

NÍZKOEMISNÍ PLYNOVÉ ZÁŽEHOVÉ MOTORY

Nejrozšířenějším plynným palivem jsou dnes tekuté rafinérské plyny (LPG), postupně se ale zvyšuje i počet vozidel, poháněných zemním plynem (NG, tvořeným z 96-98% metanem). Jako palivo budoucnosti ukazují odborné studie vodík: vodík jako “nosič” energie přitom patří do kategorie obnovitelných zdrojů a je proto logické, že ze strategického hlediska musí být dnes již na prvním místě jako perspektivní palivo pro pístové spalovací motory. Přímému spalování vodíku v pístových motorech sice konkurují palivové články, do vyřešení celé řady problémů u palivových článků zůstává pístový motor stále bezkonkurenční.

Pro použití plynných paliv v pístových spalovacích motorech je významná jejich schopnost snadno tvořit kvalitní směs vně i uvnitř válce motoru, dále široké rozmezí zápalnosti s ohledem na bohatost směsi, vysoká výhřevnost a většinou i vysoká antidetonační odolnost plynných paliv. Všechny zmíněné vlastnosti umožňují realizovat pracovní oběh motoru s relativně vysokým kompresním poměrem a tedy s předpokladem vysoké celkové účinnosti motoru.

Plynná uhlovodíková paliva mají proti klasickým kapalným palivům velmi dobré předpoklady k nižší produkci hygienicky nejrizikovějších výfukových škodlivin, u plynných uhlovodíkových paliv zejména velmi nízké emise pevných částic (PM) a polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH): jednodušší molekuly plynných uhlovodíkových paliv, nízký obsah síry a spalování prakticky homogenní (připravené) směsi jsou velkou předností plynných paliv při řešení ekologického (a účinného) spalování směsi ve válci motoru.

Významnou (ekologickou) vlastností plynných paliv (z uhlovodíkových plynů zejména v případě metanových paliv) proti klasickým kapalným uhlovodíkovým palivům je menší hmotnostní podíl uhlíku v 1 kg paliva, který vytváří předpoklady k poklesu produkce CO₂: tato vlastnost se projevuje vždy při náhradě benzínu plynným uhlovodíkovým palivem, v případě náhrady nafty plynným uhlovodíkovým palivem závisí pokles produkce CO₂ na celkové účinnosti plynového motoru (v porovnání s účinností původního naftového motoru) a na použitém plynném palivu. Při spalování vodíko-vzdušných směsí vzniká prakticky jediná škodlivina, NO_x.

Další výhodou plynných paliv před kapalnými palivy je dokonalá těsnost palivového systému, která minimalizuje úniky paliva do ovzduší při plnění nádrží, provedení palivového systému na plynná paliva rovněž zvyšuje odolnost proti požáru (např. při havárii motoru nebo vozidla).

Současné znalosti o průběhu spalování palivo-vzdušných směsí, o vzniku škodlivin při hoření těchto směsí a o technických opatřeních pro minimalizaci výfukových emisí vedou k řešení nízkoemisních motorů k typu zážehových motorů a určují dva možné koncepty nízkoemisních plynových zážehových motorů: rozhodnutí o volbě konceptu závisí na původním (tj. nahrazovaném) palivu, na provedení původního motoru i na použitém alternativním palivu.

A). Seřízení a provoz plynového motoru na směs stechiometrického složení, tj. se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 1$ ve všech provozních režimech. Regulaci bohatosti směsi ($\lambda = 1$) zajišťuje elektronický systém, velmi nízké výfukové emise jsou zabezpečeny třísložkovým katalyzátorem ve výfukovém systému motoru.

Pro tuto koncepci jsou velmi vhodným alternativním palivem LPG a NG, vodík je s ohledem na velmi nízkou aktivační energii pro současné motory této koncepce prakticky vyloučen. Alternativní paliva LPG a NG mohou velmi dobře nahradit benzin a lze je použít pro nepřepřlňované i přepřlňované motory. Palivový systém je zpravidla postaven pro vnější tvoření směsi s přívodem plynného (v případě LPG odpařeného) paliva do nasávaného (plnicího) vzduchu pomocí směšovače nebo vefukovače (injektoru). Nepřepřlňované plynové motory mají zpravidla proti původním benzinovým motorům sníženou velikost středního efektivního tlaku p_e pracovního oběhu. Poměrnou změnu hodnoty p_e v režimu 100% zatížení po konverzi benzinového motoru ($\lambda=1$) na plynné alternativní palivo ukazuje zjednodušený vztah (za předpokladu stejných hodnot plnicích účinností a celkových účinností obou motorů):

$$\frac{p_{e/GF}}{p_{e/PF}} = \frac{(A_{T/PF} \cdot r_{air} + r_{PF}) \cdot H_{L/GF} \cdot T_{BDC/PF}}{(A_{T/GF} \cdot r_{air} + r_{GF}) \cdot H_{L/PF} \cdot T_{BDC/GF}} .$$

Teoretická spotřeba vzduchu A_T pro jednotlivá paliva:

benzin: $A_{T/PF} = 14,6$ kg/kg zemní plyn: $A_{T/NG} = 16,9$ kg/kg LPG: $A_{T/LPG} = 15,6$ kg/kg

Plynová konstanta r pro vzduch: $r_{air} = 287$ J/kg K . Pro plynná paliva jsou plynové konstanty LPG: $r_{LPG} = 168$ J/kg K, zemního plynu: $r_{NG} = 520$ J/kg K a přehřáté páry benzinu: $r_{PF} = 76$ J/kg K.

Dolní výhřevnost paliva H_L jednotlivých paliv:

benzin: $H_{L/PF} = 43,5$ MJ/kg, LPG: $H_{L/LPG} = 46,1$ MJ/kg, zemní plyn: $H_{L/NG} = 49,1$ MJ/kg.

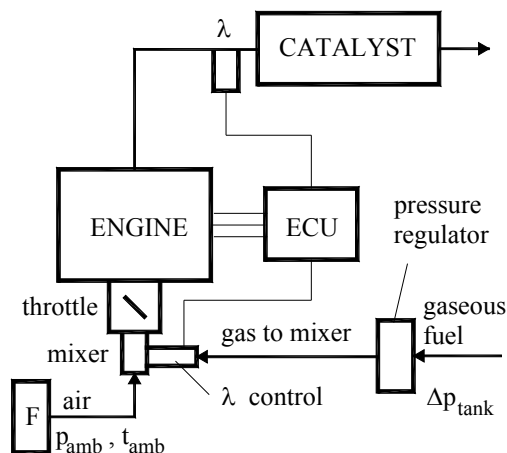
Teplota náplně válce na konci plnění T_{BDC} :

Teplota v benzinovém motoru $T_{BDC/PF}$ bude proti teplotě v plynových motorech $T_{BDC/GF}$ o (10-15)° C nižší v důsledku odpařování benzinu (odhad: $T_{BDC/PF} \approx 325$ K, $T_{BDC/GF} \approx 340$ K).

Výpočet s využitím uvedených hodnot dává poměrné snížení výkonu při náhradě benzinu

LPG : $\frac{p_{e/LPG}}{p_{e/PF}} = 0,930$, při náhradě benzinu zemním plynem (CNG) : $\frac{p_{e/NG}}{p_{e/PF}} = 0,855$.

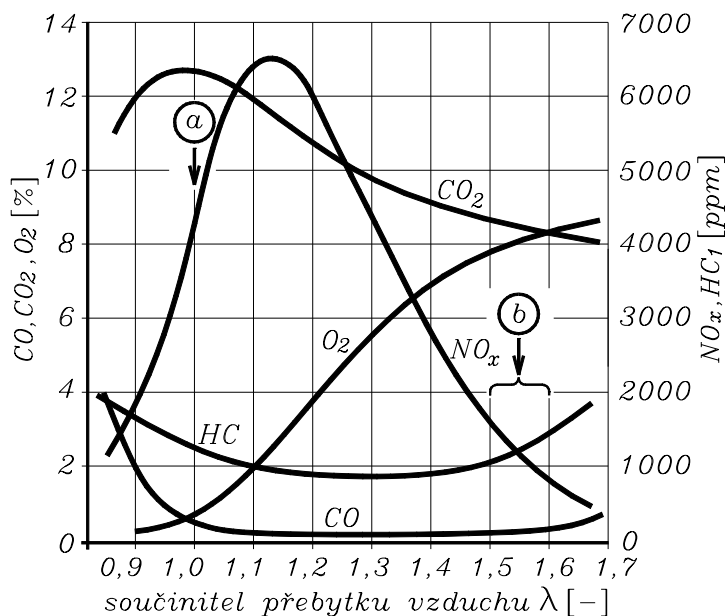
Strukturální schéma uspořádání plynového nízkoemisního motoru podle konceptu A ukazuje obr. 1.



Obr.1: Nepřepřehovaný plynový zážehový motor s tvořením směsi ve směšovači: nejrozšířenější řešení pro kategorii osobních automobilů. Moderní vozidlové plynové motory tohoto typu používají ke tvoření plyno-vzdušné směsi řízené vefukování plynu (jednobodové, zpravidla před škrticí klapkou, nebo vícebodové před sacími kanály v hlavě válců).

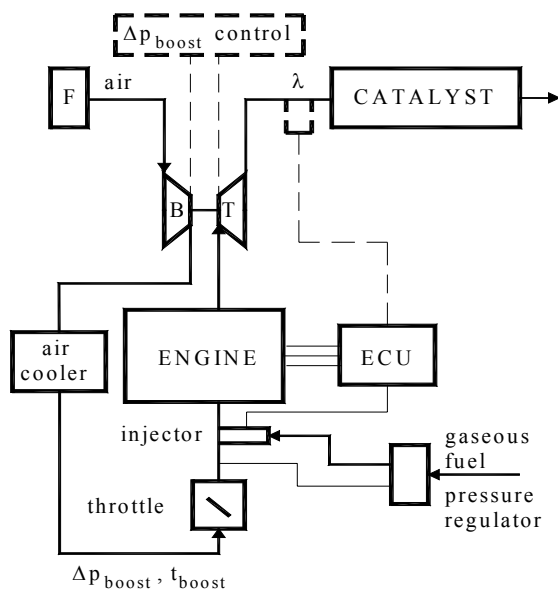
B). Seřizemím a provozem plynového motoru na chudou až velmi chudou směs s řízenou bohatostí směsi v závislosti na zatížení motoru: ve volnoběhu $\lambda=1,0$ až $1,15$, v režimech plného zatížení se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 1,45$ až $1,55$) [4]. Tato varianta plynového zážehového motoru je zpravidla použita při konverzi původně naftového motoru: pro dosažení potřebných výkonových parametrů jsou plynové motory této koncepce řešeny jako přepřehované. Pro snížení emisí HC a CO je ve výfukovém systému těchto motorů oxidační katalyzátor.

Koncentraci jednotlivých složek škodlivin ve výfukových plynech na výstupu z pístového spalovacího motoru při seřizemím podle A) nebo B) ukazuje obr.2.



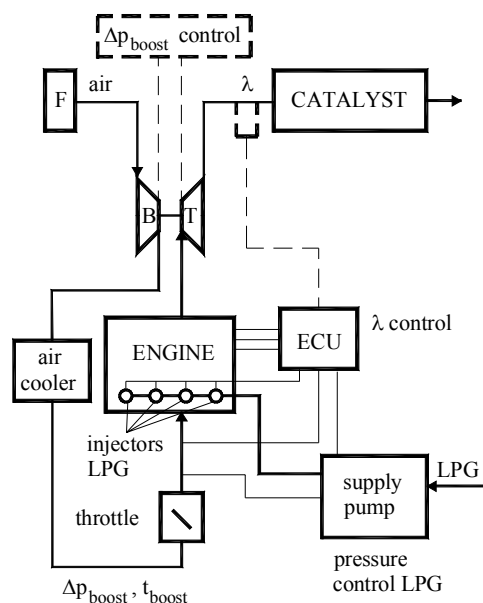
Obr.2: Závislost koncentrace vybraných složek výfukových plynů na bohatosti spalované směsi.

Strukturální schéma uspořádání plynového nízkoemisního přeplňovaného motoru podle konceptu B ukazuje obr. 3.



Obr.3: Přeplňovaný plynový zážehový motor s tvořením směsi pomocí vefukování plynu do plnicího systému motoru za škrticí klapkou: používá se rovněž přívod plynu do směšovače před škrticí klapkou nebo jednobodové vefukování před škrticí klapkou. Bohatost tvořené směsi je řízena elektronicky λ regulátorem podle naprogramované mapy v závislosti na tlaku vzduchu v plnicím potrubí a na otáčkách motoru (ve výfukovém potrubí motoru ale může být λ sonda pro elektronické řízení bohatosti směsi při volnoběhu motoru), nebo pneumaticko-mechanickým systémem na přívodu plynu do směšovače: regulace bohatosti směsi v závislosti na zatížení však zpravidla nemá zpětnou vazbu. Průběh momentové charakteristiky plynového přeplňovaného motoru v režimech 100% zatížení je řízen pomocí regulace plnicího tlaku (např. systémem waste-gate).

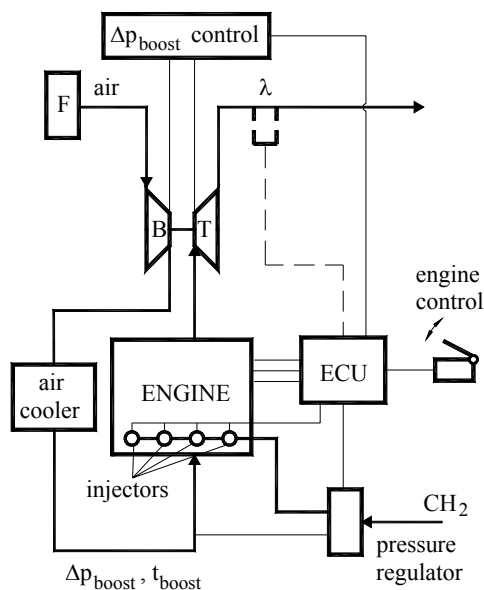
Vnější tvoření plyno-vzdušných směsí je u současných vozidlových plynových motorů nejrozšířenější způsob přípravy směsi. Pro některá alternativní paliva se ale ukazuje jako perspektivní cesta vnitřního tvoření směsi, vstřikováním zkapalněného plynu nebo vefukováním plyného paliva přímo do válce. Důvody pro tato řešení jsou jak technické, tak bezpečnostní. Na obr.4 je strukturální schéma plynového zážehového motoru na LPG s přímým vstřikem LPG do válců motoru: toto řešení by mělo odstranit problémy, vznikající při vstřikování kapalné fáze LPG do sacího potrubí v důsledku relativně velké spotřeby tepla při velmi intenzivním odpařování LPG v těsné blízkosti vstřikovače (zamrzání).



Obr.4: Přepřlňovaný plynový zážehový motor s tvořením směsi pomocí přímého vstřiku kapalné fáze LPG do válců motoru (studie). Palivové čerpadlo LPG zajišťuje tlakem 2 MPa kapalnou fázi LPG i při zvýšených teplotách ve vstřikovačích: výstupní tlak palivového čerpadla se mění v závislosti na tlaku plnicího vzduchu. Bohatost směsi je řízena elektronicky podle naprogramované mapy v závislosti na tlaku vzduchu v plnicím potrubí a na otáčkách motoru (podobně jako u plynového motoru s vnějším tvořením směsi). Plynový přepřlňovaný motor této koncepce vyžaduje rovněž regulaci průběhu točivého momentu v režimech 100% zatížení (v závislosti na otáčkách motoru).

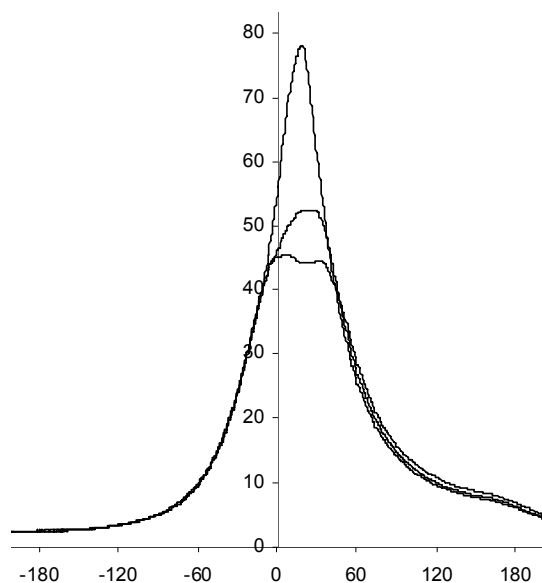
Plynové zážehové motory s vnějším i vnitřním tvořením směsi jsou řešeny pro spalování homogenních plyno-vzdušných směsí. K zabezpečení kvalitní homogenity vytvořené směsi je u plynových motorů s vnitřním tvořením směsi potřeba, aby časování vstřiku paliva do válce mělo konec dodávky nejpozději 20° před DÚ [1]: pokud není zážehový motor speciálními konstrukčními úpravami řešen pro spalování vrstvené směsi, zvýšená nehomogenita směsi způsobuje zvětšení emisí HC.

Jako jednoznačně perspektivní se ukazuje vnitřní tvoření směsi pro vodíkové palivo, i když z hlediska bezpečnosti může stejně dobře vyhovovat vnější tvoření směsi s řízeným (časovaným) vstřikem plyného vodíku do sacího potrubí těsně před sací kanál v hlavě válce: s ohledem na velmi nízkou aktivační energii vodíko-vzdušných směsí je však vstřikování plyného vodíku přímo do válce motoru zárukou vysoké provozní bezpečnosti vodíkového motoru. Strukturální schéma přepřlňovaného plynového motoru na vodíkové palivo je na obr.5.



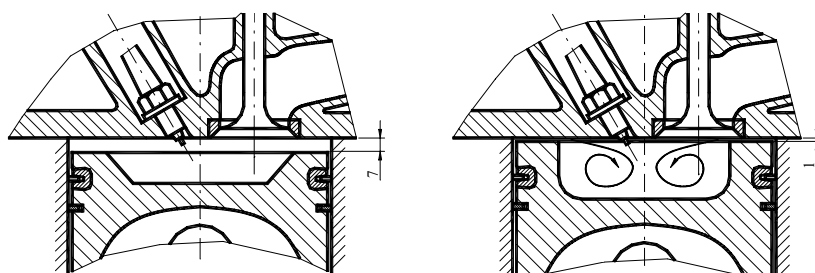
Obr.5: Přepíňaný plynový zážehový motor na vodíkové palivo s tvořením směsi pomocí přímého vstřiku plynného vodíku do válců motoru (studie). Vodíkový motor pracuje se spalováním extrémně chudých směsí: ve volnoběhu pracuje motor s ochuzením směsi až na hodnotu $\lambda \approx 3,0 - 3,5$ bez škrťací klapky v sacím, resp. plnicím traktu motoru, postupné zvyšování zatížení motoru do hodnoty středního indikovaného tlaku $p_i \approx 0,4 \div 0,5 \text{ MPa}$ se provádí pouze zvyšováním dávky paliva (při poklesu hodnoty součinitele přebytku vzduchu až na $\lambda \approx 2,2 \div 2,5 \text{ MPa}$) a další zvyšování hodnoty p_i je zajištěno současným zvyšováním tlaku plnicího vzduchu a dávky paliva (se spalováním velmi chudých směsí ($\lambda \approx 2,2 \div 2,5$)). Motor s vodíkovým palivem vykazuje i s extrémně chudou směsí (např. ve volnoběhu) pravidelný chod, nevýhodou spalování velmi chudých vodíko-vzdušných směsí je nutnost zajistit dostatečné (potřebné) výkonové parametry motoru přepíňáním. Vzhledem k relativně vysokému součiniteli přebytku vzduchu ve spalované vodíko-vzdušné směsi vychází potřebné tlaky plnicího vzduchu u vodíkového motoru pro srovnatelné výkonové parametry jako u dnešních nepřepíňaných zážehových motorů vysoké: k dosažení $p_i = 1,4 \text{ MPa}$ je potřebná hodnota $\Delta p_{boost} = 210 \text{ kPa}$. Produkce oxidů dusíku při spalování velmi chudých vodíko-vzdušných směsí je velmi nízká, koncentrace NO_x ve výfukových plynech se pohybuje nejvýše v desítkách ppm (do 50 ppm).

Spalovací proces plynových zážehových motorů na všechny druhy alternativních plyných paliv se vyznačuje stejnými vlastnostmi jako spalovací proces klasických benzinových motorů, tj. relativně vysokou variabilitou pracovních cyklů. Mezioběhová variabilita $\text{VAR}_{p_i} \cong 2$ až 2,5%, $\text{VAR}_{p_{\max}} \cong 8\%$: riziko zvýšené variability přitom mají plynové motory podle konceptu B), tj. plynové motory se spalováním chudých až velmi chudých směsí. Jako příklad lze uvést změřené průběhy tlaku ve válci zkušebního jednoválcového vodíkového motoru – viz obr.6 .



Obr.6: Průběh tlaku ve válci vodíkového pístového motoru při spalování extrémně chudé vodíko-vzdušné směsi (cykl s nejvyšší, střední a nejnižší hodnotou p_{\max} ze souboru 150 po sobě následujících cyklů. Provozní režim motoru: $n = 1500$ 1/min, $p_i = 1,237$ MPa, variabilita $VAR_{p_i} = 6,13\%$, $VAR_{p_{\max}} = 13,3\%$. Přepřehování $\Delta p = 180$ kPa, vefukování vodíku přímo do válce motoru v průběhu plnicího zdvihu, součinitel přebytku vzduchu $\lambda = 2,33$, předstih zážehu 5° před HÚ. Měřená koncentrace $NO_x = 28$ ppm.

K dosažení kvalitních energetických a emisních parametrů motorů se spalováním velmi chudých směsí je nutno použít vhodná konstrukční opatření, kterými se eliminují pomalý rozběh oxidačních reakcí, nízká rychlost hoření a z toho plynoucí nízká stabilita spalovacího procesu velmi chudých směsí ve válci motoru. Výsledky [3,4] prokazují významný vliv tvaru spalovacího prostoru na snížení parametrů variability pracovního oběhu (VAR_{p_i} , $VAR_{p_{\max}}$) a vedou k jednoznačnému doporučení na provedení spalovacího prostoru s vysokou intenzitou turbulence: příklad vhodné změny tvaru spalovacího prostoru k dosažení vysoké turbulence směsi pro zlepšení stability spalovacího procesu ukazuje obr.7.

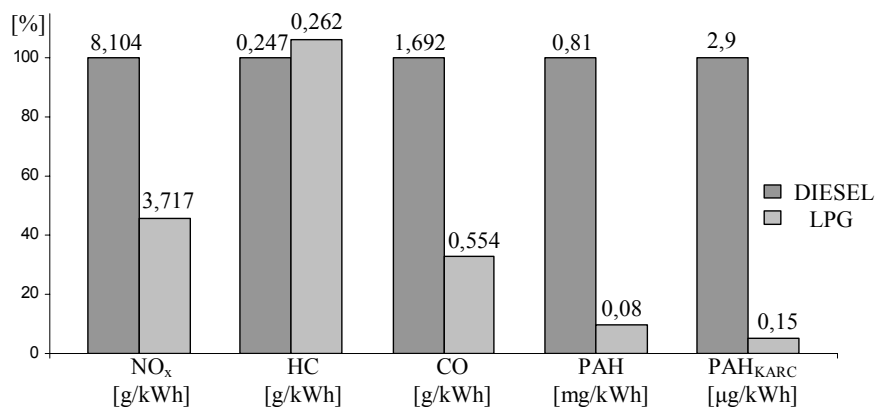


Obr.7: Spalovací prostor **a)** (vlevo, $\varepsilon = 10,2$) s nízkou turbulencí a s vysokou turbulencí **b)** (vpravo, $\varepsilon = 11,8$) přeplňovaného plynového zážehového motoru na NG: v obou případech je zakreslena situace v horní úvratí. Nové řešení tvaru spalovacího prostoru významně snižuje riziko detonací a umožnilo zvýšit kompresní poměr motoru.

Turbulentní pohyb směsi ve spalovacím prostoru zrychluje průběh jejího hoření a má pozitivní vliv na snížení VAR_{p_i} a $VAR_{p_{\max}}$. Zásadní vliv na stabilitu spalovacího procesu ve

válci zážehového motoru ale mají podmínky pro rozběh oxidačních reakcí v ohnisku zážehu, tj. v nejbližším okolí vysokonapětového výboje na zapalovací svíčke a zapalovací energie vysokonapětového výboje. Přepřehované plynové motory na velmi chudou směs používají zapalovací systémy se zvýšenou energií ve vysokonapětovém výboji (40 až 120 mJ proti 10 mJ u klasických benzinových motorů): plynové motory s takovým zapalováním pracují spolehlivě, přesto je rozvoj ohniska zážehu v jednotlivých pracovních cyklech dosti rozdílný. Zkušenosti se zapalováním velmi chudých směsí ve válci velkých plynových motorů pomocí zapálení malého objemu připravené směsi v zapalovací komůrce s následným výtokem hořící směsi do hlavního spalovacího prostoru ve válci ukazují, že zážeh směsi v zapalovací komůrce se vyznačuje relativně vysokou stabilitou: výtok hořící směsi z komůrky do hlavního spalovacího prostoru zajistí vznik většího počtu sekundárních ohnisk zážehu, vede k celkovému zkrácení doby hoření směsi ve válci motoru a významně sníží VAR_{pi} a VAR_{pmax} . Jednou z technických možností ke zlepšení podmínek pro rozvoj hoření v počáteční fázi spalovacího procesu je proto konstrukční úprava hlavy válce s vytvořením komůrky malého objemu ($\approx 3-5\%$ kompresního prostoru) kolem zapalovací svíčky, spojené se spalovacím prostorem určitým počtem vhodně nasměrovaných otvorů, nebo vhodně upravená zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou. Oddělený prostor kolem elektrod zapalovací svíčky zlepšuje podmínky pro rozvoj ohniska zážehu tím, že zabrání zředování produktů předoxidačních reakcí v tvořícím se ohnisku hoření: pozitivní efekt takovéto úpravy dokládá vlastní experimentální výzkum a vývoj komůrkového zážehu na KSD, realizovaný na benzinových motorech (stechiometrická směs) i plynových motorech (velmi chudá směs).

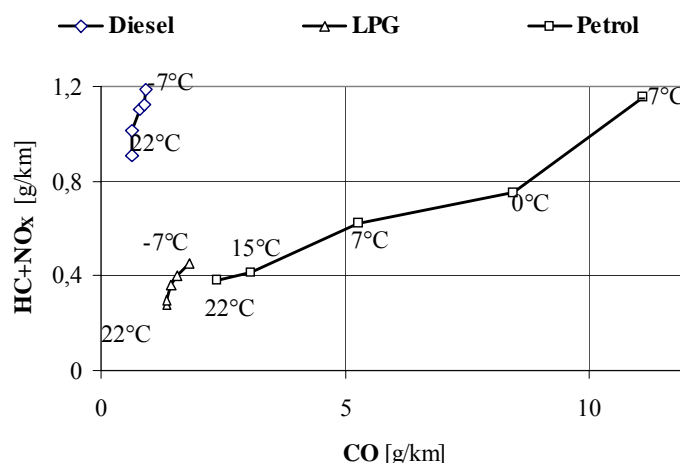
Ekologické výhody plyných paliv proti klasickým kapalným palivům byly prokázány podrobným výzkumem na několika nezávislých výzkumných institucích a výsledky byly prezentovány ve větším počtu publikací. Při použití alternativních paliv náhradou za původní benzinové palivo u moderních vozidlových benzinových motorů s 3w katalyzátorem ve výfukovém systému jsou emise regulovaných a zejména neregulovaných výfukových škodlivin nižší než při provozu motoru na benzin. Nahrazením nafty alternativním plyným palivem se 10x sníží emise hygienicky nejrizikovějších složek emisí ve výfukových plynech proti stavu u původního naftového motoru: názorně to ukazuje výsledek měření na autobusovém motoru po jeho konverzi z naftového provedení na plynový přepřehovaný motor na LPG se spalováním velmi chudých směsí – viz sloupcový diagram na obr.8.



Obr.8: Porovnání výsledků měření standardních plyných škodlivin ve výfukových plynech původních autobusových naftových motorů a jeho plynové verze (výzkum a vývoj plynového motoru na KSD) v emisním testu EHK 49 (NO_x, HC and CO) a emisí hygienicky

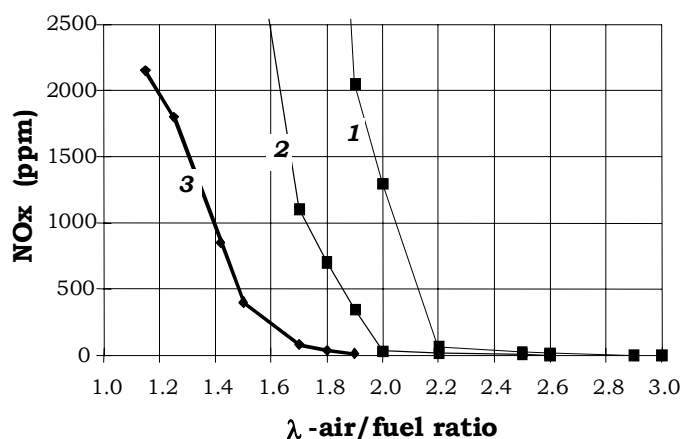
nejrizikovějších polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH -12 organických sloučenin) vč. jejich karcinogenních složek (PAH_{KARC} – 7 organických sloučenin): výsledek je váženým průměrem z jednotlivých režimů testu EHK 49. Plynový motor se spalováním velmi chudých směsí je seřízen na nízké emise NO_x, kvalitní oxidační katalyzátor (s účinností $\eta_{HC} > 0,85$) zajišťuje nízké emise HC a CO: velmi nízké emise PAH a PAH_{KARC} plynového motoru (cca 10x nižší v porovnání s původním naftovým motorem) jsou dány jednodušší strukturou molekul uhlovodíků v plynných palivech (v plynných palivech jsou molekuly typu C₁ až C₄, nafta obsahuje molekuly uhlovodíků typu C₁₀ až C₂₅).

Rovněž výfukové emise plynových motorů při nízkých teplotách (po studených startech a nízké okolní teplotě) jsou proti motorům na klasická kapalná paliva minimalizovány a jenom málo závisí na teplotě (motoru i okolí); dokládá to další výsledek měření na obr.4. Tato vlastnost vozidlových plynových motorů je stejně významná jako celkové snížení výfukových emisí plynofikovaných vozidel za normálního provozu. Vzhledem k povaze provozních režimů některých (zejména komunálních, obslužných) vozidel v kategorii M1 a N1 může dokonce takovýto pokles znečišťování ovzduší v blízkém okolí vozidla (po startu a rozjezdu) a v místech s vysokým soustředěním lidí působit jako hlavní důvod k prosazení nízkoemisních plynofikovaných vozidel (rozvážka zboží, taxi, vozidla zdravotní a servisní služby a pod.) do určitých územních oblastí (zejména potom tam, kde často zhoršené rozptylové podmínky výrazně zhoršují stav ovzduší a úřady jsou nuceny regulovat, omezovat, pohyb a provoz vozidel).



Obr. 9: Výfukové emise motorových vozidel kategorií M1 a N1 podle emisního testu EHK 83 (91/441/EEC) na různá paliva v závislosti na venkovní teplotě – podle / X/.

Závislost koncentrace NO_x ve výfukových plynech vodíkového motoru (jako jediné významnější škodliviny ve výfukových plynech vodíkového motoru) na bohatosti spalované směsi ukazují průběhy na obr.10: v digramu je porovnání zakreslena i závislost koncentrace NO_x při spalování zemního plynu.



Obr. 10: Koncentrace NO_x ve výfukových plynech plynových motorů na vodík (1,2) a zemní plyn (3) v závislosti na bohatosti spalovaných směsí: nepřepřehňovaný motor s vnitřním tvořením směsi, $n = 900$ 1/min, $\varepsilon = 10$, předstih zážehu $\alpha = 5^\circ$ před HÚ (1 a 3 - vefukování paliva do válce během sacího zdvihu, 2 - vefukování paliva do válce během kompresního zdvihu). V přeplňované verzi motoru se rozdíly mezi průběhy křivek 1 a 2 zmenšují [2,7].

Výsledky měření provedených na plynových motorech v laboratoři KSD TUL i na jiných pracovištích jednoznačně prokazují, že plynové motory emitují řádově nižší množství hygienicky nejrizikovějších škodlivin než naftové motory. V optimalizovaném provedení (a při použití účinného katalyzátoru) mají plynové autobusové motory na zemní plyn nebo LPG jednoznačně výrazně kladný efekt na množství emitovaných škodlivin. Rovněž emise rizikových NO_x, které jsou u plynových motorů cca poloviční proti motorům naftovým, významně omezují vznik smogových situací (NO_x se katalyticky zúčastňuje na vzniku oxidačního fotochemického smogu, který silně dráždí sliznice dýchacích cest, způsobuje slzení očí a poškozuje vegetaci). Plynové motory proto z hlediska příznivějších emisních vlastností proti motorům na klasická kapalná paliva (a v současné době i z důvodů energetických zásob) představují perspektivu zejména pro vybrané skupiny silničních vozidel kategorií M2 a M3 (autobusy) a N2 a N3 (komunální užitková vozidla), ale i pro některá silniční vozidla kategorií M1 a N1. S plynovými motory se proto počítá jako s variantou pohonu pro několik příštích desetiletí a u většiny významných výrobců motorů i vozidel pokračuje další výzkum na těchto motorech.

V ekologicky vyspělých zemích dostávají plynové vozidlové motory zcela oprávněně výraznou podporu při jejich využití v městských autobusech a v obslužných vozidlech pro oblasti s větším soustředěním populace a to i v případech, kdy cenovou politikou v jednotlivých státech vychází celkové náklady na provoz plynofikovaných vozidel vyšší proti nákladům na provoz vozidel s motory na klasická kapalná paliva:

[1] BECK, N.J., JOHNSON, W.P., PETERSON, P.W.: Optimized E.F.I. for Natural Gas Fueled Engines. SAE 911650.

[2] BEROUN, S.: Ecological effect of gas fuelled vehicles engines. 6th International Scientific-Technical Conference of Internal Combustion Engines MOTAUTO 99, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, Plovdiv 13.-15. October, 1999. ISBN 954-90272-2-8.

[3] BEROUN, S.: Importance of the Combustion Chamber Form for the Quality of the Gas Engines. 7th International Scientific-Technical Conference of Internal Combustion Engines MOTAUTO 2000, Technical University of Sofia, Sofia, 18.-20. October, 2000. ISBN 954-90272-3-6.

- [4] BEROUN, S., BARTONÍČEK, L., SCHOLZ, C.: Gas Fuelled Vehicles Engines and their Pollution Parameters. Vth International Conference "GAS ENGINES 2000", Polytechnic Institute of Czestochova (Poland), Czestochova - Vyšne Ružbachy, 8.-12.5. 2000. ISBN 83-7193-100-X, str. 7 - 14.
- [5] HOLLEMANS, B.: LPG a Clean and Efficient Motor Fuel - Related and Non Regulated Emissions of a Commercially Atractive LPG Vehicle. TNO - paper VM 9604, Delft, 1996.
- [6] CHMELA, F., BRUNER, G., KNORR, H.: Entwicklungsergebnisse an einem aufgeladenen Flüssiggas-Magermotor für Stadtbus. 18. Internationales Wiener Motorensymposium, 1997.
- [7] KOVÁŘ, Z., BEROUN, S., SCHOLZ, C., BLAŽEK, J., DROZDA, H., SALHAB, Z.: Study on the combustion of hydrogen lean mixture in experimental direct injection SI engine. F02V181, FISITA 2002, World Automotive Congress, Helsinki, Finland, ISBN 951-9155-16-3.
- [8] LPG as an Automotive Fuel. NOVEM/TNO, Utrecht, 1995.
- [9] PARK, J., CHOI, H., LEE, M., LEE, T., HA, J., CHUNG, S.: A fundamental study to improve the ignitability of lean mixture by radials induced injection in a constant volume combustor. F02V198, FISITA 2002, World Automotive Congress, Helsinki, Finland, ISBN 951-9155-16-3.
- [10] SCHOLZ, C.: Variability of combustion process in SI piston engines. Doctoral thesis. SM 351/98, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, 1998.
- [11] ŠEBOR, G. and COLL.: Influence of the type and composition of the fuels upon the engine emissions. Research reports of Chemical University of Prague, Institute of the technology of crude oil and petrochemistry. 1996,1997.