

ANALYSIS OF EXHAUST AFTERTREATMENT SYSTEMS FOR VEHICLES¹

Krasimir Kirilov –PhD Student

Department of of Engines and Vehicles,
University of Ruse “Angel Kanchev”
Tel.: +359 894 781 087
E-mail: kkirilov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Ivan Evtimov, PhD

Department of Engines and Vehicles,
“Angel Kanchev” Univesity of Ruse
Phone: 082 888 527
E-mail: ievtimov@uni-ruse.bg

***Abstract:** The article analyzes the efficiency of the use of systems for additional processing of exhaust gases. These systems are installed with the main purpose of vehicles using fossil fuels to reduce to a certain extent the content of harmful to global warming emissions contained in the exhaust gases. The analysis is based on publications published in recent years related to the study of achievements in the field of reducing carbon and nitrogen oxides and fine particulate matter. A quantitative assessment has been made of the efficiency of the systems for additional processing of the exhaust gases obtained from the combustion of fossil fuels.*

***Keywords:** Exhaust Aftertreatment Systems, Energy Consumption*

ВЪВЕДЕНИЕ

Отделянето на вредни емисии от автомобилите по време на тяхната експлоатация зависи основно от използването гориво, разхода на гориво и системите за последваща обработка на отработените газове. През последните години, съгласно приетите евростандарти за допустимите емисии в отработените газове, редица производители на автомобили усъвършенстваха системите си за допълнителна обработка на отработените газове. Следователно количеството съдържание на вредните емисии в съвременните автомобили зависи до голяма степен от конструктивната особеност на системите за допълнителна обработка на отработените газове (B. Apicella et al, Elsevier, 2020; Ramakrishnan, G., K. Naveen, Journal, 2016; Shinichi Ishizuka et al, МАТЕС, 2016). Това налага да се направи анализ на съществуващите система за допълнителна обработка, тяхната ефективност в намаляване емисиите в отработените газове, за да може реално да се оцени влиянието на автомобилите в процесите на глобалното затопляне през целия им жизнен цикъл.

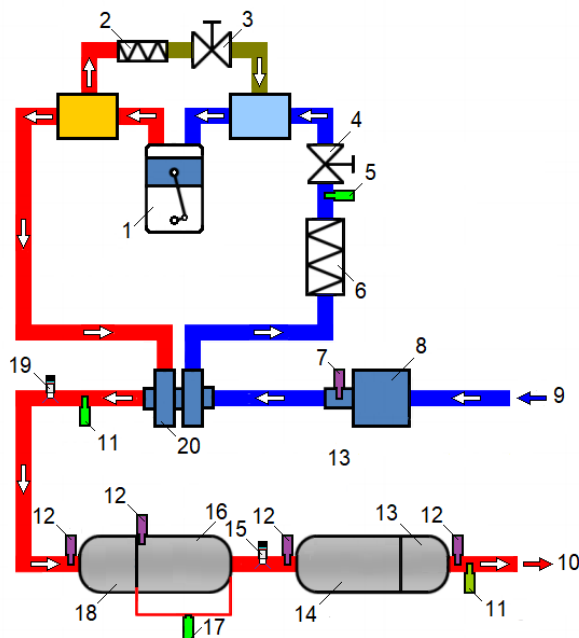
ИЗЛОЖЕНИЕ

Днес автомобилите са отговорни за замърсяването на въздуха в градските райони и към проблемите с глобалното затопляне. Бензиновите и дизеловите автомобили отделят различни замърсители, въглеродни и азотни съединения, придружени с фини прахови частици (PM) (B. Apicella et al, Elsevier, 2020). Това изисква последваща обработка на отработените газове, което да намали съдържанието на вредни емисии, съгласно изискванията на европейските стандарти. Особено напоследък са повишени много изискванията към дизеловите автомобили с последиствие към тяхното спиране от производство.

¹ Докладът е представен на 27 октомври 2021 с оригинално заглавие на български език: АНАЛИЗ НА СИСТЕМИТЕ ЗА ДОПЪЛНИТЕЛНА ОБРАБОТКА НА ОТРАБОТЕНИТЕ ГАЗОВЕ ЗА АВТОМОБИЛИ

Последваща обработка на отработените газове на дизелов двигател

На фиг. 1 е показва принципна схема на системата за последваща обработка на отработените газове на дизелов двигател (Shinichi Ishizuka et al, MATEC, 2016), където синьото и червеното означават съответно смукателната и изпускателната система. Дизеловите прахови частици DPM (Diesel Particulate Matter) се улавят и натрупват в дизелов филтър 16 за твърди частици DPF (Diesel Particulate Filter) и може да бъдат изгорени, когато натрупването достигне определено ниво.



Фиг. 1. Принципна система за последваща обработка на отработените газове на дизелов двигател: 1 – ДВГ; 2 – EGR охладител; 3 – EGR клапан; 4 – всмукателна дроселна клапа; 5 – MAP сензор; 6 – охладител; 7 – MAF сензор; 8 – въздухоочистител; 9 – вход на атмосферен въздух; 10 – изход на отработените газове; 11 – NO_x сензор; 12 – температурни сензори; 13 – CUC катализатор; 14 – SCR катализатор; 15 – инжектор на урея; 16 – DPF филтър; 17 – сензор за налягане; 18 – DOC катализатор; 19 – инжектор за въглеводородни добавки; 20 – турбокомпресор с променлива геометрия

Едно от ограниченията за дозиране на урея в SCR (Selective Catalytic Reduction) са прекомерните емисии на амоняк, което може да наложи внедряване на катализатор 13 за окисляване на амоняка (CUC – Clean Up Catalyst). CUC е монтиран по веригата след SCR катализатора 14.

NO_x се разлагат във вода и азот чрез селективна каталитична редукция SCR при подходяща температура за ускоряване на химичната реакция. Постига се чрез впръскване на урея с инжектора 15. Уреята е органично азотно съединение с химична формула (NH₂)₂CO, съдържащо карбонилна група, прикрепена към две аминогрупи с осмотична диуретична активност. Известна е също като карбамид или DEF разтвор. Впоследствие се хидролизира в амоняк и въглероден диоксид. След това амонякът се разпада на безвреден NO_x, като се редуцира до вода и азот чрез следните химични реакции



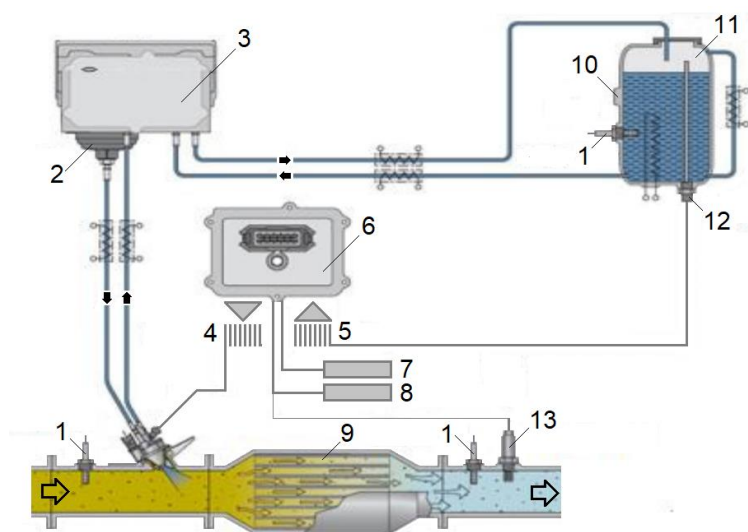
Количеството инжектирана DEF трябва да се контролира за да съответства на концентрацията на NO_x. Недостатъчната концентрация на урея води до непълна обработка на NO_x, като се има предвид, че твърде много урея причинява изтичане на вреден амоняк в околната среда. Тук наличието на NO_x сензорно устройство, което измерва действителната концентрация на NO_x, е наречено „NO_x твърд сензор” (NO_x hard sensor), докато сензор, който изчислява концентрацията на NO_x от други фактори се нарича „NO_x мек сензор” (NO_x soft sensor).

soft sensor). При конвенционалния метод „NO_x твърд сензор” се използва по време на стационарни операции, а „NO_x мек сензор” по време на преходни операции.

MAP и MAF сензорите изпращат информация за налягането на въздуха към ECU на двигателя, който контролира съотношението на гориво-въздушната смес. EGR клапанът контролира потока на отработените газове от изпускателния колектор във всмукателния колектор.

SCR система с DEF

Системата използва съществуващата конструкция на двигателя [18], катализатор за дизелово окисляване (DOC – Diesel Oxidation Catalyst–) и DPF, с допълнителен SCR хардуер. Тази технология позволява на двигателя да работи при оптимални температури на горене, което увеличава горивната ефективност и надеждност. Основните компоненти на SCR системата (фиг. 2) са SCR катализаторът, DEF инжекционната единица, DEF резервоар за съхранение и контролният блок DCU за дозиране на DEF. Системата се възползва от управлението със затворен цикъл, когато се използват подходящи сензори за отработени газове.



Фиг. 2. Устройство на SCR система с DEF:

- 1 – температурни сензори; 2 – филтър; 3 – захранващ DEF модул; 4 – действащ механизъм; 5 – сензори; 6 – блок за дозиране (DCU); 7 и 8 – CAN (Controller Area Network) мрежи; 9 – катализатор; 10 – цензор за качество; 11 – резервоар за уреята; 12 – сензор за ниво; 13 – цензор за контрол на амоняк

Контролът със затворен цикъл на дозиране в SCR системата дава възможност тя да бъде устойчива на смущения и да отговаря на съответствието на производството (conformity of production – COP) и нормите на съответствие в употреба.

DEF (Diesel Exhaust Fluid) е разтвор на пречистена (деминерализирана) вода и урея (висококачествен карбамид) в съотношение 67,5/32,5%. Известна е с наименованията AdBlue, AUS 32 (Aqueous Urea Solution 32), органично азотно съединение, което се превръща в амоняк при нагряване. Когато DEF се инжектира в изпускателната тръба след двигателя, топлината на отработените газове на двигателя разлагат DEF на амоняк и CO₂. При изпарен DEF отработените газове влизат в каталитичен конвертор, разположен в изпускателната система след DPF. Каталитичният конвертор съдържа катализатор, който е вещество, което ускорява химична реакция. Когато NO_x реагира вътре в катализатор с амоняк, вредните молекули NO_x в отработените газове се превръщат в безвредни азот и водни пари. Така следствие на DEF могат да се намали с 90% съдържанието на NO_x в ауспуха на дизеловите двигатели.

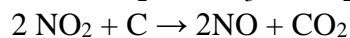
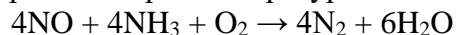
Селективното каталитично редуциране с инжектиране на DEF вече е доказана технология, която използва основно химически процеси за намаляване на емисиите на NO_x чрез процес, който е прост, изключително ефективен, много надежден и безопасен.

Следват уравнения за реакция на SCR за автомобилната урея [8]:

– разлагане на DEF;



– SCR реакции при температура от 150 до 550 °C.



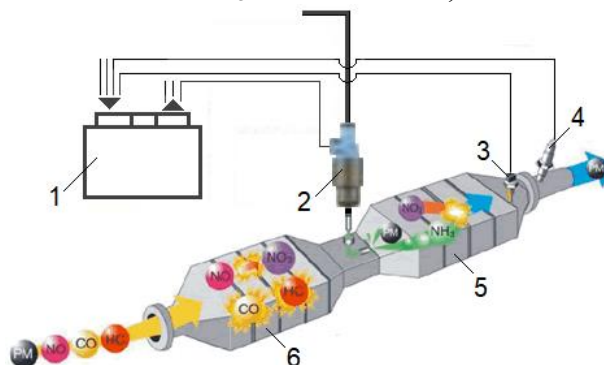
SCR система с амоняк (NH₃)

Селективна каталитична редукция (SCR) на NO_x, използваща амонячно съединение (фиг. 3) като редуктор се използва дълги години в както в стационарни така и в мобилни приложения с дизелови двигатели. В този случай NO_x реагират с амоняка, който се инжектира в потока отработени газове преди специален SCR катализатор [18].

Основната химическа реакция, която протича в SCR система с амоняк, е показана е показана с уравнението



SCR процесът с амоняк изисква прецизен контрол на скоростта на инжектиране на амоняк. Недостатъчно инжектиране може да доведе до неприемливо ниски конверсии на NO_x. Стехиометричното съотношението NH₃/NO_x е около 1,0.



Фиг. 3. Принципна схема на SCR система с NH₃:

1 – контролен блок; 2 – дозиращ клапан (пулверизатор); 3 – температурен сензор;
4 – сензор за отработени газове; 5 – SCR катализатор; 6 – оксидиращ катализатор

SCR система с амоняк за автомобилните дизелови двигатели работи по същия начин както SCR система с урея, с изключение на системата за контрол на впръскването. Системата за контрол е конфигурация с отворен контур, където се използва предварително програмирана карта на емисиите на NO_x, контролирайки скоростта на инжектиране на амоняк. Тази конфигурация с отворен контур е способна на около 95% NO_x намаления. Автомобилната индустрия признава, че предлага най-ефективното SCR решение за мобилни приложения.

Системата се състои от сензори за температура на отработените газове, температура на входящия въздух, информация за натоварването на двигателя, обороти на двигателя, обратно налягане на отработените газове, електронен блок за управление (ECU) и SCR конвертор. ECU отговаря за контрола на количеството амоняк, което се инжектира за максимално намаляване на NO_x и включва система за диагностика (On Board Diagnostic – OBD).

ECU изчислява правилното количество необходим амоняк, като "чете" информацията, доставяна от различните сензори и сравнява тези стойности с подходящата точка на фабрично програмирана ECU карта. Системата за диагностика гарантира, че евентуалните течове на амоняк не са останали неоткрити и OBD системата алармира оператора на автомобила за всякакви проблеми. Високо качество електромагнитните клапани осигуряват автоматично изключване на подаването на амоняк в случай на неизправности.

SCR системите за амоняк имат няколко предимства пред SCR системите с DEF:

- климатична съвместимост при ниска температура, амонякът се инжектира директно в отработените газове, за разлика от DEF, която първо се нуждае от топлина, за да се разложи на амоняк.
- предимство по отношение на инфраструктурните проблеми,
- по-висок процент на конверсия и по-малка и по-малко сложна система.

SCR система с твърд редуктор – амониев карбамид

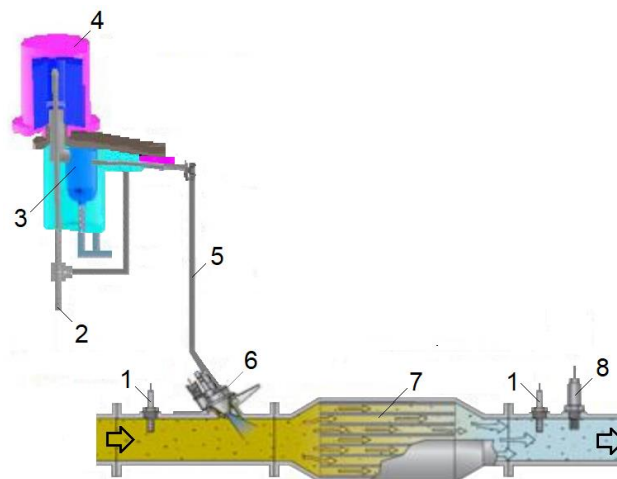
Всяка SCR система, базирана на течен амоняк, ще има допълнителна маса около 180 kg, добавена към масата на автомобила. Това води по повишен разход на гориво и други допълнителни разходи. SCR система с твърда урея та е жизнеспособна алтернатива на системата за инжектиране на течна урея. С намаляване на обема от приблизително 70%, SCR системата с твърда урея все още предлага еквивалентна или по-добра производителност от системи с течна урея.

Изследователска компания за енергийни технологии и ДВГ (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren – FEV) са инвестирали значителни ресурси в разработването на солидна SCR последваща обработка технологии и през 2009 г. Тази технология, SCR система с твърд редуктор за дизелови двигатели, предлага висок потенциал, поради своите предимства на комплектуването и факта, че тя не представя същите проблеми с ниската температура, които съществуват при системите с течна урея.

SCR система с твърда редуктор може да бъде адаптирана към по-стари автобуси и товарни автомобили и да ги доведе до съвременните стандарти за емисии.

Основният принцип на работа на тази технология е същият като системите за инжектиране на карбамид. Амонякът реагира с NO_x в отработените газове, за да го превърнат в азот и вода. Там, където се различава, е източникът на амоняк. Вместо воден разтвор на карбамид, който се инжектира в потока отработени газове, се използва твърдо вещество известно като амониев карбамид, който е страничен продукт от производството на торове.

Амониевият карбамид се съхранява в контейнер, подобен на масления филтър (фиг. 4).



Фиг. 4. Устройство на SCR система с твърда урея: 1 – температурни сензори; 2 – захранване от помпата; 3 – дозиращ клапан; 4 – реактор; 5 – захранващ тръбопровод; 6 – дюза; 7 – катализатор; 8 – цензор за контрол на амоняк

Малко количество от дизеловото гориво се прекарва през контейнера след нагряване до само 60°C , което води до амониев карбамид за сублимиране директно в газообразен амоняк. Амонякът и дизелът се прекарват през масления сепаратор за възстановяване на горивото. Амонякът се инжектира в отработените газове поток, за да реагира с NO_x .

SCR система с твърда урея по обем е три пъти по-малка от тази на течната редуктор DEF. Силидната система осигурява по-лесно боравене и не изисква отопляеми резервоари за съхранение, които трябва да предпазят карбамида от замръзване при студено време.

SCR система с твърда редуктор по обем е три пъти по-малка от тази на DEF. Солидната система осигурява по-лесно боравене и не изисква отопляеми резервоари за съхранение, които трябва да предпазят карбамида от замръзване при студено време.

Количеството редуктор, което трябва да се инжектира в отработените газове, зависи от няколко фактора:

- концентрация на NO_x в отработените газове;
- температура на отработените газове;
- общ състав и дебит на отработените газове;
- селективност и способност за адсорбция на амоняк в катализатора.

Амониевият карбамид е избран като основен редуктор сред възможните варианти. Едно основната причина за това решение беше, че то се сублимира при 60° С, което води до относително високи скорости на сублимация при по-ниски температури. Този процес също е обратим: в затворена система охлаждането на газовата фаза ще доведе до образуването на амонячен карбамид. Този процес гарантира че количеството амоняк, което временно се съхранява в затворената система, е много ниско.

В табл. 1 е дадено съотношението на масата на различните редуктори към единица маса NO.

Таблица 1

Съотношение на масата на различните редуктори към единица маса NO

Редуктор	Течен амоняк	Твърд редуктор	Разтвор на карбамид (34,4/65,6)%	Амониев карбамид
Маса/NO, g	0,57	1	2,9	1,3
Обем, cm ³	0,93	0,75	3,0	0,81
Плътност, g/cm ³	0,61	1,34	0,97	1,6

Технология на окисление на HC, CO – DOC

Дизеловият катализатор за окисляване – DOC (Diesel Oxidation Catalyst) е жизненоважен за правилното функциониране на DPF. Той е разположен директно пред DPF. Ако не се обслужва правилно ще затрудни нормалното функциониране на DPF. Този катализатор използва кислород в потока отработени газове, за да преобразува въглеродния оксид във въглероден диоксид и въглеродните във вода и въглероден диоксид



За съжаление този тип катализатори са ефективни едва на 90%, и успяват да премахнат миризмата на дизел и да намалят видимите частици, но не са ефективни за намаляването на емисиите от NO_x.

Дизеловите двигатели отработват газове, които съдържат относително високи нива на прахови частици (сажди), които се състоят в голямата си част от елементарен въглерод, с който DOC катализаторите не могат да се справят, затова се налага частиците да се отстраняват с помощта на филтъра за твърди частици – DPF.

Катализаторите за окисляване на дизеловото гориво са ефективни при превръщането на разтворимата органична фракция SOF (Soluble Organic Fraction) от дизелови прахови частици във въглероден двуокис и вода, обикновено могат да постигнат 25% до 40% от целия редуционен процес.

Технология на окисление на частици

Катализаторите за окисляване на частици (POC – Particle Oxidizing Catalysts) са устройства, които могат да улавят и съхраняват въглероден PM материал за период от време, достатъчен за неговото каталитично окисление, като същевременно имат отворени проходни канали, които позволяват на отработените газове да преминават, дори ако задържащият капацитет на PM е наситен. Уловените частици трябва да бъдат отстранени от устройството чрез окисляване до газообразни продукти, в процес, наречен регенерация. POC регенерацията обикновено се осъществява чрез реакции между сажди и азотен диоксид,

генерирани в катализатор NO₂ нагоре по веригата. Противно на дизеловия филтър за твърди частици (DPF), POC няма да се запуши, след като бъде напълнен със сажди до максималния си капацитет при липса на регенерация.

Катализаторите за окисляване на частици е технология за контрол на емисиите на РМ, която има ефективност на контрол по-висока от тази на DOC, но по-ниска от дизеловите филтри за твърди частици. Тези устройства могат да използват различни видове субстрати и са известни с няколко имена: протичащи филтри FTF (Flow-through filters), филтри за частичен поток (PFF), технология за частичен филтър PFT (Partial filter technology) и др.

Оксидиращи катализатори за двигатели с природен газ (CNG)

За да се постигнат ограничаване на емисиите, системите за последваща обработка се използват все по-често в приложения на двигатели с природен газ (Kati Lehtoranta, Springer, 2016). Двигателите с природен газ (NG) се използват в световен мащаб в производството на енергия, в превозните средства и все по-често с приложения в морския транспорт. Повишената наличност на природен газ, увеличаване на цените на горивата, както и на все по-строгите законодателства за емисиите стимулират използването на природен газ. Освен това, което е важно, използването на природен газ може да доведе до по-ниски емисии на CO₂ в сравнение с конвенционалните течни изкопаеми горива. Въпреки че приложенията за изгаряне на NG имат ясни предимства в сравнение с конвенционалните течни изкопаеми горива, двигателите с природен газ също произвеждат вредни емисии с ефекти и върху здравето.

Метанът е основният вид въглеродород, изпускан от NG двигатели. Тъй като метанът е потенциален парников газ, емисиите му трябва да бъдат сведени до минимум. Друг важен компонент, открит в емисиите на NG двигател, е формалдехидът, токсично съединение, което е опасно дори в ниски концентрации. Той може да се отделя от двигатели с природен газ като продукт на непълно изгаряне, най-вече поради частичното му окисление.

За да се намалят въздействията върху околната среда и здравето, системите за последваща обработка на отработените газове също ще се използват все по-често в приложения на двигатели с природен газ. Катализаторите на окисление за двигателите с природен газ с бедно изгаряне са проектирани главно да окисляват CO и неметанови въглеродороди (и формалдехид). За да се окисли метан е необходим високоефективен катализатор MOC (methane oxidation catalyst). MOC използва платина-паладий в съотношение 1:4. Една от възможностите за допълнително намаляване на NO_x от NG двигателите е методът на селективна каталитична редукция (SCR). Друга технология е използването на само един катализаторен реактор OXICAT-х, поставен подобно на SCR катализатора.

Нивата на CO след веригата на двете катализаторни настройки при всички условия на изпитване бяха ниски. Най-висока ефективност при намаляване на CO от 96,5% е постигната след „OXICAT-х“ в режим при температура 350° C. При температури от 400° C и по -високи, намаляването на CO в двете катализаторни системи е 98-99%.

Трипътен катализатор (окислително – редукиционен каталитичен конвертор)

Този тип катализатор (Ramakrishnan, G., K. Naveen, Journal, 2016) намира приложение в почти всички съвременни автомобили (фиг. 5). Той изпълнява едновременно три задачи:

- редуцира азотния окис до азот и кислород;
- окислява въглеродния окис до въглероден двуокис;
- окислява неизгорелите въглеродороди до въглероден двуокис и вода.

Тъй като изпълнява и двата етапа на катализация - редуциране и окисация, този тип каталитичен конвертор изпълнява задачата си с ефективност до 98%. А това означава, че ако автомобилът ви е снабден с такъв катализатор, вие няма да замърсявате околната среда с вредни емисии.

В действителност се използват комбинирани технологии за последваща обработка на отработените газове, както е показано на фиг. 1, чрез обединяване на различните катализатори в едно тяло (Mikael Larsson, JM, 2014) различни комбинации

$$\text{DOC} + \text{CSF} + \text{SCR} + \text{ASC} = \text{SCRT} \quad (1.9)$$

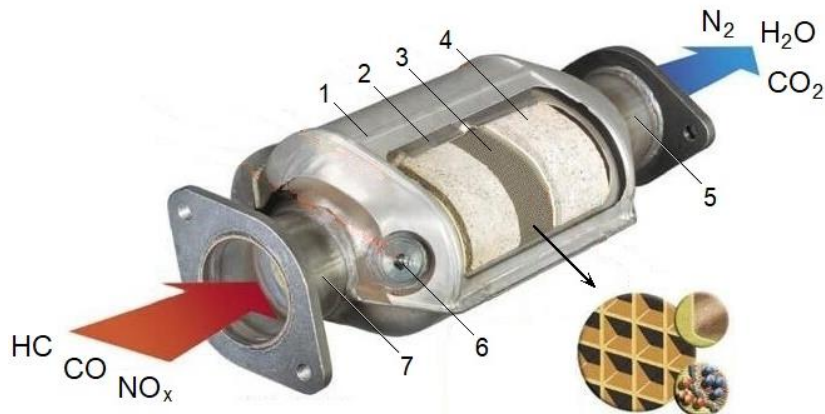
$$\text{DOC} + \text{CSF} + \text{SCR} = \text{SCRF} \quad (1.10)$$

$$\text{DOC} + \text{CSF} = \text{CRT} \text{ или } \text{CCRT}, \quad (1.11)$$

където ASC (Ammonia Slip Catalyst) е катализаторът с амоняк;

CSF (Catalysed Soot Filter – каталитичният филтър за сажди;

(SCR coated filter) = DPF+SCR с амоняк (NH₃).



Фиг. 5. Устройство на трипътен катализатор: 1 – корпус; 2 – вътрешно тяло на субстрата; 3 – субстрат; 4 – топлоизолационни опаковки; 5 – кислороден цензор; 5 – изходяща тръба; 7 – входяща тръба

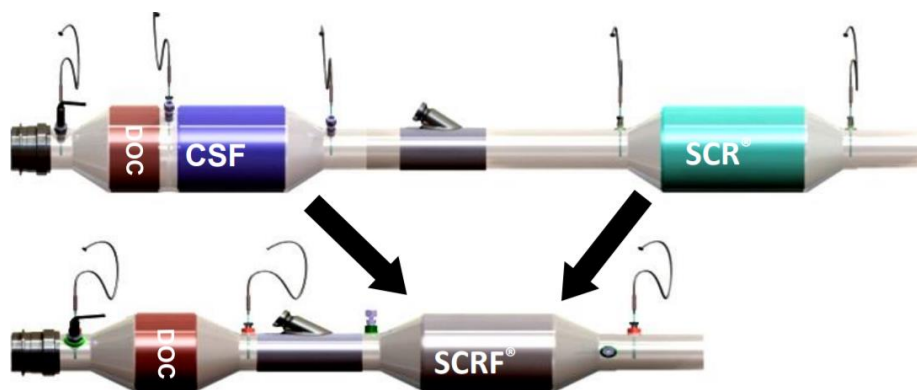
Комбинацията SCR+ASC се използва за двигатели с високо съдържание на NO_x и ниско съдържание на РМ без използване на EGR. Максимална ефективност на редуциране на NO_x в някои системи е > 98%.

Системите с DOC за полезни при ниски температурна активност. Използват се също за регенериране на филтър и за насърчаване нискотемпературната активност на SCR системите.

SCR премахва NO_x чрез селективна реакция с амоняк.

CSF улавяне и изгаря пасивните и активните сажди, а ASC - следите от амоняк след SCR катализатора.

На фиг. 6 е показана две възможни комбинации в технологиите за последваща обработка на отработените газове. Основната идея, свързана със системата за последваща обработка, е да се трансформират вредните емисии на отработените газове в CO₂, H₂O и N₂. За да се получи този резултат, трябва да се предизвика поредица от реакции, способни да преобразуват вредните емисии с ефективност над 90%.

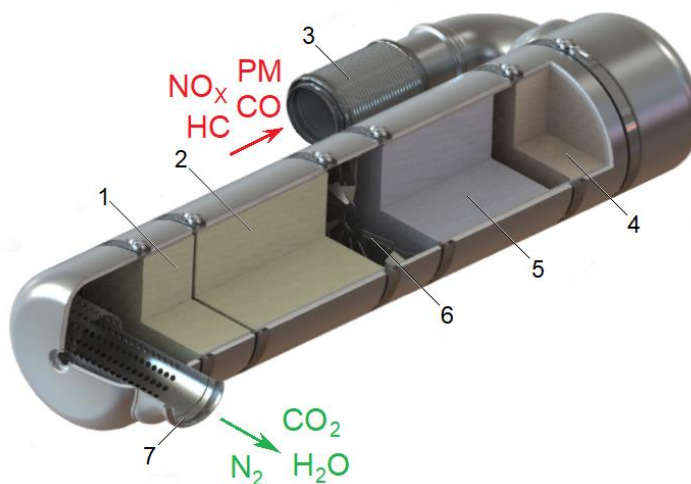


Фиг. 6. Системи за последваща обработка на отработените газове

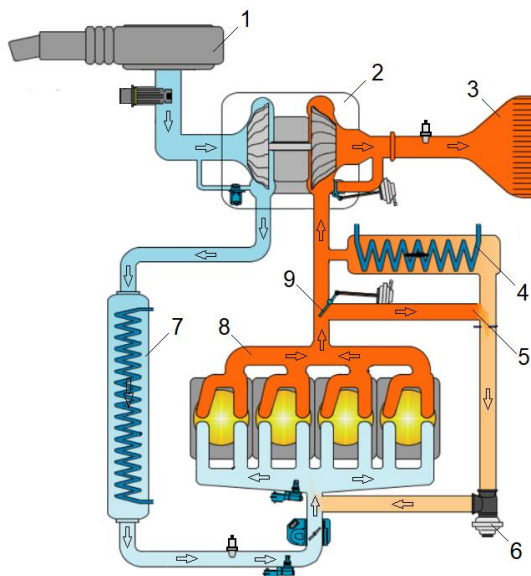
За дизелови двигатели, типично приложението включва DOC, тясно свързан с DPF, система SCR за намаляване на NO_x, с възможност за добавяне на почистващ катализатор CUC (Clean Up Catalyst) за окисляване на NH₃ (фиг. 7). Това обединение позволява реализирането на компактно устройство, което да отговаря на изискванията на съвременните стандарти.

Рециркулация на отработените газове

Все по-строгите регулации за емисиите изискват постоянно подобряване на методите за намаляване на замърсяването. За дизеловите двигатели това се отнася особено за по-нататъшно намаляване на азотните оксиди (NO_x). Това може да се постигне и чрез т. н. рециркулацията на отработените газове EGR (Exhaust Gas Recirculation). Принципната схема на EGR е показана на фиг. 8.



Фиг. 7. Устройство на комбинирана система за последваща обработка на отработените газове на дизелов двигател: 1 – CUC; 2 – SCR; 3 – входяща тръба; 4 – DOC; 5 – DPF; 6 – дозираща система; 7 – изходяща тръба



Фиг. 8. Принципна схема на система EGR с открит клапан: 1 – въздушен филтър; 2 – турбокомпресор; 3 – каталитичен конвертор; 4 – EGR охладител; 5 – байпасен канал; 6 – EGR клапан; 7 – охладител; 8 – колектор на отработените газове; 9 – байпасен клапан

Благодарение на охлаждането, температурите в горивната камера са по-ниски, както и нивото на образуване на азотни оксиди. Съществуват различни модули за охлаждане на EGR, които имат електрически или пневматично превключващи байпасни клапани.

Байпасният клапан 9 позволява отвеждането на отработените газове да преминава през EGR охладителя във фазата на загряване, така че двигателят и каталитичният конвертор 3 да постигнат по-бързо работната си температура.

Благодарение на рециркулацията на отработените газове концентрациите на NO_x могат да бъдат намалени до 50%, а съдържанието на сажите приблизително с 10%.

ИЗВОДИ

Въз основа на направения анализ могат да се направят следните изводи:

1. За намаляване съдържанието на вредни емисии в отработените газове през последните години намират приложение различни системи за последваща обработка на отработените газове с ефективност над 90%.

2. За оценка на отделените вредни емисии на автомобилите през целият им жизнен цикъл е необходимо по-задълбочено да се анализират тези системи с използване на различни горива, за да може реално да се оценят предимствата и недостатъците на тези превозни средства спрямо нарастващата експлоатация на тези, задвижвани с електрическа енергия.

REFERENCES

Barbara Apicella, Ezio Mancaruso, Carmela Russo, Antonio Tregrossi Maria, Maddalena Oliano, Anna Ciajolo, Bianca Maria Vaglieco. Effect of after-treatment systems on particulate matter emissions in diesel engine exhaust, ELSEVIER, Volume 116, 2020, p. 8

Jonathan Zhang. Diesel Emission Technology – Part II of Automotive After-treatment System, Diesel Emission Technology, http://www.bowmannz.com/yahoo_site_admin/assets/docs/DieselEmissionTechnology.93160107.pdf (Accessed on 09.10.2021).

Kati Lehtoranta, Timo Murtonen, Hannu Vesala, Päivi Koponen, Jenni Alanen, Pauli Simonen, Topi Rönkkö, Hilikka Timonen, Sanna Saarikoski, Teuvo Maunula, Kauko Kallinen, Satu Korhonen. Natural Gas Engine Emission Reduction by Catalysts, Springer International Publishing Switzerland 2016

Mikael Larsson. Aftertreatment solutions for Tier4 and beyond. Emission control technologies, JM, 2014. <https://futurepowertrains.co.uk/2014/presentations/Mikael-Larsson.pdf> (Accessed on 09.10.2021).

Ramakrishnan, G., K. Naveen. Emission and Dynamic Characteristics of Three Way Catalytic Converter by Computational Fluid Dynamics. International Journal of Engineering Science and Computing, Volume 6, No 11, 2016, pp. 3 503 – 3 510

Shinichi Ishizuka, Itsuro Kajiwara, Junichi Sato, Yoshifumi Hanamura. Adaptive NO_x Soft Sensor for Aftertreatment of Diesel Engines. MATEC Web of Conferences 42, Hokkaido University in St. Louis, Japan 2 ISUZU Motors Limited, Japan, 2016, p. 5.

Докладът отразява резултатите от работата по проект 2021-ТФ-02, финансиран от Националния научен фонд на Русенския университет