

1.11. Controlul emisiilor poluante ale motorului Diesel

Efectul poluant cel mai important al motoarelor cu ardere internă este produs de substanțele nocive existente în gazele de evacuare; diferențele existente între procesul ideal de ardere și cel real, care conduc la apariția substanțelor poluante, sunt datorate timpului de reacție disponibil care, în motor, este foarte redus, imperfecțiunilor legate de formarea amestecului aer-combustibil etc.

Dintre cele aproximativ o mie de substanțe existente în gazele de evacuare, reglementările legislative iau în calcul următoarele substanțe poluante:

- hidrocarburi – HC;
- monoxid de carbon (CO) și bioxid de carbon (CO₂);
- oxizi de azot – NO_x (NO + NO₂);
- particule (pentru motoarele Diesel);
- fum.

Fig. 1.124 prezintă o analiză comparativă a emisiilor celor două tipuri de motoare utilizate (cu aprindere prin scânteie și Diesel); trebuie remarcat că emisiile sunt mai importante cantitativ atunci când motorul este rece decât după ce acesta s-a încălzit.

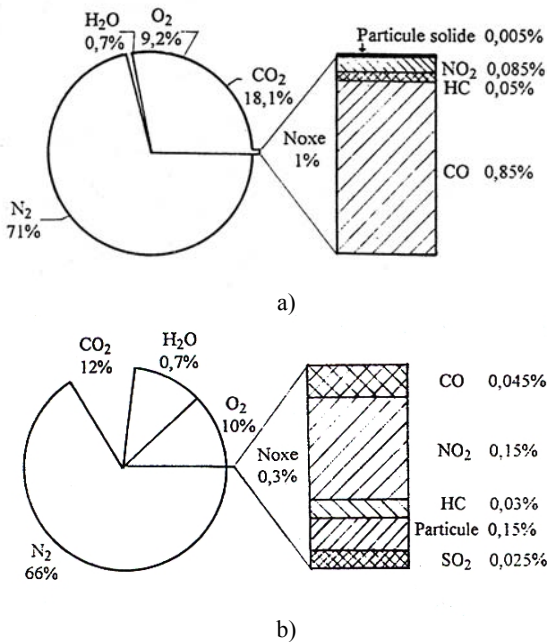


Fig. 1.124. Compoziția gazelor de ardere [38]

a) motor cu aprindere prin scânteie;
b) motor cu aprindere prin comprimare.

În categoria *hidrocarburilor* intră produsele gazoase rezultate din arderea incompletă, dar și componentele evaporate din combustibil; compoziția acestora diferă în funcție de tipul motorului (m.a.s. sau m.a.c.), dar este reprezentată majoritatea compușilor organici (hidrocarburi aromatice, aldehide, eteri etc.).

Hidrocarburile sunt, în același timp, substanțe poluante primare, care rezultă din procesele de schimb de gaze și ardere, dar și substanțe poluante secundare, ca urmare a interacțiunii dintre substanțele primare sau dintre acestea și aerul înconjurător.

Apariția hidrocarburilor în gazele de evacuare ale motoarelor este o consecință a imposibilității propagării frontului de flacără în masa de amestec carburant. Stingerea

flăcării poate apare prin contact cu peretele relativ rece al cilindrului, din cauza depresiunilor mari din colectorul de admisie (la m.a.s.) sau ca urmare a existenței unei mase mari de gaze arse reziduale, care întrerupe reacția; întoarcerea gazelor de ardere în cilindru, pe lângă supapa de evacuare, poate de asemenea produce stingerea flăcării.

Oxizii de azot din gazele de ardere apar ca urmare a reacției dintre oxigenul atmosferic și azotul din aer, în condițiile de presiune și temperatură ridicate ce caracterizează arderea din cilindrul motorului. Dintre oxizii de azot cei mai importanți din punct de vedere al poluării sunt NO și NO₂

Monoxidul de carbon este un produs intermediar, prin care trec toți compușii carbonului atunci când sunt oxidați, în timp ce *bioxidul de carbon* este produsul final al arderii. Dacă amestecul carburant este caracterizat printr-un exces mare de aer (cantitate de aer mai mare decât cea stoichiometric necesară pentru arderea combustibilului), monoxidul de carbon este oxidat în continuare, formându-se bioxid de carbon. Ca urmare, emisiile de CO ale motoarelor Diesel (care funcționează cu un coeficient mare de exces de aer) sunt mai mici decât cele ale motoarelor cu aprindere prin scânteie.

Particulele reprezintă un amestec de substanțe anorganice și organice, care provin din gazele arse și care se pot găsi atât în stare solidă cât și în stare lichidă; particulele sunt formate dintr-o fracțiune insolubilă de carbon (funingine) și o fracțiune solubilă, ce conține combustibil și ulei nears. Din punct de vedere legislativ, particulele sunt definite ca fiind materialul (cu excepția apei) colectat pe un filtru din teflon, la trecerea gazelor arse emise de motor, diluate cu aer filtrat pentru ca temperatura filtrului să nu depășească 52°C. În general, motoarele cu aprindere prin comprimare au emisii de particule mai importante cantitativ decât motoarele cu aprindere prin scânteie; în același timp, particulele de carbon emise de motorul Diesel au dimensiuni mai mici și pot pătrunde mai adânc în plămâni. *Compușii de sulf*, care se găsesc într-un procent mai mare în motorină decât în benzină, se transformă, prin ardere, în bioxid de sulf (în cea mai mare parte), dar și în trioxid de sulf care, combinându-se cu apa și cu alți compuși din gazele de evacuare, contribuie la emisia de particule a motorului. Reducerea emisiilor de particule constituie principalul motiv pentru care normativele recente impun reducerea procentului de sulf din motorină, ceea ce poate avea efecte negative asupra proprietăților lubrifiante ale acesteia precum și asupra durabilității sistemului de injecție a combustibilului.

Fumul este format dintr-o suspensie de particule lichide de combustibil, nears sau parțial oxidat, cu diametrul de 0,5...1 μm (fumul alb sau albastru), sau din particule cărbunoase cu diametrul de 1 μm (fumul negru). Fumul alb sau albastru este cauzat de regimul termic coborât al motorului (la pornire, mers în gol sau sarcini mici), când are loc o ardere incompletă a combustibilului; din cauza temperaturilor mici ale gazelor de ardere, combustibilul nears se condensează sub formă de particule lichide. Fumul negru apare în cazul amestecurilor sărace (cantitate de combustibil mai mare decât cea corespunzătoare arderii stoichiometrice).

Pentru motorul cu aprindere prin comprimare cele mai importante substanțe poluante din gazele de ardere (din punct de vedere cantitativ) sunt oxizii de azot și particulele.

Metodele de reducere a emisiilor poluante ale motorului Diesel se împart în două categorii [38]:

- metode active, care combat emisiilor poluante prin controlul procesului de ardere a combustibilului;

- metode pasive, care acționează asupra emisiilor poluante după formarea acestora, pe traseul de evacuare, prin utilizarea unor metode chimice și mecanice.

Metodele active utilizate pentru reducerea emisiilor poluante au în vedere următorii factori [38]:

- regimul de funcționare: emisiile poluante sunt influențate de sarcina și turația motorului și reducerea acestora este posibilă prin evitarea acelor regimuri care influențează negativ emisiile (de exemplu funcționarea îndelungată în relanti, accelerările bruște);
- caracteristicile injecției (avansul la injecție, legea de injecție, presiunea de injecție, caracteristicile injectorului): motoarele moderne utilizează sisteme de injecție controlate electronic, astfel încât avansul la injecție și durata injecție să poată fi modificate în funcție de regimul de funcționare; aceste sisteme permit și utilizarea metodei injecției-pilot (fig. 1.125), ce presupune injectarea unei mici cantități de combustibil (aproximativ 10% din doza ciclică) cu $3...10^0$ RAC înainte de începutul injecției principale (vezi și 1.5.4). Astfel se asigură introducerea combustibilului din injecția principală într-un mediu mai bine pregătit pentru desfășurarea arderii, ceea ce are ca efect reducerea emisiilor de NO_x (dar conduce la creșterea emisiilor de particule și fum).

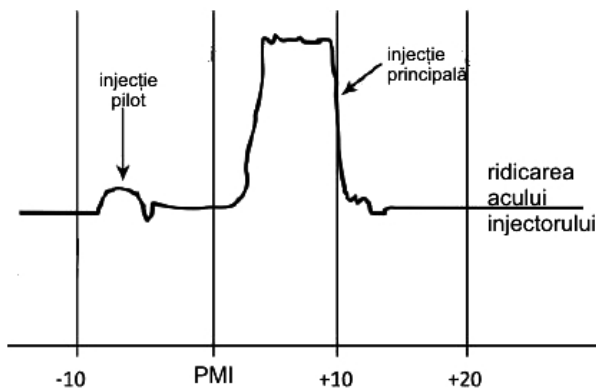


Fig. 1.125. Principiul injecției pilot³³

- particularitățile constructive ale motorului: în această categorie se includ elemente cum ar fi cantitatea de gaze arse reziduale din cilindru, tipul camerei de ardere, transferul de căldură prin pereții camerei de ardere, supraalimentarea, fazele distribuției etc. Astfel, o cantitate mai mare de gaze arse reziduale în cilindru conduce la micșorarea cantității de aer proaspăt aspirat în motor și deci la reducerea emisiilor de oxizi de azot și de hidrocarburi, dar și la creșterea emisiilor de fum și a duratei arderii, cu efecte negative asupra consumului de combustibil. În acest sens o metodă eficientă de reducere a emisiilor de NO_x o constituie recircularea gazelor de ardere (EGR – Exhaust Gas Recirculation), astfel încât o anumită cantitate de gaze de ardere să fie reintrodusă în cilindru (fig. 1.126). Utilizarea camerelor de ardere divizate conduce la reducerea cu până la 10% a nivelului global al emisiilor [38]; supraalimentarea motorului conduce la creșterea temperaturii aerului din cilindru la sfârșitul comprimării, cu efecte pozitive asupra reducerii duratei întârzierii la autoaprindere și a emisiilor de NO_x și HC (fig. 1.127). Fazele distribuției influențează emisiile poluante prin durata în care

³³ http://nptel.ac.in/courses/112104033/pdf_lecture/lecture26.pdf

supapa de admisie și cea de evacuare sunt deschise simultan [38].

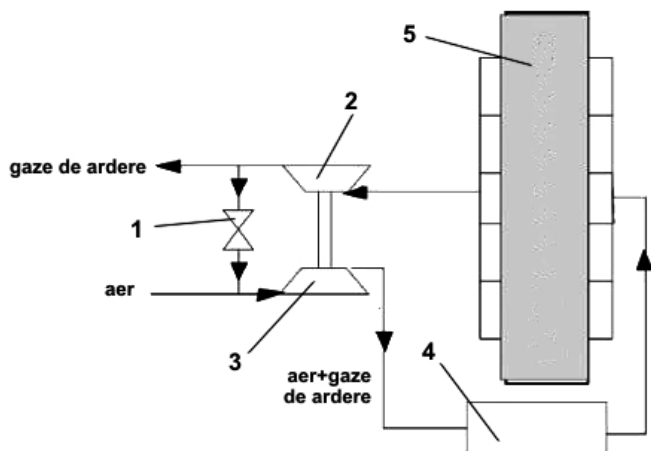


Fig. 1.126. Supraalimentarea și recircularea gazelor de ardere³⁴

- 1- supapă EGR;
- 2- turbină;
- 3-compresor;
- 4-răcitor intermediar;
- 5-motor Diesel.

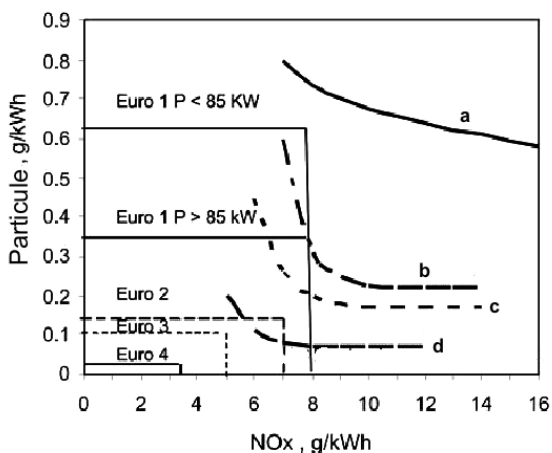


Fig. 1.127. Reducerea emisiilor poluante ale motoarelor Diesel³⁵

- a-motor cu aspirație naturală;
- b-motor supraalimentat;
- c-motor supraalimentat, cu răcire intermediară a aerului;
- d- motor supraalimentat, cu răcire intermediară a aerului și control electronic al injecției.

- starea tehnică a motorului: emisii mărite de substanțe poluante apar ca urmare a uzării sau dereglării echipamentului de injecție, uzurilor cuplului piston-cilindru, colmatării filtrelor etc.

Metodele pasive reduc emisiile poluante prin tratarea gazelor de ardere după ieșirea din cilindru (post-tratarea gazelor arse) cu ajutorul filtrelor de particule și a catalizatorilor de oxidare. În principiu catalizatorii de oxidare permit reducerea emisiilor de oxizi de azot, în timp ce filtrele de particule sunt utilizate pentru reducerea emisiilor de particule.

Diminuarea emisiilor de oxizi de azot se realizează prin *reducere catalitică neselectivă* (NSR – Non Selective cathalytic Reduction) și prin *reducere catalitică selectivă* (SCR - Selective Cathalytic Reduction).

Un catalizator de tip NSR este format dintr-un material de bază, realizat sub forma unei structuri de tip fagure, dintr-un material ceramic sau mineral (de exemplu cordierit³⁶), pe care se depune un strat intermediar poros din oxid de aluminiu, peste care

³⁴ http://nptel.ac.in/courses/112104033/pdf_lecture/lecture27.pdf

³⁵ ibid.

³⁶ Silicat de aluminiu și magneziu.

se găsește stratul catalitic activ, format din oxid de bariu și platină (fig. 1.128).

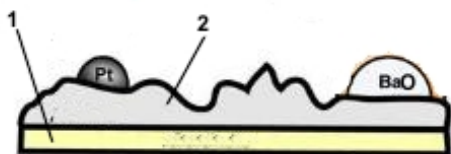


Fig. 1.128. Structura unui catalizator NSR

1-material de bază (cordierit);
2-strat poros de oxid de aluminiu.

Funcționarea unui astfel de catalizator are loc în două faze (fig. 1.129):

- faza 1: în gazele de ardere există NO, NO₂ și oxigen (cantitatea de aer din cilindru fiind mult mai mare decât cea necesară pentru arderea stoichiometrică a combustibilului); în prezența catalizatorului din platină NO se transformă în NO₂, ca urmare a prezenței oxigenului, iar NO₂ este stocat de către oxidul de bariu, până când acesta din urmă este complet saturat cu oxizi de azot (în aproximativ 60...100 s);
- faza 2: în prezența hidrocarburilor neare din gazele de evacuare (HC) și a catalizatorului din platină are loc reacția de reducere a NO₂, cu eliberarea de N₂, CO₂, H₂O.

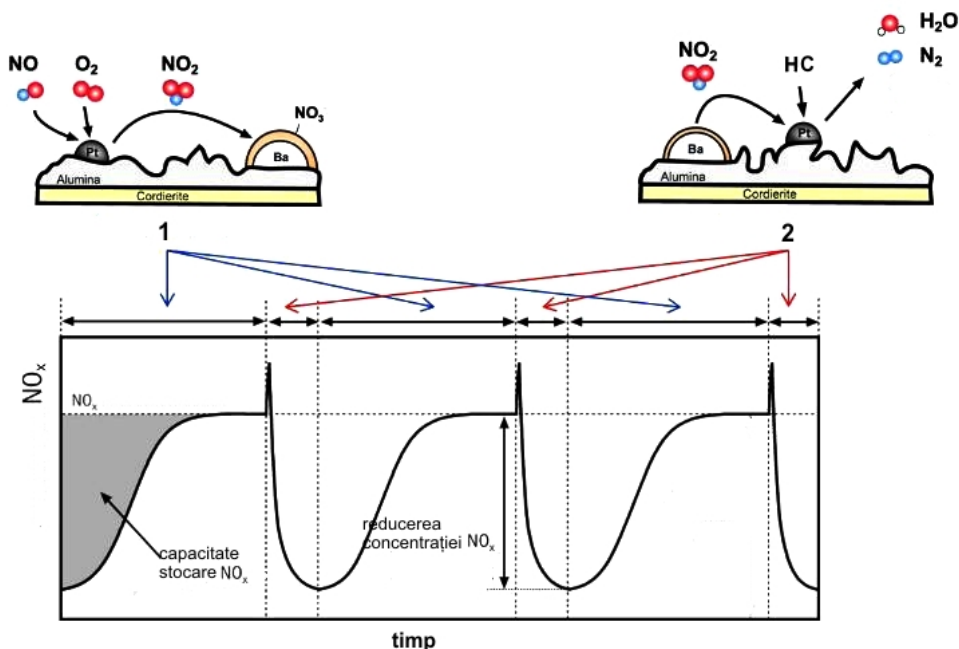


Fig. 1.129. Funcționarea catalizatorului NSR³⁷

1-stocarea NO₂; 2- reducerea oxizilor de azot în prezența combustibilului (HC)

Gazele de evacuare ale motorului Diesel conțin doar cantități mici de hidrocarburi neare; în aceste condiții hidrocarburile necesare reacției de reducere rezultă fie din injecția de combustibil în cilindru (aproximativ 2% din doza ciclică), către sfârșitul destinderii (la 90...200° RAC după începutul injecției principale), fie din injecția de combustibil suplimentar în sistemul de evacuare al motorului.

Sistemele de tip NSR funcționează optim la temperaturi cuprinse între 200 și

³⁷ www.intechopen.com/download/pdf/44432

350⁰C, iar prezența sulfurului din combustibil reduce dramatic eficiența sistemului, într-un interval de timp relativ scurt; randamentul diminuării emisiilor de oxizi de azot nu depășește 30...35% în condițiile în care motorul funcționează în diferite regimuri de sarcină și turație.

Catalizatorii de tip SCR permit obținerea unor randamente mai mari în ceea ce privește diminuarea emisiilor de oxizi de azot (60...70%). În acest caz se utilizează un agent care reacționează preferențial (sau selectiv) cu NO_x; agentul reducător (amoniac sau uree) este injectat în gazele arse evacuate [38].

În stare liberă amoniacul (NH₃) este toxic și din acest motiv se utilizează o soluție pe bază de apă și uree (CO(NH₂)₂), conținutul de uree fiind de aproximativ 32,5%. Această soluție este stabilă din punct de vedere chimic; denumirea comercială, în Europa, a acestei soluții de uree este **AdBlue**.

Pentru a putea respecta limitele impuse de standarde pentru emisiile poluante motoarele Diesel actuale sunt echipate cu următoarele sisteme de post-tratare a gazelor de evacuare (fig. 1.130):

- catalizator de oxidare (reducere CO, HC, NO, conversie NO);
- catalizator SCR (reducere NO, NO₂);
- catalizator de oxidare amoniac (reducere NH₃ rezidual);
- filtru de particule.

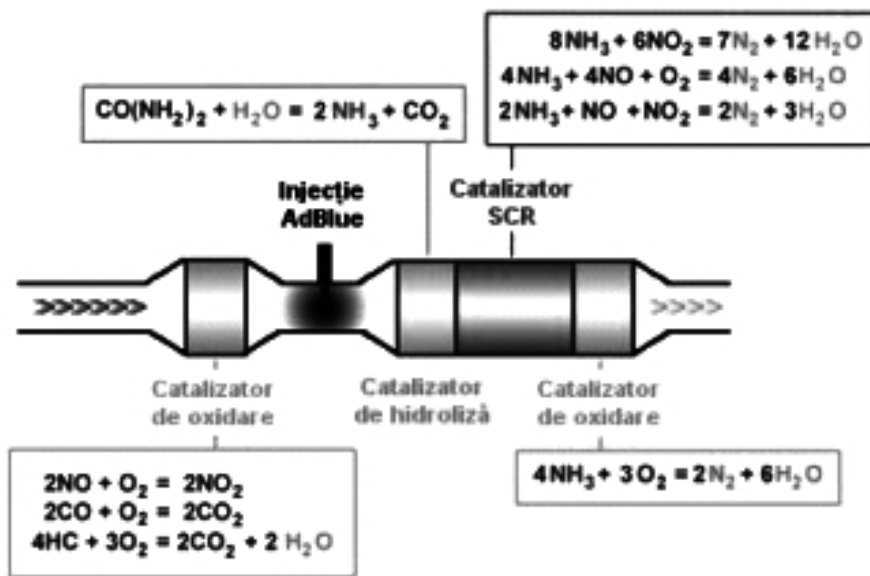


Fig. 1.130. Sistem catalitic de tip SCR³⁸

În catalizatorul de oxidare au loc reacțiile de reducere a hidrocarburilor (HC), monoxidului de carbon (CO) și a oxizilor de azot (NO):

$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$: monoxidul de azot (NO) se combină cu oxigenul (O₂) și rezultă bioxid de azot (NO₂);

$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$: monoxidul de carbon (CO) se combină cu oxigenul (O₂) și rezultă bioxid de carbon (CO₂);

³⁸ <http://www.e-automobile.ro/>

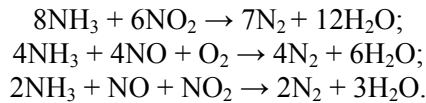
$4\text{HC} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$: hidrocarburile neare (HC) sunt convertite în bioxid de carbon (CO_2) și apă (H_2O), în prezența oxigenului (O_2)

După catalizatorul de oxidare are loc injecția de uree, după care gazele și soluția AdBlue trec printr-un mixer (sită metalică care are rolul de a omogeniza amestecul) și intră în catalizatorul de hidroliză. Acesta are rolul de a extrage amoniacul (NH_3) din soluția AdBlue; amoniacul (NH_3) se obține prin două reacții, una de piroliză și a doua de hidroliză:

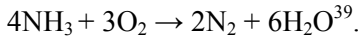
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HNCO}$ (piroliză): ureea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) este descompusă în amoniac (NH_3) și acid izocianic (HNCO);

$\text{HNCO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{CO}_2$ (hidroliză): acidul izocianic (HNCO) rezultat în urma reacției de piroliză, prin combinație cu apa (H_2O) formează amoniac (NH_3) și bioxid de carbon (CO_2).

În catalizatorul SCR au loc reacțiile de reducere a oxizilor de azot (NO și NO_2), cu ajutorul amoniacului (NH_3). În urma reacțiilor produsele rezultante sunt apa (H_2O) și azotul (N^2):



Catalizatorul de oxidare a amoniacului are rolul de a neutraliza, prin oxidare, amoniacul (NH_3) care nu a reacționat în interiorul catalizatorului SCR pentru că altfel acesta ar fi eliberat în atmosferă, având un impact toxic asupra mediului înconjurător.



Sistemul de injecție cu uree este relativ complex și implică costuri adiționale relativ mari; acesta conține un rezervor de uree, sistemul de alimentare cu pompă electrică, modulul electronic de control, injectorul și catalizatorul (fig. 1.131).

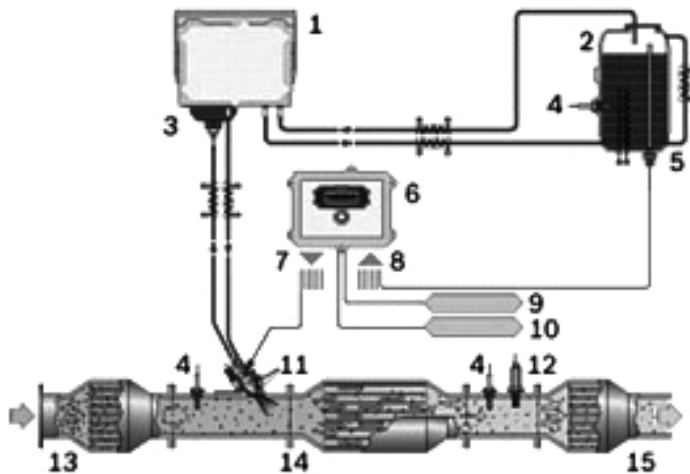


Fig. 1.131. Sistem Bosch de tratare a emisiilor de NO_x prin injecție de AdBlue⁴⁰

- 1-sistem de alimentare (pompă);
- 2-rezervor AdBlue;
- 3- filtru;
- 4-senzor de temperatură;
- 5-senzor de nivel soluție AdBlue;
- 6-modul electronic de control;
- 7-ieșiri modul electronic de control;
- 8-intrări modul electronic de control;
- 9, 10-porturi de comunicare și diagnostic;
- 11-injector AdBlue;
- 12-senzor de NO_x ;
- 13-catalizator de oxidare;
- 14-catalizator SCR;
- 15-catalizator neutralizare amoniac.

³⁹ http://nptel.ac.in/courses/112104033/pdf_lecture/lecture29.pdf

⁴⁰ <http://www.e-automobile.ro/>

Filtrele de particule realizează reducerea acestui tip de emisii poluante în două faze: în prima fază are filtrarea și acumularea particulelor (deoarece acestea sunt prea diluate pentru a putea arde), iar în a doua fază are loc regenerarea filtrului, când particulele colectate sunt oxidate (arse).

În principiu un filtru de particule (DPF – Diesel Particulate Filter) este format dintr-o carcasă (1, fig. 1.132) în care se găsește un corp ceramic monolit, poros, în care sunt executate canalele longitudinale (2), ce îi conferă un aspect de fagure; canalele sunt obturate alternativ cu obturatoarele ceramice (3) astfel încât reținerea particulelor are loc la trecerea gazelor dintr-un canal în altul prin pereții poroși ai monolitului.

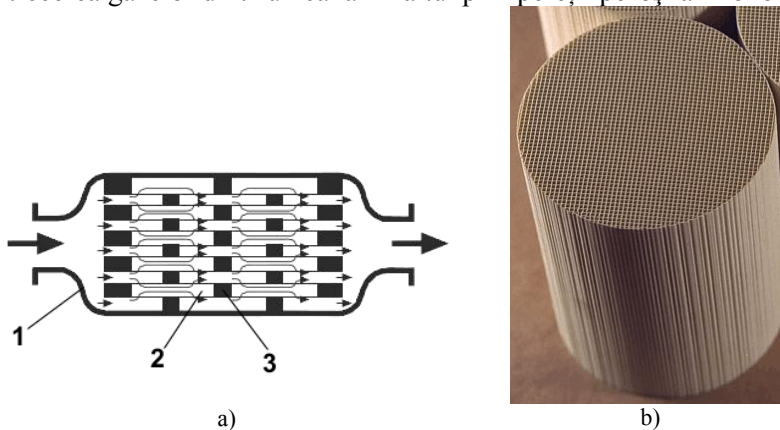


Fig. 1.132. Filtrul de particule

a) schema de principiu;
b) corpul ceramic monolit;
1-carcasă;
2-canale;
3-dopuri

În timp filtrul se colmatează cu particulele reținute și este necesară curățirea (regenerarea) acestuia. Atunci când temperatura gazelor de evacuare este de peste 540°C filtrul este curățat prin arderea particulelor acumulate, însă la motoarele cu aprindere prin comprimare temperatura gazelor de evacuare este, de obicei, insuficientă pentru a asigura regenerarea filtrului (fiind de aproximativ 300°C), ceea ce impune utilizarea unor metode speciale de regenerare. Totuși, în cazul motoarelor supraalimentate, la care temperatura gazelor de ardere este mai mare decât la motoarele cu aspirație normală, amplasarea filtrului de particule în imediata apropiere a racordului de refulare a turbinei asigură gazelor de ardere temperatura necesară pentru regenerarea filtrului, mai ales atunci când motorul funcționează în regimuri de sarcini și turații mari.

Regenerarea activă presupune utilizarea unei surse exterioare de căldură care să mărească temperatura gazelor ce trec prin filtru; aceasta poate fi o rezistență electrică sau un arzător care folosește același combustibil ca și cel utilizat de către motor. Prima variantă necesită echiparea autovehiculului cu o baterie de acumuloare de mare capacitate având în vedere faptul că rezistența electrică utilizată pentru regenerare trebuie să aibă o putere relativ mare (aproximativ 3 kW). În fig. 1.133 se prezintă o soluție constructivă de regenerare activă cu arzător; se observă existența unui ventilator (2) - care asigură aerul necesar arderii - și a arzătorului (5), alimentat cu combustibil prin intermediul electrovalvei (4) doar atunci când trebuie efectuată regenerarea. Pe durata regenerării doar o mică parte din gazele de ardere sunt evacuate prin filtrul de particule (6), cea mai mare ieșind în atmosferă prin amortizorul de zgomot (7), fără a mai trece prin filtru.

Regenerarea pasivă (catalitică) folosește catalizatori care să permită arderea particulelor la o temperatură mai scăzută; catalizatorul poate fi introdus în combustibil

sau poate fi depus în filtru [38].

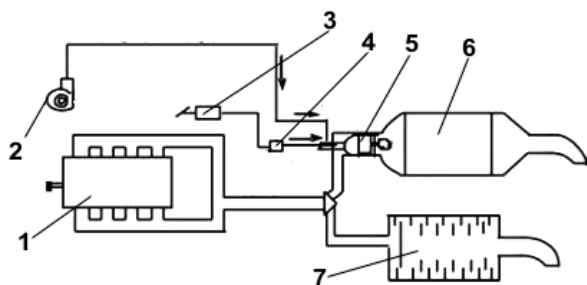


Fig. 1.133. Sistem pentru regenerarea activă a filtrului de particule

- 1-motor;
- 2-ventilator,
- 3-pompă de alimentare cu combustibil;
- 4-electrovalvă;
- 5-arzător;
- 6-filtru de particule;
- 7-amortizor de zgomot.

Aditivii pentru combustibil, pe bază de Fe, Ce (ceriu), Mn, Zn, Cu, Pb coboară temperatura de aprindere a particulelor spre 300°C; aditivii sunt introduși în sistemul de alimentare cu ajutorul unui sistem automat, atunci când căderea de presiune pe filtrul de particule (din cauza acumulării particulelor) depășește o anumită valoare maximă.

În cazul depunerii catalizatorului în filtru una dintre metodele folosite este care utilizează un catalizator de oxidare în amonte de filtrul de particule, astfel încât oxidul de azot din gazele de ardere să fie transformat în bioxid de azot (în prezența unui catalizator, de exemplu platină), care apoi să asigure oxidarea (arderea) particulelor din filtru la temperaturi mai scăzute (aproximativ 300°C):

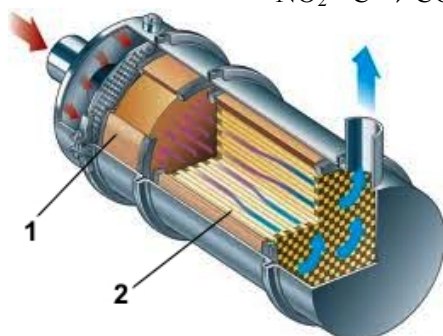
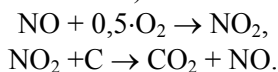


Fig. 1.134. Filtru de particule catalitic (sistem CRT⁴¹)

- 1-catalizator de oxidare;
- 2-filtru de particule.

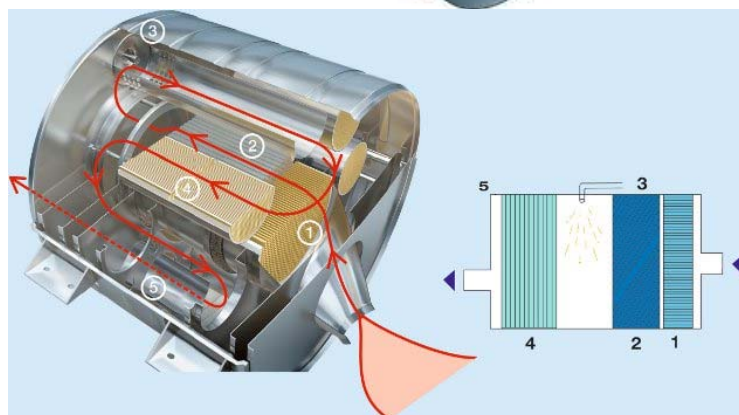


Fig. 1.135. Sistem integrat de tratare a gazelor de ardere

- 1-catalizator de oxidare;
- 2-filtru de particule;
- 3-injector uree;
- 4-catalizator SCR;
- 5-amortizor de zgomot.

⁴¹ CRT: Continuously Regenerating Trap; <http://ect.jmcatalysts.com/Continuously-regenerating-trap-CRT-johnson-matthey>

Fig. 1.135 prezintă schema unui sistem integrat de tratare a gazelor de ardere care asigură reducerea emisiilor de particule, a celor de oxizi de azot și a zgomotului prin integrarea subansamblurilor respective într-o carcasă comună.