm}$  a vnější průměr je  $r_2 = 3 \text{ mm}$ . K výpočtu napětí je zapotřebí znát konstantu  $K$ , kterou lze vypočítat jako

$$K = \frac{p_p \cdot r_1^2 - p_a \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{5 \cdot 2^2 - 0,1 \cdot 3^2}{3^2 - 2^2} = 3,82 \text{ MPa}. \quad (12.7)$$

Nyní je možné určit hodnoty radiálního osového a tečného napětí

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -p_p = -5 \text{ MPa}, \\ \sigma_t &= 2 \cdot K + p_p = 2 \cdot 3,82 + 5 = 12,64 \text{ MPa}, \end{aligned} \quad (12.8)$$

$$\sigma_o = K = 3,82 \text{ MPa.}$$

Dovolené napětí je  $\sigma_D = 235 \text{ MPa}$ . Hodnoty  $\sigma_{max} = \sigma_t$  a hodnota  $\sigma_{min} = \sigma_o$  budou dosazeny do rovnice

$$\sigma_{red}^{\tau_{max}} = \sigma_{max} + \sigma_{min} = 12,64 + 3,82 = 16,46 \text{ MPa.} \quad (12.9)$$

Z těchto výpočtů je zřejmé, že napětí v potrubí nepřesáhne hodnotu dovoleného napětí. V následujícím výpočtem bude zjištěna bezpečnost podle rovnice

$$k = \frac{\sigma_d}{\sigma_{red}^{\tau_{max}}} = \frac{235}{16,46} = 14,277. \quad (12.10)$$

Jak je vidět, bezpečnost potrubí je dostatečná.

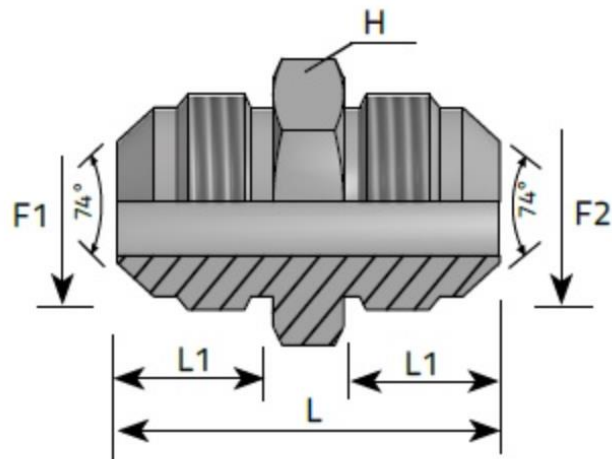
#### 12.4.2 Hadice

Hadice budou mít stejný vnitřní průměr jako trubičky. Důvodem je zachování stejné rychlosti proudění. Jelikož hadice vedoucí od tlakové lahve pro kyslík přijde do styku plynným kyslíkem, musí být z materiálu, který s kyslíkem nebude reaktivní. Tímto materiálem je teflon. Ten má ovšem špatnou pevnost, a proto se používají teflonové hadice s ocelovým opletem. Tyto hadice mají maximální pracovní přetlak až  $26,5 \text{ MPa}$ , což je více než dostačující.

#### 12.5 Konstrukce regulačních clonek

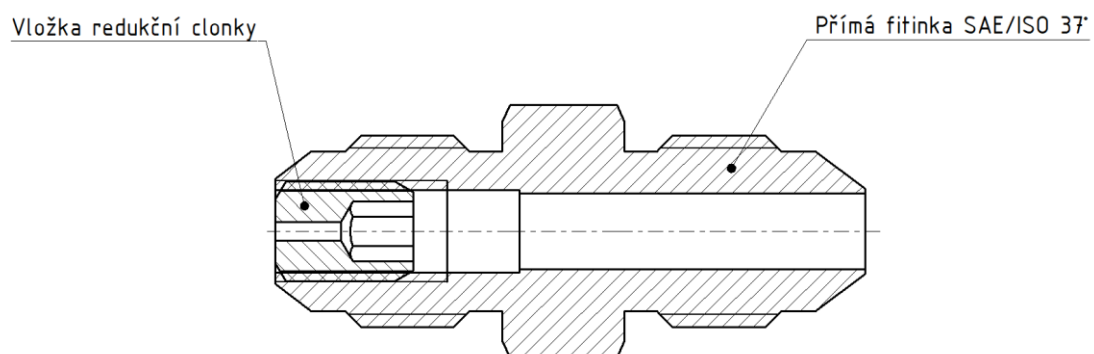
Jak již bylo řečeno, regulační clonky budou sloužit zároveň jako vstřikovač. Proto budou muset být clonky jako poslední komponenta vstupující do komory. Jako poslední komponenta palivového systému, bude přímá fitinka typu SAE/ISO 37°, která je vyobrazena na obrázku 20. To znamená že regulační clonka bude muset být zakomponovaná do této fitinky.





Obrázek 20 - Přímá fitinka typu SAE/ISO 37° [22]

Regulační clonka bude vyrobena jako samostatná vložka, která bude mít na sobě vnější závit. Fitinka v sobě bude mít vyříznutý vnitřní závit. Clonka se dále našroubuje do fitinky a ta se následně našroubuje do komory. V komoře bude vyroben závit, který bude ukončený drážkou za závitem. Na tuto drážku bude dále navazovat kuželová plocha, která bude dosedací plochou pro kuželovou plochu fitinky. Tímto bude realizováno těsnění. Schéma regulační clonky vložené do fitinky lze vidět na obrázku 21.



Obrázek 21 - Schéma konstrukce regulační clonky

## 13 Závěr

V první části této práce byla stručně popsána funkce raketového motoru a jejich základní rozdělení. Na základě vlastností těchto motorů byla objasněna funkce zážehového zařízení. Dále byla popsána existující řešení zážehových zařízení. Zařízení, která jsou určena pro motory na tuhá paliva a díky tomu jsou na jedno použití, zážehová zařízení pro hybridní motory a dále také zážehová zařízení pro kapalinové motory.

Na základě poznatků z existujících řešení byly sepsány výhody a nevýhody jednotlivých typů zařízení a na základě těchto poznatků bylo vybráno pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou.

Dále byli pro toto zařízení definovány jeho základní parametry. Jedním z těchto parametrů byli použité pracovní látky. Bylo rozhodnuto, že zážehové zařízení bude používat stejné pohonné látky jako motor, pro který je zařízení určeno. Zařízení tedy používá směs plynného kyslíku jako okysličovadla a isopropylalkohol sloužícího jako palivo. Dále byl definován jeho výkon. Na základě znalosti pohonných látek a výkonu zařízení, bylo možné určit jejich spotřebu. Byli určeny přesné hmotnostní průtoky jak pro palivo, tak pro okysličovadlo.

Dále se mohlo přistoupit ke koncepčnímu návrhu palivového systému. Bylo provedeno rozvržení palivového systému. Byl proveden popis tří částí palivového systému a to sice části pro dodávku okysličovadla, části pro dodávku paliva a následně i popis pomocné části sloužící k tlakování palivové nádrže a proplachování komory a potrubí.

Při znalosti rozvržení se mohlo přistoupit k návrhu konstrukčního řešení palivového systému. Nejprve ale bylo zapotřebí dále upřesnit vlastnosti systému. Bylo zapotřebí určit pracovní přetlaky v potrubí, které jsou závislé na funkci a konstrukci regulačních clonek řídicích hmotnostní průtoky. Proto byli navrženy regulační clonky a tím se určili i pracovní přetlaky. Následně bylo rozhodnuto, že jako nádrž pro kyslík a dusík budou použity tlakové lahve, a že nádrž na izopropylalkohol bude navržena.

Byl proveden návrh palivové nádrže. Byl určen její objem a také tvar. Nádrž byla navržena jako válcová tlaková nádoba s eliptickými dny. Byli provedeny pevnostní výpočty a také kontroly. Nádrž byla navržena s dostatečnou bezpečností.

Následně byl zvolen typ fitinek, který zajistí dostatečnou těsnost. Na základě znalosti typu fitinek byli zvoleny jednotlivé ventily. Byla provedena pevnostní kontrola potrubí. Na závěr byl proveden návrh konstrukční realizace regulačních clonek.

Konstrukce palivového systému ze zvolených a navržených součástí by byla možná, ale nebyla by použitelná pro letový exemplář. Systém není hmotnostně ani rozměrově optimalizovaný pro letové aplikace. Systém je určen pro pozemní testování.

## Seznam použité literatury

- [1] SUTTON, George P. a Oscar BIBLARZ. *Rocket Propulsion Elements*. New York: John Wiley & Sons, 2000. ISBN 0-471-32642-9.
- [2] ROSENBERG, Alois. *Raketové modelářství: stavba raket, modelů a raketoplánů*. 1. Brno: Computer Press, 2006. Hobby (Computer Press). ISBN 80-251-0684-5.
- [3] Fuse. *Britanica* [online]. 1 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/fuse-ignition-device>
- [4] Estes Rockets. In: *Estes Rocket* [online]. Estes Industries LLC, 2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://estesrockets.com/get-started/>
- [5] SON, S. F., M. A. HISKEY, D. L. NAUD, J. R. BUSSE a B. W. ASAY. *LEAD-FREE ELECTRIC MATCHES*. Los Alamos, USA, 2002. Los Alamos National Laboratory.
- [6] How were the Space Shuttle SRBs ignited?. In: *Stack Exchange* [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://space.stackexchange.com/questions/26084/how-were-the-space-shuttle-srbs-ignited-with-what>
- [7] *Space Shuttle Operations Manual* [online]. NASA, 2008 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/390651main\\_shuttle\\_crew\\_operations\\_manual.pdf](https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/390651main_shuttle_crew_operations_manual.pdf)
- [8] HUZEL, Dieter a David HUANG. *Design of Liquid Propellant Rocket engines*. Washington, D.C., USA, 1967. NASA.
- [9] NAKAGAWA, Ichiro. *Plasma Torch Igniter for Hybrid Rockets*. Kitakaname, JAPAN, 2018. Research. School of Engineering, Tokai University.
- [10] SOLLER, S., N. RACKEMANN, A. PREUSS a G. KROUPA. *APPLICATION OF LASER-IGNITION SYSTEMS IN LIQUID ROCKET ENGINES*. Mnichov, Německo. Airbus Sefran Launchers.
- [11] JONKER, Wouter A., Alfons EHJ. MAYER a Barry TC. ZANDBERGEN. *DEVELOPMENT OF A ROCKET ENGINE IGNITER USING THE CATALYTIC DECOMPOSITION OF HYDROGEN PEROXIDE*. green propellant for space propulsion, 2006. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/profile/Btc-Zandbergen/publication/228664419\\_Development\\_of\\_a\\_Rocket\\_Engine\\_Igniter\\_Using\\_the\\_Catalytic\\_Decomposition\\_of\\_Hydrogen\\_Peroxide/links/0fcfd5118f4bc7d86600000/Development-of-a-Rocket-Engine-Igniter-Using-the-Catalytic-Decomposition-of-Hydrogen-Peroxide.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Btc-Zandbergen/publication/228664419_Development_of_a_Rocket_Engine_Igniter_Using_the_Catalytic_Decomposition_of_Hydrogen_Peroxide/links/0fcfd5118f4bc7d86600000/Development-of-a-Rocket-Engine-Igniter-Using-the-Catalytic-Decomposition-of-Hydrogen-Peroxide.pdf)
- [12] RABBITTE, Sean P. a Alexander MOHS. *Investigation of Ignition Systems for an 800 lbf Thrust Bipropellant Engine*. Huntsville, Alabama, USA. University of Alabama in Huntsville.
- [13] SANCHEZ, Luis Eduardo. *Development and Testing of Oxygen/Methane Torch Igniter Technologies for Propulsion Systems* [online]. El Paso, Texas, 2016 [cit. 2022-05-12].

Dostupné z:

[https://scholarworks.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1745&context=open\\_etd](https://scholarworks.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1745&context=open_etd).  
Disertační práce. University of Texas.

- [14] REPAS, George A. *Hydrogen-Oxygen Torch Ignitor*. Cleveland, Ohio, 1994. National Aeronautic and Space Administration.
- [15] Isopropyl Alcohol. *National Library of Medicine* [online]. 2022 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Isopropyl-alcohol>
- [16]  $C_3H_8O + O_2 = CO_2 + H_2O$  - Vyvážená chemická rovnice. In: *Chemical Aid* [online]. 2008-2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation=C3H8O+%2B3O2+%3D+CO2+%2B+H2O>
- [17] *Isopropyl Alcohol* [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2021 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C67630&Type=TC#Refs>
- [18] ANDERSON, John D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 6th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 978-1-259-12991-9.
- [19] *DISCHARGE COEFFICIENT FOR NOZZLES AND ORIFICES* [online]. Neutrium, 2015 [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <https://neutrium.net/fluid-flow/discharge-coefficient-for-nozzles-and-orifices/>
- [20] *Datový list Nerezová ocel 1.4307 / AISI 304L* [online]. [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: [https://www.agst-steel.de/cs/AISI\\_304L\\_1.4307.pdf](https://www.agst-steel.de/cs/AISI_304L_1.4307.pdf)
- [21] ČSN EN 13445-3 *Netopené tlakové nádoby - Část 3: Konstrukce a výpočet*. 2010.
- [22] *STEEL 37 FLARE (JIC) FITTINGS* [online]. World Wide Fittings [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.worldwidefittings.com/en/support/steel-37-flare-jic-fittings/>
- [23] *Ball valve* [online]. Glacier Tanks LLC [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.glaciertanks.com/ball-fn6-mj6.html>
- [24] *Solenoid Valve* [online]. Tameson [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: [https://tameson.com/valves/solenoid-valve/2-way/stainless-steel/hp-da014s010p-012dc-solenoid-valve-2way-014inch-stainless-steel-0p0-75bar-ptfe.html?id\\_currency=1&gclid=Cj0KCQjwnNyUBhCZARIsAI9AYIEEWXxQXG76\\_51ZSgKW2KVFrCTnV0oHKfZA3B3\\_WSeUGfa88XI4D\\_EaArwzE](https://tameson.com/valves/solenoid-valve/2-way/stainless-steel/hp-da014s010p-012dc-solenoid-valve-2way-014inch-stainless-steel-0p0-75bar-ptfe.html?id_currency=1&gclid=Cj0KCQjwnNyUBhCZARIsAI9AYIEEWXxQXG76_51ZSgKW2KVFrCTnV0oHKfZA3B3_WSeUGfa88XI4D_EaArwzE)
- [25] *Safety Valve* [online]. PneuParts [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.pneuparts.com/en/item/TSVPSS14850MS>
- [26] *Recommended Flow Velocities for Different Fluids in Pipe Lines* [online]. Mondī Štětí a.s., 2018 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi5y6jItlz4AhUPyaQKHbtTAsQQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fbozp.mondisteti>



cz%2Fwww%2Fhomepage%2Fdownload%2F182&usg=AOvVaw0XISjd\_mOxl7wW5a-  
8Fgnq

## Seznam použitých obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 – Hořící zápalnice [3] .....  | 16 |
| Obrázek 2 - Schéma elektrického palníku [5] .....   | 17 |
| Obrázek 3 – Pojistné zařízení [6] .....   | 18 |
| Obrázek 4 – Zážehové zařízení pro urychlovací motor na tuhá paliva raketoplánu [6] .....                  | 19 |
| Obrázek 5 – Plasmové zážehové zařízení [9] .....  | 21 |
| Obrázek 6 – Laserové zážehové zařízení [10] .....   | 22 |
| Obrázek 7 - Ionizace nosného plynu v ohnisku laseru [10] .....  | 23 |
| Obrázek 8 - Součásti zapalovače využívající katalytický rozklad peroxidu vodíku [11] .....                | 25 |
| Obrázek 9 - Pochodňové zážehové zařízení se zapalovací svíčkou [14] .....                                 | 30 |
| Obrázek 10 – Příklad uspořádání palivového systém pro zážehové zařízení na GOX/CH <sub>4</sub> [13] ..... | 42 |
| Obrázek 11 - Návrh uspořádání palivového systému .....  | 43 |
| Obrázek 12 - Větev okysličovadla .....  | 44 |
| Obrázek 13 - Část palivového systému pro dodávku paliva .....   | 45 |
| Obrázek 14 - Dusíková část palivového systém .....  | 47 |
| Obrázek 15 - Schéma nádrže .....  | 56 |
| Obrázek 16 - Schéma SAE/ISO 37° [22] .....  | 57 |
| Obrázek 17 – Manuální ventil [23] .....   | 58 |
| Obrázek 18 – Solenoidový ventil [24] .....  | 59 |
| Obrázek 19 - Přetlakový ventil [25] .....   | 60 |
| Obrázek 20 - Přímá fitinka typu SAE/ISO 37° [22] .....  | 63 |
| Obrázek 21 - Schéma konstrukce regulační clonky .....   | 63 |

## Seznam použitých tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 - Porovnání zážehových zařízení .....                                 | 33 |
| Tabulka 2 - Fyzikální vlastnosti Isopropylalkoholu.....                         | 34 |
| Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti kyslíku.....                                   | 35 |
| Tabulka 4 - Požadavky na palivový systém .....                                  | 41 |
| Tabulka 5 - Vlastnosti plynného kyslíku pro výpočet průřezu otvoru clonky ..... | 49 |
| Tabulka 6 - Výsledky iteračních výpočtů.....                                    | 50 |
| Tabulka 7 - Vlastnosti isopropylalkoholu [1] [17] [19].....                     | 52 |





## Seznam použitých grafů

|  |    |
|--|----|
| Graf 1 - Závislost termodynamické teploty na směšovacím poměru ..... | 37 |
|--|----|



## Seznam použitých programů

1. NASA Chemical Equilibrium Application (NASA CEA)
2. Autodesk Inventor
3. Python v Visual Studio Code