

Efektivní spalování alternativních paliv v pístovém spalovacím motoru

Ing. Zbyněk Syrovátka

Studijní obor: Dopravní stroje a zařízení
Školitel: Prof. Ing. Michal Takáts, CSc.

Úvod

V této práci je prezentován experimentální vývoj zapalovacího systému s vyplachovanou předkomůrkou pro spalování chudé směsi v plynovém motoru, jako prostředku pro navýšení účinnosti spalovacího motoru a snížení emisí oxidů dusíku. Spalování chudé směsi dochází k poklesu maximální teploty, a tím i snížení tepelných ztrát vysokotlaké části pracovního cyklu. Přebytečný vzduch v chudé směsi navíc zvyšuje poměr specifických tepelných kapacit (κ) a vede ke zvýšení tepelné účinnosti motoru. Chudá koncepce také umožňuje omezit nutnost škrcení pro regulaci výkonu a tím snížit pumpovní ztráty. Extrémní zředění směsi pak výrazně snižuje emise oxidů dusíku (NOx), a to vlivem poklesu maximální teploty v průběhu spalování, která je hlavním faktorem ovlivňujícím jejich tvorbu.

Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vytvořit zapalovací systém s vyplachovanou předkomůrkou pro spalování plyných paliv v pístovém spalovacím motoru pro automobilní aplikace. V konstrukčním návrhu zapalovacího systému je proto implementováno robustní řešení s minimalizací elektroniky a s nízkými nároky na sofistikovanost řídicího systému. Dalším unikátním rysem navrhovaného přístupu je strategie přiřazení složení směsi provozním režimům motoru. Na rozdíl od klasického jiskrového zapalování, zapalovací předkomůrka umožňuje kombinace dvou spalovacích režimů, a to stechiometrické a chudé koncepce. Při nízkém částečném zatížení se předpokládá spalování extrémně chudé směsi tak, aby se dosáhlo akceptovatelně nízkého obsahu oxidů dusíku v surových spalinách a zároveň zvýšení účinnosti motoru. Při plném a vyšším částečném zatížení se navrhuje spalování stechiometrické směsi, aby se dosáhlo měrného výkonu motoru na úrovni současného standardu. Nízký obsah škodlivin ve spalinách odcházejících do atmosféry zajistí konvenční tzv. třicestný katalyzátor.

Dílčí cíle:

- Návrh funkčního vzorku zapalovacího systému a jeho experimentální ověření na motoru.
- Vytvořit simulační modely, které umožní podrobnou analýzu navrhovaného zapalovacího systému.
- Vytvořit kompletní 3-D CFD model experimentálního motoru včetně simulace spalování za účelem stanovení popisu dějů uvnitř předkomůrky a v hlavním spalovacím prostoru.
- Optimalizovat návrh vyplachované předkomůrky pomocí simulačních nástrojů.
- Stanovit strategii řízení navrženého zapalovacího systému a motoru ve stacionárních režimech. Vytvořenou strategii řízení následně ověřit pomocí simulace v nestacionárním emisním cyklu motoru WHTC.

VYPLACHOVANÁ PŘEDKOMŮRKA - KONSTRUKCE

VYPLACHOVANÁ KOMŮRKA – HLAVNÍ VÝHODY:

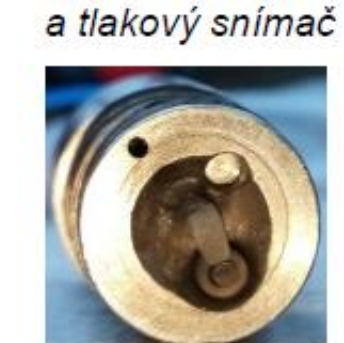
- DVA ODDĚLENÉ SPALOVACÍ PROSTORY
- LOKÁLNÍ OBOHACENÍ SMĚSI
- VÝPLACH ZBYTKOVÝCH PLYNŮ X SAMOZÁPÁLŮM
- VÍCEBODOVÉ ZAPALENÍ CHUDÉ SMĚSI VE VÁLCI

MODULÁRNÍ PROTOTYP:

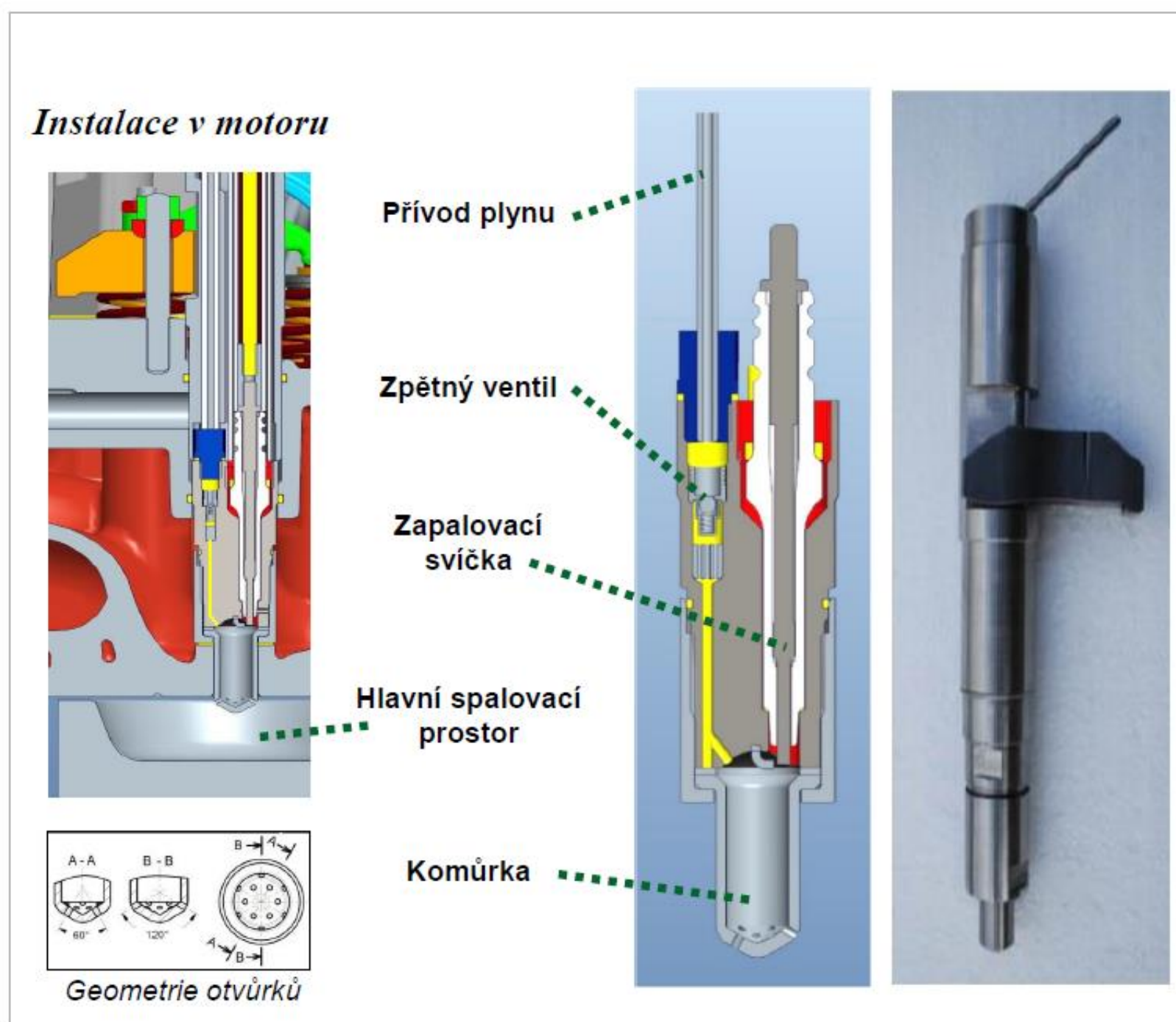
- UMOŽŇUJE ZMĚNU GEOMETRIE - 4 VARIANTY
- SNÍMAČ TLAKU UVNITŘ KOMŮRKY

DATA PRO KALIBRACI NUMERICKÝCH MODELŮ!

Pohled na jiskřičku a tlakový snímač



Vyměnitelná spodní část komůrky



Obr. 1. Konstrukce vyplachované předkomůrky – funkční vzorek

ZKUŠEBNÍ MOTOR

MODIFIKOVANÝ SÉRIOVÝ MOTOR AVIA D432.100

- VZNETOVÝ MOTOR UPRAVEN NA PROVOZ NA ZEMNÍ PLYN
- SNÍŽENÍ KOMPRESNÍHO POMĚRU – ÚPRAVOU PISTU
- KAPACITNÍ ZAPALOVÁNÍ (UNIMA TC+)
- OVLÁDÁNÍ: PRŮŘEZ SMĚŠOVAČE, ŠKRTICÍ KLAPKA, VGT.

ZÁKLADNÍ PARAMETRY:

Veličina	Hodnota	Jednotka
Vrtání x zdvih	102 x 120	mm
Zdvihový objem	3922	cm ³
Původní kompresní poměr	17.5 : 1	-
Aktuální kompresní poměr	12 : 1	-
Počet ventilů / Válec	4	-
Maximální otáčky	2800	min ⁻¹

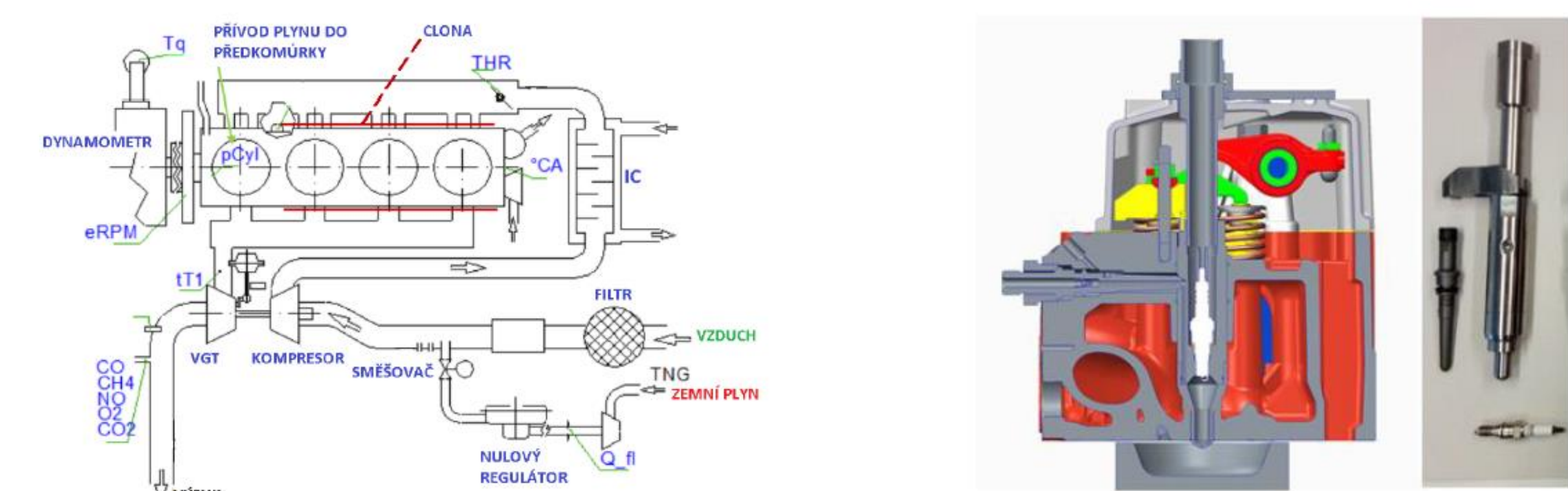
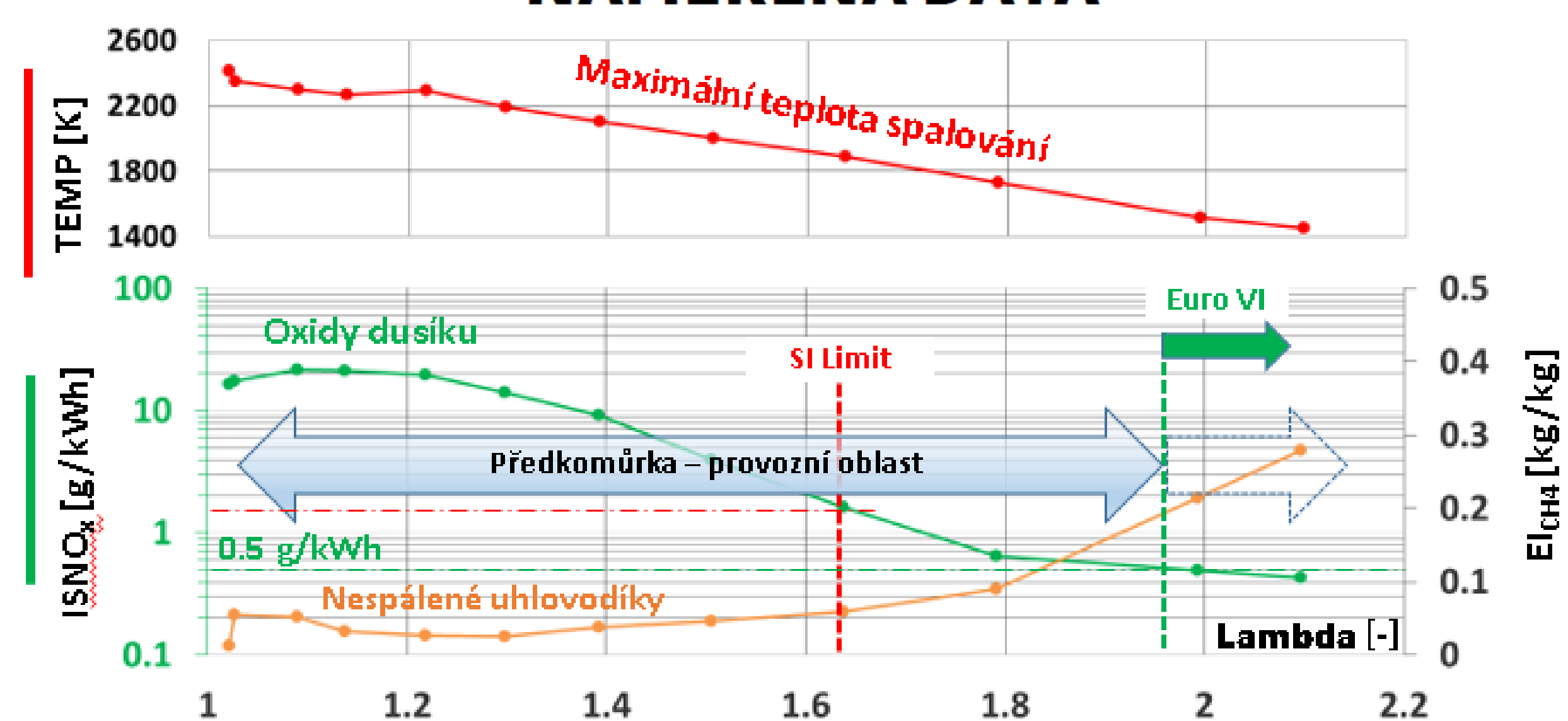


Schéma uspořádání plynového motoru G432

Instalace velké předkomůrky v motoru G432

Obr. 2. Zkušební motor – parametry, schéma uspořádání, úpravy.

NAMĚŘENÁ DATA



Obr. 3. Naměřená data na plynovém motoru G432 s vyplachovanou předkomůrkou.

SI Limit – limit zápalnosti směsi zážehového motor s konvenční zapalovací svíčkou.

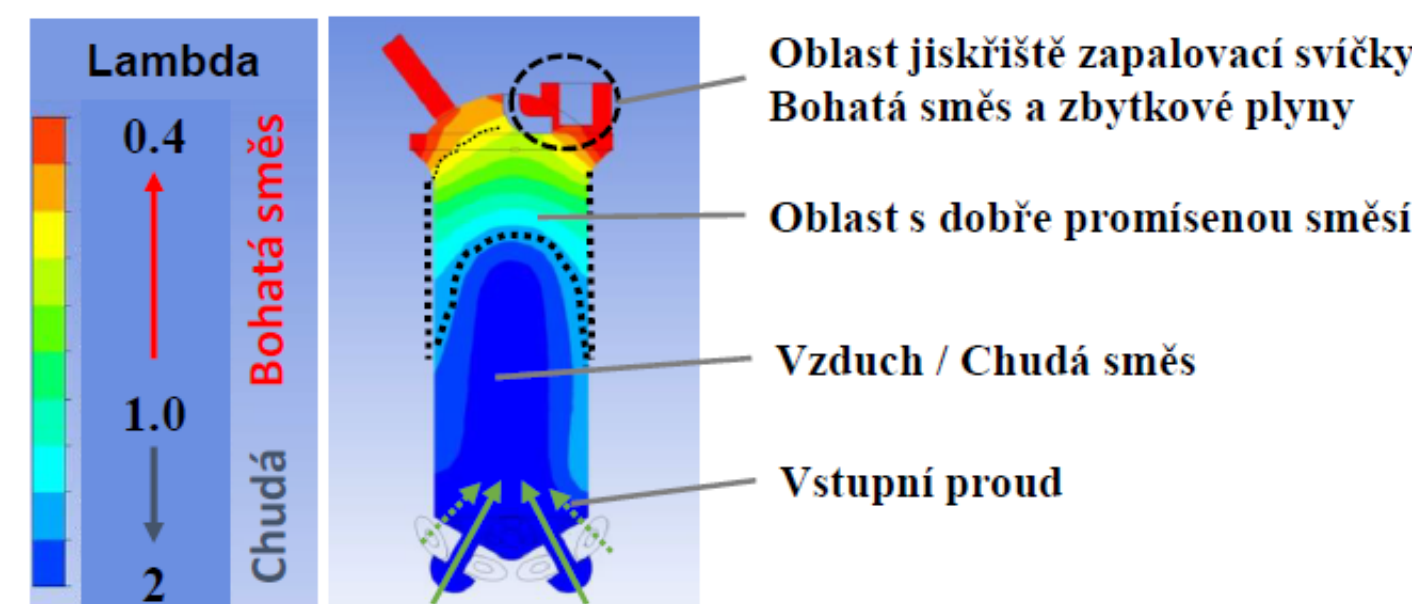
3-D CFD SIMULACE V PROGRAMU FLUENT

PŘEDKOMŮRKA SE SYMETRICKY USPOŘADANÝMI PROPOJOVACÍMI OTVÝRKY

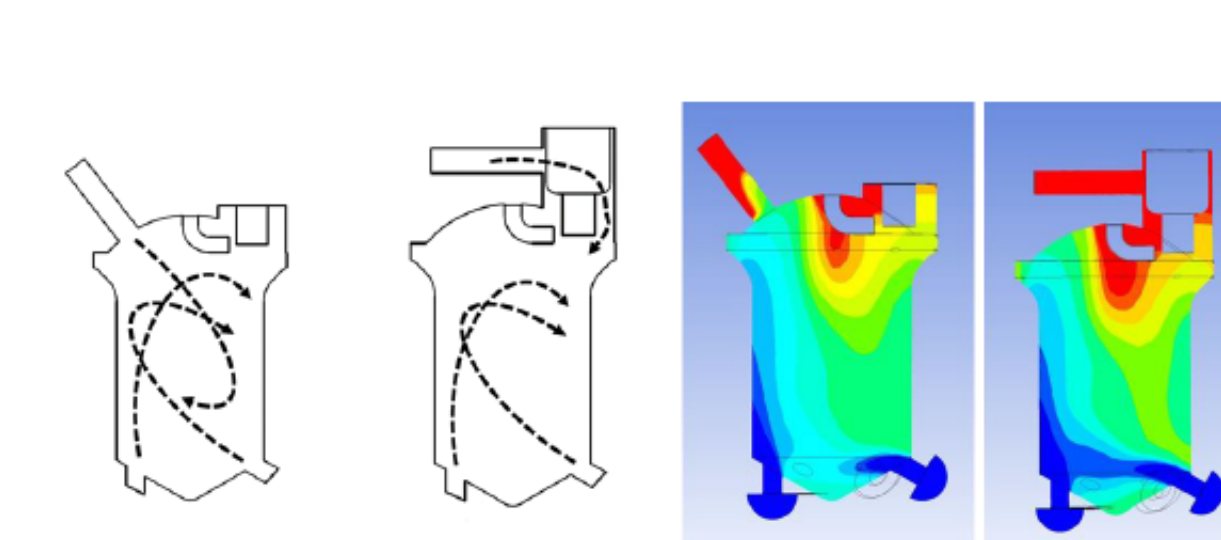
- VSTUPNÍ PROUD NEVYTVÁŘÍ VÍRIVÝ POHYB NÁPLNĚ
- VZNIK VÝRAZNĚ VRSTVENÉ SMĚSI
- BOHATÁ SMĚS V OKOLI JISKŘIŠTĚ

ZLEPŠENÍ HOMOGENITY NÁPLNĚ PŘEDKOMŮRKY POMOCÍ VYTVOŘENÍ PŘÍČNÉHO VÍRU

- CÍLENÉ OVLIVNĚNÍ ROZVRSTVENÍ SMĚSI
- STABILIZACE PROUDOVÉHO POLE
- MINIMALIZACE MEZI-OBĚHOVÉHO ROZPTÝLU
- ZLEPŠENÉ VYPLACHOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH PLYNŮ



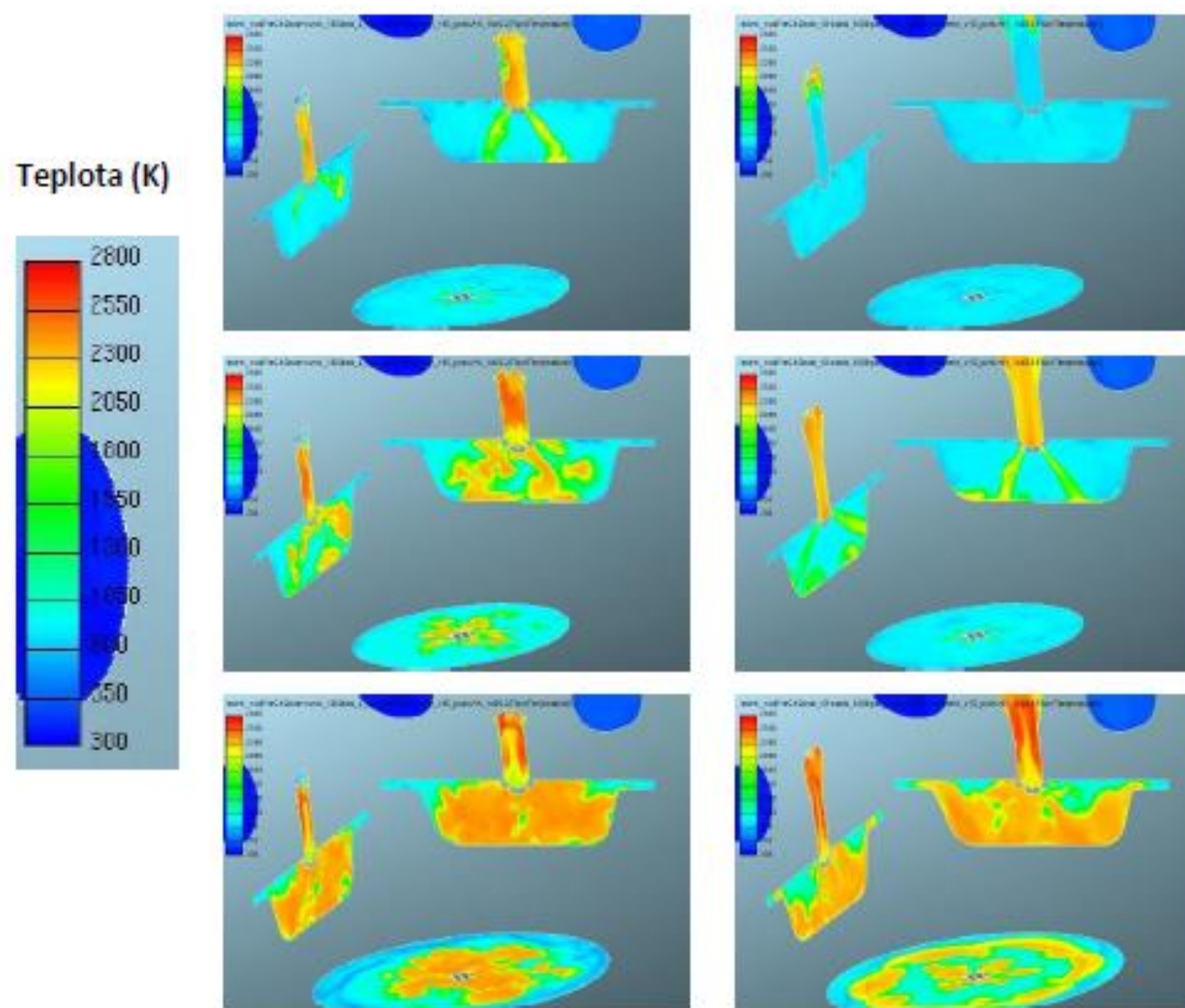
Rozložení směsi uvnitř předkomůrky



Nové návrhy geometrie vstupních otvorů

Obr. 4. Mechanismus tvorby směsi uvnitř předkomůrky

3-D CFD MODEL MOTORU V PROGRAMU AVL FIRE



Obr. 5. Teplota uvnitř spalovacího prostoru motoru. Porovnání malé vyplachované (vlevo) a velké vyplachované předkomůrky (vpravo).

Závěr

V rámci této disertační práce bylo navrženo a experimentálně otestováno několik funkčních vzorků zapalovacího systému s tzv. vyplachovanou předkomůrkou. Společně s tím tak vznikl poměrně rozsáhlý soubor naměřených dat, který dokládá funkci tohoto zapalovacího systému a dále slouží pro kalibraci numerických modelů. Porovnání parametrů předkomůrkového motoru s klasickým zážehovým motorem ukazuje, že pomocí předkomůrky lze dosáhnout výrazného rozšíření provozního rozsahu motoru ($\lambda \geq 2$ až 2.9) a navýšení rychlosti spalování. Při částečném zatížení motoru a extrémním zředění směsi ($\lambda > 2.1$) lze docílit snížení emise oxidů dusíku v surových spalinách pod hodnoty, které vyžaduje aktuální emisní legislativa a zároveň navýšit účinnost motoru. K navýšení účinnosti dochází v důsledku vyšší tepelné účinnosti motoru při nízkoteplotním spalování chudé směsi a dále pak díky omezení nutnosti škrcení a tím zmenšení pumpovních ztrát. Výsledky simulace emisního cyklu WHTC ukázaly, že při volbě vhodné strategie řízení, lze s předkomůrkovým motorem splnit současné emisní limity a zároveň dosáhnout 4.3% úspory paliva oproti klasickému zážehovému motoru. Pokud by navíc došlo k nasazení toho zapalovacího systému v kombinaci se spalováním paliv s příměsí vodíku, došlo by k dalšímu snížení celkové produkce oxidu uhličitého.

Aby bylo možné předkomůrkový systém detailně analyzovat vzniklo několik simulačních modelů. Prvním z modelů je model předkomůrkového motoru v programu GT-Power. Tyto simulace na základě 0-D/1-D přístupu umožňují stanovení fyzikálních veličin, které nelze získat přímým měřením v experimentu, a také slouží pro křížovou kontrolu experimentálních výsledků. S dostatečnou přesností lze také určit průměrnou hodnotu součinitele přebyteku vzduchu uvnitř předkomůrky, který má zásadní vliv na její funkci. V neposlední řadě pak lze výsledky těchto simulací využít pro definici okrajových podmínek 3-D CFD simulací a predikci celkových parametrů čtyřválcového přeplňovaného motoru.

3-D CFD simulace umožňují mnohem detailnější analýzu dějů uvnitř spalovacího motoru. Jedním z vytvořených modelů je model samotné předkomůrky v programu Fluent. Tento model se velmi osvědčil při optimalizaci geometrie předkomůrky a to díky jeho poměrně nízké výpočetní náročnosti. Dále umožňuje stanovit kvalitu vyplachování, prostorové rozložení směsi a přebyteku vzduchu uvnitř předkomůrky. Pro komplexní popis dějů, jak uvnitř předkomůrky, tak v hlavním spalovacím prostoru, a to včetně simulace spalování, byl sestaven 3-D CFD model celého motoru v programu AVL Fire.

Na základě experimentálních a simulačních výsledků vznikl nejen detailní popis funkce předkomůrkového zapalovacího systému, ale i řada doporučení pro jeho optimální návrh a strategii řízení pro dosažení co nejefektivnějšího provozu motoru. Dále byly podány dvě patentové přihlášky, které jsou v současné době ve schvalovacím řízení. První z nich se týká zlepšení promísení směsi uvnitř předkomůrky za pomoci příčného víru a tím cíleně vytvořeného pohybu náplně. Druhý patentem je použití vodíkem vyplachované předkomůrky pro zvýšení tepelné účinnosti spalovacího motoru a minimalizaci mezi-oběhové variability parametrů motoru.

Reference:

- Syrovátka, Z., Vitek, O., Vavra, J., and Takats, M., "Scavenged Pre-Chamber Volume Effect on Gas Engine Performance and Emissions," SAE Technical Paper 2019-01-0258, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0258>.
- Vavra, J., Syrovátka, Z., Vitek, O., Macek, J. et al., "Development of a Pre-Chamber Ignition System for Light Duty Truck Engine," SAE Technical Paper 2018-01-1147, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1147>.
- Syrovátka, Z., Takats, M., and Vavra, J., "Analysis of Scavenged Pre-Chamber for Light Duty Truck Gas Engine," SAE Technical Paper 2017-24-0095, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-24-0095>.
- Vavra, J.; Syrovátka, Z.; Takáts, M.; Barrientos, E., "Scavenged Pre-Chamber on a Gas Engine for Light Duty Truck". In: ASME 2016 Internal Combustion Engine Fall Technical Conference (ICEF2016). New York: American Society of Mechanical Engineers - ASME, 2016. ICEF2016-9423, pp. 1-11. ISBN 978-0-7918-5050-3.