



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Vodíkem vyplachovaná komůrka pro nepřímý
zážeh v plynovém spalovacím motoru

Hydrogen scavenged pre-chamber for a gas
combustion engine

DIPLOMOVÁ PRÁCE
2022

David HOFMAN

Studijní program: NDTT Dopravní a transportní technika

Studijní obor: N071TSPM Spalovací motory

Vedoucí práce: Ing. Syrovátka Zbyněk, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hofman** Jméno: **David** Osobní číslo: **466270**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Spalovací motory**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vodíkem vyplachovaná komůrka pro nepřímý zážeh v plynovém spalovacím motoru

Název diplomové práce anglicky:

Hydrogen scavenged pre-chamber for a gas combustion engine

Pokyny pro vypracování:

Provedte návrh a optimalizaci konstrukce vodíkem vyplachované komůrky pro nepřímý zážeh homogenní směsi v plynovém čtyřválcovém spalovacím motoru ($D = 105 \text{ mm}$, $Z = 120 \text{ mm}$). Komůrku integrujte do hlavy válce experimentálního motoru a vypracujte výkresovou dokumentaci. Pro optimalizaci komůrky využijte dostupný 3-D CFD výpočetní nástroj v programu PTC CREO.

Seznam doporučené literatury:

3-D CAD modely a výkresová dokumentace předchozí verze zapalovacího systému

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: David Hofman

Název práce: Vodíkem vyplachovaná komůrka pro nepřímý zážeh v plynovém spalovacím motoru

Anglický název: Hydrogen scavenged pre-chamber for a gas combustion engine

Rozsah práce:

87 stran

61 obrázků

4 tabulky

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Dopravní a transportní technika

Obor: Spalovací motory

Vedoucí práce: Ing. Syrovátka Zbyněk, Ph.D.

Klíčová slova: Komůrka, vyplachovaná předkomůrka, Zetor, CNG, methan, Vodík, 3-D CFD, 3-D CAD, Creo Flow Analysis

Key words: Scavenged prechamber, mass flow rate, Zetor, CNG, methane, Hydrogen, 3-D CFD, 3-D CAD, Creo Flow Analysis



Abstrakt

Diplomová práce se zabývá konstrukčními úpravami a optimalizací vyplachované komůrky pro motor Zetor 1716, určený k přestavbě na motor plynový, s následnou tvorbou výkresové dokumentace. Výsledný výpočetní model pro Creo Flow Analysis byl kalibrován s využitím výsledků z 3-D CFD programu AVL FIRE. S pomocí kalibrovaného modelu bylo otestováno vícero verzí, ze kterých byla vytvořena optimalizovaná komůrka s ohledem na co nejmenší zástavbové nároky. Ta pak byla otestována v AVL FIRE s průběhem celého spalovacího cyklu, tedy včetně výměny náplně a simulace chemické kinetiky spalování.

Abstract

This diploma thesis deals with design modification and optimization of scavenged prechamber designed for the Zetor 1716 engine which is intended for conversion to natural gas engine, with subsequent creation of drawing documentation. The resulting computation model for Creo Flow Analysis was calibrated using results from 3-D CFD simulation made in AVL FIRE software. With the help of the calibrated model, several versions were tested, from which an optimized chamber was created with regards to keeping changes to the cylinder head at minimum. Resulting geometry was tested in AVL FIRE by simulation the entire combustion cycle, i.e. including charge replacement during intake end exhaust stroke with simulation of the chemical kinetics of combustion.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Vodíkem vyplachovaná komůrka pro nepřímý zážeh v plynovém spalovacím motoru“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Zbyňku Syrovátkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu doc. Ing. Oldřichu Vítkovi, Ph.D. za konzultace v rámci kalibrace CFD modelu a ověření simulačního modelu ve FIRE. Děkuji též panu Ing. Vítu Dolečkovi, Ph.D. za výraznou pomoc při tvorbě simulační sítě pro FIRE.



Obsah

| | |
|---|----|
| 1 Úvod..... | 9 |
| 2 Komůrkové zapalování | 12 |
| 2.1 Pasivní komůrka | 12 |
| 2.2 Aktivní komůrka | 14 |
| 2.3 Vedlejší účinky spalovacích motorů na životní prostředí | 18 |
| 2.4 Výhody spalování H ₂ | 19 |
| 2.5 Doporučené parametry komůrky | 20 |
| 3 Konstrukce komůrky | 21 |
| 3.1 Úpravy na hlavě válců | 22 |
| 3.2 Těsnění..... | 23 |
| 3.3 Svíčka | 24 |
| 3.4 Komůrka..... | 25 |
| 3.5 Montáž..... | 26 |
| 4 Výpočetní model CFD | 27 |
| 4.1 Proudění tekutiny | 27 |
| 4.1.1 Rovnice kontinuity | 27 |
| 4.1.2 Zákon zachování hybnosti | 27 |
| 4.2 Modelování turbulence | 27 |
| 4.2.1 Standardní k-ε | 28 |
| 4.2.2 RNG k-ε..... | 28 |
| 4.3 Chování kapaliny u stěny | 29 |
| 4.3.1 Standardní funkce stěny | 30 |
| 4.3.2 Nonequilibrium | 30 |
| 4.3.3 Zobecněná funkce | 30 |
| 5 Simulace v Creo Flow Analysis..... | 31 |
| 5.1 Příprava geometrie | 32 |
| 5.2 Preprocessing..... | 33 |
| 5.2.1 Přiřazení objemů a ploch | 33 |
| 5.2.2 Meshing..... | 34 |
| 5.2.3 Fyzikální moduly..... | 37 |
| 5.2.4 Počáteční a okrajové podmínky | 39 |
| 5.3 Simulační výpočet | 39 |
| 5.4 Postprocessing | 40 |
| 6 Kalibrace CFD modelu ve Flow Analysis | 42 |
| 6.1 Podmínky optimalizační simulace..... | 43 |



| | |
|--|----|
| 6.2 Numerická viskozita | 44 |
| 6.3 Turbulentní Prandtlovo číslo | 46 |
| 6.4 Turbulentní Schmidtovo číslo | 47 |
| 6.5 Isentropický model vs. ideální plyn | 49 |
| 6.6 Model turbulence Standard k- ϵ vs RNG k- ϵ | 50 |
| 6.7 Stěnové funkce | 52 |
| 6.8 Výsledný nakalibrovaný model | 52 |
| 7 Optimalizace komůrky | 53 |
| 7.1 Optimalizace naplnění z válce..... | 55 |
| 7.1.1 Podmínky simulace | 55 |
| 7.1.2 Testované varianty..... | 56 |
| 7.2 Optimalizace vyplachování | 61 |
| 7.2.1 Podmínky simulace | 61 |
| 7.2.2 Testované konfigurace..... | 62 |
| 8 Výsledky ze simulace ve FIRE..... | 65 |
| 9 Závěr | 67 |
| 10 Přílohy..... | 69 |
| 11 Seznam použité literatury..... | 83 |



Seznam použitých symbolů

| Značka | Veličina | Jednotka |
|--------------------|---|-------------------------------------|
| CFD | Počítačová mechanika tekutin | |
| LES | Large eddy simulation | |
| RANS | Reynolds averaged Navier-Stokes | |
| CA | Stupeň klikového hřídele | |
| TDC | Horní úvrať | ° |
| BTDC | Stupně klikového hřídele před horní úvratí | ° |
| p | Absolutní statický tlak tekutiny | Pa |
| β | Bezrozměrný parametr komůrky | 1 |
| d | Průměr otvorů komůrky | mm |
| D | Vnitřní průměr komůrky | mm |
| B | Vrtání válce | mm |
| A_t | Celkový průřez otvorů komůrky | mm ² |
| V_{pcc} | Objem spalovací komůrky | mm ³ |
| r | Měrná plynová konstanta vzduchu | J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| T | Termodynamická teplota tekutiny | K |
| ε | Součinitel expanze/disipace turbulentní kinetické energie (CFD) | 1 |
| κ | Adiabatický exponent vzduchu | 1 |
| μ | Dynamická viskozita | Pa.s |
| μ_t | Turbulentní dynamická viskozita | Pa.s |
| ρ | Průměrná hustota tekutiny | kg.m ⁻³ |
| C_t | Craya-Curtetovo číslo | 1 |
| τ_{ij} | Tenzor smykového napětí (molekulární + turbulentní) | Pa |
| f | Objemové síly (zrychlení) | m.s ⁻² |
| n | Povrchový normálový vektor | 1 |
| t | Čas | s |
| $\Omega(t)$ | Kontrolní objem | m ³ |
| $\partial\Omega$ | Hranice kontrolního objemu | m ² |
| δ_{ij} | Kroneckerovo delta | 1 |
| v | Rychlost tekutiny | m.s ⁻¹ |
| v_σ | Rychlost povrchu (kontrolního objemu) tekutiny | |
| v' | Fluktuace turbulentní rychlosti | m.s ⁻¹ |
| $u'_i (i = 1,2,3)$ | Složky fluktuace turbulentní rychlosti | m.s ⁻¹ |
| τ'_{ij} | Reynoldsovo turbulentní napětí | Pa |
| G_t | Generace kinetické energie turbulence | J.s ⁻¹ |
| u | Rychlost ve středu buňky | m.s ⁻¹ |
| τ_w | Tečné napětí na stěně | Pa |
| y^+ | Bezrozměrná vzdálenost buňky od stěny | 1 |

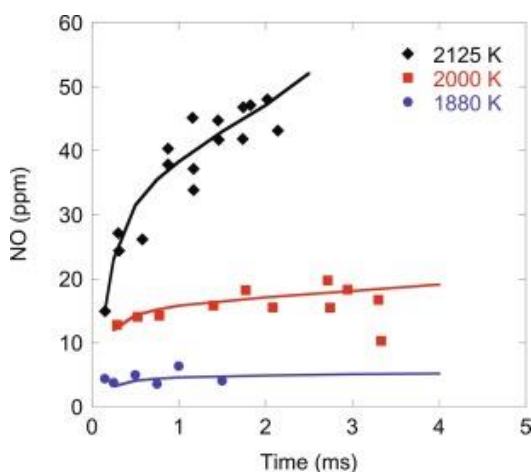


1 Úvod

Spalovací motor s vnitřním spalováním je tepelný stroj, který získává mechanickou energii transformací energie chemické na tepelnou pomocí spalování paliva. Hlavními reaktanty spalovacího procesu je uhlovodíkové palivo a vzdušný kyslík. Při dokonalém spalování vzniknou pouze 2 produkty, a to oxid uhličitý CO_2 a vodní pára H_2O . Dokonalé spalování je však jen teoretický koncept, kterého za normálních podmínek nelze dosáhnout a snažíme se mu postupným vývojem přiblížit.

Běžně dochází ve spalovacích motorech ke spalování nedokonalému. To znamená např. neúplné spálení paliva, mezi jehož produkty figurují nespálené uhlovodíky, zkratkou označovány jako HC či oxid uhelnatý CO, který vzniká neúplnou oxidací uhlíku z paliva na CO_2 atd.

Od devadesátých let minulého století se však čím dál silněji sleduje obsah oxidů dusíku NO_x , které jsou pro lidský organismus silně toxické. Vznik NO lze popsat Zeldovichovým mechanismem, tedy párem souhrnných vratných reakcí. [1]



Obr. 1 Rovnovážná koncentrace NO v závislosti na čase a teplotě [20]

Klíčem k potlačení vzniku NO je udržet teplotu spalování pod zhruba 1800 K. Nad touto hranicí začíná strmě narůstat jeho rovnovážná koncentrace. Pokud chceme

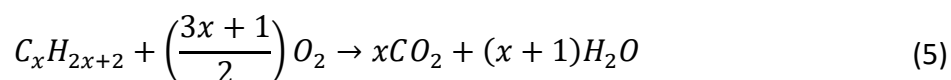


minimalizovat produkci NO, je nezbytné zajistit teplotu nižší. Toho lze dosáhnout právě ochuzením směsi, kdy je ve spalovacím prostoru dostatek plynu neúčastnícího se reakcí. Ten funguje především jako tepelný akumulátor, který však odejde do výfukového potrubí spolu se spalinami. Zmíněné snížení teplot vede zároveň k nižšímu odvodu tepla do jednotlivých komponent motoru, a tím navíc dojde ke poklesu tepelných ztrát.

Snížení teploty uvnitř spalovacího prostoru má další benefity. Jedním z nich je zvýšení termické účinnosti motoru vlivem menšího poklesu adiabatického exponentu. Tento efekt lze pozorovat z rovnice zmíněné účinnosti pro u zážehových motorů používaný Ottův cyklus viz (1). [2]

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (3)$$

Snížením NOx pod úroveň stanovenou legislativou, jen za použití chudé směsi přináší oproti moderním zážehovým motorům další změnu, a to je použití pouze oxidačního katalyzačního reaktoru¹ (lidově zvaného dvoucestného katalyzátoru), kde dochází k oxidaci HC a CO dle souhrnných chemických rovnic viz (2), (3) [3]. Pokud je motor provozován pouze v dostatečně chudé oblasti (např. jako stacionární motor v kogenerační jednotce), odpadá nutnost dalších úprav výfukových plynů z hlediska emisí NOx. Za předpokladu použití motoru v širokém spektru provozních režimů je však i zde nezbytné použití dalších systémů na likvidaci škodlivin.



Právě použití komůrky umožňuje spalování extrémně chudé směsi $\lambda > 2$, kdy teplota neroste tak vysoko, aby vznikalo značné množství NOx. Dalším přínosem komůrky je rychlé hoření směsi v hlavním spalovacím prostoru po výšlehu žhavých plynů propojujícími otvůrky. Díky tomu stačí násobně menší předstih v porovnání s konvenčním svíčkovým zapalováním. To výrazně snižuje riziko detonačního spalování, které vede k poškozování motoru.

¹ V chudém režimu ani není vhodné použití oxidačně redukčního (třícestného) katalyzátoru, protože pro jeho správnou funkci je potřeba směs velmi blízká stechiometrické.



Vodík je vysoce reaktivní a hoří daleko rychleji než uhlovodíková paliva. To vede k intenzivnějšímu zážehu ve spalovacím prostoru, tedy i jeho rychlejšímu prohoření. Díky tomu lze použít ještě menší předstih zážehu a chudší směs než v případě zemního plynu.

Pro zmíněné práce věnuje konstrukci a zároveň optimalizaci s pomocí CFD řešiče. Zároveň částečně vychází z prací svých předchůdců, ve kterých se zabývali úpravou motoru AVIA D432, tedy původně dieselové varianty. Stejně tomu je u motoru Zetor, jehož úprava na plynovou variantu s komůrkovým zapalováním je hlavním předmětem této práce.

Optimalizace designu za pomoci experimentálních metod představuje vysokou finanční i časovou zátěž. Díky neustálému zvyšování výpočetního výkonu počítačů lze do značné míry tento náročný proces podstoupit virtuálně, a to díky stále se zlepšujícím CFD simulacím. Ty nám dovolují predikovat proudění tekutin, a dokonce i následné hoření. Ač se jedná stále o zjednodušené modely, většinou dosahují vysoké shody s následným experimentem. Proto jsou CFD simulace používány k optimalizaci a až ve finální fázi se přejde k ověření s experimentálními daty.

Pro optimalizaci za pomoci CFD jsem použil software CREO Parametric. Mezi jeho výhody patří dostupnost na rozdíl od jiných specializovaných řešičů, uživatelská přívětivost (vyplývá ze zakomponování CFD řešiče do CAD softwaru), a zároveň rychlost, s jakou lze jednotlivé simulační modely upravovat a testovat tak v relativně krátkém časovém horizontu mnoho konstrukčních úprav bez potřeby vysokého výpočetního výkonu.



2 Komůrkové zapalování

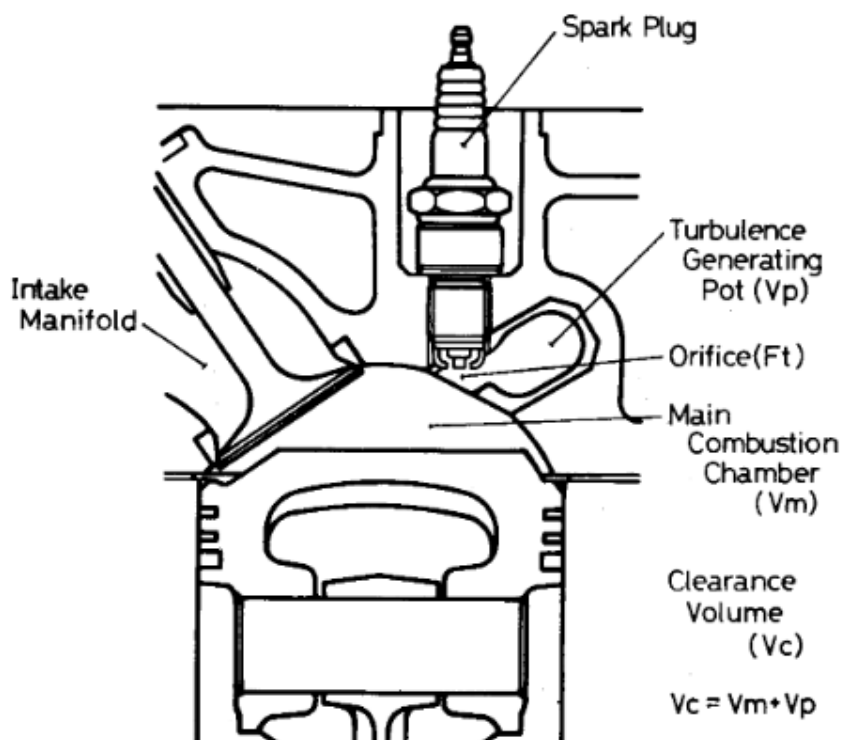
Jedná se o druh zapalování, kdy je spalovací prostor rozdělen na 2 části, a to na hlavní spalovací prostor a na komůrku. Využívá se především v kombinaci se spalováním chudé směsi, protože poskytuje zhruba o 3 řády vyšší zapalovací energii oproti zapalovací svíčce. To umožňuje spalování daleko chudší směsi. Obohacení v komůrce je dosaženo buď za pomoci aktivní dodávky paliva přímo do komůrky, nebo v případě pasivní komůrky strategií vstřikování paliva, která umožní nátok bohatší směsi do komůrky, zatímco v hlavním spalovacím prostoru je celkově chudá směs. Toho se využívalo již v minulém století, kdy takovýto systém umožnil snížení spotřeby paliva. Se zpřísnujícími se emisními požadavky však muselo komůrkové zapalování ustoupit, protože jedinou cestou, jak je splnit bylo použití oxidačně redukčního katalyzátoru, který správně funguje jen při stechiometrické směsi.

2.1 Pasivní komůrka

Jedná se o provedení, kdy je do komůrky přiváděna směs z hlavního spalovacího prostoru, tedy sama není nijak obohacována a bohatost směsi tak závisí pouze na složení v části válce okolo samotné komůrky.

Prvním popsáním provedením je komůrka, která byla vyvinuta pro Toyota Motor Co., Ltd. [4]. K vývoji zde vedlo několik hlavních faktorů a to:

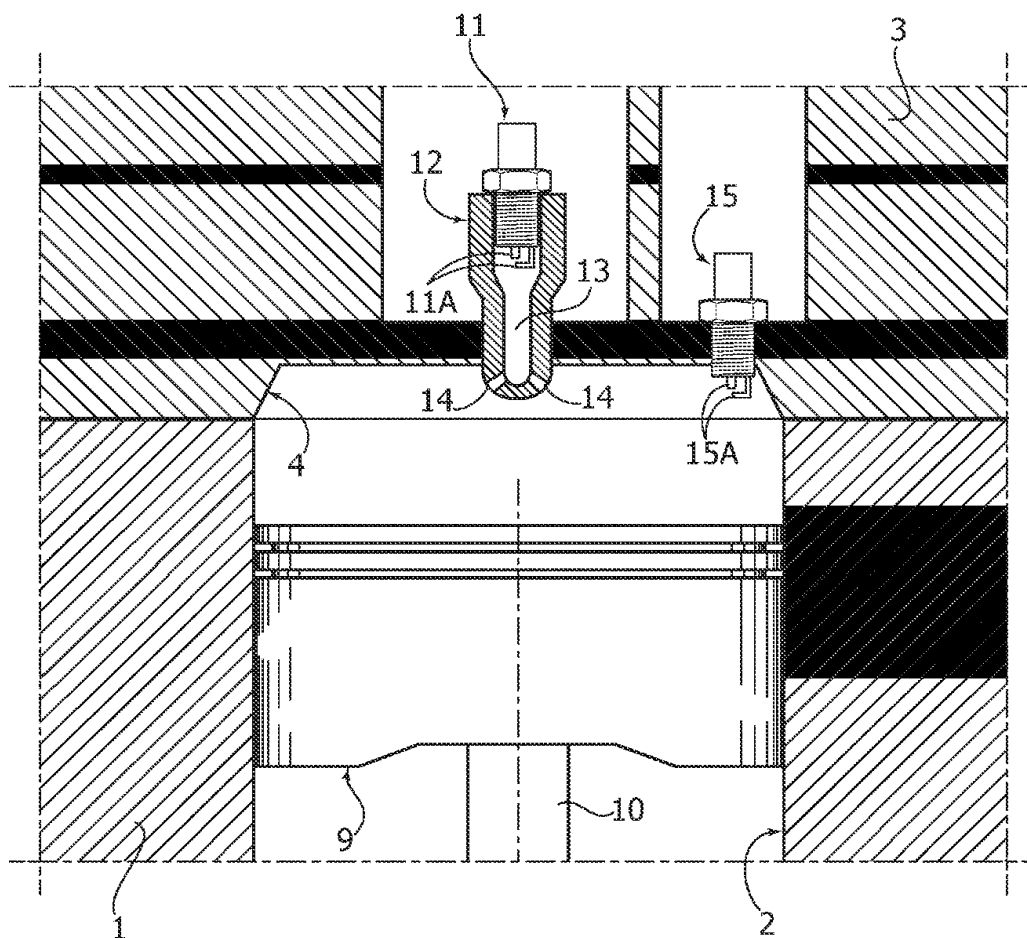
- Špatná až nemožná zapalitelnost směsi se součinitelem přebytku vzduchu λ vyšším než 1,3.
- Zvýšená spotřeba paliva při spalování chudé směsi z důvodu snížení rychlosti spalování a horšímu šíření čela plamene.
- Zvýšená mezicyklová variabilita, vedoucí k fluktuacím v indikovaném tlaku, ve výsledku tedy momentu na klikovém hřídeli, což má za příčinu zhoršené uživatelské vlastnosti motoru.



Obr. 2 Pasivní komůrka [4]

Výsledkem vývoje je turbulentní komůrka (Turbulence generating pot), která má za úkol eliminovat výše zmíněné problémy. Zvyšuje turbulenci v hlavním spalovacím prostoru, čímž dojde k rychlejšímu šíření čela plamene a zároveň jeho vyššímu zvrásnění. Tyto dva efekty celkově zrychlí spalení směsi a zároveň sníží mezicyklovou variabilitu.

Moderní verzi pasivní komůrky lze najít v přeplňovaném motoru Maserati Nettuno, který je od roku 2020 součástí vozu Maserati MC20. Na rozdíl od komůrek využívaných v plynových motorech nebo benzinových s vrstvenou směsí je zde použita pro zapalování stechiometrické směsi. Hlavním důvodem pro její implementaci je odolnost vůči detonačnímu spalování díky vyšší rychlosti spalování. To umožňuje použít pozdější předstih zážehu (vyšší jednotky stupňů, oproti i několika desítkám stupňů), zvýšení kompresního poměru na 11:1. Díky tomu lze dosáhnout vyšší účinnosti motoru, tedy při stejném výkonu snížení spotřeby paliva a tím také emisí. Zároveň to umožní použít pro požadovaný výkon motor s nižším zdvihovým objemem, tedy zástavbově a hmotnostně menší. [5]

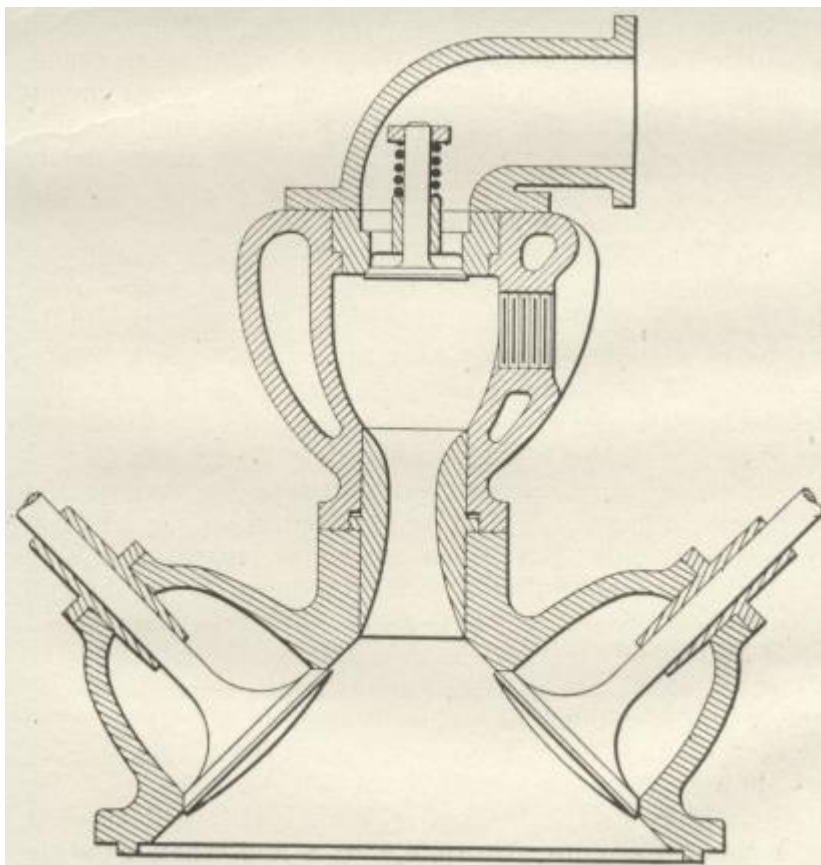


Obr. 3 Pasivní komůrka Maserati [5]

2.2 Aktivní komůrka

Na rozdíl od pasivní má svůj vlastní přívod paliva, tedy je do jisté míry možnost kontroly nad bohatostí, potažmo složením směsi v komůrce.

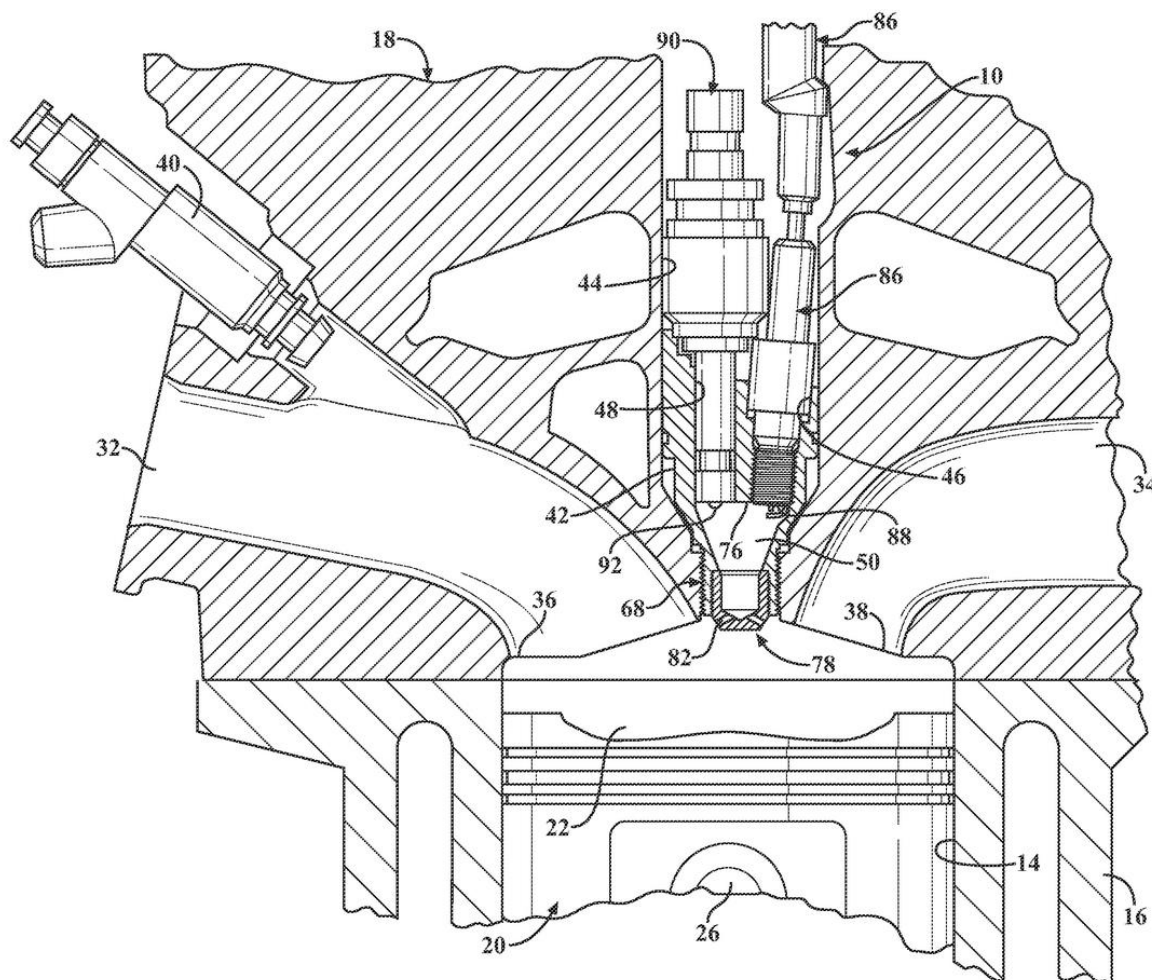
Jednu z prvních zmínek o tomto druhu komůrky nalezneme ve shrnutí výzkumné práce na spalovacích motorech Harryho R. Ricarda z roku 1922, jak je vyobrazena viz Obr. 4 kde byla realizována myšlenka chodu motoru na chudou směs pro zvýšení efektivity motoru. To má za účinek snížení tendence k detonačnímu spalování díky nižší teplotě plamene. Lze tak zvýšit kompresní poměr motoru a tím i jeho účinnost. Navrhovanou metodou pro spalování chudé směsi bylo využití možnosti směs vrstvit, tedy v okolí svíčky udržovat až do přeskočení jiskry směs dostatečně bohatou pro její zapálení. Díky tomu může být ve zbytku spalovacího prostoru směs ochuzená. K zapálení ochuzené směsi dojde díky dostatečně vysoké zapalovací energii obohacené komůrky. [6]



Obr. 4 Aktivní komůrka dle návrhu H. R. Ricarda [6]

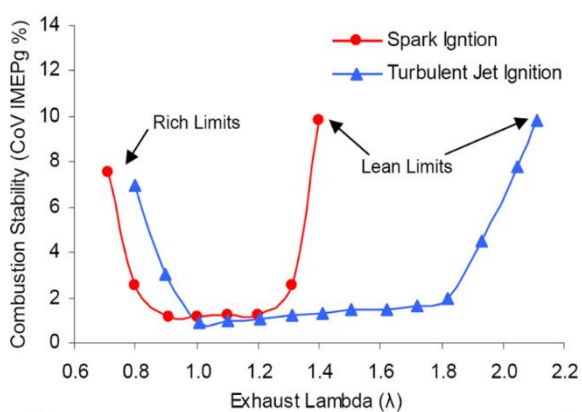
Nynější aktivní komůrky jsou v základu podobné počátečním návrhům, avšak prošly značným vývojem. Příklad lze vidět na Obr. 5, kde je zobrazeno konstrukční provedení vyvinuté firmou MAHLE Powertrain Ltd.

Komůrka (50) používá koncept zapalování známý v anglické literatuře jako „Turbulent jet ignition“. Tento koncept využívá urychlení zapálené směsi proudící ven z komůrky vlivem průchodu malými otvůrkami (orifices) (82), čímž dochází k dostatečné penetraci spalovacím prostorem a zapálení chudé směsi ve velkém objemu. Je však nutné správně navrhnout poměr mezi objemem komůrky a průřezem zmíněných otvůrků, aby nedošlo k nadměrnému dopadání paprsku na píst a tím jeho zvýšenému tepelnému zatížení či až k přehřátí a následnému selhání. Zároveň nesmí být otvůrky příliš velké, protože v tom případě dojde k zažhnutí menšího povrchu směsi a jejímu delšímu prohořívání. Komůrka má objem $1,3 \text{ cm}^3$ což jsou zhruba 2 % kompresního objemu. Celkem je v komůrce 6 otvůrků o průměru 1,25 mm. Z toho vychází poměr objemu ku průřezu na 1 cm^3 : $0,057 \text{ cm}^2$. [7]

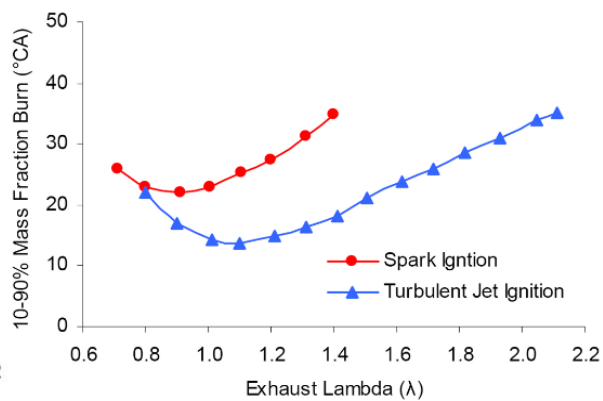


Obr. 5 Aktivní komůrka MAHLE [7]

Díky použití aktivní komůrky lze v motoru použít více typů paliv. V tomto případě je do sání vstřikován benzín zodpovědný za ~98 % přivedené energie, zbylá 2 % jsou dodatečně vstřikována do komůrky v podobě propanu, který je v komůrce spalován za stechiometrického poměru. V této konfiguraci bylo provedeno několik experimentálních měření, jejichž výsledky můžeme vidět na následujících grafech.



Obr. 6 Stabilita zapalování, komůrka MAHLE vs. svíčka [23]



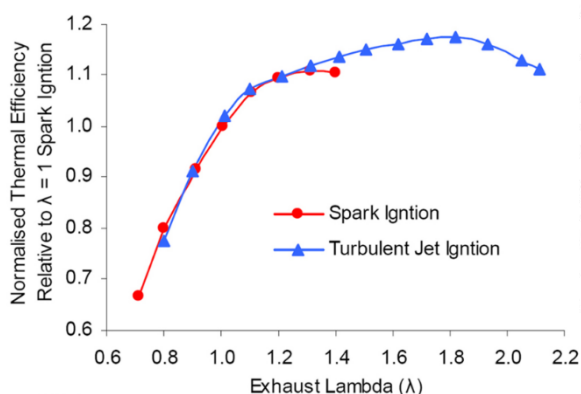
Obr. 7 Rychlost hoření, komůrka MAHLE vs. svíčka [23]



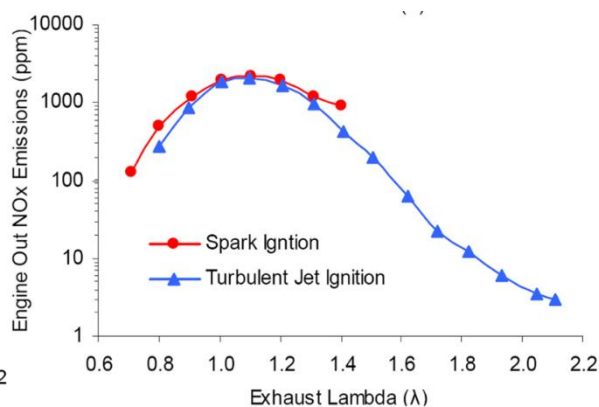
Prvním přínosem je již v případě komůrky firmy Toyota zmiňovaná snížená mezicyklová variabilita, kdy při spalování velmi chudé směsi může docházet až k úplnému vynechání zážehu. Na Obr. 6 je vidět, že skutečně komůrka umožňuje zapálit značně ochuzenou směs v porovnání s konvenčním zapalováním za pomoci svíčky.

Obr. 7. porovnává délku hoření, za kterou dojde ke spálení 10-90 % směsi ve stupních klikového hřídele. Je z něj patrný výrazný nárůst rychlosti spalování předkomůrky oproti klasické zapalovací svíčke. Opět je zde patrná výhoda komůrkového provedení, která zajišťuje zapalitelnost a dostatečně rychlé prohoření i v ochuzeném režimu, aby se předešlo nadměrnému hoření směsi v expanzním zdvihu.

Oproti konfiguraci se standardní svíčkou lze dále pozorovat až 18% navýšení termické účinnosti viz Obr. 8, tedy úspory paliva při $\lambda = 1,8$. Zároveň při takto chudé směsi nedochází k dostatečně vysoké teplotě potřebné k oxidaci N_2 na NO_x . Jejich hlavním zdrojem je pak nejspíše sama komůrka, která má však nízký objem. Díky tomu se ve spalinách nachází NO_x v koncentraci pouze 10ppm a při $\lambda > 1,8$ ještě klesá pod zmíněnou hodnotu viz Obr. 9.



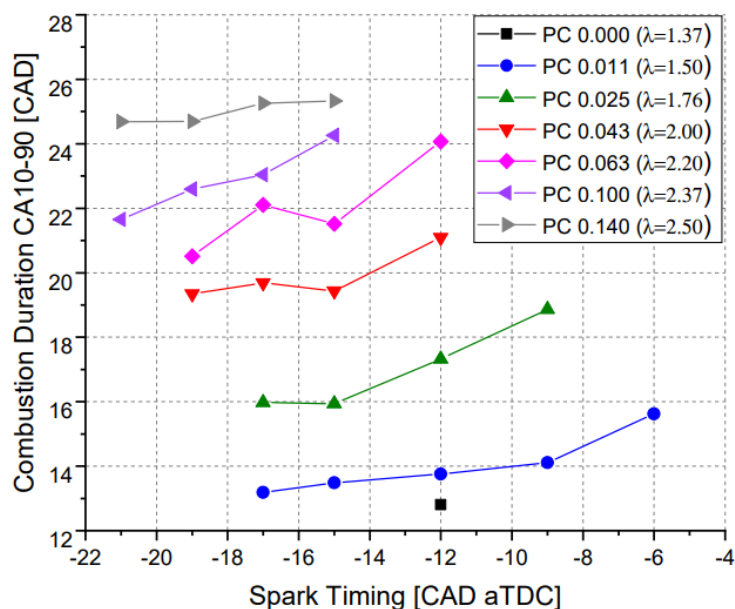
Obr. 8 Termická účinnost, komůrka MAHLE vs. svíčka [23]



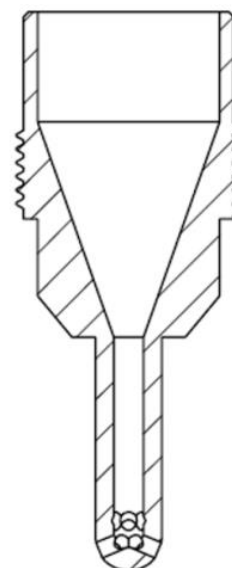
Obr. 9 Emise NO_x , komůrka MAHLE vs. svíčka [23]



Testován byl i tvar komůrky s úzkým hrdlem viz Obr. 10, kde dochází k výraznému urychlení plamene po daleko větší dráze oproti tradičním komůrkám, zároveň lze pozorovat silnější zhášecí efekt.



Obr. 11 Délka hoření v komůrce s dlouhým hrdlem [21]



Obr. 10 Komůrka s tenkým hrdlem [21]

Z Obr. 11 je patrné, že i toto provedení komůrky splňuje požadavek zapalitelnost extrémně chudé směsi (až do $\lambda = 2,5$) a dostatečně rychlé hlavní fáze hoření (spálení 10-90% paliva, které se pohybuje při nejchudším nastavení na délce zhruba 25°CA).

2.3 Vedlejší účinky spalovacích motorů na životní prostředí

Motor je tepelný stroj, který získává energii ze spalování a pracuje s omezenou účinností. Vzniká tak odpadní teplo a zreagovaná směs ve formě spalin, které ve větší koncentraci působí neblaze na živé organismy a mohou být za špatných rozptylových podmínek příčinou smogové situace.

Často bývají spalovací motory lokálně nejvyšším znečišťovatelem ovzduší (především v hustě obydlených oblastech). Důsledkem může být zvýšená míra respiračních onemocnění nebo i změny genetického kódu uvnitř buněk (mutace), včetně nádorového bujení.

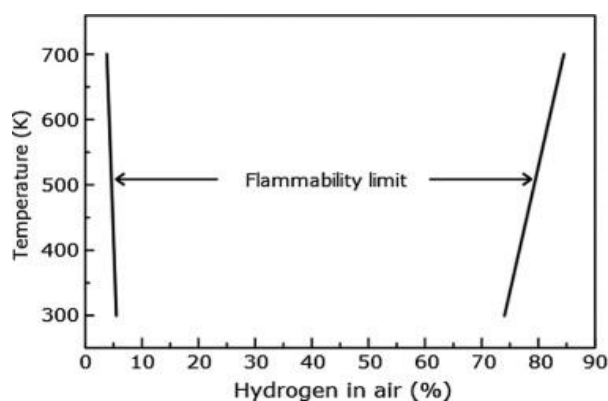
Je nezbytné počítat s produkcí elektrické a tepelné energie, která je zapotřebí k výrobě dopravního prostředku se spalovacím motorem. Nelze opomenout ani náklady spojené s recyklací, těžbou hornin či ropy a její rafinaci. S tím vším se navíc pojí ekologická rizika. [1]



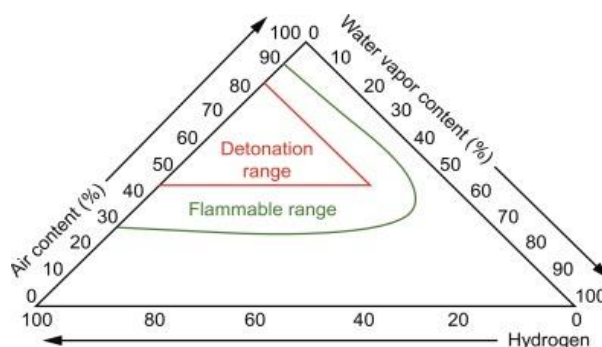
2.4 Výhody spalování H₂

Při použití vodíku jako paliva je jedním z benefitů jeho samotné chemické složení. Konkrétně absence uhlíku, díky které při spalování nedochází ke vzniku CO₂. Působí tak v celé směsi příznivě na splňování legislativních požadavků².

Jeho další výhodou je široká mez zápalnosti viz Obr. 12 (obj. 4–75% koncentrace ve vzduchu při normální teplotě, ve spalovacím prostoru se mez zápalnosti ještě zvyšuje), umožňující vyšší míru kvalitativního řízení směsi. Nutnost škrcení přichází až v ultra chudé oblasti, tedy při $\lambda = 3,3 - 4,2$. Ve všech provozních režimech je ale potřeba se vyvarovat výbušné oblasti viz Obr. 13 (obj. 15-59% koncentrace). Dalším benefitem je vysoká rychlost hoření, která napomáhá menšímu odvodu tepla do komůrky, stejně jako kratšímu průtahu mezi jiskrou v komůrce a počátkem hoření směsi ve spalovacím prostoru. [8]



Obr. 12 Mez zápalnosti vodíku v závislosti na teplotě [8]



Obr. 13 Detonační oblast vodíku [8]

² Nutno podotknout, že jde pouze o lokální emise CO₂, nikoli o globální, které mohou být kvůli energetické náročnosti vodíku naopak vyšší. Ty lze snížit např. využitím elektrické energie při nadbytečné výrobě z obnovitelných zdrojů, jinak by se musela daná elektřina mařit bez využití. Ještě lepší je použití vodíku jakožto vedlejšího produktu v chemickém průmyslu.



2.5 Doporučené parametry komůrky

V oblasti komůrek pro plynové motory jsou v poslední době používány dva konstrukčně odlišné typy (viz 2.2), konkrétně s širokým a s tenkým hrdlem, kde je průřez otvorů buď daleko menší než průřez hrdla, nebo naopak srovnatelný či i vyšší.

Ústav 12120 se věnuje především variantě s širokým hrdlem, která je již roky v různých podobách rozvíjena.

Doporučení pro parametry komůrky, jak stanovil L. A. Gussak [9], jsou:

- Objem 2 - 3 % kompresního objemu
- Plocha otvorů komůrky odpovídající 0,03 – 0,04 cm² na 1 cm³ objemu komůrky
- Poměr délky ku průměru otvorů je roven zhruba 1:2 pro snížení gradientu tlaku mezi komůrkou a hlavním spalovacím prostorem
- Zaručení bohaté směsi v komůrce, zhruba $\lambda = 0,4 - 0,7^3$

V pracích [10] [11], které se též zabývaly optimalizací velikosti komůrky a jejích otvorů, nalezneme další doporučení. Ta využívají dvou parametrů. Prvním je Craya-Curtetovo číslo (6), které dává do souvislosti průřez komůrky s jejími otvory. Poskytuje tak informaci o urychlení proudu a škrcení vlivem zmenšení průřezu. Druhým je bezrozměrný parametr β^4 (7). Ten vyjadřuje schopnost komůrky zapálit směs ve válci. Proto staví do vztahu vrtání válce a průřez otvorů s objemem komůrky. Je totiž nutné, aby proud z komůrky měl dosah co nejbližší ke stěnám spalovacího prostoru (před nimi se ideálně akorát zastaví), pro jeho co nejhomogennější prohoření

$$C_t = \left(\left(\frac{D}{d} \right)^2 - \frac{1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\beta = B \cdot \frac{A_t}{V_{pcc}} \quad (7)$$

Dle [10] je doporučená hodnota $C_t = 0,2 - 0,3$ a $\beta \sim 0,4$. Zároveň je zmíněn doporučený poměr mezi délkou komůrky a jejím průměrem a to $L/D \sim 1,5$.

³ Dnes se v komůrce cílí spíše na směs stechiometrickou. Bohatá byla uvažována především u kapalných paliv pro odpaření dostatečného množství.

⁴ Vyjadřuje jistou schopnost komůrky zapálit směs ve válci. Proto dává do vztahu vrtání válce a průřez otvorů s objemem komůrky. Je totiž nutné, aby proud z komůrky měl dosah co nejbližší ke stěnám spalovacího prostoru (avšak né na píst)



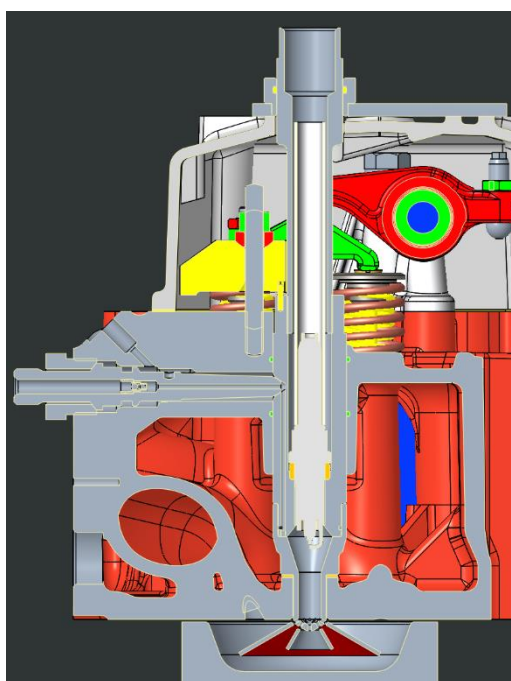
3 Konstrukce komůrky

Samotná konstrukce vychází z již existující geometrie velké komůrky na motoru AVIA D432 viz Obr. 14, která se nachází na Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Ten je do jisté míry podobný motoru Zetor. Jedná se též o řadový čtyřválcový motor předělaný ze vznětového na plynový.

Upravovaný motor je Zetor 1716. Budoucí přestavba na plyn počítá rovnou s použitím komůrkového zapalování.

Tabulka 1 Parametry motoru Zetor 1716

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Typ motoru | Zetor 1716 |
| Princip | 4-dobý zážehový |
| Jmenovité otáčky | 2200 min ⁻¹ |
| Maximální výkon | 108,2 kW |
| Maximální točivý moment | 589 Nm |
| Plnění | turbodmychadlo |
| Počet válců | 4 |
| Počet ventilů | 16 |
| Vrtání | 105 |
| Zdvih | 120 |
| Zdvihový objem | 4156 cm ³ |



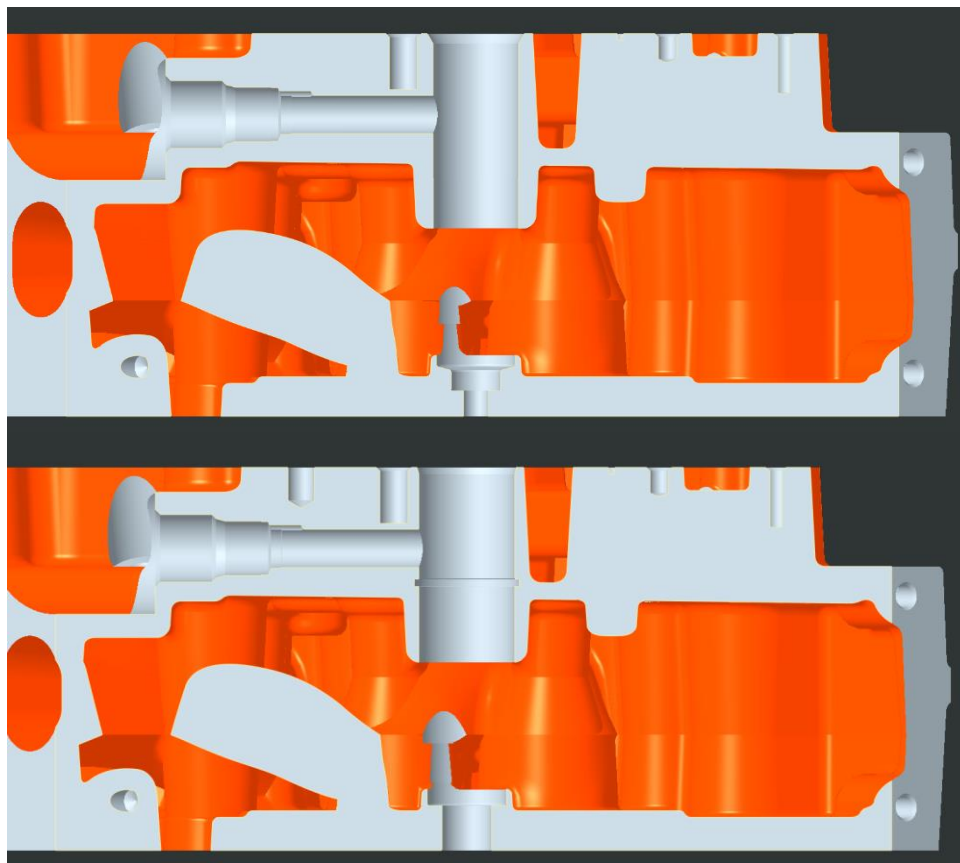
Obr. 14 Výchozí geometrie z motoru AVIA D432 [24]

Hlavním záměrem v konstrukční části bylo předělání spodní část komůrky kvůli menším zástavbovým možnostem. Ty jsou omezeny zejména z důvodu zachování co nejvyšších tloušťek stěn a eliminace možnosti proboření se do jiného prostoru v hlavě válců. Plyne z toho i další výhoda a tou je zachování co nejvyšší tuhosti.



3.1 Úpravy na hlavě válců

Těleso komůrky se nachází na místě původního vysokotlakého vstřikovače. Jedná se o rozměrově náročnější zařízení, proto je nezbytné upravit samotnou hlavu motoru.



Obr. 15 Řez hlavou válců Zetor. Nahoře: původní hlava

Dole: upravená hlava

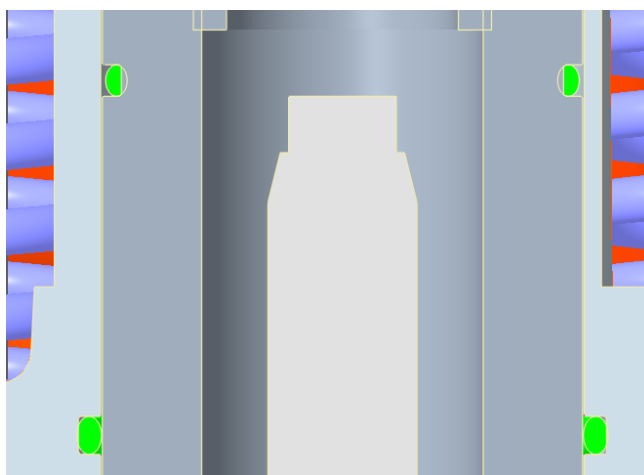
Na hlavě válců byly provedeny následující úpravy, které jsou zároveň vyobrazeny v řezech viz Obr. 15:

- Zvětšení průchozí díry ze strany ventilových rozvodů.
- Navrtání neprůchozí díry pro opěrný kolík, na který dosedá upínací třmínek, zajišťující celé těleso komůrky v hlavě válců.
- Vysoustružení drážky pro spodní O-kroužek, proti vniknutí vody do olejového prostoru.
- Zarovnání průměru díry do spalovacího prostoru na 15 mm.
- Zarovnání původního kužele na dosedací ploše pro komůrku.
- Odvrtání části stěny sacího kanálu, pro akomodaci spodní části komůrky. Jeho velikost je volena co nejmenší kvůli nebezpečí probourání se do prostoru sacích kanálů.



3.2 Těsnění

Protože je těleso komůrky ocelové, je nutné použít těsnění, aby nedocházelo k průniku oleje/chladiwa kolem tělesa komůrky.



Obr. 16 Těsnění za pomoci O-kroužků u tenké stěny

Ve spodní části tak byl použit O-kroužek těsnící zevnitř. V horní části je však hlava příliš úzká kvůli vybraní stěny pro zdvih vahadla a došlo by k jejímu proboření viz Obr. 16. Bylo tak nutné použít O-kroužek těsnící zvenku, který se montuje do tělesa komůrky.

O-kroužky byly vybrány dle katalogu o.z. HENNLICH TĚSNĚNÍ. Jako materiál byl zvolen Viton (FPM)⁵. Jeho klíčovými vlastnostmi je odolnost vůči olejům, uhlovodíkovým palivům a teplotě (-20°C až 230 °C).

Montované velikosti jsou následující:

- Kroužek nad vefukovačem – 26 x 1,5 mm
- Kroužek pod vefukovačem – 29 x 1,8 mm

Spalovací prostor je pak od chladícího okruhu těsněn za pomoci měděné podložky o tloušťce 1 mm na dosedací ploše komůrky.

Posledním těsněným rozhraním je prostor mazacího okruhu od okolní atmosféry. To je těsněno dvojmo a to O-kroužkem okolo tělesa komůrky, který je identický s kroužkem nad vefukovačem. Druhá těsnící plocha je mezi montážním plechem a víkem ventilů. Ta je těsněna jen díky přítlaku, který vyvíjí šroubové spoje.

⁵ Lze použít i O-kroužky z teflonu, ty jsou však kvůli své tvrdosti náchylnější na poškození při montáži.



3.3 Svíčka

Opět kvůli nedostatku zástavbového prostoru bylo nutno hledat specifické řešení. Nelze použít klasickou svíčku s klasickým zakončením pro nasazovací zapalovací kabely, kvůli jejich rozměrnosti. Nutnou volbou byla svíčka se šroubovacím terminálem⁶. Na něj je možno našroubovat prodlužovací nástavec. Díky němu lze napojovat zapalovací kabely až v prostorově otevřené pozici.

Z výše zmíněných důvodů byly na svíčku kladeny následující parametry:

- Dlouhý (minimálně 20 mm) závit M12x1,25 (menší velikosti se rychle opotřebovávají)
- Koncovka na klíč velikosti 14
- Šroubovací terminál

Ty splňuje svíčka BOSCH VR8SC+ viz Obr. 17, která disponuje odšroubovatelným terminálem, pod kterým se skrývá šroubovice M4x0,7.



Obr. 17 Zapalovací svíčka BOSCH VR8SC+

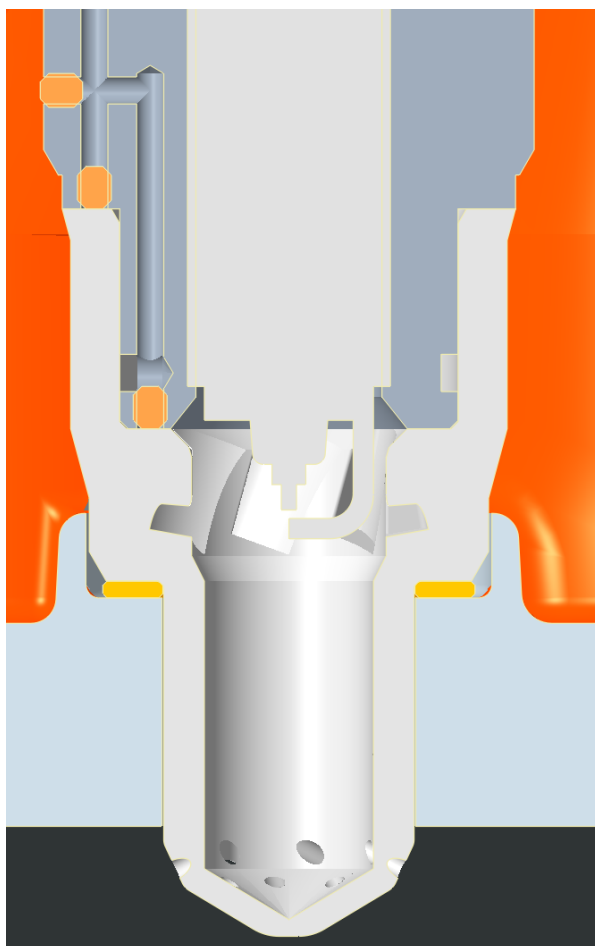
⁶ Nástavec je v různých podobách použit i na komůrkách motoru Avia.



3.4 Komůrka

Jedním ze základních požadavků na konstrukci komůrky je její vyrobiteľnost třískovým obráběním. Vnější plochy jsou především soustružené, zatímco vnitřní jsou zejména vrtané s dokončováním za pomoci frézování. V případě útvarů pro usměrnění proudění v komůrce jde pouze o frézování. Otvěrky do komůrky lze vyrobit buď zarováním malé části povrchu, do které je následně kolmo veden vrták, nebo je možné použít obrábění vyjiskřováním (zde se jedná o přípustnou výjimku od třískového obrábění). Vnitřní závity jsou dle velikosti buď soustruženy, nebo vrtány závitníkem.

Pro co nejmenší obrábění hlavy bylo ve spodní části středového dílu komůrky vytvořeno koleno pro vedení plynu za pomoci více vývrtů viz Obr. 18. To umožnilo zmenšit průměr spodní části komůrky. Tím ale vznikly tři otvory, které bylo nutno zaslepit. Toho bylo dosaženo za pomoci šroubovaných ucpávek, které je nutné ještě utěsnit tmelem, nebo lépe zavařit, protože se nejedná o díly, které by měly být rozebíratelné.



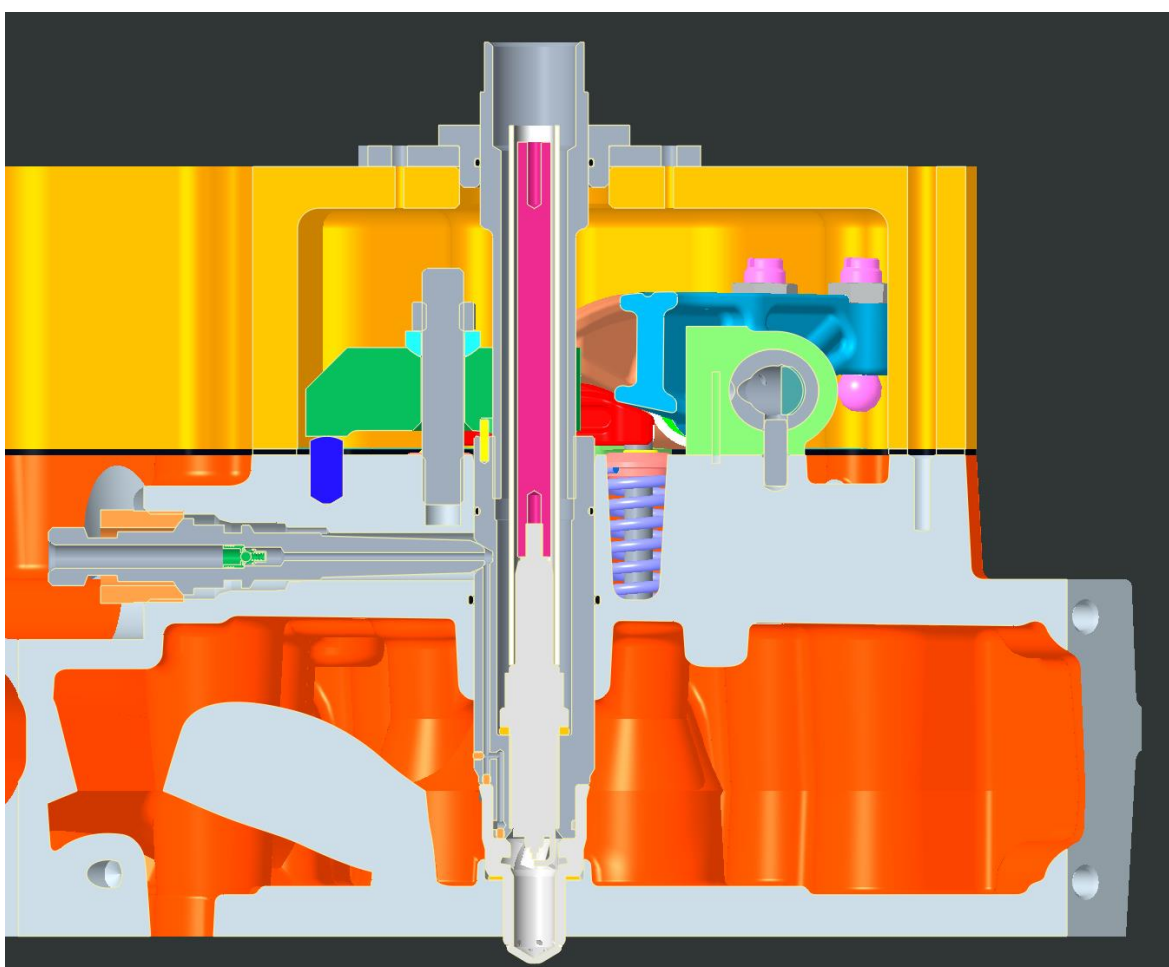
Obr. 18 Detail spodní části komůrky Zetor



3.5 Montáž

Spodní a středová část komůrky jsou do sebe navzájem lisované. Spáru vzniklou po nalisování je ještě vhodné laserem zavařit. Tím lze docílit lepší soudržnosti, která je jinak závislá na výrobních tolerancích lisování. Zároveň tím dojde k utěsnění tělesa komůrky.

Celé těleso viz Obr. 19 je pak na místě zajištěno za pomoci přidržovacího třmínku, který slouží jak pro upevnění komůrky v provozní poloze, tak (s pomocí středícího kolíčku) k vymezení polohy pro vefukovač.



Obr. 19 Zástavba komůrky do motoru Zetor 1716



4 Výpočetní model CFD

Tato část práce vysvětluje fungování základních CFD rovnic v modulu Flow Analysis.

4.1 Proudění tekutiny

Jelikož se jedná o metodu konečných prvků, jsou rovnice použity ve tvaru integrálním.

4.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity neboli zákon zachování hmoty, vyjadřuje základní myšlenku, že hmota nemůže v systému vznikat ani zanikat, jen je přemísťována prouděním. Tento fakt znázorňuje rovnice (6), kde zleva členy vyjadřují změnu hmoty v kontrolním objemu a pak odtok/přítok hmoty.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \rho d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho(\bar{v} - \bar{v}_\sigma) \cdot n d\sigma = 0 \quad (8)$$

4.1.2 Zákon zachování hybnosti

Zleva rovnice obsahuje členy: změnu hybnosti, přítok/odtok hybnosti, působení povrchových sil, tlakové síly a konečné síly objemové.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \rho v d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho((\bar{v} - \bar{v}_\sigma) \cdot n) v dS = \int_{\partial\Omega} \bar{\tau} \cdot n dS - \int_{\partial\Omega} \bar{p} n dS + \int_{\Omega} f d\Omega \quad (9)$$

Samotný tenzor napětí $\bar{\tau}$ pak lze rozepsat do formy:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} - \frac{2}{3} \frac{du_k}{dx_k} \delta_{ij} \right) \quad (10)$$

4.2 Modelování turbulence

Pro modelování turbulence CREO využívá průmyslově rozšířené a lety ověřené modely založené na RANS přístupu. Ten využívá pro výpočet tenzoru turbulentních napětí nově zavedenou turbulentní viskozitu. Pro Newtonské látky, ve kterých lineárně narůstá rychlost deformace s napětím, lze pro turbulentní viskozitu aplikovat Bussinesqovu hypotézu. Ta nám pak definuje tenzor turbulentních napětí jako:

$$\tau'_{ij} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (11)$$

Oba nabízené modely jsou dvourovnicové typu k- ϵ , řeší tedy transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii a její disipaci.



4.2.1 Standardní k-ε

Jedná se o základního zástupce k-ε, který v roce 1974 navrhli Launder a Spalding. Využívá předpoklad plně turbulentního proudění, a tedy i vysokých Reynoldsových čísel, zároveň se přepokládá zanedbatelný vliv molekulární viskozity. Neumí však dobře pracovat s víry a obecně rotací proudění, stejně jako s jeho odtrháváním. [12]

Transportní rovnici pro turbulentní kinetickou energii k lze zapsat jako:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \rho k d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho ((v - v_\sigma) \cdot n) k dS \\ = \int_{\partial\Omega} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) (\nabla k \cdot n) dS + \int_{\partial\Omega} (G_t - \rho \varepsilon) dS \end{aligned} \quad (12)$$

Disipaci turbulence ε pak zapíšeme podobně jako:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \rho \varepsilon d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho ((v - v_\sigma) \cdot n) \varepsilon dS \\ = \int_{\partial\Omega} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) (\nabla \varepsilon \cdot n) dS + \int_{\partial\Omega} \left(c_1 G_t \frac{\varepsilon}{k} - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right) dS \end{aligned} \quad (13)$$

Kde:

Tabulka 2 Konstanty k-ε modelu [13]

| | |
|----------------------------|--|
| $c_1 = 1,44$ | konstanta modelu |
| $c_2 = 1,92$ | konstanta modelu |
| $\sigma_k = 1$ | Prandtlovo číslo turbulentní kinetické energie |
| $\sigma_\varepsilon = 1,3$ | Prandtlovo číslo turbulentní disipace |
| $C_\mu = 0,09$ | konstanta modelu |

Turbulentní kinetickou energii lze vyjádřit za pomoci turbulentní rychlosti jako:

$$k = \frac{1}{2} (v' \cdot v') \quad (14)$$

Disipaci turbulence pak jako:

$$\varepsilon = 2 \frac{\mu}{\rho} (S'_{ij} \cdot S'_{ij}) \quad (15)$$

Kde lze tenzor deformací vyjádřit zápisem:

$$S'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x'_i} \right) \quad (16)$$

Turbulentní viskozitu popíšeme vztahem:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

Generaci turbulence pak můžeme zapsat součinem Reynoldsova napětí a deformací:

$$G_t = \tau'_{ij} S'_{ij} = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (18)$$

4.2.2 RNG k-ε

Jedná se o jeden z prvních vylepšených k-ε modelů. Byl odvozen za pomoci statistické metody renormalizačních grup (RNG). Zahrnuje tak účinek vírů na turbulenci,



je tak na rozdíl od Standardního modelu vhodný pro vířivé proudění. Obsahuje analytický vzorec pro výpočet turbulentního Prandtlova čísla. [14]

Transportní rovnice pro k je prakticky stejná jako pro Standardní k - ϵ . Liší se však zápis ϵ , který nabývá tvaru:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \rho \epsilon d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho ((v - v_\sigma) \cdot n) \epsilon dS \\ = \int_{\partial\Omega} \alpha_\epsilon (\mu + \mu_t) (\nabla \epsilon \cdot n) dS + \int_{\partial\Omega} \left(c_1 G_t \frac{\epsilon}{k} - c_2 (RNG) \rho \frac{\epsilon^2}{k} \right) dS \end{aligned} \quad (19)$$

Rovnice obsahuje tentokrát nekonstatní člen $c_2(RNG)$ namísto konstanty c_2 . Je tak vhodnější pro použití i při vysokých rychlostech proudění.

$$c_2(RNG) = c_2 + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{k}{\epsilon} \sqrt{2S'_{ij}S'_{ij}} \quad (21)$$

Kde:

Tabulka 3 Konstanty modelu RNG k - ϵ [13]

| | |
|--------------------------|--|
| $c_1 = 1,42$ | konstanta modelu |
| $c_2 = 1,68$ | konstanta modelu |
| $C_\mu = 0,085$ | konstanta modelu |
| $\beta = 0,012$ | konstanta modelu |
| $\alpha_\epsilon = 1,39$ | inverzní Prandtlovo číslo turbulentní disipace |
| $\eta_0 = 4,38$ | konstanta modelu |

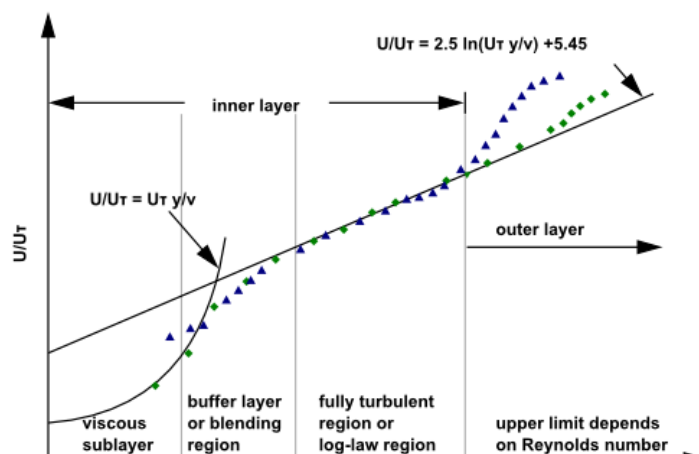
4.3 Chování kapaliny u stěny

Protože je proudění turbulentní až v určité vzdálenosti od stěny, je potřeba vrstvu mezi stěnou a turbulentním proudem dodatečně modelovat. U stěny se nachází vysoký gradient rychlosti, jehož efektem je vysoká produkce turbulentní kinetické energie, proto hraje přesnost řešení ve finálním proudění výraznou roli.

Proudění v blízkosti stěny rozlišujeme dle vzdálenosti na:

- Viskózní podvrstvu: $0 < y^+ < 5$
- Přejícnou oblast: $5 < y^+ < 30$
- Inerciální jádro (logaritmická oblast): $30 < y^+ < 200$

Abychom nemuseli tyto vrstvy zachycovat detailně sítí, což vede ve 3D ke značnému nárůstu požadavku na výpočetní výkon, používají se k jejich modelování stěnové funkce, které tak co nejpřesněji popisují přechod mezi jednotlivými zónami. [12]



Obr. 20 Proudění v blízkosti stěny [18]

4.3.1 Standardní funkce stěny

Jedná se o základní stupeň modelování proudění v blízkosti stěny, se kterým přišli B. E. Launder and D. B. Spalding. Základem je rozdělení vrstvy na 2 oblasti a to pro $y^+ < 11,25$, kde je použit laminární vztah a pro $y^+ > 11,25$, kde je pak použit logaritmičtý zákon stěny. Jedná se však o první možné přiblížení, které má jisté podmínky pro zaručení správné funkčnosti, jako např. malé tlakové gradienty, malé zakřivení proudu bez separace či malá zrychlení.

4.3.2 Nonequilibrium

Jak vyplývá již z názvu, jedná se o nerovnovážný model, kdy produkce turbulentní kinetické energie není rovna její disipaci. To umožňuje práci s vysokými tlakovými gradienty, které jsou zohledňovány ve výpočtu střední rychlosti s použitím logaritmičtého zákona stěny. Zároveň jde o dvouzónový model, který počítá s přechodovou vrstvou ($3 < y^+ < 10$) mezi viskózní podvrstvou a turbulentní podvrstvou.

4.3.3 Zobecněná funkce

Umí vhodně nakládat jak s pozitivním, tak negativním tlakovým gradientem a nabývá platnosti až k turbulentnímu jádru. Využívá celkem tři vrstev, ve kterých postupně vyjadřuje turbulentní střední rychlost, tedy ve viskózní podvrstvě, přechodové vrstvě a v turbulentní podvrstvě. Vykazuje dobré výsledky i při recirkulaci a složitých tvarech proudění.



5 Simulace v Creo Flow Analysis

V CAD software CREO se již od verze CREO 5.0.0.0, vydané v roce 2018, nachází rozšíření Flow Analysis, určený k řešení výpočetní dynamiky tekutin. Ten vznikl integrací řešení od společnosti Simerics, která se dlouhodobě danou problematikou zabývá. Jak už však bývá zvykem, jeho první vydání trpělo mnoha nedostatky, jako častější padání celého softwaru, neuložení změny v grafickém rozhraní/hodnoty přepsané veličiny, absence jednotek atd. Postupně dochází k jejich odstraňování a optimalizaci samotného výpočtu, avšak ani ve verzi 7.0.7.0, ve které byla odvedena většina práce, není všech chyb zbavena. V květnu letošního roku vyšla verze 9.0.0.0, která snad zaznamená další vylepšení a optimalizaci, nebylo však již v časových možnostech tuto verzi otestovat.

Hlavní předností rozšíření je jeho pracovní jednoduchost a rychlost spočívající v integraci do samotného CAD softwaru. To s sebou bohužel nese i jisté zápory, jako je přílišné omezení v práci s výpočetní sítí, stejně jako ve výpočetních modelech. Je tedy více jakýmsi konstruktérským pomocníkem pro prvotní optimalizaci návrhu. K finálnímu ověření je stále vhodné použít specializovaný software.

| Capability | Creo Flow Analysis Basic | Creo Flow Analysis Plus | Creo Flow Analysis Premium |
|---|--------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Calculate Internal and External Flows | ● | ● | ● |
| Animate Flow results in real-time | ● | ● | ● |
| Parallel Processing Simulation | ● | ● | ● |
| Simulate Flow | ● | ● | ● |
| Heat Transfer | ● | ● | ● |
| Turbulence | ● | ● | ● |
| Particle - Simulate individual particles in the context of the flow | | ● | ● |
| Radiation - Heat transfer due to emission of electromagnetic waves | | ● | ● |
| Species - Simulating the mixing of liquids with similar densities. | | ● | ● |
| Moving/Sliding Meshing - Simulate the movement of individual components in a flow analysis | | ● | ● |
| Cavitation - Simulates Vapor, Free Gas and Liquid (bubbles) compressibility | | | ● |
| Multiphase - Used when simulating gas and liquid together | | | ● |
| Multicomponent - Another mixing capability used for multiple gases and density | | | ● |
| Dynamics - Simulate interaction of fluids and solids | | | ● |

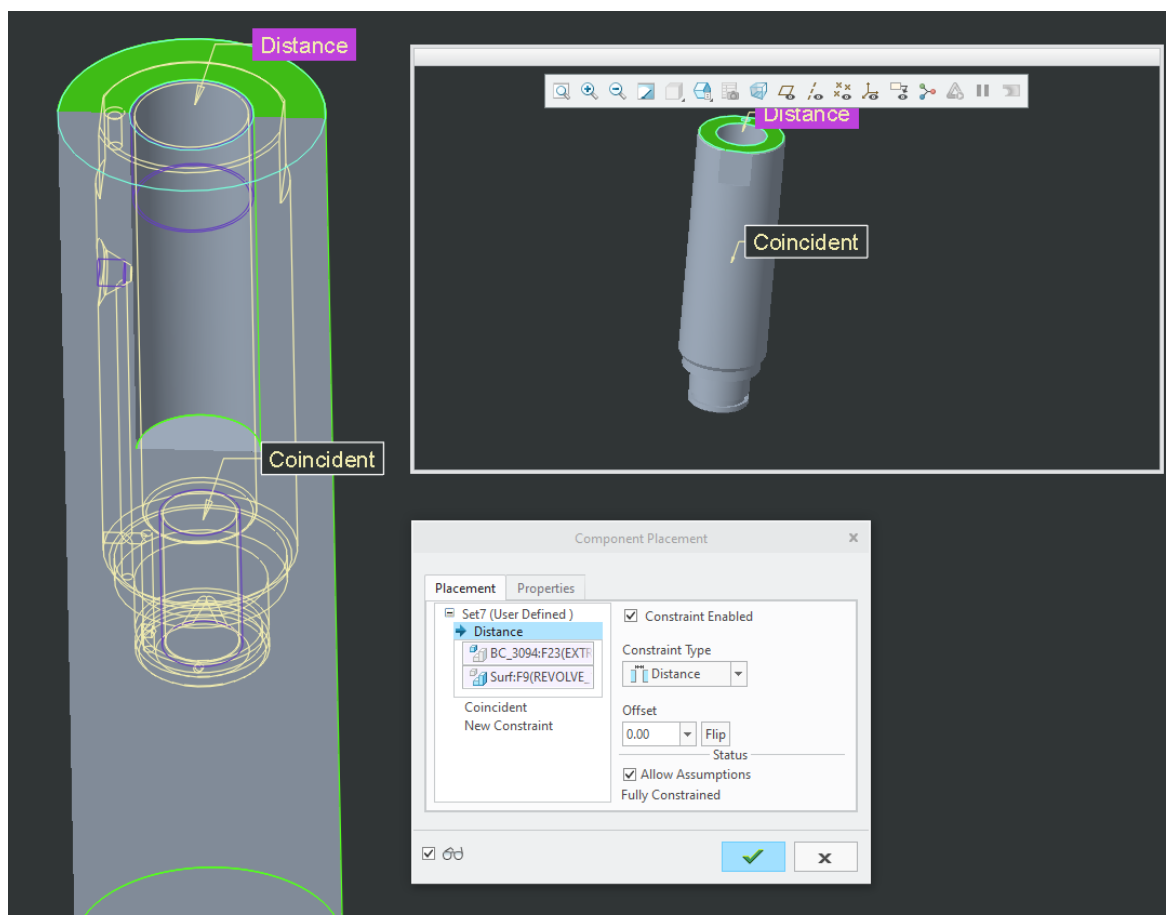
Obr. 21 Přehled balíčků CREO Flow Analysis [19]



Školní verze disponuje nejjobsáhlejší licenci, která byla nezbytná k řešení problematiky míchání více plynů (modul Multicomponent mixing). Pro aktivaci rozšíření je potřeba rozšířenou licenci při instalaci přesunout mezi aktivní licence. Tam se lze „prokliknout“ přes tlačítko Edit viz Obr. 54 při výběru části Creo Parametric, během kroku určeného pro nastavení jednotlivých částí CAD softwaru. Je pak potřeba vybrat rozšíření CFD_ADVANCED_PLUS_SET viz Obr. 55, které odpovídá licenci Creo FLOW Analysis Premium, tedy maximální možné.

5.1 Příprava geometrie

Krokem, který ještě předchází práci v samotném prostředí Flow Analysis, je příprava geometrie požadovaného modelu. V tomto případě se jedná o vnitřní geometrii komůrky s nátokovou soustavou a přidavné polokoule nahrazující prostředí uvnitř spalovacího prostoru.



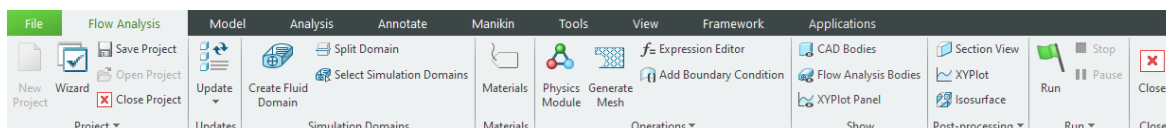
Obr. 22 Použití funkce Merge pro tvorbu simulační geometrie

Nejprve je potřeba vytvořit těleso větší než naše geometrie, protože ji budeme od tělesa odečítat. Toho lze docílit pouze v editaci dílu, protože funkce Merge není v editaci sestavy podporována. Sama funkce je schována pod šipkou Get Data. Po vybrání funkce stačí otevřít díl, který chceme odečíst (funkce umí tělesa i slučovat atd.) a v dialogovém



okně, které se po vybrání dílu otevřelo ho spojíme vazbami s původním tělesem viz Obr. 22 (Ize si vizuálně pomoci v okénku vazeb na políčko vedle ikony brýlím, kde se nám objeví poloha součásti i v hlavním okně). Tento postup aplikujeme i na další díly, dokud nedosáhneme požadované vnitřní geometrie. Pak stačí jen např. funkcí Revolve odstranit zbylou přebytečnou geometrii.

Analogicky lze vytvořit polokouli okolního prostředí a v nově vytvořené sestavě k sobě hotové díly propojíme vazbami s využitím funkce Assemble a tím je geometrie připravena pro rozšíření Flow Analysis (nacházející se v záložce Applications). V této práci je výhodné rozdělit samotnou komůrku a okolní prostředí, přestože rozšíření Flow Analysis již v porovnání s původní verzí umí pracovat nejen se sestavami, ale i s jednotlivými součástmi.



Obr. 23 Hlavní panel modulu Flow Analysis

5.2 Preprocessing

Jedná se o stěžejní část celého CFD, kde nastavujeme simulaci od použitých tekutin, výpočetních modelů, přes síťování až k počátečním a okrajovým podmínkám.

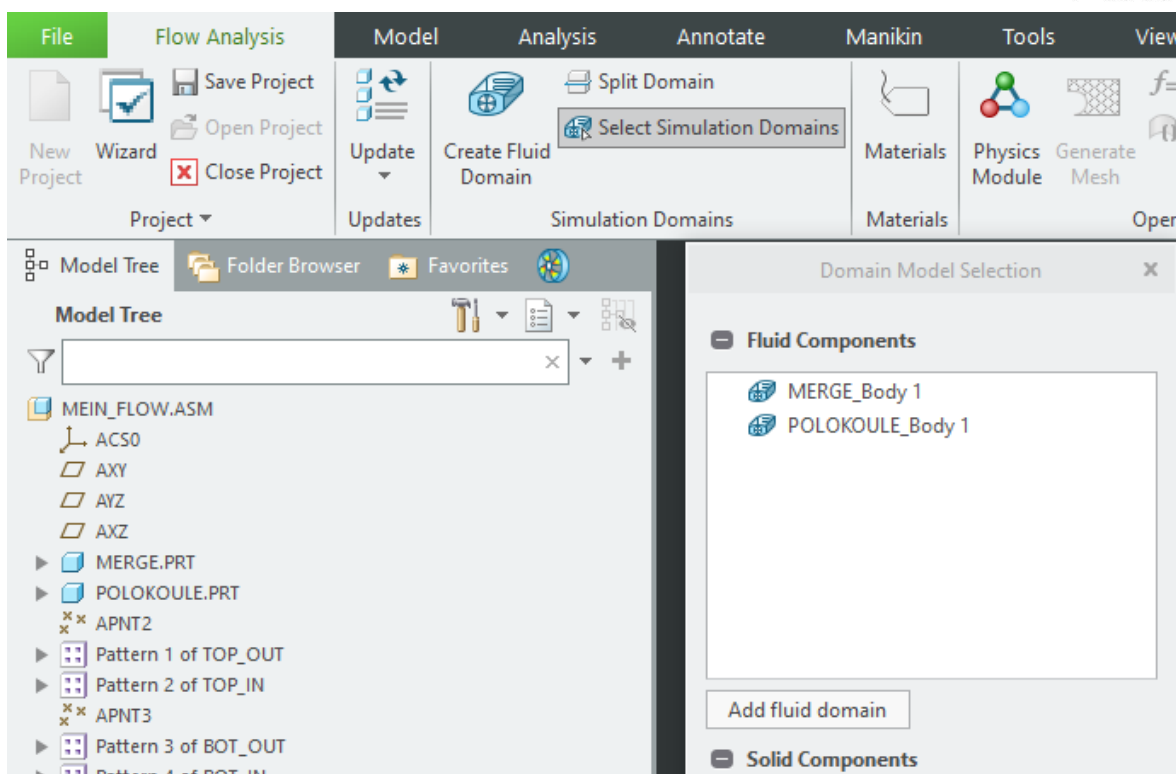
Prvním krokem po otevření rozšíření je vytvoření nového projektu. Ten automaticky převezme název ze jména soustavy použité pro simulaci⁷.

5.2.1 Přiřazení objemů a ploch

Jelikož máme model již připravený, není třeba vytvářet jednotlivé simulační domény. Stačí vybrat jednotlivé objemy v podobě dílů v sestavě. Použijeme pro to funkci Select Simulation Domains, v dialogovém okně vybereme Add fluid domain, přepneme se v levém sloupci do Model Tree a vybereme oba díly, tvořící simulační sestavu.

Pro výběr ploch okrajových podmínek si musíme nejdříve na hlavním panelu zapnout viditelnost Flow Analysis Bodies. Pak použijeme funkci Add Boundary Condition a postupným výběrem si je připravíme pro okrajové podmínky.

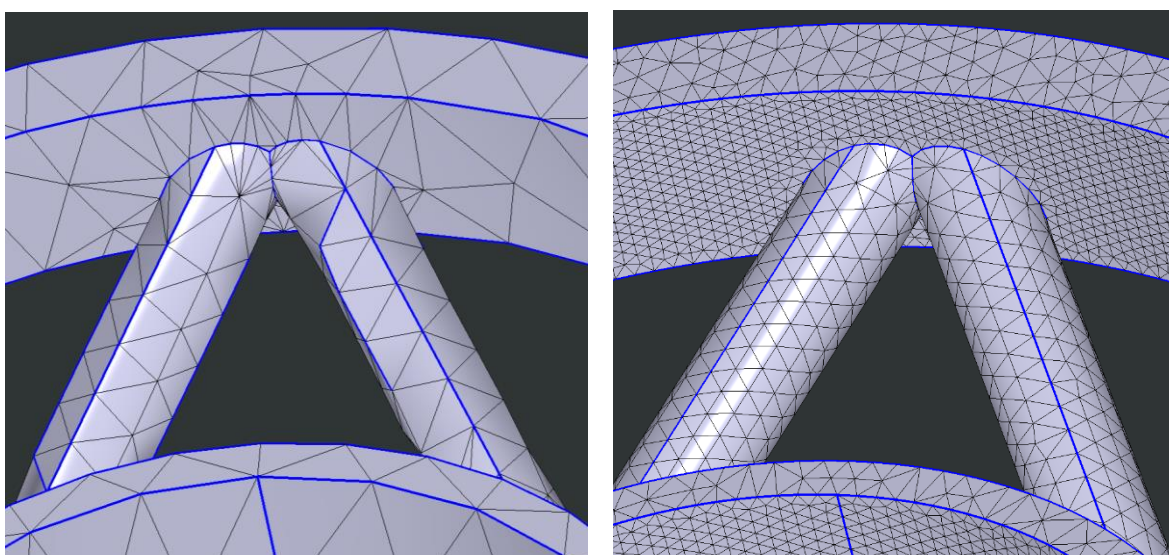
⁷ Od verze 9.0.0.0 lze pro jednu geometrii vytvořit více projektů najednou, je tedy jednoduše dostupné porovnání různých simulačních parametrů.



Obr. 24 Tvorba simulační domény

5.2.2 Meshing

Než začneme nastavovat okrajové podmínky, je vhodné se věnovat tvorbě sítě. Ta samotná má na ně vliv (dotvoří se při její generaci další oblasti s nutností stanovit okrajové podmínky). K té se dostaneme v bočním stromě při výběru souhrnného prvku simulačních domén, kdy se v dolní části objeví záložka Mesh.



Obr. 25 Teselace povrchu s hodnotou parametru vlevo: 4 ; vpravo: 0,1



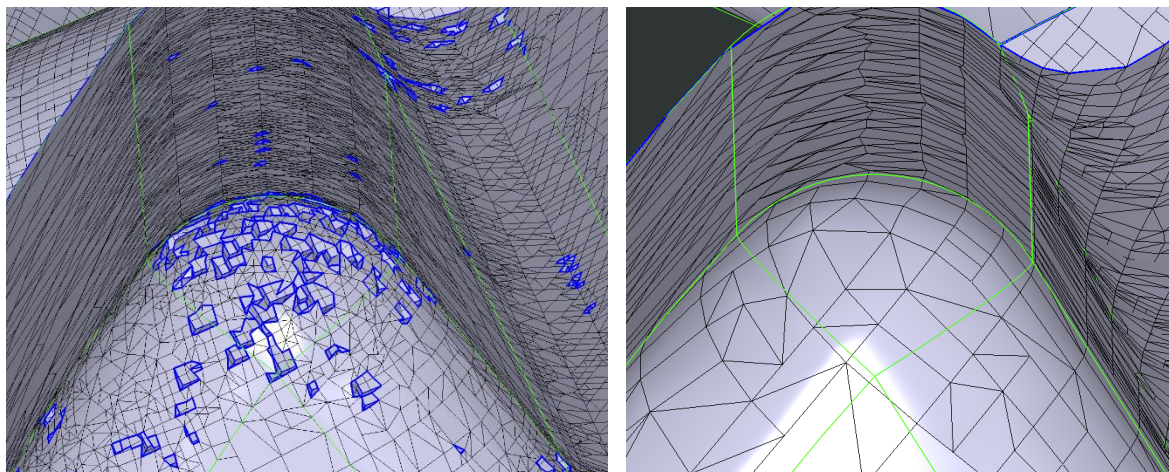
Prvním krokem při tvorbě sítě je teselace povrchu simulačních domén. Ta má za úkol vytvořit co nejlepší reprezentaci povrchu za použití rovinných útvarů místo zakřivených ploch. Výsledkem je tedy lehce zjednodušená geometrie. Pro geometrie malých rozměrů je však výchozí rozlišení teselace velice nízké. Bohužel lze její parametry upravit pouze pro typ Regular, který nelze využít k vytvoření simulační sítě⁸. Absenci nastavení přímo v grafickém rozhraní lze do jisté míry obejít vytvořením „proměnné prostředí“ přímo v systému Windows⁹. Tam je potřeba vytvořit proměnnou CFD_MESH_CONTROL_PERCENT, která je ve Flow Analysis zabudovaná. Není jiný způsob, jak se k nastavení její hodnoty dostat. Bez jejího explicitního nastavení na hodnotě 4, což je pro rozměrné geometrie dostačující, nicméně při milimetrových rozměrech je značně nedostačující. Proto je vhodné parametr pro lepší aproximaci geometrie snížit viz Obr. 25.

Právě možnosti ovlivňující výslednou síť jsou zde silně omezené. CREO využívá výhradně šestistěnné buňky s rovinnými stěnami (ve výjimkách na povrchu modelu pětistěnné). Nelze tak vytvořit ani rotačně symetrickou síť, která by byla pro osově symetrické proudění vhodná. Proto je nutné v případech, kde se takové proudění nachází, značně zjemnit výpočetní síť.

Upozornil bych ale, že CREO ve výchozím nastavení nepoužívá pro nastavení sítě žádné jednotky, nýbrž vztahuje rozměry k velikosti jakési opsané krychle simulačních domén. Stačí si však vybrat absolutní specifikaci velikosti buněk a nastavení se přepne na metry. Pak můžeme s vybráním Advanced Mode jednoduše využít maximální možnosti nastavení velikosti buněk. Narazíme i na rozlišení kritického úhlu a rozlišení zakřivení. To jsou užitečné parametry pro zjemnění sítě v místech kde se výrazněji mění proudění. S jejich snižováním je však nezbytné vysoce zjemňovat síť, jinak se v hojném množství objeví poruchy sítě viz Obr. 26. Proto musíme najít takové nastavení, kdy jsme spokojeni s rozlišením těchto míst, ale zároveň nám významně výpočetní čas neprodlužují.

⁸ Od verze CREO 9.0.0.0 jsou možnosti pro úpravu simulační teselace přímo v prostředí Flow Analysis.

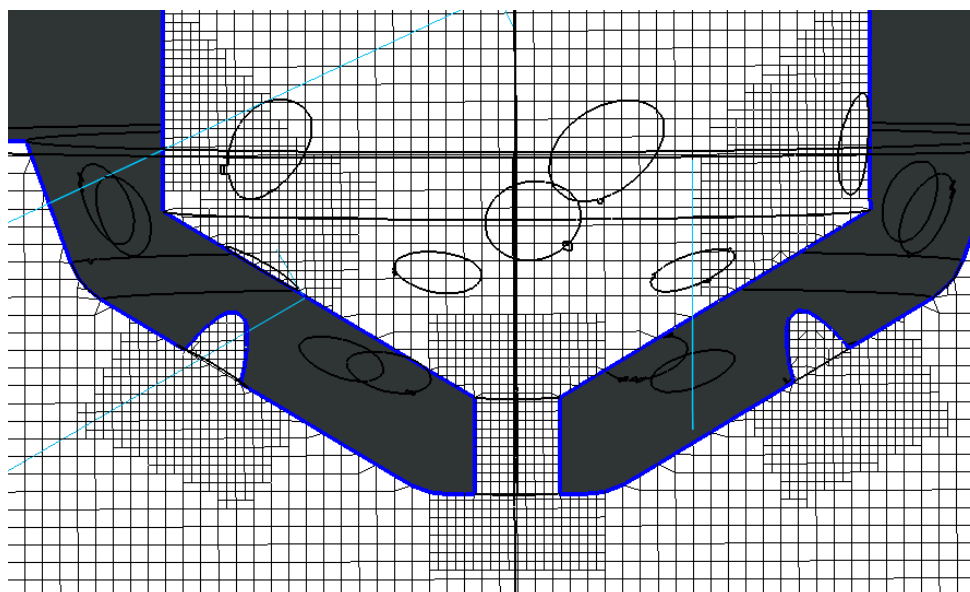
⁹ V prostředí Windows vyhledáme „Proměnné prostředí“, otevře se okno, kde vpravo dole klikneme na Proměnné prostředí a vytvoříme novou proměnnou.



Obr. 26 Vlevo špatného nastavení parametrů sítě (685 038 buněk)

Vpravo lepší nastavení povrchu sítě (68 472 buněk)

Pokud máme v modelu oblasti, kde dochází např. k vysoké změně tlaku/rychlosti proudění vlivem zúžení či jiných okolností a jsou dobře geometricky vymezené, přichází pak vhod možnost lokálního zjemnění sítě. Toho dosáhneme pomocí Refine Zone, kde lze vybrat např. válcovou zónu viz Obr. 27, kterou specifikujeme za pomoci středových bodů základů a průměru válce. CREO k tomu neumožňuje použít body vytvořené v modelu, je tedy nezbytné si jejich souřadnice opsat a následně je přepsat do nastavení zjemněné zóny.



Obr. 27 Řez lokálního zjemnění sítě v okolí nátoků do komůrky



5.2.3 Fyzikální moduly

Jako další je vhodné vybrat potřebné fyzikální moduly, ze kterých je pro řešení problematiku potřeba minimálně Turbulence pro vnesení turbulence do proudění. Dále potřebujeme Multicomponent Mixing kvůli míšení více plynů a Heat pro přestup tepla mezi hranicemi a tekutinou. Pro lepší vyobrazení výsledků je možné si zapnout i modul Streamline a Particle, které využijeme v postprocessingu viz 5.4.

Tímto krokem se otevřelo několik dalších částí v levém stromu pod ikonou Flow Analysis, které je nutno nakonfigurovat. Nejprve přejmenujeme jednotlivé tekutiny ve stromu Physics pod položkou Multicomponent Mixing např. na methan a vzduch¹⁰.

Dále přejdeme do nastavení materiálů pod funkcí „Materials“. Zde buď přiřadíme k našim tekutinám předdefinované vlastnosti, nebo je možnost si vytvořit vlastní.

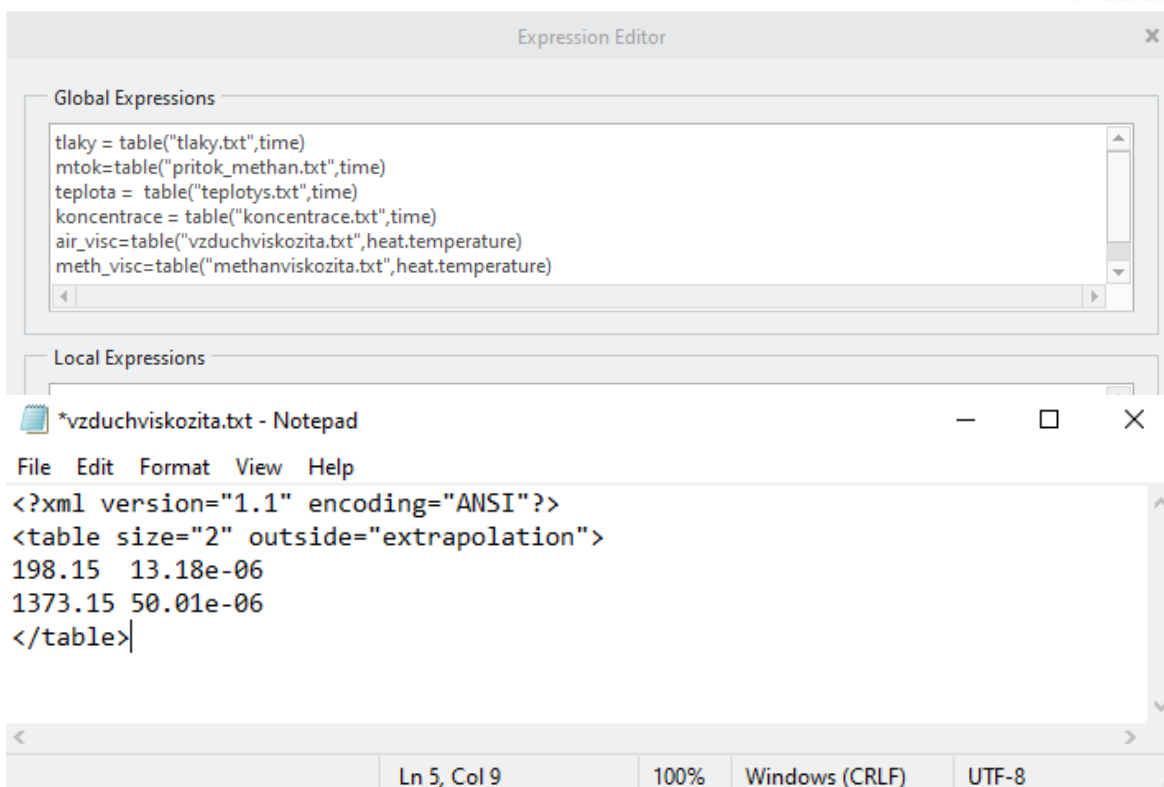
Poté nastavíme chování tekutin v samotných simulačních doménách. To najdeme v levém stromě, pod kategorií Domains. Vlastnosti lze nastavit jak pro jednu doménu, tak pro více domén najednou. Toho lze s výhodou využít, protože často chceme mít stejně nastavené parametry v celém objemu.

Hromadně můžeme nastavit všechny vlastnosti kromě počátečních podmínek. Nejprve vybereme model hustoty plynu, kde je nejvhodnější možností ideální plyn, který lze ještě dle očekávaného finálního stavu upravit kompresním faktorem, v realitě závislým na teplotě plynu a tlaku [15].

Dále upravíme viskozitu. Ačkoli to intuitivně nemusí dávat smysl, použijeme možnost konstantní dynamické viskozity a uděláme ji proměnlivou v závislosti na teplotě. Toho docílíme pomocí funkce Expression Editor, který nám umožňuje používat matematické operace, upravovat vypočítané veličiny, stejně jako importovat hodnoty z textového souboru. Formát textového souboru viz Obr. 28 má v prvním sloupci nezávislou rostoucí veličinu a v druhém závislou. Proměnnou z editoru můžeme použít místo běžného zadávání konstant¹¹.

¹⁰ Vždy je možné přidat další tekutiny kliknutím pravým tlačítkem myši na Multicomponent Mixing, avšak odebrat lze jen všechny najednou. Doporučuji si tedy project uložit “vedle” při takovéto změně. Přestože lze jednotlivé tekutiny nastavit tak, že se proudění neúčastní, tak se stává, že brzdí konvergenci řešení. Proto doporučuji vždy mít v modelu pouze ty tekutiny, které jsou skutečně použity.

¹¹ Při opětovném spuštění Flow Analysis se občas stane, že nastavenou proměnnou viskozitu CREO přepíše zpět na výchozí konstantní hodnotu. Je pak potřeba konstanty opět přepsat na proměnné.



Obr. 28 Zadávání parametrů pomocí textových souborů, nahoře: skript pro načítání dat; dole: textový soubor s daty

Jak již bylo řečeno, turbulence je v modelování proudění tekutin esenciální součástí, je tedy hned dalším krokem volba modelu turbulence. CREO má k dispozici pouze 2 modely, které se od sebe navíc příliš neliší. Jsou to Standardní k- ϵ a RNG k- ϵ , který se od standardní liší snahou o zachycení menších turbulencí pomocí zdrojového členu. Tento přístup je čistě matematický a mezi CFD puritány není příliš uznáván, může však v případech s vysokými gradienty tečného napětí vykazovat lepší výsledky.

Dalším parametrem, který je potřeba u proudění ve spalovacím prostoru uvažovat je tepelná kapacita plynu, protože ta se ve vysokých teplotách, především pro methan, začíná silně zvyšovat. Nejvhodnější je pro řešení tohoto problému použití polynomické funkce [16].¹²

¹² CREO umožňuje zadat celkem 3 členy (lineární, kvadratický a kubický), které však zaokrouhluje na 6 desetinných míst, takže kubický člen má velmi nízkou přesnost, nebo se dokonce zaokrouhlí na 0. To je potřeba kompenzovat úpravou zbylých členů aproximačního polynomu pro co nejbližší přiblížení v používané teplotní oblasti.



5.2.4 Počáteční a okrajové podmínky

Co se týká simulačních domén, zbývá pro samotný výpočet nastavit už jen počáteční podmínky, které jsou však pro každou simulační doménu odlišné. Proto je už není vhodné nastavovat pro celý strom Domains najednou. V našem případě nastavíme tlak v tekutině, hmotnostní složení přítomné směsi plynů a její teplotu. Můžeme nastavit i rychlost jejího proudění v kartézských souřadnicích, turbulentní kinetickou energii a její disipaci, to však v tomto případě nejsou zásadní parametry.

Okrajové podmínky se nastavují analogicky. Základem je specifikovat, zda se jedná o propustnou stěnu, kde nastavujeme vstupní tlak/průtok/aj., nebo o stěnu, u které vybíráme kvůli povaze RANS simulací jednu ze stěnových funkcí. Dále vybereme hmotnostní zlomky jednotlivých složek na vstupu či model přenosu tepla.

Nastavuje se zde i část postprocessingu a to je vypouštění částic pro tvorbu proudnic či sledování samotných částic unášených proudem (ty mohou být nehmotné i hmotné). Stejně tak u každá okrajové podmínky a každé simulační domény vybíráme jednotlivé výstupní veličiny, jako je tlak, rychlost, koncentrace atd. Ty pak můžeme využít pro vynesení do grafu, vyobrazení v rámci postprocessingu nebo i jako souhrnná integrální data z jednotlivých simulačních domén.

5.3 Simulační výpočet

Než spustíme simulaci, musíme nastavit podmínky pro konvergenci jednotlivých sledovaných veličin. Ty jsou přednastaveny dle použitých fyzikálních modulů a lze tak měnit jen podmínku jejich konvergence, tedy procentuální rozdíl mezi předchozím a nyníjším iteračním výsledkem.

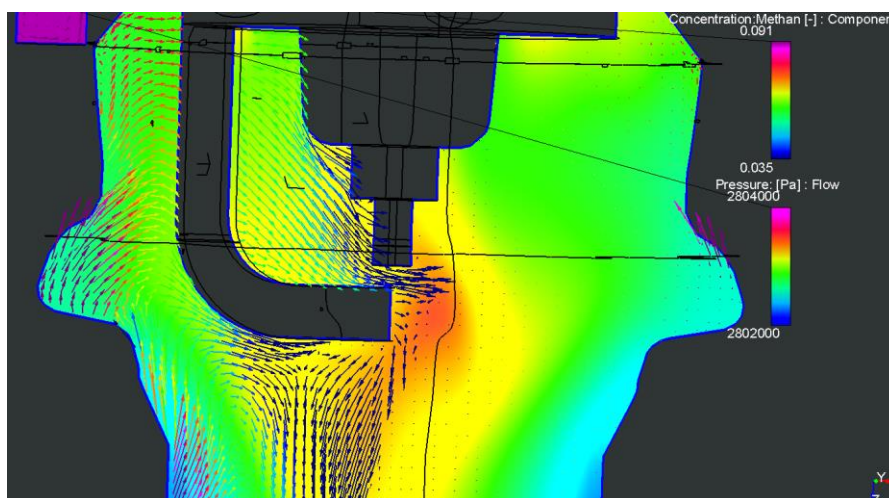
Druhá důležitá věc je samotná podstata výpočtu, a to, jestli zvolíme simulaci ustáleného stavu, nebo přechodového. V našem případě je nutné použít přechodový stav, protože se měnily v průběhu simulace podmínky v motoru. Tomu musí také odpovídat vstupní veličiny, které by měly být závislé na čase.

V případě přechodové simulace je potřeba nastavit i frekvenci ukládání výsledků, kterých lze využít i při nutnosti přerušení výpočtu a je možné z posledních uložených dat pokračovat.

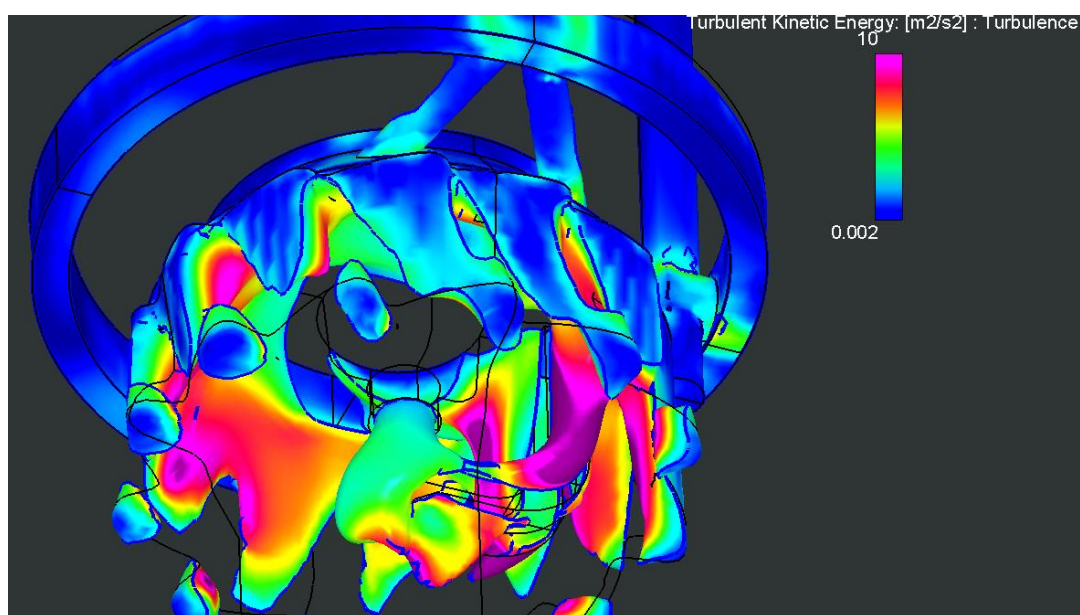


5.4 Postprocessing

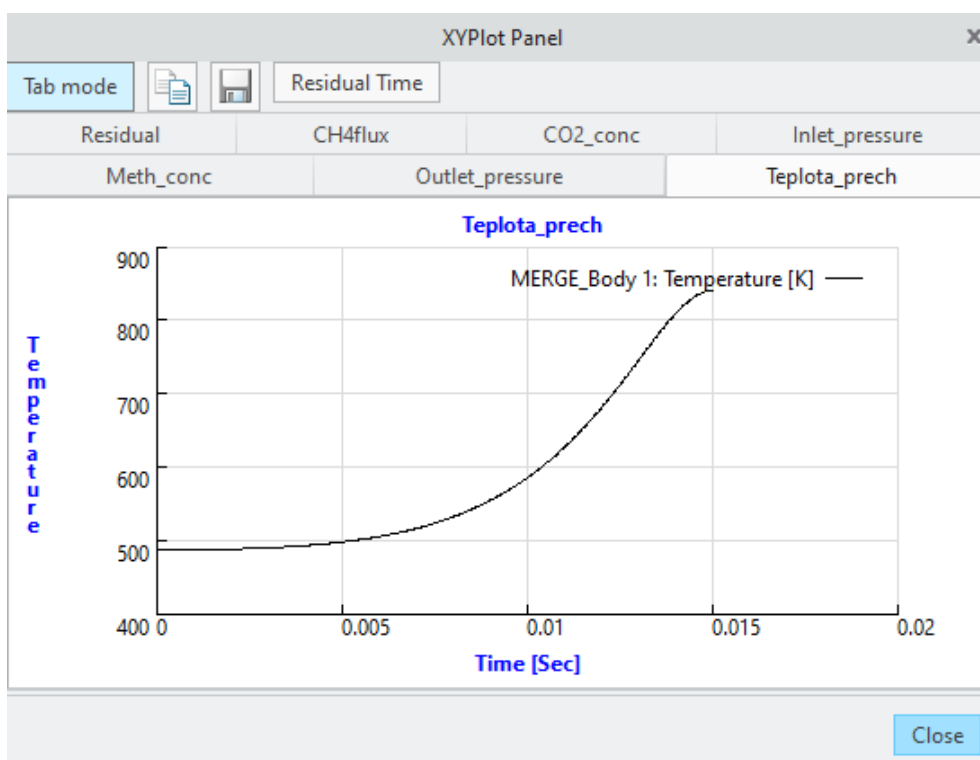
Finální a někdy i nejdelší fází CFD je zpracování výsledných dat. V prostředí Flow Analysis s nimi lze pracovat hned několika způsoby. Kromě proudnic můžeme všechny potřebné prvky doplnit až skutečně po doběhnutí simulace. Jedná se o řezy simulačními doménami viz Obr. 29 či zobrazování veličin přímo na jejich subpovrchu. Ten lze ohraničit podle libovolné veličiny vybranou krajní hodnotou viz Obr. 30. Nalezneme zde i proudnice viz Obr. 31 či monitorovací body, ve kterých se zaznamenávají jednotlivé veličiny, které pak můžeme stejně jako integrální veličiny z objemů vykreslit do grafu viz Obr. 32.



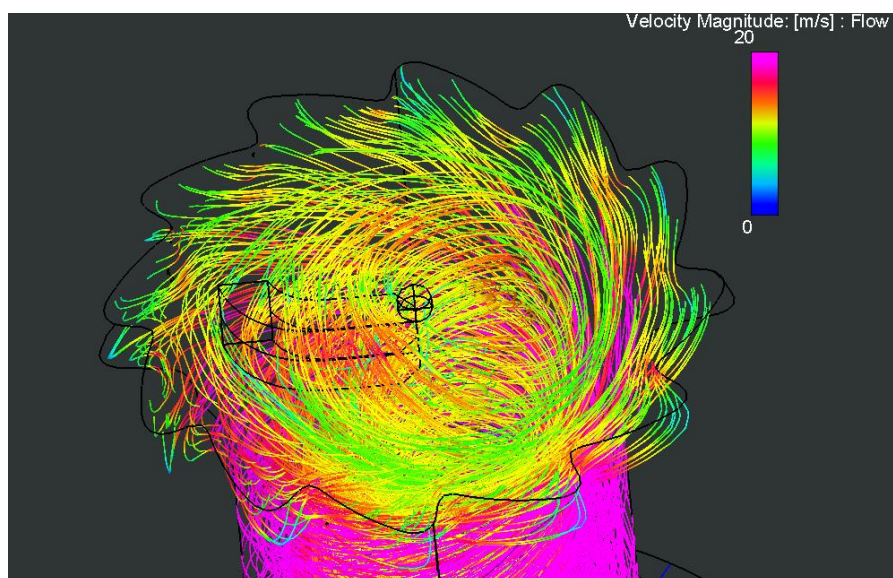
Obr. 29 Koncentrace methanu v řezu komůrkou s vektory o délce dle rychlosti, obarvenými dle hodnoty tlaku



Obr. 30 Subpovrch komůrky s příliš bohatou směsí v kombinaci se zobrazením turbulentní kinetické energie



Obr. 32 Integrální průběh teploty v komůrce



Obr. 31 Proudnic se zbarvením dle rychlosti tekutiny, omezené řezem



6 Kalibrace CFD modelu ve Flow Analysis

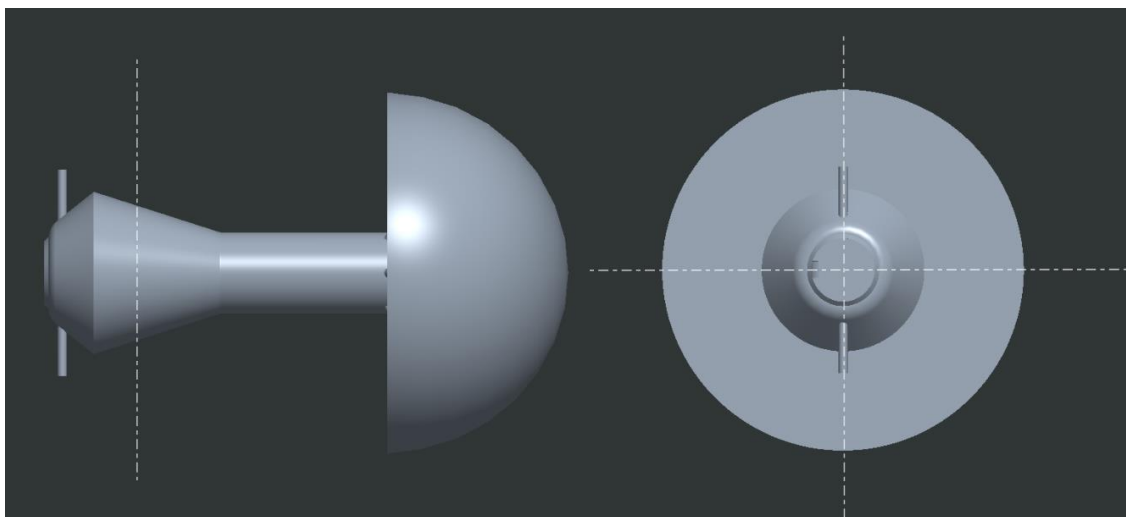
Pro co nejpřesnější simulaci samotného kompresního zdvihu, především pak mísení plynů v komůrce, byla nejprve vynaložena snaha replikovat data již nasimulovaná v programu AVL FIRE za pomoci LES přístupu¹³. Proto se tato kapitola věnuje kalibraci modelu za použití dostupných parametrů ve Flow Analysis.

Nutno zmínit, že CREO používá pro grafickou reprezentaci výsledků jinou barevnou škálu, než bývá u CFD řešičů jako AVL FIRE či Ansys Fluent běžné. Místo škály Blue-Red používá Blue-Purple¹⁴, tedy je škála obohacena o přechod z červené do fialové barvy. Proto je při porovnávání grafických výsledků zapotřebí porovnávat mezi sebou lehce odlišné barvy.

Oproti konfiguraci v AVL FIRE, bylo nutné, co se týká geometrie, zvolit několik zjednodušení:

- Síť není pohyblivá, nahrazuje ji tak pouze tlaková a teplotní okrajová podmínka s uklidňovacím objemem před otvůrkou. Nedochází tak ke stejnému rozvíření směsi, jako je tomu u pevné pohybující se stěny (pístu).
- Absence nátokové soustavy spalovacího prostoru, která opět vnese určité rozvíření do válce i do komůrky.

Pro porovnání výsledků byly použity jak metody porovnání integrálních hodnot, tak metody grafické (např. porovnání rozložení bohatosti směsi v řezech komůrkou). Právě používané řezné roviny jsou naznačeny na Obr. 33:



Obr. 33 Model kalibrační komůrky motoru AVIA s G432 s naznačenými řezy

¹³ Výsledky z LES simulace jsou průměrovány přes 5 cyklů.

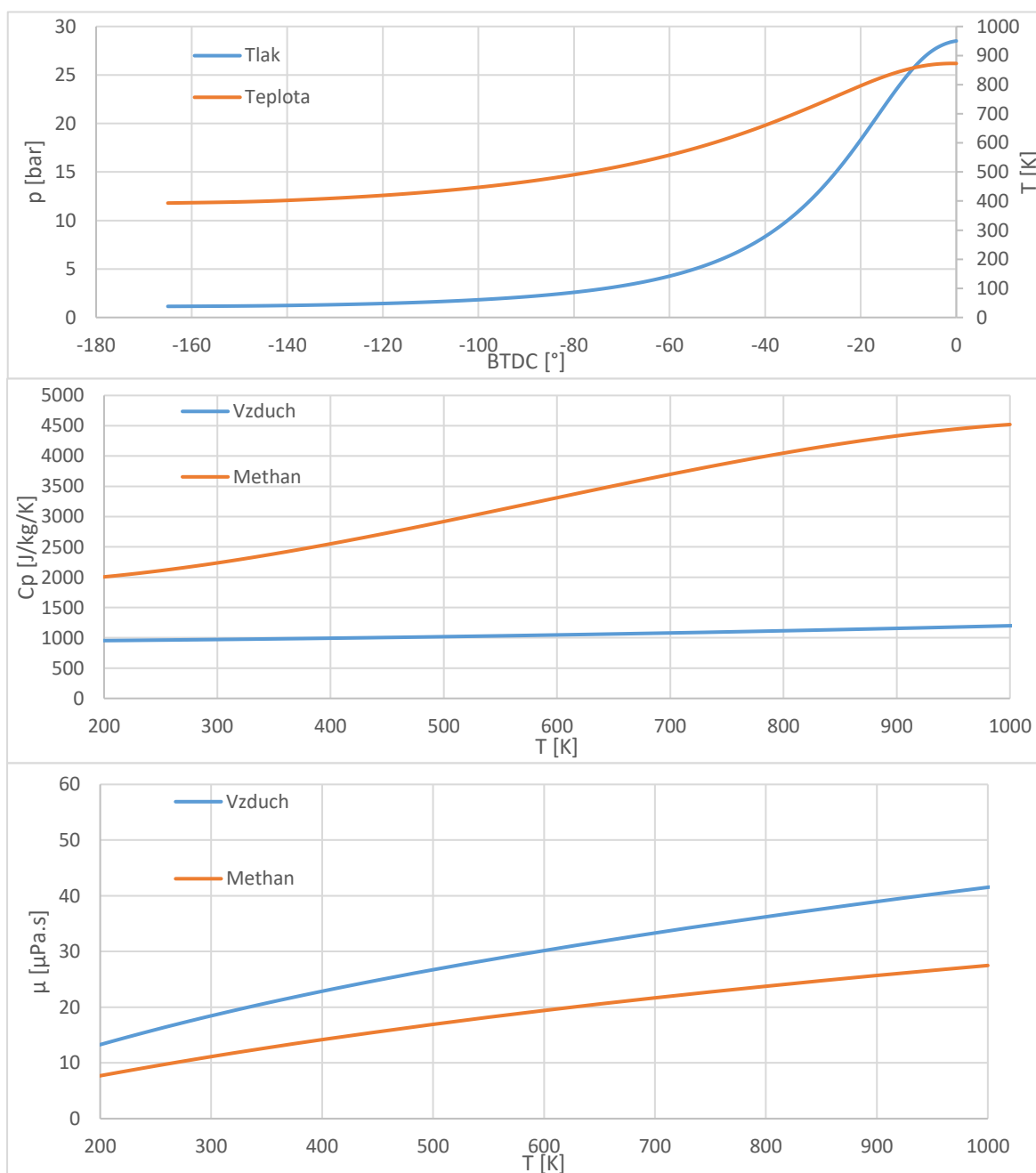
¹⁴ Ve verzi CREO 9.0.0.0 byla přidána možnost zobrazení i s barevnou škálou Blue-Red.



6.1 Podmínky optimalizační simulace

Jako začátek simulace byl zvolen pracovní bod krátce po dolní úvratí, konkrétně 165° BTDC, kdy začíná chudá směs přetékat do komůrky. Ve válci je již finální směs a dochází pouze k jejímu promíchávání a kompresi. Simulace končí v TDC, protože od zážehu není při absenci výpočtu spalování žádná přidaná hodnota v dalších výpočtech (bylo by nutné porovnávat s protáčeným motorem).

Simulace probíhala s konstantním časovým krokem 0,3°CA. To znamená celkem 550 kroků.



Obr. 34 Nahoře: průběh teploty a tlaku na polokulové ploše v závislosti na úhlu před horní úvratí.
Dole: průběh tepelných kapacit v závislosti na teplotě



Počáteční podmínky byly určeny dle výstupních dat okamžitého stavu ve FIRE. Byla tak určena počáteční teplota a tlak v komůrce a také okolí v podobě polokoule. Dále byly nastaveny okrajové podmínky, a to proměnlivě tlak a teplotu chudé náplně vnikající do systému polokulovou plochou viz Obr. 34. Jako stacionární byla nastavena teplota hlavy válců a komůrky, konkrétně na 500 K, respektive 485 K.

Komůrka byla naplněna směsí odpovídající 61 % hmotnostního podílu methanu a zbylých 39 % zabíral vzduch. Přes polokulovou plochu, nahrazující tlakovou okrajovou podmínkou pohybující se píst, natékala do komůrky chudá směs o zhruba 3,46 % hmotnostního podílu methanu, což odpovídá $\lambda = 1,68$.

Poté byly nastaveny parametry, které nepodléhají kalibraci. Těmi jsou tepelná kapacita a viskozita methanu a vzduchu viz Obr. 34 získané za pomoci interpolačních tabulek dle [16].

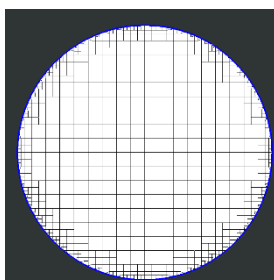
Jednotlivé položky, které byly ve Flow Analysis optimalizovány jsou:

- Hustota výpočetní sítě
- Turbulentní Prandtlovo číslo
- Turbulentní Schmidtovo číslo
- Výpočetní model plynu
- Volba modelu turbulence
- Volba stěnové funkce

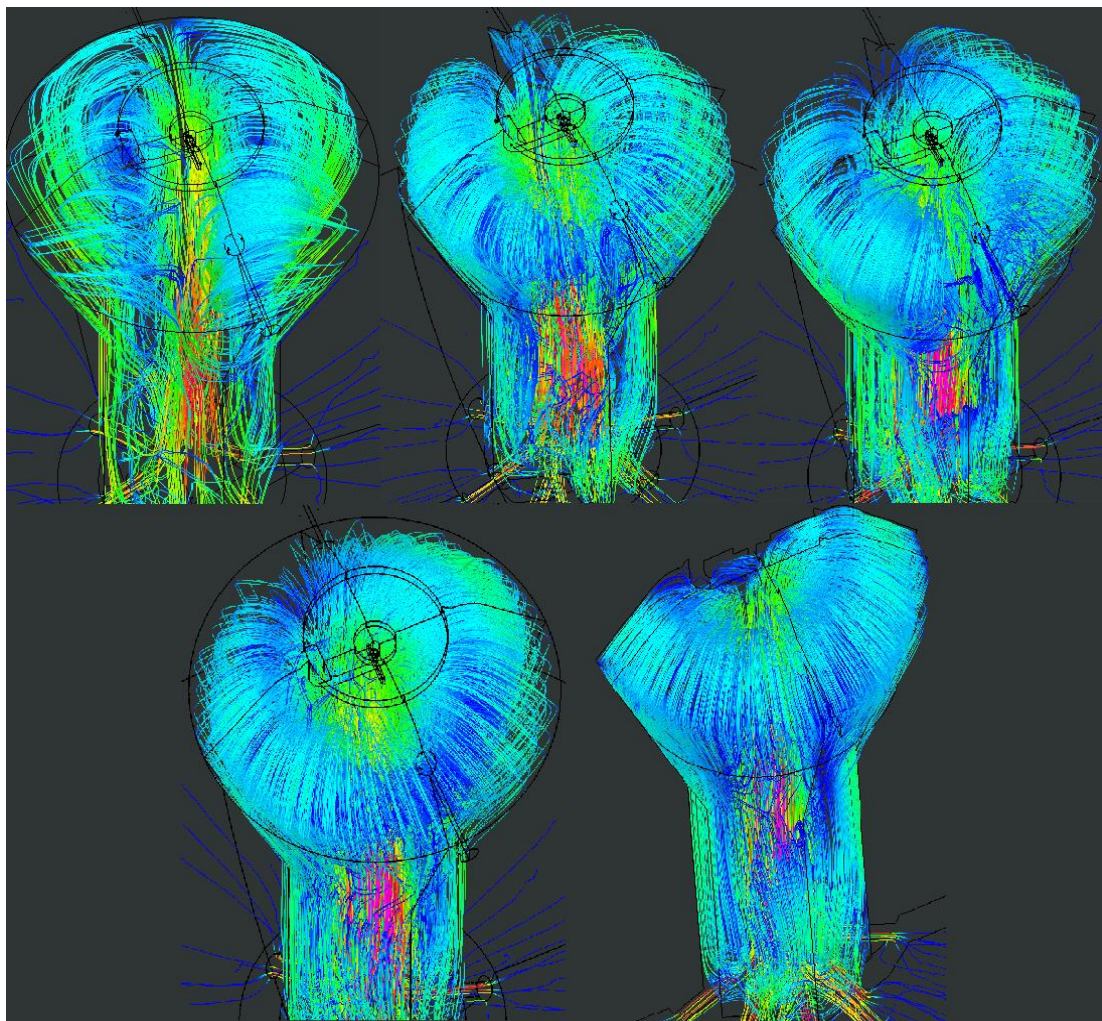
6.2 Numerická viskozita

Numerická viskozita vzniká v případě, kdy nemáme rotačně symetrickou síť, tedy když v rovinném řezu je v jednom směru po stejné délce více buněk než v jiném viz Obr. 35. Tento efekt lze ve Flow Analysis do jisté míry eliminovat pouze zjemňováním sítě.

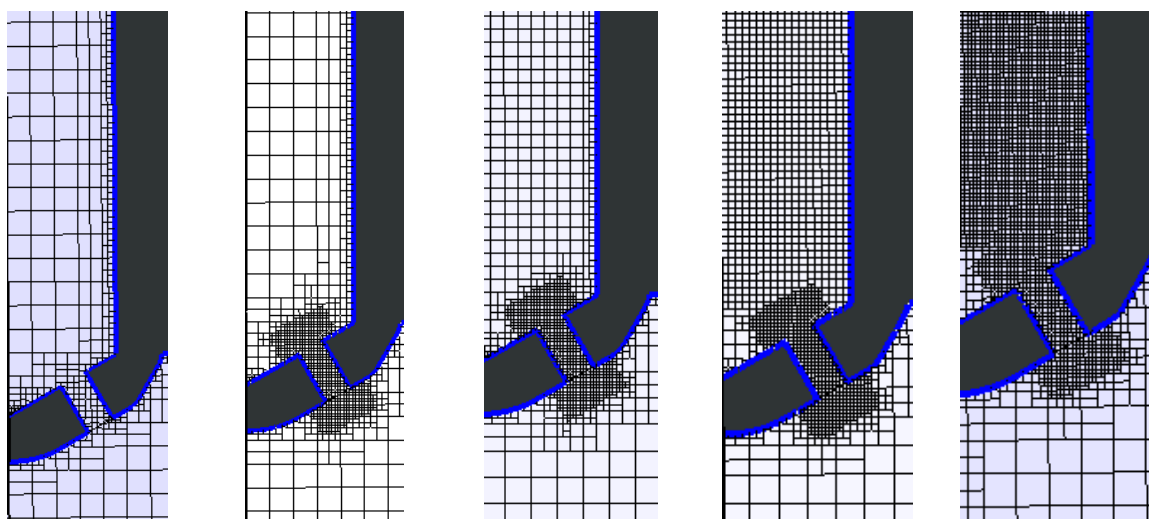
Působení numerické viskozity, stejně tak jako postupný pokles se zjemňováním sítě, můžeme pozorovat především v horní části komůrky, kde se mění axiální směr proudu a mělo by dojít k tvorbě anuloidu. Právě zmíněná viskozita však způsobí jeho rozdělení na dva samostatné útvary.



Obr. 35 Rotačně nesymetrická síť



Obr. 36 Proudnice v kalibrační komůrce, zleva: první řada 1-3, druhá řada 4-5



Obr. 37 Detail řezů výpočetními sítěmi, zleva 1-5



Ve snaze eliminovat co nejvíce numerickou viskozitu bylo porovnáno několika sítí. Měněnými parametry byly jen maximální délka hrany buněk v objemu komůrky a pak zjemnění buněk v prostoru otvorů ve spodní části komůrky. Síť v polokouli zůstala beze změny. Testované varianty viz Obr. 37 byly:

1. Max. hrana 1 mm, bez explicitního zjemnění (max. hrana 1 mm), 167 tis. elementů
2. Max. hrana 1 mm, otvůrky 0,125 mm, 277 tis. elementů
3. Max. hrana 0,5 mm, otvůrky 0,125 mm, 296 tis. elementů
4. Max. hrana 0,25 mm, otvůrky 0,125 mm 499 tis. elementů
5. Max. hrana 0,125 mm, otvůrky 0,125 mm (simulace pouze symetrické poloviny) 1209 tis. elementů

Z Obr. 36 lze vyvodit, že výrazné zjemnění v okolí otvorů má zásadní vliv na proudění v komůrce. Díky nim došlo k výraznému rozrušení původního rovinně symetrického útvaru. Nicméně to samotné nestačilo, protože lze pozorovat stále náznaky předchozí symetrie, a to především v rozšířené horní části, kde stále není ucelené proudění ve tvaru anuloidu.

Při prvním zjemnění sítě byla změna v podstatě nepatrná, což lze z malého nárůstu elementů očekávat. Další zjemnění už přináší dobré výsledky. Došlo ke zřetelnému propojení proudění v horní části a je možné proudění již považovat za relativně korektní. S ještě dalším zjemněním došlo ke zhruba pětinasobnému nárůstu elementů a byla proto zvolena simulace pouze symetrické poloviny komůrky (vzhledem k poloze svíčky). Toto další zjemnění už nepřineslo výraznou změnu a vzhledem k několikanásobnému nárůstu výpočetního času byla zvolena varianta sítě 4.

6.3 Turbulentní Prandtlovo číslo

Řeší poměr mezi přenosem hybnosti a tepla za pomoci turbulence. Kde:

$$Pr_t = \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_H}$$

Pr_t Turbulentní Prandtlovo číslo

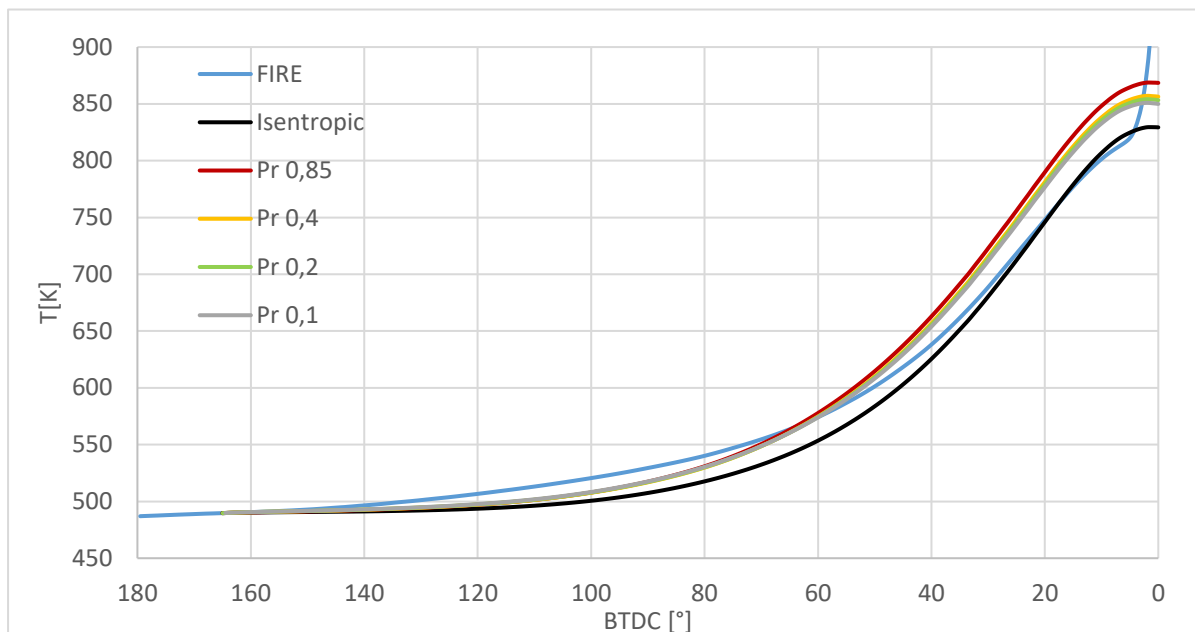
ε_M Přenos hybnosti

ε_H Přenos tepla

Z Obr. 38 vyplývá, že snížení turbulentního Prandtlova čísla má zprvu zřetelný účinek. S dalším snižováním je nárůst přestupu tepla čím dál nižší. Lze konstatovat, že pod



hodnotou 0,4 se výrazně snižuje citlivost modelu na Pr_t . Proto bylo jako optimální vybráno $Pr_t = 0,4$.



Obr. 38 Vliv turbulentního Prandtlova čísla na teplotu v komůrce

6.4 Turbulentní Schmidtovo číslo

Číslo vyjadřuje poměr mezi turbulentní viskozitou a turbulentní difuzivitou hmoty.

$$Sc_t = \frac{\nu_t}{D_t}$$

Kde:

Sc_t Turbulentní Schmidtovo číslo

ν_t Turbulentní viskozita

D_t Turbulentní difuzivita hmoty

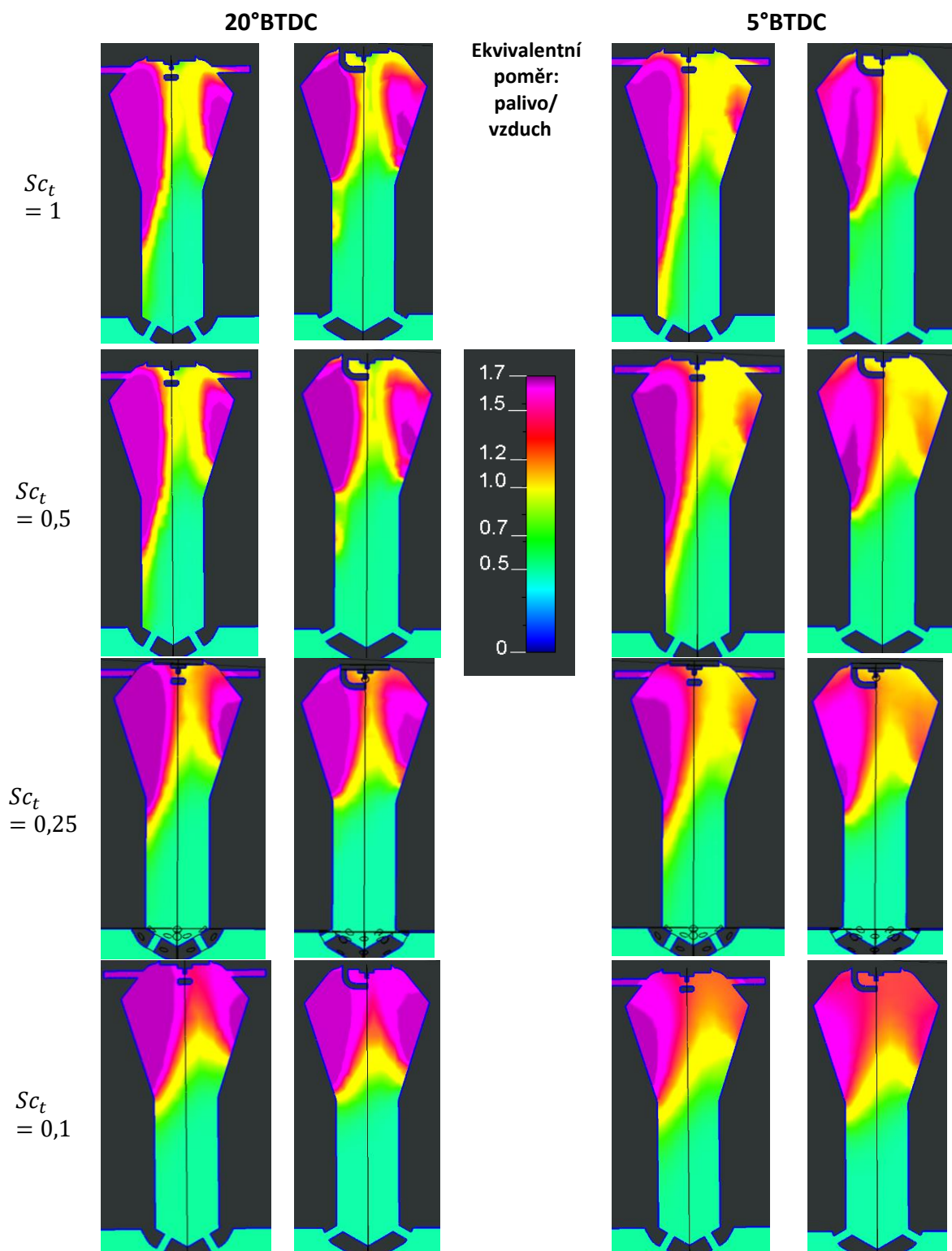
Úpravy výše zmíněného byly provedeny především kvůli známému podceňování turbulence v případě použití RANS modelu. K dosažení promíchání směsi, aby se blížilo více výsledkům z LES simulace v programu FIRE, bylo turbulence potřeba podpořit.

Jak je zmiňováno např. v [17], mělo by turbulentní Schmidtovo číslo nabývat podstaty vektoru než konstanty, protože dosahuje jiných výsledků pro proudění v blízkosti stěny oproti volnému proudění. Tuto variantu však CREO neumožňuje, je tak nutné se spokojit s nastavením konstanty. Ve výchozím nastavení je hodnota $Sc_t = 1^{15}$. Můžeme si všimnout, že to skutečně nestačí a jsou znatelné silné gradienty koncentrace CH_4 viz Obr.

¹⁵ Pro komerčních CFD řešičích bývá doporučována hodnota 0,7.



39, které by měly být ve skutečnosti daleko pozvolnější. Ty však nelze zcela upravit pouze změnou Sc_t , proto jsem zvolil relativně konzervativní hodnotu $Sc_t = 0,5$. Ta je používána i v rámci hodnot obvyklých pro simulace trysek [17].

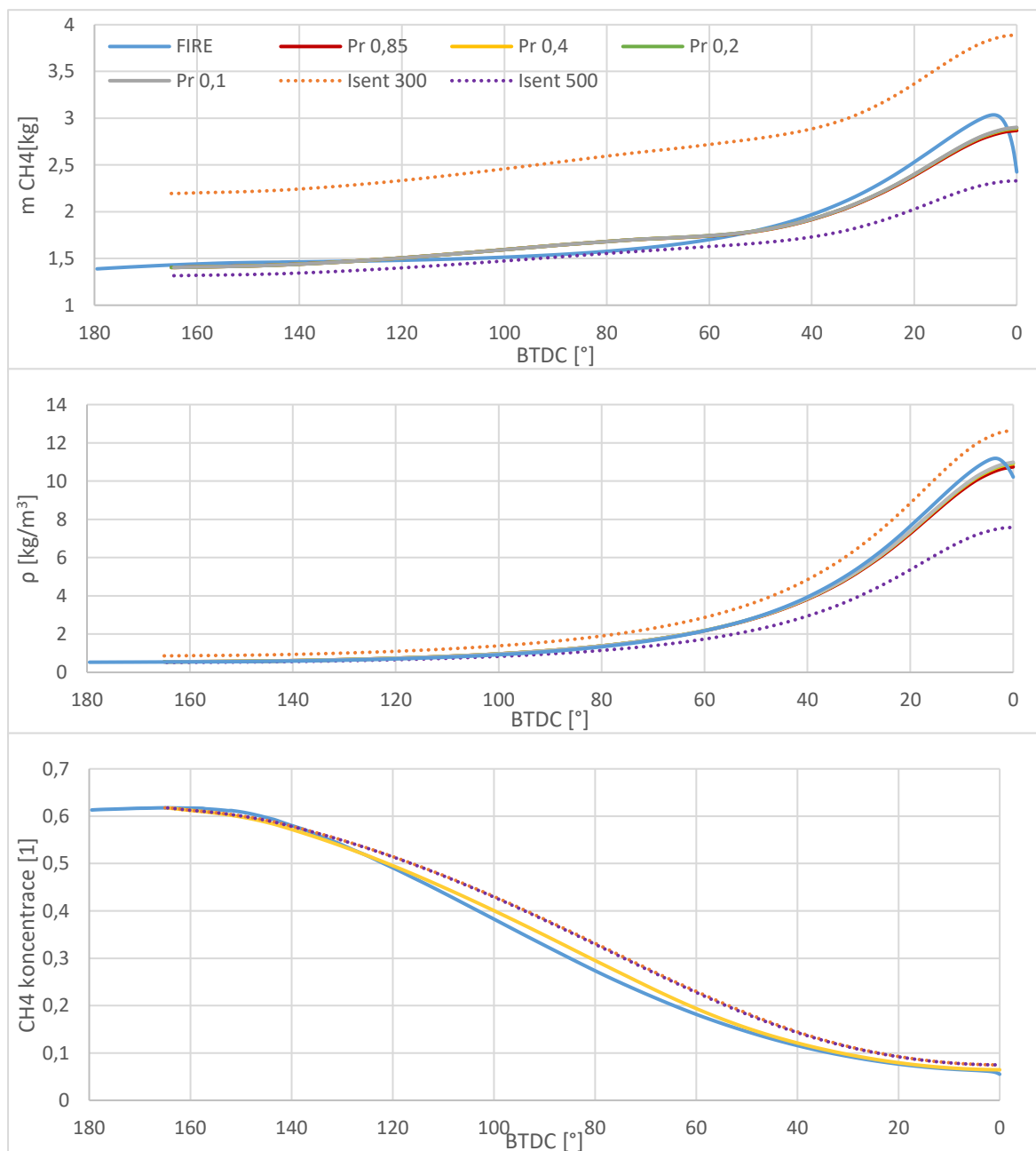


Obr. 39 Úpravy turbulentního Schmidtova čísla



6.5 Isentropický model vs. ideální plyn

CREO dává na výběr celkem 4 možnosti výpočtu hustoty tekutiny a to: konstantní hustotu, isentropický děj, zákon ideálního plynu a model stlačitelné kapaliny. Z povahy simulovaného děje není možné použít první ani poslední zmíněný, na výběr tedy zůstává isentropický děj a ideální plyn.



Obr. 40 Nahoře: hmotnost methanu v komůrce; uprostřed: hustota náplně v komůrce; dole: koncentrace CH₄ v komůrce. Pr x jsou modely ideálního plynu, Isent x pro isentropický plyn + referenční teplota.

Co se týká primární sledované veličiny, tedy koncentrace methanu v komůrce, tak se oba modely chovaly téměř identicky. První rozdíly byly pozorovatelné při porovnání průběhu teplot v komůrce. Ideální plyn má oproti isentropickému ději tendenci se dostat



při stlačování na vyšší teplotu. Z průběhu vidíme, že křivky mají podobný tvar, ale isoentropický děj končí na zhruba správné teplotě, zatímco ideální plyn se dostane zhruba o 40 K výše. Model ideálního plynu se tak zdá hůře použitelným viz Obr. 38.

Naprosto odlišná situace však nastává při porovnání průběhu hmotnosti/hustoty plynu v komůrce viz Obr. 40. Zde lze pozorovat, proč je definice isoentropického modelu pro tuto aplikaci nevhodná. Celý výpočet hustoty se totiž provádí za použití referenční teploty, vykresleny jsou křivky pro 300K a 500K, a adiabatického exponentu. Ty jsou pro celý výpočet konstantní a hustota tak roste daleko pomaleji, nebo je již výchozí hodnota značně odlišná, než jak je tomu ve skutečnosti¹⁶.

6.6 Model turbulence Standard k- ϵ vs RNG k- ϵ

Vzhledem k povaze proudění s vysokými gradienty tlaku a rychlosti, lze předpokládat, že se jedná právě o případ, kdy je výhodné použít model RNG k- ϵ . Ten je sice zatížen vyšší výpočetní náročností, avšak v porovnání např. se zjemňováním sítě jde o relativně zanedbatelné navýšení výpočetního času.

Z řezů komůrkou viz Obr. 41 lze vidět, že model RNG k- ϵ dosahuje výsledků bližších LES simulaci. Výhodou je zůstávání bohatší směsi u stěny po delší dráze, kterou symbolizuje zelená barva, než jak je tomu u Standard k- ϵ . Proto je model RNG k- ϵ upřednostňován pro použití při simulacích konstrukčních variant zkoušených komůrek.

Pro srovnání modelů je také důležité porovnat jejich časovou náročnost, protože ne vždy může být benefit lepší přesnosti výhodný za daň výrazného navýšení výpočetního času.

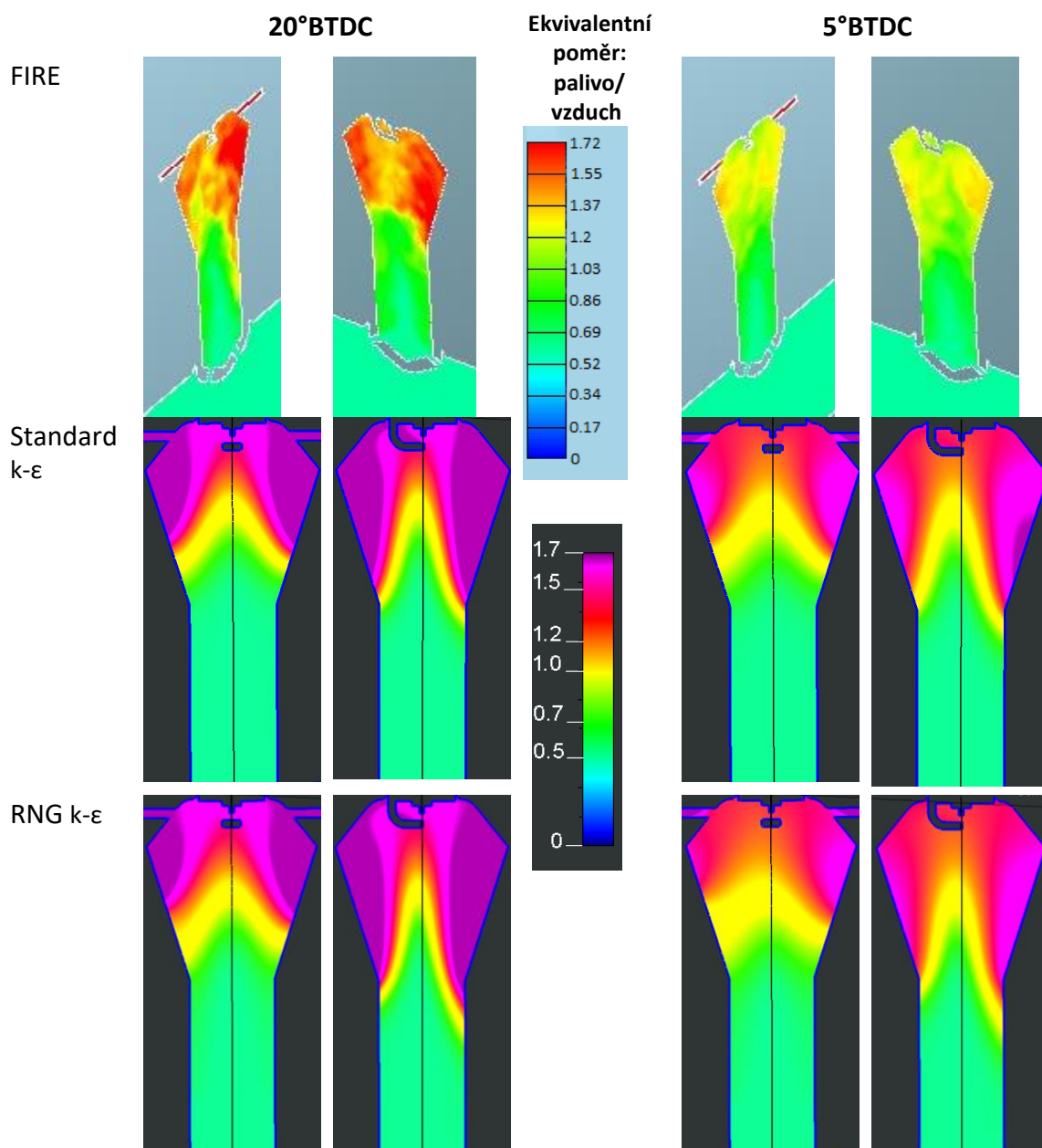
Výpočetní časová náročnost obou modelů v konfiguraci se sítí vybranou dle 6.2 je následující¹⁷:

- RNG k- ϵ : 7 hodin 46 minut
- Standard k- ϵ : 6 hodin 39 minut

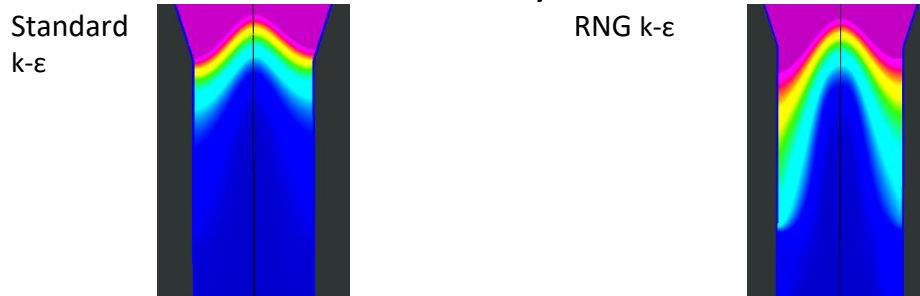
Použití RNG přístupu v tomto případě vyžaduje zhruba o 17 % více výpočetního času, což je vzhledem k zpřesnění výsledků viz Obr. 41 přijatelné.

¹⁶ Isoentropické modely jsou v grafu označeny jako Isent + referenční teplota. Model ideálního plynu nese označení dle hodnoty turbulentního Prandtlůva čísla, přičemž lze pozorovat, že mezi jednotlivými hodnotami Pr se grafy mění náznakem jako již výše u teploty.

¹⁷ Pokud není řečeno jinak, tak veškeré výpočty v této práci běželi na procesoru AMD Ryzen 5 2600 – 6 fyzických, resp. 12 logických jader.



Detail hrdla 20°BTDC se zúženým rozsahem ekvivalentního poměru



Obr. 41 Porovnání modelů turbulence



6.7 Stěnové funkce

Časová náročnost dle volby funkce:

- Standard – 7 hodin 34 minut
- Non-equilibrium – 7 hodin 46 minut
- Zobecněná (unified) 7 hodin 39 minut

Vzhledem k poměrně malým časovým rozdílům při použití jednotlivých funkcí lze usoudit, že nemají zásadní vliv na výpočetní čas a může se tak jednat o faktory vnesené užíváním počítače při běhu simulace.

Kvůli podstatě proudění jsem zvolil na základě popisu v 4.3 funkci zobecněnou.

6.8 Výsledný zkalibrovaný model

Dalším faktorem, který je nutné uvažovat, je vysoký rozdíl koncentrací mezi komůrkou a spalovacím prostorem na začátku, přičemž na výsledných obrázcích je rozmezí koncentrace silně omezeno. Proto z obrázků nelze vyčíst pravý tvar proudění, k němu by bylo minimálně v počátečních fázích potřeba zobrazovanou škálu koncentrací zvýšit.

Ladící parametry jsou tedy nastaveny následovně:

- Nastavení sítě: Max. hrana 0,25 mm, otvůrky 0,125 mm
- Turbulentní Prandtlovo číslo 0,4
- Turbulentní Schmidtovo číslo
- Model ideálního plynu
- RNG k- ϵ model turbulence

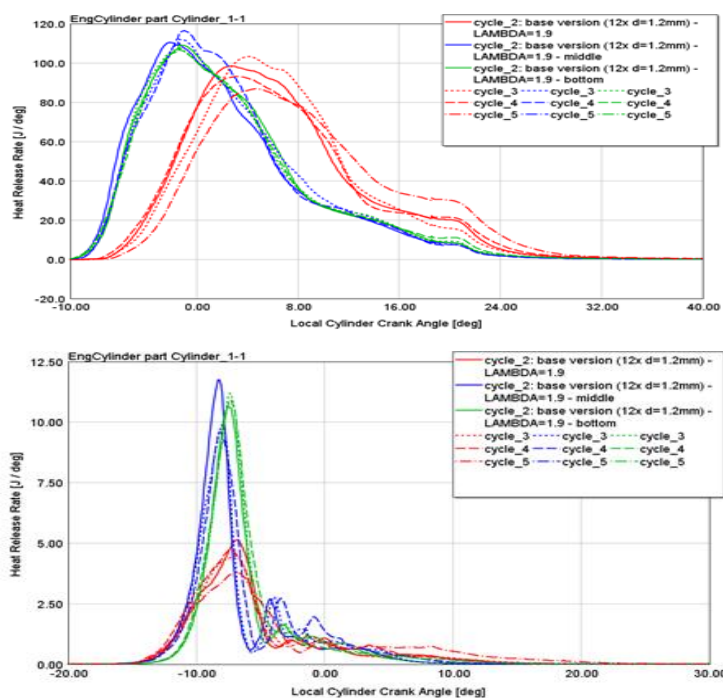


7 Optimalizace komůrky

Při návrhu komůrky jsem vycházel jak z doporučení zmíněných v kapitole 2.5, tak ze simulačních dat, které jsem získal od Ústavu 12120.

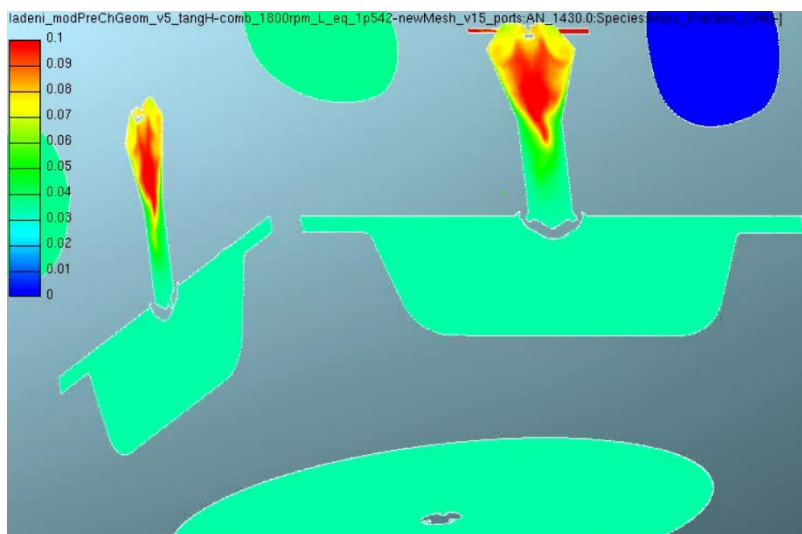
Umístění svíčky bylo voleno na základě simulací prováděných na ústavu. Z nich vychází, že je z pohledu mezicyklové variability i rychlosti spalování výhodnější umístit poloha jiskřičky zhruba doprostřed komůrky viz Obr. 42. Nižší umístění zároveň znamená příznivější rozložení směsi z hlediska zapalitelnosti, protože příliš bohatá směs je vytlačována do horní části komůrky a nátokových kanálků. V případě tangenciálních kanálků se však rozložení bohatosti směsi zásadně mění.

Pro dobré výsledky ze simulací komůrek s tangenciálními otvůrkami jsem se rozhodl také směřovat touto cestou. Nicméně je nutno podotknout, že experimentálně se jejich výhodnost nepotvrdila. Proto je nezbytné se věnovat vnitřní geometrii komůrky, která je nástrojem k možnému zlepšení experimentálních výsledků.



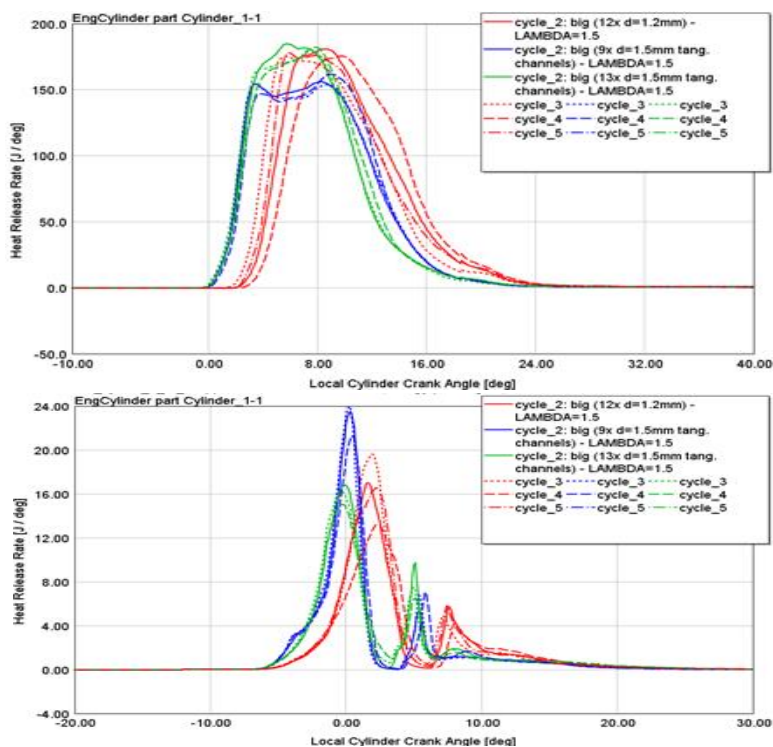
Obr. 42 Rychlost vývinu tepla v závislosti na poloze jiskry v AVL FIRE; nahoře graf vývinu ve válci, dole graf vývinu v komůrce komůrka; jiskra: červeně v nahoře, modře uprostřed, zeleně dole [22]

Tangenciální otvůrky vytváří v komůrce proudění vírového charakteru, které má za následek silné rozvrstvení směsi a téměř izolaci bohaté směsi okolo osy proudění. Proud je navíc vytlačován odspoda, takže se nakonec v komůrce vytvoří obohacený kužel právě okolo svíčky při jejím nižším umístění viz Obr. 43, Obr. 58. Hrozí tak pomalá iniciační fáze hoření, vysoká mezicyklová variabilita, nebo až vynechání zápalu.



Obr. 43 Hmotnostní podíl paliva v komůrce a vír bohaté směsi tvořený tangenciálními otvůrkami v AVL FIRE [23]

Tečné proudění je však výhodné především pro jeho vysokou turbulenci, která zajišťuje rychlejší prohoření směsi. Za pomoci konstrukčních úprav v okolí svíčky by mělo být dosaženo lepšího promísení, které potlačí negativa tečného proudění. To by mohlo zároveň snížit vysokou mezicyklovou variabilitu.



Obr. 44 Rychlost vývinu tepla v závislosti na tvaru otvůrků; nahoře graf vývinu ve válci, dole v komůrce; červeně: 12x1,2 mm, modře 9x1,5 mm tangenciální, dole 13x1,5 mm [22]



Výše zmíněné důvody volby tečných kanálků jsou navíc podpořeny výsledky na geometrii Avia viz Obr. 44. Z něj plyne, že pro tečné otvůrky je výhodné použití vyššího průřezu v porovnání s kolmými. Parametr β pro variantu tečných 9x1,5 mm nabývá hodnoty $\beta = 0,4$, zatímco 13x1,5 mm se dostává na $\beta = 0,57$. To se promítá do rychlosti hoření v hlavním spalovacím prostoru, kde se varianta 9x1,5 mm vyznačuje delším hořením s nižším maximálním vývinem tepla.

Obě varianty však nad verzi 12x1,2 mm, která je do jisté míry optimalizována a parametr $\beta = 0,34$, vyčnívají nízkou mezicyklovou variabilitou.

7.1 Optimalizace naplnění z válce

Úkolem optimalizace naplnění komůrky bylo zajistit optimální promísení směsi. K tomu sloužilo usměrnění tečného víru v okolí svíčky. To bylo realizováno především za účelem snížení bohatosti směsi v okolí jiskřiště a zároveň jejího lepšího promíchání v celé komůrce k optimálnímu prohoření (spodní část směsi je vytlačena zpátky do hlavního spalovacího prostoru).

Velikost otvůrků byla zvolena s respektem k velikosti již testované tangenciální varianty na motoru AVIA, pro kterou v konfiguraci otvůrků 13x1,5 mm vychází parametr [10] $\beta = 0,57$. Pro komůrku na motoru Zetor při použití 13x1,2 mm/12x 1,2 mm vychází parametr $\beta = 0,59$ a $C_t = 0,29$ resp. $\beta = 0,55$ a $C_t = 0,28$. Parametry β jsou vyšší než v [11], což je ze zkušenosti výhodné pro tangenciální prouděním oproti kolmým nátokům, kde jsou vhodné nižší hodnoty. C_t pak vychází k horní hranici doporučených hodnot. Ze zástavbových důvodů se pohybuje poměr L/D na hodnotě zhruba 1,9 k doporučeným 1,5, avšak tento parametr se značně odlišuje i u komůrky použité při kalibraci, která vykazuje na motoru AVIA dobré výsledky.

Sama komůrka objemem odpovídá 2,7 % kompresního objemu, což splňuje doporučení dle Gussaka viz 2.5. Komůrka včetně škodných prostor, tedy až ke zpětnému ventilu zabírá 3,2 %.

7.1.1 Podmínky simulace

Simulace naplnění z válce probíhala za totožných podmínek jako kalibrace v kapitole 6. Jednalo se tedy o simulaci jednoho cyklu od 165°BTDC do TDC s časovým krokem odpovídajícím 0,3°CA. Komůrka je přitom naplněna směsí odpovídající 61 % hmotnostního podílu methanu a zbylých 39 % zabírá vzduch. Přes polokulovou plochu, nahrazující tlakovou okrajovou podmínkou pohybující se píst, natéká do komůrky

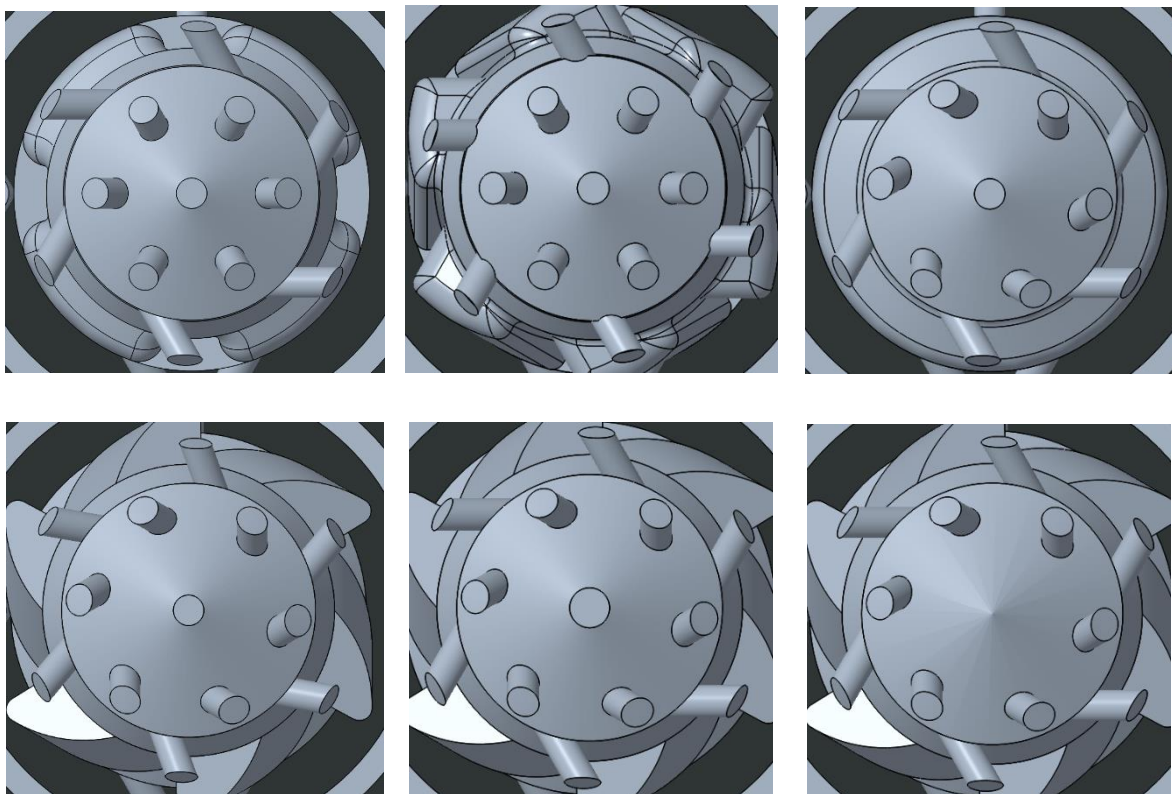


chudá směs o zhruba 3,46 % hmotnostního podílu methanu, což odpovídá zhruba $\lambda = 1,68$.

7.1.2 Testované varianty

K testování bylo vytvořeno celkem 6 variant otvůrků viz Obr. 45. Varianty jsou popsány jako: Provedení otvůrků, jejich odsazení od roviny procházející osou komůrky a jejich průměr (vnější/vnitřní otvůrky¹⁸):

1. 6 tečných, odsazení 3,5 mm; $\varnothing 1,2$ mm/6 přímých + středový; $\varnothing 1,2$ mm
2. 6 tečných, odsazení 2,5mm; $\varnothing 1,2$ mm/6 přímých + středový; $\varnothing 1,2$ mm
3. 6 tečných, odsazení 3,5mm; $\varnothing 1,2$ mm/6 tečných, odsazení 2,5 mm + středový; $\varnothing 1,2$ mm
4. 6 tečných, odsazení 2,5mm; $\varnothing 1,2$ mm/6 tečných, odsazení 2,5 mm + středový; $\varnothing 1,2$ mm
5. 6 tečných, odsazení 3,5mm; $\varnothing 1,2$ mm/6 tečných, odsazení 2,5 mm + středový; $\varnothing 1,2$ mm + středový $\varnothing 1,5$ mm
6. 6 tečných, odsazení 3,5mm; $\varnothing 1,2$ mm/6 tečných, odsazení 2,5 mm $\varnothing 1,2$



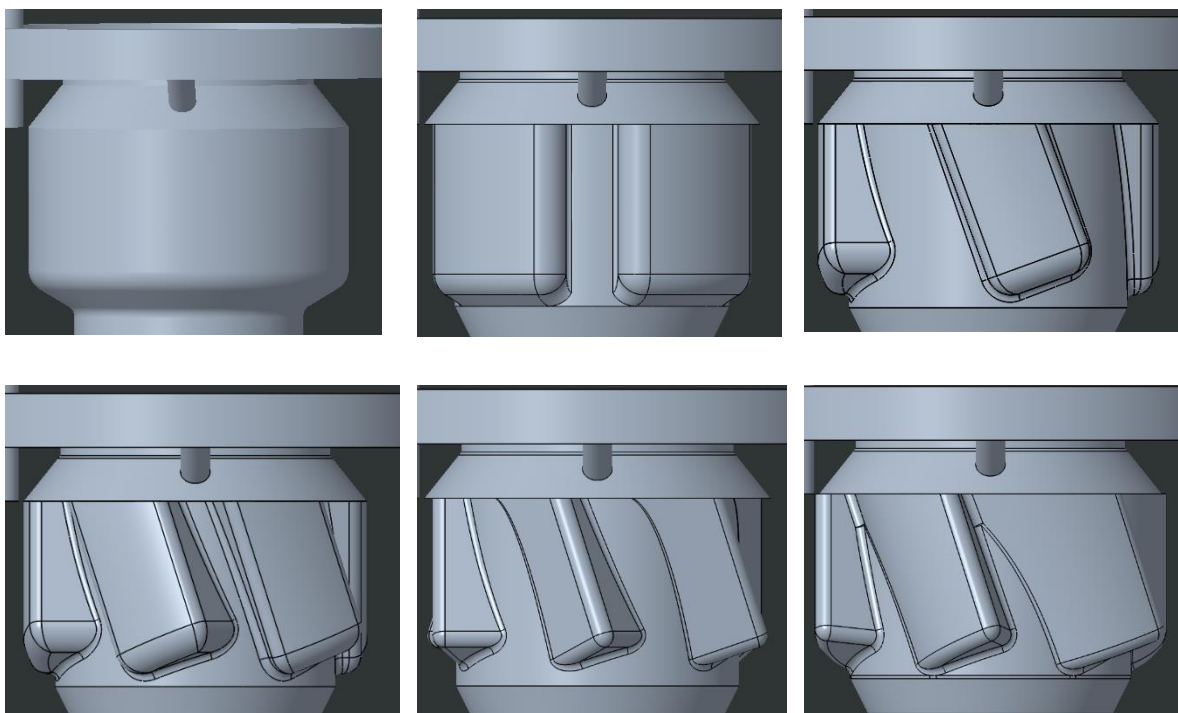
Obr. 45 Provedení otvůrků, varianty 1-6

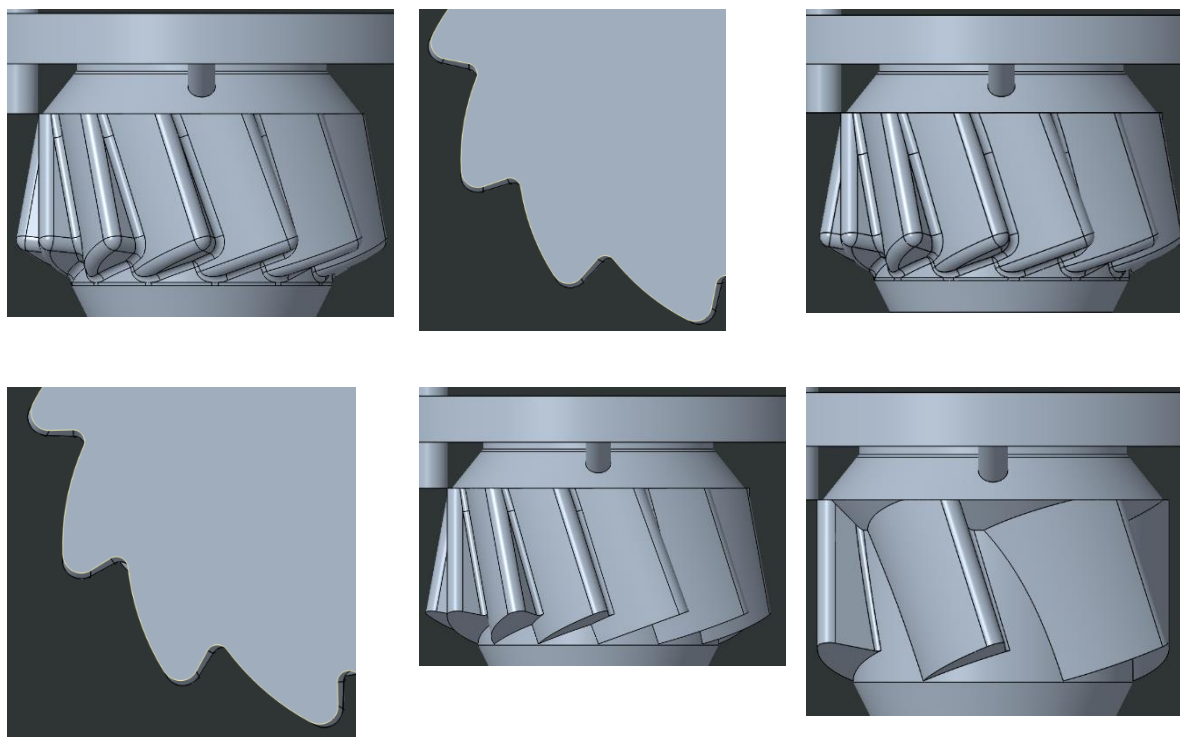
¹⁸ Pokud není řečeno jinak, je středový otvůrek stejného průměru jako dolní otvůrky.



Testovaná provedení komůrky se liší podle provedení rozšířené části v okolí svíčky.
Geometrií bylo celkem 10 viz Obr. 46 a ty jsou následující:

- a) hladká komůrka
- b) 4 malé zarážky
- c) 4 naklonené kapsy
- d) 6 nakloněných kapes
- e) 6 zkosených zarážek
- f) 6 tečných zkosených zarážek s rádiusy
- g) 12 tečných zkosených zarážek s rádiusy
- h) 12 tečných ostře zkosených zarážek s rádiusy
- i) 12 tečných ostře zkosených zarážek
- j) 6 tečných ostře zkosených zarážek





Obr. 46 Varianty tvarů komůrky (a-j) + vodorovné řezy pro varianty g a h, pro názornost rozdílu mezi tečnými zkosenými zarážkami a tečnými ostře zkosenými zarážkami

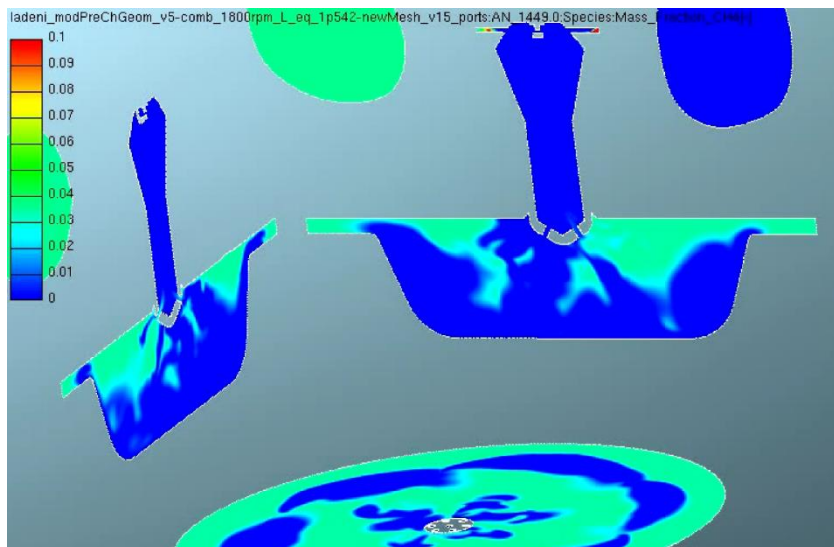
Testováno bylo celkem 17 variant, které jsou kombinací výběru otvorů a komůrky. Ty byly postupnou evolucí upravovány, vždy na základě výsledků z variant již odzkoušených. Jejich kombinace jsou následující:

Tabulka 4 Kombinace testovaných variant komůrky

| Pořadové číslo | Varianta otvorů | Tvar komůrky |
|----------------|-----------------|--------------|
| 1 | 1 | a |
| 2 | 2 | a |
| 3 | 1 | b |
| 4 | 3 | a |
| 5 | 1 | c |
| 6 | 1 | d |
| 7 | 1 | d |
| 8 | 1 | e |
| 9 | 1 | e |
| 10 | 3 | f |
| 11 | 3 | g |
| 12 | 3 | h |
| 13 | 3 | i |
| 14 | 3 | j |
| 15 | 5 | j |
| 16 | 4 | j |
| 17 | 6 | j |



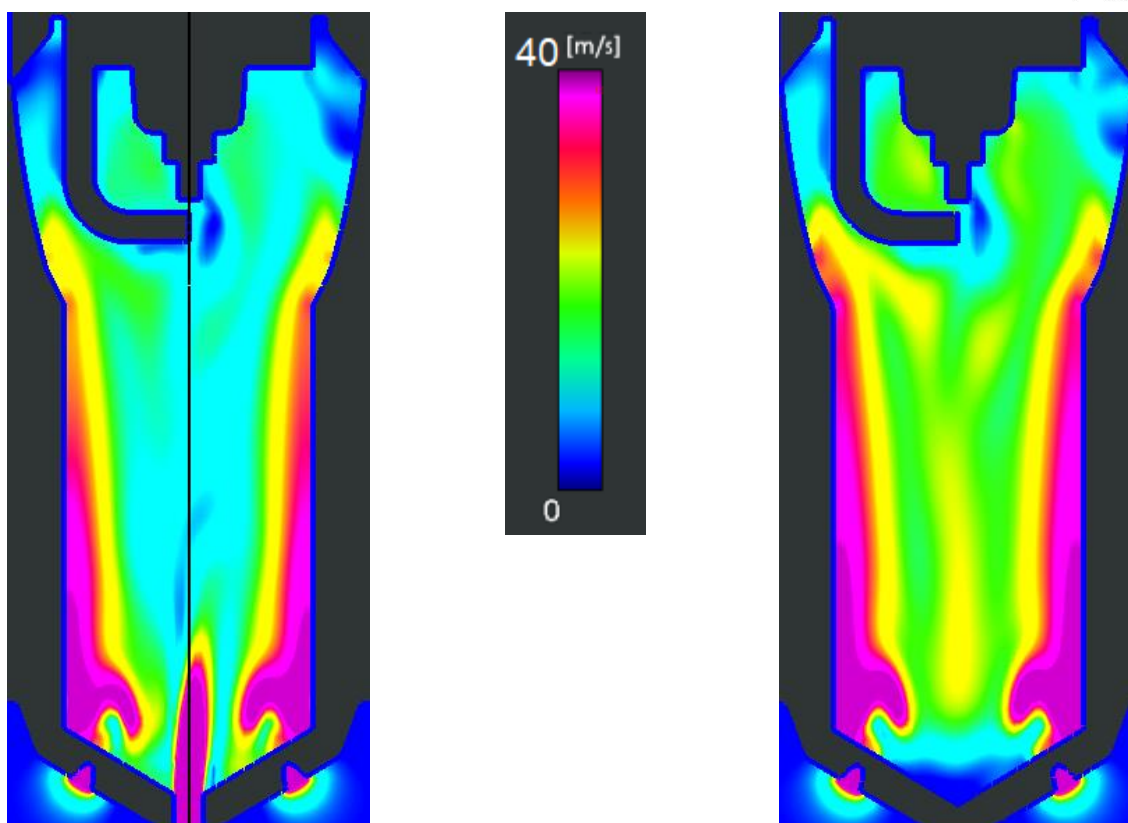
Návrhy se středovým otvůrkem mají zaručovat lepší prohoření uprostřed spalovacího prostoru. Nicméně již z Obr. 47 vidíme, že není naprosto nezbytný, protože při rozevření spodních otvůrků pod úhlem 60° je prohoření směsi pod komůrkou stále dostatečné.



Obr. 47 Hmotnostní podíl paliva 14° po zážehu, velká komůrka na motoru Avia [22]

Jak je vidět na Obr. 48 jeho vynechání má vysoký dopad na celkové proudění v komůrce. To získá daleko vyšší tangenciální charakter, který jinak proudění ze středového kanálku narušuje. Hlavní výhodou je, že proudění ze středového otvůrku vytlačovalo bohatou směs směrem ke svíčce, zatímco při jeho absenci je náplň více tangenciálně rozvířena a není tak silně tlačena do středu komůrky. Díky tvarování okolo svíčky navíc dochází k promíchání v okolí elektrody a směs je tak zapalitelná dříve před TDC.

Umístění svíčky bylo voleno na základě simulací prováděných na ústavu. Z těch vychází, že je z pohledu mezicyklové variability i rychlosti spalování výhodnější poloha jiskřiště umístěna co nejnižší viz Obr. 42. Nižší umístění viz Obr. 50 zároveň znamená příznivější rozložení směsi z hlediska zapalitelnosti, protože příliš bohatá směs je vytlačována do horní části komůrky a nátokových kanálků.



Obr. 48 Rychlost proudění v řezu 15°BTDC vlevo 14., vpravo 17.

Zpětný ventil je situován až ve vefukovači viz Obr. 19 a to především z důvodu zástavbových rozměrů. Jediné bližší umístění je ve spodní části komůrky, kde však hrozí jeho tepelné poškození z důvodu prohoření směsi až do nátokových kanálků.

Z výsledků simulací v rozšíření Flow Analysis na Obr. 58 lze vyčíst několik poznatků, a to:

- 1) K dostatečnému rozrušení tečného proudění v okolí svíčky je potřeba volit agresivní geometrii na stěnách komůrky. Vidíme že až do geometrie e), která je přítomna na variantě 9. (1e) mají úpravy komůrky na proudění uvnitř zanedbatelný vliv.
- 2) Z porovnání variant 1. (1a) a 4. (3a) je zřejmé, že i relativně malý tangenciální příspěvek od dolních otvorů razantně změní celou situaci v komůrce a zároveň v okolí svíčky viz Obr. 56 a Obr. 57. Tam se ve variantě 4. nachází pouze relativně úzké pásmo s příliš bohatou směsí v porovnání s daleko větší oblastí varianty 1. (1a), která je navíc silně soustředěna v okolí jiskřiště. Dolní otvůrky přitom mají daleko menší odstředivou rychlost, díky úhlu rozevření pouze 60°, v porovnání s horními otvůrky.



- 3) Nejvíce překvapující rozdíl je vidět mezi verzemi 16. (4j) a 17. (6j) Jediným rozdílem je absence středového otvoru. Ta přináší velikou změnu v celkovém rozložení směsi v komůrce, protože tento přímý paprsek chudé směsi vytlačuje bohatší směs směrem ke svíčce a chudá směs pak je dále unášena tečným prouděním.

Situace přímo v okolí svíčky je ve variantě 17. (6j) oproti všem předchozím výrazně odlišná, protože se u ní již v 15°BTDC nachází daleko chudší směs (stále však bohatá).

Společně s poznatky z bodu 2) lze usoudit, že tečné proudění je relativně choulostivé na narušení prouděním ve značně rozdílném směru.

7.2 Optimalizace vyplachování

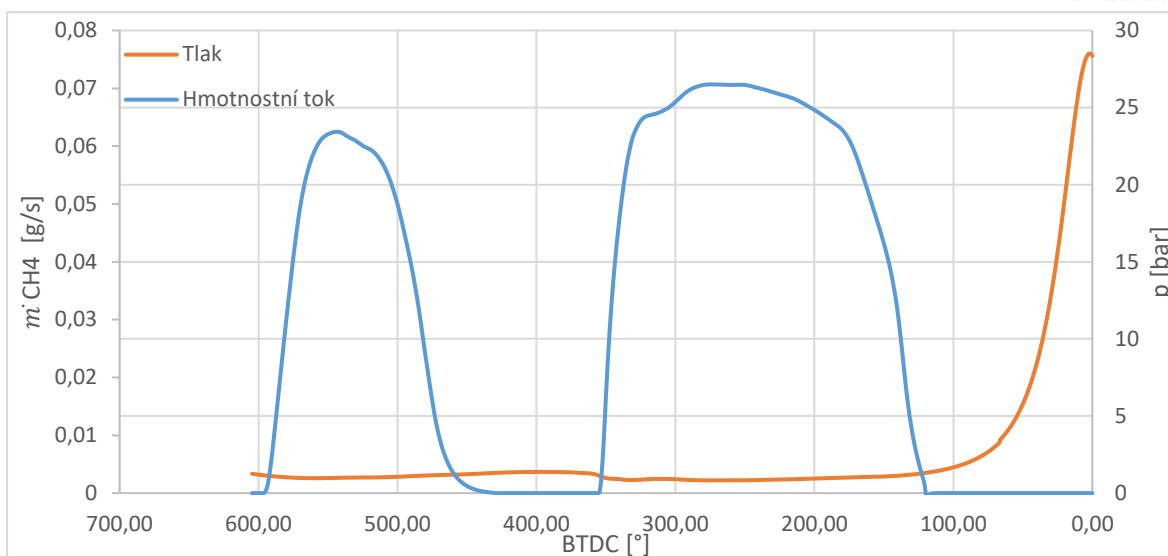
K vyplachování byl použit průběh z protáčeného motoru Avia simulovaného v prostředí GT-Power.

7.2.1 Podmínky simulace

Na počátku byla komůrka včetně nátokové soustavy naplněna 100 % CO₂. Následně byla komůrka plněna methanem s průtokem viz Obr. 49. Analogicky byla podle Obr. 49 stanovena tlaková podmínka na polokulové ploše, přes kterou do komůrky při nárůstu tlaku pronikal vzduch. Simulace probíhala od 605°BTDC do 0°BTDC s časovým krokem 1°CA. Nastaveny byly i teplotní podmínky, jak na fyzických okrajích, tak pro methan a vzduch, které naplňovaly komůrku, přestože část této simulace nebyla teplotně zdaleka tak proměnlivá jako 7.1.

Počáteční podmínky byly určeny dle výstupních dat okamžitého stavu ve FIRE. Byla tak určena počáteční teplota a tlak v komůrce a okolí v podobě polokoule. Dále byly nastaveny okrajové podmínky, a to proměnlivě tlak a teplotu chudé náplně vnikající do systému polokulovou plochou viz Obr. 49. Jako stacionární byla nastavena teplota hlavy válců a komůrky, konkrétně na 500 K, respektive 485 K.

Komůrka byla naplněna směsí odpovídající 61 % hmotnostního podílu methanu a zbylých 39 % zabíral vzduch. Přes polokulovou plochu, nahrazující tlakovou okrajovou podmínkou pohybující se píst, natékala do komůrky chudá směs o zhruba 3,46 % hmotnostního podílu methanu, což odpovídá $\lambda = 1,68$.



Obr. 49 Průběh tlaku a hmotnostního toku do komůrky

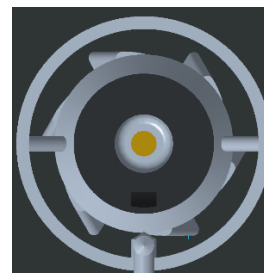
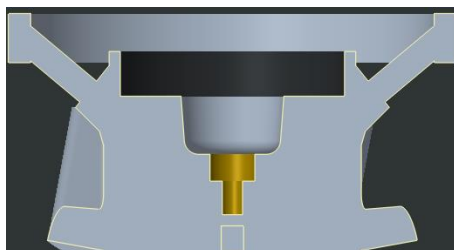
7.2.2 Testované konfigurace

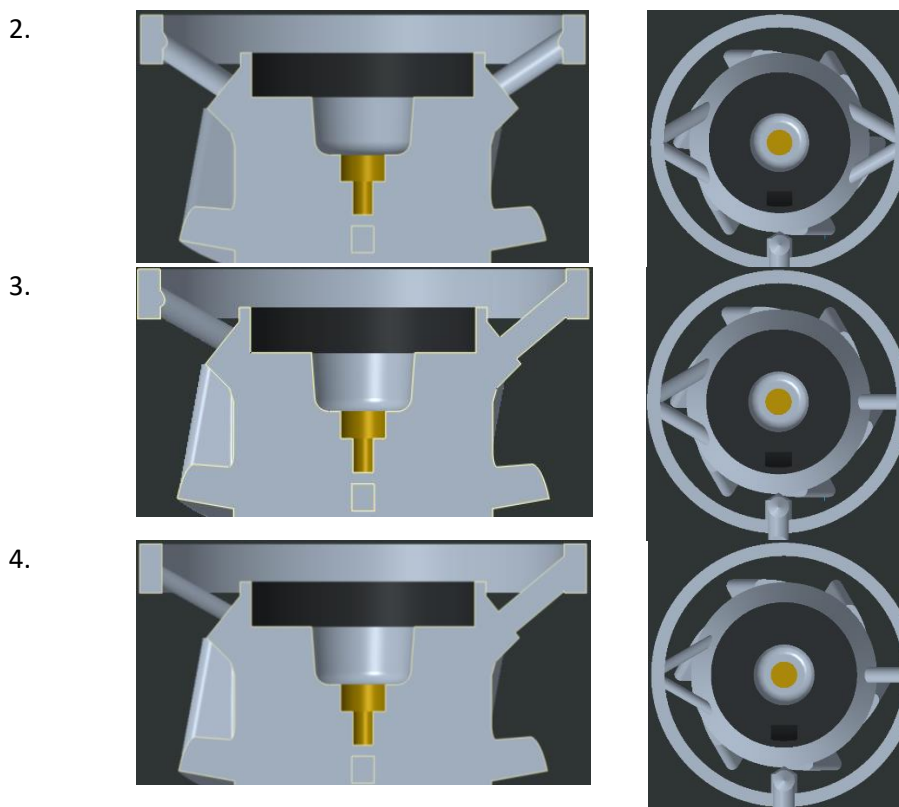
Vzhledem k umístění svíčky zhruba doprostřed rozšířené části komůrky není možné umístit kanálky vodorovně, protože jak si lze představit s pomocí Obr. 50, ústily by do závitů svíčky.

Je tedy nutné kanálky namířit pod úhlem do komůrky. Velikost úhlu je pak závislá na délce zasunutí svíčky do komůrky. Na otestování bylo zvoleno několik následujících možností viz Obr. 50:

1. Jednoduché středové kanálky namířené na jiskřiště 1,2 mm
2. Zdvojené vidlicové kanálky 1,2 mm
3. Jeden středový kanálek namířený do jiskřiště 1,2 mm, z protilehlé strany komůrky vidlicovité kanálky 1,2 mm
4. Jeden kanálek namířený do jiskřiště 1,2mm a z protilehlé strany komůrky vidlicovitá dvojice 0,8mm (pro stejný průtok z obou stran)

1.





Obr. 50 Varianty nátokových kanálků

Z porovnání nátokových kanálků viz Obr. 51 a Obr. 59 je patrné, že v první fázi plnění komůrky lépe vyplachuje jiskřiště varianta 1 (kanálky namířené do jiskřiště). V průběhu druhé fáze, před kterou dochází k zpětnému toku do komůrky, se do popředí dostávají verze 3 a 4 (jeden kanálek do jiskřiště a dva ve tvaru vidlice).

Další nevýhodou varianty 1 je vysoký efekt zkratového vyplachování oproti zbylým variantám. Komůrka tak dosahuje horšího vypláchnutí a je tak méně místa pro čerstvou náplň.

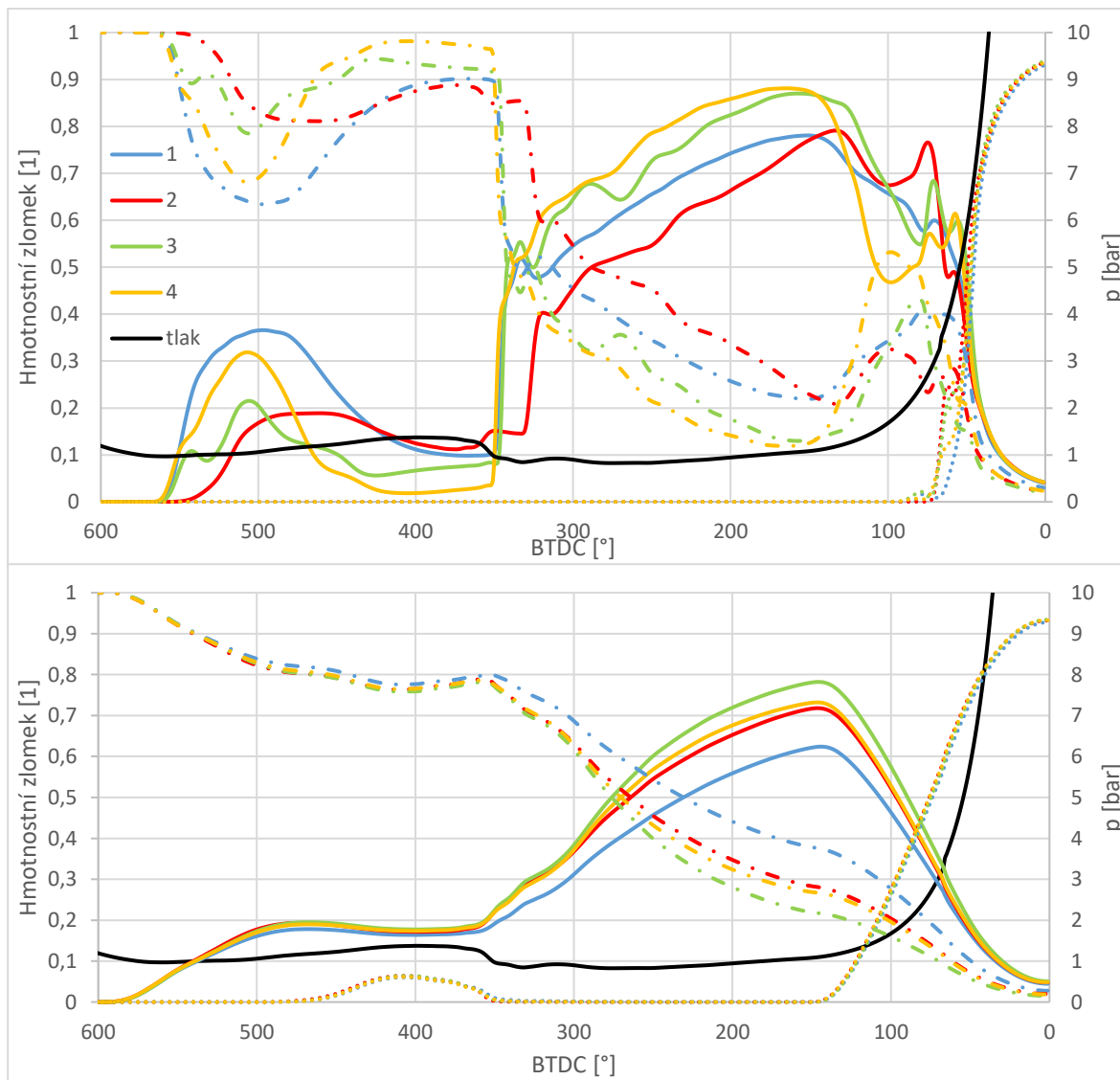
Konfigurace 2 (na obou stranách vidličkové kanálky) většinu času zaostává ve vyplachování okolo svíčky oproti ostatním variantám. V úseku $100^\circ - 70^\circ$ BTDC je vidět nižší pokles koncentrace methanu v jiskřišti. Důvodem je udržování bohatší směsi u stěn komůrky díky absenci středového kanálku. Ta se pak dostane s pomocí vybrání v okolí svíčky do jiskřiště. Nicméně s přítokem dalšího vzduchu z válce dojde k rozředění pod hodnoty poskytované verzemi 3 a 4.

Varianta 4, jejíž úkol bylo sjednotit hmotnostní průtok z obou stran kanálků, se prokázala jako horší v porovnání s verzí 3.

Jako nejlepší možnost se ukazuje verze 3, která poskytuje vysoké vypláchnutí komůrky, včetně prostoru v okolí svíčky díky jednomu kanálku, který je směřován přímo do jiskřiště.



Na Obr. 59 je patrný trend variant 3 a 4 rozmísťovať smes v komúrce nerovnomerné, nicméně finální fáze se silným tečným prouděním tyto nerovnoměrnosti dostatečně promíchá. Verze 3 tak zůstává jako nejlepší možnost pro tuto komúrku.

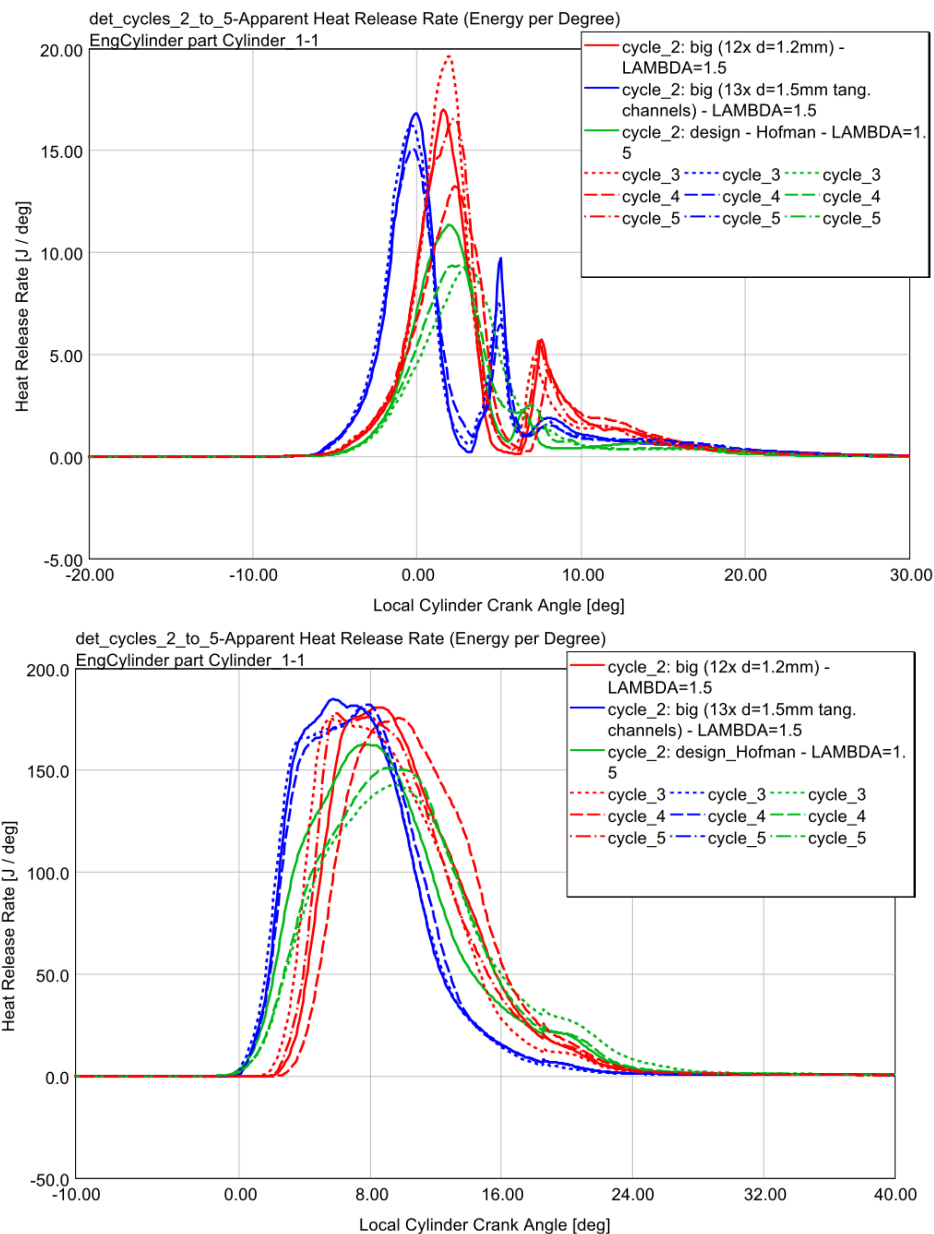


Obr. 51 Průběh koncentrací a tlaku, nahoře v poloze jiskřiště, dole v celé komúrce.
Plně: methan; tečkovaně: vzduch; šrafovaně: oxid uhličitý



8 Výsledky ze simulace ve FIRE

Pro náročnost přípravy simulace kompletně nové geometrie, především v oblasti síťování, došlo ke kompromisu v podobě zabudování výsledné komůrky do simulačního motoru AVIA.



Obr. 52 Rychlost vývinu tepla. Nahoře: v komůrce; dole: ve válci.

Proběhly celkem 4 simulační cykly (z prvních dvou byly pořízeny i grafické výsledky, 3. a 4. pouze v integrálních datech), na kterých však oproti očekávání byla zaznamenána vysoká mezicyklová variabilita viz Obr. 52. Zároveň se dle očekávání negativně projevil menší objem komůrky v rychlosti prohoření směsi v hlavním spalovacím prostoru. Délka

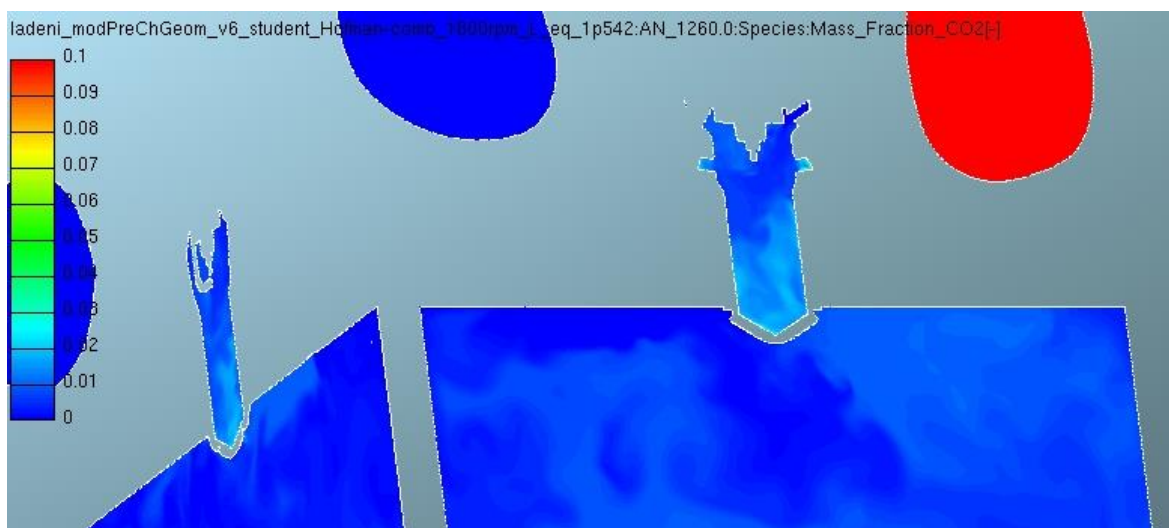


hoření 10-90 % paliva se dle cyklu pohybovala v rozmezí 12-14°C, zatímco velká tečná komůrka se pohybuje v rozmezí 10-11°C. Tento rozdíl lze vidět i na grafické reprezentaci viz Obr. 60, kde je porovnání nové komůrky s velkou tangenciální variantou. Je zde vidět i intenzivnější fáze dohořívání po spálení 90 % paliva, která může vést k navýšení tepelných ztrát.

Kromě malého objemu komůrky to může být způsobeno dalšími faktory, jako např. příliš velké propojovací otvůrky, či až příliš velká turbulence.

Navzdory horším výsledkům v porovnání s většími verzemi byl zaznamenán přínos vnitřní geometrie komůrky. Ten spočívá v rozložení směsi v komůrce. Tvarování komůrky skutečně prospělo v promíchání směsi a snížení její bohatosti, zejména pak v okolí jiskřiště viz Obr. 61.

Stejně tak lze kladně zhodnotit vyplachování komůrky, protože po dosažení dolní úvrati je v prostoru kolem svíčky téměř nulové zastoupení CO₂. Podobně tomu je ve zbytku komůrky, kde se jen ve spodní části nachází CO₂ v jednotkách procent viz Obr. 53.



Obr. 53 Podíl CO₂ v nové komůrce po vyplachování.



9 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala úpravou, zabudováním a optimalizací vyplachované komůrky do motoru Zetor 1716, společně s vytvořením její výkresové dokumentace.

Návrh komůrky vycházel z již experimentálně ověřené komůrky používané na motoru Avia G432. Mezi hlavní konstrukční úpravy patří úprava hlavy válců motoru Zetor, která je nezbytná pro akomodaci komůrky. Důraz byl kladen na co nejmenší zásah do hlavy válců z důvodu zachování její tuhosti a minimalizace rizika proboření z prostoru chladicí kapaliny do okolních částí, jako např. sací kanál. Toho bylo dosaženo především za pomoci přemostění nátokové soustavy v okolí svíčky, které umožnilo snížit průměr tělesa komůrky. To současně vedlo ke snížení objemu komůrky, jehož ztrátu měla být kompenzována úpravou vnitřní části komůrky.

K optimalizaci proudění v komůrce bylo použito rozšíření programu CREO Parametric, Flow Analysis. To umožnilo vyzkoušení vysokého počtu variant. Nejdřív však bylo potřeba CFD model důkladně nastavit. K tomu bylo využito simulace v prostředí AVL FIRE, která sloužila jako etalon, ke kterému se bylo před optimalizací komůrky potřeba přiblížit. Jako nejvhodnější pro modelování turbulence se ukázal model RNG k- ϵ . Jelikož patří mezi RANS přístup, bylo vhodné zvýšit koeficienty podporující turbulentní parametry. Nemalou překážkou byly omezené možnosti síťování, které je v rozšíření Flow Analysis velice zjednodušené. Kvůli tomu bylo nutné použití jemné sítě, protože se při absenci rotačně symetrické sítě projevuje numerická viskozita, která pokrývá proudění. Po optimalizaci je však i takto zjednodušený řešič schopen podávat výsledky blížící se specializovaným software. Je tak vhodné jeho použití pro eliminaci zásadních chyb v návrhu, které se týkají samotného proudění.

S pomocí kalibrovaného modelu bylo odzkoušeno sedmnáct provedení tangenciální komůrky, které byly kombinací deseti geometrií komůrky a šesti typů nátokových kanálků. Postupný vývoj vedl až k finální variantě 17., která jako jediná nemá centrální propojovací kanálek. Jeho absence přinesla daleko homogennější rozložení směsi v komůrce.

Druhá část optimalizace se soustředila na vyplachování komůrky. Otestovány byly čtyři konfigurace nátokových kanálků. Jako nejlepší verze se ukázala varianta 3., která je kombinací přímého kanálku do polohy jiskřiště se stejně velkými vidlicovými kanálky na protější straně. Tato verze vedla k dobrému vypláchnutí jak v oblasti jiskřiště, tak ve zbytku komůrky.

Varianta 17. s nátoky tvaru 3. pak byla otestována v software AVL FIRE, kde proběhly čtyři výpočetní cykly. Oproti velké tangenciální komůrce však zaznamenala vyšší



mezicyklovou variabilitu a nižší rychlost hoření. Na vině je s nejvyšší pravděpodobností znatelně nižší objem komůrky, který neposkytuje tak vysokou zapalovací energii. Dalším možným důvodem je příliš velký průřez propojovacích otvůrků, které snižují tlakový rozdíl mezi komůrkou a spalovacím prostorem, což může vést k zapálení menšího objemu směsi. Z výsledných dat lze poupravit doporučení zejména k objemu komůrky, kdy dolní hranice doporučené rozmezí 2–3 % kompresního objemu zaostává v zapalovacích schopnostech v porovnání s většími komůrkami.

Pro budoucí práci by bylo vhodné využití funkce geometrie určené k homogenizaci směsi na komůrce s vyšším objemem. To by mělo vést k vyšší rychlosti spalování a snížení mezicyklové variability. Zároveň by to mohlo vést i k lepším experimentálním výsledkům, které se jinak u tangenciálních provedení komůrek ukázaly jako nedostatečné.



10 Přílohy

(Mimo diplomovou práci)

| Název | Číslo výkresu |
|-------------------------|---------------|
| KOMURKA | 001 |
| STRED | 002 |
| VRCHNI_TRUBKA | 003 |
| PODLOZKA_KOMURKY | 004 |
| KOLIK | 005 |
| TRMINEK | 006 |
| KULOVA_PODLOZKA | 007 |
| PRIDRZUJICI_PLECH | 008 |
| TESNICI_KROUZEK | 009 |
| ADAPTER_NA_SVICKU | 010 |
| HLAVA | 011 |
| SESTAVA_KOMURKA | ASM001 |
| SESTAVA_KOMURKY_V_HLAVE | ASM002 |

Data_kalibrace.xlsx

Vseobecne.xlsx

Vyplachovani_CO2.xlsx

CFD_model_KOS.zip (obsahuje nakonfigurovanou simulaci naplnění v Creo 7.0.7.0)



Customize Selected Applications

Creo Direct [7.0.7.0]
Creo Layout [7.0.7.0]
Creo Parametric [7.0.7.0]
Creo Simulate [7.0.7.0]

Application Features | **Command Configuration** | Shortcuts

Setup Command Configuration:

| Configuration | Configuration Description | |
|---------------|---------------------------|--|
| parametric | Creo Parametric (default) | |

Add
Edit
Delete

Obr. 54 Konfigurace modulu Flow Analysis

Edit configuration

Configuration Name: parametric

Configuration Description: Creo Parametric (default)

Available License(s)

- ▼ Startup Extensions
 - Mechanism_Design
- ▼ Floating options
 - MEC-Cus-Loads
 - PVANIMATION
 - PVDESIGNCHECK
 - PVINTERFERENCE
 - PVMCAD64

Selected License(s)

License to run

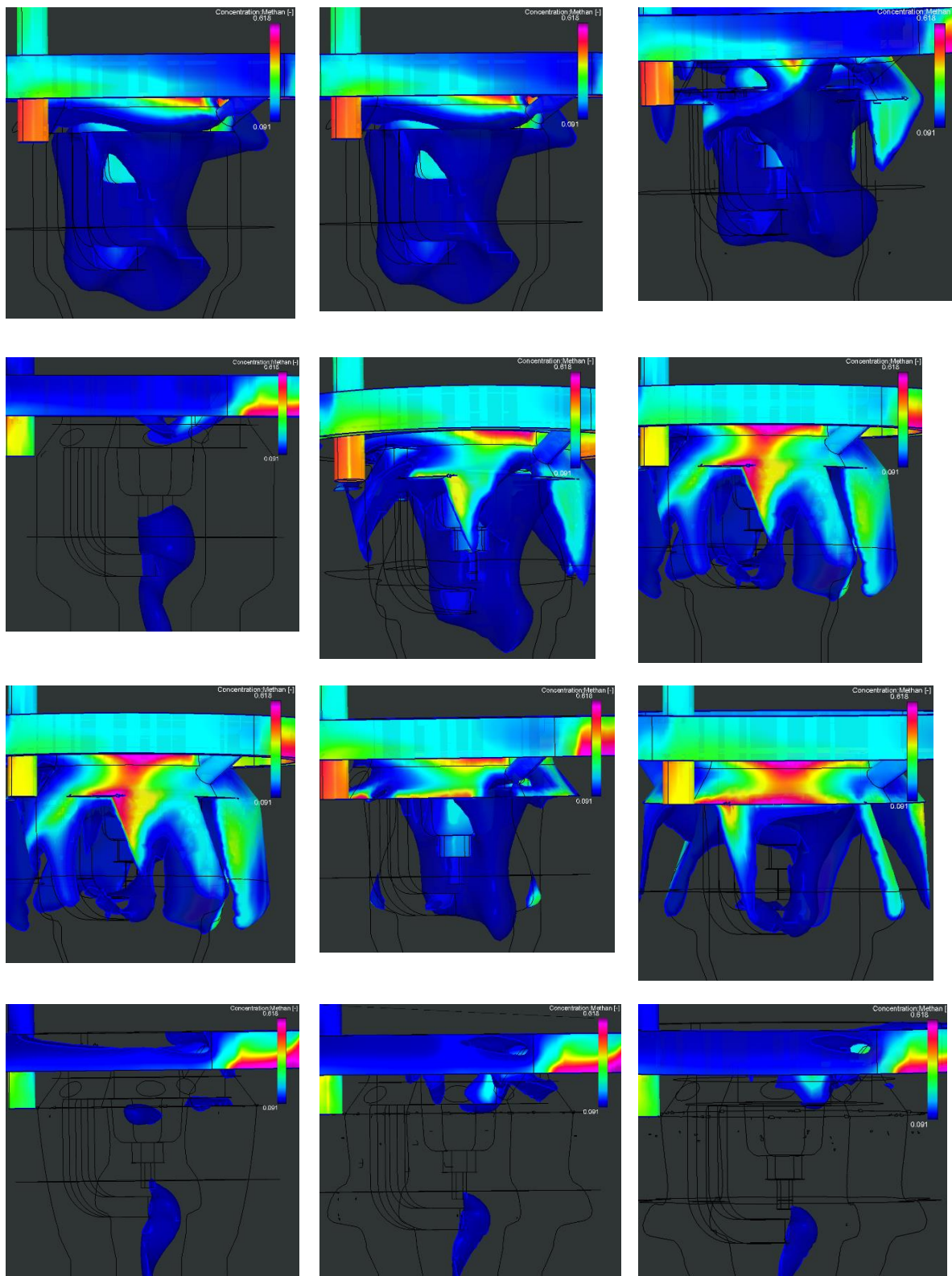
- PROE_FoundationAdv
- PROE_Educ1

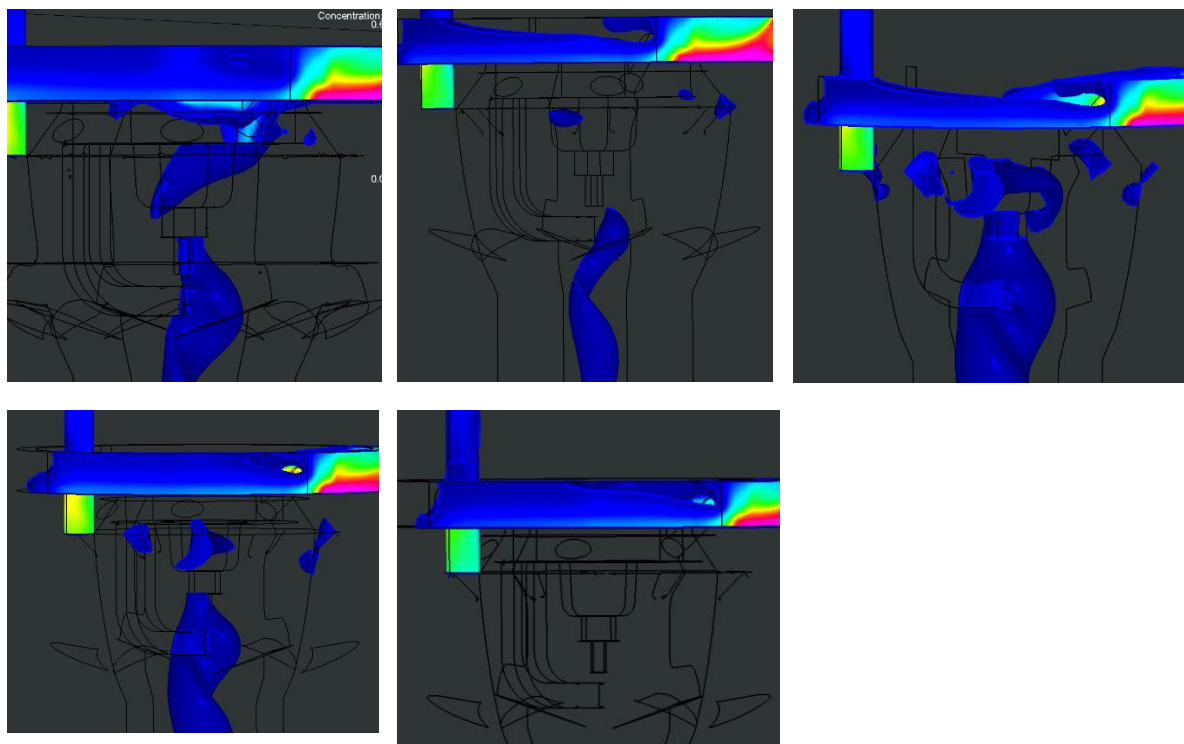
Startup_extensions and floating options

- CFD_ADVANCED_PLUS_SET

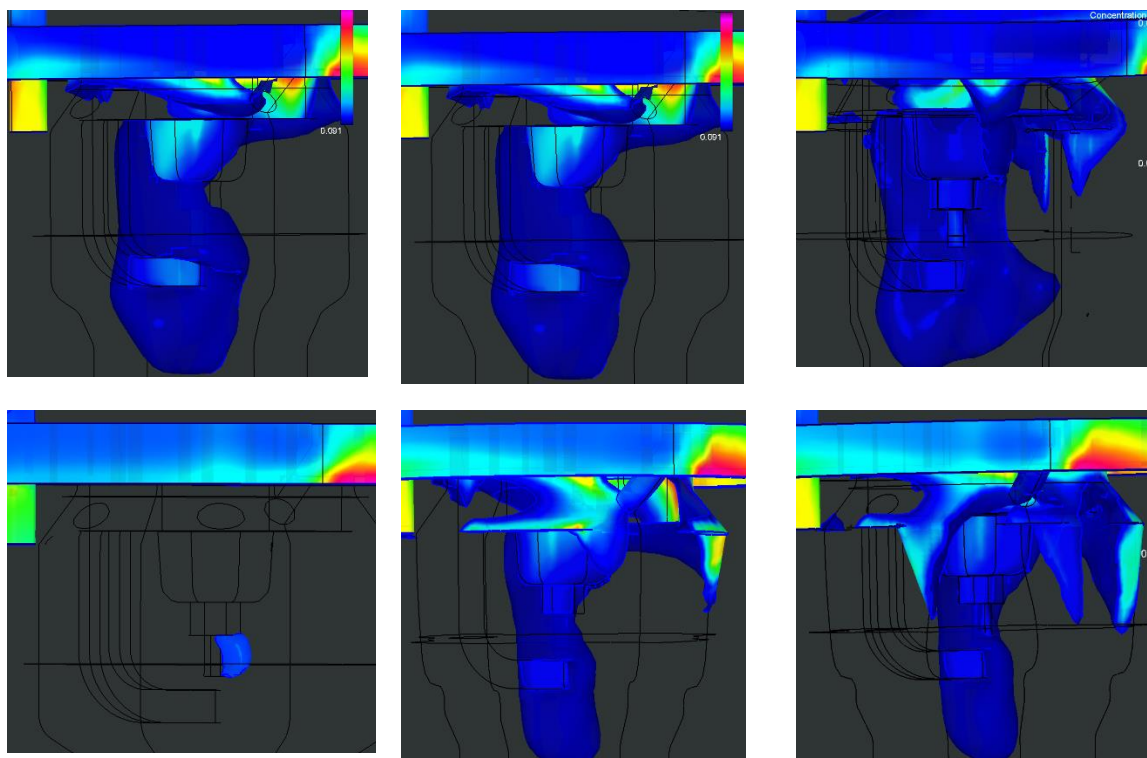
OK Cancel

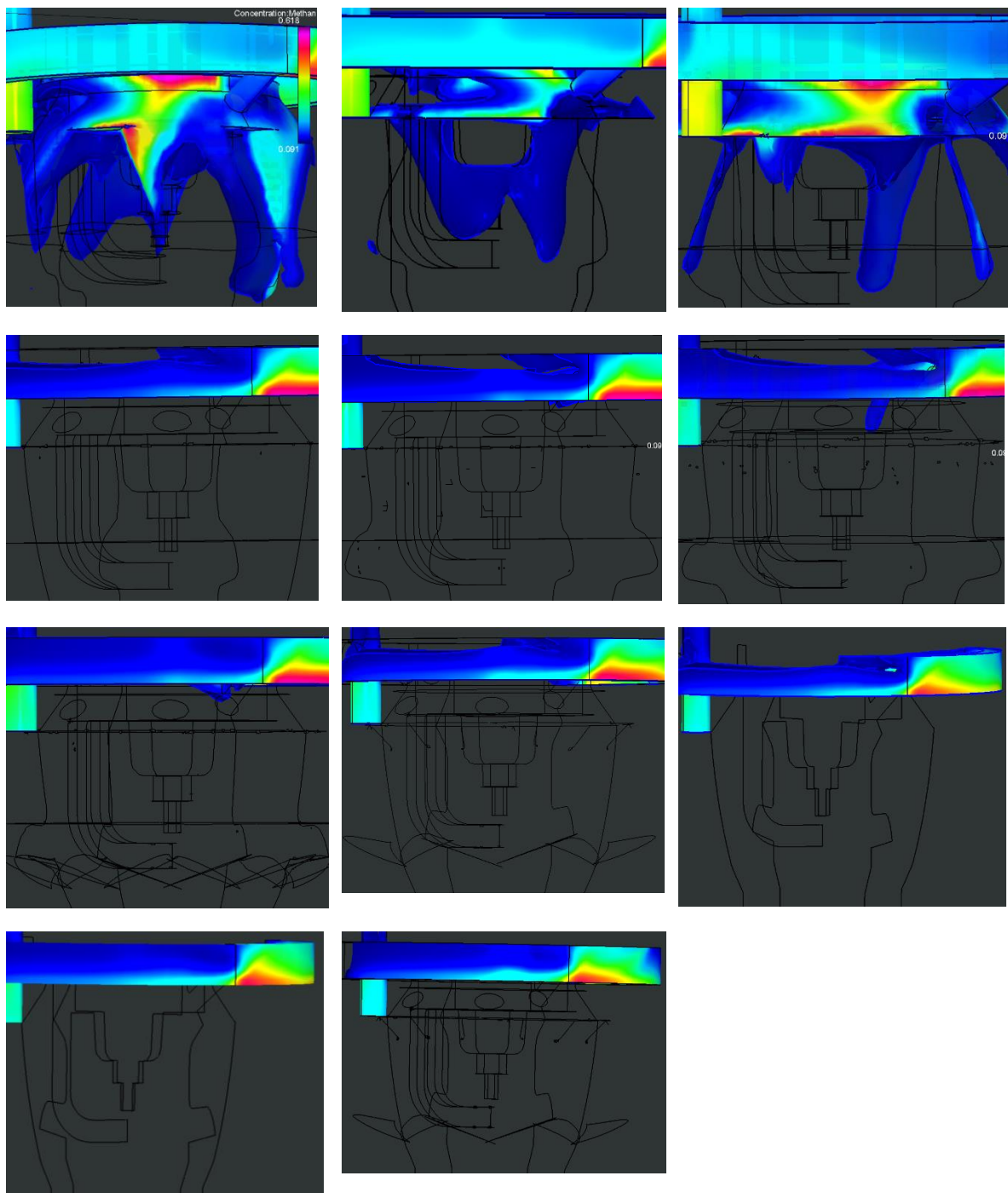
Obr. 55 Instalace rozšířeného modulu Flow Analysis Premium



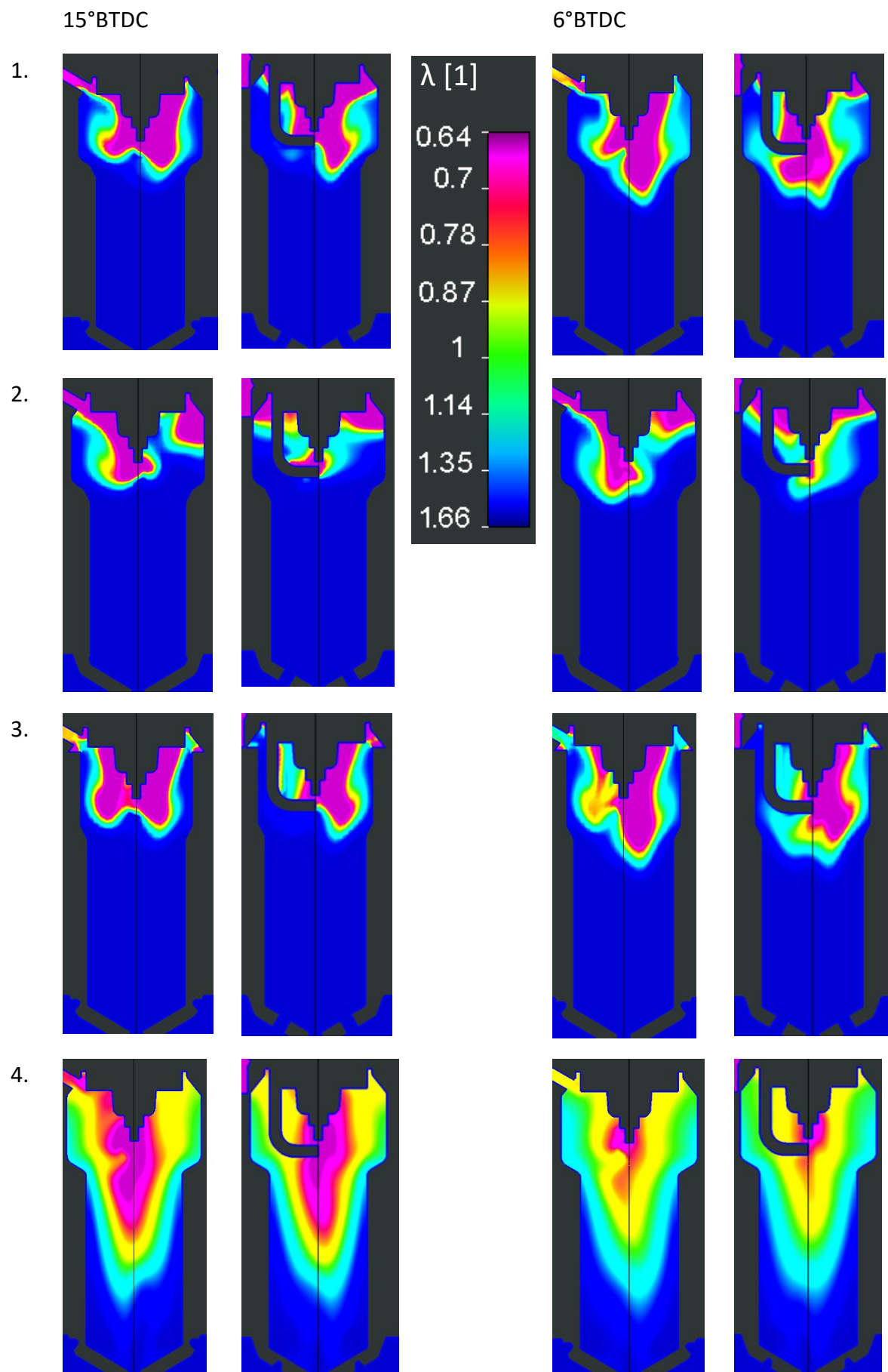


Obr. 56 Vyobrazení příliš bohaté oblasti ($\lambda < 0,6$) v okolí svičky 15°BTDC, varianty 1-17 (řazení po řádcích zleva doprava), barvy jsou spíše ilustrativní, nemají na zapalitelnost směsi již vliv



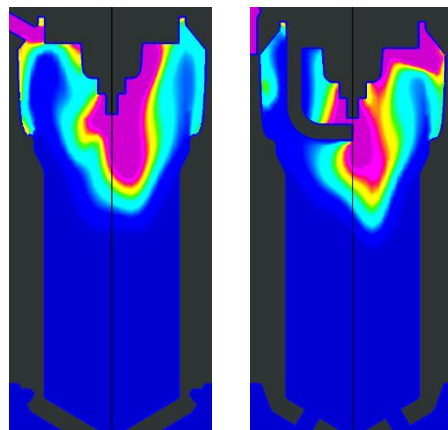
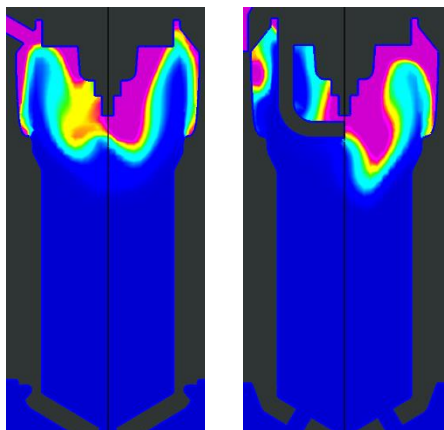


Obr. 57 Vyobrazení příliš bohaté oblasti ($\lambda < 0,6$) v okolí svíčky 6° BTDC, varianty 1-17 (řazení po řádcích zleva doprava), barvy jsou spíše ilustrativní, nemají na zapalitelnost již vliv

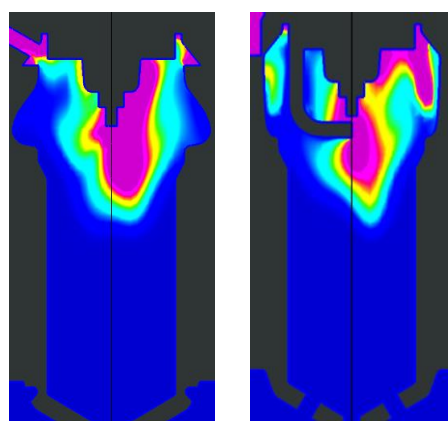
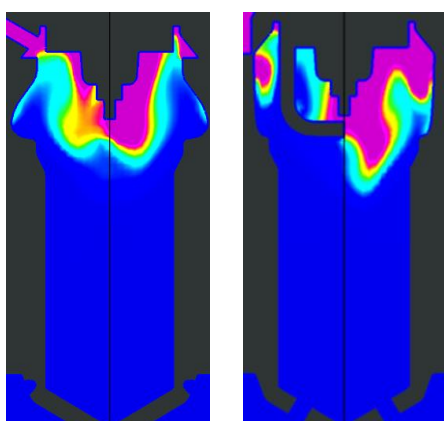




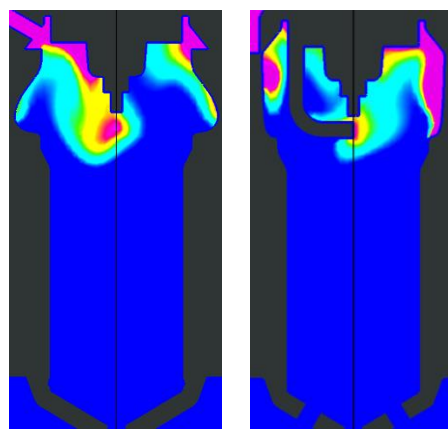
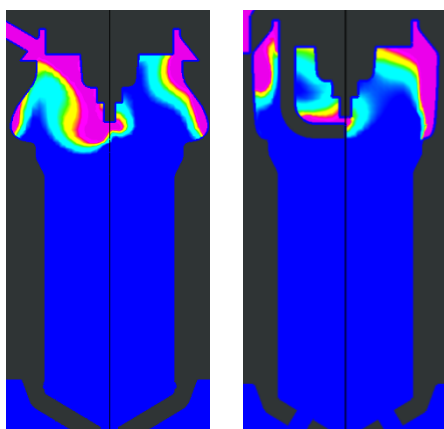
5.



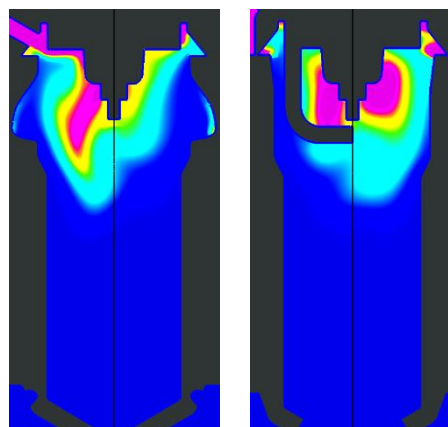
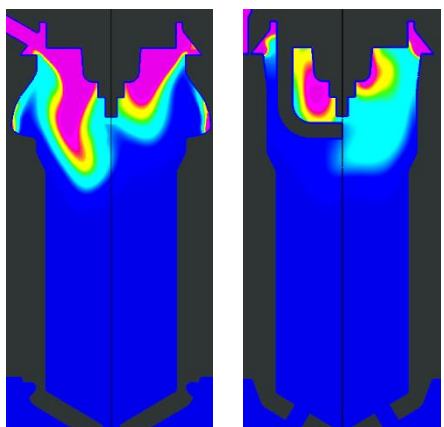
6.



7.

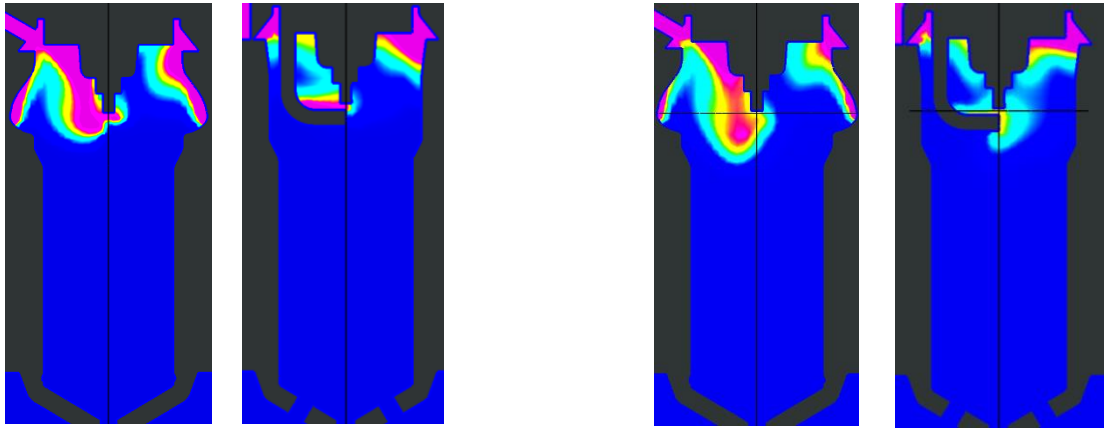


8.

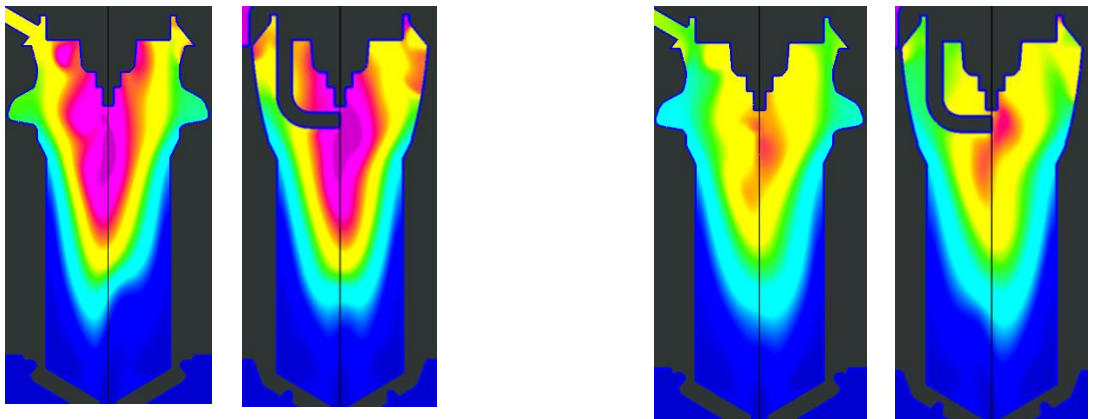




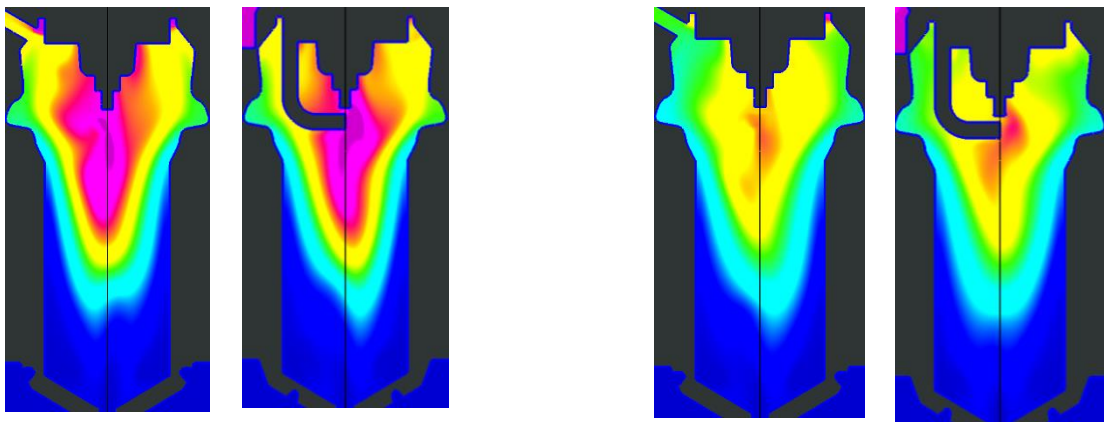
9.



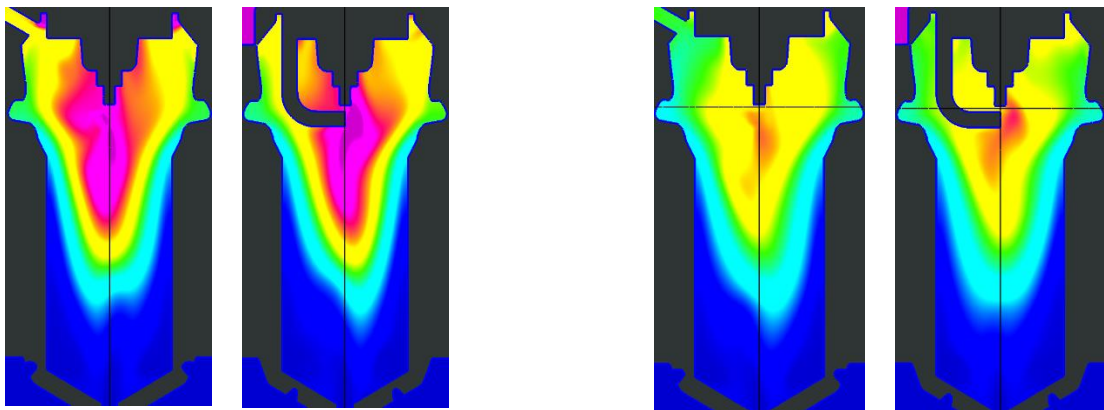
10.



11.

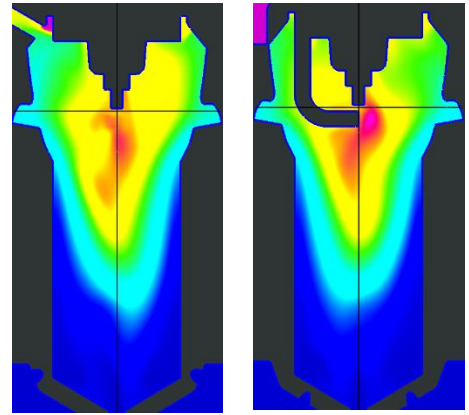
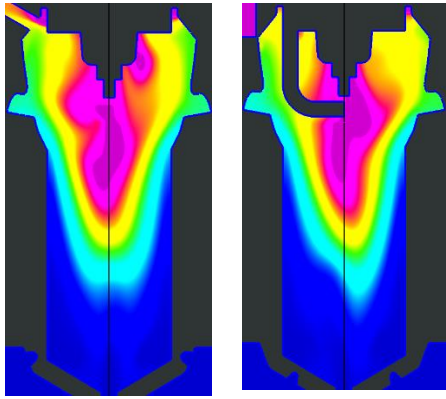


12.

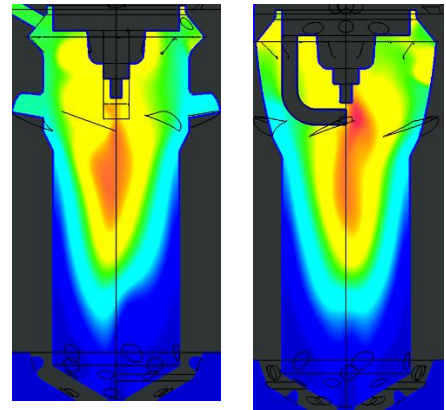
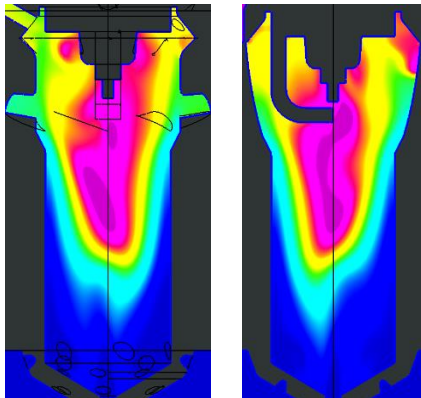




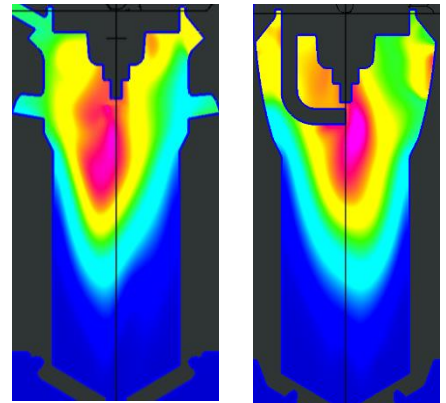
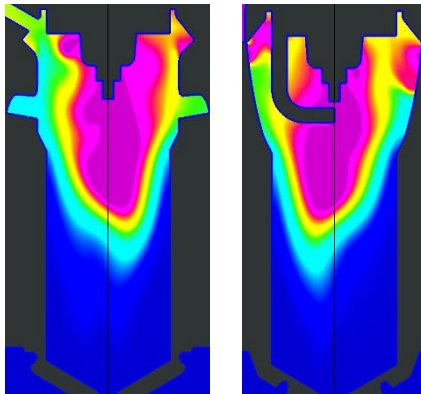
13.



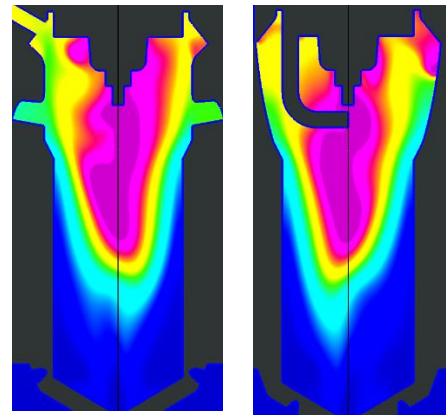
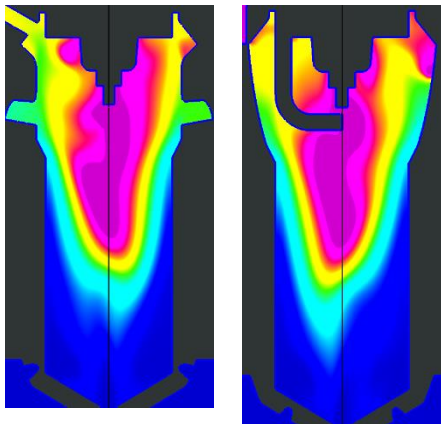
14.



15.

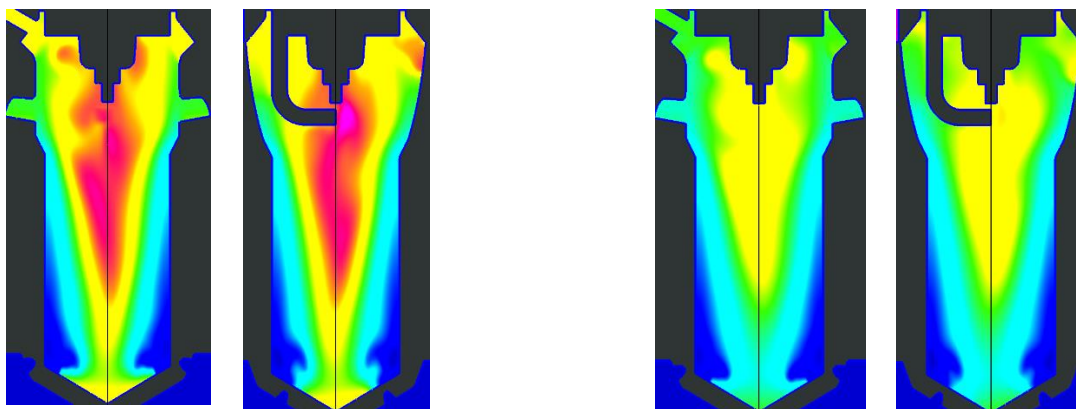


16.

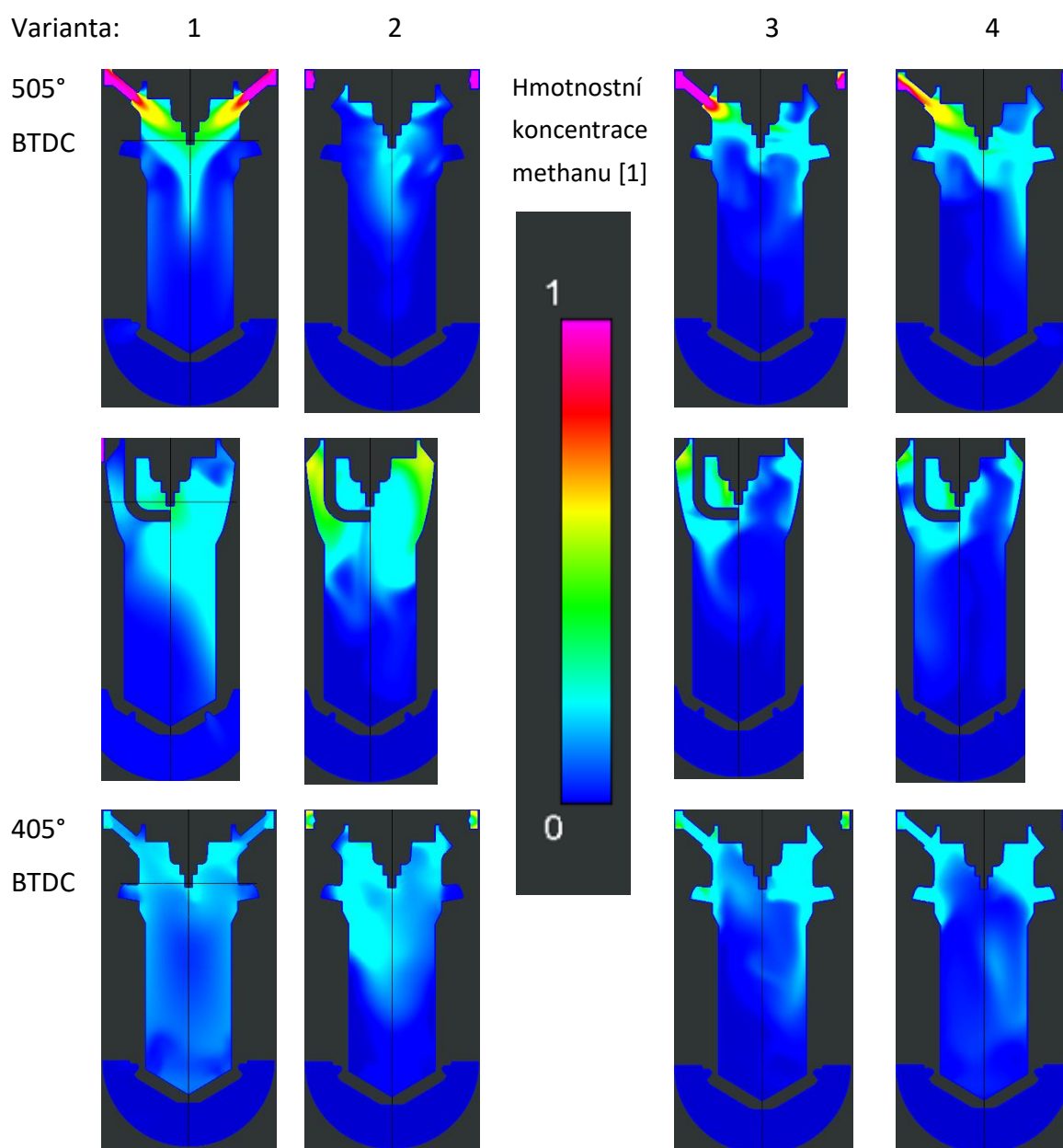


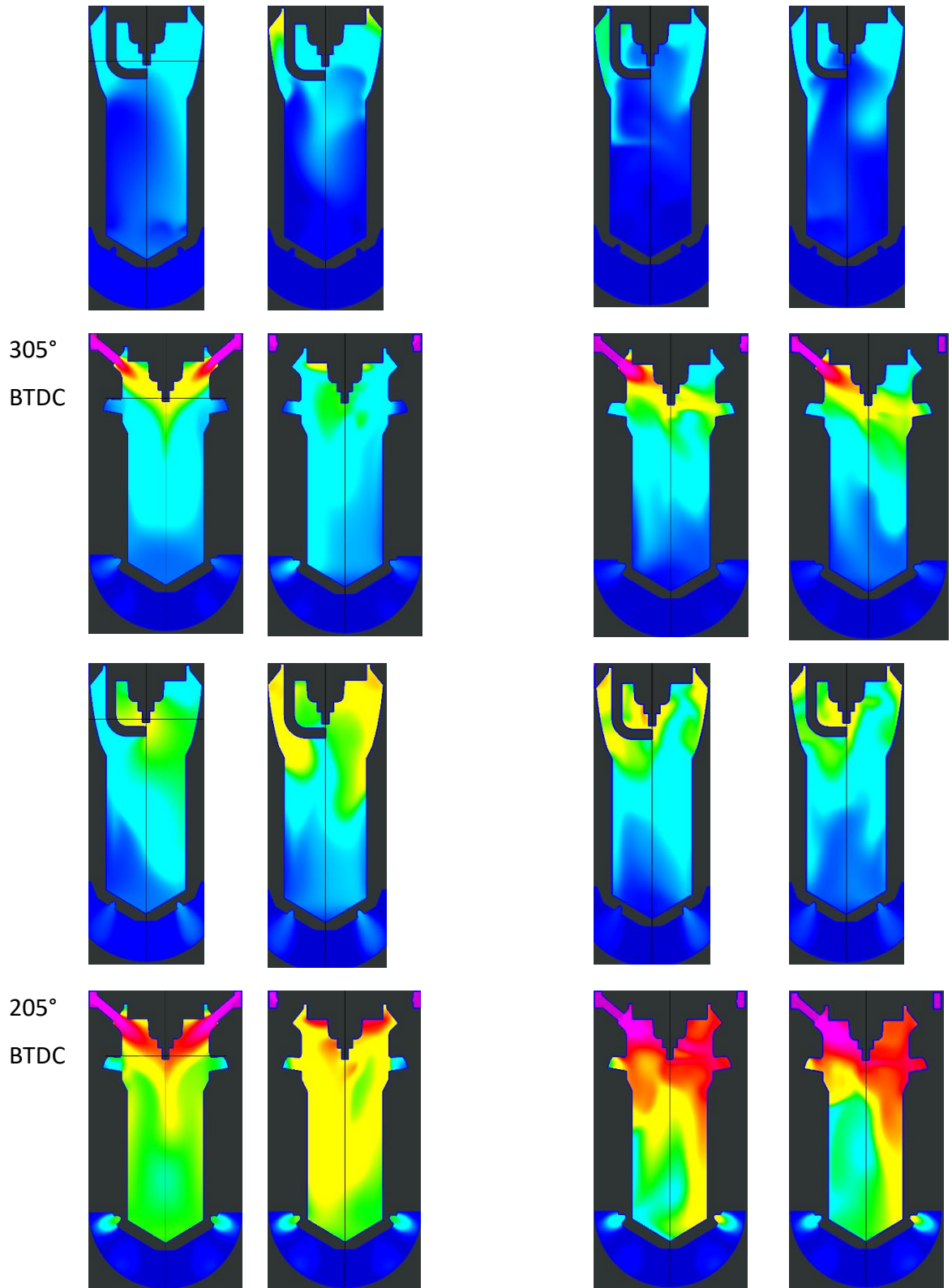


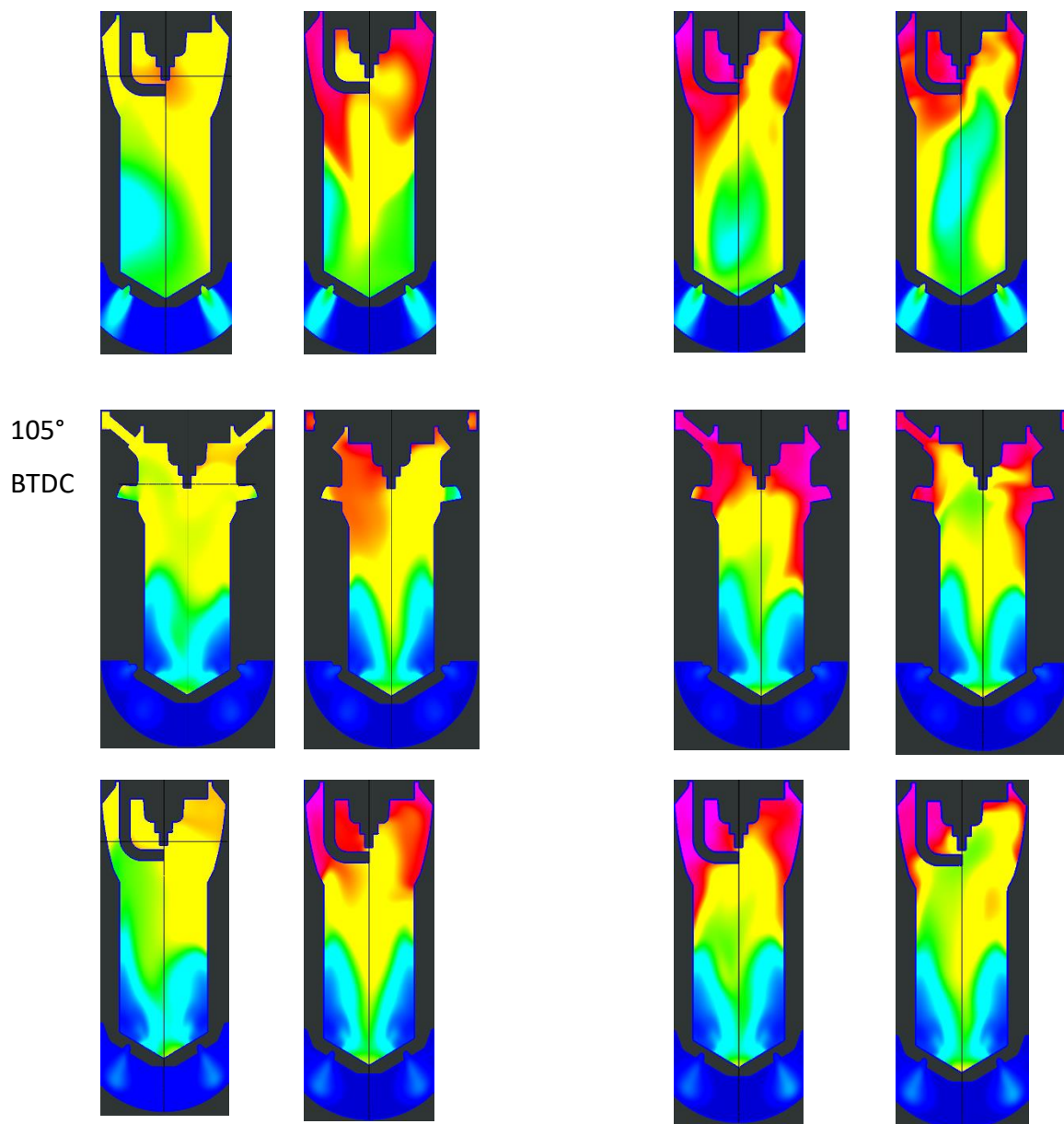
17.



Obr. 58 Koncentrace methanu v testovaných variantách komůrky při 15° a 6° BTDC







Obr. 59 Koncentrace methanu v komůrce při jejím plnění, varianty kanálek 1-4

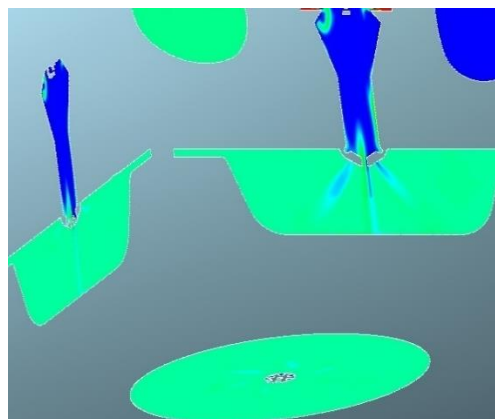
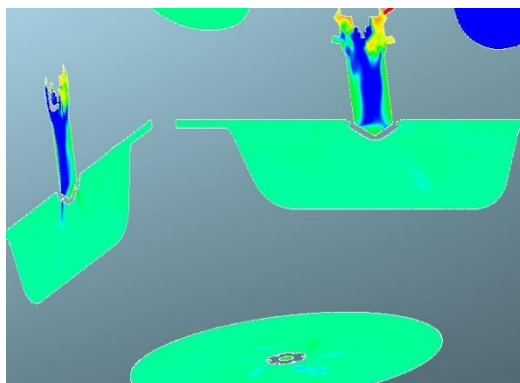
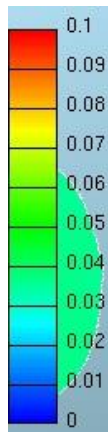


°ATDC

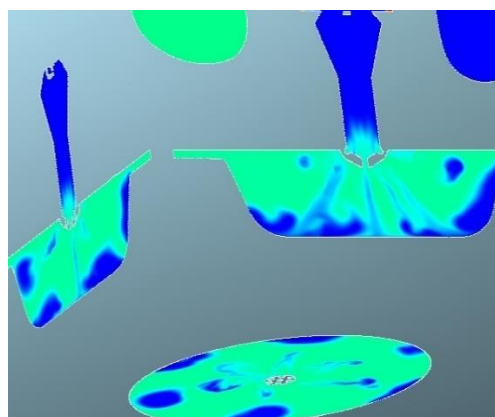
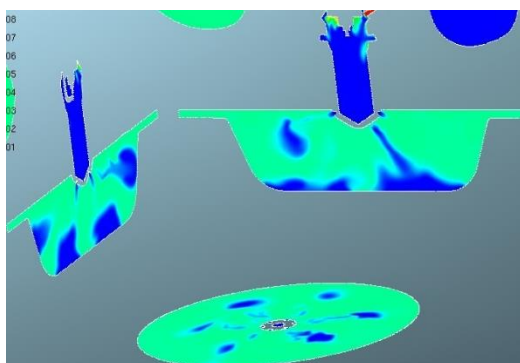
Nová varianta pro Zetor

Tangenciální varianta Avia

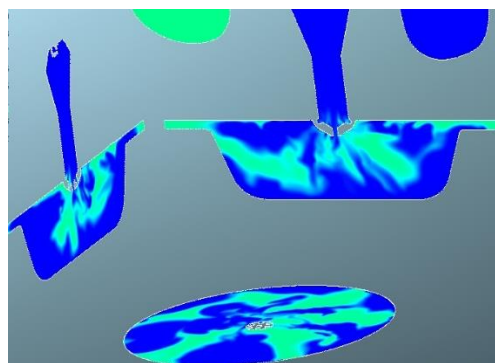
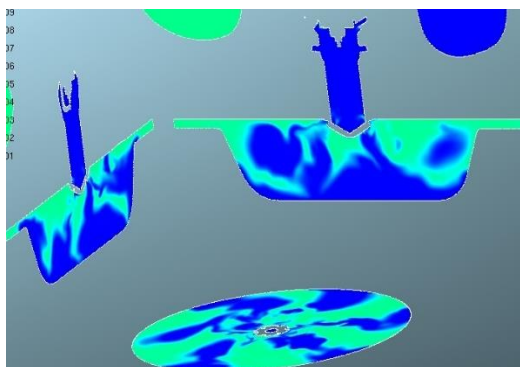
1°



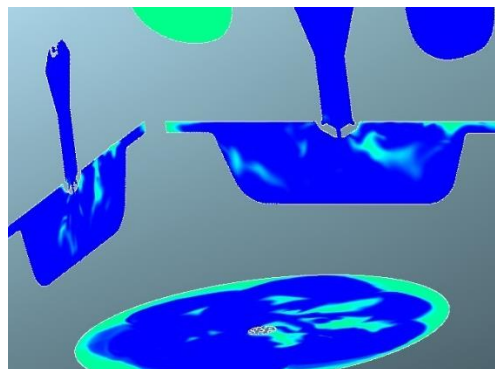
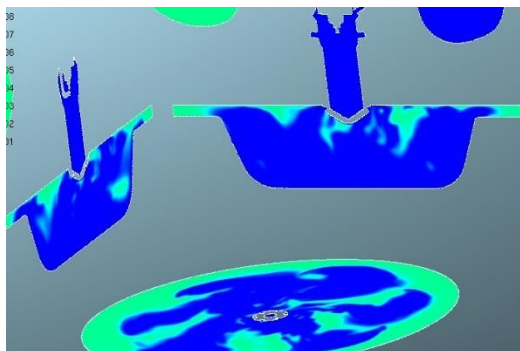
4°



7°

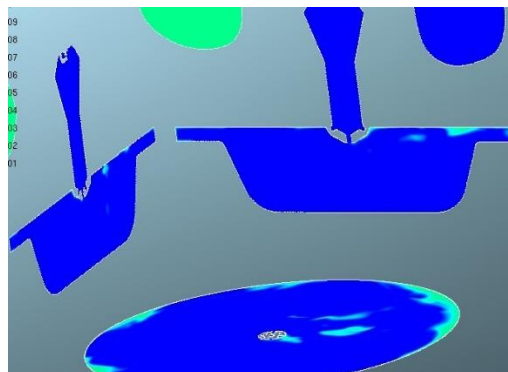
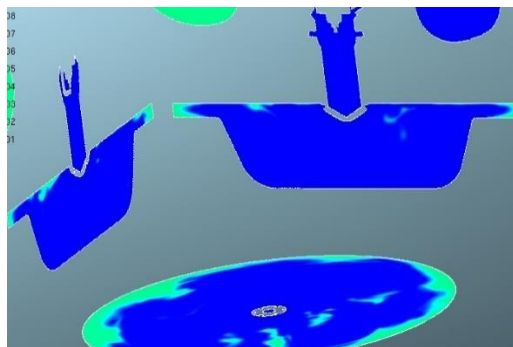


10°

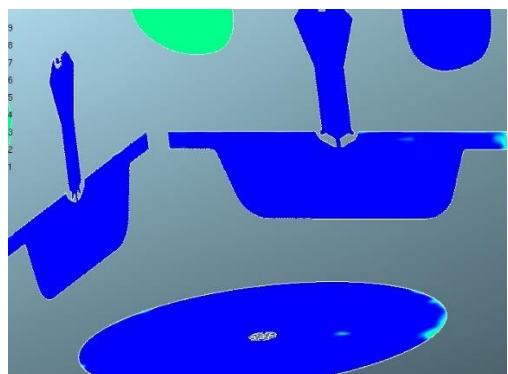
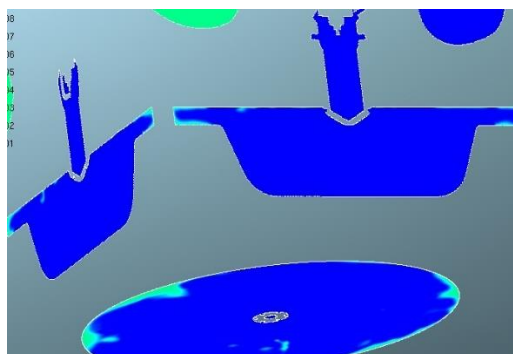




13°



16°



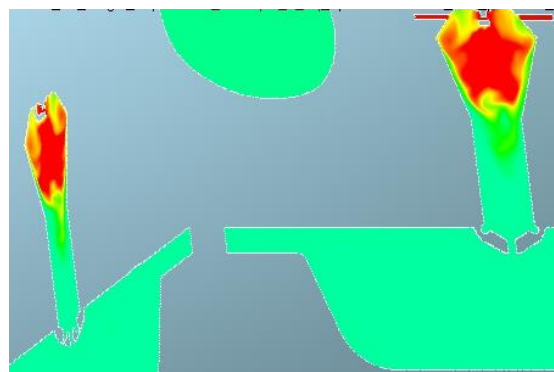
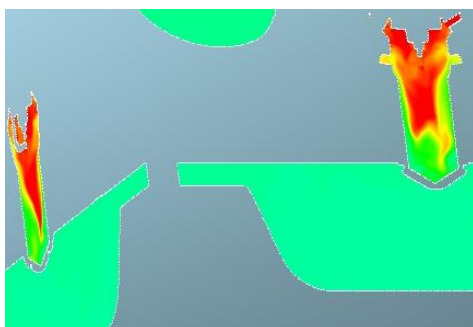
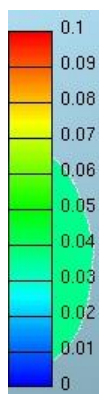
Obr. 60 Porovnání hoření nové komůrky s tangenciální variantou Avia 13x1,5 mm. (zbarvení dle koncentrace methanu)

°BTDC

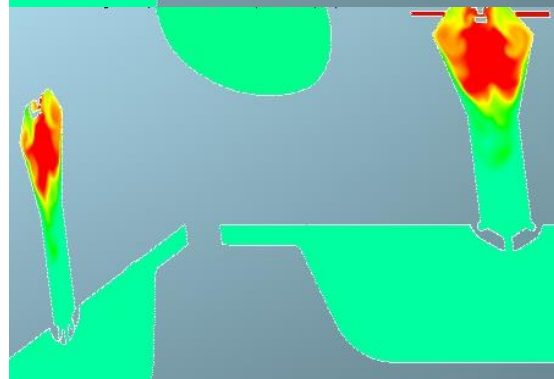
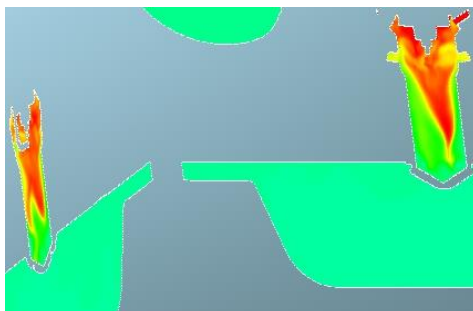
Nová varianta pro Zetor

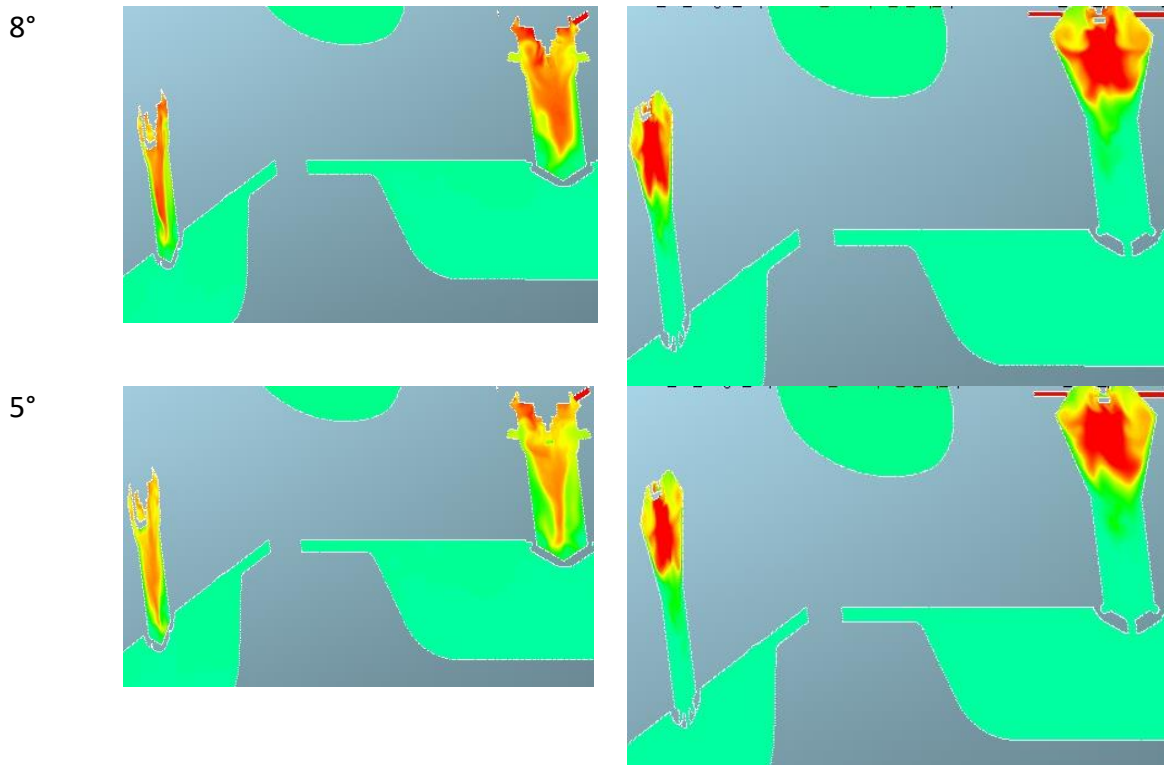
Tangenciální varianta Avia

14°



11°





Obr. 61 Rozložení methanu v komůrce před zápalem. Nová vs. velká komůrka Avia 13x1,5 mm. (zbarvení dle koncentrace methanu)

11 Seznam použité literatury

Bibliografie

- [1] Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York : McGraw-Hille, Inc., 1988
- [2] MACEK, Jan. Spalovací motory I. Praha : Nakaldatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03618-1.
- [3] KAŠPAR, J., FORNASIERO, P. a HICKEY, N. Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. Trieste : Dipartimento di Scienze Chimiche, University of Trieste, 2003. ISSN 0920-5861.
- [4] Noguchi, M., Sanda, S. a Nakamura, N. Development of Toyota Lean Burn Engine. [Online] 1976. [Citace: 16. 05 2022.] <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/760757/>.
- [5] BEDOGNI, F., a další. Gasoline internal combustion engine, with a combustion pre-chamber and two spark plugs. EP3453856B1 EP, JP, US, 16. 10 2019.



- [6] RICARDO, H. R. RECENT RESEARCH WORK ON THE INTERNAL-COMBUSTION ENGINE. [Online] 1922. [Citace:] <http://www.jstor.org/stable/44729538>.
- [7] ATTARD, W. Turbulent jet ignition pre-chamber combustion system for spark ignition engines. US8857405B2 Spojené státy americké, 01. 11 2011.
- [8] DAS, L. M. Hydrogen-fueled internal combustion engines. místo neznámé : Woodhead Publishing, 2016. ISBN 9781782423638.
- [9] GUSSAK, L. A. High chemical activity of incomplete combustion products and a method of prechamber torch ignition for avalanche activation of combustion in internal combustion engines. [Online] 1975. ISSN 0148-7191.
- [10] KIRKPATRICK, A., KIM, G. a OLSEN, D. Modeling of the Performance of a Prechamber for Use in a Large Bore Natural Gas Engine. [Online] 2015. [Citace: 20. 06 2022.] <https://asmedigitalcollection.asme.org/ICES/proceedings-abstract/ICES2005/41847/397/308623>.
- [11] LENG, X., a další. IMPACT OF THE PRE-CHAMBER NOZZLE ORIFICE CONFIGURATIONS ON COMBUSTION AND PERFORMANCE OF A NATURAL GAS ENGINE. [Online] 2018. [Citace: 20. 06 2022.] https://www.researchgate.net/publication/322836916_Impact_of_the_pre-chamber_nozzle_orifice_configurations_on_combustion_and_performance_of_a_Natural_Gas_Engine.
- [12] VLČEK, Petr. Modelování turbulentního proudění. [Online] 2013. [Citace: 25. 05 2022.] <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>.
- [13] Manuál CREO Flow Analysis. [Online] [Citace: 23. 05 2022.] https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r7.0/usascii/.
- [14] YAKHOT, V., a další. Development of turbulence models for shear flows by double expansion technique. [Online] 1992. [Citace: 25. 05 2022.] <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.858424>. ISSN 0899-8213.
- [15] AZUBUIKE, I. I., IKIENSIKIMAMA, S. S. a ORODU, O. DO. Natural Gas Compressibility Factor Measurement and Evaluation for High Pressure High Temperature Gas Reservoirs. [Online] Červenec 2016. [Citace: 23. 03 2022.] http://eprints.covenantuniversity.edu.ng/7834/1/researchpaper_Natural%20%28Orodu%29.pdf. ISSN 2229-5518.
- [16] ANDREWS, J. R. a BIBLARZ, O. Temperature dependence of gas properties in polynomial form. [Online] 1981. [Citace: 23. 03 2022.] <https://core.ac.uk/download/pdf/36723064.pdf>. NPS67-81-001.
- [17] GUALTIERI, C., a další. On the Values for the Turbulent Schmidt Number in Environmental Flows. [Online] 2017. [Citace: 28. 05 2022.] https://www.researchgate.net/publication/316213958_On_the_Values_for_the_Turbulent_Schmidt_Number_in_Environmental_Flows.
- [18] AVRAHAM, T. All about CFD. [Online] [Citace: 16. 06 2022.] <https://cfdisrael.blog/2018/04/25/understanding-the-k-epsilon-turbulence-model/>.



- [1] PTC Creo Flow Analysis Extension Data sheet. [Online] [Citace: 29. 05 2022.]
9] https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/CAD/creo-datsheet/J13496_CreoFlowAnalysis_DS.pdf.
- [2] GRAF, R. F. Modern Dictionary of Electronics. [Online] 1999. [Citace: 18. 05 2022.]
0] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080511986500114>. ISBN 9780080511986.
- [2] HLAING, P., a další. A Study of Lean Burn Pre-Chamber Concept in a Heavy Duty Engine.
1] [Online] 2019. [Citace: 03. 06 2022.] <https://saemobilus.sae.org/content/2019-24-0107/>.
- [2] VÍTEK, O., a další. Natural Gas SI Internal Combustion Engine Equipped with Scavenged Pre-
2] Chamber. místo neznámé : České vysoké učení technické v Praze.
- [2] ATTARD, W. P., a další. A Turbulent Jet Ignition Pre-Chamber Combustion System for Large
3] Fuel Economy Improvements in a Modern Vehicle Powertrain. [Online] 2010. [Citace: 23. 05 2022.] <https://saemobilus.sae.org/content/2010-01-1457/>. ISSN 1946-3936.
- [2] Syrovatka, Z., Vitek, O., Vavra, J., and Takats, M., "Scavenged Pre-Chamber Volume Effect on
4] Gas Engine Performance and Emissions," SAE Technical Paper 2019-01-0258, 2019, doi:10.4271/2019-01-0258 [Online] 2019.



Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Rovnovážná koncentrace NO v závislosti na čase a teplotě [20]..... | 9 |
| Obr. 2 Pasivní komůrka [4] | 13 |
| Obr. 3 Pasivní komůrka Maserati [5] | 14 |
| Obr. 4 Aktivní komůrka dle návrhu H. R. Ricarda [6] | 15 |
| Obr. 5 Aktivní komůrka MAHLE [7]..... | 16 |
| Obr. 6 Stabilita zapalování, komůrka MAHLE vs. svíčka [23] | 16 |
| Obr. 7 Rychlost hoření, komůrka MAHLE vs. svíčka [23] | 16 |
| Obr. 8 Termická účinnost,..... | 17 |
| Obr. 9 Emise NO _x , komůrka MAHLE vs. svíčka [23]..... | 17 |
| Obr. 10 Komůrka s tenkým hrdlem [21] | 18 |
| Obr. 11 Délka hoření v komůrce s dlouhým hrdlem [21] | 18 |
| Obr. 12 Mez zápalnosti vodíku v závislosti na teplotě [8] | 19 |
| Obr. 13 Detonační oblast vodíku [8]..... | 19 |
| Obr. 14 Výchozí geometrie z motoru AVIA D432 [24] | 21 |
| Obr. 15 Řez hlavou válců Zetor. Nahoře: původní hlava | 22 |
| Obr. 16 Těsnění za pomoci O-kroužků u tenké stěny | 23 |
| Obr. 17 Zapalovací svíčka BOSCH VR8SC+ | 24 |
| Obr. 18 Detail spodní části komůrky Zetor | 25 |
| Obr. 19 Zástavba komůrky do motoru Zetor 1716 | 26 |
| Obr. 20 Proudění v blízkosti stěny [18]..... | 30 |
| Obr. 21 Přehled balíčků CREO Flow Analysis [19]..... | 31 |
| Obr. 22 Použití funkce Merge pro tvorbu simulační geometrie | 32 |
| Obr. 23 Hlavní panel modulu Flow Analysis | 33 |
| Obr. 24 Tvorba simulační domény..... | 34 |
| Obr. 25 Teselace povrchu s hodnotou parametru vlevo: 4 ; vpravo: 0,1 | 34 |
| Obr. 26 Vlevo špatného nastavení parametrů sítě (685 038 buněk)..... | 36 |
| Obr. 27 Řez lokálního zjemnění sítě v okolí nátoků do komůrky..... | 36 |
| Obr. 28 Zadávání parametrů pomocí textových souborů, nahoře: skript pro načítání dat; dole: textový soubor s daty | 38 |
| Obr. 29 Koncentrace methanu v řezu komůrkou s vektory o délce dle rychlosti, obarvenými dle hodnoty tlaku | 40 |
| Obr. 30 Subpovrch komůrky s příliš bohatou směsí v kombinaci se zobrazením turbulentní kinetické energie..... | 40 |
| Obr. 31 Proudnice se zbarvením dle rychlosti tekutiny, omezené řezem | 41 |
| Obr. 32 Integrovaný průběh teploty v komůrce | 41 |
| Obr. 33 Model kalibrační komůrky motoru AVIA s G432 s naznačenými řezy | 42 |
| Obr. 34 Nahoře: průběh teploty a tlaku na polokulové ploše v závislosti na úhlu před horní úvratí. Dole: průběh tepelných kapacit v závislosti na teplotě | 43 |
| Obr. 35 Rotačně nesymetrická síť..... | 44 |
| Obr. 36 Proudnice v kalibrační komůrce, zleva: první řada 1-3, druhá řada 4-5 | 45 |
| Obr. 37 Detail řezů výpočetními sítěmi, zleva 1-5 | 45 |
| Obr. 38 Vliv turbulentního Prandtlova čísla na teplotu v komůrce | 47 |
| Obr. 39 Úpravy turbulentního Schmidtova čísla..... | 48 |
| Obr. 40 Nahoře: hmotnost methanu v komůrce; uprostřed: hustota náplně v komůrce; dole: koncentrace CH ₄ v komůrce. Pr x jsou modely ideálního plynu, Isent x pro isoentropický plyn + referenční teplota | 49 |
| Obr. 41 Porovnání modelů turbulence | 51 |
| Obr. 42 Rychlost vývinu tepla v závislosti na poloze jiskry v AVL FIRE; nahoře graf vývinu ve válci, dole graf vývinu v komůrce komůrka; jiskra: červeně v nahoře, modře uprostřed, zeleně dole [22]..... | 53 |
| Obr. 43 Hmotnostní podíl paliva v komůrce a vír bohaté směsi tvořený tangenciálními otvůrkami v AVL FIRE [23]..... | 54 |



| | |
|---|----|
| Obr. 44 Rychlost vývinu tepla v závislosti na tvaru otvůrků; nahoře graf vývinu ve válci, dole v komůrce; červeně: 12x1,2 mm, modře 9x1,5 mm tangenciální, dole 13x1,5 mm [22] | 54 |
| Obr. 45 Provedení otvůrků, varianty 1-6 | 56 |
| Obr. 46 Varianty tvarů komůrky (a-j) + vodorovné řezy pro varianty g a h, pro názornost rozdílů mezi tečnými zkosenými zarážkami a tečnými ostře zkosenými zarážkami | 58 |
| Obr. 47 Hmotnostní podíl paliva 14° po zážehu, velká komůrka na motoru Avia [22]..... | 59 |
| Obr. 48 Rychlost proudění v řezu 15°BTDC vlevo 14., vpravo 17. | 60 |
| Obr. 49 Průběh tlaku a hmotnostního toku do komůrky | 62 |
| Obr. 50 Varianty nátokových kanálků..... | 63 |
| Obr. 51 Průběh koncentrací a tlaku, nahoře v poloze jiskřiště, dole v celé komůrce. Plně: methan; tečkovaně: vzduch; šrafovaně: oxid uhličitý | 64 |
| Obr. 52 Rychlost vývinu tepla. Nahoře: v komůrce; dole: ve válci. | 65 |
| Obr. 53 Podíl CO ₂ v nové komůrce po vyplachování. | 66 |
| Obr. 54 Konfigurace modulu Flow Analysis | 70 |
| Obr. 55 Instalace rozšířeného modulu FLOW Analysis Premium | 70 |
| Obr. 56 Vyobrazení příliš bohaté oblasti ($\lambda < 0,6$) v okolí svíčky 15°BTDC, varianty 1-17 (řazení po řádcích zleva doprava), barvy jsou spíše ilustrativní, nemají na zapalitelnost směsi již vliv | 72 |
| Obr. 57 Vyobrazení příliš bohaté oblasti ($\lambda < 0,6$) v okolí svíčky 6°BTDC, varianty 1-17 (řazení po řádcích zleva doprava), barvy jsou spíše ilustrativní, nemají na zapalitelnost již vliv | 73 |
| Obr. 58 Koncentrace methanu v testovaných variantách komůrky při 15° a 6° BTDC | 78 |
| Obr. 59 Koncentrace methanu v komůrce při jejím plnění, varianty kanálků 1-4..... | 80 |
| Obr. 60 Porovnání hoření nové komůrky s tangenciální variantou Avia 13x1,5 mm. (zbarvení dle koncentrace methanu) | 82 |
| Obr. 61 Rozložení methanu v komůrce před zápal. Nová vs. velká komůrka Avia 13x1,5 mm. (zbarvení dle koncentrace methanu)..... | 83 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Parametry motoru Zetor 1716 | 21 |
| Tabulka 2 Konstanty k-ε modelu [15] | 28 |
| Tabulka 3 Konstanty modelu RNG k-ε [15] | 29 |
| Tabulka 4 Kombinace testovaných variant komůrky..... | 58 |