

Dvoufázové proudění v pístovém vznětovém motoru

Ing. Martin Šimek, Prof. Ing. Pavel Šafařík, Ing. Marcel Diviš

1. Úvod

Na základě Eulerovy/Lagrangeovy metody byl vytvořen vícerozměrný matematický model pro předpověď pohybu paprsku ve válci spalovacího motoru. Jde o nestacionární případ, kdy je sledován vývoj paprsku v čase, a to v závislosti na úhlu vstřikování a na tvaru spalovacího prostoru. Model je doplněn o odpařování paprsku. Součástí příspěvku je ukázka modelu na praktickém problému – NADI (Narrow Angle Direct Injection). Řešení bylo provedeno pomocí programu FLUENT.

1.1 Předpoklady modelování dvoufázového proudění

Vlivem značných výtokových rychlostí, daných velkými tlakovými spády, se spojitý proud paliva vytékající z trysky rozrušuje vlivem tření o okolní plynné prostředí a dále rozpadá na kapky různé velikosti. Palivový paprsek tvořený kapkami rozptýlenými v okolní směsi plynů je médiem náhodné povahy jak pro polohu jednotlivých kapek tak i jejich velikost. Větší kapky pak podléhají dalšímu rozpadu vlivem aerodynamických sil. Palivo zároveň přejímá teplo od okolního plynu, ohřátého kompresí na vysokou teplotu, a intenzivně se odpařuje. Průběh těchto procesů je silně závislý na výtokové rychlosti z trysky, stavu proudového pole ve válci a dále na termofyzikálních vlastnostech paliva a okolní směsi plynů. Při podmínkách typických pro vznětové motory (vysoké výtokové rychlosti, velká hustota a teplota plynu) dochází k intenzivnímu, velmi jemnému rozpadu palivového paprsku téměř ihned za ústím otvorů trysky. Paprsek lze tedy s dostatečnou přesností nahradit dvoufázovým prouděním kapek v okolní směsi plynů, přičemž se předpokládá, že nedochází k jejich vzájemnému ovlivňování. Vzhledem ke značně rozdílným počátečním rychlostem a teplotám kapek a plynu je nutno respektovat oddělená proudová pole pro obě fáze oddělenými bilancemi zachovávaných veličin a současně uvažovat výměnu tepla, hybnosti a hmoty mezi bilancemi obou fází. Další náhodnost je způsobena prouděním plynu uvnitř paprsku, které má obvykle turbulentní charakter.

Numerické metody používané pro řešení mnohofázového proudění jsou rozděleny do dvou základních kategorií.

- Eulerova-Lagrangeova metoda, kde rovnice popisující proudění diskrétně rozptýlené kapalně fáze jsou formulovány v souřadnicích sledujících trajektorie jednotlivých kapek,
- Eulerova metoda, kde obě fáze jsou považovány za navzájem se prostupující kontinua.

Jednou z dalších možností je PDF metoda, která popisuje turbulentní paprsek spojením statistických vlastností kapek.

2. Eulerův-Lagrangeův (E-L) přístup

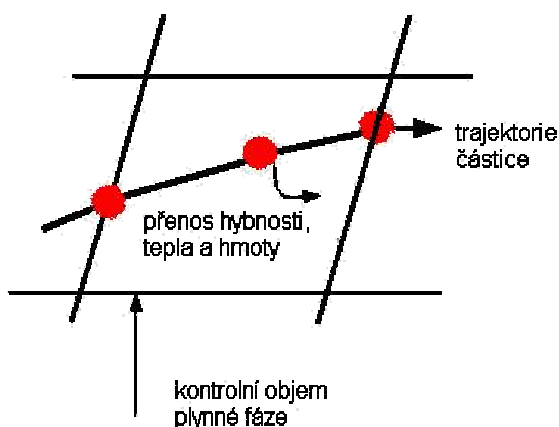
Pro modelování palivového paprsku je použit Lagrangeovský model diskrétně rozložené fáze. Palivový paprsek je nahrazen počtem jednotlivých kapek, jejichž chování je určeno prostřednictvím tzv. vzorové kapky. “Baliček” kapek je následně reprezentován jedinou trajektorií vzorové kapky, zastupující celkový hmotnostní tok v “baličku”. Pro spojení

s plynným prostředím hmotové, hybnostní a tepelné toky, odvozené od vzorové kapky, jsou vhodně násobeny (předpokládáme všechny kapky v balíčku rovny kapce vzorové), aby souhlasily s celkovou hmotností kapek v “balíčku”. Tok považujeme za zředěný, takže interakce mezi kapkami jsou zanedbány. Kapky jsou předpokládány za dostatečně rozptýlené při východu z trysky, což je dáno podmínkami, které jsou typické pro vznětové motory. Dále předpokládáme, že všechny kapky mají stejnou počáteční teplotu a projdou stěnou výpočetní oblasti, tzn. nedochází k žádné interakci (odrazu, ulpívání...).

Pro popis plynného prostředí jsou použity rovnice v Eulerovském tvaru. V našem případě je plynné prostředí reprezentováno třemi složkami, kterými jsou kyslík, dusík a

palivové páry produkované při vypařování kapek z tekutého proudu paprsku. Míšení mezi kapkami a plynem pak vede ke speciálním zdrojovým členům, zahrnující přenos hybnosti, tepla a hmoty mezi fázemi. Vliv kapek na plynné turbulentní prostředí není vzat v úvahu.

Kvůli vypařování paliva z kapek je nutné zohlednit vedle rovnic kontinuity i rovnice pro jednotlivé složky. Dále je plynné prostředí popsáno rovnicí pro zachování hybnosti a rovnicí pro zachování energie.



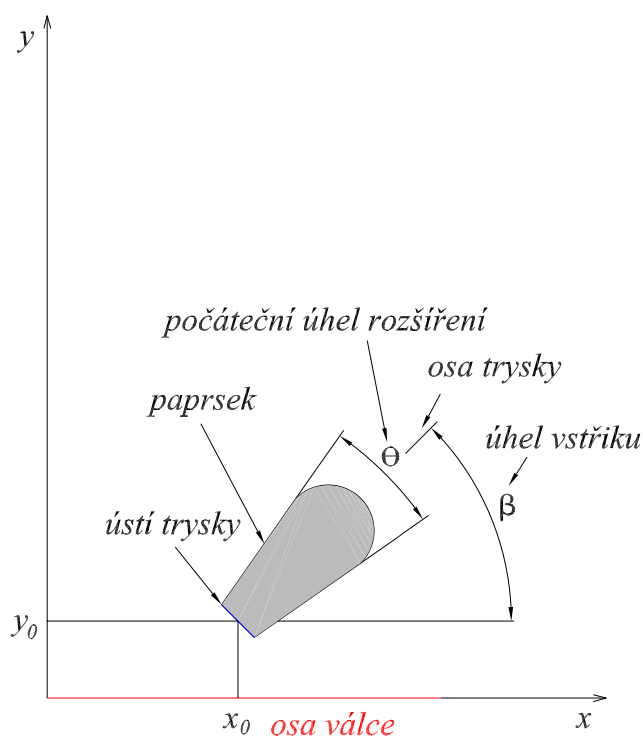
Obr. 2.1. Přenos mezi plynnou a kapalnou fází

3. Modelování palivového paprsku

Pro začlenění paprsku do výpočetní oblasti, potřebujeme definovat počáteční pozici, rychlost, velikost a teplotu kapek.

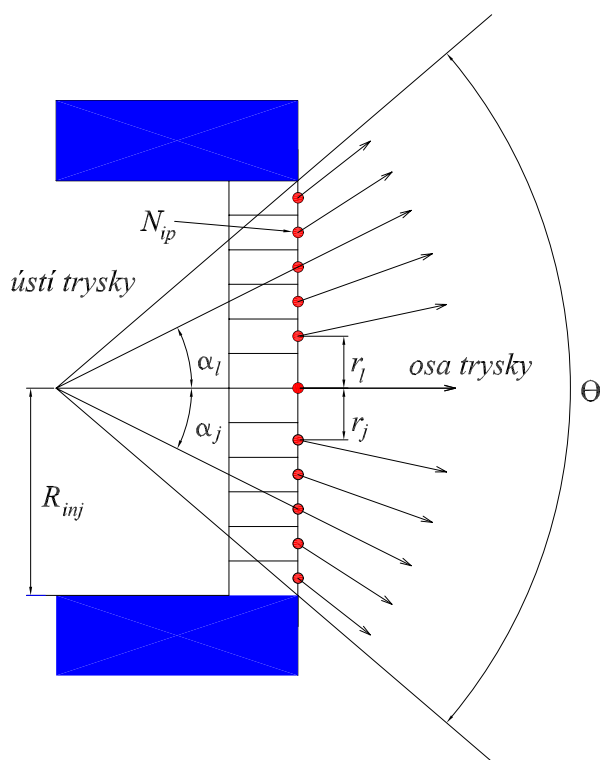
Proud vytvořený palivovým paprskem vstříknutým do spalovacího prostoru je považován za symetrický podél osy válce. Proto je použita osová symetrie kolem osy x . Důvodem je výpočetní čas.

Jak již bylo předesláno, vývoj paprsku je určen analýzou chování jednotlivých “balíčků” kapek, kde každý “balíček” reprezentuje část z celkového hmotnostního toku. Správná definice počátečních podmínek těchto kapek je tudíž nezbytná pro správnou distribuci hmoty palivového paprsku.



Obr. 3.1. Schéma modelu

3.1 Rozdělení počátečních rychlostí, poloh a hmotnostních toků pro jednotlivé vstřikovací body



Obr. 3.2. Schéma vstřikovacího otvoru

Celkový hmotnostní tok je vypočítán ze vztahu:

$$\dot{m}_p = l \frac{\pi d^4}{4} w \rho_p K, \quad (3.1)$$

kde koeficient l značí celkový počet otvorů v trysce, d je průměr jednoho otvoru, ρ_p je hustota paliva a w je rychlost výtoku z trysky, kterou můžeme vyjádřit z Bernoulliovy rovnice. V uvedeném modelu je použita rotační symetrie kolem osy válce motoru, ve skutečnosti je však palivo do válce vstřikováno otvůrkami rozloženými po obvodu vstřikovače. Rozložení paliva v tangenciálním směru není proto rovnoměrné jako v našem matematickém modelu. Pro přiblížení vypočtených koncentrací kapek s koncentracemi v osovém řezu

skutečných palivových paprsků je použit empirický koeficient K , který byl volen na základě zkušeností $K=3$. Pro náš případ bylo voleno 19 vstřikovacích bodů ($N_{ip} = 19$), ze kterých byly vypouštěny vzorové kapky, pro které je nezbytné definovat počáteční polohy, rychlosti a hmotnostní toky. Počáteční rozdělení rychlostí kapek opouštějících otvor trysky je definováno na základě úhlu Θ (úhel udávající počáteční úhel palivového paprsku), viz. obr. 3.2. Počáteční rychlost v jednotlivých vstřikovacích bodech vypočteme z předpokladu turbulentního rychlostního profilu uvnitř vstřikovacího otvoru:

$$u_k = u_{\max} \left(1 - \frac{r_k}{R_{inj}}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3.2)$$

kde hodnotu $u_{\max}$ vypočteme pomocí vztahu:

$$\frac{w}{u_{\max}} = 0,817. \quad (3.3)$$

Dále je nezbytné dopočítat složky rychlostí do směru x a y v jednotlivých vstřikovacích bodech. Proto je nezbytné dopočítat úhly α_k , aby bylo zachováno původní rozšiřování paprsku, které je nezbytné pro E-L model. Tyto úhly určíme ze vztahu:

$$\frac{\tan \alpha_k}{\tan \Theta} = \frac{r_k}{R_{inj}} \quad (3.4)$$

Pro použití této metody potřebujeme znát hodnotu úhlu Θ . Tento úhel lze dopočítat použitím empirické formule, viz. [4]:

$$\operatorname{tg} \frac{\Theta}{2} = \frac{4\pi}{C_A} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_g}} \frac{\sqrt{3}}{6}, \quad (3.5)$$

kde C_A je závislý na geometrii trysky.

Nyní lze dopočítat složky rychlostí v jednotlivých vstřikovacích bodech N_{ip} . Zde je na místě připomenout si rozmístění jednotlivých vstřikovacích bodů. To je patrné z obr. 3.2.

Pro výpočet jednotlivých poloh vstřikovacích bodů byly sestaveny vztahy:

$$x_j = x_0 + r_j \sin(\beta) \quad (3.6)$$

$$y_j = y_0 - r_j \cos(\beta) \quad (3.7)$$

$$x_l = x_0 - r_l \sin(\beta) \quad (3.8)$$

$$y_l = y_0 + r_l \cos(\beta) \quad (3.9)$$

Pro výpočet složek rychlostí byly sestaveny vztahy:

$$u_{xj} = u_j \cos(\beta - \alpha_j) \quad (3.10)$$

$$u_{yj} = u_j \sin(\beta - \alpha_j) \quad (3.11)$$

$$u_{xl} = u_l \cos(\beta + \alpha_l) \quad (3.12)$$

$$u_{yl} = u_l \sin(\beta + \alpha_l) \quad (3.14)$$

Nyní nám chybí určit hmotnostní toky pro jednotlivé vstřikovací body. Ty vypočteme z následujících vztahů:

$$\dot{m}_j = \dot{m}_l = \frac{1}{2} A_k K l u_k \rho_p, \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_o = A_k K l u_k \rho_p, \quad (3.16)$$

kde plocha A_k je předpokládána stejná ve všech vstřikovacích bodech a je vypočtena následovně ze vztahu:

$$A_k = \frac{1}{N_{ip}} \frac{1}{\cos \beta} \pi \left[(y_0 + R_{inj} \cos \beta)^2 - (y_0 - R_{inj} \cos \beta)^2 \right]. \quad (3.17)$$

3.2 Počáteční distribuce průměrů kapek

Modelování rozpadu paprsku, tzv. *rozprašování*, se matematicky popisuje pomocí dvou základních přístupů. Prvním z nich je použití tzv. “breakup” modelů, které popisují rozpad palivových kapek během jejich pohybu v plynném prostředí po opuštění výstřikových otvorů trysky.

Druhou možností představuje použití distribučních charakteristik rozprašování paliva. Jedná se o křivky popisující poměrné zastoupení kapek určitého průměru vůči celkovému

počtu kapek produkovaných tryskou, přičemž se předpokládá, že tato ihned po výtoku paliva z trysky vzniklá směs kapek je konečným produktem rozprašování (kapky nepodléhají dalšímu rozpadu). Vzhledem k již zmíněnému intenzivnímu rozpadu palivového paprsku u vznětových motorů, byla akceptována tato druhá možnost.

Počáteční distribuce průměrů kapek byla předpokládána z funkce navržené Rosin a Rammlerem, definované jako:

$$1 - \nu = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^\delta} \quad (3.18)$$

$1 - \nu$ je objem z materiálu kapek působící v kapkách o průměru větším než d , $\bar{d}$ značí velikostní parametr, a δ je distribuční parametr (Spread parametr). Parametr $\bar{d}$ byl vyjádřen ze středního Sauterova průměru (SMD) d_{32} použitím vztahu:

$$\frac{\bar{d}}{d_{32}} = \Gamma\left(1 - \frac{1}{\delta}\right), \quad (3.19)$$

kde gama funkce je definována jako:

$$\Gamma(C) = \int_0^\infty x^{C-1} e^{-x} dx. \quad (3.20)$$

Přes numerickou integraci gama funkce byl získán následující vztah pro výpočet velikosti parametru Rosinovy/Rammlerovy distribuční funkce ze středního Sauterova průměru viz. [2]:

$$\frac{\bar{d}}{d_{32}} = 1,489. \quad (3.21)$$

Uvedená hodnota je pro náš případ, kdy $\delta = 2,5$.

Pro náš model byly voleny následující hodnoty:

<i>minimální průměr:</i>	$5 \cdot 10^{-6}$ mm
<i>maximální průměr:</i>	$5 \cdot 10^{-5}$ mm
<i>SMD:</i>	$2,8 \cdot 10^{-5}$ mm
<i>spread parametr:</i>	2,5

Počáteční teplota kapek v paprsku se předpokládá konstantní a rovná se teplotě kapaliny ústící do otvůrků trysky.

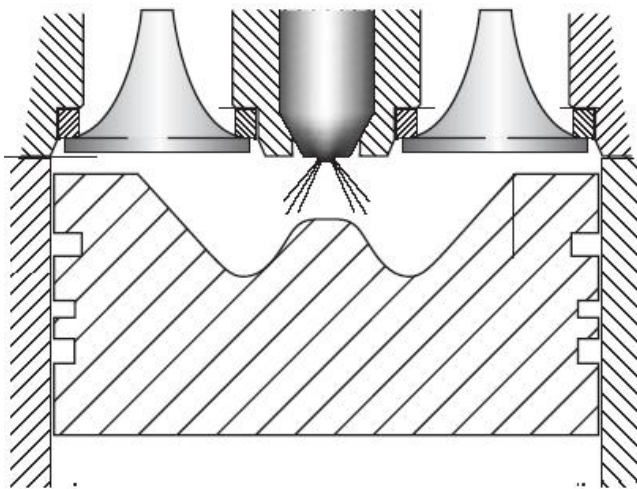
4. Aplikace modelu v případě NADI

Nové spalovací procesy HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) jsou vyšetřovány pro jejich potenciál dosáhnout dokonalých promísení částic paliva a vzduchu a téměř minimální emise dusíku. IFP (Institut Francais du Pétrole) vyvinulo spalovací systém,

který je schopen dosáhnout výše uvedené předpoklady a zároveň zachovat podobné standardy Diesellova motoru. Tento “duální mód” motoru aplikace nazvané NADI vyžaduje HCCI k dosažení předeslaných požadavků.

Principy HCCI spalování jsou následující:

- příprava vysoce zředěné směsi palivo/vzduch,
- podpora současného zapalování v spalovacím prostoru,
- kontrola tepla uvolněného



Obr. 4.1. Schéma NADI [1]

při spalování k dosažení nejlepšího kompromisu mezi výkonností a emisemi.

Hlavní architektura motoru je podobná tradičnímu Diesellovému motoru s následujícími rozdíly:

- úzký úhel kužele paprsku,
- specifický design spalovacího prostoru ve dně pístu pro efektivní vedení paliva,
- redukovaný kompresní poměr oproti obvyklým vznětovým motorům,
- vícenásobné vstříkávání (Common Rail vstříkovací systém)

4.1. Určení vztahů pro určení počátečních a okrajových podmínek modelovaného NADI

Výpočet rozměrů výpočetní oblasti:

Tvar výpočetní oblasti byl převzat z literatury [1]. Bylo potřeba dopočítat výšku nad pístem, kdy se píst nachází v horní úvratí a hodnotu, která zanáčí výšku nad pístem při natočení úhlu kliky 50° před horní úvratí. Podrobný výpočet je uveden v literatuře [3].

Výpočet počátečního tlaku a teploty:

Pro výpočet počátečního tlaku a teploty vyjdeme ze vztahů známých pro polytropickou změnu:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1-n} \quad (4.1)$$

Z dopočítaných objemů jsme schopni poté dopočítat počáteční hodnoty tlaku a teploty.

Výpočet průměrů otvorů trysky:

Pro určení průměru trysky vyjdeme ze vztahu pro objemový tok $\dot{V}_p$:

$$\dot{V}_p = lAw, \quad (4.2)$$

kde A je průřez otvoru trysky, w je střední rychlost proudu vytékajícího z trysky a l značí celkový počet otvorů v trysce (pro náš případ bylo uvažováno 7 otvorů).

Po úpravě dostaneme výsledný vztah pro průměr trysky:

$$d = \sqrt{\frac{4\dot{V}_p}{l\pi\mu\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_p}}}}. \quad (4.3)$$

Výpočet doby vstřiku:

Pro výpočet doby vstřiku vyjdeme ze vztahu pro výpočet součinitele přebytku vzduchu λ definovaného vztahem:

$$\lambda = \frac{m_g}{L_t m_p}, \quad (4.4)$$

kde L_t je stechiometrický hmotnostní směšovací poměr. Nejdříve vypočteme hmotnost plynu m_g ze vztahu:

$$m_g = \frac{60\dot{m}_g 2}{n}, \quad (4.5)$$

potom vyjádříme hmotnost paliva m_p :

$$m_p = \frac{60\dot{m}_g 2}{\lambda L_t n}. \quad (4.6)$$

Vzhledem k tomu, že v našem případě známe objemový tok paliva $\dot{V}_p$, můžeme dopočítat námi hledanou dobu vstřiku dle vztahů:

$$\dot{V}_p \rho_p = \dot{m}_p = \frac{m_p}{t} \rightarrow t = \frac{m_p}{\dot{V}_p \rho_p} = \frac{60\dot{m}_g 2}{\dot{V}_p \rho_p \lambda L_t n}.$$

4.2. Výsledky E-L modelu případu NADI

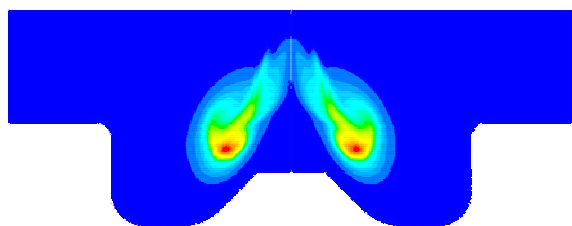
Hodnoty převzaté z literatury [1]:

Hustota paliva:	$\rho_p = 960 \cdot \text{kgm}^{-3}$
Objemový tok paliva:	$\dot{V}_p = 1370 \cdot \text{ml} / \text{min}$
Otáčky motoru:	$n = 1580 \cdot 1 / \text{min}$
Součinitel přebytku vzduchu:	$\lambda = 1,25$
Tlakový spád na trysce:	$\Delta p = 140 \cdot \text{MPa}$

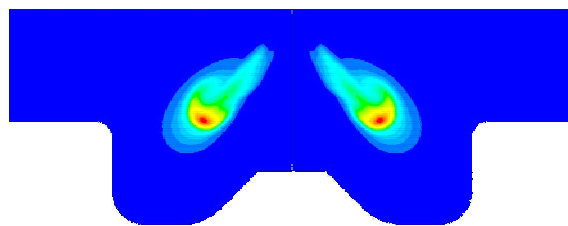
Hmotnostní tok vzduchu: $\dot{m}_g = 35,6 \cdot \text{kg} / \text{h}$
Hmotnost paliva v jednom cyklu: $m_p = 41,4 \cdot \text{mg}$
Kompresní poměr: $\varepsilon = 14$
Teplota: $T_1 = 333 \cdot \text{K}$
Tlak: $p_1 = 133,6 \cdot \text{kPa}$

Vývoj paprsku v čase (hmotnostní podíl paliva $C_{19}H_{30}$):

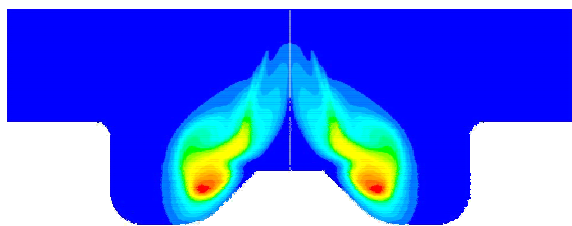
Z následujících obrázků je patrné, že dominantní vliv na tvaru a rozložení paprsku má velký vliv úhel vstřiku β a tvar spalovací komory, kterou paprsek vyplňuje.



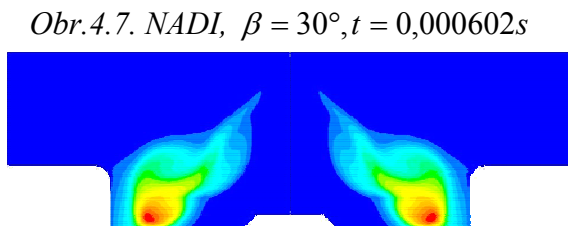
Obr.4.1. NADI, $\beta = 30^\circ, t = 0,000241s$



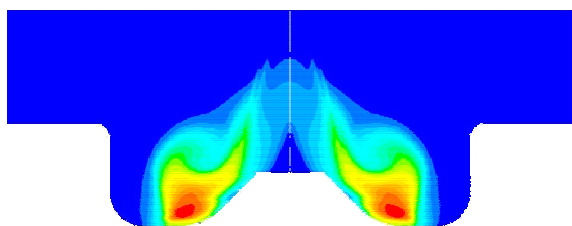
Obr.4.2. NADI, $\beta = 45^\circ, t = 0,000241s$



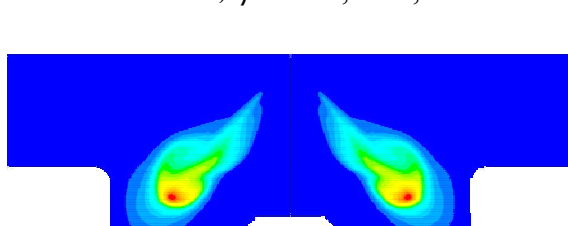
Obr.4.3. NADI, $\beta = 30^\circ, t = 0,000361s$



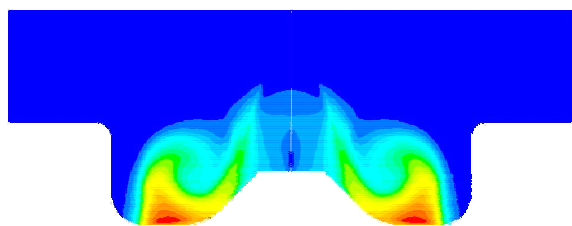
Obr.4.7. NADI, $\beta = 30^\circ, t = 0,000602s$



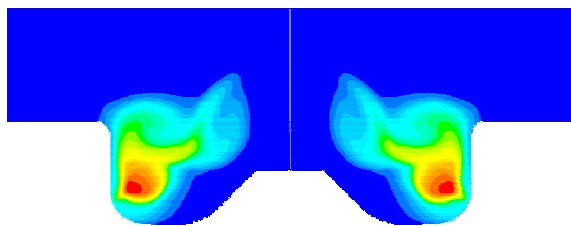
Obr.4.5. NADI, $\beta = 30^\circ, t = 0,000482s$



Obr.4.4. NADI, $\beta = 45^\circ, t = 0,000361s$



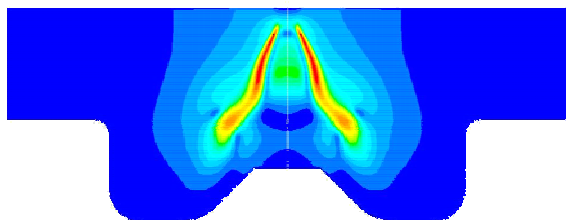
Obr.4.6. NADI, $\beta = 45^\circ, t = 0,000482s$



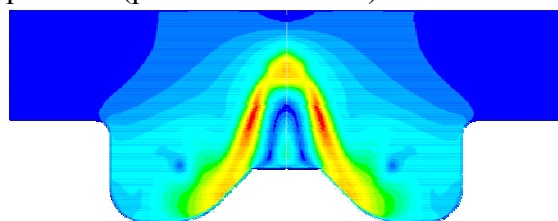
Obr.4.8. NADI, $\beta = 45^\circ$, $t = 0,000602s$

Vývoj proudových polí v blízkosti paprsku v závislosti na úhlu vstřiku:

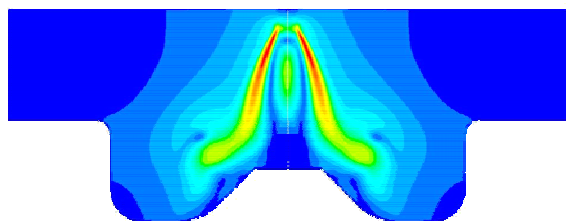
Významným vlivem NADI je přisávání paprsku k ose válce. To je typické pro paprsky ve tvaru dutého kuželu, kdy dochází k přisávání paprsku k ose kuželu vlivem vírové struktury vznikající podél osy válce. Na základě těchto výsledků se dá usoudit, že úhel vstřiku β by se měl pohybovat právě mezi námi volenými úhly, tedy v rozmezí $\beta \in \langle 30^\circ, 45^\circ \rangle$. Tímto dojde k nasměrování paprsku právě do oblasti spalovacího prostoru (pro naše nastavení).



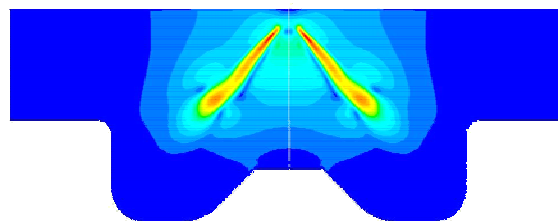
Obr.4.9. NADI, $\beta = 30^\circ$, $t = 0,000241s$



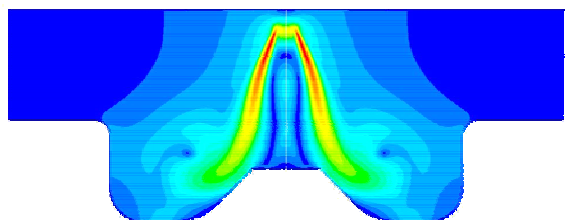
Obr.4.15. NADI, $\beta = 30^\circ$, $t = 0,000602s$



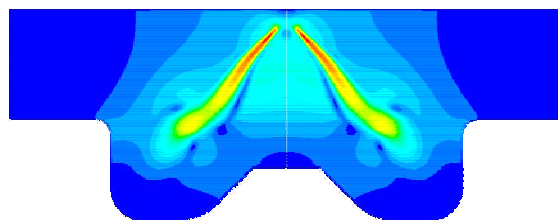
Obr.4.11. NADI, $\beta = 30^\circ$, $t = 0,000361s$



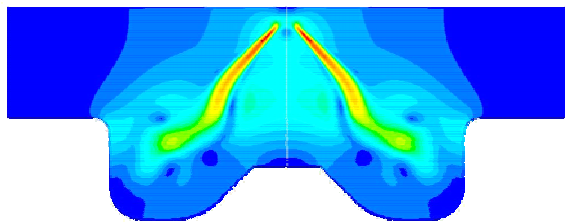
Obr.4.10. NADI, $\beta = 45^\circ$, $t = 0,000241s$



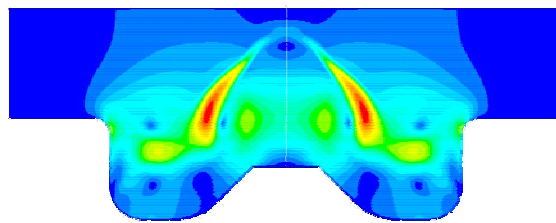
Obr.4.13. NADI, $\beta = 30^\circ$, $t = 0,000482s$



Obr.4.12. NADI, $\beta = 45^\circ$, $t = 0,000361s$



Obr.4.14. NADI, $\beta = 45^\circ$, $t = 0,000482s$



Obr.4.16. NADI, $\beta = 45^\circ$, $t = 0,000602s$

5. Závěr

Příspěvek ve své počáteční fázi pojednává o problému dvoufázového proudění v pístovém vznětovém motoru. Na základě Eulerovy/Lagrangeovy metody byl vytvořen vícerozměrný matematický model, jehož řešení bylo provedeno pomocí programu FLUENT. Jedná se o nestacionární děj, který je doplněn o vypařování paprsku. Plynná fáze je popsána pomocí rovnic pro zachování hybnosti, zachování energie a rovnice kontinuity. Kapalná fáze je nahrazena počtem “balíčků” kapek, jejichž chování je určeno prostřednictvím tzv. vzorové kapky. Tento “balíček” kapek je následně reprezentován jedinou trajektorií vzorové kapky, zastupující celkový hmotnostní tok. V našem případě působila na kapku pouze odporová síla. Základ modelu je postaven na symetrii podél osy válce. Dále jsou uvedeny vztahy pro výpočet počátečních podmínek paprsku, tzn. polohu jednotlivých vstřikovacích bodů, v nichž jsou definovány počáteční složky rychlostí a počáteční hmotnostní toky. Takto vytvořený model byl aplikován na případ NADI. Zde byla vytvořena tvarovaná výpočetní oblast respektující reálnou geometrii spalovacího prostoru a paprsek byl vstřikován do výpočetní oblasti pod dvěma úhly β : $\beta = 30^\circ$ a $\beta = 45^\circ$. Z výsledků je patrné, že paprsek by měl být vstřikován někde mezi těmito dvěma úhly (pro naše nastavení).

Literatura

- [1] COLLIOU, T.; TILAGONE, R.; MARTIN, B. Adapting the NADI Concept to Heavy Duty Engines, IFP, 2006
- [2] DIVIŠ, M. Mathematical Modelling of Flashing Spray, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium, 2003
- [3] ŠIMEK, M. Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2006
- [4] Uživatelský manuál softwaeru FLUENT 6.1