

GESTIONAREA POLUĂRII ÎN ENERGETICĂ: SOLUȚII DE CONTROL AL EMISIILOR DE NO_x LA UTILIZAREA MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ

Ștefan PANDELEA

Departamentul Energetică, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică,
Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

*Autorul corespondent: Ștefan Pandelea, e-mail stefan.pandelea@en.utm.md

Îndrumătorul/coordonatorul științific: **Corina GUȚU-CHETRUȘCA**, lect. univ., dr., UTM

Rezumat. În prezent, nu sunt suficiente informații pentru a dezvolta indicatori tehnologici specifici pentru emisiile de NO_x la motoarele cu ardere internă, care în cazul tranziției către utilizarea unor combustibili alternativi cum ar fi biogazul, singazul și hidrogenul demonstrează valori și mai mari comparativ cu combustibilul fosil, inclusiv gazele naturale. În aceste condiții, transpunerea Directivelor Europene privind limitarea emisiilor industriale în cazul oxizilor de azot - unul din principalii poluanți în industria energetică, care condiționează cca 95% din toxicitatea totală a emisiilor instalațiilor de generare a energiei, necesită o abordare complexă și aplicarea celor mai dezvoltate și eficiente soluții tehnologice de control. Articolul propune o analiză a mecanismelor generale de formare și tehnologiilor moderne de reducere a emisiilor de NO_x în cazul motoarelor cu ardere internă.

Cuvinte cheie: oxizi de azot, emisii poluante, industria energetică, combustibil fosil, gaze naturale.

Mulți specialiști și experți în domeniul energetic susțin părerea, că motoarele cu ardere internă (MAI) pot juca un rol important în tranziția către sursele regenerabile de energie. Aceasta în mod special se referă la: flexibilitatea operațională (de până la 10% din puterea nominală); posibilitatea de generare în bază, cu operarea la modelele performante practic constantă (cca 8 000 ore/an); eficiența sporită: unele MAI moderne sunt concepute pentru a fi foarte eficiente din punct de vedere energetic, cu randamente electrice declarate de până la 52% - comparabile cu ciclul combinat turbina cu gaze/turbina cu abur, iar în cazul cogenerării randament global de transformare a energiei primare de până la 93%, chiar superior ciclului combinat. Aceste caracteristici fac potrivite MAI atât pentru a compensa fluctuațiile de energie, inclusiv provenite din sursele regenerabile, dar și creșterea generală a eficienței sistemelor energetice, reducând astfel impactul negativ asupra mediului.

În ceea ce privește tipul de combustibil, gazele naturale se planifică a fi principalul tip de combustibil fosil cel puțin în următoarele decenii utilizat în scopuri domestice și energetice, în mod special datorită celor mai buni indicatori ecologici privind emisiile de substanțe nocive în atmosferă printre toți combustibilii fosili disponibili pe piață.

La combustia gazelor naturale principalii poluanți emiși în aerul atmosferic sunt doar trei: CO, NO_x și VOCs (*Volatile Organic Compounds* - compuși organici volatili), iar contribuția toxică a oxizilor de azot constituie 95-98%.

Astfel, una dintre principalele probleme la utilizarea gazelor naturale, în mod special condiționat de specificul proceselor de combustie și parametrilor tehnologici a pistoanelor, reprezintă nivelul sporit de emisii NO_x - principala clasă de compuși nocivi care se elimină la arderea combustibililor fosili, inclusiv celor care practic nu conțin azot, spre exemplu - a gazelor naturale. De menționat, că efectul toxic al NO_x se consideră de către experți a fi de 10 ori mai mare ca efectul emisiilor de carbon. Fără a subestima impactul mijloacelor de transport, totuși principala sursă a emisiilor de NO_x la nivel global se consideră Industria Energetică, aceasta datorită consumului uriaș de combustibili fosili.

Tabelul 1

Piața anuală a produselor petroliere conform rapoartelor ANRE în Republica Moldova

Produs	Import, t/an	Echivalent combustibil convențional, t/an	Echivalent gaze naturale, mii m ³ /an
Benzină	170 000	274 437	240 030
Motorina	640 000	978 567	855 881
Gaz lichefiat	61 000	93 686	81 940
TOTAL	871 000	1 346 689	1 177 851

Totodată, dacă să luăm în considerare consumurile centralelor electrice de termoficare (CET Sursa-1, CET Sursa-2, CET Nord și CTE Cuciurgan), consumul de gaze naturale pentru producerea locală de energie va fi de cca 1.5 miliarde m³/an, sau cu cca 30% mai mult ca toate tipurile de mașini, iar considerând că pentru încălzirea locuințelor se consuma încă cca 600 mil. m³/an, consumul de facto al gazelor naturale în scopuri energetice este practic dublu mai mare față de toate tipurile de produse petroliere împreună luate (cca 2,1 miliarde m³/an).

Nu sunt promițătoare din acest punct de vedere și posibilitățile combustibililor alternativi. Astfel, dacă să luăm în considerare rezultatele ultimilor testări a echipamentelor energetice pe bază de combustibilul, care din mai multe motive se consideră a fi promițător în energetică – hidrogenul, emisiile de NO_x sunt și mai mari decât, spre exemplu, a cărbunelui, lignitului, păcurii, biomasei. Aceasta se datorează faptului că, având în vedere că în compoziția aerului atmosferic sunt prezente 78% azot și 21% oxigen, împreună cu reacțiile principale de oxidare a hidrogenului și a carbonului în anumite condiții în zona de ardere se activează în mod secvențial alte reacții paralele și formarea ulterioară a altor oxizi de azot.

În acest sens, DIRECTIVA (UE) 2015/2193 A PARLAMENTULUI EUROPEAN ȘI A CONSILIULUI din 25 noiembrie 2015 privind limitarea emisiilor de anumite poluanți în aer de la instalații de ardere medie, se aplică instalațiilor de ardere cu o putere termică de admisie (eng. *Thermal input*) egală sau mai mare de 1 MW și mai mică de 50 MW („instalații de ardere medie”), indiferent de tipul de combustibil pe care îl folosesc, și limitează valoarea maximă admisibilă de NO_x la 75 mg/m³. Astfel, raportate la valorile inferioare a căldurii de ardere (LHV), care nimeresc sub incidența Directivei susmenționate, acestea vor fi:

Tabelul 2

Diapazonul valorilor consumului orar de combustibili conform Directivei (UE) 2015/2193

Combustibil	Gaze, m ³	Cărbune, kg	Petrol, kg	Păcură, kg	Lemn, kg
LHV, MJ (/m ³ /kg)	33,5	29,8	41,8	40,8	16
1 MWt	108	121	86	88	225
50 MWt	5 373	6 040	4 306	4 412	11 250

În ceea ce privește cinetica formării oxizilor de azot, la momentul actual lipsește un model unic, care în mod exhaustiv ar explica mecanismele și condițiile de formare al acestora, dar există modele și sisteme îndeajuns de exacte de a estima valorile aproximative ale oxizilor de azot.

În timpul procesului de ardere la temperaturi înalte, azotul din aer devine reactiv și generează oxizi precum NO, NO₂, N₂O și alții. În produsele rezultate din ardere, se găsesc în principal NO și NO₂, grupate sub denumirea de NO_x. Formarea oxidului de azot este posibilă în mai multe scenarii: în primul rând, azotul derivat din azotul molecular din aer; în al doilea rând, prin intermediul radicalilor intermediari, într-o etapă de reacție cu viteză mare cunoscută sub numele de "rapidă"; în al treilea rând, prin prezența azotului în combustibil, denumit azot

combustibil. Prin urmare, avem trei modalități distincte de formare a oxizilor de azot: termică, rapidă și prin intermediul azotului combustibilului.

Oxizii de azot combustibili sunt prezenți în principal în combustibilii solizi și lichizi, care conțin diferiți compuși de azot sau în prezența amoniacului în combustibilul gazos. Studiile au demonstrat că creșterea concentrațiilor de oxizi de azot este asociată cu creșterea conținutului de azot din combustibil. Viteza de formare a acestui tip de azot are o dependență slabă de temperatură. Astfel, deoarece gazele naturale practic nu conțin azot sau conțin într-o măsură neglijabilă, acest mecanism practic nu influențează formarea de NO_x la combustia gazelor în MAI.

Formarea oxizilor de azot “rapizi” (prompt) în fața flăcării este fundamental diferit de cel pentru NO_x termic. Reacția are un caracter mai complex, deoarece este strâns legată de formarea radicalului CN. În condiții reale în motoarele pe benzină, cu atât mai mult în cele diesel și gaze naturale, formarea de NO “rapid” nu depășește 10% din NO total. Prin urmare, în calculul concentrației de NO_x în motoarele diesel, care funcționează cu combustibili tradiționali sau alternativi, cum ar fi gazul natural, formarea de NO “rapid” nu este luată în considerare.

Astfel, formarea termică a oxizilor de azot (azotul termic) este principalul mecanism de formare a NO_x la combustia gazelor naturale. Cinetica formării a fost definite de Zeldovich în 1946 și de Lavua în 1970, care iau în considerare amestecuri bogate în care cantitatea de oxigen atomic este mică. Aceste fenomene sunt descrise ca “Mecanismul avansat al lui Zeldovich”. Principala influență asupra formării azotului termic o deține temperatura din zona de ardere, care crește exponențial odată cu creșterea temperaturii flăcării. Prin urmare, pentru a diminua emisiile de oxizi de azot, este esențial să se reducă temperatura în zona de ardere și să se minimizeze variațiile locale ale acesteia. Dar obținerea unei scăderi acceptabile a temperaturii medii în camera de ardere nu este suficientă atâta timp cât există regiuni locale cu temperaturi ridicate.

Generalizând, în timpul arderii oricărui combustibil, atât tradiționali cât și alternativi, când oxidantul este aerul, din cauza temperaturilor de ardere ridicate, formarea diferitelor compuși de azot cu oxigenul este practic inevitabilă. În ceea ce privește MAI, cea mai mare parte a NO_x formată prin mecanismul NO_x termic apare în regiunile de temperatură înaltă din cilindru, acolo unde aerul de combustie s-a amestecat suficient cu combustibilul pentru a produce interfața combustibil/aer la temperatura maximă.

Formarea NO_x, la fel ca și a altor componente nocive precum CO, hidrocarburi și particule solide de funingine, depinde în primul rând de raportul de aer excesiv α_B și temperatura de ardere. Concentrațiile produselor de ardere incompletă, cum ar fi CO și CH, cresc în cazul în care amestecul este îmbogățit ($\alpha_B < 1$), iar concentrația maximă a oxizilor de azot NO_x este atinsă la o temperatură ridicată în cilindru și un raport de aer excesiv de $\alpha_B = 1,1$. Sărăcirea amestecului ($\alpha_B > 1,2$) duce la scăderea temperaturii de ardere în cilindru (necotând arderii complete, o parte din căldură este absorbită de aerul în exces, ceea ce menține temperatura amestecului la un nivel scăzut), ceea ce duce la reducerea concentrației de NO_x.

Totodată, concentrația de oxizi de azot în produsele de ardere depinde direct de calitatea procesului de lucru. Creșterea efectului încălzirii globale, eficiența limitată a motoarelor și legile stricte cu privire la emisii (în special emisiile de NO_x și PM) au generat o accelerare în dezvoltarea motoarelor eficiente cu nivelul acceptabil de emisii. Această dezvoltare poate fi împărțită în trei categorii principale: modificări ale configurației motorului înainte de combustie, modificarea combustibilului în timpul combustiei și tehnici de tratare post-combustie

În ceea ce privește modificarea combustibilului în timpul combustiei, există mai multe tendințe și tehnici de modificare la motoare, printre care pot fi enumerate: adaosuri de inhibitori de NO_x, care în mod specific reduc reacțiile de formare a NO_x în flacără; emulsificarea combustibilului, care poate duce la o ardere mai rece, prin urmare, la o reducere a NO_x; utilizarea de combustibili cu temperatură de ardere mai scăzută; tehnici de pulverizare și amestecare mai bune; *staging*-ul combustibilului, care implică împărțirea procesului de ardere în

mai multe etape, unde combustibilul este adăugat treptat pentru a controla temperatura și a reduce formarea de NO_x, etc.

Tehnicile de tratare post-combustie sunt la moment bine dezvoltate, și cel mai des utilizate în calitate de mecanism de reducere a emisiilor de NO_x. Principalele dintre acestea sunt:

- Reductorul catalitic selectiv (SCR): implică injectarea de amoniac sau uree în fluxul de gaze de eșapament, care reacționează cu oxizii de azot într-un catalizator pentru a forma azot și apă, reducând astfel nivelul de NO_x.
- Reducerea catalitică non-selectivă (SNCR): Similar cu SCR, dar fără utilizarea unui catalizator. Amoniacul sau ureea este injectată în gazele de eșapament la temperaturi în care NO_x se va reduce la azot și apă.
- Recircularea gazelor de eșapament (EGR): Această metodă implică recircularea unei părți a gazelor de eșapament înapoi în camera de ardere a motorului pentru a reduce temperatura de ardere și a diminua formarea de NO_x în timpul combustiei.
- Oxidarea catalitică selectivă (SCO): Această tehnică utilizează un catalizator care favorizează conversia monoxidului de carbon și hidrocarburilor nea arse din gazele de eșapament în CO₂ și apă, ceea ce poate contribui indirect la reducerea NO_x.
- Adsorbția și regenerarea NO_x (NSR): Acest proces implică captarea oxizilor de azot din gazele de eșapament folosind un absorbant și apoi regenerarea acestuia în afara motorului.
- Analiza proiectelor implementate și în curs de dezvoltare indică faptul, că în majoritatea cazurilor se optează pentru tehnica post-combustie în baza SCR, care de fapt este și cea mai simplă din punct de vedere de realizare tehnică.

Totodată urmează de menționat, că SCR are și un șir de particularități tehnice și economice, care puternic influențează fezabilitatea proiectelor și urmează a fi luate în considerare. Printre acestea:

- Reducerea randamentului electric cu cca 1%, datorat consumului suplimentar de energie.
- Costuri investiționale de cca 60 Euro/kW în echipament, sau cca 3-5% la costul instalației
- Investiții conexe (clădire cu mai multe niveluri, fundație, comunicații) – cca 2% la costul instalației
- Spații adăugătoare pentru reagentul uzat (cca 2% din reagent nu intră în reacție)
- Necesitatea de respectare a regimului de temperaturi între -5C /25C la păstrarea reagentului
- Echipament pretențios, cu un grad sporit de malfuncție, și emisia fonică sporită
- Catalizatorii sunt predispuși la contaminarea cu compușii volatili din gazele de ardere
- Consum sporit de reagent (de 1-2 kg/MWh în dependență de temperatura mediului)
- Dependența costului reagentului de prețul gazelor naturale, din care și cu care se produce.

De asemenea, dat fiind faptul că pentru producerea 1 kg uree se consumă cca 1 kg (≈ 1.4 m³) gaze naturale, devine absurdă reducerea emisiilor la arderea gazelor în scopuri energetice la o locație prin arderea gazelor pentru producere în altă locație.

De exemplu, pentru un proiect de CET de 55 MW în cogenerare de înaltă eficiență în baza MAI pe gaze naturale, valoarea investiției în echipamentul SCR va fi de cca 3 milioane Euro, investițiile conexe de cca 1.5 milioane Euro, iar consumul de reagent (la funcționarea de 8000 ore/an) va constitui cca 500 000 kg, pentru care se vor utiliza chiar la cea mai performantă uzină cca 700 000 m³ gaze naturale. Concomitent, practic inevitabil se vor forma cca 10 000 kg de deșeuri lichide la locația energetică.

În acest sens, un interes sporit prezintă posibilitățile de modificări ale configurației motorului înainte de combustie, în scopul de limitare a formării de NO_x. Urmează de menționat,

că valoarea tipică a emisiilor de NO_x “la uzină” al MAI este de cca 500 mg/m³, care corespunde nivelului maxim admisibil din standardul maritim Tier III (din 1 ianuarie 2016) de 2 g/kWh pentru clasa cu turațiile de cca 2000 rpm, 2,4 g/kWh pentru clasa cu turațiile de 130-1999 și 3,4 g/kWh pentru clasa cu turațiile de sub 130 rpm). Astfel, un motor tipic de clasa 100 kW emite 0.24 kg, unul de clasa 5 MW – 12 kg, unul de clasa 9 MW – 21.6 kg, iar unul de clasa 20 MW – 48 kg/h de NO_x pe oră.

Totodată, performanța motorului și emisiile de poluanți depind direct de configurația lui, care diferă foarte mult în dependență atât de clasa de puteri, nivelul turațiilor, sistemul de aprindere, executarea pistoanelor, apartenența la *rich-burn* sau *lean-burn* tehnologii, dar și de la producător la producător chiar și la coinciderea parametrilor susmenționați, datorită tehnologiilor individuale proprietare (*know-how*). În acest sens, este complicat de a determina care anume tehnologii își vor găsi aplicarea într-un proiect anumit.

Analiza informațiilor și studiilor cu privire la tehnologiile existente indică posibilitatea aplicării următoarelor tehnici principale de ajustare a arderii combustibilului gazos în MAI în scopul diminuării nivelului de NO_x:

- modificarea parametrilor de injecție (presiune, temporizare și durată)
- modificarea rapoartelor de compresie
- modificarea locației duzelor de intrare
- modificarea geometriei camerei.

Astfel, în cazul modelelor moderne a producătorilor cu reputație, există posibilități reale de a micșora nivelul emisiilor de NO_x a MAI de cca 6 ori fără aplicarea metodelor de tratare post-combustie (SCR, SNCR, etc), de la valoarea tipică de 500 mg/m³ până la valori sub 75 mg/m³ (cca 35 ppvm), dar care influențează în mod semnificativ performanța motorului, și practic se soldează cu majorarea consumului specific de combustibil. Altfel spus, micșorarea nivelului emisiilor duce inevitabil la micșorarea eficienței, în mod special – al randamentului electric.

Totodată, Standardul ISO-3046, care vizează condițiile de declarare și verificare a puterilor motoarelor cu ardere internă (cu piston) obligă doar raportarea emisiilor, dar nu limitează nici într-un fel nivelul - nici de NO_x, nici de CO₂, SO₂ sau altele, la care urmează a fi executate testările. Este firesc, că practic toți producătorii din lume la declararea puterilor și a eficienței produselor indică valoarea maximă, care poate fi obținută doar la nivelul de NO_x de 500mg/m³.

Mai mult, dacă nu este agreeat din start în condițiile contractuale, Standardul ISO-3046 permite o toleranță față de consumul de combustibil declarat și cel obținut la testări funcționale la punerea în funcțiune de până la 5%. Astfel, urmează a lua în considerare faptul, ca valorile de puteri și randamentele electrice declarate de producători pentru modelele staționare (pe uscat) din piață la momentul actual nu sunt veridice din punct de vedere practic, dat fiind faptul că există foarte puține țări, unde este permisă valoarea de 500 mg/m³ de NO_x.

Este important de menționat, că dependența eficienței de nivelul NO_x nu este și practic imposibil să fie liniară. Există o mulțime de factori care influențează procesul, care foarte dificil se supun modelării, astfel că valorile reale pot fi obținute practic doar în rezultatul testelor funcționale pentru modele concrete la fiecare producător. Situația se complică mult datorită faptului, că din motive evidente producătorii nu afișează, sau nu dispun de așa date.

În acest sens, în urma analizei complexe a fenomenului și datelor prezentate de producători, a fost determinat și se propune spre utilizare un coeficient de ajustare, numit convențional *coeficientul de corecție a randamentului MAI la valoarea NO_x de 75 mg/m³ (Knox75)* pentru instalațiile de clasa puterii termice de admisie 1-50 MW_{th}, propus a fi considerat (din valoarea declarată la nivelul de 500 mg/m³): 0.93 pentru MAI cu diapazonul de puteri unitare 100 – 1000 kW, și 0,96 pentru diapazonul 1000 – 12 000 kW.

Tabelul 3

Dependența randamentului MAI de valoarea NOx

Clasa de viteză	Puterea electrică nominală, MW	NOx, mg/m ³				Knox75
		500	250	125	75	
Viteză înaltă, (1500 rpm)	0,1 - 0,5	39	37,6	36,8	36,2	0,93
	0,5 ... 1	42,6	41,6	41,3	40,9	0,96
	1 ... 2	45,4	44,6	44	43,7	0,96
	2 ... 3	45,7	44,9	44,4	44,1	0,96
	3 ... 4	45,6	44,8	44,2	43,8	0,96
Viteză medie, (750 rpm)	9 ... 12	49,2	48,2	47,6	47,2	0,96

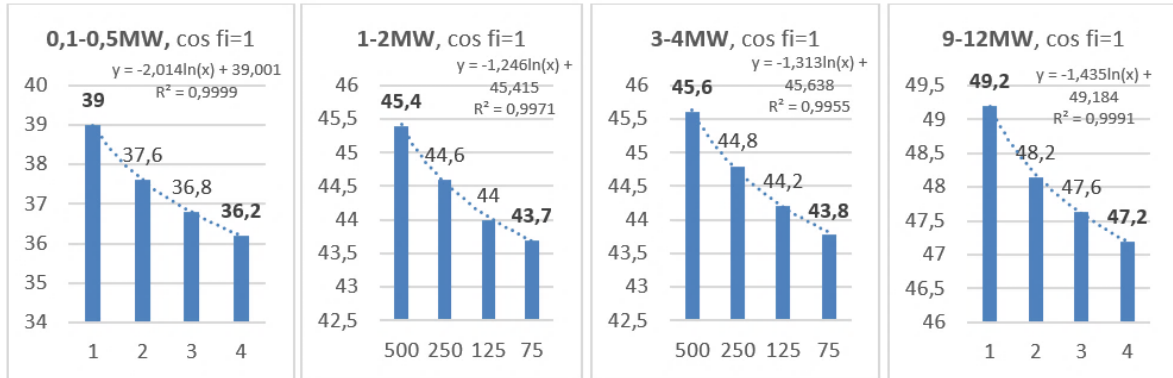


Figura 1. Reprezentarea grafică a dependenței randamentului MAI de valoarea NOx

Concluzii

1. Arderea oricărui tip de combustibil este soldată cu formarea oxizilor de azot, contribuția toxică a cărora în principalele forme de emisii constituie 95-98%.
2. La arderea gazelor naturale cca 95% NOx este formată din azotul atmosferic prin mecanismul termic în regiunile de temperatură înaltă din cilindru.
3. Concentrația NOx în produsele de ardere depinde de calitatea procesului de lucru
4. Cea mai răspândită metodă de micșorare a nivelului NOx este tratarea post-combustie a gazelor de eșapament – SCR, care la nivelul admisibil de 75 mg/m³ reduce eficiența electrică a motorului cu cca 2,2%, sau cca 1% valoare absolută, necesită investiții majore, cheltuieli anuale suplimentare și formează deșeuri lichide.
5. Există posibilități tehnice de reducere a nivelului NOx prin ajustarea avansată a proceselor de combustie la MAI fără post-tratare (ajustare avansată pre-combustie), care nu necesită investiții inițiale în echipamente de post-tratare, cheltuieli suplimentare anuale, nu formează deșeuri lichide, sporește factorul de capacitate al instalației
6. Ajustarea avansată la nivelul admisibil de 75 mg/m³ NOx reduce eficiența electrică a motorului cu cca 4%, sau cca 2% valoare absolută.
7. La executarea studiilor de fezabilitate și a cerințelor tehnice, se recomandă solicitarea de la producător a datelor exacte cu privire la parametrii de funcționare și eficiența MAI la diferite nivele, inclusiv cel admis 75 mg/m³ de NOx, fără tratare post-combustie.
8. În cazul în care astfel de informații sunt limitate, pentru o estimare practică și realistă se propune spre utilizare coeficientul de corecție a randamentului electric MAI la valoarea admisă de emisii NOx (Knox75).

Mulțumiri. Aduc sincere mulțumiri pentru suportul acordat Dnei Corina GUȚU-CHETRUSCA, lect. univ., dr., UTM, cât și producătorilor de echipamente pentru informațiile prezentate.

Referințe

- [1] Dr I. M. Rizwanul Fattah, State-of-the-Art of Strategies to Reduce Exhaust Emissions from Diesel Engine Vehicles, in *Energies* **2021**, 14(6), 1766; doi: 10.3390/en14061766
- [2] Pulkrabek, W.W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, 2nd ed.; Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2004; Volume 2.
- [3] Zeng, K.; Huang, Z.; Liu, B.; Liu, L.; Jiang, D.; Ren, Y.; Wang, J. Combustion characteristics of a direct-injection natural gas engine under various fuel injection timings. *Appl. Therm. Eng.* 2006, 26, 806–813; doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.011
- [4] Srinivasan, K.; Krishnan, S.; Qi, Y.; MIDKIFF, K.; Yang, H. Analysis of diesel pilot-ignited natural gas low-temperature combustion with hot exhaust gas recirculation. *Combust. Sci. Technol.* 2007, 179, 1737–1776 Doi:10.1080/00102200701259882