

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Demonstrátor vstřikovače raketového motoru**

2019

DANIEL SATKE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Satke** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **409153**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**  
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Demonstrátor vstřikovače raketového motoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Demonstrator of rocket engine injector**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování práce proveďte:

Navrhněte demonstrátor vstřikovače raketového motoru na kapalné pohonné hmoty.

Demonstrátor bude pracovat s vodou o průtoku  $>0,1$  l/s.

Proveďte optimalizaci konstrukčního návrhu s ohledem na tlakové ztráty v injektoru a na možnosti výroby demonstrátoru.

Seznam doporučené literatury:

G.P. Sutton, O. Biblarz: Rocket propulsion elements, 8th ed., Wiley, 2010, ISBN 978-0-470-08024-5

D.K. Huzel, D.H. Huang, Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines, AIAA, 199, ISBN 1-5634-013-6

+ další literatura dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

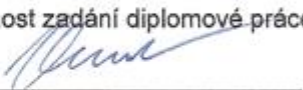
**Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**


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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce:

  
Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

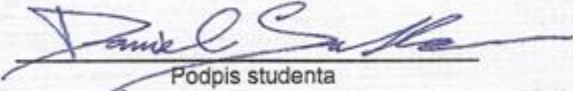
  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**29.4.2019**


Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou (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 28.7.2019

  
.....  
podpis

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Mgr. Jaroslavu Kousalovi, Ph.D. za její vedení, Bc. Ondřeji Plajdičkovi za výrobu součástí sestavy demonstrátoru vstřikovače a Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D. za 3D tisk čela vstřikovače.



## Obsah

1. Úvod .....	1
1.1. Druhy vstřikovačů.....	2
1.1.1. Vstřikovače typu proudového paprsku .....	2
1.1.2. Vstřikovače typu proudové stěny .....	5
1.1.3. Vstřikovače jednosložkových motorů .....	9
1.2. Přívodní kanálky .....	9
1.2.1. Konkrétní řešení přívodních kanálků .....	11
1.3. Fyzikální charakteristiky vstřikovače .....	13
1.3.1. Proudové charakteristiky .....	13
1.3.2. Stabilita spalování.....	16
1.4. Ověření návrhu vstřikovače .....	17
1.4.1. Modely a simulace .....	17
1.4.2. Testy za studena .....	18
1.4.3. Testy za tepla.....	19
1.5. Konkrétní použití vstřikovačů v různých typech raketových motorů .....	20
2. Obecné věci o návrhu demonstrátoru .....	23
2.1. Základní požadavky .....	23
2.1.1. Detaily čerpadla/pumpy, tlakové charakteristiky.....	23
2.2. Možnosti výroby.....	24
2.3. Principy a omezení návrhu.....	25
2.3.1. Určení základních parametrů.....	25
3. Návrh vstřikovacích prvků a jejich uspořádání .....	27
3.1. Výpočty .....	27
3.1.1. Hmotnostní toky.....	27
3.1.2. Průměry otvorů .....	27
3.1.3. Úhly.....	29
3.2. Možná řešení uspořádání .....	30
3.3. Analýza chování vstřikovacích vzorců pomocí CFD simulace .....	32
3.3.1. Jeden vstřikovací pár .....	33
3.3.2. Dva vstřikovací páry.....	34
3.3.3. Tři vstřikovací páry .....	35

3.3.4. Vyšší kombinace vstřikovacích párů.....	35
3.4. Vybrané řešení a jeho optimalizace.....	40
4. Návrh přívodních kanálků.....	43
4.1. Možnosti návrhu kanálků .....	43
4.2. Výpočty průřezů a rozměrů kanálků.....	44
4.2.1. Kanálky paliva .....	45
4.2.2. Kanálky okysličovačla .....	46
4.3. Obecný návrh tvaru .....	46
4.4. Optimalizace tlakových ztrát .....	47
4.4.1. Kanálky okysličovačla .....	47
4.4.2. Kanálky paliva .....	53
4.5. Vybraná varianta .....	53
5. Sestava vstřikovače.....	59
5.1. Výroba .....	60
6. Další součásti demonstrátoru .....	63
6.1. Hlavní součásti.....	63
6.2. Vedlejší součásti.....	64
7. Opakované úkony při provádění demonstrací .....	66
8. Experimentální data.....	67
8.1. Tlakové ztráty .....	67
8.2. Vizualní pozorování .....	69
8.2.1. Nedokonalosti proudových paprsků a jejich srážení.....	69
8.2.2. Úroveň atomizace .....	72
9. Zjištěné nedostatky a náměty k vylepšení.....	74
10. Závěr.....	75
11. Přílohy.....	76
12. Přehled použité literatury .....	77

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Dubletový vstřikovací prvek, schematické znázornění rozpadu vějíře na kapičky [3]

Obrázek 2: Znázornění tvaru kužele kapiček a rozložení hmotnostních průtoků dubletového vstřikovacího prvku při použití různých druhů proudů. V tomto případě je výsledný směr hybnosti v ose spalovací komory, tedy proud paliva a okysličovadla má před srážkou stejnou hybnost, pokud by tomu tak nebylo, tak by osa kužele byla nakloněna na jednu ze stran, více viz rovnice 7 a obrázek 14. [4]

Obrázek 3: Různé přístupy návrhu dírového typu vstřikovače, tři první nákresy protínajících se proudů znázorňují nejběžněji užívané koncepce [1] [37]

Obrázek 4: Zjednodušené průřezy vstřikovačů typu kuželové proudové stěny [37]

Obrázek 5: Regulovatelný trnový („pintle“) vstřikovač použitý na taktických balistických raketách MGM-52 Lance [2]

Obrázek 6: Schematický náčrt vstřikovače využívajícího úzké dlouhé štěrbinu [2]

Obrázek 7: Princip fungování vírového vstřikování [8]

Obrázek 8: Typická spalovací komora jednosložkového motoru na hydrazin, jsou zobrazeny čtyři různé metody vstřikování paliva do katalyzátorového lože [1]

Obrázek 9: Řez vstřikovačem motoru F-1 na směs tekutého paliva a okysličovadla. Šipkami je znázorněn tok okysličovadla - dómem okysličovadla a čelem vstřikovače (axiálními dírami do soustředných kruhových kanálků se vstřikovacími otvory). Na krajích a ve vnitřní části jsou díry na šrouby spojující vnější a vnitřní část dómu. [9]

Obrázek 10: Vstřikovač stejného typu jako na obrázku 9, zobrazen bez dómu okysličovadla. V řezu jsou znázorněny radiální přívody paliva. [2]

Obrázek 11: Vstřikovač s koaxiálními vstřikovacími prvky pro kombinaci plynného paliva a kapalného okysličovadla. Zobrazen vstřikovač motoru J-2. V ose vstřikovače je dutina na zažehovací prvek ASI (Augmented spark igniter). [2]

Obrázek 12: Řez vstřikovačem menšího motorku [2]

Obrázek 13: Schéma vstřikovače s kapilárními přívodními trubičkami [2]

Obrázek 14: Vztah úhlů u dubletového/párového podtypu paprskového proudového vstřikovacího prvku [1]

Obrázek 15: Schéma vstřikovače s přepážkami rozdělujícími vstřikovací čelo na sedm segmentů [2]

Obrázek 16: Čerpadlo „Alfapumpy 3,5SEm3/18“

Obrázek 17: 1 dublet - nejjednodušší možné řešení (pohledu shora a z boku)

Obrázek 18: 2 dublety - interakce vzniklých vějířů je zajištěna jejich sklonem (pohled shora a z boku)

Obrázek 19: 2 dublety - kolmé uspořádání (pohled shora)

Obrázek 20: 3 dublety - uspořádání do rovnostranného trojúhelníku (pohled shora)

Obrázek 21: 3 dublety - kolmé uspořádání (pohled shora)

Obrázek 22: 4 dublety - uspořádání do čtverce, varianta 1 (pohled shora)

Obrázek 23: 4 dublety - uspořádání do čtverce, varianta 2 (pohled shora)

Obrázek 24: 5 dubletů - uspořádání do pravidelného pětiúhelníku (pohled shora)

Obrázek 25: 5 dubletů - uspořádání do čtverce s centrálním dubletem (pohled shora)

Obrázek 26: 6 dubletů - uspořádání do pravidelného šestiúhelníku (pohled shora)

Obrázek 27: 6 dubletů - uspořádání do čtverce s dvěma centrálními prvky (pohled shora)

Obrázek 28: 8 dubletů - uspořádání do dvou čtverců uvnitř sebe (pohled shora)

Obrázek 29: 8 dubletů - uspořádání do pravidelného pětiúhelníku s vnitřním rovnostranným trojúhelníkem (pohled shora)

Obrázek 30: 9 dubletů - uspořádání do pravidelného šestiúhelníku s vnitřním rovnostranným trojúhelníkem (pohled shora)

Obrázek 31: 10 dubletů - uspořádání do dvou pravidelných pětiúhelníků uvnitř sebe (pohled shora)

Obrázek 32: Porovnání variant jednoho dubletového vstřikovacího prvku (izometrický pohled) (#1, #2, #3, #4)

Obrázek 33: Porovnání variant dvou párů dubletových vstřikovacích prvků (izometrický pohled) (#5, #6)

Obrázek 34: Tři páry dubletových vstřikovacích prvků uspořádané do rovnostranného trojúhelníka (izometrický pohled) (#7)

Obrázek 35: Porovnání variant vyšších párů dubletových vstřikovacích prvků (izometrický pohled). Zleva 4+2 uvnitř, 4 + 4 uvnitř, 5 + 5 uvnitř, 10 + 5 uvnitř (#8, #9, #10, #11)

Obrázek 36: Porovnání variant jednoho dubletového vstřikovacího prvku (pohledy z boků a shora) (#1, #2, #3)

Obrázek 37: Porovnání jednoho dubletu s dvěma dubletovými vstřikovacími prvky (pohledy z boků a shora) (#4, #5, #6)

Obrázek 38: Porovnání tří, šesti (4+2 uvnitř) a osmi (4+4 uvnitř) dubletových vstřikovacích prvků (pohledy z boků a shora) (#7, #8, #9)

Obrázek 39: Porovnání deseti (5+5 uvnitř) a patnácti (10+5 uvnitř) dubletových vstřikovacích prvků (pohledy z boků a shora) (#10, #11)

Obrázek 40: Náčrt ploch a poloměrů

Obrázek 41: Porovnání vstřikování s palivy a s vodou (izometrický pohled)

Obrázek 42: Porovnání vstřikování s palivy a s vodou (pohledy z boků a shora)

Obrázek 43: Znázornění pozic vstupů (tj. pohled ze strany kanálek) do jednotlivých vstřikovacích otvorů. Modře vstupy pro okysličovadlo, červeně pro palivo.

Obrázek 44: Schéma propojení vstřikovacích otvorů systémem drážek

Obrázek 45: Schéma propojení vstřikovacích otvorů systémem vrtů

Obrázek 46: Označení sekcí kanálek rozdílných průřezů

Obrázek 47: Obecný návrh tvaru přívodních kanálek

Obrázek 48: Zobrazení kontrolních průřezů v kanálcích okysličovadla pro případ W1. (Síť slouží pouze k ilustraci a neodpovídá skutečně použité síti.)

Obrázek 49: Rozložení rychlostí v kanálcích okysličovadla, případ W1 (izometrický pohled)

Obrázek 50: Rozložení rychlostí v kanálcích okysličovadla, případ W1 (pohled z boku)

Obrázek 51: Zobrazení proudnic s vybarvením rychlostí v kanálcích okysličovadla, případ W1 (pohled shora)

Obrázek 52: Rozložení rychlostí v kanálcích okysličovadla, případ W2 (nahore) a W3 (dole) (izometrický pohled)

Obrázek 53: Zobrazení kontrolních průřezů v kanálcích paliva pro případ Q1. (Síť slouží pouze k ilustraci a neodpovídá skutečně použité síti.)

Obrázek 54: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (izometrický pohled)

Obrázek 55: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (pohled 2)

Obrázek 56: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (pohled shora)

Obrázek 57: Zobrazení proudnic s vybarvením rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (pohled shora)

Obrázek 58: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q2 (nahore) a Q3 (dole) (pohled shora)

Obrázek 59: Sestava vstřikovače při výrobě z duralu

Obrázek 60: Detail kanálek

Obrázek 61: Rozložený pohled sestavy vstřikovače při výrobě z plastu 3D tiskem

Obrázek 62: Detail kanálek 3D tisku čela vstřikovače

Obrázek 63: Detail kanálek 3D tisku čela vstřikovače

Obrázek 64: Sestava vstřikovače (pohled shora)

Obrázek 65: Sestava vstřikovače (pohled zespodu)

Obrázek 66: Diagram zapojení, regulace a měření přívodů tlakované vody do vstřikovače

Obrázek 67: Detail regulačních a měřících zařízení

Obrázek 68: Fotka všech součástí demonstrátoru

Obrázek 69: Detail přívodu vody z řadu a zpětné větve do nádrže ve které je ponořeno čerpadlo

Obrázek 70: Vstřikovací otvory větve paliva při  $pp = 1 \text{ bar}$  a  $mp = 0,166 \text{ kgs}$  (pohled ze strany přítoku)

Obrázek 71: Vstřikovací otvory větve paliva při  $pp = 2 \text{ bar}$  a  $mp = 0,246 \text{ kgs}$  (pohled z druhé strany přítoku)

Obrázek 72: Vstřikovací otvory větve okysličovadla při  $po = 1 \text{ bar}$  a  $mo = 0,257 \text{ kgs}$  (pohled ze strany přítoku)

Obrázek 73: Vstřikovací otvory větve okysličovadla při  $po = 1,8 \text{ bar}$  a  $mo = 0,336 \text{ kgs}$  (pohled z druhé strany přítoku)

Obrázek 74: Vstřikování při tlaku  $0,5 \text{ bar}$  v obou větvích

Obrázek 75: Pohled z boku na kužel kapiček při  $2,5 \text{ bar}$  v obou větvích a průtocích  $mp = 0,292 \text{ kgs}$  a  $mo = 0,404 \text{ kgs}$

Obrázek 76: Pohled z boku na kužel kapiček při  $4 \text{ bar}$  v obou větvích a průtocích  $mp = 0,336 \text{ kgs}$  a  $mo = 0,479 \text{ kgs}$

## **Seznam tabulek**

- Tabulka 1: Bezrozměrné výtokové koeficienty  $C_d$  pro různé tvary výstupních otvorů [1]  
Tabulka 2: První část přehledu dvousložkových raketových motorů [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34]  
Tabulka 3: Druhá část přehledu dvousložkových raketových motorů [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34]  
Tabulka 4: Shmutí parametrů pohonné směsi [35]  
Tabulka 5: Přehled možných kombinací velikostí děr spolu s odpovídajícími směšovacími poměry a celkovými hmotnostními toky  
Tabulka 6: Úhly vstřikování  
Tabulka 7: Přehled použitých geometrických parametrů v jednotlivých simulacích  
Tabulka 8: Srovnání tlakových ztrát v jednotlivých verzích kanálků oksličovadla  
Tabulka 9: Srovnání tlakových ztrát v jednotlivých verzích kanálků paliva  
Tabulka 10: Přehled při testech změřených tlaků a průtoků

## **Seznam grafů**

- Graf 1: Výkonový diagram čerpadla „Alfapumpy 3,5SEm3/18“  
Graf 2: Závislost hmotnostního průtoku na tlaku v jednotlivých větvích kanálků

## **Seznam použitých programů**

- Microsoft Office Word  
Microsoft Office Excel  
SolidWorks 2017  
Ansys 19.2  
GIMP 2.10.8

## **Anotace**

Předmětem této diplomové práce je podrobně rozebrat všechny běžně používané koncepce vstřikovačů raketových motorů a vybrat tu, která se nejlépe hodí pro demonstrátor vstřikovače pracující s vodou za poměrně nízkých tlaků do 700 kPa. Vybraný dubletový vstřikovací prvek, kde se sráží přímo palivo s okysličovadlem, je dále analyzován spolu s různými počty a vzory uspořádání vstřikovacích prvků. Pro vybraný vzorec jedenácti prvků jsou poté navrženy přívodní kanálky, zvláště pro palivo a okysličovadlo. Pomocí CFD jsou optimalizovány tlakové ztráty v těchto přívodních kanálkách. Navržený demonstrátor vstřikovače raketového motoru je nakonec vyroben a úspěšně otestován za různých podmínek.

## **Klíčová slova**

Demonstrátor vstřikovače raketového motoru pro testy za studena, Analýza vzorce uspořádání dubletového vstřikovacího prvku, Návrh přívodních kanálků a optimalizace tlakových ztrát

## **Abstract**

Aim of this master thesis is to extensively analyze all common rocket engine injector designs and choose the one which can be relatively easily tested with water, i.e. used for cold testing, under relatively low pressures of up to 700 kPa. Chosen unlike doublet impinging element is further analyzed alongside various numbers and patterns of elements. For selected pattern of eleven elements are then designed inlet manifolds, separate for fuel and oxidizer. Optimization of pressure losses in these manifolds is addressed in detail using CFD. Designed demonstrator of rocket engine injector is eventually manufactured and successfully tested under diverse conditions.

## **Key words**

Rocket engine injector demonstrator for cold testing, Unlike doublet impinging element pattern analysis, Manifolds design and pressure loss optimization



## 1. Úvod

Vstřikovače raketových motorů na kapalná paliva slouží primárně k vstřikování paliva (a okysličovadla) do spalovací komory [1] či plynového generátoru pohánějícího turbínu turbočerpadel (tato funkce není v této práci dále rozebírána). [2] Jsou nedílnou a důležitou součástí motoru velice významně ovlivňující jeho účinnost a bezproblémový chod. Zajišťují především:

- 1) optimální hmotnostní přítok paliva (a okysličovadla) do spalovací komory [1] [2]
- 2) v případě dvousložkových kapalinových motorů optimální směšovací poměr a co nejlepší promísení reaktantů [1] [2]
- 3) atomizaci<sup>1</sup> paliva (a okysličovadla) pro co nejvyšší účinnost reakce [1] [2]
- 4) strukturální uzavření spalovací komory na její horní straně [1] [2]
- 5) přenos zatížení do zbytku konstrukce (u motorů s vektorováním tahu) [1]

Jejich vhodným návrhem, převážně u velkých raketových motorů, je ale lze využít i k:

- 6) okamžité regulaci tahu motoru [1] [2]
- 7) vyšší stabilitě reakce – například tvorbou akustických dutin [1] [2]
- 8) snížení výměny tepla s vnitřním pláštěm spalovací komory [1] [2]

Na začátku vývoje stojí požadavky zohledňující konkrétní použití, velikost motoru, palivovou směs a definují se priority, kterými mohou být nízká hmotnost, spolehlivost, vysoký výkon, nízká cena, malá velikost, rychlost odezvy či třeba znovupoužitelnost. [2] Jelikož neexistuje komplexní teorie objasňující celkový vliv všech parametrů vstřikovače na výkon a chod raketového motoru, je vývoj vstřikovače z větší části založen na experimentech a zkušenostech s vývojem podobných typů pro daný účel. [1] Přičemž jsou zohledněny a řešeny předešlé nedostatky. [2]

Jedním z hlavních faktorů návrhu je konkrétní typ paliva a okysličovadla, který určuje chemickou reaktivitu, rychlost vypařování, teplotu vznícení, povrchové napětí atd. Hypergolická směs bude vyžadovat jiný vstřikovač než směs, která musí být zažehnuta či jednosložkové palivo, které využívá katalytického rozkladu. Dalším faktorem je geometrie vstřikovacích prvků na čele vstřikovače – velikosti a plošná hustota otvorů, úhly, pod kterými dochází ke srážení jednotlivých proudů, vzdálenost srážky proudů od čela vstřikovače, hmotnostní tok jedním vstřikovacím otvorem a rozmístění vstřikovacích prvků po čele vstřikovače. Speciální opatření bude vyžadovat vstřikovač u motoru, jehož mise bude zahrnovat jeho mnohačetné zhasnutí a zažehnutí. V závislosti na konkrétní misi budou jiné požadavky kladeny na možnost přesně a spolehlivě určit celkový tah – u některých misí to může být životně důležité pro jejich splnění. V neposlední řadě pak do návrhu vstupují materiálové vlastnosti vstřikovače, kdy je vystaven vysokým tlakům a široké škále teplot – od studených kryogenních paliv až po horké spaliny ve spalovací komoře. Je proto zapotřebí myslet i na možná pnutí či tepelnou roztažnost materiálu. [1]

Každé procento ztrát na účinnosti vstřikovače se projeví na nižším celkovém specifickém impulsu. Některé v poslední době vyvinuté vstřikovače dosahují hodnot účinností spalování blízkých 100 % (např. SSME<sup>2</sup> má tuto účinnost 99,7 %), tak vysokých hodnot je dosaženo

<sup>1</sup> roztříštění proudu na mikroskopické kapičky

<sup>2</sup> Space Shuttle main engine

rovnoměrným rozložením reaktantů a jejich dokonalou atomizací ve spalovací komoře. Důležité je to zejména pro výkonné motory spalující velká množství paliva a okysličovadla. Naopak u motorků používaných například pro řízení polohy mohou být plně uspokojující účinnosti i kolem 90 %. U nich jsou prioritou jiné parametry, jako přesná a předvídatelná velikost tahu a nízká hmotnost. [2]

### 1.1. Druhy vstřikovačů

Požadavky zmíněné v kapitole 1 se promítly do mnoha různých návrhů vstřikovačů, které však lze v případě vstřikovačů pro dvousložkové směsi rozdělit do dvou základních skupin podle tvaru proudů vstřikovacích prvků – paprskové a stěnové. [1] Či do třech skupin podle typu srážky proudů paliva a okysličovadla ze vstřikovacích prvků – neprotínající se, protínající se stejným typem a protínající se palivo s okysličovadlem. Jednotlivé vstřikovací prvky jsou uspořádány na čele vstřikovače do určitého vzorce, tak aby se maximalizovala účinnost spalování. [2]

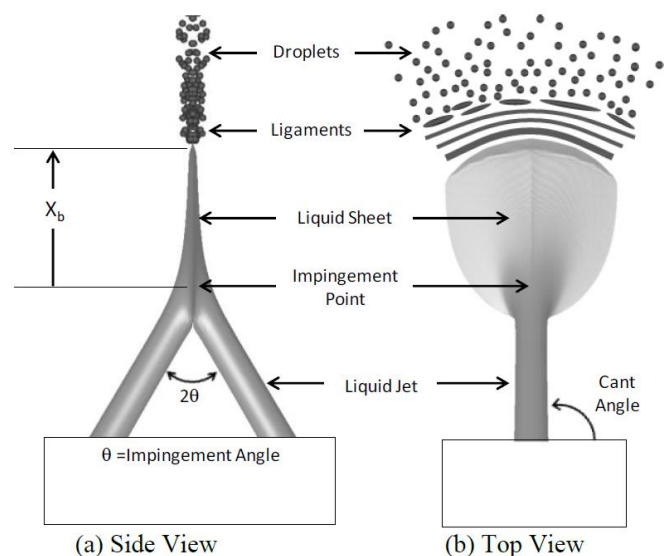
Starší skupina (dělení podle tvaru proudů) využívá jako vstřikovací prvek díry umístěné na čele vstřikovače – palivo a okysličovadlo při vstřikování nejdříve utváří proudový paprsek, poté dochází k jeho atomizaci, ať již zásahem jiného proudového paprsku (paliva či okysličovadla), samotné konstrukce spalovací komory či díky proudění v ní. [1] Různé přístupy návrhu těchto vstřikových prvků jsou znázorněny na obrázku 3.

Druhou skupinou jsou vstřikovače, které namísto proudových paprsků tvoří kuželové (případně válcové) proudové stěny. Toho je docíleno upevněním (připájením nebo přivařením) většinou válcových prvků do čela vstřikovače. [1] Obrázek 4 vyobrazuje zjednodušené průřezy několika běžných typů tohoto druhu vstřikovačů.

Existují i typy kombinující oba dva základní přístupy. [1]

#### 1.1.1. Vstřikovače typu proudového paprsku

Nejběžněji používané jsou dubletové/párové protínající se proudy. Rozdělují se na dva podtypy. V prvním se sráží přímo palivo s okysličovadlem, k plné reakci však v tomto případě nedochází okamžitě, ale podobně jako u srážení se se stejným proudem až poté co se palivo a okysličovadlo rozptýlí v komoře. Při srážce dvou paprsků nejprve dochází k tvorbě malého vějíře, který se rozpadá do kužele plného mikroskopických kapiček a následně reaguje ve spalovací komoře. Tento jev je znázorněn na obrázcích 1 a 2. [1] [2] [3] [4]

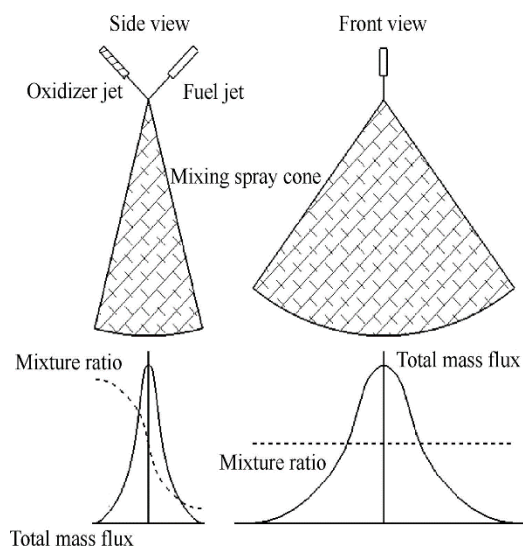


Obrázek 1: Dubletový vstřikovací prvek, schematické znázornění rozpadu vějíře na kapičky [3]

V druhém podtypu se sráží stejné proudové paprsky, tzn. palivo s palivem nebo oksylichovadlo s oksylichovadlem. Po střetu nedochází k míšení reaktantů v rámci vějíře, ale jen k rozpadu na drobné kapičky a atomizaci. Ke smíchání a reakci dochází až při druhotném střetu různých atomizovaných vějířů mezi sebou. Orientace a zajištění interakce mezi těmito vějíři je tedy klíčem k efektivnímu fungování tohoto podtypu. [1] [2] [3] [4]

Z obrázku 2 je patrné, že celkové i jednotlivé hmotnostní toky se uvnitř kužele výrazně odlišují a v zásadě tvoří dvoudimenzionální sprej. Šířka kužele při pohledu z boku je dána především úhlem, který svírají oba srážející se paprsky a turbulencemi ve spalovací komoře. Dalšími faktory, které ovlivňují tvar výsledného vějíře a kužele, a tedy promíchání reaktantů jsou nedokonalosti výroby (odlišné průměry proudů a neprotínající se osy proudů) a v některých případech fakt, že ke spalování začne docházet již během rané fáze po srážce proudů. To se děje při srážení přímo proudů paliva a oksylichovadla u velice reaktivních hypergolických směsí, jež mají velice krátké doby zážehu. Mezi reaktanty začnou ještě před dokončením hydrodynamické srážky vznikat spaliny tlačící oba reaktanty od sebe, čímž je zabráněno jejich dobrému smíchání. Bylo zjištěno, že při vysokých tlacích ve spalovací komoře i některá paliva, která za normálních podmínek hypergolická nejsou, vykazují totožné chování, jako např. směs tekutého kyslíku a petroleje (RP-1).

Řešením je použití dubletových vstřikovacích prvků, kde se sráží stejné proudy paprsků. Ačkoliv má tento přístup za následek horší smíchování, správným návrhem druhotných střetů lze dosáhnout vysokých účinností spalování a výrazně lepší stability hoření. [1] [2] [3] [4]



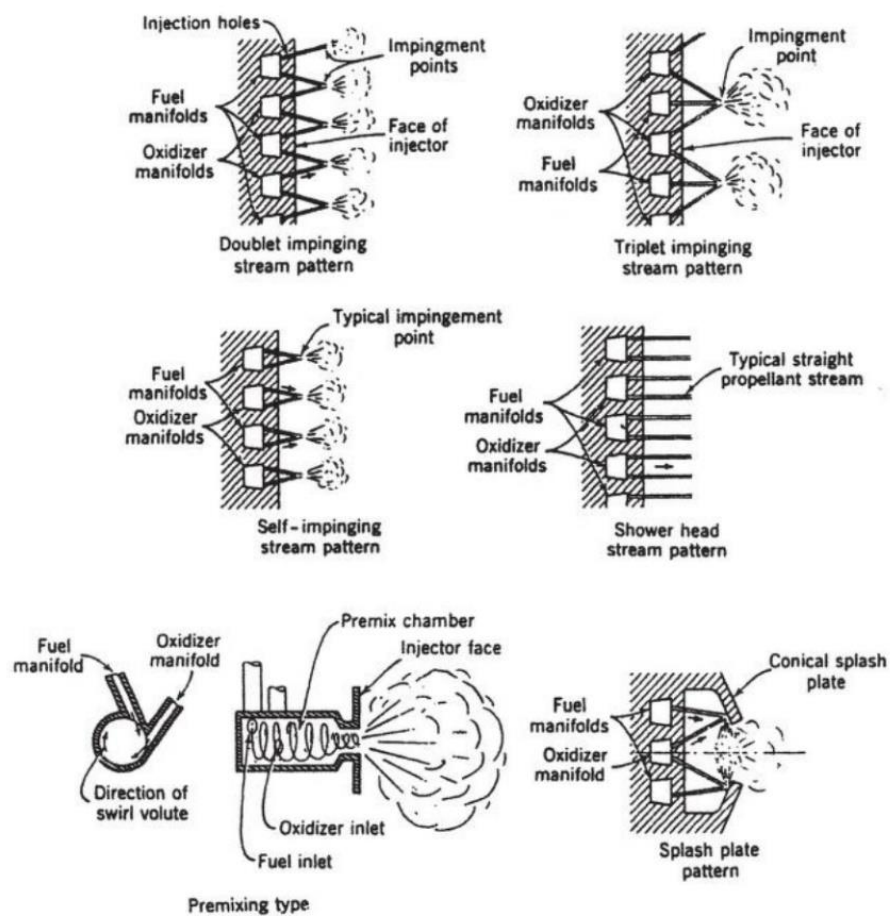
Obrázek 2: Znáornění tvaru kužele kapiček a rozložení hmotnostních průtoků dubletového vstřikovacího prku při použití různých druhů proudů. V tomto případě je výsledný směr hybnosti v ose spalovací komory, tedy proud paliva a oksylichovadla má před srážkou stejnou hybnost, pokud by tomu tak nebylo, tak by osa kužele byla nakloněna na jednu ze stran, více viz rovnice 7 a obrázek 14. [4]

Dubletový vstřikovací prvek nelze z důvodu výrazné deformace výsledného axiálního kužele, a tedy horšímu promíchání použít pro proudy odlišných průměrů či pokud jsou jejich hybnosti výrazně odlišné. Řešením je symetrická trojice protínajících se proudů, kdy prostřední proud směřuje v axiálním směru spalovací komory a zbylé dva se s ním symetricky srážejí ve stejném bodě z opačných stran. Je možná kombinace, kdy centrální proudový paprsek tvoří palivo a postranní paprsky oksylichovadlo, tak i opačná. Ve většině kombinací pohonných směsí je vyšší průtok oksylichovadla, a proto se jako centrální paprsek zpravidla používá palivo, to má ale za následek risk vzniku oblastí bohatých na oksylichovadlo u zdi komory. Vějíř a následný kužel kapiček je pro trojitý vstřikovací prvek užší než pro ekvivalentní dubletový a tím pádem je i hmota více koncentrována. Tyto prvky dosahují dobrého smíchání a tím pádem vysoké účinnosti spalování, jejich slabou stránkou je naopak náchylnost k nestabilitě spalování. [1] [2]

Trojice stejných proudových paprsků se příliš nepoužívá, jejich jedinou výhodou je, že vyžadují menší otvory, a proto se jich do stejné plochy kanálků vejde více než ekvivalentních

dubleťových. Jejich nevýhody jako užší kužel kapiček, tedy rozložení hmotnosti ve spalovací komoře a větší kapky, ale převažují. Používají se tedy jen v případech, kdy je to opravdu nutné vzhledem k fyzickým rozměrům vstřikovače. [2]

Existují i další modifikace trojice protínajících se proudů s vyšším počtem postranních proudů srážejících se s centrálním axiálním paprskem – čtveřice, pětice atd. Používají se pro speciální případy, kdy je hmotnostní průtok jednoho z reaktantů o mnoho vyšší než druhého. Takovým případem jsou např. plynové generátory turbočerpadel, které operují se směsí velice bohatou na palivo. Obecně je jejich výhodou velice dobré smíšení reaktantů a jejich nevýhodami špatné rozložení hmoty ve spalovací komoře (užší výsledné kužely) a náchylnost k nestabilitě. [2]



Obrázek 3: Různé přístupy návrhu dírového typu vstřikovače, tři první nákresy protínajících se proudů znázorňují nejběžněji užívané koncepce [1] [37]

Jedním z prvně vyvinutých vstřikovačů je typ sprchové hlavy (používal se například na německých balistických raketách V-2). Využívá designu neprotínajících se proudů a pro smíchání spoléhá na turbulence a difuzi ve spalovací komoře, která ale musí být pro dobrou funkci dostatečně velká, a proto se tento typ již pro primární vstřikování nepoužívá. Používá se ale k chlazení stěn spalovací komory, palivo je vstřikováno v axiálním směru vedle stěn a tím je ochlazuje a chrání před okysličovadlem. [1] [2]

Starším a již nepoužívaným druhem vstřikovače je také prvek vstřikující proudy na desku, kde dochází k jejich roztržení na kapičky. Jeho výhodou jsou daleko větší tolerance při výrobě, kdy není nutné, aby se paprsky tříštili v konkrétním bodě tak jako u typů, kde se střetávají proudové paprsky. [1] [2]

Posledním podtypem této skupiny, který do ní ale svým principem nepatří je typ vstřikovače, u kterého dochází k promíchání reaktantů vířivým pohybem v samotném vstřikovači před vstříknutím do spalovací komory. Tento princip je běžný u motorů nasávajících vzduch, ale vzácný u raketových motorů. Je to především kvůli vysokým tlakům a velkým hmotnostním tokům, kdy se může stát, že reakce se ze spalovací komory lehko přenesou do promíchávacích dutin, čímž v tom lepším případě vzniká jen nadměrné tepelné zatěžování této části vstřikovače, v tom horším celkové selhání motoru. Konvenční vstřikovací prvky zajišťují lepší výkon, větší kontrolu tepelného namáhání a celkově vyšší stabilitu spalování. [2]

Ze samotné podstaty vstřikovače typu proudového paprsku je zřejmé, že pro jeho správnou funkci je potřeba, aby se paprsky střetly co nejpřesněji, což klade nemalé požadavky na jejich výrobu. Původní metoda výroby, která se používá dodnes, je navrtávání děr a zaoblení či zkosení na jejich vstupu. Děr přitom na jednom vstřikovacím čele mohou být i stovky. [1] Vždy se jedná o kompromis mezi vyšším výkonem motoru (více vstřikovacích otvorů) a nižšími výrobními náklady (méně otvorů). [2]

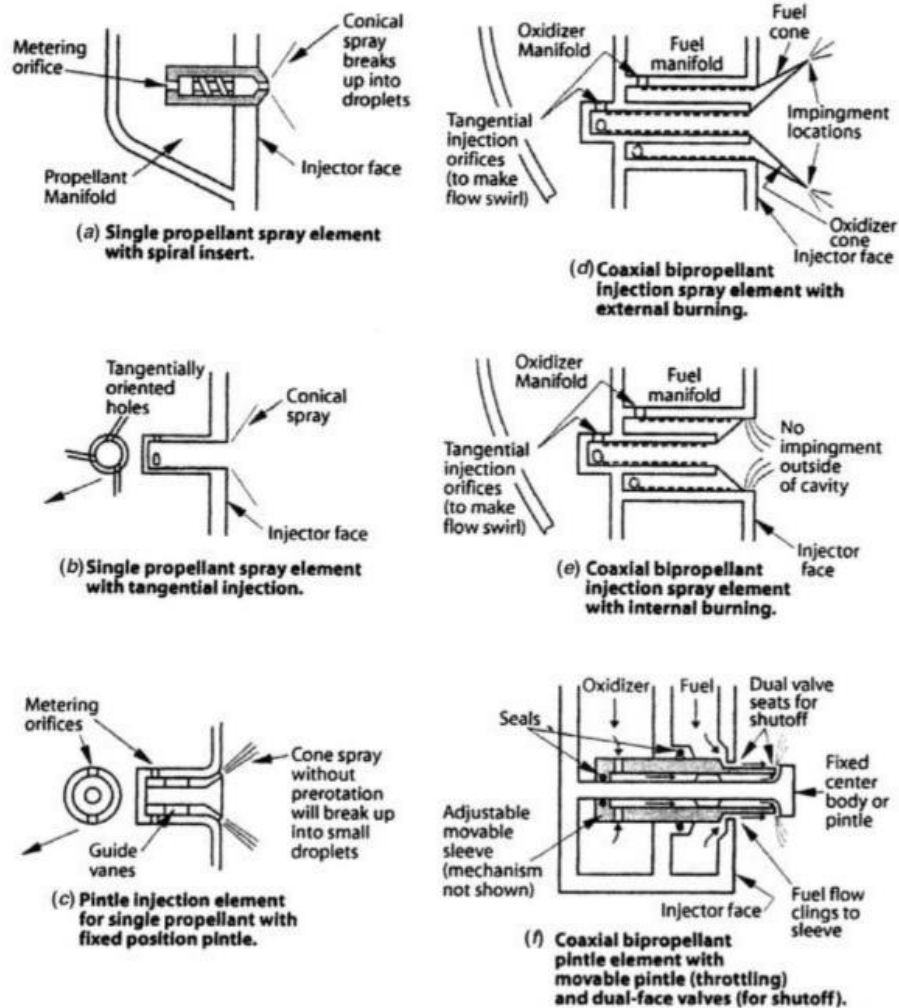
Jelikož je těžké díry vyrobit přesně a vyhnout se výrobním nedokonalostem (miniaturním otřepům a nepravidelnostem) byla firmou Aerojet Propulsion Company vyvinuta nová metoda využívající vyleptaných velmi tenkých destiček difúzně spojených k sobě v jeden díl. Do jednotlivých destiček jsou vyleptány vstřikovací díry, přírodní kanálky případně i mřížky jemných filtrů, destičky jsou naskládány na sebe a difúzně spojeny. Tento přístup nabízí nejen daleko větší přesnost výroby, ale i větší volnost při navrhování přírodních kanálků, kdy jejich výroba již není limitována konvenčními technologiemi. Lze použít pro malé a střední velikosti vstřikovačů. [1] [2]

V posledních letech se na poli výrobních technologií v tomto oboru prosazuje aditivní výroba neboli 3D tisk. Stejně jako metoda využívající vyleptané destičky, umožňuje i 3D tisk téměř neomezenou volnost při navrhování, ale je i rychlý a relativně levný. Konkrétně se využívá technologie selektivního tavení laserem (SLM). Lože se postupně po vrstvách plní kovovým práškem, v každé vrstvě je přitom selektivně roztaven a spojen s předchozí vrstvou, čímž vznikne hotový díl. [5] [6] [7]

### **1.1.2. Vstřikovače typu proudové stěny**

Pomocí vnitřní geometrie nebo vířením vytváří kuželové, válcové či jiné proudové stěny, které se vzájemně střetávají nebo se jen zvětšováním rozměrů rozpadají na malé kapičky, vypařují a společně reagují (palivo s okysličovadlem). Jejich výhodami oproti proudovým paprskům jsou menší odchylky velikosti kapiček a v některých případech možnost jejich jednoduché regulace v poměrně velkém rozsahu hodnot výstupního tahu motoru. Tento typ

se běžně používá pro letecké motory nasávající vzduch, ale u raketových motorů není, až na koaxiální podtyp a motory vyžadující regulaci tahu, používán. Především kvůli problémům s chlazením čela vstřikovače a nutnosti vysokých hmotnostních průtoků spojenými s raketovými motory. [1] [2]



Obrázek 4: Zjednodušené průřezy vstřikovačů typu kuželové proudové stěny [37]

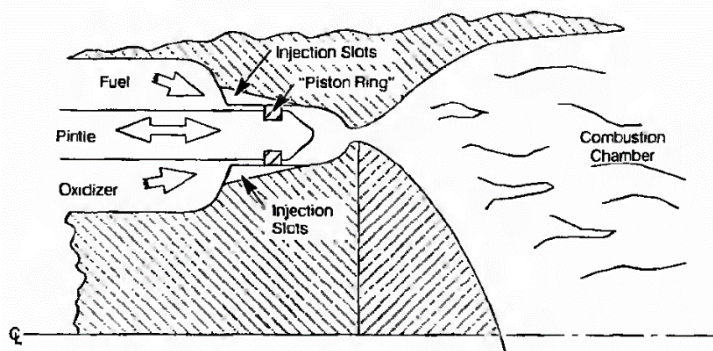
Nejpoužívanějším podtypem tohoto typu vstřikovače je sousový/soustředný vstřikovací prvek schematicky zobrazený na skicách (d) a (e) v obrázku 4, ve větším kontextu na obrázku 11. Používá se pro tekutý kyslík (okysličovadlo) a již plynný vodík (palivo), který byl odpařen chlazením pláště trysky a spalovací komory raketového motoru. Plynný vodík má v samotném vstřikovacím prvku i více než desetkrát vyšší rychlost než pomalu se pohybující kapalným kyslík proudící sloupkem uvnitř (typické rychlosti jsou pro okysličovadlo pod  $30 \frac{m}{s}$  a pro palivo přes  $300 \frac{m}{s}$ ). Smykovou silou mezi proudem okysličovadla a válcovou proudovou stěnou paliva dochází k velice efektivnímu rozbití proudu kapalného kyslíku na malé kapičky. Některé sousové vstřikovací prvky mohou pro zvýšení atomizace a smíchávání využívat vířivý efekt, jak je patrné z obrázku 4 (d) a (e), který po opuštění vstřikovacího elementu vytváří dva protínající se proudové kužely. Konfigurace bez víření je zobrazena na obrázku 11. [1] [2]



Na čele vstřikovače se nevyskytuje jen jediný takovýto prvek, ale většinou stovky či alespoň desítky, jak může být vidět z obrázku 11. Tento vstřikovací prvek je vhodný pro raketové motory vysokých výkonů využívající tekutého okysličovadla a plynného paliva. Prospívá stabilitě spalování, a to i přesto, že je kapalný kyslík úmyslně vstřikován malou rychlostí. Nutný pokles tlaku na vstřikovači zajišťující stabilitu vstřikování je v tomto případě zajištěn pomocí alespoň jedné škrtkové clony v každém sloupku okysličovadla. Další výhodou je fakt, že palivo při reakci obklopuje okysličovadlo a tím chrání stěny spalovací komory před excesivním teplem. Naopak se koaxiální vstřikovací prvek nedá příliš použít pro kapalná či hodně hustá plynná paliva, jelikož by v tomto případě bylo velice obtížné dosáhnout nutných rychlostí pro efektivní promíchání. [1] [2]

Raketové motory s všemi výše zmíněnými typy vstřikovačů lze regulovat v menším rozsahu restrikcí toku před vstřikovačem, řádově na polovinu maximálního tahu. Ale pouze za předpokladu, že jsou dobře navrhnuté a mají dostatečný pokles tlaku na vstřikovači i po restrikci toku, čímž je zajištěna stabilita vstřikování. Právě tato podmínka stability a vztah poklesu tlaku s rychlostí toku kapaliny jsou limitujícími faktory pro regulaci v širším rozsahu tahu tímto způsobem. Tlakové ztráty se totiž snižují s druhou mocninou rychlosti toku, naproti tomu tlak ve spalovací komoře, a tedy tah se snižuje s klesajícím průtokem lineárně. Při přílišné regulaci a vzniku malého poklesu tlaku na vstřikovači může dojít k vážným oscilacím tlaku a nestabilitě spalování. [2]

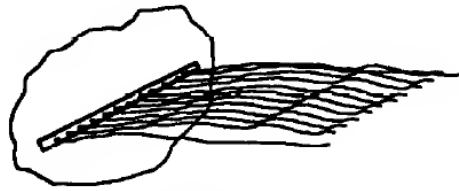
Některé raketové motory pro specifické účely ve vesmíru i na Zemi však mohou vyžadovat regulaci tahu po daleko větším rozsahu hodnot, řádově od jednotek do malých desítek procent maximálního tahu. V minulosti se vyvinuly různé přístupy k tomuto problému. Jedním z návrhů bylo například použití stlačeného plynu, který se přimíchával k palivu a okysličovadlu, čímž efektivně snižoval hustotu v regulovaném stavu bez vlivu na pokles tlaku na vstřikovači. Jeho nevýhodami však byly nutnost mít zásobu plynu a řídit jeho smíchávání. Nakonec se jako nejvhodnější ukázal design s centrálním trnem (anglicky „pintle“), jež svým osovým pohybem reguluje množství paliva a okysličovadla ihned před jejich vstupem do spalovací komory. Princip fungování je zobrazen na obrázku 4 (f). Tento vstřikovací element zajišťuje dostatečnou spolehlivost a stabilitu chodu motoru i ve vysoce regulovaném stavu. Kromě typické konfigurace trnu z obrázku 4 (f) lze použít i další alternativní přístupy na stejném principu, jeden z nich je zobrazen na obrázku 5. [2]



Obrázek 5: Regulovatelný trnový („pintle“) vstřikovač použitý na taktických balistických raketách MGM-52 Lance [2]

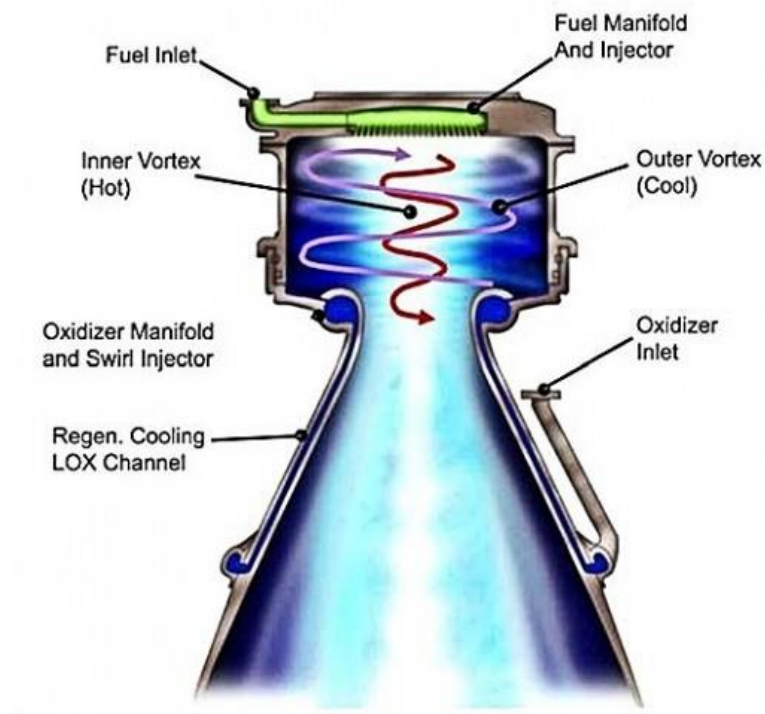


Byly zkoušeny i úzké dlouhé štěrby tvořící rovinné proudové stěny za účelem zvýšení povrchu proudů, avšak převážně neúspěšně. Proudové stěny se nepředvídatelně shlukovaly do velkých a nepravidelných tvarů. [2]



Obrázek 6: Schematický náčrt vstřikovače využívajícího úzké dlouhé štěrby [2]

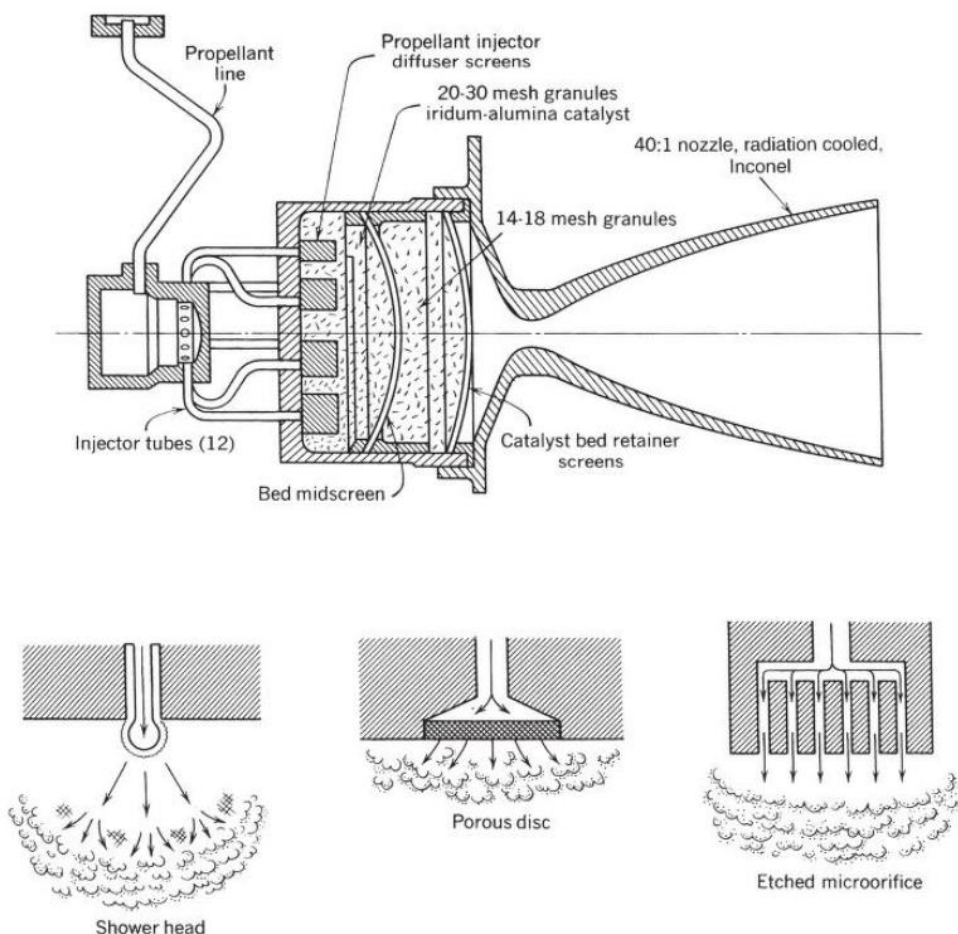
Jedním z v poslední době vyvinutých typů vstřikování do spalovací komory je vstřikování založené na míšení dvou velkých vírů – jednoho vnitřního paliva a druhého na vnější straně spalovací komory – okysličovadla. Viz obrázek 7. Výhodou tohoto vstřikování je, že stěny komory jsou před odehrávající se reakcí chráněny vírovým proudem okysličovadla a jsou daleko méně tepelně namáhány než stěny spalovacích komor využívající konvenční vstřikování. [8]



Obrázek 7: Princip fungování vírového vstřikování [8]

### 1.1.3. Vstřikovače jednosložkových motorů

Jednosložkové motorky využívají ke svému chodu palivo (ve většině případů hydrazin) a katalyzátorové lože (pórovité keramické granule s jemně rozptýleným iridiem nebo kobaltem). Z principu svého fungování jsou jejich vstřikovače daleko jednodušší než u dvousložkových motorů. Čtyři ověřené přístupy přívodu paliva do katalyzátorového lože jsou zobrazeny na obrázku 8, nahoře je naznačen přívod paliva do válcových „sít“ zapuštěných do katalyzátorového lože, níže pak další tři přístupy – typ sprchové hlavy, porézního disku a vyleptaných mikro otvorů. Základním požadavkem vstřikovačů jednosložkových motorků je rozvést palivo co nejjednodušeji do co největšího objemu katalyzátoru. [1]



Obrázek 8: Typická spalovací komora jednosložkového motoru na hydrazin, jsou zobrazeny čtyři různé metody vstřikování paliva do katalyzátorového lože [1]

### 1.2. Přívodní kanálky

Výběr vstřikovacích prvků a vzor jejich rozmístění po čele vstřikovače je úzce spjat s možnostmi výroby přívodních kanálků, jež mají za úkol přívod oxidličovadla nebo paliva do jednotlivých vstřikovacích otvorů. Mají za úkol jeden přívodní zdroj vhodně rozvést do jednotlivých vstřikovacích prvků, a to nejlépe tak, aby všechny vstřikovací prvky měly na svém vstupu stejný tlak a hmotnostní tok. I když je nemožné dosáhnout tohoto ideálu, lze se mu vhodnými metodami přiblížit. [2]

Komplexnější systém kanálků umožňuje nižší rychlosti proudění v kanálcích a lepší rozložení reaktantů ve spalovací komoře. Na druhou stranu vstřikovač s jednodušším systémem kanálků je zpravidla lehčí [1], má rychlejší zážeh a nižší impuls po vypnutí motorů (tj. po uzavření ventilů), kdy tlak par v kanálcích udržuje malý přísun zbytků paliva a oksyličovadla do spalovací komory. [2] Kvůli poslední zmíněnému efektu jsou často ventily přímo součástí samotného vstřikovače. [1] Pro některé systémy vyžadující velkou přesnost může být tento jev naprosto kritický, například pro motorčky řízení polohy nebo manévrovací motorčky, které jsou zažehávány v krátkých pulzech dlouhých pouze několik milisekund. Dalším limitujícím faktorem komplexního systému kanálků je po omezeních technologie výroby samotné fyzické místo v čele vstřikovače. [2]

Z předchozího odstavce je zřejmé, že musí dojít ke kompromisu mezi co nejmenším impulsem po vypnutí motorů a účinným rozváděním paliva a oksyličovadla, které vyžaduje větší objem prostoru. Prakticky se k návrhu přívodních kanálků používají dvě jednoduché metody, které dávají podobný výsledek. [2]

První z nich říká, že každý kanálek by měl mít čtyřikrát větší plochu průřezu než součet všech ploch průřezů otvorů, které zásobuje. To znamená, že například jednoduchý přívodní systém zásobující otvory za sebou v řadě by se měl postupně zužovat. Pro zvýšení účinnosti motorčků využívajících krátkých pulsů je často přijatelné tento poměr místo čtyři ku jedné vzít dva ku jedné, a to i za cenu větších tlakových ztrát a méně rovnoměrného rozložení složek po celé ploše vstřikovače. [2]

Druhá metoda zvaná „pravidlo jednoho procenta“ tvrdí, že dynamický tlak by neměl překročit 1% celkového místního tlaku. To zajistí odchylky nerovnoměrného rozložení hmotnostního toku ve vstřikovacích otvorech, indukované rychlostí proudění systémem kanálků, do 5%. Tato metoda nevyžaduje, na rozdíl od první, znalost průřezů. [2] Dynamický tlak se dá jednoduše spočítat z rovnice:

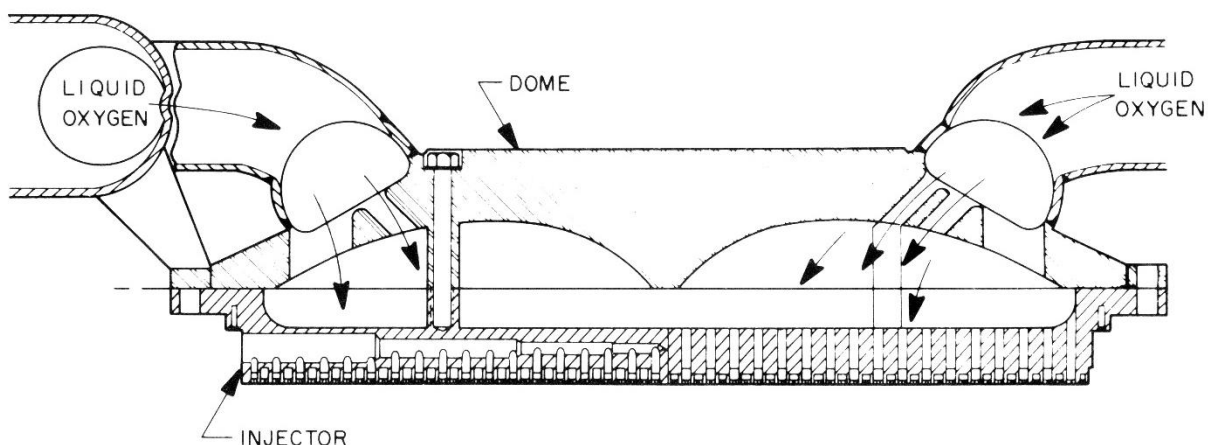
$$p_{dyn} = \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\dot{m}^2}{2\rho A^2} \quad (1)$$

kde  $\rho$  je hustota,  $v$  rychlost proudění a  $\dot{m}$  hmotnostní tok média daným místem,  $A$  je plocha průřezu kanálku. Vše je v základních jednotkách SI. [2] [3]

Kromě rychlosti proudění kanálky má na rozložení vliv i geometrie kanálků (např. úhly mezi nimi) a výrobní nedokonalosti (např. otřepy). Ty mohou hmotnostní tok určitým otvorem snížit i zvýšit. Nižší rychlost proudění v kanálcích však tyto jevy minimalizuje a při dodržení jedné z výše zmíněných metod má proudění v kanálcích jen malý vliv na rozložení hmotnostních toků po čele vstřikovače. [2]

### 1.2.1. Konkrétní řešení přívodních kanálků

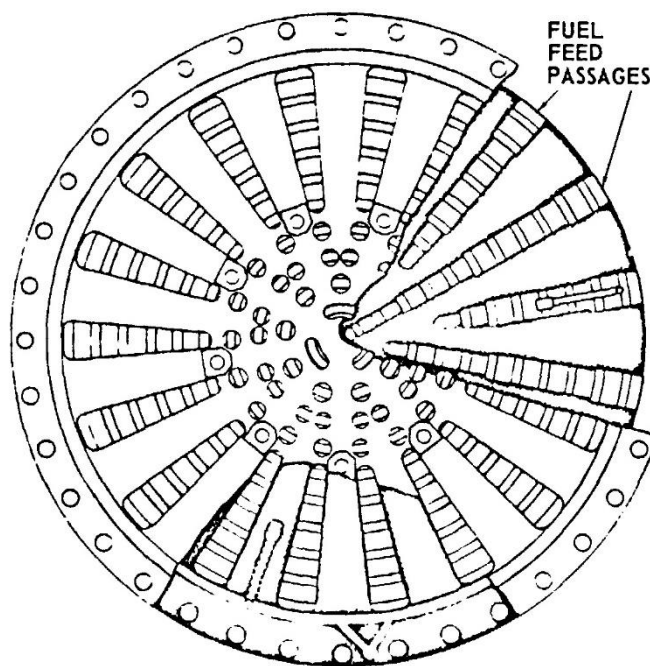
Existuje několik základních přístupů návrhu přívodních kanálků vstřikovače, které se využívají. Pro pomocné motory používající směs tekutého paliva a okysličovadla se pro okysličovadlo používá takzvaný „dóm okysličovadla“, kdy je okysličovadlo přiváděno z horní části (vzdálenější od spalovací komory) do těla vstřikovače – do vyvrtaných děr, které



Obrázek 9: Řez vstřikovačem motoru F-1 na směs tekutého paliva a okysličovadla. Šipkami je znázorněn tok okysličovadla - dómem okysličovadla a čelem vstřikovače (axiálními dírami do soustředných kruhových kanálků se vstřikovacími otvory). Na krajích a ve vnitřní části jsou díry na šrouby spojující vnější a vnitřní část dómu. [9]

na spodním okraji navazují na soustředné kruhové kanálky v čele vstřikovače, v nichž jsou vyvrtány vstřikovací otvory. Palivo, které je často využíváno k chlazení stěn spalovací komory je přiváděno z vnější strany, do radiálních vyvrtaných děr, z nich je opět vedeno dírami do koncentrických kruhových kanálků v čele vstřikovače, a nakonec do vstřikovacích otvorů. Vše je názorně zobrazeno na obrázcích 9 a 10. Kruhové kanálky jsou vyráběny vysoustružením kruhových drážek do čela vstřikovače, na něž se položí a přivaří/připájí kruhový pás s vyvrtanými vstřikovacími otvory. [2] [4]

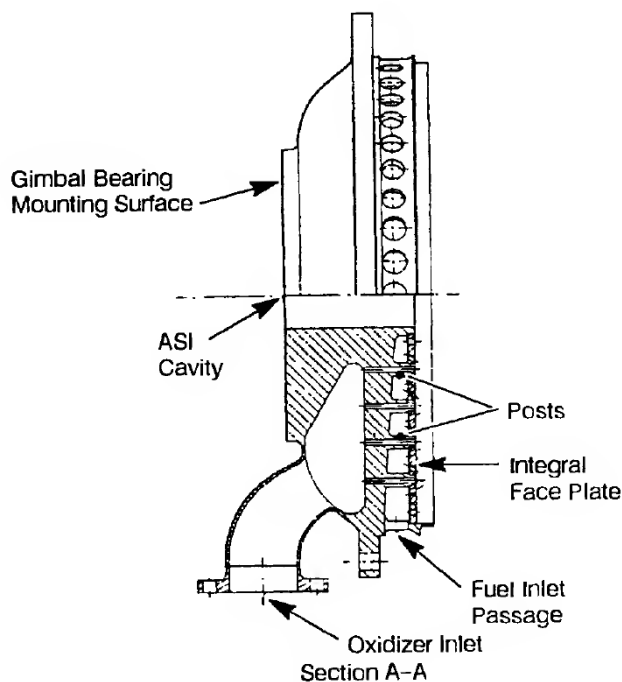
Pro velké motory spalující směs plyného paliva a kapalného okysličovadla se používá podobný design. Opět je zde přítomen dóm okysličovadla, ale pod ním se, na rozdíl od předchozího typu, nevyskytují vyvrtané díry, ale další dutina, kudy je přiváděno palivo do jednotlivých otvorů, viz obrázek 11. Skrz dutinu s palivem prochází duté válcovité sloupky vedoucí okysličovadlo do spalovací komory. Tato kombinace pohonné směsi



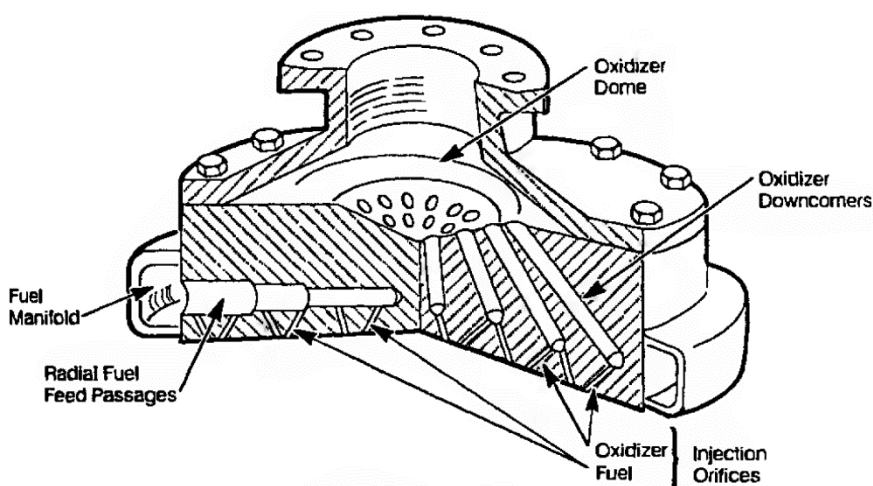
Obrázek 10: Vstřikovač stejného typu jako na obrázku 9, zobrazen bez dómu okysličovadla. V řezu jsou znázorněny radiální přívody paliva. [2]

zpravidla využívá souosý vstříkovací prvek, kdy palivo při vstříkování obklopuje proud okysličovadla ze všech stran. Samotný souosý vstříkovací prvek musí být navržěn tak, aby poskytoval oporu čelu vstříkovače proti tlaku v kanálcích. [2]

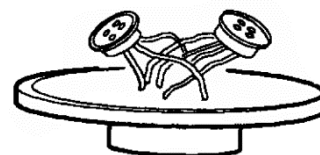
Menší vstříkovače jsou založeny na stejných principech, jen kanálky lze díky menším rozměrům rovnou obrobit do jednoduchého těla vstříkovače. Vstříkovací otvory jsou napájeny přímo z radiálních kanálků vedoucích palivo nebo víceméně axiálními kanálky vycházejícími z domu okysličovadla, viz obrázek 12. U malých motorků využívajících krátkých pulzů je vhodné minimalizovat celkový objem kanálků za ventily, přistupuje se tedy k změti navzájem se proplétajících vrtaných kanálků. Pro některé motorky pulzního typu s pár vstříkovacími prvky je také možné použít kapilární přívodní trubičky přímo z ventilu do vstříkovacích otvorů, viz obrázek 13. Objem kanálků je tak minimalizován. [2]



Obrázek 11: Vstříkovač s koaxiálními vstříkovacími prvky pro kombinaci plyného paliva a kapalného okysličovadla. Zobrazen vstříkovač motoru J-2. V ose vstříkovače je dutina na zažehovací prvek ASI (Augmented spark igniter). [2]



Obrázek 12: Řez vstříkovačem menšího motorku [2]



Obrázek 13: Schéma vstříkovače s kapilárními přívodními trubičkami [2]

### 1.3. Fyzikální charakteristiky vstřikovače

Odlíšné typy a podtypy vstřikovačů se vyznačují rozdílnou účinností reakce, hydraulickou charakteristikou proudu, atomizací, startovací charakteristikou a odolností vůči samoindukovaným vibracím ve spalovací komoře. [1]

#### 1.3.1. Proudové charakteristiky

Hydraulická charakteristika proudu může být spolehlivě vyhodnocena již při návrhu vstřikovače na základě požadovaných parametrů, jako jsou směšovací poměr, tlak a rychlost vstřikování. Základními vztahy pro tento popis jsou:

$$\dot{m} = \frac{F}{v_e} \quad (2)$$

kde  $\dot{m}$  je hmotnostní tok,  $F$  tah a  $v_e$  efektivní výtoková rychlost. [1]

Vztahy pro **směšovací poměr** paliva a okysličovačla a jejich hmotnostní průtoky:

$$r = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_f} \quad (3)$$

$$\dot{m}_o + \dot{m}_f = \dot{m} \quad (4)$$

kde  $r$  je směšovací poměr,  $\dot{m}_o$  hmotnostní průtok okysličovačla a  $\dot{m}_f$  hmotnostní průtok paliva. [1]

Pro proudění nestlačitelné tekutiny skrz otvor platí rovnice:

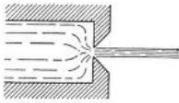
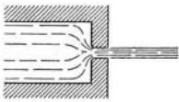
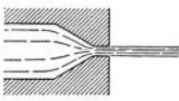
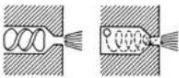
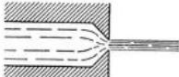
$$\dot{m} = \dot{V}\rho = C_d A \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (5)$$

kde  $\dot{V}$  je objemový průtok,  $\rho$  hustota média,  $C_d$  bezrozměrný výtokový koeficient (viz tabulka 1),  $A$  plocha průřezu otvoru a  $\Delta p$  pokles tlaku na vstřikovacím prvku. [1]

**Poklesem tlaku** se rozumí rozdíl tlaku ve spalovací komoře a tlaku ve vstřikovacím prvku před vstříknutím do spalovací komory. Tento rozdíl tlaků zajišťuje potřebnou rychlost vstřikovaných proudů, které pak tuto kinetickou energii využijí na atomizaci a směšování ve spalovací komoře. Proudů s nízkou rychlostí by jen odkapávaly do spalovací komory, nezajišťovaly výše zmíněné, a tudíž negativně ovlivnili směšování a následné spalování. Stejně tak je důležitý dostatečný pokles tlaku pro zajištění stability. Specifikace NASA např. povolují až 5% oscilace tlaku ve spalovací komoře. Pokud by byl pokles tlaku na vstřikovači jen povolených 5%, tak by při zvýšení tlaku v komoře o 5% došlo ke krátkodobému zastavení vstřikování, po němž by následoval pokles tlaku a zintenzivnění vstřikování, čímž by se opět tlak zvýšil a tento proces by se opakoval. Oscilace tlaku nejčastěji nastávají jen lokálně, pro některé vstřikovací elementy. Takový chod motoru je nejen neefektivní, ale také v případě, že by oscilace tlaků byly blízko vlastním frekvencím systému, by došlo k nárůstu nestability. Z těchto důvodů je nutné mít dostatečně velký pokles tlaku na vstřikovači, jako výchozí

hodnota se doporučuje rozmezí 15 až 25 % tlaku ve spalovací komoře (dle [1], 15 až 20 % dle [2]). I pokud má vstřikovač doporučenou hodnotu poklesu tlaku okolo 20%, může při 5% oscilacích docházet k výrazným změnám průtoku vstřikovačem. Raketové motory, které používají regulaci tahu vyžadují vyšší pokles tlaku, stejně jako motory náchylné na nestabilitu. [2]

Vyšší pokles tlaku ale na druhou stranu znamená vyšší hmotnost přívodního systému a větší výkon pump. Podobně je nutné udělat kompromis i v některých dalších oblastech, kdy je zapotřebí upřednostnit stabilitu spalování nad výkonem, a to výběrem vhodného vstřikovacího elementu či opatřeními tlumícími nežádoucí vibrace (viz kapitola 1.3.2). [1][2]

Orifice Type	Diagram	Diameter (mm)	Discharge Coefficient
Sharp-edged orifice		Above 2.5	0.61
		Below 2.5	0.65 approx.
Short-tube with rounded entrance $L/D > 3.0$		1.00	0.88
		1.57	0.90
		1.00 (with $L/D \sim 1.0$ )	0.70
Short tube with conical entrance		0.50	0.7
		1.00	0.82
		1.57	0.76
		2.54	0.84–0.80
		3.18	0.84–0.78
Short tube with spiral effect		1.0–6.4	0.2–0.55
Sharp-edged cone		1.00	0.70–0.69
		1.57	0.72

Tabulka 1: Bezrozměrné výtokové koeficienty  $C_d$  pro různé tvary výstupních otvorů [1]

Bezrozměrný **výtokový koeficient**  $C_d$  je definován jako:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{sku}}{\dot{m}_{teo}} \quad (6)$$

kde  $\dot{m}_{sku}$  je skutečný hmotnostní tok na výtokové straně otvoru a  $\dot{m}_{teo}$  je hmotnostní tok na výtokové straně ideální trysky za stejných podmínek. [10]

Z definice výtokového koeficientu je patrné, že je vhodné, aby jeho hodnota byla co nejblíže 1, tak aby se energie ztracená poklesem tlaku přeměnila v co nejvyšší míře na kinetickou energii proudu vstřikovaného do spalovací komory a maximalizovala se atomizace a směšování. Vysoký výtokový koeficient také zajišťuje lepší kontrolu nad směrem proudu a skrze setrvačnost proudu podporuje stabilitu reakce. [2] Jeho hodnota by měla být co nejkonstantnější pro různé rozsahy Reynoldsova čísla. Malé nedokonalosti výroby, jako jsou



otřepy, jiné velikosti zaoblení či zkosení dokáží způsobit velké snížení výtokového koeficientu, nesprávné smíšení reaktantů a tím pádem i nedokonalé spalování. [1]

Vstřikovací otvory jsou většinou krátké válcové otvory mezi kanálky a čelem vstřikovače, ke ztrátám dochází i na jejich vnitřní straně u vstupu z kanálků. Na této straně je také vhodné ztráty snížit – např. zaoblením hran. [2]

Celková plocha průřezů všech vstřikovacích otvorů paliva či okysličovadla je stanovena na základě požadovaného průtoku  $\dot{m}$  a požadovaného poklesu tlaku na vstřikovači  $\Delta p$ . [2] Po úpravě rovnice (5) dostáváme pro celkovou plochu průřezů vstřikovacích otvorů  $A$ :

$$A = \frac{\dot{m}}{C_d \sqrt{2\rho\Delta p}} \quad (7)$$

Pro průměr  $d$  otvorů kruhového průřezu pak platí:

$$d = \sqrt[4]{\frac{8\dot{m}^2}{\pi^2 N^2 C_d^2 \rho \Delta p}} \quad (8)$$

kde  $N$  je počet otvorů.

I přes zjevnou přímočarost předchozích rovnic není jednoduché zvolit konkrétní průměry otvorů a tím pádem stanovit počet vstřikovacích prvků. Pro maximální atomizaci a směšování je nejlepší mít co největší počet otvorů, neboli jejich průměr co nejmenší. Nejlépe tak malý, jak jen je možné vyrobit. Na druhou stranu se ale musí zohlednit složitost výroby ohromného počtu otvorů, stabilita spalování a riziko ucpání otvoru nečistotou. Drobné vstřikovací prvky jsou jednodušeji vybuditelné oscilacemi ve spalovací komoře, což vede k nestabilitě. Velké motory, které jsou náchylnější k nestabilitě spalování ale naštěstí mají delší čas, po který reaktanty zůstávají ve spalovací komoře a tím pádem delší čas na jejich správné smíšení. Pro dosažení vysoké účinnosti spalování tak nevyžadují velice malé otvory. Menší motory naopak mohou využít drobných vstřikovacích prvků, protože nemají takový sklon k nestabilitě. [2]

V minulosti byly použity otvory od 0,1 mm pro experimentální motor o tahu 4,5 N do 19 mm pro urychlovací stupeň. Obvyklejší rozmezí je však od 0,33 mm (např. v motoru pro horní stupeň XLR-132) do 7 mm (např. v motorech F-1 rakety Saturn V). Většina vstřikovačů má průměry otvorů od 0,5 do 2 mm. [2]

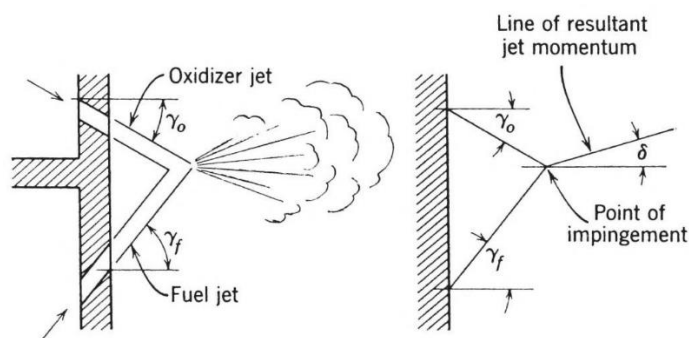
Rychlost vstřikování je dána vztahem: [1]

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = C_d \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

Směr hybnosti výsledné směsi po střetu paliva a okysličovadla je určen zákonem zachování hybnosti a tedy:

$$\tan \delta = \frac{\dot{m}_o v_o \sin \gamma_o - \dot{m}_f v_f \sin \gamma_f}{\dot{m}_o v_o \cos \gamma_o + \dot{m}_f v_f \cos \gamma_f} \quad (10)$$

kde úhly  $\gamma_o$ ,  $\gamma_f$  a  $\delta$  jsou definovány jako **úhly mezi odpovídajícími proudy a osou spalovací komory**, viz obrázek 14. [1] [2]



Obrázek 14: Vztah úhlů u dubletového/párového podtypu paprskového proudového vstřikovacího prvku [1]

Pro optimální výkon raketového motoru by hybnost výsledného proudu měla být v ose spalovací komory, tedy  $\delta = 0$  a tím pádem ze vztahu (10) dostáváme: [1]

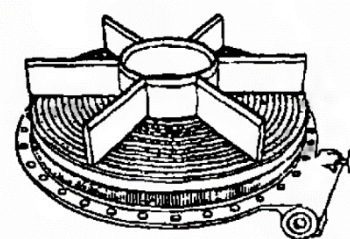
$$\dot{m}_o v_o \sin \gamma_o = \dot{m}_f v_f \sin \gamma_f \quad (11)$$

### 1.3.2. Stabilita spalování

Vysoký výkon motoru je dobrý ukazatel, ale jen v případě, že ve spalovací komoře nelze snadno vyvodit nestabilitu hoření. Parametry zvětšující výkon motoru často snižují stabilitu spalování, jako u všech vysokoenergetických dějů je ve spalovací komoře potenciál pro ničivé vibrace, zejména pokud zde existuje pozitivní zpětná vazba mezi rychlostí uvolňování energie a spalováním. Stabilní chod lze zajistit tlumením vibrací nebo odladěním nebezpečných frekvencí. Přitom se musí myslet na všechny elementy vstřikovače, včetně přívodních kanálků a jejich vlastní frekvence. [2]

Stabilita hoření je ovlivněna již samotným výběrem vstřikovacího elementu, proudové paprsky, kdy se sráží palivo a okysličovadlo jsou k nestabilitě nejnáchylnější, poté ty, u kterých se sráží stejné složky palivové směsi a nejvíce odolné nestabilitě jsou ty, kde se nesráží vůbec a mísí se až prouděním ve spalovací komoře (např. vstřikovač typu sprchové hlavy), to jsou ale také ty nejméně efektivní. [2]

V praxi se kromě odladění jednotlivých komponent používá i tlumení vibrací tvorbou akustických dutin a přepážek (u větších spalovacích komor). V případě přepážek se některé vstřikovací prvky výrazně prodlouží nad čelo vstřikovače a tím ho v oblasti nejcitlivější na stabilitu – blízko čela – rozdělí na více segmentů, schéma je na obrázku 15. Tím se rezonanční frekvence posunou do vyšších hodnot, které se snadněji tlumí. Akustické dutiny jsou funkčně podobné akustickým vložkám v motorech dopravních letadel a tlumí předem dané frekvence. Fungují na principu Helmholtzových rezonátorů nebo čtvrtvlnových šterbin. Pro jejich maximální efekt je vhodné je umístit mezi obvod těla vstřikovače a stěny komory, kde ovšem mají neblahý vliv na výkon motoru. [2]



Obrázek 15: Schéma vstřikovače s přepážkami rozdělujícími vstřikovací čelo na sedm segmentů [2]

#### **1.4. Ověření návrhu vstříkovače**

Kromě analytických a numerických modelů a simulací proudění, vypařování a spalování se provádí experimenty s již vyrobeným prototypem vstříkovače. Existují testy nereaktivní (za studena) a za tepla, se skutečnými reaktanty. I když jsou testy za tepla skutečnou zkouškou funkčnosti vstříkovače, tak testy za studena dokáží poskytnout mnoho hodnotných informací za zlomek ceny a rizika. Výsledky a závěry kromě možných vylepšení slouží i k ověření teoretických předpokladů návrhu. [2]

Při návrhu vstříkovače je nutné myslet na implementaci měření tlaku, teploty a vibrací během testů. [2]

##### **1.4.1. Modely a simulace**

Při vývoji raketového motoru je extrémně výhodné uplatnit matematické modelování z následujících důvodů: skutečné testy jsou velice drahé a modifikace relativně pomalé, vyžadují nesčetně senzorů, které navíc není možné umístit všude – například do spalovací komory. O tom, co přesně se v ní odehrává můžeme z testů za tepla vyčíst jen málo. [11]

Jako první se k určení chování vstříkovače a spalovací komory objevily **analytické modely**. Jsou to především modely vypařování a směšování kapiček. Jejich smysluplný výsledek je závislý na mnoha empirických hodnotách a zkušenostech konstruktérů. Byly vyvinuty i počítačové programy porovnávající jednotlivé parametry vstříkovače a motoru s již existujícími kusy se známými vlastnostmi. Program hledá korelace mezi parametry jednotlivých designů, jako např. který prvek pozitivně ovlivňuje stabilitu. [2]

V posledních desetiletích se však stále více prosazuje **numerické modelování pomocí CFD<sup>3</sup>** analýzy proudění ve specializovaných programech. I když tento druh modelování spalování je v jiných druzích motorů nepostradatelný, v raketových motorech se pro jejich charakteristické vlastnosti zatím uplatňoval jen s nepříliš přesnými výsledky. [2] [11]

Problémem jsou moc velké škály jevů, které se v komoře odehrávají, a to jak časové, tak rozměrové. Časově probíhá reakce na molekulární úrovni v řádech  $10^{-11}$  až  $10^{-9}$  sekund, pohyb hmoty a tepla se objevuje v řádech od  $10^{-7}$  do  $10^{-6}$  a akustické vibrace a doba po kterou palivo zůstává v komoře v řádech  $10^{-4}$  až  $10^{-3}$  s. Fyzické rozměry se liší od velikostí kolem 1 metru pro přibližnou délku komory a trysky až po velikosti jednotek mikrometrů, na kterých se objevuje disipace energie turbulentního proudění do tepla. [11]

Pokud bychom chtěli použít běžné metody síťování pro dokonalou analýzu všech dějů, tak by výpočty trvaly měsíce. Proto nový software vyvíjený SpaceX užívá adaptivní síť, tj. dynamicky zdobňuje síť na místech, kde je to potřeba, podle rozměrů jevů kolem daného bodu. Tím dochází k efektivnímu využití výpočetního času. [11]

Věci, které se řeší simulací spalování jsou především stabilita spalování a hmotnostní rozložení reaktantů po průřezu komory. Z konstrukčního hlediska nelze umístit vstříkovací

---

<sup>3</sup> Computational Fluid Dynamics

prvky příliš blízko obvodu komory, kde v důsledku vzniká nedostatek reaktantů. Použití akustických dutin tuto zónu ještě více zvětšuje. Radiální proudy ve spalovací komoře následně ženou většinou směs bohatou na oksylichovadlo směrem ke stěnám, kde může docházet k nadměrnému přestupu tepla a v krajním případě i k lokálnímu hoření samotné komory či čela vstřikovače. Tento problém lze řešit i účelovým vstřikováním směsi bohaté na palivo či vstřikováním jen samotného paliva na nebo ke stěnám komory. Vždy to znamená snížení výkonu, jak velké záleží na konkrétním palivu, například u vodíku je toto snížení poměrně malé. [2] [11]

#### **1.4.2. Testy za studena**

Kvalitativní parametry vstřikovače, jako je určení tlakových ztrát a ověření správnosti určení výtokového koeficientu, se mohou místo s reaktivními složkami provádět s inertními kapalinami. K tomuto účelu se nejčastěji používá voda jako náhrada paliva i oksylichovadla zároveň, je ale také možné použít dvou různých inertních a vzájemně se nemísících kapalin pro určení lokálních směšovacíh poměrů ve spalovací komoře. [1]

Jako jedny z prvních se provádějí **kalibrační testy za studena**. Slouží především k experimentálnímu porovnání **odporu proudění** ve vstřikovači s vypočtenými hodnotami. Z jejich vzájemného nesouladu lze usuzovat na nevhodnost použití teorie pro výpočet či nekvalitu výroby. Reálný odpor proudění je nutné znát k určení vstupních tlaků, a tedy výkonu turbočerpadel. [2]

Testy tlakových ztrát by se za ideálních podmínek měly dělat se zvýšeným tlakem za čelem vstřikovače, tak aby se reálně simuloval tlak ve spalovací komoře. I beztoho lze však získat hodnotné informace. Nemusí se simulovat plný objemový tok, ale jen za předpokladu, že je zabráněno kavitaci. U většiny vstřikovacích prvků nedochází ke kavitaci, pokud je tlak za čelem vstřikovače roven alespoň polovině poklesu tlaku na vstřikovacích otvorech. Tedy pro atmosférický tlak  $101\text{ kPa}$  by se měřilo přibližně do  $200\text{ kPa}$ . Mělo by se měřit i několik hodnot kolem tohoto tlaku, aby se nástup kavitace mohl určit odečtem z grafu. Existují zařízení umožňující zvýšení tlaku na výstupní straně, a to buď pomocí kapaliny nebo plynu, obě poskytují stejně dobré výsledky. [2]

U těchto testů se provádí také prvotní **vizuální kontrola** vstřikovaných proudů, formace jejich vějířů a úrovně atomizace. Mohou se ukázat nedostatky jako například špatně vyvrtané díry, ucpané otvory či problémy v geometrii srážení proudových paprsků a stěn. Z optické kontroly lze taktéž vyvodit vzájemné působení reaktantů se zdmi spalovací komory. [2]

Tyto testy by se měly dělat vždy před ostrým zažehnutím a testy za tepla. [2]

**Směšovací testy za studena** se používají především k analýze motorů pracujících s kapalným oksylichovadlem a palivem. Jde o poměrně přesnou metodu, kdy dvě v sobě nerozpustné tekutiny simulují jednotlivé reaktanty. Pro co nejpřesnější výsledek je nutné, aby hodnoty jejich hustot a viskozit byly co nejbližší ekvivalentním hodnotám paliva a oksylichovadla. Po průchodu vstřikovačem jsou jejich kapičky sbírány do mřížky umístěné ve vhodné vzdálenosti za čelem vstřikovače. Následnou analýzou se určí směšovací poměr v

každém místě mřížky. Tato metoda je relativně levná a hodnotná. Existují podobné testy pro pohonnou směs plynu a kapaliny, ale jsou daleko obtížněji realizovatelné, a ne tak spolehlivé, přesto mohou být užitečné. [1] [2]

Skutečný směšovací poměr lze odhadnout i z testů za studena pouze s vodou. Z rovnic (3) a (5) platí pro směšovací poměr  $r$ :

$$r = \frac{C_{d_o} A_o}{C_{d_f} A_f} \sqrt{\frac{\rho_o \Delta p_o}{\rho_f \Delta p_f}} \quad (12)$$

kde indexy  $o$  a  $f$  popisují vlastnost okysličovačla a paliva či jejich vstříkovačho prvku v tomto pořadí. [1]

Pokud je přiváděna voda do přírodních kanálků paliva i okysličovačla pod stejným tlakem, tj.  $\Delta p_f = \Delta p_o$  a  $\rho_f = \rho_o$ , pak pro vodní směšovací poměr  $r_w$  platí: [1]

$$r_w = \frac{C_{d_o} A_o}{C_{d_f} A_f} \quad (13)$$

S tímto vodním směšovacím poměrem určeným testy za studena s vodou lze následně, po vynásobení odmocninou s poměrem hustot a poklesů tlaků (odmocnina v rovnici (12)), získat skutečný směšovací poměr. Pokles tlaku na vstříkovači se většinou volí okolo 20% tlaku ve spalovací komoře (více o poklesu tlaku viz kapitola 1.3.1). [1]

Úroveň **atomizace** je důležitá pro celkovou účinnost reakce, pro její vyhodnocení existuje mnoho metod, od základních jako je kvalitativní pozorování během testů za studena až po velice sofistikované metody. Mezi ně se může řadit například měření velikosti kapiček laserem či holografická rekonstrukce. [2]

Jedna z prvních metod, která byla vyvinuta, byla analýza ztuhlých kapiček vosku nebo kovů s nízkou teplotou tání po průchodu vstříkovačem. Později se objevily nové metody – laserová zařízení založená na Dopplerově interferenci, difrakci a další. Jelikož jsou všechny tyto nové metody založeny na optickém pozorování, mají problém při vysokých hmotnostních tocích, kdy je vidět jen vnější část z oblaku kapiček. Výhodou je, že velké motory, u kterých je optické pozorování z větší části znemožněno, nejsou až tak moc citlivé na dobrou atomizaci, a tedy jí není nutné tolik analyzovat. Limitující je pro ně spíše směšování reaktantů než jejich vypařování. U malých motorů se ale stále jedná o metodu s hodnotnými výsledky. [2]

### 1.4.3. Testy za tepla

Testy za tepla jsou dělány jak v menším měřítku (s částmi vstříkovače), tak i s celým vstříkovačem a spalovací komorou. Při této příležitosti se testují a optimalizují i rozměry spalovací komory. Jinými testy nelze celý proces reakce ve spalovací komoře, od atomizace, přes vypařování až po spalování reaktantů, spolehlivě analyzovat. Proto je většina nových vstříkovačů (motorů) testována přímo s palivem a okysličovačem. Testy se provádí vždy alespoň u stejného typu vstříkovače, pokud není možné testy provést se všemi vyrobenými kusy, například z důvodu vysokých korozivních účinků pohonné směsi. [1] [2] [12]

Při testování se zkoumá **chování motoru** pomocí jevů, které by za normálních podmínek chodu neměly nastat. Ve větším rozsahu a náhle se mění průtoky, tlaky a směšovací poměry, a to jak lokálně, tak globálně. [2]

V celkovém uspořádání se testuje i **stabilita spalování** – účelně je náhlými změnami tlaku v komoře buzena nestabilita, k tomuto účelu existuje více metod. Sleduje se především čas útlumu jakýchkoliv indukovaných oscilací a podle toho se určuje odolnost vůči nestabilitě. [2]

V kalorimetrické komoře se měří **tepelné toky** a určuje se nutnost chladit zdi spalovací komory i z vnitřní strany vstřikováním paliva ke stěnám. [2]

Závěry z horkých testů pomáhají nejen zdokonalit současnou konstrukci vstřikovače a spalovací komory, ale získat informace i pro budoucí vývoj dalších typů. [2]

### **1.5. Konkrétní použití vstřikovačů v různých typech raketových motorů**

Palivová směs a podmínky vstřikování do značné míry určují konkrétní druh vstřikovacího prvku. [2]

Hypergolická palivová směs s malou spalovací komorou bude typicky využívat dubletové proudové paprsky srážející palivo s okysličovadlem. Naproti tomu motor na kapalný kyslík a vodík nejspíše využije souosý vstřikovací prvek založený na míšení smykovou silou. Přídavný raketový motor spalující kombinaci kapalného kyslíku a raketového petroleje (RP-1) již ale tento vstřikovací prvek kvůli větší hustotě kapalné fáze využít nemůže a kvůli citlivosti k vzniku nestabilního spalování se nehodí použití ani dubletových proudových paprsků srážejících palivo s okysličovadlem. Pro tuto palivovou směs se většinou volí jako vstřikovací prvek dubletových proudových paprsků srážejících palivo s palivem a okysličovadlo s okysličovadlem. [2]

V tabulkách 2 a 3 jsou pro přehled uvedeny charakteristické vlastnosti motorů důležité pro volbu vstřikovacího prvku a jejich počtu. Motory jsou rozděleny podle aplikace a přibližně sestupně seřazeny podle tahu.

Motor	Aplikace	Tah ve vakuu [N]	Pohonná směs	Směšovací poměr [-]	Tlak ve spalovací komoře [bar]	Celkový průtok $\left[\frac{kg}{s}\right]$	Hustota paliva $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Typ vstřikovacího prvku (hlavní spalovací komory)
SSME	Mise vyžadující vysoký impuls	2 090 000	LOX/LH <sub>2</sub>	6	207	467	333	koaxiální
HM60		1 075 000	LOX/LH <sub>2</sub>	5,3	105	255	346	516x koaxiální
LE-7		1 078 000	LOX/LH <sub>2</sub>	6	147	246,5	333	koaxiální
RS-68		3 310 000	LOX/LH <sub>2</sub>	6	96	824		koaxiální
RD-180		4 152 000	LOX/Petrolej	2,72	250	1250	1011	271x koaxiální s vírem
HM7A	Mise vyžadující mírný impuls	61 600	LOX/LH <sub>2</sub>	5,14	36	14,2	311	
VINCI		155 000	LOX/LH <sub>2</sub>	5,8	60	33,8	365	koaxiální
LE-5		100 000	LOX/LH <sub>2</sub>	5,6	35	23,1	357	koaxiální
LE-5A		121 500	LOX/LH <sub>2</sub>	5	38,5	26,9	333	koaxiální
RL10A-3-3A		73 400	LOX/LH <sub>2</sub>	5	32,2	16,8	333	216x koaxiální (z toho 162 s vírem)
RL10A-4N		88 900	LOX/LH <sub>2</sub>	5,5	38,4		354	koaxiální
OMS	Mise vyžadující nízký impuls	26 700	NTO/MMH	1,65	9	8,62	1141	dublety (P-P, O-O)
Aestus (L7)		27 500	NTO/MMH	2	10	8,76	1189	132x koaxiální s vírem
Aestus II		46 000	NTO/MMH	2,05	50		1189	132x koaxiální s vírem
RS-72		55 400	NTO/MMH	2,05	61,7		1189	132x koaxiální s vírem
ATE		20 000	NTO/MMH	2	10		1189	
AJ10-118K		43 400	NTO/A-50	1,9	8,9	13,86		dublety (O-P)

Tabulka 2: První část přehledu dvousložkových raketových motorů [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34]

#### Poznámky k tabulkám 2 a 3:

- 1) Zkratky pohonných směsí: LOX = kapalný kyslík, LH<sub>2</sub> = kapalný vodík, NTO = dimerní forma oxidu dusičitého, MMH = monomethylhydrazin, A-50 = Aerozine 50, MON = směs oxidů dusíku
- 2) U dubletových vstřikovacích prvků je v některých případech poznámka o tom, které paprsky se srážejí – P (palivo), O (okysličovadlo)
- 3) Hodnoty jsou typické pro tah 100 %



Motor	Aplikace	Tah ve vakuu [N]	Pohonná směs	Směšovací poměr [-]	Tlak ve spalovací komoře [bar]	Celkový průtok $\left[\frac{kg}{s}\right]$	Hustota paliva $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Typ vstřikovacího prvku (hlavní spalovací komory)
RS-41	"reaction control system" dvousložkové	11 100	NTO/MMH	1,63	13,2			
R-40A		3 870	NTO/MMH	1,6	10,5	1,358		dublety
S3K		3 500	MON/MMH	1,6	12			
RS-28		2 670	NTO/MMH	1,63	13,8			
RS-21		1 330	NTO/MMH	1,52	8			
R-42		890	MON/MMH	1,65	7,1	0,3		
R-4D		490	NTO/MMH	1,65	6,9	0,158		dublety s chlazením stěn komory
Leros 1		467	MON/Hydrazin	0,8	6,2			dublety (O-P) s chlazením stěn komory
RS-42		445	NTO/MMH	1,6	9,7			
S400/1		400	MON/MMH	1,64	7,2	0,135		dva střetávající se vírové kužely
RS-25		111	NTO/MMH	1,6	6,9			
R-1E		110	NTO/MMH	1,65		0,061		1x dublet
R-43		67	NTO/Hydrazin	1,6				
RS-43		22,2	NTO/MMH	1,6	6,9			
Leros 20		22	NTO/MMH	1,65	9			
R-6C		22	NTO/MMH	1,6	6,8	0,008		1x dublet
SEP 20 N		20	NTO/MMH	1,65	8	0,0097		1x dublet
S10/1		10	MON/MMH	1,64	10			
RS-45		4,5	NTO/MMH	1,6	4,8			
R-2B		4,5	NTO/Hydrazin	1,65				
S4	4	MON/MMH		4				

Tabulka 3: Druhá část přehledu dvousložkových raketových motorů [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34]

## 2. Obecné věci o návrhu demonstrátoru

Návrh demonstrátoru vstřikovače raketového motoru poháněného kapalnými pohonnými hmotami.

### 2.1. Základní požadavky

Shrnutí požadavků na demonstrátor vstřikovače:

- Médium pro demonstraci: voda
- Objemový tok vody  $\dot{V} > 0,1 \frac{l}{s}$
- Optimalizace tlakových ztrát ve vstřikovači
- Jako zdroj tlaku bude použito čerpadlo „Alfapumpy 3,5SEm3/18“
- Lehká vyrobitelnost

#### 2.1.1. Detaily čerpadla/pumpy, tlakové charakteristiky

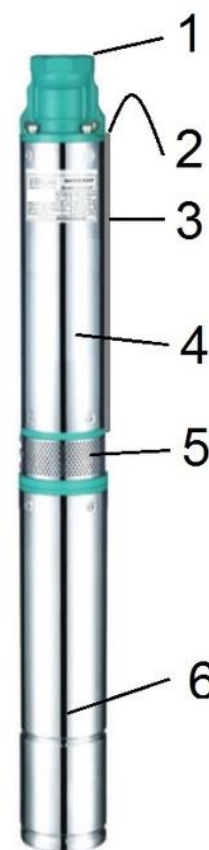
Bude použito ponorné odstředivé vícešupňové čerpadlo „Alfapumpy 3,5SEm3/18“ pro čerpání čisté užitkové vody bez mechanických příměsí. Je zobrazeno na obrázku 16 spolu s popisem jeho součástí:

- 1... výtlačné hrdlo se závěsnými oky – vnitřní závit G1,5“
- 2... přívodní kabel s vidlicí
- 3... kryt kabelu
- 4... plášť čerpadla
- 5... sací síto
- 6... motor čerpadla

Toto čerpadlo má maximální výtlak 80m, jeho celá výkonová charakteristika je zobrazena na grafu 1. Tlak na výstupu lze z výtlaku v grafu na ose  $y$  získat jednoduchým přepočtem pomocí hydrostatického tlaku:

$$p = h\rho g$$
$$p = h \times 998 \times 9,81$$
$$p = 9790h$$

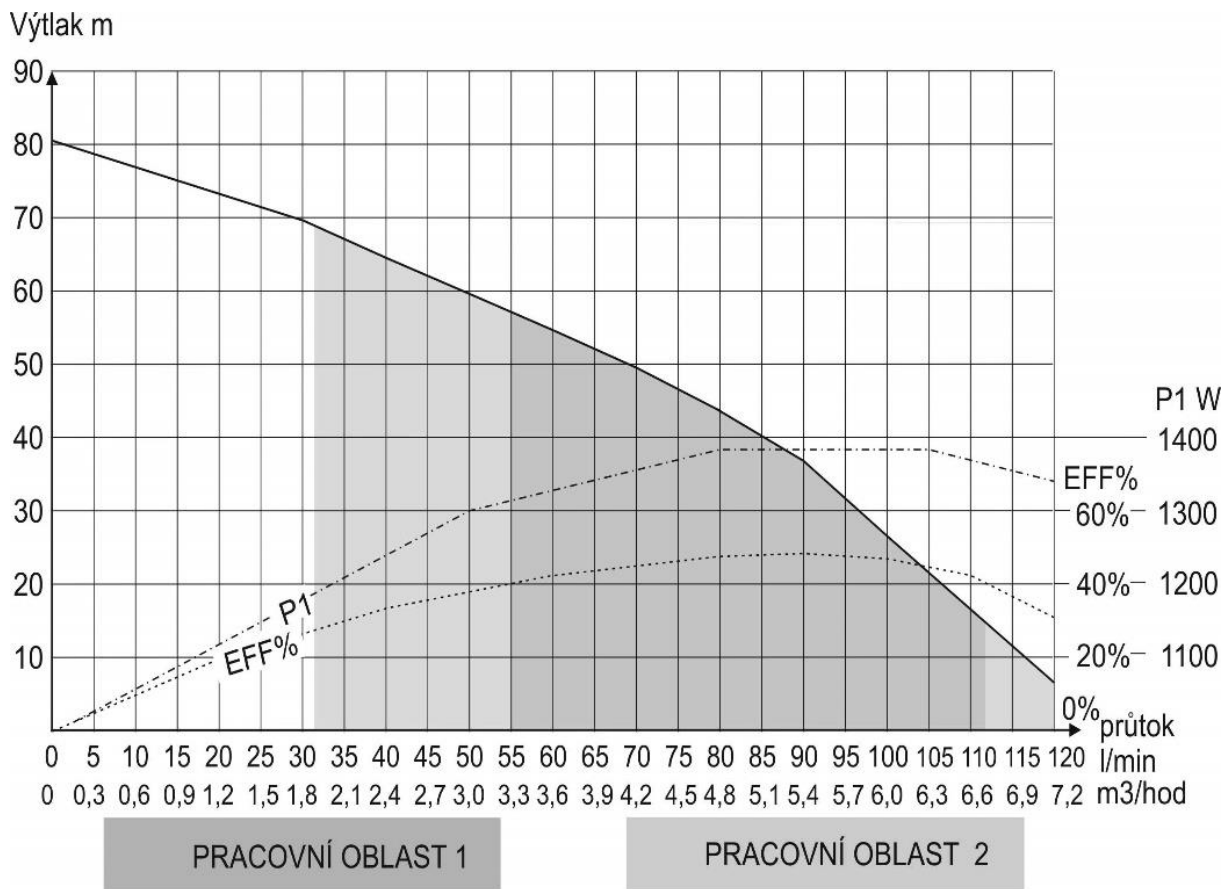
Jedním z požadavků je, aby demonstrátor pracoval s minimálním průtokem  $0,1 \frac{l}{s}$ , což se rovná  $6 \frac{l}{min}$ . Tento bod odpovídá po přepočtu z grafu přibližně  $760 kPa$ . K dosažení daného průtoku za tohoto tlaku ale ve skutečnosti nemůže dojít, protože ztráty ve vedení trubkami od čerpadla k vstřikovači a v samotném vstřikovači nebudou nulové. Proto bude maximální použitelný tlak menší než tato teoretická maximální hodnota.



Obrázek 16: Čerpadlo „Alfapumpy 3,5SEm3/18“

Z bodu 1.4.2 o testování tlakových ztrát za studena je zřejmé, že při testování (v tomto případě demonstraci) za atmosférického tlaku  $101 kPa$  by měl být tlak ve vstřikovacích

prvcích maximálně 200 kPa, tak aby v nich nedocházelo ke kavitaci. Při zpětném přepočtení tohoto tlaku na průtok získáme hodnotu minimálního průtoku  $1,8 \frac{l}{s}$ . Tato hodnota je poměrně velká, a proto bude pravděpodobně nutné snížit průtok odvodem do jiné větve.



Graf 1: Výkonový diagram čerpadla „Alfapumpy 3,5SEm3/18“

Poznámky ke grafu 1:

- EFF% – celková účinnost soustrojí motor-čerpadlo
- Pracovní oblast 1 – optimální pracovní oblast (oblast s nejvyšší účinností)
- Pracovní oblast 2 – doporučená pracovní oblast (oblast s vysokou účinností)
- P1 – elektrický příkon soustrojí motor-čerpadlo

**2.2. Možnosti výroby**

Shrnutí výrobních metod pro možnost výroby demonstrátoru vstříkovače:

- Dostupné – vhodné:
  - Konvenční obrábění
    - Vrtání (možné průměry děr jsou od 0,1 mm po 0,1 mm výše, maximální tloušťka materiálu pro ty nejmenší vrtáky cca 1 cm, u průměrů vrtáků pod 1 mm je výrazně vyšší riziko jejich zlomení v materiálu)
    - Soustružení (průměr obrobku do cca 10 cm)
    - Frézování

- Dostupné – potenciálně vhodné pro ověření návrhu:
  - 3D tisk z plastu (tekutina, která je pod vysokým tlakem se může dostat do malých spár v plastu a roztrhnout ho – může vyřešit 100 % výplň; relativně drsný povrch může ovlivňovat proudění)
- Nedostupné – vhodné:
  - 3D tisk z kovu (možnost plné optimalizace přívodních kanálků)
  - Tvrdé pájení v peci

Vhodný materiál pro demonstrátor je materiál lehký a pevný, jako např. dural, naopak nevhodným materiálem by byla např. nerezová ocel.

### **2.3. Principy a omezení návrhu**

Pro co nejvěrnější demonstraci bude uvažováno, jako by byl vstříkovač navrhován na skutečné pohonné látky.

Tak aby byla možná demonstrace s vodou není možné, aby jedna ze složek paliva byla plynná, jako v případě kombinace kapalného kyslíku a vodíku, který je v době vstříkávání již plynný. Z tohoto důvodu je nevhodné použití jednoduchého koaxiálního vstříkovacího prvku (bez víření) – pro demonstraci by nefungoval.

Z výkonového grafu čerpadla (Graf 1) je vidět, že maximální průtok je  $2 \frac{l}{s}$ , i když za velmi malého tlaku. Při porovnání této hodnoty s tabulkami 2 a 3 je při daných hmotnostních průtocích a hustotách paliv zřejmé, že se budeme dostupnými objemovými toky pohybovat v části motorků pro „reaction control system“ aplikace. Tyto motorky zpravidla používají jako palivo směs dimerní formy oxidu dusičitého (NTO) s monomethylhydrazinem (MMH). Proto bude dále demonstrátor vstříkovače navrhován tak, jako by pracoval s touto pohonnou směsí.

#### **2.3.1. Určení základních parametrů**

Při znalosti použitého paliva a okysličovadla známe i ideální směšovací poměr, který je pro kombinaci NTO s MMH 2,16 (okysličovadlo/palivo, tj. NTO/MMH) [35]. Ve skutečnosti se ale tento směšovací poměr nepoužívá, okysličovadlo by s největší pravděpodobností nezreagovalo všechno s palivem, ale docházelo by i k jeho reakci se stěnami komory. Proto byl směšovací poměr zvolen jako rozmezí 1,6 – 1,65 (tento poměr vychází z typických hodnot v tabulce 3).

Pro směs NTO s MMH se zpravidla (viz sekce 1.5) používají dubletové vstříkovací prvky, kdy se střetává přímo palivo (P) s okysličovadlem (O). Jejich počet a průměry se odvíjí nejen od celkového průtoku, ale i od dalších faktorů (více v kapitole 1.3.1).

Tlak ve spalovací komoře se pro danou aplikaci typicky pohybuje od 7 *bar* (700 *kPa*) výše (z tabulky 3). Tlak ve spalovací komoře bude tedy předpokládán 700 *kPa*. To znamená, že při doporučené hodnotě poklesu tlaku na vstřikovači ve velikosti 20 % tlaku ve spalovací komoře bude ve vstřikovacích prvcích tlak  $p = 700 \times 1,2 = 840 \text{ kPa}$ . Tento tlak se bude dále mírně navyšovat směrem od vstřikovače k pumpě v důsledku ztrát v přívodních kanálcích.

Při posouzení předchozích velikostí tlaků je zřejmé, že daných hodnot nelze při simulaci dosáhnout. Především hodnotu tlaku ve spalovací komoře nelze žádným jednoduchým způsobem simulovat a čerpadlo by také muselo dosahovat tlaků okolo 900 *kPa*. I tak ale může demonstrace probíhat za atmosférických podmínek s dostupným tlakem. Pro zjištění vnitřních ztrát ale bude nutné zmenšit pokles tlaku na vstřikovacích prvcích, tak aby nedocházelo ke kavitaci.

Po úvahách z bodu 2.1.1 a vzhledem k tabulce 3 byl zvolen celkový výchozí průtok jako  $\dot{V} = 0,5 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ , tak aby splňoval zadání a aby nebyl příliš velký – z praktických důvodů. Tento průtok odpovídá motorům o tahu řádově malých jednotek *kN* (z rovnice (14) a tabulky 3).

Výše zmíněné závěry jsou shrnuty v tabulce 4:

<b>Pohonná směs</b>	NTO/MMH
<b>Hustota okysličovadla (NTO)</b>	$1\,450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
<b>Hustota paliva (MMH)</b>	$880 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
<b>Ideální směšovací poměr</b>	2,16
<b>Zvolený směšovací poměr</b>	1,6 – 1,65
<b>Typ vstřikovacích prvků</b>	Dubleťové (O-P)
<b>Tlak ve spalovací komoře</b>	700 <i>kPa</i>
<b>Tlak ve vstřikovacích prvcích</b>	840 <i>kPa</i>
<b>Celkový průtok</b>	$0,000\,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Tabulka 4: Shrnutí parametrů pohonné směsi [35]

### 3. Návrh vstřikovacích prvků a jejich uspořádání

Nejprve budou určeny základní parametry, jako průměry děr a úhly pod kterými směřují proudové paprsky. Budou navrženy některé možné vzorce uspořádání a vybrané z nich budou analyzovány k pochopení míšení a vybrání toho nejvhodnějšího uspořádání dubletových vstřikovacích elementů. U vybraného řešení bude provedena simulace jak s teoretickými palivy NTO/MMH tak s vodou, s kterou bude pracovat demonstrátor.

#### 3.1. Výpočty

Určení celkové plochy průřezů všech vstřikovacích prvků pro palivo a okysličovadlo, tedy velikosti průměrů děr pro různá množství dubletů, určení úhlů vstřikování. Je vycházeno ze závěrů v sekci 2.3.1 shrnutých v tabulce 4.

##### 3.1.1. Hmotnostní toky

Po určení celkového hmotnostního toku  $\dot{m}$ , ho rozdělíme podle zvoleného směšovacího poměru  $r$  na hmotnostní tok okysličovadla  $\dot{m}_o$  a paliva  $\dot{m}_p$ :

$$\dot{m} = \dot{V}\rho = \dot{V} \left( \frac{\rho_o r + \rho_p}{r + 1} \right) = 0,000\ 5 \left( \frac{1450 \times 1,625 + 880}{1,625 + 1} \right) = 0,616\ 4 \frac{kg}{s} \quad (14)$$

$$\dot{m}_o = \frac{\dot{m}r}{(1+r)} = \frac{0,616\ 4 \times 1,625}{(1+1,625)} = 0,38\ 16 \frac{kg}{s} \quad (15)$$

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}}{(1+r)} = \frac{0,616\ 4}{(1+1,625)} = 0,234\ 8 \frac{kg}{s} \quad (16)$$

kde vztahy pro  $\dot{m}_o$  a  $\dot{m}_p$  byly získány odvozením z rovnic (3) a (4).

##### 3.1.2. Průměry otvorů

Pro zjištění průměrů otvorů použijeme upravenou rovnici (8),  $C_d$  bylo zvoleno 0,8:

$$d_o = \sqrt[4]{\frac{8\dot{m}_o^2}{\pi^2 N_o^2 C_d^2 \rho_o \Delta p}} = \sqrt[4]{\frac{8 \times 0,381\ 6^2}{\pi^2 N_o^2 \times 0,8^2 \times 1\ 450 \times 140\ 000}} = 5,49 \times 10^{-3} \times \frac{1}{\sqrt[2]{N_o}} [m] \quad (17)$$

$$d_p = \sqrt[4]{\frac{8\dot{m}_p^2}{\pi^2 N_p^2 C_d^2 \rho_p \Delta p}} = \sqrt[4]{\frac{8 \times 0,234\ 8^2}{\pi^2 N_p^2 \times 0,8^2 \times 880 \times 140\ 000}} = 4,879 \times 10^{-3} \times \frac{1}{\sqrt[2]{N_p}} [m] \quad (18)$$

V tabulce 5 je přehled výsledných kombinací průměrů pro počet párů  $N$  od 1 do 50 a pro doplnění i některé vyšší konfigurace. Výsledné průměry z rovnic (17) a (18) jsou zaokrouhleny

na dostupné velikosti vrtáků  $d_{x-v}$ . Pro tyto vyrobitelné průměry děr je z rovnice (19) vypočten směšovací poměr  $r$  (složení rovnic (3) a (5), předpokládáme stejná  $C_d$  a  $\Delta p$ ) a také odpovídající hmotnostní průtok  $\dot{m}$  (rovnice (20)):

$$r = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_p} = \frac{C_d A_o \sqrt{2\rho_o \Delta p}}{C_d A_p \sqrt{2\rho_p \Delta p}} = \frac{d_o^2 \sqrt{\rho_o}}{d_p^2 \sqrt{\rho_p}} = \frac{0,0055^2 \sqrt{1450}}{0,0049^2 \sqrt{880}} = 1,617 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{m} = \dot{m}_o + \dot{m}_p &= C_d \pi N \sqrt{\frac{\Delta p}{8}} (d_o^2 \sqrt{\rho_o} + d_p^2 \sqrt{\rho_p}) = \\ &= 0,8 \times \pi \times 1 \sqrt{\frac{140\,000}{8}} (0,005\,5^2 \sqrt{1\,450} + 0,004\,9^2 \sqrt{880}) = 0,62 \frac{kg}{s} \end{aligned} \quad (20)$$

$N$ [-]	$d_o$ [mm]	$d_p$ [mm]	$d_{o-v}$ [mm]	$d_{p-v}$ [mm]	$r$ [-]	$\dot{m}$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$
1	5,490	4,879	5,5	4,9	1,617	0,620
2	3,882	3,450	3,9	3,4	1,689	0,613
3	3,170	2,817	3,2	2,8	1,677	0,621
4	2,745	2,440	2,7	2,4	1,625	0,596
5	2,455	2,182	2,5	2,2	1,658	0,634
6	2,241	1,992	2,2	2,0	1,553	0,604
7	2,075	1,844	2,1	1,8	1,747	0,615
8	1,941	1,725	1,9	1,7	1,603	0,594
9	1,830	1,626	1,8	1,6	1,625	0,596
10	1,736	1,543	1,7	1,5	1,649	0,588
11	1,655	1,471	1,7	1,5	1,649	0,647
12	1,585	1,408	1,6	1,4	1,677	0,621
13	1,523	1,353	1,5	1,4	1,474	0,622
14	1,467	1,304	1,5	1,3	1,709	0,632
15	1,418	1,260	1,4	1,3	1,489	0,622
16	1,373	1,220	1,4	1,2	1,747	0,624
17	1,332	1,183	1,3	1,2	1,506	0,605
18	1,294	1,150	1,3	1,1	1,793	0,600
19	1,259	1,119	1,3	1,1	1,793	0,633
20	1,228	1,091	1,2	1,1	1,528	0,603
21	1,198	1,065	1,2	1,1	1,528	0,633
22	1,170	1,040	1,2	1,0	1,848	0,618
23	1,145	1,017	1,1	1,0	1,553	0,579
24	1,121	0,996	1,1	1,0	1,553	0,604
25	1,098	0,976	1,1	1,0	1,553	0,630
26	1,077	0,957	1,1	1,0	1,553	0,655
27	1,057	0,939	1,1	0,9	1,918	0,629
28	1,038	0,922	1,0	0,9	1,585	0,578
29	1,019	0,906	1,0	0,9	1,585	0,599

30	1,002	0,891	1,0	0,9	1,585	0,619
31	0,986	0,876	1,0	0,9	1,585	0,640
32	0,971	0,862	1,0	0,9	1,585	0,661
33	0,956	0,849	1,0	0,8	2,006	0,626
34	0,942	0,837	0,9	0,8	1,625	0,563
35	0,928	0,825	0,9	0,8	1,625	0,580
36	0,915	0,813	0,9	0,8	1,625	0,596
37	0,903	0,802	0,9	0,8	1,625	0,613
38	0,891	0,791	0,9	0,8	1,625	0,630
39	0,879	0,781	0,9	0,8	1,625	0,646
40	0,868	0,771	0,9	0,8	1,625	0,663
41	0,857	0,762	0,9	0,8	1,625	0,679
42	0,847	0,753	0,8	0,8	1,284	0,605
43	0,837	0,744	0,8	0,7	1,677	0,556
44	0,828	0,736	0,8	0,7	1,677	0,569
45	0,818	0,727	0,8	0,7	1,677	0,582
46	0,809	0,719	0,8	0,7	1,677	0,595
47	0,801	0,712	0,8	0,7	1,677	0,608
48	0,792	0,704	0,8	0,7	1,677	0,621
49	0,784	0,697	0,8	0,7	1,677	0,634
50	0,776	0,690	0,8	0,7	1,677	0,647
75	0,634	0,563	0,6	0,6	1,284	0,608
100	0,549	0,488	0,5	0,5	1,284	0,563

Tabulka 5: Přehled možných kombinací velikostí děr spolu s odpovídajícími směšovacími poměry a celkovými hmotnostními toky

Zeleně jsou v tabulce označeny směšovací poměry dané tabulkou 4, tedy v rozmezí od 1,6 do 1,65 a hmotnostní toky, které se liší od vypočtené hodnoty  $0,6164 \frac{kg}{s}$  o méně než 2%.

Z tabulky 5 je vidět, že i průměry pro vyšší množství párů  $N$  jsou teoreticky stále vyrobitelné, z této strany je tedy omezením jen pracnost výroby. Na druhou stranu pro malá množství párů jsou průměry poměrně velké. Z kapitoly 1.3.1 víme, že obvyklé rozmezí je od 0.33 do 7 mm a že většina vstřikovačů má průměry otvorů od 0,5 do 2 mm.

V jednom vstřikovači je teoreticky možná i kombinace různých velikostí průměrů (pro  $N$  větší než 1) – tyto kombinace a jejich průměry však v tabulce uvedeny nejsou.

Z hlediska velikostí průměrů a pracnosti jejich výroby by tedy nejvhodnější byly počty párů od 8 do cca 26 (pro které jsou oba průměry vrtáků alespoň 1 mm) a z hlediska odpovídajícího směšovacího poměru a hmotnostního toku by byl nejvhodnější 1 či 37 párů.

### 3.1.3. Úhly

Pro určení úhlů proudových paprsků využijeme rovnic (9) a (11), odpovídající úhly jsou zobrazeny na obrázku 14. Úhel, který svírá proud okysličovačla s osou spalovací komory  $\gamma_o$  zvolíme např.  $15^\circ$ , pro úhel proudu paliva  $\gamma_p$  pak dostáváme (pro hodnoty z tabulky 5 pro  $N = 1$ ):



$$\begin{aligned}
\gamma_p &= \sin^{-1} \left( \frac{\dot{m}_o v_o \sin \gamma_o}{\dot{m}_p v_p} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{\dot{m}_o \frac{\dot{V}_o}{A_o} \sin \gamma_o}{\dot{m}_p \frac{\dot{V}_p}{A_p}} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{\frac{\dot{m}_o^2}{A_o \rho_o} \sin \gamma_o}{\frac{\dot{m}_p^2}{A_p \rho_p}} \right) = \\
&= \sin^{-1} \left( \frac{\dot{m}_o^2 d_p^2 \rho_p \sin \gamma_o}{\dot{m}_p^2 d_o^2 \rho_o} \right) = \\
&= \sin^{-1} \left( \frac{0,383^2 \times 0,0049^2 \times 880 \times \sin 15^\circ}{0,2368^2 \times 0,0055^2 \times 1450} \right) = 19^\circ
\end{aligned} \tag{21}$$

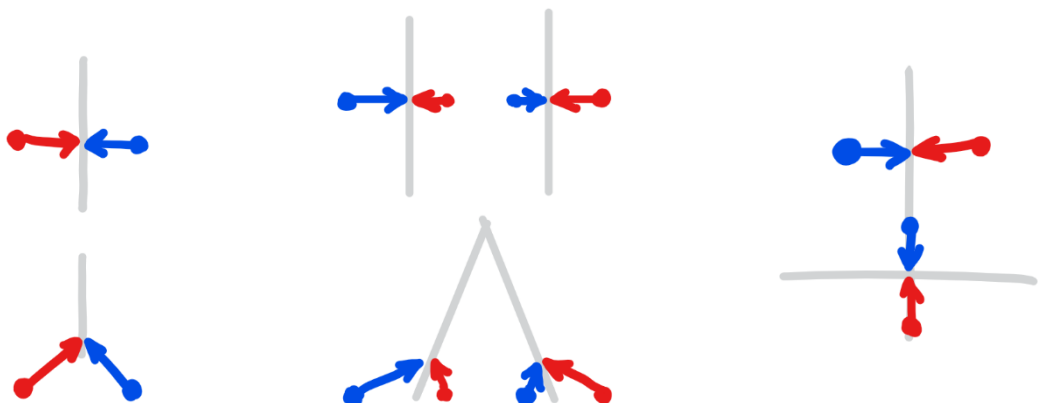
Další příklady možných úhlů pro hodnoty z tabulky 5 pro  $N = 1$  jsou v tabulce 6.

$\gamma_o$ [°]	$\gamma_p$ [°]
15	19
20	25,5
25	32,2
30	39
35	46,3
40	54,1

Tabulka 6: Úhly vstříkování

### 3.2. Možná řešení uspořádání

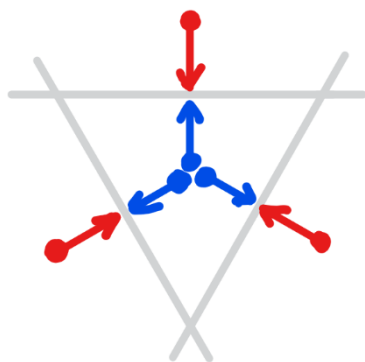
Na obrázcích 17 až 31 jsou zobrazeny některé možné konfigurace dubletových vstříkacích prvků, od jednoho po deset párů, vyšší konfigurace jsou také možné. Červeně jsou označeny proudové paprsky paliva, modře oxidací. Šedivé čáry pak naznačují směr tvorby hlavní části vějíře směsi. V místech průniků šedivých čar dochází k další interakci směsi.



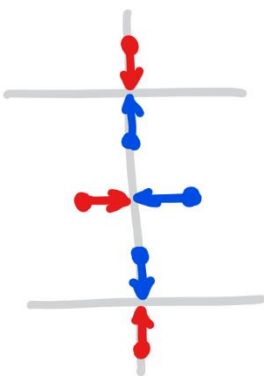
Obrázek 17: 1 dublet - nejjednodušší možné řešení (pohledu shora a z boku)

Obrázek 18: 2 dublety - interakce vzniklých vějířů je zajištěna jejich sklonem (pohled shora a z boku)

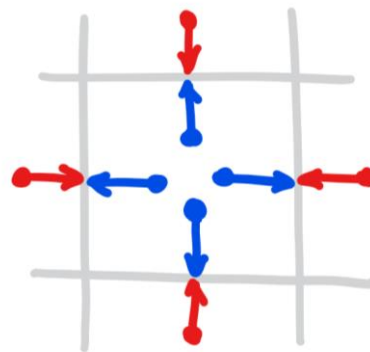
Obrázek 19: 2 dublety - kolmé uspořádání (pohled shora)



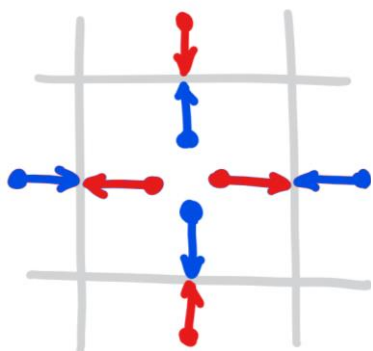
Obrázek 20: 3 dublety - uspořádání do rovnostranného trojúhelníku (pohled shora)



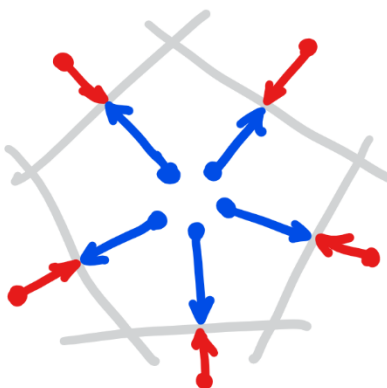
Obrázek 21: 3 dublety - kolmé uspořádání (pohled shora)



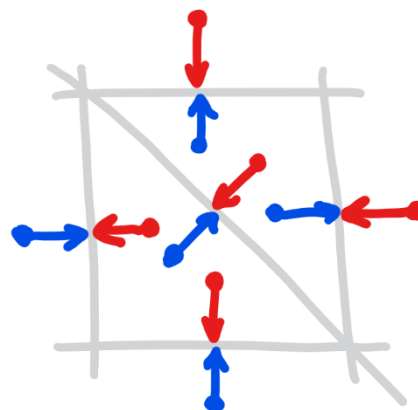
Obrázek 22: 4 dublety - uspořádání do čtverce, varianta 1 (pohled shora)



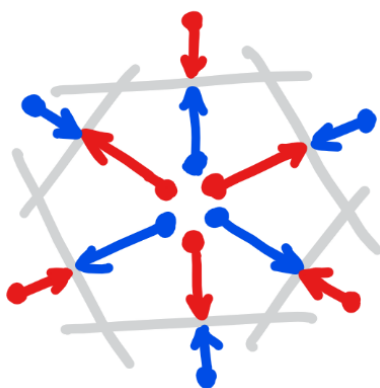
Obrázek 23: 4 dublety - uspořádání do čtverce, varianta 2 (pohled shora)



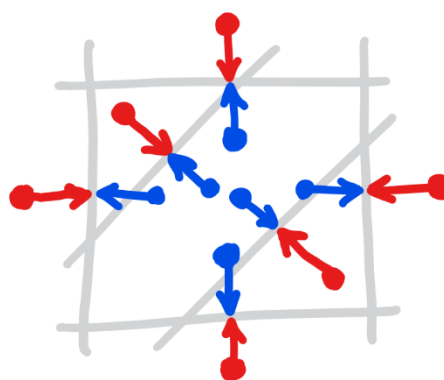
Obrázek 24: 5 dubletů - uspořádání do pravidelného pětiúhelníku (pohled shora)



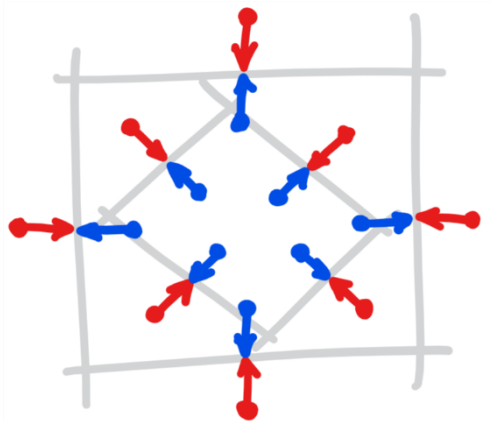
Obrázek 25: 5 dubletů - uspořádání do čtverce s centrálním dubletem (pohled shora)



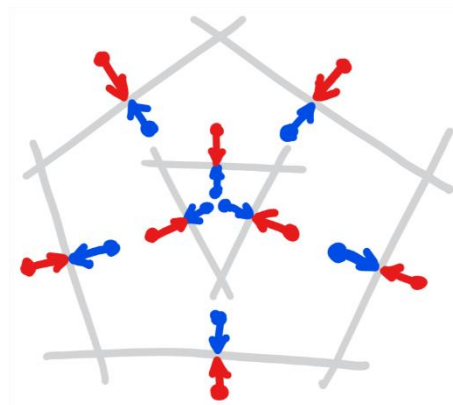
Obrázek 26: 6 dubletů - uspořádání do pravidelného šestiúhelníku (pohled shora)



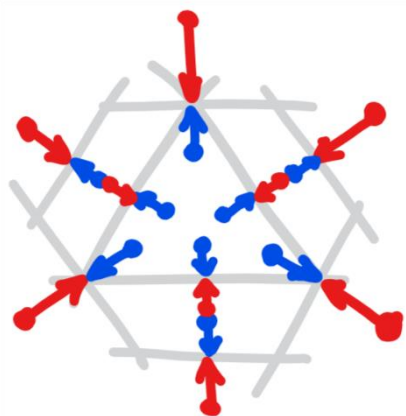
Obrázek 27: 6 dubletů - uspořádání do čtverce s dvěma centrálními proky (pohled shora)



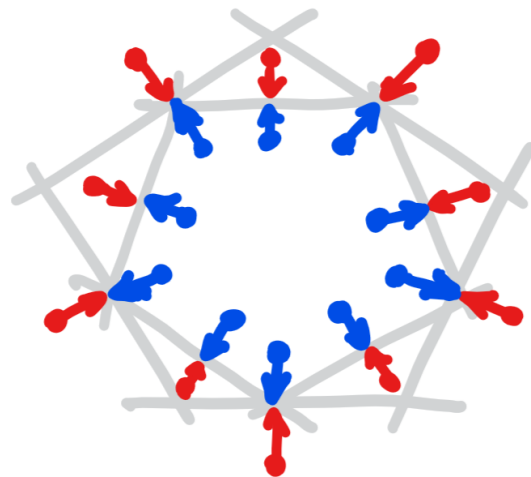
Obrázek 28: 8 dubletů - uspořádání do dvou čtverců uvnitř sebe (pohled shora)



Obrázek 29: 8 dubletů - uspořádání do pravidelného pětiúhelníku s vnitřním rovnostranným trojúhelníkem (pohled shora)



Obrázek 30: 9 dubletů - uspořádání do pravidelného šestiúhelníku s vnitřním rovnostranným trojúhelníkem (pohled shora)



Obrázek 31: 10 dubletů - uspořádání do dvou pravidelných pětiúhelníků uvnitř sebe (pohled shora)

U některých konfigurací (např. na obrázcích 27, 28 a 31) je výhodou blízkost děr stejné složky – tzn. jednodušší systém přívodních kanálků. U vyšších konfigurací by již docházelo k opakování podobných vzorců jako v prezentovaných případech – skládaly by se z cyklicky se opakujících elementů se soustřednými vzorci, jako u obrázků 28-31.

### 3.3. Analýza chování vstřikovacích vzorců pomocí CFD simulace

Pro výběr vhodného vzorce uspořádání vstřikovacích prvků (dubletů) je nezbytné podrobněji analyzovat tvorbu vějířů po střetu proudových paprsků a jejich vzájemnou interakci. Následující CFD modely nemají za úkol simulovat vypařování a spalování, ale dát obecný vhled do způsobu tvorby vějířů a míšení reaktantů.

### Použité parametry CFD simulací:

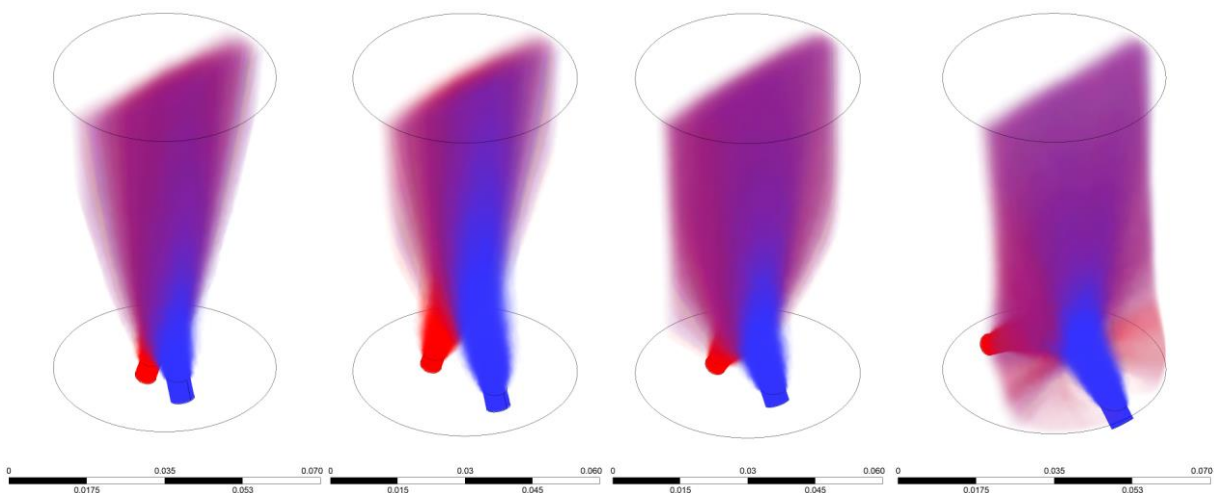
- Software: ANSYS Fluent
- Models:
  - Multiphase – Eulerian
    - Number of Eulerian Phases: 3
    - Formulation: Implicit (stabilnější pro větší časové kroky)
  - Viscous - k-epsilon (dobrá predikce daleko od stěn, na rozdíl od k-omega která má dobrou predikci blízko stěn)
- Hustoty a hmotnostní toky z tabulky 4 a rovnic (15) a (16)
- Time step size (s): 0,005
- Max Iterations/Time Step: 40

I když mají vzorce dubletů o počtech párů  $N < 8$  poměrně velké průměry děr (z kapitoly 3.1.2), mohou posloužit k vyhodnocení tvorby a charakteristik vznikajících vějířů. Pro dva proudové paprsky paliva a okysličovadla lze měnit úhel pod kterým se střetávají a vzdálenost od čela vstřikovače ve které se střetnou. Také pro interakci vějířů lze měnit úhly a vzdálenost jejich střetu. Zjištěné poznatky u těchto jednodušších modelů lze následně využít k optimalizaci vzorců s vyššími počty párů.

#### **3.3.1. Jeden vstřikovací pár**

Jako první je analyzován ten nejjednodušší příklad – jediný vstřikovací pár (#1 v tabulce 7, kde jsou přehledně porovnány úhly a vzdálenosti všech simulací). Výsledek simulace je na obrázku 32 vlevo a na obrázku 36 nahoře. Simulace dává smysluplný výsledek, který se navíc shoduje s předpoklady z obrázku 2. I přesto, že je paprsek proudu okysličovadla (znázorněn **modře**) většího průměru než paprsek proudu paliva (**červeně**), tvoří se hezký vějíř v axiálním směru, tak jak bylo vypočteno. Ve vějíři dochází k dobré atomizaci a smíšení reaktantů, jak je patrné z obrázku 36.

Byly modelovány i další tři případy jednoho dubletu.



Obrázek 32: Porovnání variant jednoho dubletového vstřikovacího prouku (izometrický pohled) (#1, #2, #3, #4)

V prvním případě (#2 v tabulce 7) zobrazeném na obrázku 32 (druhý zleva) a 36 uprostřed byla zvětšena vzdálenost střetu paprsků od čela vstřikovače zvětšením rozestupu otvorů. Původní proudový paprsek má v tomto případě delší dobu na "rozevření" a dochází k tvorbě rozměrnějšího vějíře, což je do určité míry vhodné. Naopak ale dochází k znatelně horšímu smíšení.

V druhém případě (#3 v tabulce 7; obrázek 32 (druhý zprava) a 36 dole) byl pozměněn úhel srážení paprsků, u okysličovadla z  $15^\circ$  na  $25^\circ$  a u paliva při dosazení do rovnice (21) z  $19^\circ$  na  $32,2^\circ$ . Výsledný vějíř je větší a vyznačuje se dobrým smíšením.

V třetím případě (#4 v tabulce 7; obrázek 32 vpravo a 37 nahoře) byl obdobně jako v předešlém případě pozměněn úhel srážení paprsků, ale tentokrát ještě do větších úhlů, u okysličovadla na  $40^\circ$  a u paliva na  $54,1^\circ$ . Sklon proudu paliva je v tomto případě až moc velký, nehledě na vyrobitelnost takovéto díry, dochází k proudění paliva kolem čela vstřikovače, tvoří se zde oblast bohatá na palivo a díky vzniklé menší celkové hybnosti paliva je vějíř nakloněn na stranu odkud proudí palivo. Palivo má v tomto případě až moc malou hybnost v axiálním směru. Na druhou stranu dochází k tvorbě vějíře většího než v předešlých dvou případech.

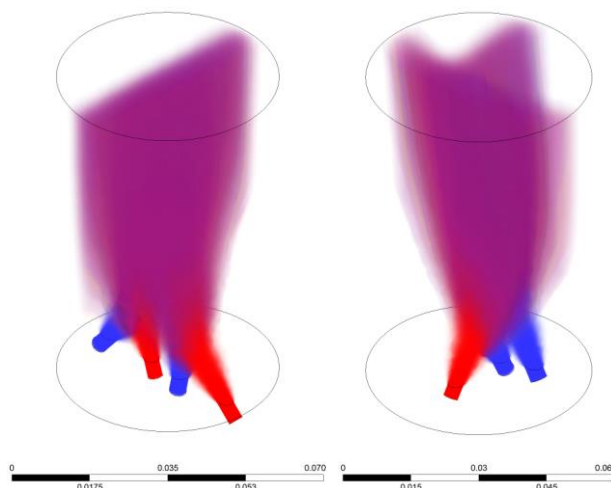
Z předešlých poznatků bylo usouzeno, že pro další analýzu lze jako vhodnou použít geometrii z případu #3 s tím, že vzdálenost  $x$  od čela vstřikovače po střet paprsků by měla být co nejmenší. Minimalizováním vzdálenosti  $x$  lze vměstnat více vstřikovacích prvků do stejného prostoru v případě vyšších počtů vstřikovacích párů.

### 3.3.2. Dva vstřikovací páry

Při simulacích jednoho dubletu bylo možné určit faktory ovlivňující tvorbu a velikost vějíře, simulace dvou a více dubletových vstřikovacích prvků umožňuje analyzovat vzájemné působení vějířů směsí.

Byly simulovány dvě konfigurace s dvěma páry vstřikovacích elementů, u obou bylo použito vybrané vhodné geometrie z bodu 3.3.1.

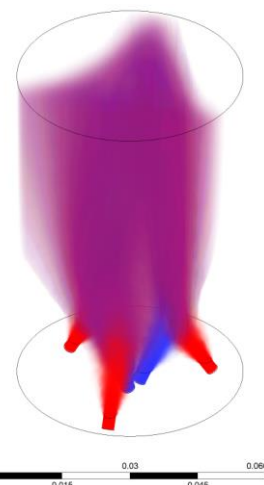
V první verzi dvou párů prvků (#5 v tabulce 7), zobrazené na obrázcích 33 vlevo a 37 uprostřed byla zkoumána interakce vějířů, kdy je osa jejich průniku kolmá na osu spalovací komory. V tomto případě již nelze mluvit o srážení, ale spíše o splnutí vějířů do jednoho. Tento jev není vhodný, ideální je aby byly reaktanty po celém průřezu komory rozděleny co nejrovnoměrněji.



Obrázek 33: Porovnání variant dvou párů dubletových vstřikovacích prvků (izometrický pohled) (#5, #6)

V druhé verzi (#6 v tabulce 7), zobrazené na obrázku 33 vpravo a 37 dole, byla obdobně jako v předešlém případě zkoumána interakce vějířů, v tomto modelu ale byla osa jejich průniku rovnoběžná s osou komory. Ani v této konfiguraci se vějíře nesrážejí ale jen okraj jednoho z nich splývá do druhého.

Z předešlých výsledků pro dva páry vstřikovacích prvků lze vyvodit, že pro atomizaci a smíšení jsou hlavní primární srážky samotných proudových paprsků než druhotné kolize vytvořených vějířů. Hlavním důvodem je mnohonásobně vyšší rozdíl vektorů hybností proudových paprsků. Z tohoto důvodu se dále směry a interakce vějířů budou používat jen k optimalizaci vyplnění prostoru nad čelem vstřikovače.



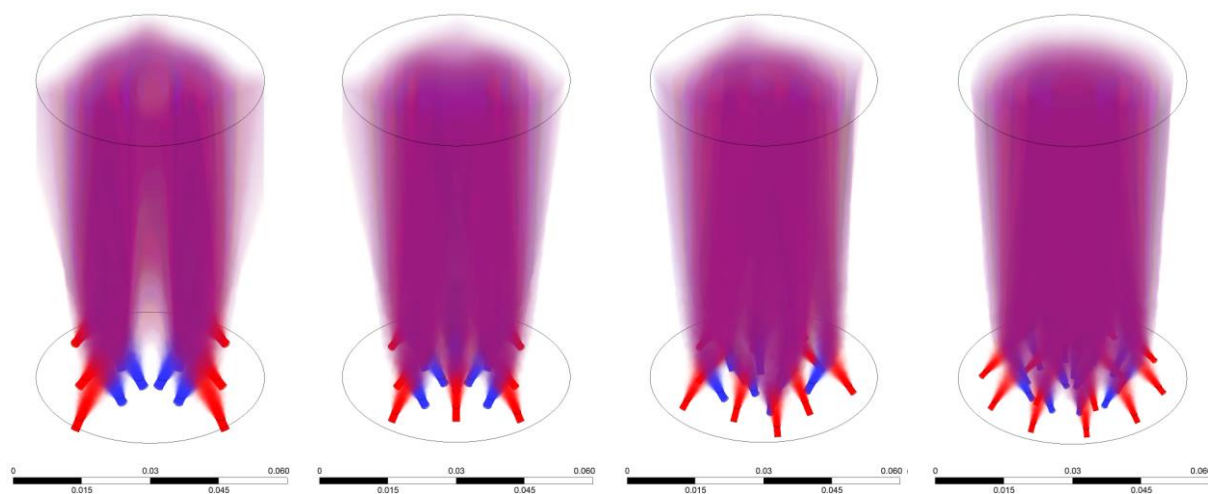
Obrázek 34: Tři páry dubletových vstřikovacích prvků uspořádané do rovnostranného trojúhelníka (izometrický pohled) (#7)

### 3.3.3. Tři vstřikovací páry

Tři dublety (#7 v tabulce 7), tak jak jsou zobrazené na obrázku 34 a 38 nahoře, také vychází z vhodných hodnot určených v bodě 3.3.1. Pro co nejlepší vyplnění prostoru (zejména středu mezi vějíři) byly vstupy pro proudy okysličovačla umístěny co nejbližší středu vstřikovače. Tato konfigurace dobře vyplňuje kruhový průřez, a proto by byla dobrá i jako centrální prvek u vyššího počtu párů.

### 3.3.4. Vyšší kombinace vstřikovacích párů

Po rozboru případů z bodů 3.3.1 až 3.3.3, při znalosti, že vyšší kombinace zajišťují lepší smíchání a při brání ohledu na výrobu budou dále nasimulovány vzorce z obrázků 27, 28 a 31, které slibují dobré výsledky.



Obrázek 35: Porovnání variant vyšších párů dubletových vstřikovacích prvků (izometrický pohled). Zleva 4+2 vnitř, 4 + 4 vnitř, 5 + 5 vnitř, 10 + 5 vnitř (#8, #9, #10, #11)

Simulace konfigurace z obrázku 27 (#8 v tabulce 7), je zobrazena na obrázku 35 vlevo a 38 uprostřed. Celkově dochází k dobrému smíšení, až na oblast kolem středu, mezi dvěma centrálními páry. Jelikož jsou proudy okysličovadla již velice blízko sebe nedá se tato oblast eliminovat jejich přiblížením k sobě, čímž je celá konfigurace nevhodná.

Model konfigurace z obrázku 28 (#9 v tabulce 7) je na obrázku 35 druhý zleva a na obrázku 38 dole. U konfigurací z této podkapitoly jsou si pohledy z boků velice podobné, tzn. že vzniklá směs rovnoměrně vyplňuje prostor.

Konfigurace z obrázku 31 (#10 v tabulce 7) se dvěma do sebe vsazenými pětiúhelníky je vidět na obrázku 35 druhá zprava a 39 nahoře. Vyplnění prostoru je o něco lepší, než u předchozí konfigurace.

Jako poslední byla nasimulována konfigurace s deseti vnějšími páry a pěti vnitřními (#11 v tabulce 7). Jak je patrné z obrázků 35 vpravo a 39 dole, dosahuje nejlepších výsledků – vyplnění prostoru a také dobře zakrývá všechny vstříkovací otvory při pohledu shora.

Při ohledu na smíšení a vyplnění prostoru by jako výsledná měla být zvolena konfigurace s co nejvyšším počtem párů  $N$ , které mohou být uspořádány do soustředných kružnic, tak aby vyplnili prostor co nejrovnoměrněji.

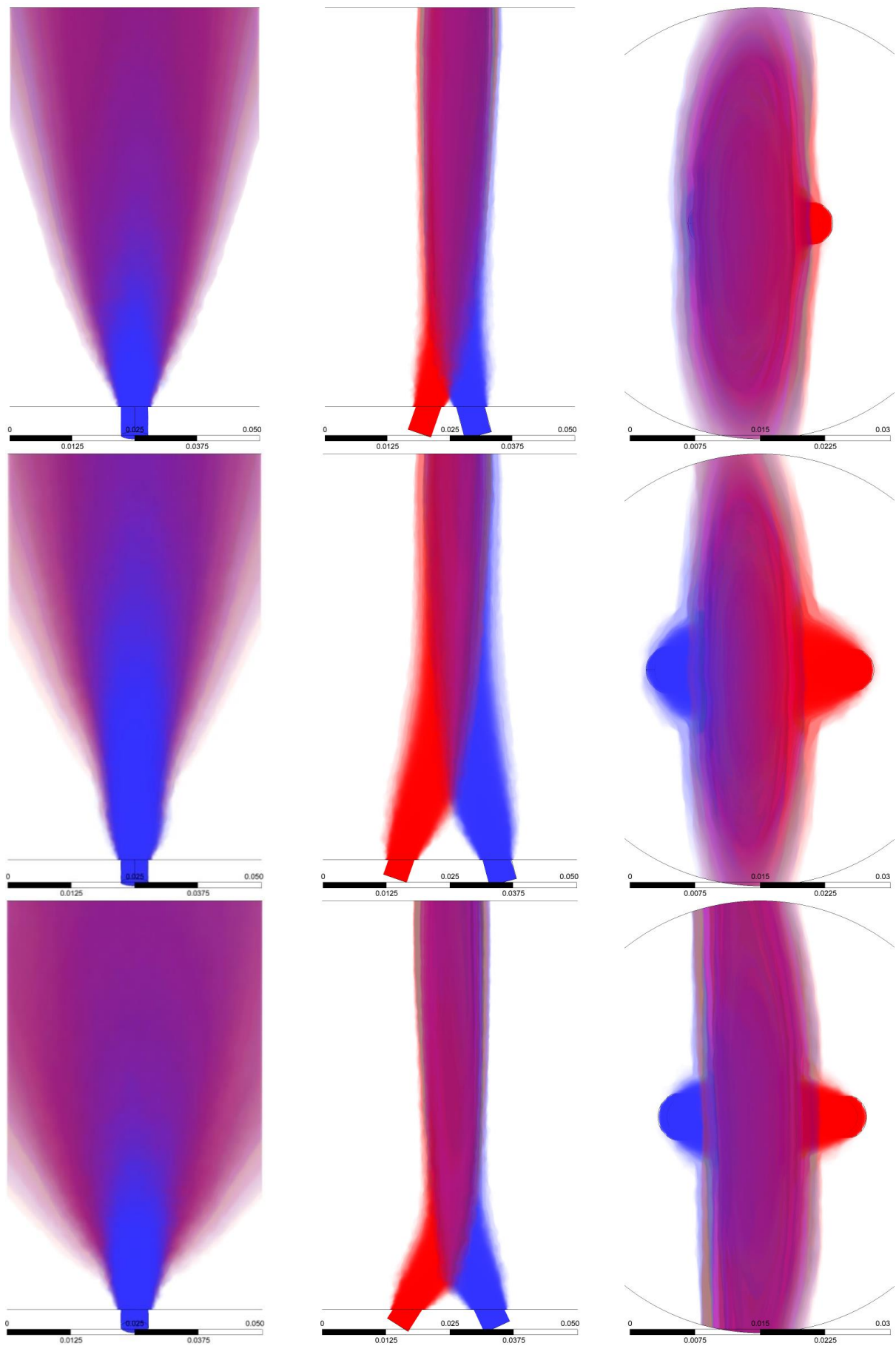
#	$N$	$d_o$ [mm]	$d_p$ [mm]	$\gamma_o$ [°]	$\gamma_p$ [°]	$x$ [mm]	$\varnothing d$ [mm]	$b$ [mm]
1	1	5,5	4,9	15	19	13,6	50	80
2	1	5,5	4,9	15	19	30,6	50	80
3	1	5,5	4,9	25	32,2	14,5	50	80
4	1	5,5	4,9	40	54,1	15	50	80
5	2	3,9	3,4	25*	33,8*	11,5	50	80
6	2	3,9	3,4	25	33,8	12,8	50	80
7	3	3,2	2,8	25	33,5	12,7	50	80
8	6	2,2	2,0	25	30,8	10,3	50	80
9	8	1,9	1,7	25	31,9	7	50	80
10	10	1,7	1,5	25	32,9	7	50	80
11	15	1,4	1,3	25	29,3	6,7	50	80

Tabulka 7: Přehled použitých geometrických parametrů v jednotlivých simulacích

\*navíc každý z párů nakloněn na stranu o 14°

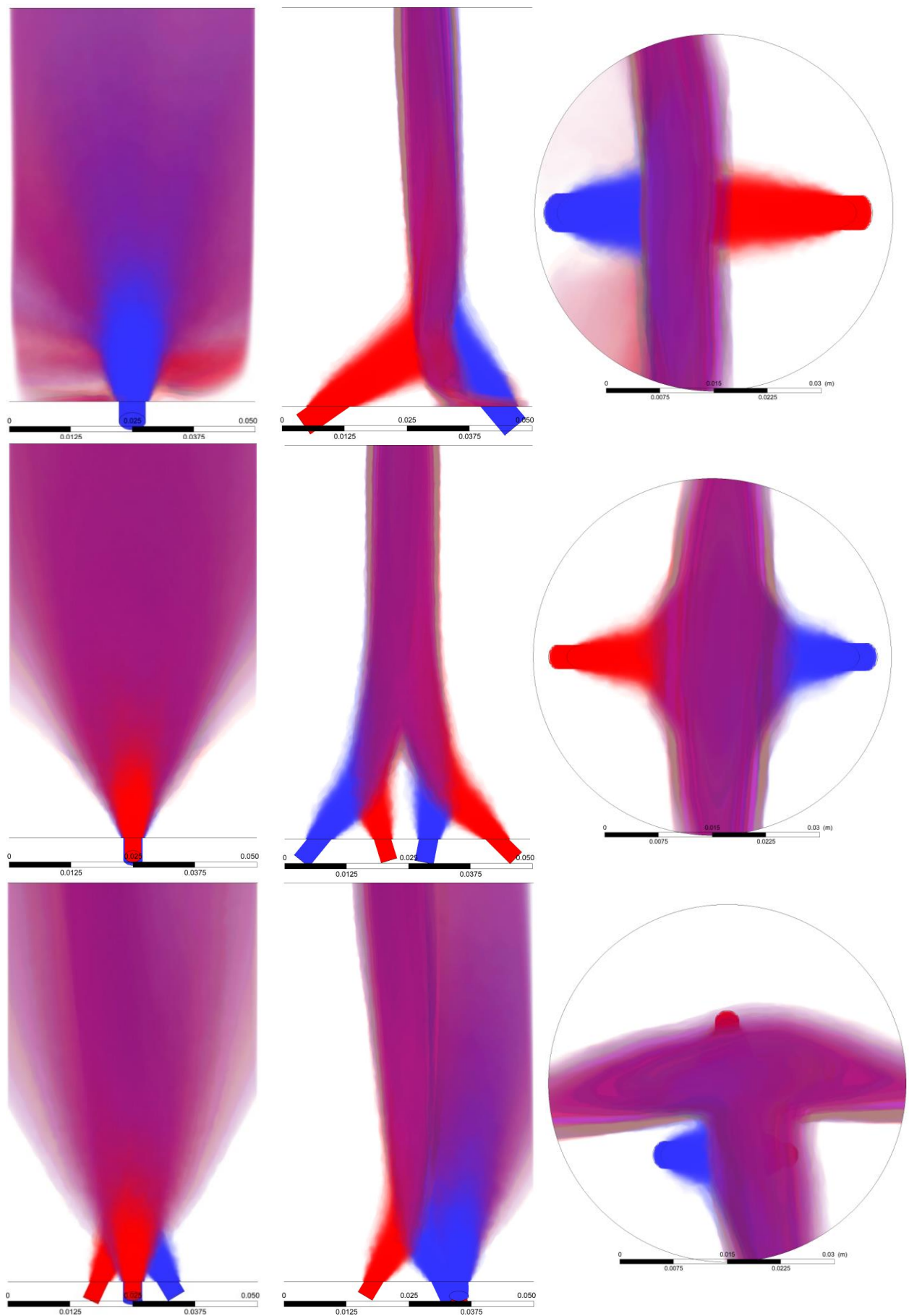
$x$  je vzdálenost od čela vstříkovače po průnik os dvou otvorů jednoho dubletu;  $\varnothing d$  je průměr a  $b$  výška kontrolní oblasti



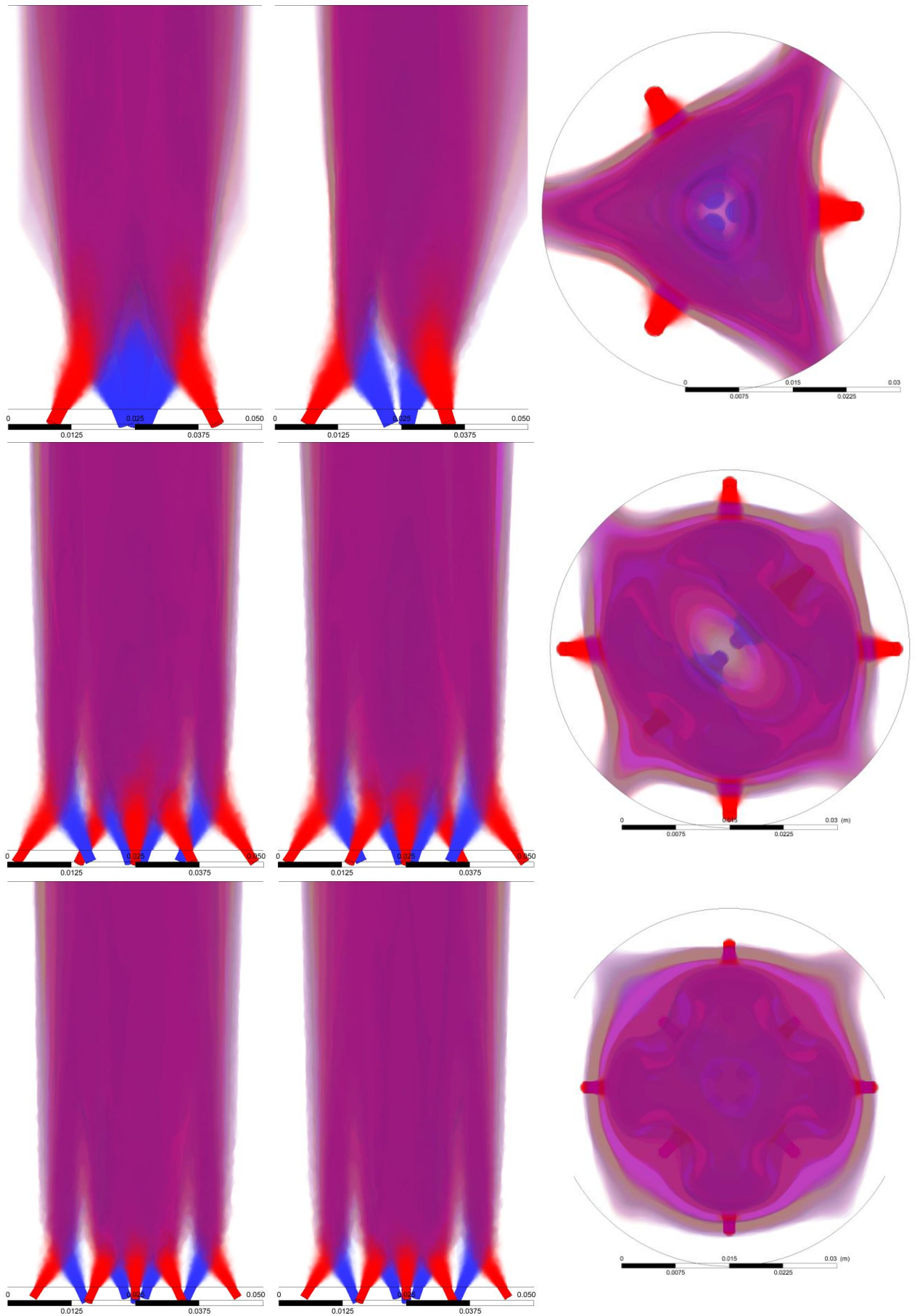


Obrázek 36: Porovnání variant jednoho dubletového vstřikovacího prouku (pohledy z boků a shora) (#1, #2, #3)

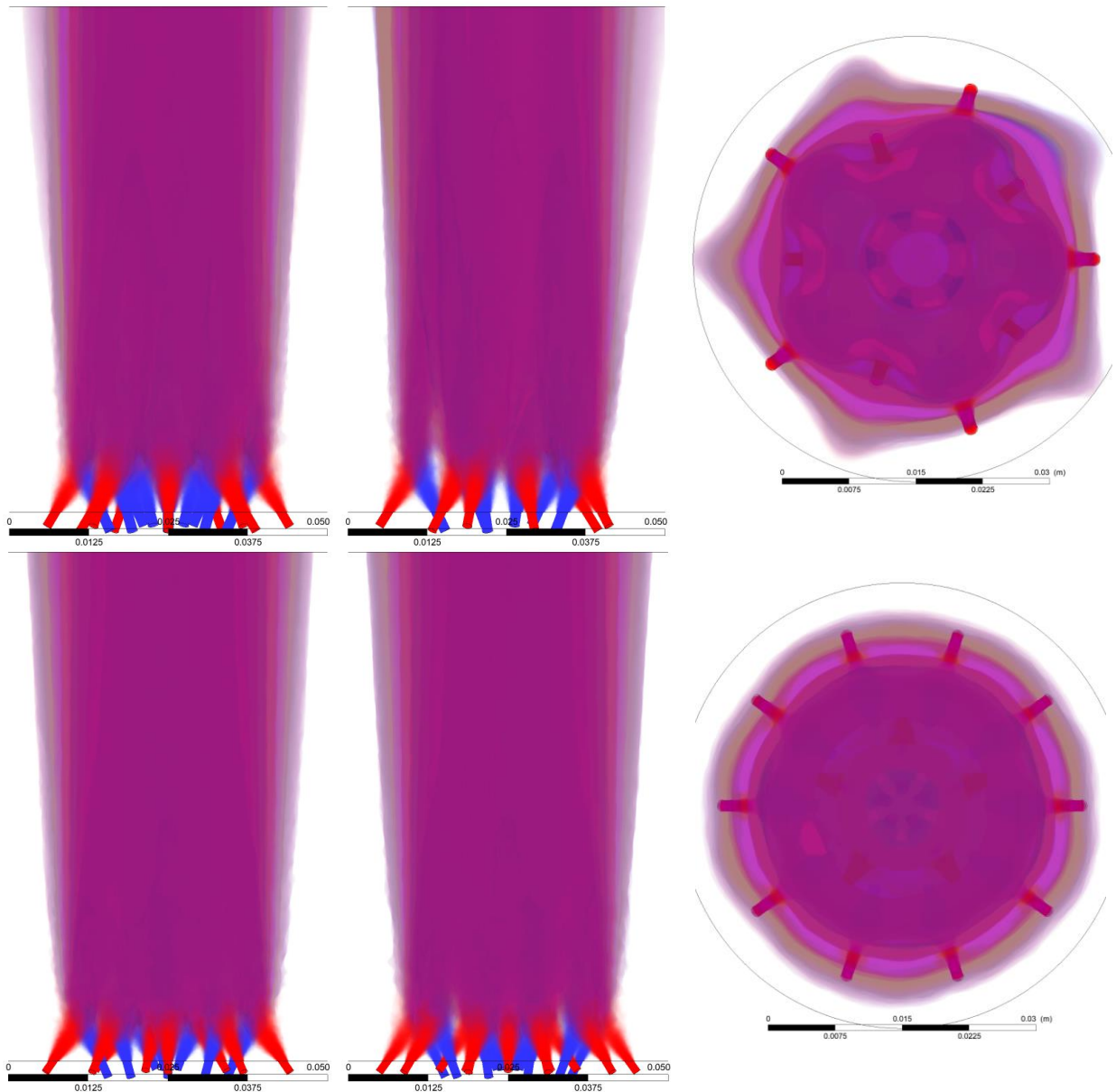




Obrázek 37: Porovnání jednoho dubletu s dvěma dubletovými vstříkovacími prvky (pohledy z boků a shora) (#4, #5, #6)



Obrázek 38: Porovnání tří, šesti (4+2 vnitř) a osmi (4+4 vnitř) dubletových vstřikovacích prvků (pohledy z boků a shora) (#7, #8, #9)



Obrázek 39: Porovnání deseti (5+5 uvnitř) a patnácti (10+5 uvnitř) dubletových vstřikovacích proků (pohledy z boků a shora) (#10, #11)

### 3.4. Vybrané řešení a jeho optimalizace

Pro vybraní řešení je nutné udělat kompromis mezi co nejlepším směřováním, tj. co nejvyšším počtem párů a náročností výroby, pro kterou je naopak lepší nižší počet párů. Zároveň je nutné vyhovět požadavku na průtok a správný směšovací poměr.

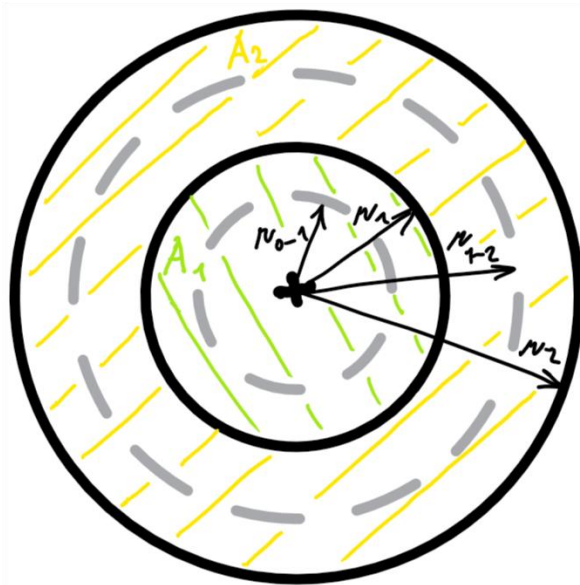
Znalosti z kapitoly 2.2 o možnostech výroby přeneseme do tabulky 5, tedy omezíme minimální vyrobitelný průměr na  $1\text{ mm}$ , tj. na  $N \leq 26$ . V tabulce 5 najdeme nejvyšší možnou hodnotu  $N$  pro  $N \leq 26$  pro které je směšovací poměr v požadovaném rozmezí daným v tabulce 4. Toho je splněno pro  $N = 11$ .

Pro  $N = 11$  jsou průměry  $d_o = 1,7\text{ mm}$  a  $d_p = 1,5\text{ mm}$ , směšovací poměr  $r = 1,649$  a hmotnostní průtok  $\dot{m} = 0,647 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  (což je 104,4% předem uvažovaného průtoku, podmínkám

ale vyhovuje). Odpovídající průtoky oksličovadla a paliva (z rovnic (15) a (16)) jsou  $\dot{m}_o = 0,4028 \frac{kg}{s}$  a  $\dot{m}_p = 0,2442 \frac{kg}{s}$ .

I když není jedenáct párů nikterak vysoké číslo, tato hodnota pro demonstrátor plně vyhovuje. Jak je vidět z analyzovaných případů #9, #10 a #11, vyšší čísla již mají poměrně zanedbatelný dopad na celkový výsledek.

Vybraný počet jedenácti párů byl rovnoměrně uspořádan do dvou soustředných kružnic s třemi páry uprostřed a osmi na vnějším okraji:



Obrázek 40: Náčrt ploch a poloměrů

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\pi r_1^2}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{3}{8} \quad (22)$$

$$r_2 = 25 \text{ mm (poloměr kontrolní oblasti)}$$

$$\Rightarrow r_1 = \sqrt{\frac{3r_2^2}{11}} = \sqrt{\frac{3 \times 25^2}{11}} = 13 \text{ mm} \quad (23)$$

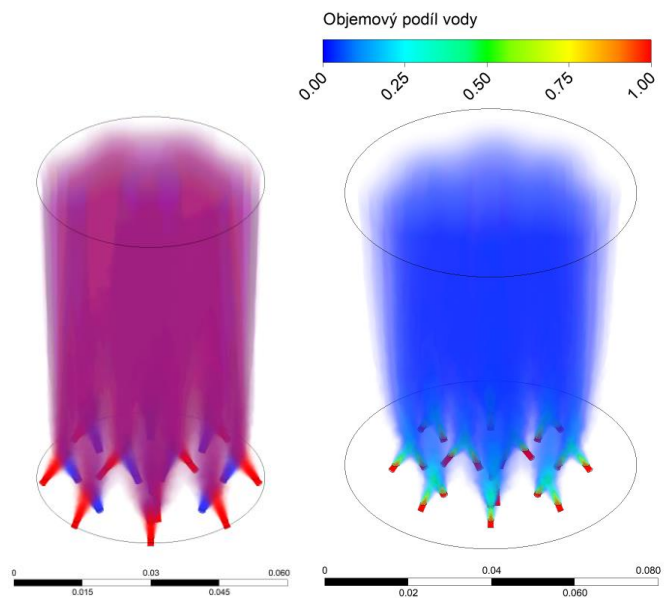
Vzdálenosti střetů od osy vstřikovače:

$$r_{0-1} = \frac{r_1}{2} = \frac{13}{2} = 6,5 \text{ mm} \quad (24)$$

$$r_{1-2} = r_1 + \frac{r_2 - r_1}{2} = 13 + \frac{25 - 13}{2} = 19 \text{ mm} \quad (25)$$

Pro porovnání s realitou při demonstraci s vodou byla provedena i CFD simulace s vodou za atmosférického tlaku za vstřikovačem a tlakem 200 kPa a 600 kPa ve vstřikovacích prvcích. Hmotnostní průtoky byly při simulaci s vodou zachovány, zvětšil se tedy objemový průtok z  $0,555 \frac{l}{s}$  pro reálná paliva na  $0,649 \frac{l}{s}$  pro vodu ( $\dot{V}_{o-w} = 0,404 \frac{l}{s}$  a  $\dot{V}_{p-w} = 0,245 \frac{l}{s}$ ).

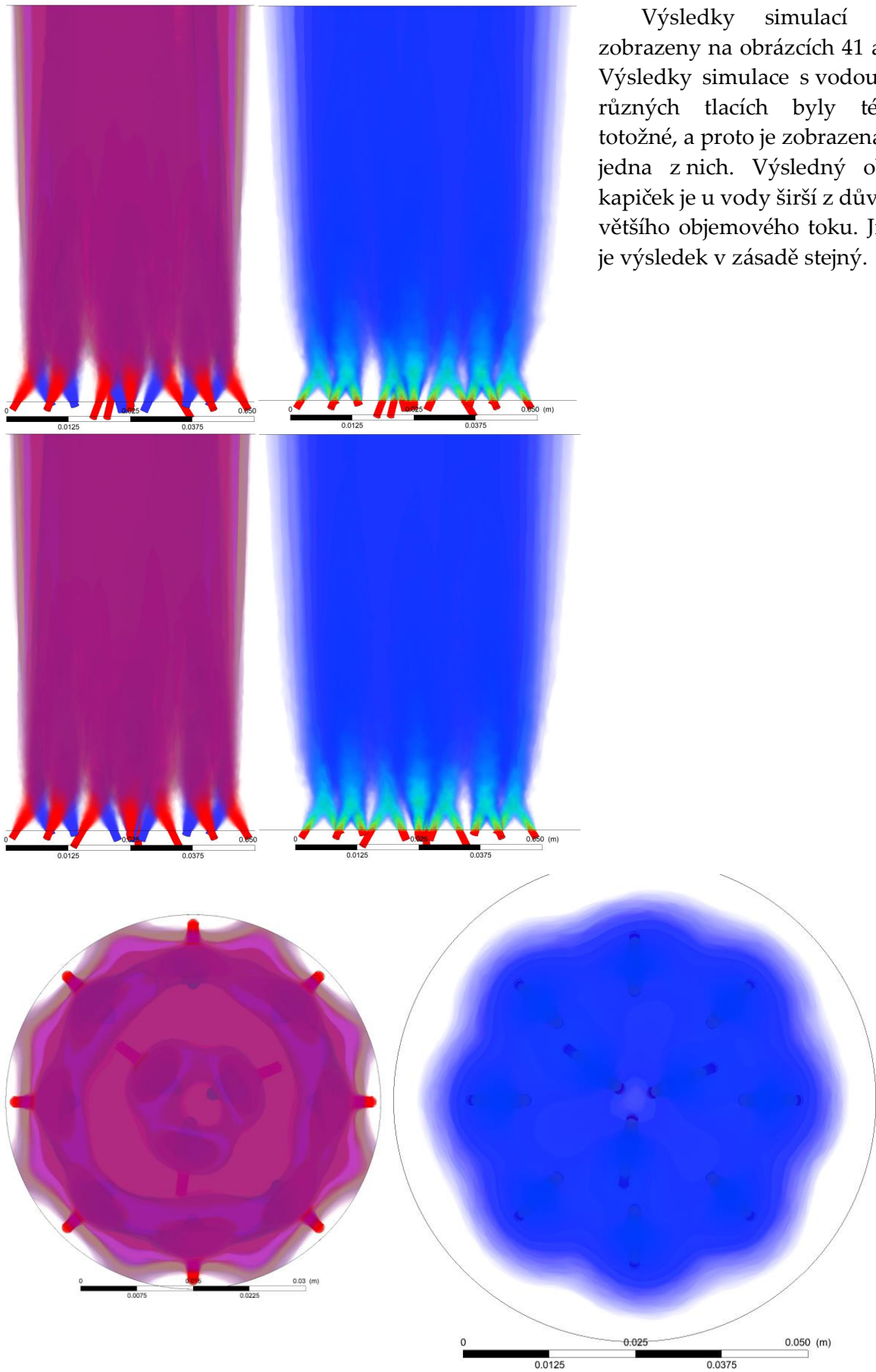
Další použité geometrické parametry:  $\gamma_o = 25^\circ, \gamma_p = 32,9^\circ, x = 6 \text{ mm}, \varnothing d = 50 \text{ mm}$  (pro simulaci s reálnými palivy) a  $\varnothing d = 70 \text{ mm}$  (pro simulaci s vodou),  $b = 80 \text{ mm}$ .



Obrázek 41: Porovnání vstřikování s palivy a s vodou (izometrický pohled)



Výsledky simulací jsou zobrazeny na obrázcích 41 a 42. Výsledky simulace s vodou při různých tlacích byly téměř totožné, a proto je zobrazena jen jedna z nich. Výsledný oblak kapiček je u vody širší z důvodu většího objemového toku. Jinak je výsledek v zásadě stejný.



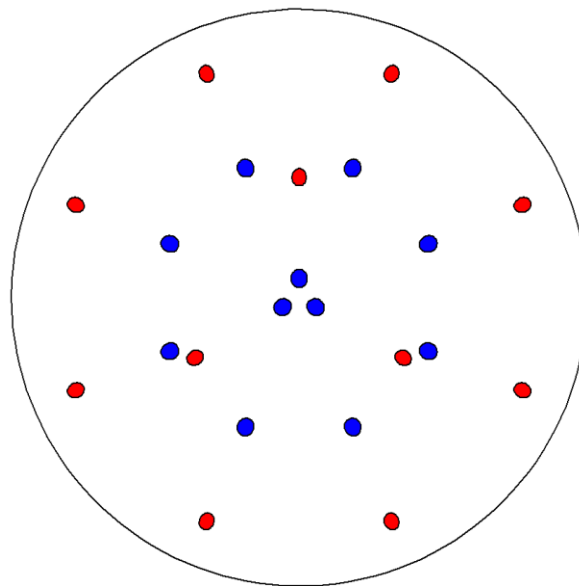
Obrázek 42: Porovnání vstřikování s palivou a s vodou (pohledy z boků a shora)

#### 4. Návrh přívodních kanálků

K jednotlivým vstřikovacím elementům je zapotřebí sítí přívodních kanálků přivést okysličovadlo nebo palivo, či v našem případě vodu (pro demonstraci). V kapitole 3 byly určeny všechny parametry vstřikovacích otvorů, z kterých bude dále vycházeno.

Minimální tloušťka materiálu mezi čelem vstřikovače a kanálky byla zvolena 3,5 mm, což je hodnota dostačující pro ustálení proudění ve směru osy otvorů a také hodnota zajišťující dostatečnou pevnost – při předpokládaných malých rozměrech kanálků. Tento rozměr spolu se závěry z kapitoly 3 umožňuje definovat pozice vstupů do jednotlivých otvorů, viz obrázek 43.

Při znalosti pozic vstupů do jednotlivých vstřikovacích otvorů je zapotřebí spojit kanálky všechny otvory pro palivo a jinými kanálky všechny otvory pro okysličovadlo. V kanálkách by přitom mělo docházet k co možná nejmenším tlakovým ztrátám, přitom by však měly mít rozumné rozměry. Z kapitoly 1.2 víme, že pro návrh kanálků se používají dvě metody s podobnými výsledky.



Obrázek 43: Znázornění pozic vstupů (tj. pohled ze strany kanálků) do jednotlivých vstřikovacích otvorů. Modře vstupují pro okysličovadlo, červeně pro palivo.

Podle metody, která pracuje se znalostí průřezů vstřikovacích otvorů by měl mít kanálek čtyřikrát větší průřez než součet průřezů všech vstřikovacích otvorů, které zásobuje. Z toho vyplývá, že při každém jednotlivém odpojení se jednoho vstřikovacího otvoru se musí průřez kanálku zmenšit.

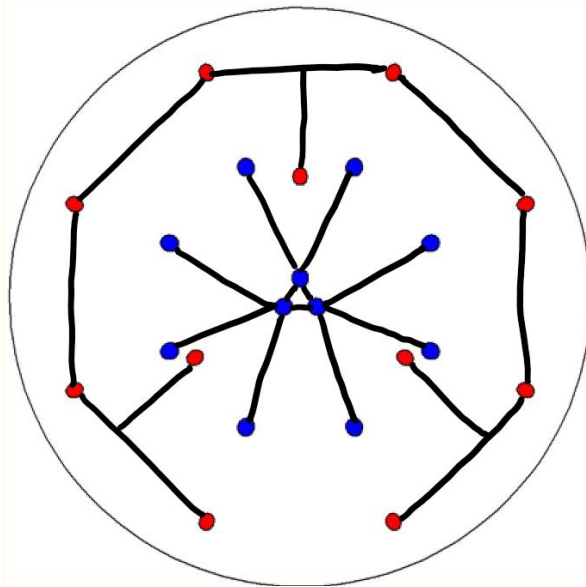
##### 4.1. Možnosti návrhu kanálků

Při znalosti, že kanálky musí být vyrobitelné konvenčními technologiemi se v principu nabízí dvě možnosti.

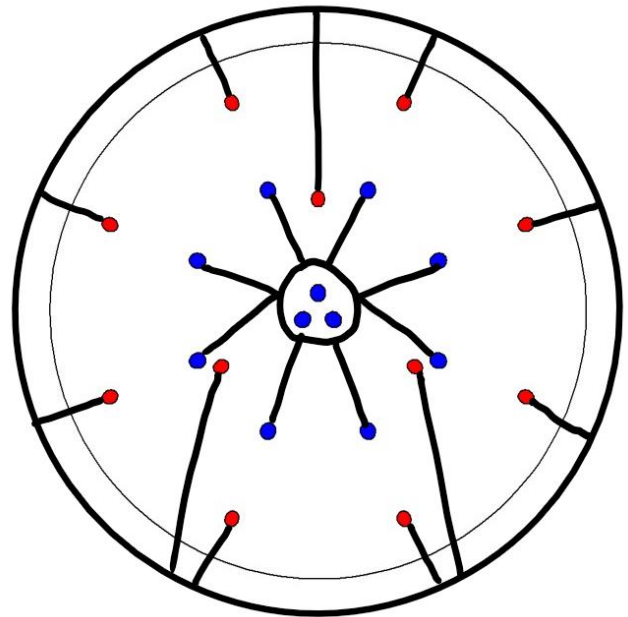
První z nich je spojení jednotlivých otvorů frézovanými drážkami. Na obrázku 44 je schematicky naznačeno, jak by mohly být otvory propojeny. Z druhé strany by se pak kanálky zakryly rovným protikusem a utěsnily mezi ně vloženým těsněním.

Druhou možností je vrtání kanálků, podobně jako na obrázku 12. Jednotlivé vrty pro palivo by radiálně vedly do vnějšího prstencového kanálku a vrty pro okysličovadlo šikmo či axiálně do dómu okysličovadla. Tato možnost je schematicky zobrazena na obrázku 45.

Jako principiálně jednodušší se jeví metoda první, je méně komplexní, nevyžaduje tak přesnou výrobu a jednoduše umožňuje fyzický přístup do všech částí kanálků. Proto byla vybrána tato technologie výroby kanálků.



Obrázek 44: Schéma propojení vstřikovacích otvorů systémem drážek



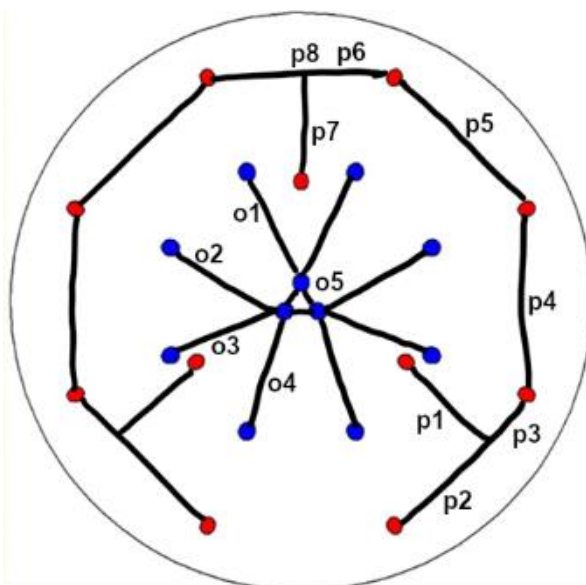
Obrázek 45: Schéma propojení vstřikovacích otvorů systémem vrtů

#### 4.2. Výpočty průřezů a rozměrů kanálků

Při znalosti průměrů otvorů paliva a okysličovadla můžeme určit velikosti průřezů jednotlivých otvorů:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} = \frac{\pi 1,5^2}{4} = 1,767 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

$$A_o = \frac{\pi d_o^2}{4} = \frac{\pi 1,7^2}{4} = 2,27 \text{ mm}^2 \quad (27)$$



Obrázek 46: Označení sekcí kanálků rozdílných průřezů

Jelikož je průřez otvorů paliva menší, je zapotřebí nejdříve navrhnout jeho kanálky. Musí totiž být zvolena jejich hloubka, která bude stejná pro kanálky paliva i okysličovadla a jelikož mají otvory paliva menší průřez, bude i jejich šířka menší.

V obrázku 46 jsou systematicky označeny rozdílné velikosti průřezů kanálků, přičemž p8 a o5 symbolizují průměr přívodu pro všechny kanálky. Systém kanálků je symetrický, a proto je označena vždy jen jedna strana.

#### 4.2.1. Kanálky paliva

Pro průřez kanálků p1, p2 a p7 tedy platí:

$$A_{p1} = A_{p2} = A_{p7} = 4 \times A_p = 7,069 \text{ mm}^2 \quad (28)$$

Šířka kanálku p1 je na rozdíl od kanálků p2 a p7 limitována kanálkem o3. Minimální vzdálenost mezi těmito dvěma kanálky (tj. tloušťka stěny) byla zvolena 0,5 mm. Při tečném napojení kanálku na vstřikovací otvor nám pak šířka kanálku p1 vyjde  $b_{p1} = 1,8 \text{ mm}$  (z modelu). Průřez kanálku má obdélníkový tvar, tedy hloubka kanálků  $h$  je rovna:

$$h = \frac{A_{p1}}{b_{p1}} = \frac{7,069}{1,8} = 3,927 \doteq 4 \text{ mm} \quad (29)$$

Jelikož kanálky p2 a p7 nejsou tak jako kanálek p1 limitovány přívodními kanálky okysličovačla, je žádoucí je z výrobního hlediska udělat mělčí a širší, např. čtvercového průřezu, tedy:

$$h_{p2} = h_{p7} = b_{p2} = b_{p7} = \sqrt{A_{p2}} = \sqrt{7,069} = 2,659 \doteq 2,7 \text{ mm} \quad (30)$$

Pro průřez a šířku kanálku p3 platí:

$$A_{p3} = A_{p1} + A_{p2} \quad (31)$$

$$hb_{p3} = hb_{p1} + h_{p2}^2 \quad (32)$$

$$\Rightarrow b_{p3} = b_{p1} + \frac{h_{p2}^2}{h} = 1,8 + \frac{2,7^2}{4} = 3,623 \text{ mm} \quad (33)$$

Pro průřez a šířku kanálku p4 platí:

$$A_{p4} = 4A_p + A_{p3} \quad (34)$$

$$hb_{p4} = 4A_p + hb_{p3} \quad (35)$$

$$\Rightarrow b_{p4} = \frac{4A_p}{h} + b_{p3} = \frac{7,069}{4} + 3,623 = 5,39 \doteq 5,4 \text{ mm} \quad (36)$$

Obdobně pro šířku kanálků p5 a p6:

$$b_{p5} = \frac{4A_p}{h} + b_{p4} = \frac{7,069}{4} + 5,4 = 7,167 \doteq 7,2 \text{ mm} \quad (37)$$

$$b_{p6} = \frac{4A_p}{h} + b_{p5} = \frac{7,069}{4} + 7,2 = 8,967 \doteq 9 \text{ mm} \quad (38)$$

Přívod do kanálků paliva se předpokládá kruhového průřezu, pro průřez přívodu  $A_{p8}$  a jeho průměr  $d_{p8}$  tedy platí:

$$A_{p8} = 2A_{p6} + A_{p7} \quad (39)$$



$$\frac{\pi d_{p8}^2}{4} = 2hb_{p6} + h_{p7}^2 \quad (40)$$

$$\Rightarrow d_{p8} = \sqrt{\frac{8hb_{p6} + 4h_{p7}^2}{\pi}} = \sqrt{\frac{8 \times 4 \times 9 + 4 \times 2,7^2}{\pi}} = 10,048 \doteq 10,1 \text{ mm} \quad (41)$$

#### 4.2.2. Kanálky okysličovadla

V případě kanálek okysličovadla budou mít kanálky zásobující vnějších 8 otvorů stejné průřezy, a totožné tvary, až na kanálky o3, které budou muset být mírně zahnuté. Při určování rozměrů kanálek paliva již byla určena hloubka kanálek, která je stejná i pro kanálky okysličovadla. Šířka kanálek o1, o2, o3 a o4 je tedy rovna:

$$b_{o1} = b_{o2} = b_{o3} = b_{o4} = \frac{4A_o}{h} = \frac{4 \times 2,27}{4} = 2,27 \doteq 2,3 \text{ mm} \quad (42)$$

Nad třemi centrálními vstřikovacími otvory bude umístěn přívod do kanálek okysličovadla o5. Pro jeho kruhový průřez  $A_{o5}$  a průměr  $d_{o5}$  platí:

$$A_{o5} = 8A_{o1} + 3 \times 4A_o \quad (43)$$

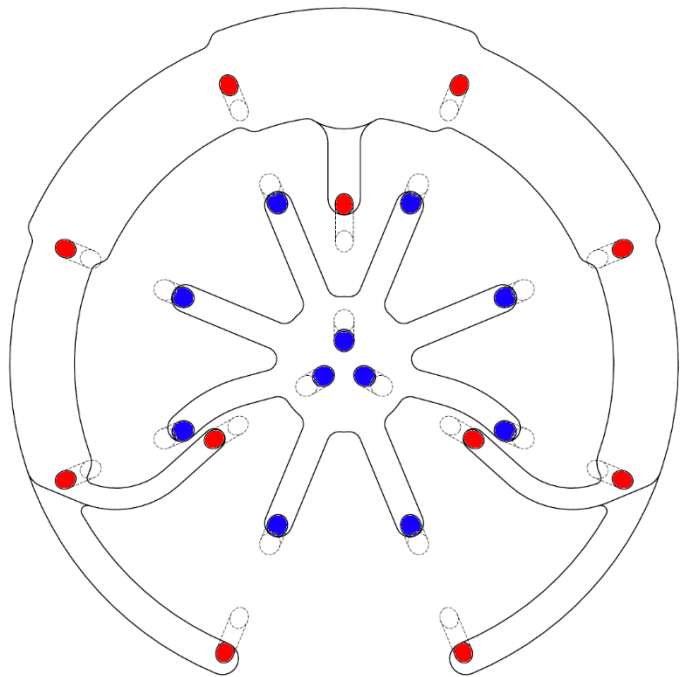
$$\frac{\pi d_{o5}^2}{4} = 8hb_{o1} + 12A_o \quad (44)$$

$$\Rightarrow d_{o5} = \sqrt{\frac{32hb_{o1} + 48A_o}{\pi}} = \sqrt{\frac{32 \times 4 \times 2,3 + 48 \times 2,27}{\pi}} = 11,398 \doteq 11,4 \text{ mm} \quad (45)$$

#### 4.3. Obecný návrh tvaru

Velmi schematická spojení z obrázku 44 je zapotřebí optimalizovat tak, aby proudění v kanálcích muselo co nejméně zatáčet, obzvláště je zapotřebí eliminovat kanálky malých poloměrů zatáčení.

Proto byl jako hlavní kanálek paliva zvolen kanálek prstencového tvaru, přerušovaný na opačné straně, než je přívod. Z tohoto prstencového kanálku, který zásobuje všechny vstřikovací otvory paliva po obvodu odbočují tři malé radiální kanálky pro zásobování třech vnitřních vstřikovacích otvorů paliva. Dva z nich jsou optimalizovány tak, aby při



Obrázek 47: Obecný návrh tvaru přívodních kanálek

přechodu z prstencového kanálku nemuselo proudění příliš měnit směr.

Kanálky okysličovačla jsou založeny na jednoduchém principu centrální hvězdice. Okysličovačlo jde přímo z přívodu nad středem vstřikovače do třech centrálních vstřikovacích otvorů a z velké kruhové díry radiálními kanálky do vnějších osmi. Kanálky pro dva vnější vstřikovací otvory nemohou z důvodu blízkosti vstřikovacích otvorů paliva vést přímo, ale musí být mírně do zatáčky.

#### **4.4. Optimalizace tlakových ztrát**

Kanálky pro palivo a okysličovačlo byly analyzovány zvlášť, jelikož proudění v nich je na sobě nezávislé. Analýza probíhala pomocí CFD simulací. Nejprve jsou analyzovány a optimalizovány kanálky okysličovačla, jejichž systém je jednodušší.

##### Použité parametry CFD simulací:

- Software: ANSYS Fluent
- Models:
  - Viscous – SST k-omega (dobrá predikce blízko stěn)
- Hmotnostní toky z kapitoly 3.4:  $\dot{m}_o = 0,4028 \frac{kg}{s}$  a  $\dot{m}_p = 0,2442 \frac{kg}{s}$
- Médium: voda
- Tlak na výstupu: atmosférický

##### **4.4.1. Kanálky okysličovačla**

Kanálky okysličovačla byly v kontrolních místech zobrazených na obrázku 48 analyzovány na celkový tlak a rychlost (v obou případech šlo o hmotnostně vážené průměry). Celkem se se vstupem a výstupem jedná o 15 kontrolních ploch, které jsou označené písmenem a číslem. Tyto plochy zůstaly umístěny v různých verzích na stejných místech.

Byly simulovány tři různé verze (označené W1, W2 a W3). Rozdělení kanálků kontrolními průřezy umožnilo vždy udělat více než jen jednu změnu mezi jednotlivými variantami. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 8.

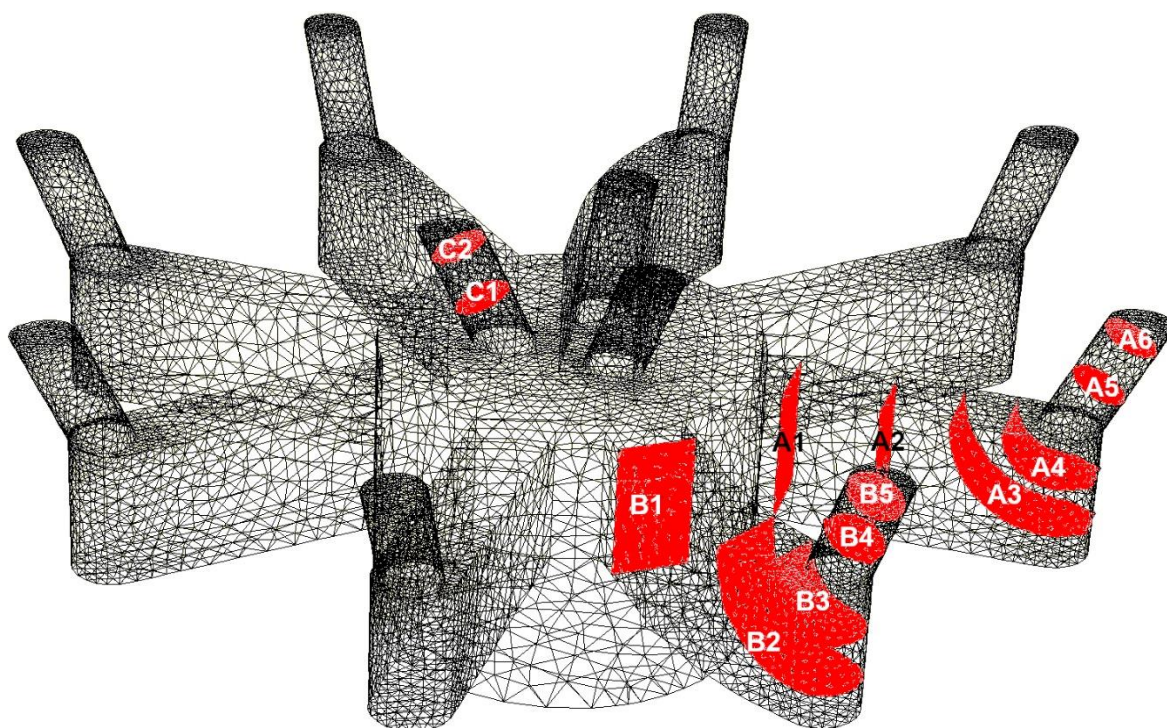
**Verze W1:** Výchozí verze, je zobrazena na obrázcích 48 až 51. Na obrázcích 49 a 50 je zobrazeno výsledné rozložení rychlostí proudění v kanálkách. Dle předpokladů je proudění v přívodních kanálkách pomalejší než ve vstřikovacích otvorech. Zajímavé je rozdělení radiálních kanálků na pomalejší a rychlejší proud. V obrázku 51 kde jsou zobrazeny proudnice (spolu s vykreslením rychlostí), lze krásně pozorovat, jak se proud rozděluje do jednotlivých vstřikovacích otvorů/radiálních kanálků. Tlakové ztráty v tomto případě tvoří 26,2 % vstupního tlaku.

**Verze W2:** Oproti verzi W1 byly zaobleny vstupy do radiálních kanálků, zkoseny hrany vstupů do centrálních vstřikovacích otvorů a zaobleny hrany na vstupech do vnějších vstřikovacích otvorů. Popsané geometrické změny jsou spolu s výsledným rozložením rychlostí vidět na obrázku 52 nahoře. Při analýze dat z tabulky 8 je zřejmé, že veliký vliv na tlakové ztráty má obrobení (zkosení či zaoblení) vstupů do vstřikovacích otvorů. Ztráty se při

použití této geometrie snížili z původních 26,2 % ve verzi W1 na 16,3 %. Proudění je umožněno lépe přejít do užších vstřikovacích otvorů. Kromě obrobení vstupů do vstřikovacích otvorů mělo pozitivní vliv i zaoblení na vstupech do radiálních kanálků.

**Verze W3:** Dna kanálků byla zaoblena rádiusem 0,5 mm, z tohoto důvodu bylo nutné prodloužit radiální kanálky o 0,5 mm. U všech vstupů do vstřikovacích otvorů bylo použito zkosení 0,2 mm, změny z W2 byly zachovány. Celkové tlakové ztráty v tomto případě tvoří 20,4 % vstupního tlaku, což je méně než ve verzi W1, ale více než ve verzi W2. Vyšší ztráty oproti verzi W2 jsou pravděpodobně dány zmenšením průřezu zaoblením dna kanálků. Vzrostly ztráty při vstupu do vstřikovacích otvorů, což může být dáno přesahem radiálních kanálků o 0,5 mm za vstřikovací otvor. Naopak se ale snížili ztráty v samotném vstřikovacím otvoru. Geometrie i rozložení rychlostí pro tuto verzi je zobrazeno na obrázku 52 dole.

Z tabulky je zřejmé, že při simulacích nedošlo k plné konvergenci (např. pro případ W3 se na kontrolní ploše A4 vyskytuje o 1 kPa vyšší celkový tlak než na kontrolní ploše A3, která ji předchází). Z fyzikálního hlediska tento jev nemůže nastat, odchylky jsou ale zanedbatelné.

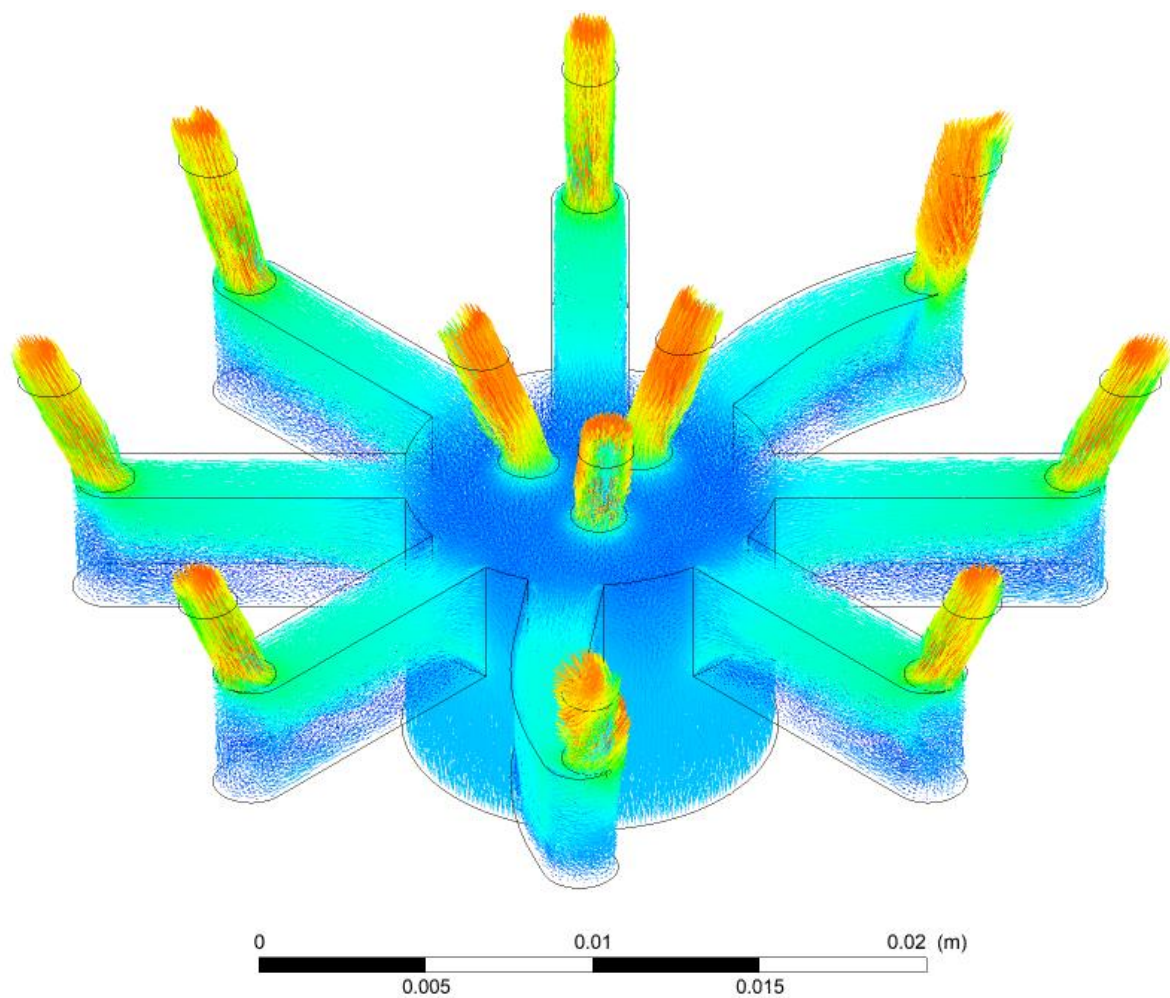


Obrázek 48: Zobrazení kontrolních průřezů v kanálkách oksyličovadla pro případ W1. (Síť slouží pouze k ilustraci a neodpovídá skutečně použité síti.)

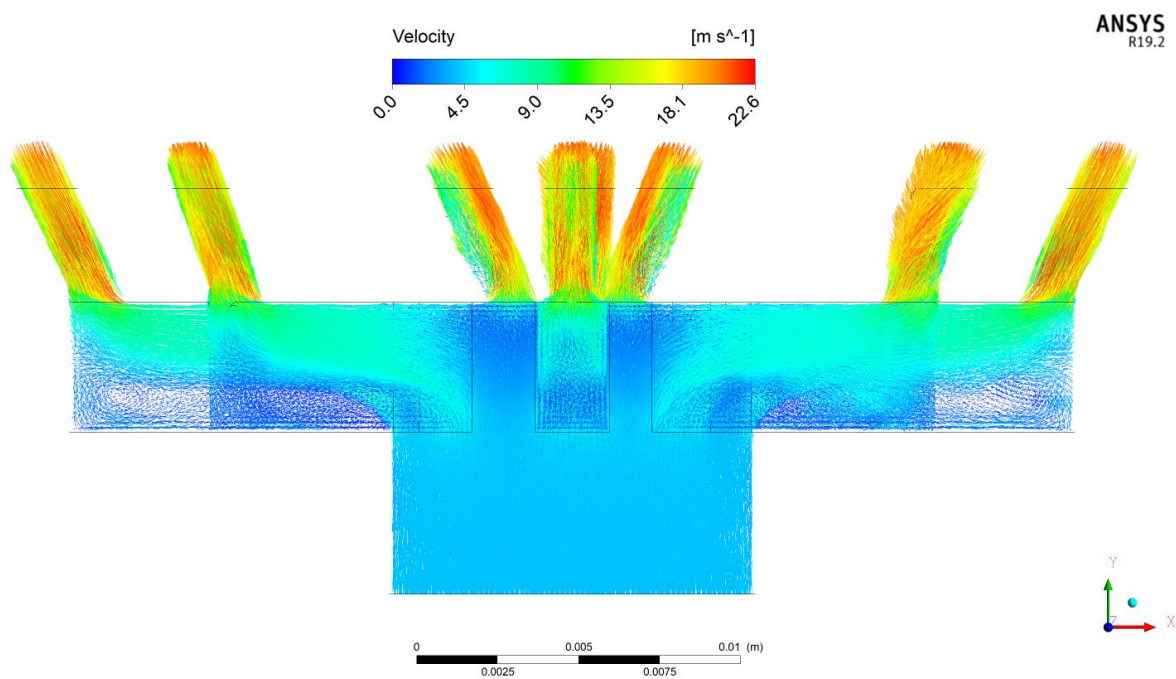
Simulovaný případ	W1		W2		W3	
<b>Popis případu</b>	- výchozí - obrázky z tohoto případu		- zaoblení vstupů do radiálních kanálků - zkosení na centrálních vstřikovacích otvorech - zaoblení na vnějších vstřikovacích otvorech		- zaoblení jako při frézování (0,5 mm) => prodloužení radiálních kanálků o 0,5 mm - změna zaoblení na vstupu na zkosení 0,2 mm - změny z W4 zachovány	
<b>Kontrolní plocha</b>	$p_{tot}[kPa]$	$v\left[\frac{m}{s}\right]$	$p_{tot}[kPa]$	$v\left[\frac{m}{s}\right]$	$p_{tot}[kPa]$	$v\left[\frac{m}{s}\right]$
<b>VSTUP (IN)</b>	219	4,0	176	4,0	188	4,0
A1	216	5,8	173	5,5	185	5,5
A2	213	6,5	172	6,1	185	6,1
A3	210	6,5	170	6,2	183	6,3
A4	213	8,2	172	7,6	184	7,5
A5	170	18,4	157	17,3	157	17,4
A6	165	17,9	153	17,4	153	17,3
B1	216	5,4	173	5,0	186	5,1
B2	213	5,9	171	5,8	183	6,0
B3	211	7,3	170	7,3	182	7,0
B4	171	19,0	154	17,1	152	17,3
B5	158	17,6	146	16,8	145	16,8
C1	172	19,1	151	17,3	155	18,4
C2	159	17,4	145	16,7	154	17,2
<b>VÝSTUP (OUT)</b>	162	17,7	147	17,0	150	17,1
<b>Ztráty (IN-OUT)</b>	57,3 26,2%		28,6 16,3%		38,5 20,4%	
<b>Ztráty (IN-A4/B3)</b>	6,9 3,1%		4,8 2,7%	Zaoblení je dobré	5,3 2,8%	
<b>Ztráty (A4/B3-A5/B4)</b>	41,5 19,0%		15,4 8,7%	Zaoblení na vstupu do otvorů – veliký rozdíl	28,5 15,1%	
<b>Ztráty (A5/B4-OUT)</b>	8,9 4,1%		8,4 4,8%	Beze změny	4,7 2,5%	Menší ztráty v tomto případě mohou být způsobeny lepším ustálením toku před vstupem do vstřikovacích otvorů
<b>Ztráty (IN-C1)</b>	46,5 21,3%		25,2 14,3%	Zkosení na vstupu do otvorů – veliký rozdíl	32,9 17,5%	

Tabulka 8: Srovnání tlakových ztrát v jednotlivých verzích kanálků oksličovadla

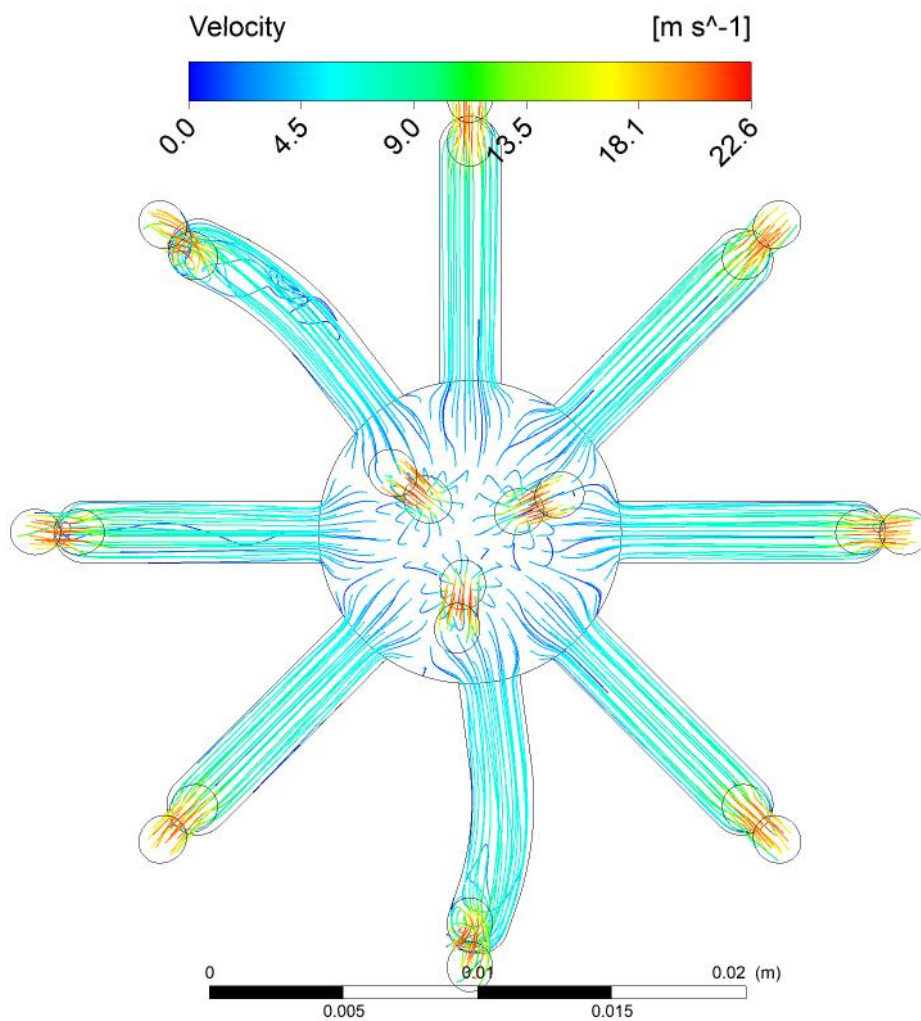




Obrázek 49: Rozložení rychlostí v kanálcích oksličovaadla, případ W1 (izometrický pohled)

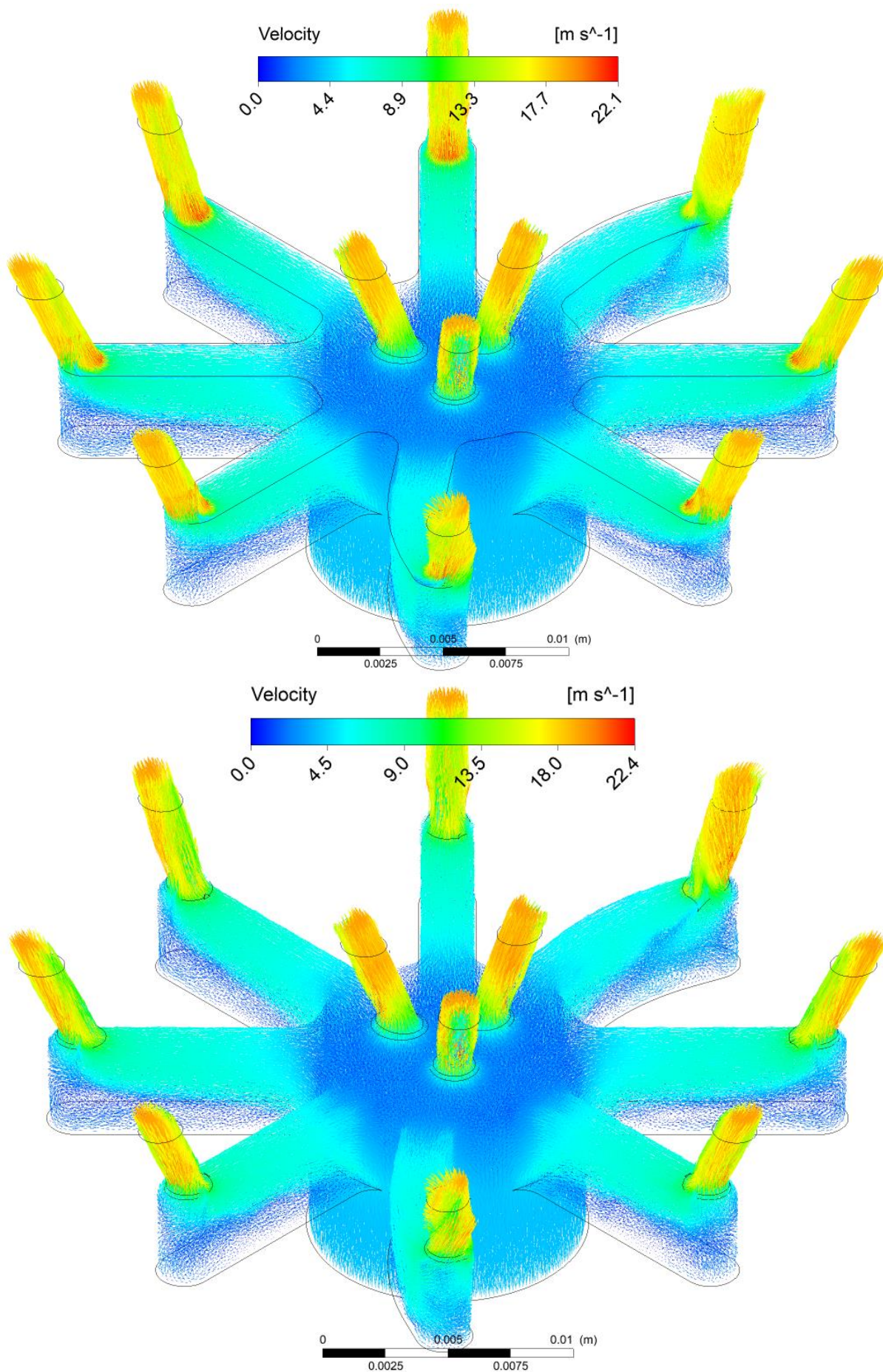


Obrázek 50: Rozložení rychlostí v kanálcích oksličovaadla, případ W1 (pohled z boku)



Obrázek 51: Zobrazení proudnic s vybarvením rychlostí v kanálcích okysličovadla, případ W1 (pohled shora)





Obrázek 52: Rozložení rychlostí v kanálcích oxidovaadla, případ W2 (nahore) a W3 (dole) (izometrický pohled)

#### **4.4.2. Kanálky paliva**

Kanálky paliva byly analyzovány podobně jako kanálky oksyličovadla vložením kontrolních ploch, v tomto případě jich bylo spolu se vstupem a výstupem celkem 25, jejich označení viz obrázek 53. Celkové tlaky a rychlosti (jejich hmotnostně vážené průměry na kontrolních plochách) jsou shrnuty v tabulce 9 spolu s určením ztrát v důležitých částech kanálků.

Opět byly simulovány tři různé verze (označené Q1, Q2 a Q3). Stejně jako u kanálků oksyličovadla bylo díky rozdělení kanálků kontrolními plochami možné dělat více změn najednou.

**Verze Q1:** Výchozí verze, je zobrazena na obrázcích 53 až 57. Na obrázcích 54 až 56 je zobrazeno výsledné rozložení rychlostí proudění v kanálcích z různých pohledů. Lze pozorovat dle předpokladů pomalejší proudění v širokých přívodních kanálcích a rychlé proudění v úzkých vstřikovacích otvorech. V obrázcích 56 a 57 lze zřetelně pozorovat setrvačnost kapaliny při proudění v kruhovém kanálku. V obrázku 57 je pomocí proudnic jasně viditelné rozhraní oddělení proudů do třech různých větví. Tlakové ztráty jsou pro tuto variantu poměrně vysoké – 36,7 % vstupního tlaku. Při porovnání s kanálky oksyličovadla jsou kanálky paliva rozsáhlejší, proto i ztráty v nich musí být větší.

**Verze Q2:** Oproti verzi Q1 bylo přidáno zaoblení rádiusem 0,2 mm na vstupech do vstřikovacích otvorů, které mělo velice pozitivní dopad na tlakové ztráty u kanálků oksyličovadla. Bylo přidáno zaoblení před D1, mezi M5 a I1 a mezi I1 a H1 a zvětšeno zaoblení (2x) za M5 z 1 na 2 mm. Změny geometrie jsou spolu s výsledným prouděním zobrazeny na obrázku 58 nahoře. Tlakové ztráty jsou v této verzi 23,5 % vstupního tlaku, tedy o hodně menší než ve verzi Q1. Opět se ukázal veliký vliv obrobení vstupů do vstřikovacích otvorů. Ostatní zaoblení měla také pozitivní vliv, ale ne tak velký.

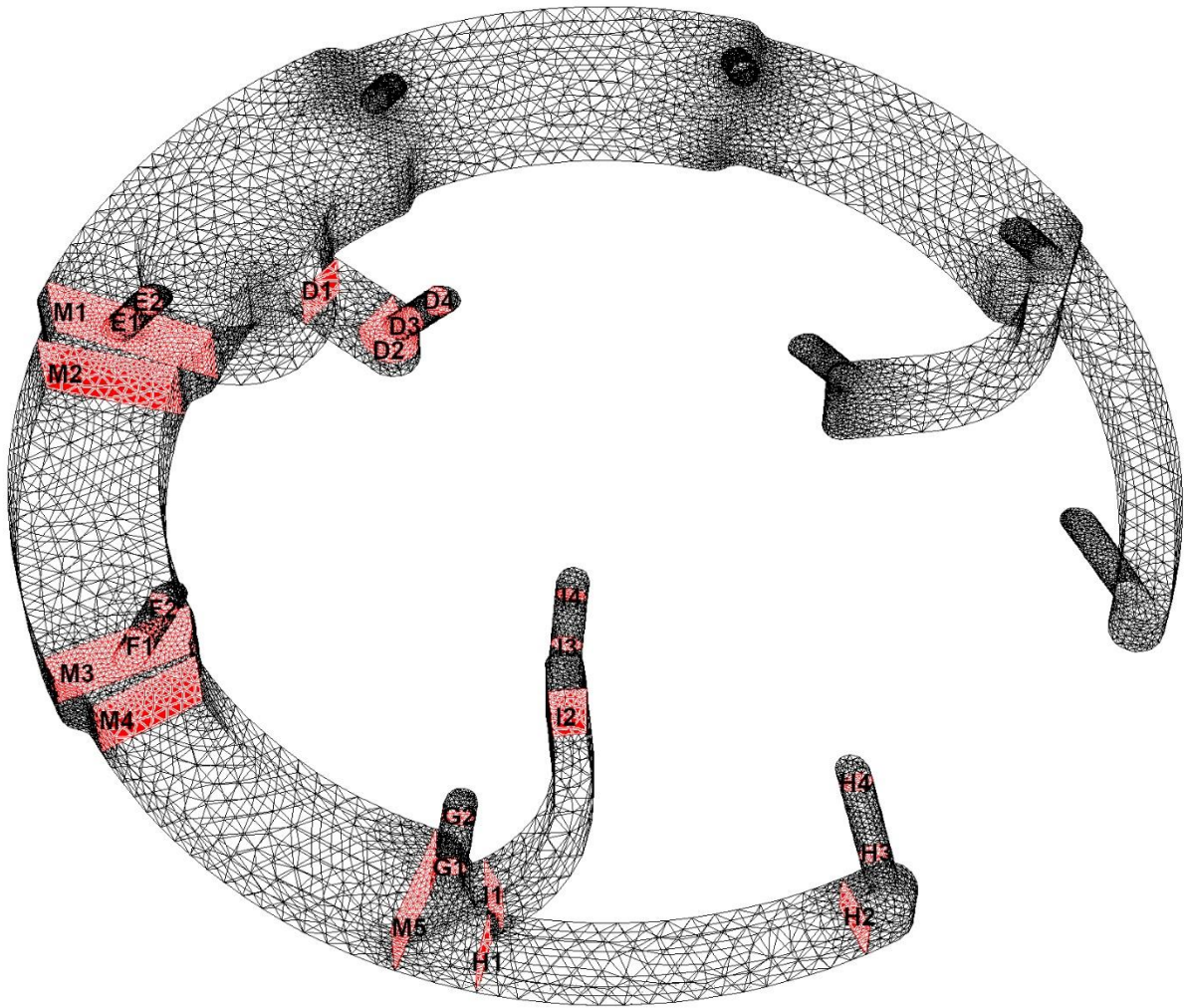
**Verze Q3:** U této verze byla použita alternativní geometrie (na obrázku 58 dole), jinak je stejná s verzí Q2. Tato geometrie má za cíl o něco lépe navést proud z kanálků do vstřikovacích otvorů. Celkové ztráty se snížily, ale jen o 0,5 % na 23 %, což nemůže vyvážit pro výrobu daleko náročnější geometrii, která se již například skládá z více tečně na sebe navazujících kružnic různých poloměrů.

V případě kanálků paliva byl problém s konvergencí opět minimální, tak jako u kanálků oksyličovadla, zde např. v případě celkových tlaků ve verzi Q3 na kontrolních plochách M5 a H1.

#### **4.5. Vybraná varianta**

Jako optimální co se týče malých tlakových ztrát a dobré vyrobiteľnosti byla zvolena kombinace variant W2 a Q2.



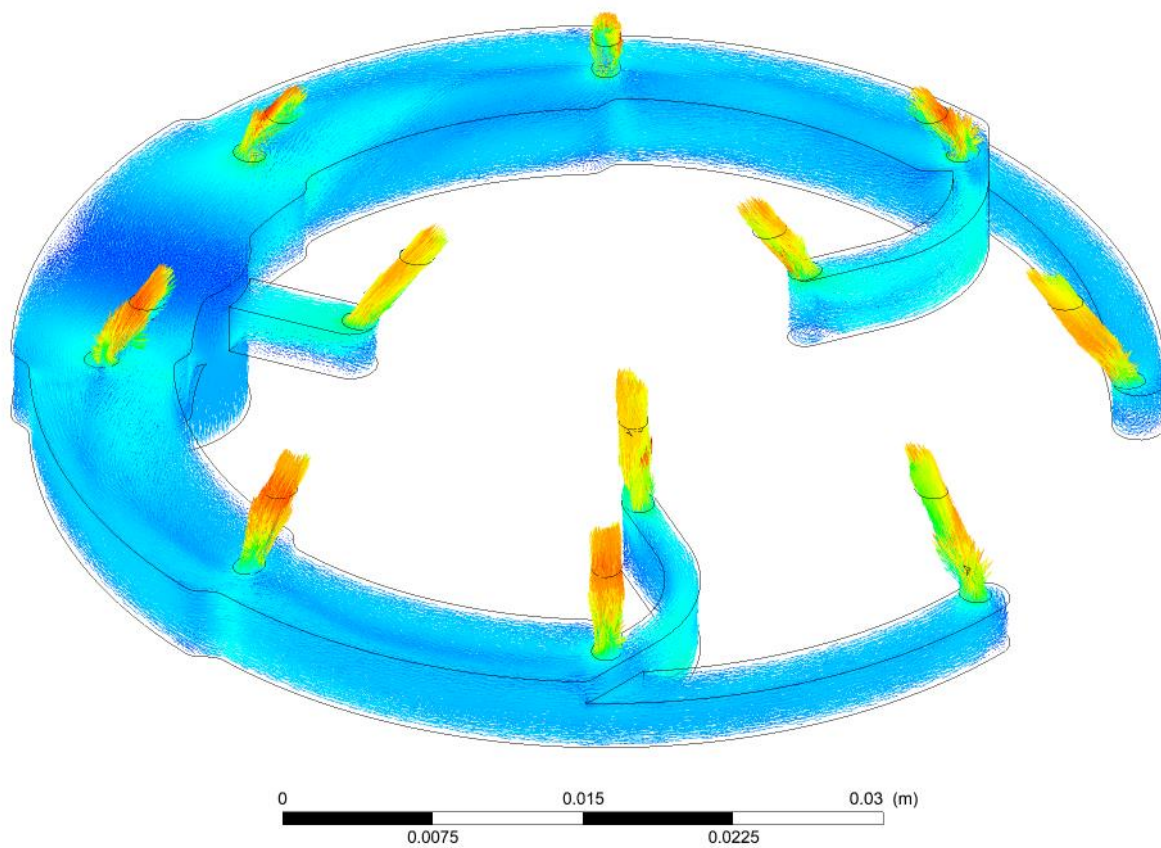


Obrázek 53: Zobrazení kontrolních průřezů v kanálcích paliva pro případ Q1. (Síť slouží pouze k ilustraci a neodpovídá skutečně použité síti.)

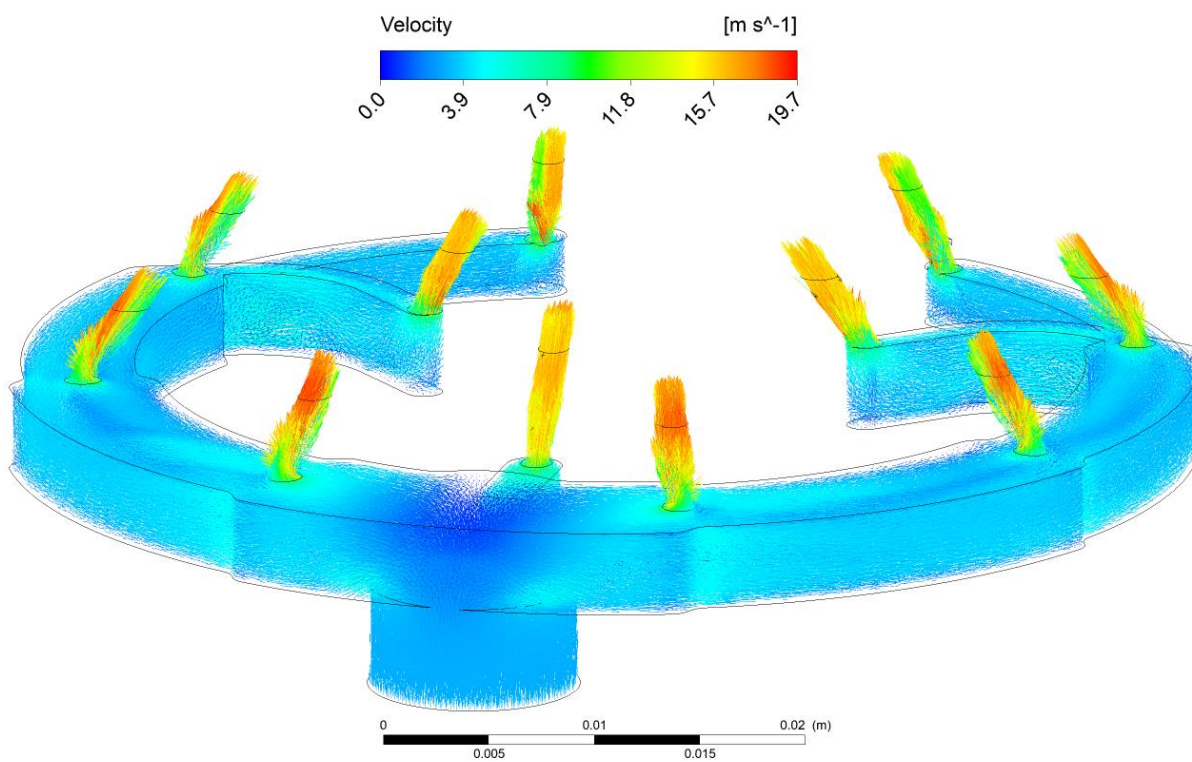
Simulovaný případ	Q1		Q2		Q3	
Popis případu	- výchozí		- zaoblení 0,2 mm na vstupech do otvorů - zaoblení před D1, mezi M5 a I1 a mezi I1 a H1 - zvětšení zaoblení (2x) za M5 z 1 na 2 mm		- alternativní geometrie - jinak stejné s Q2	
Kontrolní plocha	$p_{tot}$ [kPa]	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$p_{tot}$ [kPa]	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$p_{tot}$ [kPa]	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]
VSTUP (IN)	163	3,1	114	3,1	113	3,1
M1	161	4,3	112	4,4	111	4,3
M2	160	4,1	111	4,3	110	4,0
M3	158	3,5	109	3,5	108	3,5
M4	158	3,7	109	3,5	108	3,7
M5	157	3,5	108	3,3	107	3,3
D1	159	4,8	112	3,9	110	4,6

D2	158	5,7	112	4,3	109	5,1
D3	127	15,3	90	12,7	100	13,4
D4	115	14,9	81	12,5	94	13,7
E1	122	15,9	97	13,7	97	13,4
E2	105	14,2	90	13,4	91	13,1
F1	115	15,9	94	13,0	92	12,9
F2	96	13,8	88	13,2	86	12,9
G1	118	15,8	96	13,3	94	13,3
G2	95	13,6	90	13,3	88	13,2
H1	157	3,3	108	3,1	108	3,1
H2	156	3,7	107	3,5	106	3,6
H3	120	15,6	95	13,1	95	13,0
H4	103	14,2	86	13,1	85	13,0
I1	154	4,8	107	3,4	106	3,2
I2	151	4,6	106	4,0	105	4,0
I3	125	15,2	98	13,2	97	13,2
I4	115	14,7	92	13,2	91	13,4
<b>VÝSTUP (OUT)</b>	103	14,1	88	13,2	87	13,1
<b>Ztráty (IN- OUT)</b>	<b>59,9</b> <b>36,7%</b>		<b>26,9</b> <b>23,5%</b>		<b>26,1</b> <b>23,0%</b>	
<b>Ztráty (IN-D2)</b>	4,6 2,8%		2,6 2,3%		3,8 3,4%	
<b>Ztráty (IN-M5)</b>	6,2 3,8%		6,1 5,4%		6,0 5,3%	
<b>Ztráty (M5-H1)</b>	0 0%		0 0%		-1 -1%	
<b>Ztráty (M5-I1)</b>	3,0 1,8%		0,8 0,7%	Zaoblení před I1 funguje	1,2 1,0%	
<b>Ztráty (D2-D3, M1-E1, M3-F1, M5-G1, H2-H3, I2-I3)</b>	35,6 21,8%		13,8 12,1%	Veliký rozdíl, pokud je zkosení nebo zaoblení na vstupu do vstřikovacích otvorů	12,0 10,6%	Lépe navádí k vstřikovacím otvorům
<b>Ztráty (D3/E1/F1/ G1/H3/I3- OUT)</b>	18,0 11,0%		7,6 6,6%		8,7 7,7%	

Tabulka 9: Srovnání tlakových ztrát v jednotlivých verzích kanálek paliva

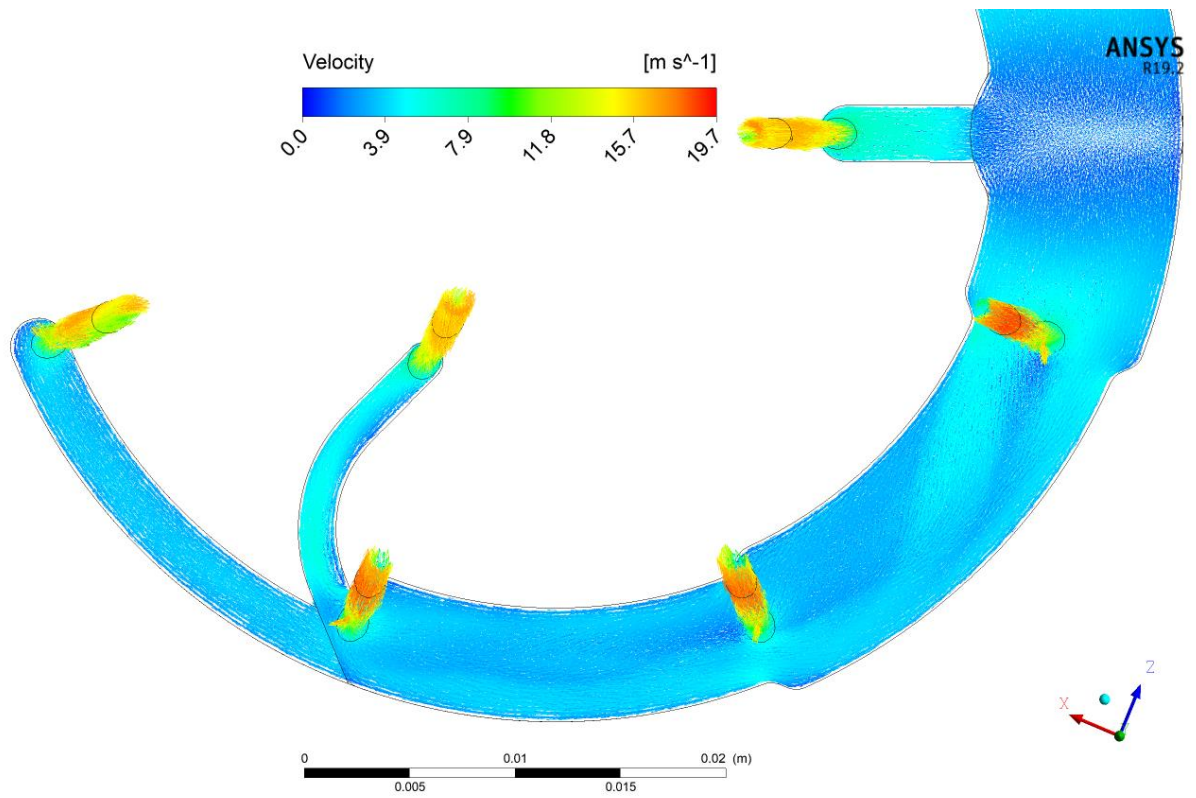


Obrázek 54: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (izometrický pohled)

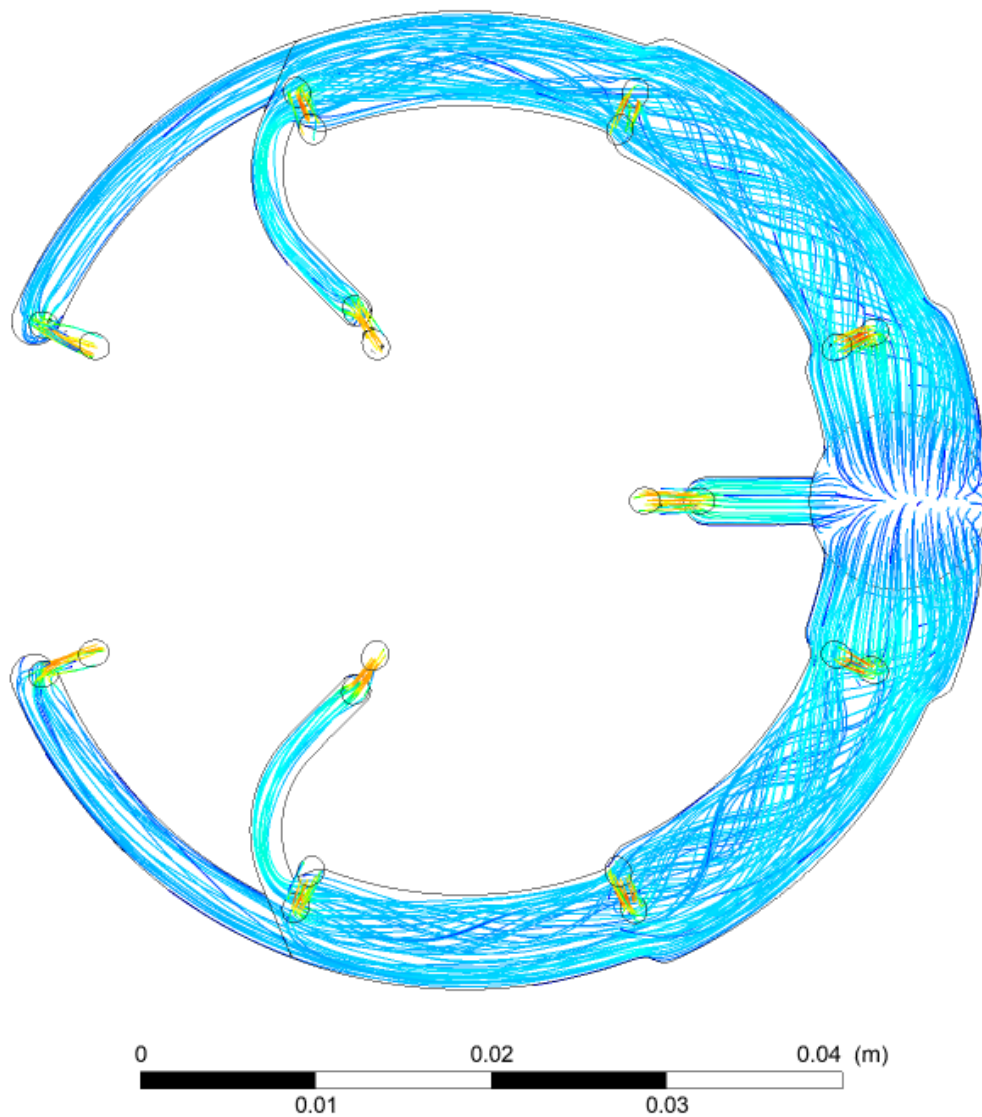


Obrázek 55: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (pohled 2)

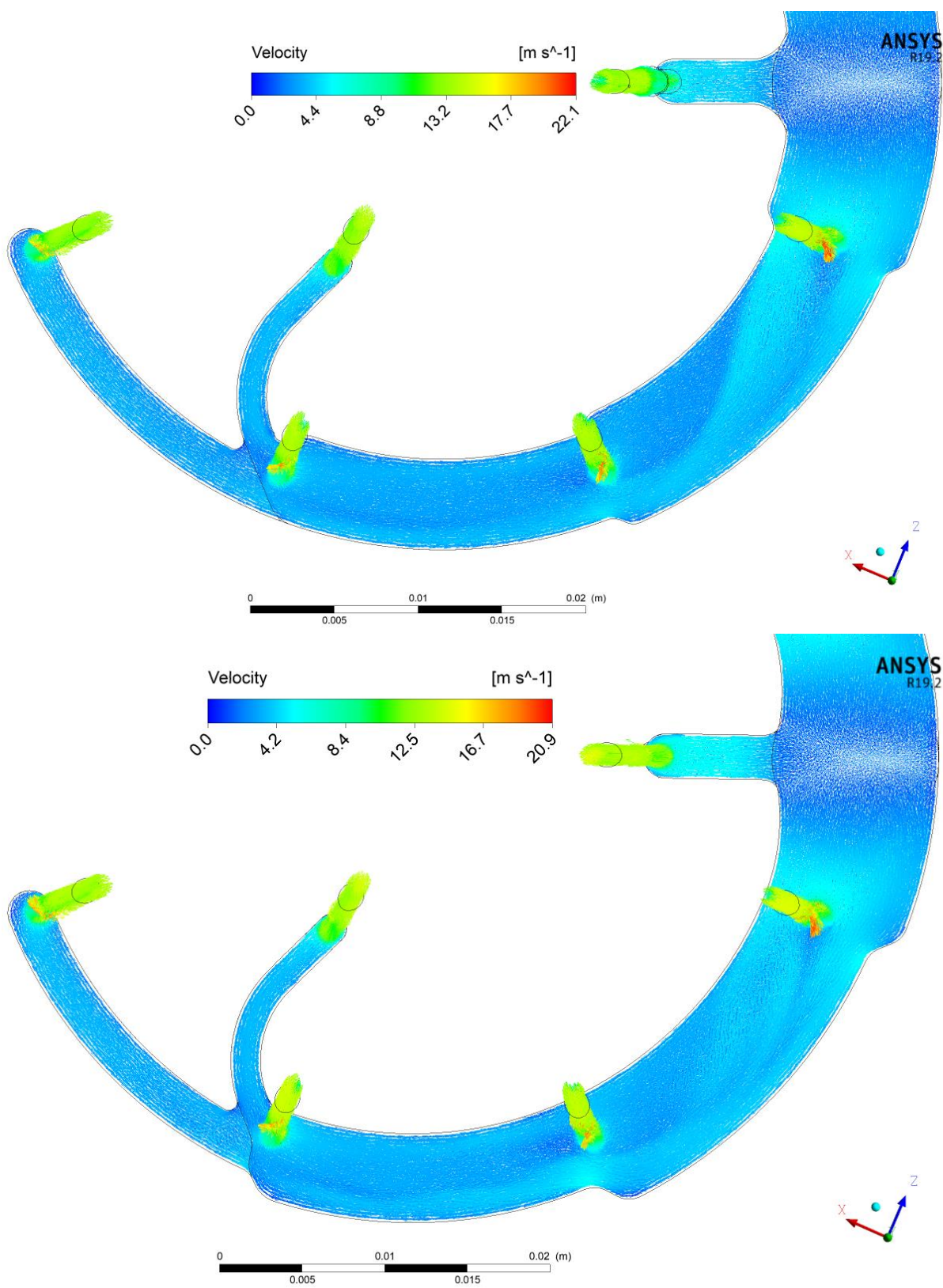




Obrázek 56: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (pohled shora)



Obrázek 57: Zobrazení proudnic s vybarvením rychlostí v kanálcích paliva, případ Q1 (pohled shora)

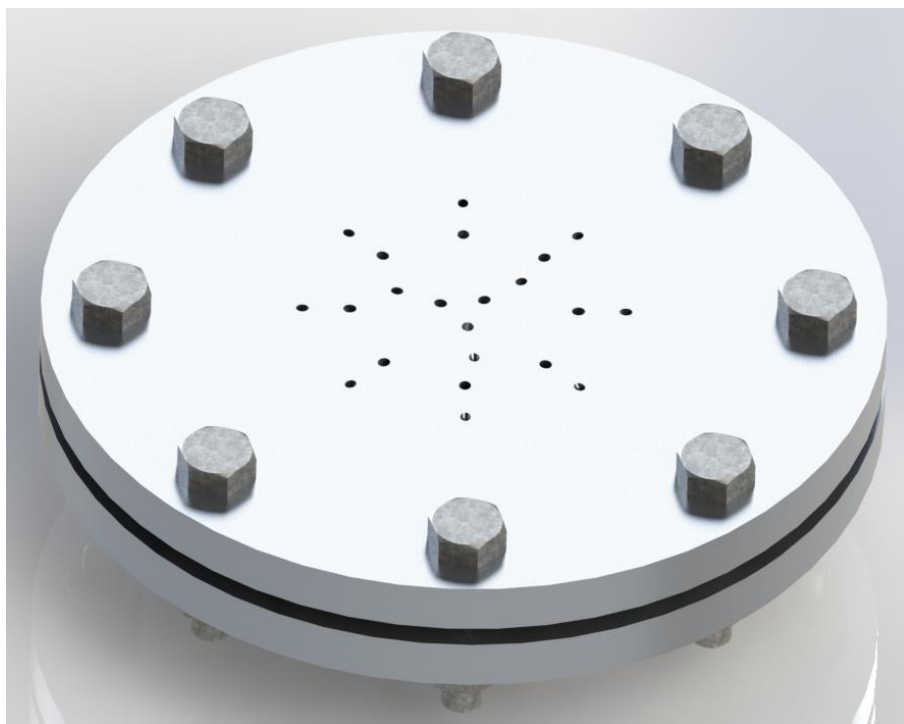


Obrázek 58: Rozložení rychlostí v kanálcích paliva, případ Q2 (nahore) a Q3 (dole) (pohled shora)

## 5. Sestava vstřikovače

Čelo vstřikovače s kanálky je zapotřebí na otevřené straně kanálků utěsnit těsněním, které na místě bude držet protikus zajišťující zároveň i přívod vody do obou větví kanálků. Jednoduchým způsobem, jak oba dva kusy spojit k sobě je pomocí příruby.

Čelo vstřikovače bylo tedy o tuto přírubu rozšířeno viz obrázek 59, detail kanálků je na obrázku 60.



Obrázek 59: Sestava vstřikovače při výrobě z duralu



Obrázek 60: Detail kanálků

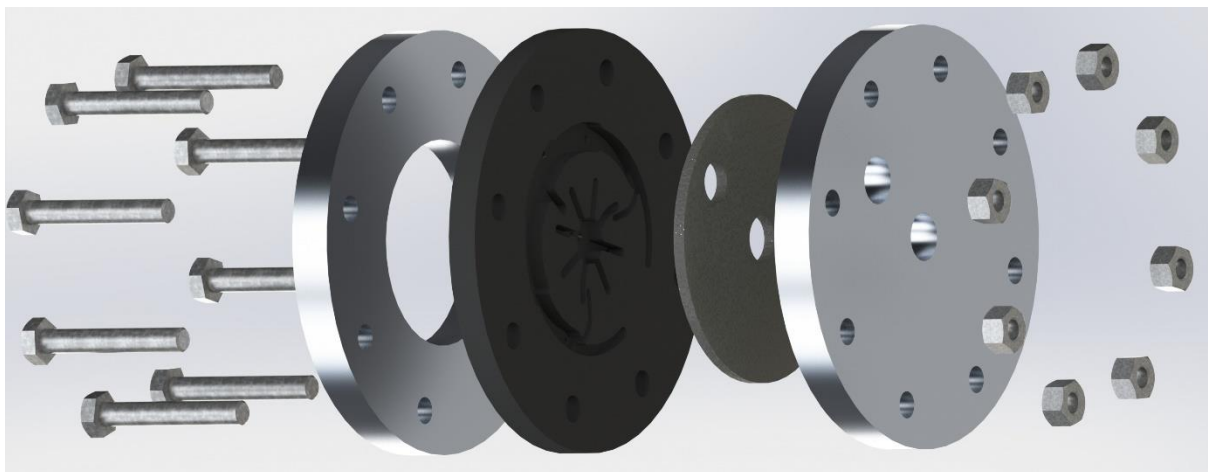


## 5.1. Výroba

Vzhledem k větší náročnosti výroby čela vstříkovače z duralu bylo rozhodnuto, že se, i přes předchozí neúspěchy v podobném projektu, součást nejprve zkusí vytisknout z plastu. Čelo vstříkovače bylo vytisknuto z PETG/CF materiálu pro vyšší pevnost, se 100 procentní výplní. Pro samotný 3D tisk byly všechny vstříkovací otvory zmenšeny o 0,5 mm, tak aby mohly být poté zvětšeny vrtáním na navrhnutý rozměr. Tím se ve vstříkovacích otvorech zajistila menší drsnost povrchu.

Pro zmenšení průhybu byla nad čelem vstříkovače navržena další příruba s kruhovou dírou uprostřed o průměru 50 mm (hypotetický průměr spalovací komory). Celá sestava je v rozloženém stavu zobrazena na obrázku 61. Výrobní výkresy čela vstříkovače, přední a zadní příruby jsou v přílohách 1 až 3.

Na obrázcích 62 až 65 jsou fotografie výsledného 3D tisku a smontované sestavy vstříkovače.



Obrázek 61: Rozložený pohled sestavy vstříkovače při výrobě z plastu 3D tiskem



Obrázek 62: Detail kanálků 3D tisku čela vstříkovače



Obrázek 63: Detail kanálek 3D tisku čela vstříkovače



Obrázek 64: Sestava vstříkovače (pohled shora)





Obrázek 65: Sestava vstřikovače (pohled zespodu)

## 6. Další součásti demonstrátoru

Sestavu vstřikovače je potřeba zapojit ke zdroji tlakované vody, samostatným přívodem do kanálek paliva a oksyličovadla. Na těchto přívodech má být zároveň regulován a měřen tlak a průtok.

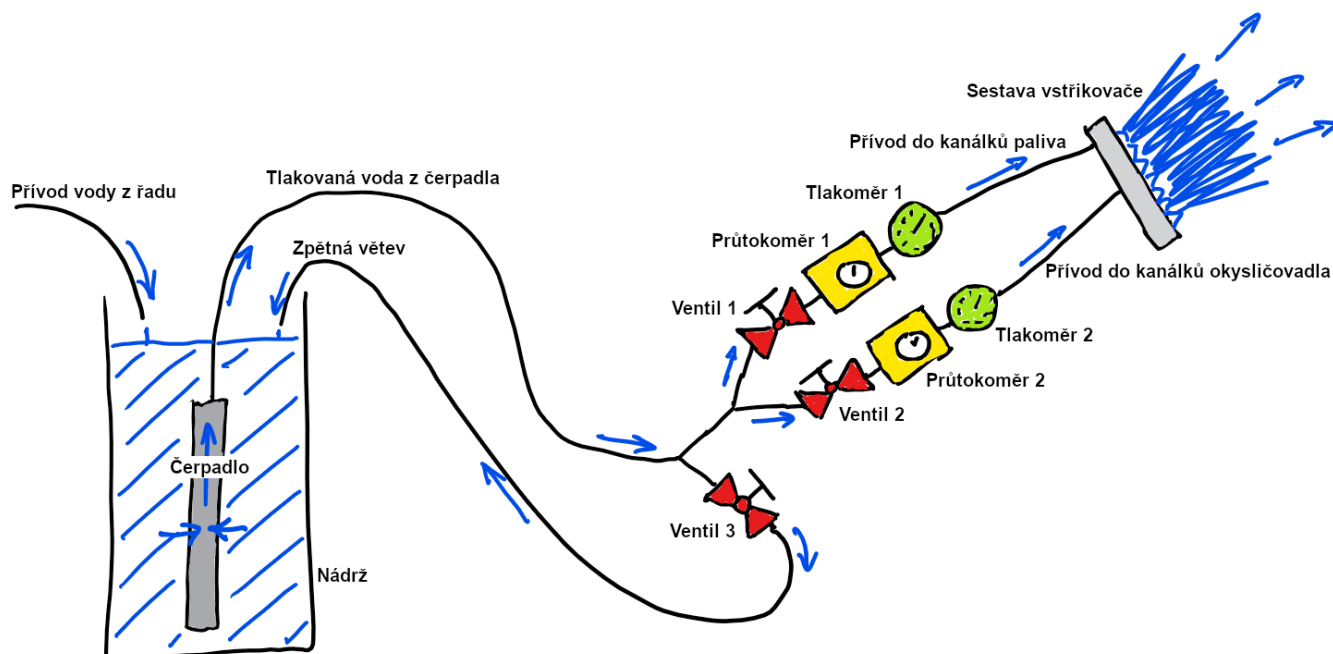
Nutné je také zajistit bezpečnost při provádění demonstrací/testů, vhodně umístit regulační a měřící zařízení pro odečet hodnot a pevně uchytit sestavu vstřikovače.

### 6.1. Hlavní součásti

Na obrázku 66 je schematicky znázorněno celkové zapojení. Vodou z řadu se naplní nádrž, ve které je ponořeno čerpadlo. Po zapnutí čerpadla je i nadále možné vodou z řadu nádrž kontinuálně doplňovat, čímž se prodlouží délka testu. Čerpadlo pumpuje tlakovanou vodu do připojené hadice, která se rozděluje na dvě větve.

První z větví pokračuje dále k vstřikovači, druhá slouží k celkové regulaci tlaku, který jde do vstřikovače, čerpadlo má totiž na výstupu konstantní tlak. Na druhé větvi je tedy umístěn ventil (Ventil 3), tato větev vede z důvodu prodloužení doby testu zpět do nádrže. První větev, která pokračuje k vstřikovači se opět dělí na dvě větve.

Jedna prochází skrz ventil (Ventil 1), průtokoměr (Průtokoměr 1) a tlakoměr (Tlakoměr 1) na vstup do kanálek paliva a druhá obdobně (skrz Ventil 2, Průtokoměr 2 a Tlakoměr 2) na vstup do kanálek oksyličovadla. Ventily na obou dvou větvích slouží k samostatné regulaci tlaku v jednotlivých kanálcích a měřící zařízení k určení parametrů proudění.



Obrázek 66: Diagram zapojení, regulace a měření přívodů tlakované vody do vstřikovače

### Seznam hlavních součástí demonstrátoru:

1. Sestava vstřikovače
2. Čerpadlo
3. Nádrž
4. 3x Ventil
5. 2x Průtokoměr
6. 2x Tlakoměr
7. 2x Rozbočka Y
8. Hadice
9. Hadicové spony
10. Redukce a přípojky

### **6.2. Vedlejší součásti**

Součásti doplňující hlavní součásti, pro demonstraci nejsou nezbytné, avšak jsou velice žádoucí.

Jedná se o součásti uchycení a nastavení polohy – stojan na vstřikovač, na měřící a regulační zařízení, stahovací pásy. Bezpečnostní součásti – lešení kolem nádrže s vodou zabraňující jejímu převrácení, popruhy a lana uchycující nádrž a stojan vstřikovače k lešení. Součásti zajišťující bezproblémový chod – všemožná dodatečná uchycení hadic, například aby hadice zpětné větve nevyhlédávala z nádrže, uchycení přívodní hadice atd.

### Seznam vedlejších součástí demonstrátoru:

1. Lešení
2. Stojan na sestavu vstřikovače, regulační a měřící zařízení
3. Lana a upínací pásy
4. Stahovací pásy

Hlavní i vedlejší součásti jsou vyfotografovány na obrázcích 67 a 68.





Obrázek 67: Detail regulačních a měřicích zařízení



Obrázek 68: Fotka všech součástí demonstrátoru



## 7. Opakované úkony při provádění demonstrací

Po sestavení všech součástí demonstrátoru se pro testovací sekvenci vždy opakuje následující postup:

1. Ventil 3 (viz obrázek 66) v poloze otevřeno
2. Ventily 1 a 2 v poloze zavřeno
3. Zapnutí přívodu vody z řadu (pokud není kontinuálně zapnutý viz bod 5)
4. Napuštění nádrže cca 5 – 15 cm pod horní okraj
5. *Volitelné – vypnutí přívodu vody z řadu*
6. Zapnutí čerpadla do elektrické sítě (čerpadlo se tím spustí)
7. Pomalé otevírání ventilu 1 a/nebo 2 dle potřeb testu
8. V případě potřeby vyššího tlaku pomalé uzavírání ventilu 3
9. Analýza vstřikování za nastavených podmínek
10. Vypojení čerpadla z elektrické sítě – po dokončení testu nebo když čerpadlo začne být hlučnější (signál, že v nádrži dochází voda)
11. Uzavření ventilů 1 a 2
12. Otevření ventilu 3



Obrázek 69: Detail přívodu vody z řadu a zpětné větve do nádrže ve které je ponořeno čerpadlo

## 8. Experimentální data

Během testování demonstrátoru vstřikovače byly měřeny tlaky a průtoky k určení tlakových ztrát a vizuálně analyzovány nedostatky výrobního procesu ve smyslu nepřesností srážení proudových paprsků. Také byla vizuálně analyzována úroveň atomizace.

### 8.1. Tlakové ztráty

Demonstrátor vstřikovače byl testován za různých tlaků a průtoků, obě větve kanálků zvlášť i dohromady. Naměřená data ze všech testů jsou shrnuta v tabulce 10,  $p_p$  a  $\dot{m}_p$  je tlak a průtok ve větvi paliva,  $p_o$  a  $\dot{m}_o$  ve větvi okysličovačla,  $r$  směšovací poměr. Data z tabulky 10 jsou pro přehlednost vynesena v grafu 2. Tlaky byly odečítány vizuálně přímo z analogového tlakoměru a průtoky byly vypočítány až následně z porízených videí (ze známých stavů 1 a 2 a rozdílu jejich časů). Hodnoty tlaků i hmotnostních průtoků dávají vzájemně smysl, jejich měření tedy proběhlo úspěšně. Vzhledem k relativně přesné možnosti výpočtu průtoků z videí, která lze použít po snímcích je pravděpodobné že k větší chybě dochází při odečtu tlaků, ručičky tlakoměru při testech také mírně oscilovaly kolem zaznamenaných hodnot.

Test	$p_p$ [bar]	$p_o$ [bar]	$\dot{m}_p$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$	$\dot{m}_o$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$	$r$
1	1	0	0,166	0	-
2	2	0	0,246	0	-
3	0	1	0	0,257	-
4	0	1,8	0	0,336	-
5	1,15	1,4	0,186	0,289	1,56
6	1,1	1,5	0,187	0,298	<b>1,59</b>
7	1,1	1,75	0,178	0,328	1,85
8	1,1	1,9	0,186	0,347	1,86
9	1,5	1,5	0,209	0,317	1,52
10	1,5	2,5	0,197	0,403	2,05
11	2	2	0,235	0,356	1,51
12	2,5	2,5	0,292	0,404	1,38
13	3	3	0,310	0,435	1,40
14	4	4	0,338	0,475	1,40
15	4	4	0,340	0,476	1,40
16	4	4	0,336	0,479	1,43
17	5,2	5	0,400	0,532	1,33

Tabulka 10: Přehled při testech změřených tlaků a průtoků

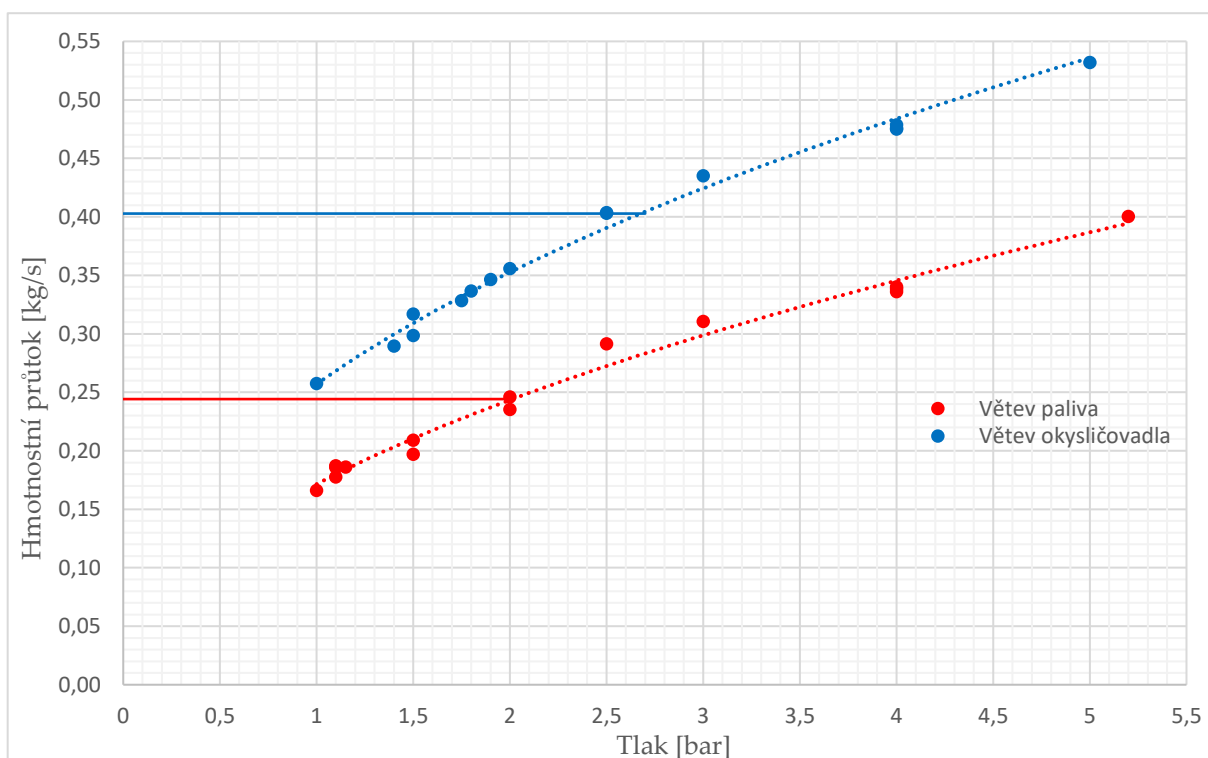
V grafu 2 jsou spolu s naměřenými hodnotami vyneseny i dvě vodorovné čáry v hodnotách návrhových průtoků  $\dot{m}_o = 0,4028 \frac{kg}{s}$  a  $\dot{m}_p = 0,2442 \frac{kg}{s}$ , které nastaly přibližně pro tlaky  $p_o = 2,5 \text{ bar}$  a  $p_p = 2 \text{ bar}$ . Dle simulací měly ale tyto průtoky nastat při tlacích  $p_o = 1,75 \text{ bar}$  a  $p_p = 1,14 \text{ bar}$ , rozdíl je tedy asi  $\Delta p_o = 0,75 \text{ bar}$  a  $\Delta p_p = 0,86 \text{ bar}$ .

Tento rozdíl je dán především dvěma hlavními faktory. Prvním je, že se při výrobě zapoměly zkosit či zaoblit vstupy do vstřikovacích otvorů, které mají (ze simulací v kapitole 4.4) velký vliv na celkové tlakové ztráty. Tlaky by v tomto případě měly být asi následující  $p_o^* = 2,2 \text{ bar}$  a  $p_p^* = 1,6 \text{ bar}$  (opět ze simulací v kapitole 4.4), tedy  $\Delta p_o^* = 0,3 \text{ bar}$  a  $\Delta p_p^* = 0,4 \text{ bar}$ .

Zbýlý rozdíl skutečně změřených tlaků a nasimulovaných je s největší pravděpodobností dán faktem, že těsnění se až příliš zaboří do kanálků, tím se zmenší jejich průřez, zvýší rychlost proudění a vzrostou tlakové ztráty. Při prvotním testování bylo dokonce zjištěno, že při příliš velkém utažení šroubů příruby do dvou vstřikovacích otvorů palivové větve, které jsou nejvíce vzdálené od přítoku, nic neproudí. Tuto teorii podporuje i fakt, že  $\Delta p^*$  je pro větev paliva větší (a to i přesto, že absolutně je tlak v palivové větvi menší) – kanálky paliva mají totiž větší plochu styku s těsněním.

Minoritním faktorem jsou také další ztráty mezi tlakoměrem a vstupem do sestavy vstřikovače.

Šrouby příruby byly vždy před testem (tj. ve stavu bez tlaku) volné (tj. mohly se otáčet) a až při zvýšení tlaku se vlivem plynoucího odtážení přírub od sebe zafixovaly proti otáčení. Při počáteční montáži a dotažení šroubů k jejich únosnosti došlo pravděpodobně k trvalé deformaci těsnění, která pak měla negativní vliv na proudění.



Graf 2: Závislost hmotnostního průtoku na tlaku v jednotlivých větvích kanálků

## **8.2. Vizuální pozorování**

Analýza kvality výrobního procesu a úrovně atomizace.

### **8.2.1. Nedokonalosti proudových paprsků a jejich srážení**

Na obrázcích 70 až 73 je fotodokumentace vstříkovaných proudových paprsků ze samostatných větví – vždy jsou zobrazeny oba dva pohledy z boku pro každou větev.

Pro vstříkovací otvory paliva je výsledek celkem dobrý, většina proudových paprsků má správný souměrný tvar. I tak se zde ale nachází několik proudů, u kterých jsou proudové paprsky zploštělé – nemůže tedy dojít ke správnému srážení s proudem ze vstříkovacího otvoru okysličovadla. Problém s tvarem proudu je také u jednoho ze vstříkovacích otvorů na samém konci palivového kanálku (zřetelné z obrázku 71), to je pravděpodobně způsobeno deformací těsnění, tak jak bylo popsáno v kapitole 8.1.

Při pohledu na vstříkování z otvorů pro okysličovadlo se výsledek zdá být horší, ale je třeba si uvědomit, že jednotlivé dublety jsou navrženy tak, aby se proudy paliva a okysličovadla střetly asi 6 mm nad čelem vstříkovače, čímž se celkový směr proudu dostane do axiálního směru. Proto u většiny vnějších proudů dochází k lehkému kontaktu s přední přírubou, jež je deformuje.

I přes obtížnost zobrazení střetávání proudů (vzhledem k zastření výhledu vzniklým oblakem kapiček) je zde umístěn obrázek 74, kde je alespoň trochu možné při velmi nízkém tlaku 0,5 bar v obou větvích pozorovat srážky proudových paprsků.

Drobnou výhodou srážení blízko čela vstříkovače je, že při malých výrobních nedokonalostech se paprsek nestačí deformovat natolik, aby většina jeho proudu minula paprsek opačný.

Celkový dojem je vyhovující, a to i přes značné nedokonalosti ve tvaru proudových paprsků způsobené jak odchylkami ve vrtání děr a možnými otřepy, tak pravděpodobně také těsněním a jeho deformací, která omezuje proudění do některých otvorů.





Obrázek 70: Vstříkovací otvory větve paliva při  $p_p = 1 \text{ bar}$  a  $\dot{m}_p = 0,166 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  (pohled ze strany přítoku)



Obrázek 71: Vstříkovací otvory větve paliva při  $p_p = 2 \text{ bar}$  a  $\dot{m}_p = 0,246 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  (pohled z druhé strany přítoku)





Obrázek 72: Vstříkovací otvory větve oksyličovaadla při  $p_o = 1 \text{ bar}$  a  $\dot{m}_o = 0,257 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  (pohled ze strany přítoku)



Obrázek 73: Vstříkovací otvory větve oksyličovaadla při  $p_o = 1,8 \text{ bar}$  a  $\dot{m}_o = 0,336 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  (pohled z druhé strany přítoku)



Obrázek 74: Vstřikování při tlaku 0,5 bar v obou větvích

### 8.2.2. Úroveň atomizace

Dle předpokladů se pozorovaná úroveň atomizace s rostoucím tlakem (tj. i průtokem) zvyšuje – zvyšuje se i pokles tlaku na čele vstřikovače, tudíž i rychlost proudění jež znamená více kinetické energie, která se může spotřebovat na atomizaci.

Z obrázků 75 a 76 je patrné, že většina hmotnostního toku jde v axiálním směru nad čelem vstřikovače vymezeném průměrem 50 mm tak jako bylo simulováno v kapitole 3.4 a jak je zobrazeno na obrázku 41 vpravo. Výsledný oblak kapiček téměř ideálně vyplňuje prostor, až na určité oblasti vzniklé nedokonalým srážením kvůli špatnému tvaru proudových paprsků. Tyto oblasti se při testování dají snadno identifikovat dotykem – jsou cítit dopady větších kapiček.

Celková atomizace není špatná, ale ani nijak dobrá, je to způsobeno především špatným tvarem některých proudových paprsků.





Obrázek 75: Pohled z boku na kužel kapiček při 2,5 bar v obou větvích a průtocích  $\dot{m}_p = 0,292 \frac{kg}{s}$  a  $\dot{m}_o = 0,404 \frac{kg}{s}$



Obrázek 76: Pohled z boku na kužel kapiček při 4 bar v obou větvích a průtocích  $\dot{m}_p = 0,336 \frac{kg}{s}$  a  $\dot{m}_o = 0,479 \frac{kg}{s}$

## 9. Zjištěné nedostatky a náměty k vylepšení

Výrazným a největším nedostatkem výsledného demonstrátoru vstříkovače je nedokonalá atomizace způsobená jak nepřesnostmi a možnými ořepky vzniklými při vrtání děr do 3D vytisknutého čela vstříkovače, tak i zvoleným těsněním a jeho implementací.

Ideálním, avšak nepoměrně dražším řešením by bylo obrobení čela vstříkovače na pětiosém obráběcím centru, kde by byla zaručena nepoměrně vyšší přesnost. Materiál (dural) by byl také pevnější než plast, i když se materiál nakonec při testování neukázal být limitujícím faktorem.

Při zvolení této výrobní metody by bylo vhodné, aby šel výsledný obrobek obrobit na jedno upnutí, což v současném návrhu znemožňují dva vstříkovací otvory na koncích palivových kanálků. Kanálek, jež tyto otvory zásobuje by bylo nutné jednoduše přesunout blíže k vnějšímu okraji, čímž by se vstup do těchto vstříkovacích otvorů dostal z dna kanálku na jeho stranu – otvory by se musely nejdříve vyvrtat a až pak by se vyfrézovaly přívodní kanálky.

Zvolené těsnění o tloušťce 3 mm se ukázalo jako nevhodné, protože se s největší pravděpodobností částečně dostalo do kanálků a omezovalo jejich průtok. Řešením by mohlo být hubenější těsnění, například o tloušťce 1 mm, které by stále postačovalo k utěsnění mezi kanálky. Proudění mezi zadní stranou čela vstříkovače a těsněním se i přes počáteční obavy neukázalo jako problém – při testování jednotlivých větví z opačné větve nikdy nic neproudilo.

Pomoci proti nadměrnému vniku těsnění do kanálků by mohla i plochá zadní příruba, ve které je nyní pro těsnění výřez. Tento výřez nejspíše zabraňuje vytlačení stlačeného těsnění směrem ven a těsnění se proto spíše nahrne do kanálků. Před testy bylo při nadměrném utažení šroubů příruby otvory přívodů pozorováno zvlnění těsnění, což podporuje tuto teorii. Vzhledem k rovné zadní části čela vstříkovače by bylo možné experimentovat i s těsněními o menších tloušťkách, jako jsou např. 0,5 nebo 0,2 mm.

Během testování nebyly zjištěny žádné další nedostatky, které by neodpovídaly teoretickým předpokladům zjištěným v kapitolách 3 a 4.

## 10. Závěr

Byl úspěšně navrhnut a otestován demonstrátor vstřikovače raketového motoru pracující s vodou o návrhových hmotnostních průtocích  $\dot{m}_o = 0,4028 \frac{kg}{s}$  ve větvi okysličovačla a  $\dot{m}_p = 0,2442 \frac{kg}{s}$  ve větvi paliva. Těchto hmotnostních průtoků bylo na testovaném demonstrátoru dosaženo při tlacích přibližně  $p_o = 2,5 \text{ bar}$  a  $p_p = 2 \text{ bar}$ . I když jsou tyto tlaky pro dané průtoky výrazně vyšší od návrhových tlaků, tak se podařilo identifikovat příčiny větších ztrát. Těmi jsou neobrobení vstupů do vstřikovacích otvorů a nadměrné vniknutí těsnění do kanálků.

Demonstrátor vstřikovače byl navržen s jedenácti páry dubletových vstřikovacích prvků, ve kterých se sráží přímo palivo s okysličovadlem. Rozmístěny byly tak, aby výsledná směs co nejlépe vyplnila prostor průměru 50 mm nad čelem vstřikovače. Simulace tohoto vyplnění byla později úspěšně potvrzena i testováním.

Byly navrženy konvenčními metodami vyrobitelné přívodní kanálky a optimalizovány tlakové ztráty v nich pomocí CFD simulací různých modifikací. Vybrána byla ta nejvhodnější varianta z hlediska výroby a ztrát.

Jako velice důležitá na výslednou atomizaci se dle předpokladů ukázala býti přesnost výroby, avšak i přes její nedokonalosti byl celkový dojem při testování uspokojivý.

Demonstrátor vstřikovače byl bez problémů s mechanickou pevností testován až do maximálních tlaků  $p_{o\_max} = 5 \text{ bar}$  a  $p_{p\_max} = 5,2 \text{ bar}$  při hmotnostních průtocích  $\dot{m}_{o\_max} = 0,532 \frac{kg}{s}$  a  $\dot{m}_{p\_max} = 0,4 \frac{kg}{s}$ . Vyšších hodnot již vzhledem k výkonu čerpadla a ztrátám nešlo docílit.

## **11. Přílohy**

### Seznam příloh:

1. Výkres vstřikovače
2. Výkres přední příruby
3. Výkres zadní příruby



## 12. Přehled použité literatury

- [1] Sutton, George Paul a Biblarz, Oscar. *Rocket Propulsion Elements*. místo neznámé : Hoboken, N.J. : Wiley, 2010.
- [2] Huzel, Dieter K. a Huang, David H. *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*. místo neznámé : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
- [3] *Impinging Fuel Injector Atomization and Combustion Modeling*. Brinckman, Kevin & M Feldman, G & Hosangadi, Ashvin. 2015.
- [4] *Coupled Lagrangian impingement spray model for doublet impinging injectors under liquid rocket engine operating conditions*. Qiang WEI, Guozhu LIANG. 4, místo neznámé : Chinese Society of Aeronautics and Astronautics & Beihang University, Srpen 2017, Chinese Journal of Aeronautics, Sv. 30.
- [5] *Design and Testing of Liquid Propellant Injectors for Additive Manufacturing*. S. Soller, R. Behr, S. Beyer, F. Laithier, M. Lehmann, A. Preuss and R. Salapete. 2017. EUCASS 2017.
- [6] *3D-PRINTED COAXIAL INJECTOR FOR A LOX/KEROSENE ROCKET ENGINE*. Ilja Müller, Markus Kuhn, Ivaylo Petkov, Sebastian Bletsch, Koen Huybrechts and P. Van Cauwenbergh. 2018. SPACE PROPULSION 2018.
- [7] Aerospace Manufacturing and Design. *3D Printed Rocket Engine Injector Tested*. [Online] 16. Červenec 2013. [Citace: 19. Květen 2019.]  
<https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/3d-printed-rocket-engine-injector-tested-071613/>.
- [8] Vortex Rocket Engine Technology Looks Promising. *Bayourat Aerospace and Rocketry*. [Online] 17. Leden 2013. [Citace: 29. Červenec 2019.] <https://bayourat.blogspot.com/2013/01/vortex-rocket-engine-technology-looks.html>.
- [9] Bernoulliho rovnice. *Wikipedie*. [Online] [Citace: 30. březen 2019.]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Bernoulliho\\_rovnice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bernoulliho_rovnice).
- [10] F-1 Engine Injector. *heroicrelics.org: Relics of the Heroic Age of Manned Space Flight*. [Online] [Citace: 31. březen 2019.] <http://heroicrelics.org/info/f-1/f-1-injector.html>.
- [11] Discharge coefficient. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 26. Květen 2019.]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Discharge\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Discharge_coefficient).
- [12] Morgan, Timothy Prickett. Rockets Shake And Rattle, So SpaceX Rolls Homegrown CFD. *The Next Platform*. [Online] 27. Březen 2015. [Citace: 28. Květen 2019.]  
<https://www.nextplatform.com/2015/03/27/rockets-shake-and-rattle-so-spacex-rolls-homegrown-cfd/>.
- [13] Christopher Riley, Duncan Copp, Nick Davidson. *Moon Machines, Part 4: The Lunar Module*. Science Channel, 2008.
- [14] *Modern Liquid Propellant Rocket Engines, 2000 Outlook*. Zandbergen, B.T.C. 2000.
- [15] Liquid Rocket Engine Injectors. *College of Engineering - Purdue University*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.]  
<https://engineering.purdue.edu/AAECourses/aae539/2007/spring/handouts/InjectorLecture2.ppt>.

- [16] Development and Characteristics of the Russian / American Russian / American RDRD--180 Rocket Engine. *Florida Tech*. [Online] AIAA Technical Activities, Červenec 2002. [Citace: 9. Červen 2019.] [http://my.fit.edu/~dkirk/4262/RD180\\_Presentation.pdf](http://my.fit.edu/~dkirk/4262/RD180_Presentation.pdf).
- [17] Propulsion Delta-IV. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] [http://www.b14643.de/Spacerockets\\_2/United\\_States\\_5/Delta\\_IV/Propulsion/engines.htm](http://www.b14643.de/Spacerockets_2/United_States_5/Delta_IV/Propulsion/engines.htm).
- [18] Rocketdyne RS-68. *College of Engineering - Purdue University*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/rockets/liquids/rs68.html>.
- [19] Vulcain forges ahead. *Flight Global*. [Online] 18. Únor 1989. [Citace: 9. Červen 2019.] <https://www.flightglobal.com/FlightPDFArchive/1989/1989%20-%200422.PDF>.
- [20] E. Kirner, D. Thelemann, D. Wolf. *Development status of the Vulcan thrust chamber*. místo neznámé : Pergamos Press Ltd, 1993. 0094-5765/93.
- [21] Wilfried Ley, Klaus Wittmann, Willi Hallmann. *Handbook of Space Technology*. místo neznámé : John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 9780470697399.
- [22] *Comprehensive Design Method for LOX/Liquid-Methane Regenerative Cooling Combustor with Coaxial Injector*. YATSUYANAGI, Nobuyuki. 177, místo neznámé : Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 2009, Sv. 52.
- [23] LE-5. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <https://en.wikipedia.org/wiki/LE-5>.
- [24] Michael Binder, Thomas Tomsik, Joseph P. Veres. *RL10A-3-3A Rocket Engine Modeling Project*. místo neznámé : NASA, 1997.
- [25] *Study on the Design Criteria of the Coaxial Injector for a LOX/Hydrogen Rocket Engine— Evaluation of Design for Injectors of the LE-5 Engine and Its Derivatives—*. YATSUYANAGI, Nobuyuki. 169, místo neznámé : Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 2007, Sv. 50.
- [26] William E. Anderson, Vigor Yang. *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*. místo neznámé : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1995. 978-1-56347-183-4.
- [27] Aestus. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aestus>.
- [28] AJ10. *Encyclopedia Astronautica*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <http://www.astronautix.com/a/aj10.html>.
- [29] R-40A. *Encyclopedia Astronautica*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <http://www.astronautix.com/r/r-40a.html>.
- [30] R-42. *Encyclopedia Astronautica*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <http://www.astronautix.com/r/r-42.html>.
- [31] *An overview of development model testing for the LEROS 4 High Thrust Apogee Engine*. Lolan Naicker, Ronan Wall and David Perigo. Kolín nad Rýnem : Space Propulsion 2014 Conference, 2014.
- [32] Leros 2. *College of Engineering - Purdue University*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/rockets/satellites/leros2.html>.
- [33] Leros 20. *College of Engineering - Purdue University*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.] <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/rockets/satellites/leros20.html>.

[34] S400 (rocket engine). *Wikipedia*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/S400\\_\(rocket\\_engine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/S400_(rocket_engine)).

[35] 400N Bipropellant Apogee Motors. *Orbital Propulsion Centre*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.]  
<http://www.space-propulsion.com/spacecraft-propulsion/apogee-motors/index.html>.

[36] N2O4/MMH. *Encyclopedia Astronautica*. [Online] [Citace: 9. Červen 2019.]  
<http://www.astronautix.com/n/n2o4mmh.html>.

[37] Sutton, George Paul. *History of Liquid Propellant Rocket Engines*. místo neznámé : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.