ARCHIWUM MOTORYZACJI
4, pp. 167–180 (2003)

Wpływ filtroreaktora na emisję toksycznych substancji ze spalinami silnika o zapłonie samoczynnym

MAREK SWAT

Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu

W pracy przedstawiono wyniki badań własnych wpływu filtroreaktora jako integralnego urządzenia, w którym do utleniania separowanych cząstek stałych wykorzystuje się efekt redukcji energii aktywacji przez katalityczne oddziaływanie NO_2, na inne toksyczne składniki spalin silnika o zapłonie samoczynnym.

1. Wprowadzenie

Świadomość ciągłego obniżania norm emisji cząstek stałych PM w spalinach silnikowych powoduje, że dużego znaczenia nabiera problem adaptacji istniejących konstrukcji silników i ich układów wylotowych. Takim środkiem, skutecznie spełniającym aktualne i projektowane normy emisji PM, może być system antysadzowy [1]. Wydaje się, że w najbliższych latach największe szanse powodzenia mają środki skutecznie separujące cząstki PM ze spalin, a nie środki ograniczające generowanie emisji cząstek stałych. Pojęcie „antysadzowy" jest umowne (z racji „sadzy silnikowej" jako głównego składnika cząstek PM) i wprowadzone do oznaczenia systemu zdolnego do separowania cząstek stałych w spalinach i umożliwiającego destrukcję odseparowanych cząstek. I tu pojawia się problem właściwego skojarzenia źródła emisji PM (silnik, jego układ wylotowy) i systemu antysadzowego.

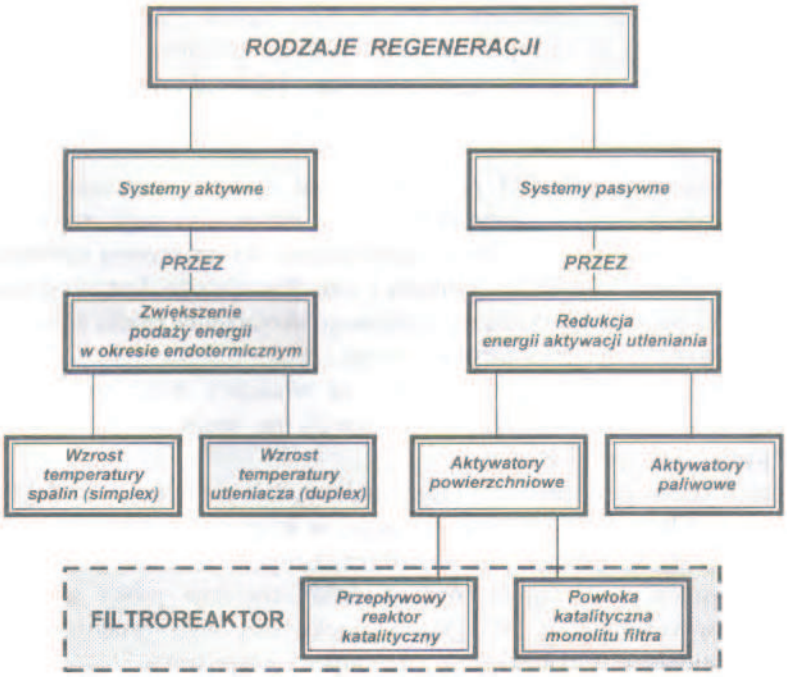
Z badań własnych [1, 2, 3, 4] wynika, że właściwy dobór technologii filtracji i regeneracji w systemie antysadzowym pozwala na spełnienie aktualnych i nowo projektowanych norm emisji PM.

Największe szanse powszechnego stosowania wydają się mieć technologie wykorzystujące elementy filtracyjne typu osadnikowego, w których separowanie cząstek PM ze spalin dokonuje się w porowatych wielokanalikowych monolitach z ceramiki kordierytowej. Prowadzi się ostatnio również dość skuteczne próby separowania PM w monolitach wykonanych z SiC [5], o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej i przewodności cieplnej, w porównaniu z ceramiką kordierytową.

Cząstki stałe PM na powierzchni typowego filtra spalin utleniają się w temperaturze 500 do 600°C. Warunki niezbędne do oksydacji cząstek, gdy temperatura spalin

przekracza 500°C, występują rzadko w warunkach normalnej eksploatacji silnika, głównie w warunkach jego wysokiego obciążenia. Systemy regeneracji filtra spalin można ogólnie scharakteryzować jako pasywne lub aktywne [6, 7]. Systemy aktywne monitorują „budowanie" cząstek w filtrze i okresowo inicjują spalanie cząstek za pomocą elektrycznych elementów grzejnych bądź palników węglowodorowych. Mają zastosowanie głównie w systemach jednofiltrowych, gdzie inicjowanie utleniania PM odbywa się głównie przez podwyższenie temperatury spalin. Systemy pasywne (rysunek 1) to głównie pokrycia katalityczne monolitu filtra lub katalityczne aktywatory do paliw (zwłaszcza cer, miedź, żelazo), których zadaniem jest redukcja energii aktywacji utleniania cząstek PM, dzięki czemu regeneracja (przynajmniej częściowa, zwłaszcza w systemie simplex) filtra może zostać zainicjowana (także samoczynnie) w warunkach częściowego obciążenia silnika. Z reguły w obecnych układach antysadzowych stosuje się kombinację obu systemów: aktywnego i pasywnego. Z badań własnych [1] wynika, że zastosowanie powłok katalitycznych w filtrach spalin na tyle redukuje energię aktywacji, że pozwala to na obniżenie temperatury samozapłonu cząstek o ponad 100°C podobnie jak dodatki aktywatora Cu.

Zastosowanie filtroreaktora spalin pozwala obecnie w największym stopniu na redukcję energii aktywacji utleniania, a tym samym na minimalizację energochłonności procesu regeneracji. Podstawowym, wyjściowym, parametrem przy określaniu kryteriów optymalizacyjnych destrukcji jest masa cząstek PM odseparowanych w procesie filtracji. Jej wielkość decyduje o charakterze prowadzonego procesu, doborze i parametryzacji samej technologii regeneracji.



Rys. 1. Systemy regeneracji filtrów spalin.
Fig. 1. Regeneration systems of exhaust gases filter.

2. Filtroreaktor spalin

Filtroreaktor spalin silnikowych jest umownym oznaczeniem połączenia dwóch integralnych urządzeń technicznych (utleniającego reaktora katalitycznego i filtra spalin) służących ograniczeniu emisji cząstek stałych. W tym ujęciu reaktor katalityczny nie jest klasycznym reaktorem utleniającym CO i HC, ale głównie konwertorem NO na NO_2 do takiego poziomu stężenia NO_2, aby maksymalnie obniżyć temperaturę samozapłonu separowanych w filtrze cząstek stałych [8].

Zastosowanie filtroreaktora [8] umożliwia prowadzenie procesu regeneracji z niewielkim udziałem dodatkowej energii zewnętrznej (ok. 90% oszczędności energetycznych w odniesieniu do dotychczasowych procesów regeneracji), a warunki jakie stwarza dwutlenek azotu (na optymalnym poziomie emisji) dla samozapłonu sadzy ok. 250÷300°C istnieją w normalnych warunkach eksploatacji w układzie wylotowym silnika o zapłonie samoczynnym. Dzięki temu proces samoregeneracji odbywa się jednocześnie z procesem filtracji i nie wymaga dodatkowych układów sterowania i regulacji.

Sposób rozwiązania problemu polega na wykorzystaniu efektu redukcji energii aktywacji utleniania sadzy w atmosferze NO_2, stworzeniu pierwszych ognisk samozapłonu w temperaturze ok. 300°C do kontrolowanego przemieszczania strefy utleniania cząstek (obszaru reakcji) w objętości monolitu filtra.

W normalnych warunkach eksploatacji silnika stężenie NO_2 w jego spalinach jest zbyt niskie (prawdopodobnie dwukrotnie), aby inicjować proces samozapłonu sadzy. Efekt utleniania NO na NO_2 w układzie wylotowym (na odcinku komora spalania — filtr spalin) jest niewielki, gdyż w istniejących temperaturach czas trwania reakcji jest zbyt długi. Dysocjacja N_2O_4 na NO_2 w układzie wylotowym wymaga dodatkowej porcji energii (ok. 23 J/mol) [9], gdyż stosunek NO_2/N_2O_4 w ich mieszaninie jest w określonej temperaturze wielkością stałą.

Ponieważ w spalinach silnikowych spośród tlenków azotu oznaczonych sumarycznie jako NO_x najwięcej jest tlenku azotu, należy przyspieszyć jego reakcję utleniania do NO_2 w obecności katalizatora utleniającego, wykorzystując tlen (a jest go wystarczająca ilość) znajdujący się w spalinach.

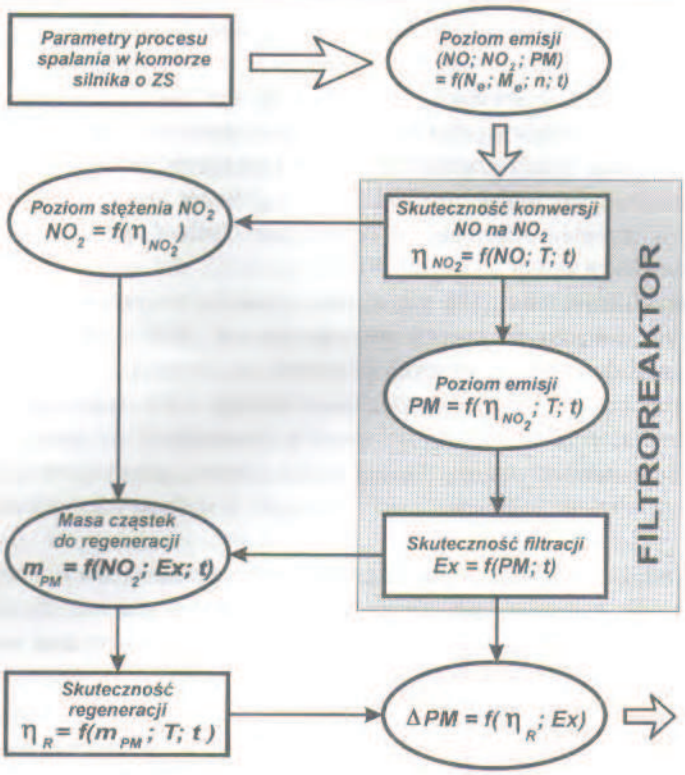
Filtroreaktor spalin jest przykładem aplikacji pasywnego systemu regeneracji, gdzie redukcja energii aktywacji utleniania (rysunek 1) cząstek stałych odbywa się głównie przez powierzchniową aktywację katalityczną konwertora utleniającego NO do NO_2.

Filtroreaktor spalin może być również połączeniem dwóch aktywatorów powierzchniowych, tj. utleniającego reaktora katalitycznego i katalitycznej powłoki monolitu filtra. Na rysunku 2 przedstawiono zasadę działania filtroreaktora spalin.

W prezentowanym schemacie można wyróżnić podstawową zależność decydującą o skuteczności działania filtroreaktora, tj.:

$$m_{PM}=f(NO_2;\ E_x;\ t), \tag{1}$$

oznaczającą zależność masy cząstek stałych separowanych na filtrze od jego skuteczności filtracji i stężenia dwutlenku azotu w spalinach po przejściu przez reaktor utleniający.



Rys. 2. Schemat zasady działania filtroreaktora spalin.
Fig. 2. The function basis scheme of the filter-reactor.

Taki zapis sugeruje ograniczenie wielkości emisji cząstek stałych PM już w samym katalitycznym reaktorze utleniającym, a poziom tej emisji zależał by głównie od skuteczności konwersji NO do NO_2, temperatury i czasu:

$$\mathrm{PM} = f(\eta_{\mathrm{NO}_2};\ T;\ t). \tag{2}$$

Na ile ta sugestia jest słuszna, trudno na tym etapie znajomości zagadnienia dać odpowiedź twierdzącą. Najprawdopodobniej pozytywne oddziaływanie konwertora utleniającego na obniżenie temperatury początku utleniania cząstek stałych ma podwójny charakter. Z jednej strony ogranicza on poziom emisji cząstek stałych, z drugiej redukuje energię aktywacji utleniania cząstek w obecności optymalnego stężenia NO_2. Dlatego w opisie schematu działania filtroreaktora wprowadzono ogólną zależność:

$$\Delta m_{\mathrm{PM}} = f(\eta_R;\ E_x), \tag{3}$$

oznaczającą zmianę (pozostałą po regeneracji) masy cząstek stałych w filtroreaktorze, zależną od skuteczności filtracji separatora i skuteczności regeneracji „wewnętrznej".

W tym ujęciu regeneracja „wewnętrzna" oznacza jednoczesne oddziaływanie konwertora utleniającego na ograniczenie emisji cząstek stałych i inicjowanie początku utleniania separowanych w filtrze cząstek w temperaturach eksploatacyjnych (ok. 300°C), dzięki redukcji ich energii aktywacji utleniania przez NO_2. Który z tych czynników ma znaczenie dominujące trudno obecnie sprecyzować, zwłaszcza że proces filtracji spalin i regeneracji (utleniania cząstek) odbywa się w sposób ciągły i w dynamicznie zmiennych warunkach eksploatacji silnika (zmiany temperatur, emisji cząstek stałych PM, NO, NO_2, O_2 itd.).

3. Konstrukcja filtroreaktora

Do badań silnikowych przyjęto model konstrukcyjny filtroreaktora z przepływowym filtrem cząstek stałych i utleniającym reaktorem katalitycznym o monolitach ceramicznych, pracującymi w układzie szeregowym.

Na elementy filtracyjne i reaktory katalityczne do realizacji systemu dobrano monolity z ceramiki kordierytowej firmy Corning. Biorąc pod uwagę podstawowe parametry eksploatacyjne filtra i reaktora, wybrano na filtry — monolity o wymiarach 5,66″×6″ z powłoką katalityczną CuV, w trzech odmianach skuteczności filtracji E_x 47, E_x 54 i E_x 66, o gęstości kanalików 100 cpsi, i średnich wartościach mas osadnikowych 12g, 35g i 40g. Do budowy reaktora katalitycznego wybrano monolity o wymiarach 4″×6″ o gęstości kanalików 200 cpsi. Monolity pokryto substancją katalityczną Pt/Pd (firma Hereus) o gęstości 34 g/ft^3.

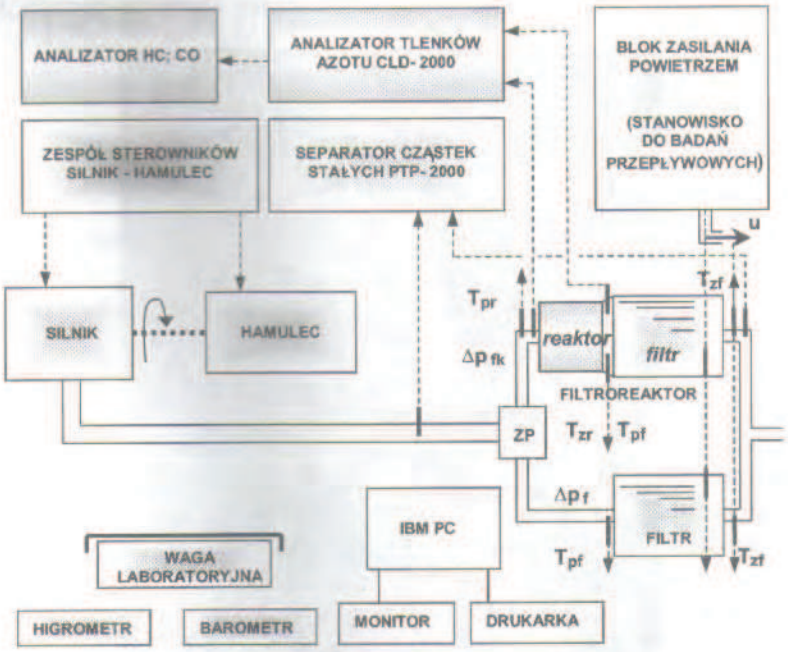
Rys. 3. Konstrukcja filtroreaktora na stanowisku badawczym.
Fig. 3. The filter-reactor construction on the research place.

4. Stanowisko badawcze

Jako źródła emisji spalin użyto silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 pracującego w standardowym układzie hamownianym (rysunek 4). Układ wylotowy silnika wyposażono w filtroreaktor, pracujący w równoległym układzie dwufiltrowym z filtrem spalin bez reaktora katalitycznego, gdzie w jednym z odgałęzień „by-pass" zamiast samego filtra spalin zastosowano filtroreaktor. Jako podstawowe kryterium wyboru takiego rozwiązania przyjęto możliwość badania na stanowisku silnikowym jednocześnie samego filtra i filtroreaktora, przez które przepływają praktycznie „te same" spaliny. Układ wylotowy zbudowano tak, że umożliwiał również pracę systemu w układzie z samym filtroreaktorem.

Pomiaru emisji PM, NO_X, NO_2, HC i CO w spalinach dokonywano zgodnie z wymaganiami znormalizowanego testu 13-fazowego.

Do układu wylotowego silnika montowany jest przewód pomiarowy, z którego sonda pobiera próbki spalin do analizatorów gazowych i do mikrotunelu rozcieńczającego. Do określania emisji cząstek stałych ze spalinami metodą grawimetryczną zastosowano system PTP-2000, emisji NO_X i NO_2 system CLD-2000 firmy Pierburg, umożliwiające wyznaczanie charakterystyk emisji cząstek PM, NO_X i NO_2 ze spalinami w różnych warunkach pracy silnika.



Rys. 4. Schemat funkcjonalny stanowiska badawczego u — powietrze do separatora; Δp_f - i Δp_{fk} — różnica ciśnień na filtrze i filtroreaktorze; T_{pr}, T_{pf} i T_{zf} — temperatury: przed reaktorem, przed filtrem, za filtrem, ZP — zawór przełączający kierunek przepływu spalin.

Fig. 4. The research place functional scheme.

Do pomiarów stężeń HC i CO wykorzystano analizator typu FTIR, model Gastester MHD-218 (firmy Hermann).

Pomiarów stężeń poszczególnych składników spalin dokonywano (podobnie jak poboru próbek masy cząstek stałych) przed filtroreaktorem, za reaktorem katalitycznym i za filtroreaktorem.

Do pomiarów tlenków azotu użyto analizatora chemiluminescencyjnego CLD PM-2000 (firmy Pierburg), wykorzystującego zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego towarzyszące reakcji tlenku azotu z ozonem, która zachodzi jedynie w warunkach zbliżonych do absolutnej próżni. Dwutlenek azotu jest w stosunku do ozonu obojętny i oznaczenie go w analizie chemiluminescencyjnej jest niemożliwe, dlatego w konwertorze przeprowadzany jest jego termiczny rozkład (ok. 923 K) na NO. Dzięki konwertorowi analizator służy do łącznego oznaczenia tlenków azotu NO_x w przeliczeniu na NO. Ponieważ realizacja badań wymagała konieczności oddzielnego oznaczania NO i NO_2 analizy przeprowadzano dwukrotnie: z odłączonym konwertorem — mierząc stężenie NO, i włączonym konwertorem — mierząc stężenie łączne. Wielkość stężenia NO_2 określano jako różnicę między stężeniem łącznym a stężeniem tlenku azotu NO.

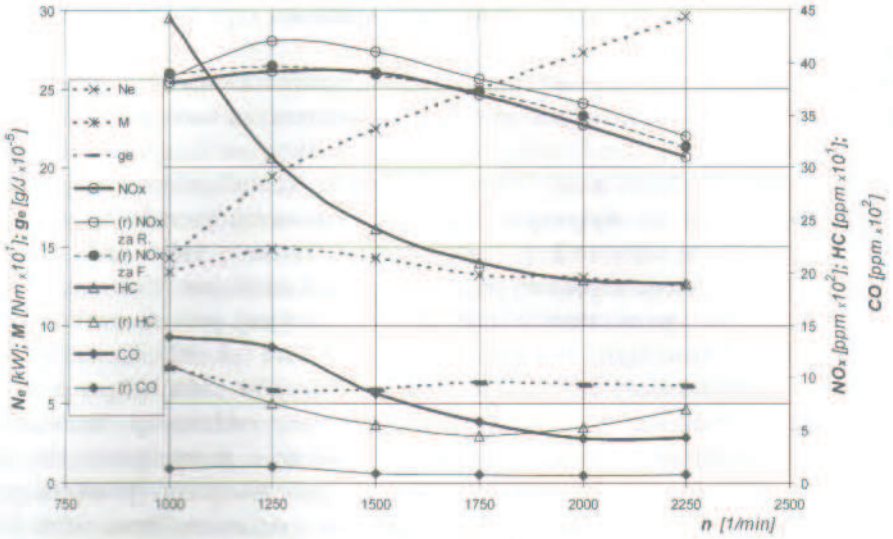
5. Wyniki badań

Filtroreaktor powoduje niewielki, mniejszy od 3 kPa spadek ciśnienia, co świadczy o niewielkim dławieniu spalin w układzie wylotowym, dzięki czemu wpływ filtroreaktora na parametry efektywne badanego silnika jest pomijalnie mały, bowiem istniejące różnice mieszczą się w zakresie niepewności pomiarów.

Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono wyniki bezpośrednich pomiarów, a na rysunkach 8 i 9 — wielkości wynikowe uzyskane podczas badań silnika AD 3.152 bez- i z filtroreaktorem (z zastosowanym reaktorem Pt/Pd) w warunkach badań charakterystyki eksploatacyjnej i obciążeniowej (obrotów maksymalnego momentu i obrotów maksymalnej mocy).

Skuteczność utleniania filtroreaktora, mierzona spadkiem stężeń tlenku węgla i węglowodorów w spalinach, jest wysoka w całym zakresie prędkości eksploatacyjnych silnika. Skuteczność utleniania CO osiąga wartości większe od 80%, a skuteczność utleniania HC większe od 70%. Stwierdzono wyraźną zależność skuteczności utleniania CO i HC od temperatury reaktora. Skuteczność utleniania wyraźnie wzrasta w zakresach średnich i dużych obciążeń silnika. Większe natężenia przepływu spalin wymagają wyższych temperatur reaktora dla zachowania tej samej skuteczności. Poniżej temperatury uruchomienia (inicjacji) reaktora ok. 250°C (w warunkach biegu jałowego i przy niewielkich obciążeniach) oddziaływanie filtroreaktora na skład emitowanych spalin (poza emisją cząstek stałych PM) jest niewielki.

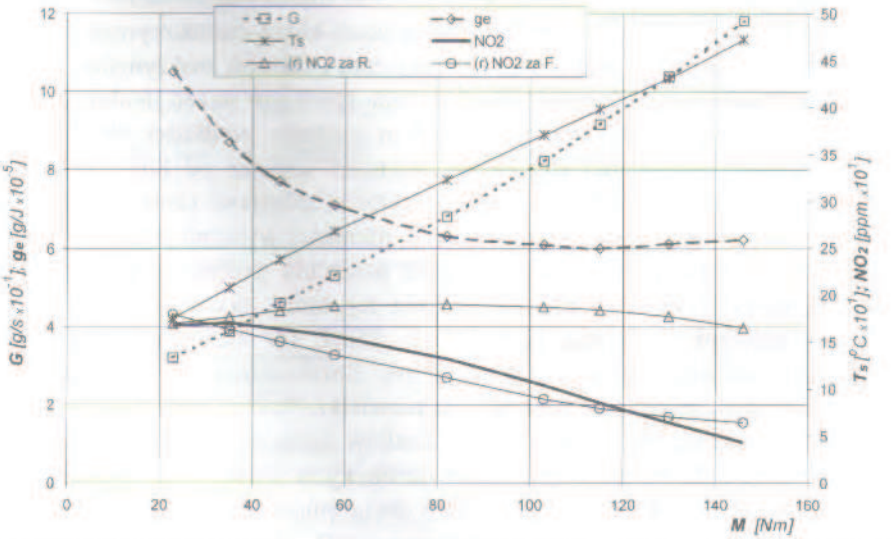
Stwierdzono nieznaczny wzrost stężeń tlenków azotu za reaktorem katalitycznym w badanych zakresach obciążeń i prędkości obrotowych silnika. Potwierdzają to zarówno badania charakterystyk zewnętrznych jak i obciążeniowych. Silnik AD 3.152 charakteryzuje się własnym, wysokim poziomem emisji NO_x, który za reaktorem katalitycznym dodatkowo nieznacznie wzrasta. Ale zaobserwowany wzrost stężenia NO_x dotyczy tylko reaktora (przebiegi z oznaczeniem „rNO_x za R." na rysunkach), ponieważ po



Rys. 5. Charakterystyka eksploatacyjna badanego silnika z filtroreaktorem (krzywe z oznaczeniem „(r)", gdzie: „za R" — za reaktorem, „za F" — za filtrem).

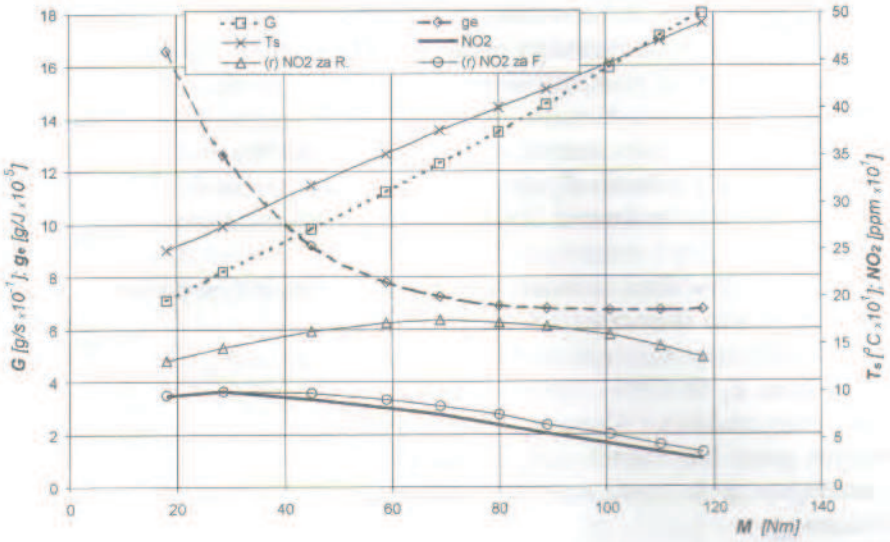
Fig. 5. The exploitation characteristic of the research engine with the filter-reactor.

przejściu przez filtr (przebiegi z oznaczeniem „rNO_X za F.) poziom stężenia tlenków azotu stabilizuje się praktycznie na poziomie przed reaktorem. Można więc ogólnie stwierdzić, że filtroreaktor nie zmienia poziomu stężenia NO_X w spalinach badanego silnika, a wzrost stężenia NO_X za reaktorem jest spowodowany oczekiwaną zmianą struktury emisji tlenków azotu i wzrostem (głównie) stężenia dwutlenku azotu, co widać na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Stężenie NO_2, charakterystyka obciążeniowa obrotów maksymalnego momentu (dla filtroreaktora z oznaczeniem „(r)", gdzie: „za R" — za reaktorem, „za F" — za filtrem).

Fig. 6. NO_2 quantities, load characteristic of rotation max. moment.



Rys. 7. Stężenie NO_2, charakterystyka obciążeniowa obrotów maksymalnej mocy, (dla filtroreaktora z oznaczeniem „(r)", gdzie: „za R" — za reaktorem, „za F" — za filtrem).
Fig. 7. NO_2 quantities, load characteristic of rotation max. power.

Stwierdzono, że w spalinach standardowego układu wylotowego silnika stężenie NO_2 jest niewielkie, średnio na poziomie 5% do 7% sumarycznego stężenia NO_X, największe w zakresie małych obciążeń silnika (dochodzi nawet do 18%), później gwałtownie spada by w zakresie maksymalnego obciążenia osiągnąć wartość 0,5% do 1%. Po przepływie spalin przez zastosowany reaktor katalityczny stężenie NO_2 wzrasta od 2,6 do 4 razy maksymalnie.

Zaobserwowano wyraźną zależność wzrostu poziomu emisji NO_2 od temperatury pracy reaktora, także największy (4-krotny) wzrost stężeń uzyskano w warunkach maksymalnych obciążeń silnika.

Za filtroreaktorem poziom stężeń NO_2 w większości badanych obciążeń i prędkości obrotowych (poza biegiem jałowym) był mniejszy niż przed reaktorem, co pozwala wnioskować, że dwutlenek azotu został zużyty do przebudowy struktury bądź utlenienia separowanych w filtrze cząstek stałych.

Porównanie, wyznaczonych przy pomocy testu 13-fazowego, syntetycznych wartości emisji jednostkowych cząstek stałych, tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla przed i po zainstalowaniu filtroreaktora w układzie wylotowym badanego silnika wykazuje, że filtroreaktor w najkorzystniejszej konfiguracji (reaktor+E_x 47 — rysunek 9) powoduje:

- 97% zmniejszenie emisji jednostkowej cząstek stałych,
- 5% zmniejszenie emisji jednostkowej tlenków azotu,
- 80% zmniejszenie emisji jednostkowej węglowodorów,
- 91% zmniejszenie emisji jednostkowej tlenku węgla.

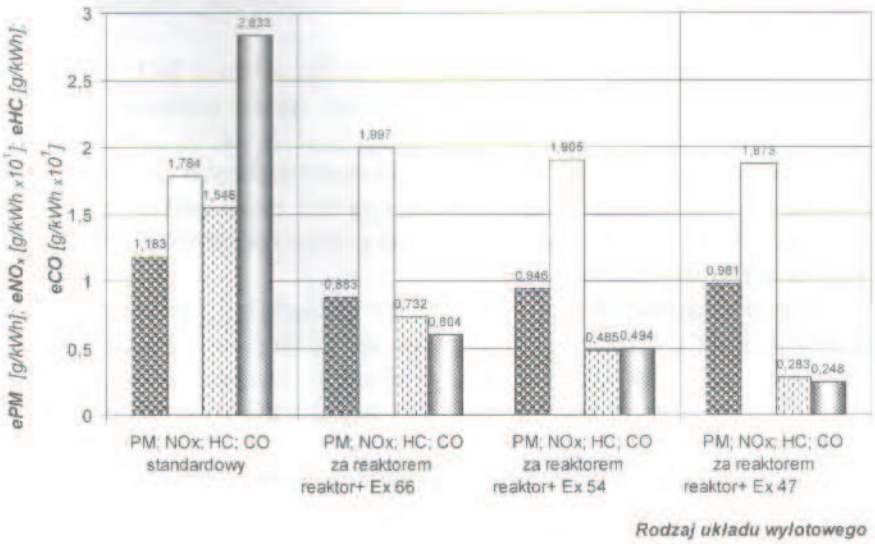
Przypadek 5% redukcji tlenków azotu miał miejsce jedynie w tym przypadku. Dla pozostałych konfiguracji filtroreaktora redukcja NO_X była na tyle mała, że można ją uznać za mieszczącą się w granicach niepewności metody pomiaru.

Zaobserwowano zjawisko kumulacyjnego wpływu reaktora i filtra w filtroreaktorze na ograniczenie emisji cząstek stałych PM i tlenku węgla. We wszystkich konfiguracjach filtroreaktora (dla odmian E_x filtra) obserwowano zmniejszenie emisji cząstek stałych i tlenku węgla za reaktorem, a filtr efekt ten powiększał (porównanie rysunków 8 i 9).

Kumulacyjny wpływ filtra na redukcję emisji CO był na stałym poziomie około 10% dla wszystkich odmian skuteczności filtracji E_x filtra.

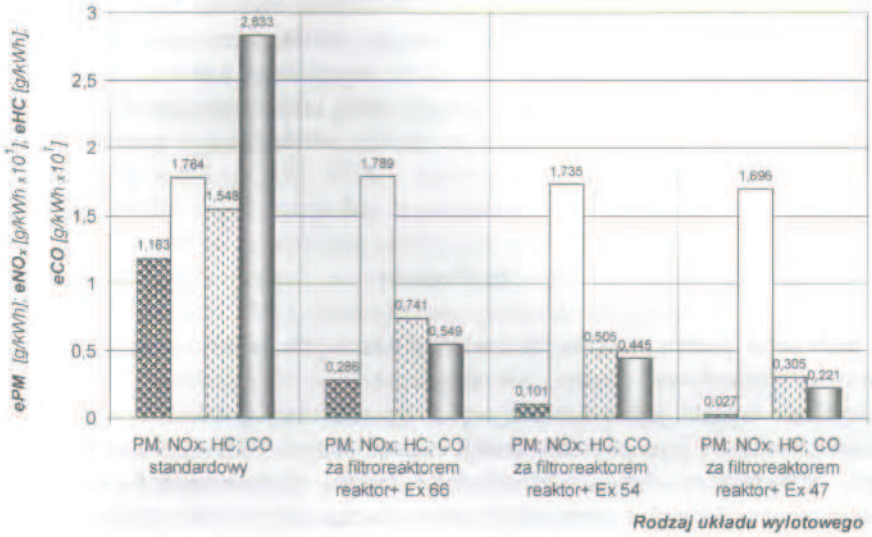
Reaktor katalityczny najwięcej redukuje CO w konfiguracji z filtrem E_x 47 (91%), najmniej z filtrem E_x 66 (79%). Można to tłumaczyć obserwowanym efektem wyższej temperatury pracy reaktora z filtrem E_x 47, w którym ma miejsce szybszy przyrost masy separowanych przez filtr cząstek stałych i niewielki (w porównaniu do E_x 66) wzrost oporów przepływu spalin (zwłaszcza dla warunków próbkowania w czasie rzeczywistym testu 13-fazowego).

Redukcja emisji przez reaktor w przypadku cząstek stałych ma odmienny charakter niż dla CO. Największą redukcję emisji zaobserwowano dla reaktora z filtrem E_x 66 (25%), a najmniejszą dla reaktora z filtrem E_x 47. Przy próbie tłumaczenia zjawiska możemy mieć do czynienia z dwojakiego rodzaju przypadkiem. W pierwszym, większa redukcja (dla odmian z mniejszymi skutecznościami filtracji E_x) może być pozorną, bo dla mniejszych skuteczności filtracji — mniejsze opory przepływu, krótszy czas przebywania cząstek stałych w przestrzeni między reaktorem i filtrem, a dla tego samego czasu próbkowania (w czasie rzeczywistym) w warunkach testu 13-fazowego w efekcie mniejsza masa cząstek do pomiaru grawimetrycznego. W drugim przypadku możemy



Rys. 8. Wyniki badań poziomu emisji silnika AD3.152 za reaktorem (dla wybranych warunków regulacji).
Fig. 8. The research results of level emission from AD3.152 engine, out off the reactor.

mieć do czynienia z rzeczywistą przebudową mikro- i makrostruktury cząstek stałych, zmianą ich gabarytów i składu chemicznego, zwłaszcza związanego z uwolnieniem ciekłej fazy „SOF" [10] i frakcji gazowej cząstek stałych. W rozpatrywanym przypadku, sama metoda pomiaru emisji (grawimetryczna) może być zbyt mało dokładna. Istota pomiaru polega na separowaniu emitowanych cząstek na specjalnych mikrofiltrach o standardowej wielkości mikroporów. Obserwowane zmniejszenie ilości cząstek za reaktorem (tym większe im mniejsza skuteczność filtracji filtra) może sugerować, że charakter emisji przesuwa się w zakres emisji nanocząstek i mikrofiltr pomiarowy nie jest w stanie separować cząstek o mniejszym wymiarze.



Rys. 9. Wyniki badań porównawczych poziomu emisji silnika AD3.152 za filtroreaktorem (dla wybranych warunków regulacji).

Fig. 9. The compare research results of level emission from AD3.152 engine, out off the filter-reactor.

Z ostatnio opublikowanych badań [11] rozkładu wielkości cząstek stałych i ich masy wynika, że prawie cała ilość cząstek stałych emitowanych przez silniki o zapłonie samoczynnym znajduje się w zakresie wielkości nanocząstek. Nanocząstki obejmują ponad 90% całkowitej liczby emitowanych cząstek stałych, natomiast pod względem masy stanowią one tylko (1÷20)% całkowitej masy cząstek wydalanych ze spalinami. Udział masy większości nanocząstek jest praktycznie pomijany.

Nie zaobserwowano kumulacyjnego wpływu filtra w filtroreaktorze na redukcję węglowodorów przez reaktor, a oddziaływanie to ma odwrotny charakter — filtr powoduje nieznaczny wzrost emisji HC. Nie tyle filtr co separowane w nim cząstki stałe, zwłaszcza uwalniana z nich faza SOF i frakcja gazowa na skutek katalitycznego oddziaływania NO_2.

Największą redukcję HC (82%) zaobserwowano dla reaktora w konfiguracji z filtrem E_x 47 (największa temperatura pracy reaktora w porównaniu z E_x 54 i 66). Dla tego

przypadku występował również największy (8%) przyrost emisji węglowodorów po przejściu spalin przez filtr. Jest to przypadek największego przyrostu masy cząstek stałych w czasie i jedynego (w badanych konfiguracjach), znacząco rejestrowanego (5%), zmniejszenia poziomu emisji NO_x, co może również potwierdzać udział NO_2 w przebudowie strukturalnej cząstek stałych i zmianie charakteru ich utleniania zwłaszcza w początkowej fazie.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wykazują właściwy dobór filtroreaktora do silnika w celu obniżenia jego poziomu emisji cząstek stałych. Zrealizowana konstrukcja spełnia aktualne normy nie tylko emisji PM, ale również HC i CO (rys. 9). Zastosowanie badanego filtroreaktora obniża poziomy emisji (poza emisją NO_x) do wartości określonych normą. Jedynym problemem jest wówczas wybór odmiany Ex filtra o odpowiednim stopniu filtracji, a co za tym idzie czas po jakim masa separowanych cząstek w filtrze osiągnie wartość osadnikową (lub tzw. krytyczną), która ze względów energetycznych, eksploatacyjnych, ekonomicznych (lub innych przyjętych za kryterium) pozwoli na jego skuteczną regenerację ze źródła zewnętrznego (podaż energii) lub wewnętrznego (reaktor katalityczny).

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań silnikowych zastosowanego filtroreaktora spalin można sformułować następujące wnioski:

- Uzyskane wyniki jednoznacznie wykazują właściwy dobór filtroreaktora do silnika w celu obniżenia jego poziomu emisji cząstek stałych PM, HC i CO. Zastosowanie badanego filtroreaktora obniża poziom emisji silnika (poza emisją NO_x) do wartości określonej normą. Jedynym problemem jest wówczas wybór odmiany E_x filtra o odpowiednim stopniu filtracji, a co za tym idzie czas po jakim masa separowanych cząstek w filtrze osiągnie wartość osadnikową.
- Skuteczność utleniania filtroreaktora, mierzona spadkiem stężeń tlenku węgla i węglowodorów w spalinach, jest wysoka w całym zakresie prędkości eksploatacyjnych silnika. Skuteczność utleniania CO osiąga wartości większe od 80%, a skuteczność utleniania HC większe od 70%. Stwierdzono wyraźną zależność skuteczności utleniania CO i HC od temperatury reaktora. Poniżej temperatury uruchomienia (inicjacji) reaktora ok. 250°C (w warunkach biegu jałowego i przy niewielkich obciążeniach), oddziaływanie filtroreaktora na skład emitowanych spalin (poza emisją cząstek stałych PM) jest niewielki.
- Stwierdzono nieznaczny wzrost stężeń tlenków azotu za reaktorem katalitycznym w badanych zakresach obciążeń i prędkości obrotowych silnika, po przejściu przez filtr poziom stężenia tlenków azotu stabilizuje się praktycznie na poziomie przed reaktorem. Można więc ogólnie stwierdzić, że filtroreaktor nie zmienia poziomu stężenia NO_X w spalinach badanego silnika, a wzrost stężenia NO_X za reaktorem jest spowodowany oczekiwaną zmianą struktury emisji tlenków azotu i wzrostem (głównie) stężenia dwutlenku azotu

• Zaobserwowano zjawisko kumulacyjnego wpływu reaktora i filtra w filtroreaktorze na ograniczenie emisji cząstek stałych PM i tlenku węgla. We wszystkich konfiguracjach filtroreaktora obserwowano zmniejszenie emisji cząstek stałych i tlenku węgla za reaktorem, a filtr efekt ten powiększał. Kumulacyjny wpływ filtra na redukcję emisji CO był na stałym poziomie około 10%.

• Redukcja emisji przez reaktor w przypadku cząstek stałych ma odmienny charakter niż dla CO, w tym przypadku możemy mieć do czynienia z rzeczywistą przebudową mikro- i makrostruktury cząstek stałych, zmianą ich gabarytów i składu chemicznego, zwłaszcza związanego z uwolnieniem frakcji gazowej cząstek. Obserwowane zmniejszenie ilości cząstek za reaktorem (tym większe im mniejsza skuteczność filtracji filtra) może sugerować, że charakter emisji przesuwa się w zakres emisji nanocząstek.

• Nie zaobserwowano kumulacyjnego wpływu filtra w filtroreaktorze na redukcję węglowodorów przez reaktor. Filtr powoduje nieznaczny wzrost emisji HC, a zwłaszcza separowane w nim cząstki stałe, głównie uwalniana z nich frakcja gazowa na skutek katalitycznego oddziaływania NO_2

• Największą redukcję HC (82%) zaobserwowano dla reaktora w konfiguracji z filtrem E_x 47. Dla tego przypadku występował również największy (8%) przyrost emisji węglowodorów po przepływie spalin przez filtr. Jest to przypadek największego przyrostu masy cząstek stałych w czasie i jedynego (w badanych konfiguracjach), znacząco rejestrowanego (5%), zmniejszenia poziomu emisji NO_X, co może również potwierdzać udział NO_2 w przebudowie strukturalnej cząstek stałych i zmianie charakteru ich utleniania zwłaszcza w początkowej fazie.

• Stwierdzono, że w spalinach standardowego układu wylotowego silnika stężenie NO_2 jest niewielkie, średnio na poziomie 5% do 7% sumarycznego stężenia NO_X, największe w zakresie małych obciążeń silnika (dochodzi nawet do 18%, później gwałtownie maleje). Po przejściu przez zastosowany reaktor katalityczny stężenie NO_2 w spalinach wzrasta od 2,6 do 4 razy maksymalnie, głównie w zakresie najmniejszej emisji w standardowych warunkach.

• Za filtroreaktorem poziom stężeń NO_2 w większości badanych obciążeń i prędkości obrotowych (poza biegiem jałowym) był mniejszy niż przed reaktorem, co pozwala wnioskować, że dwutlenek azotu został zużyty do przebudowy struktury bądź utlenienia separowanych w filtrze cząstek stałych.

• Prezentowane w opisie działania filtroreaktora ogólne zależności są słuszne, ale dokładny, funkcjonalny opis parametrów charakteryzujących skuteczność działania filtroreaktora wymaga dalszych badań modelowych i eksperymentalnych.

Literatura

[1] Swat M.: *Regeneracja filtrów spalin w silnikowych systemach antysadzowych*, Archiwum Motoryzacji, 4, 2002.

[2] Sobociński R., Swat M.: *Ograniczenie emisji cząstek stałych ze spalinami silników o zapłonie samoczynnym*. Problemy Eksploatacji, Zeszyty Naukowe ITeE, Radom, 2, 1997.

[3] Swat M. Madej K.: *Badania procesu regeneracji ceramicznych filtrów cząstek stałych dla różnej masy sadzy zgromadzonej w filtrze*. Problemy Eksploatacji, Zeszyty Naukowe ITeE, Radom, 3, 1997.

[4] SWAT M.: *Wpływ pojemności osadnikowej filtra cząstek stałych na jego proces regeneracji*, Kwartalnik Naukowy ILot, Wydanie Specjalne, IV Sympozjum EKODIESEL'98, Warszawa 1998.
[5] AWARA A.E., OPRIS C.N., JOHNSON J.H.: *A theoretical and experimental study of the regeneration process in silicon carbide particulate trap using a copper fuel additive*, SAE Paper No. 970188.
[6] CARTELLIERI W.P., TRITTHART P.: *Particulate analysis of light duty diesel engines (IDI&DI) with particular reference to the lube oil fraction*, SAE Paper No 840418.
[7] SWAT M.: *Niskoenergetyczna regeneracja samochodowych filtrów spalin*, 26 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silników Spalinowych „KONES 2000". Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
[8] HAWKER P., MYERS N. i inni: *Experience with a new particulate trap technology in Europe*, SAE Paper No. 970182.
[9] BERNHARDT M., MICHAŁOWSKA J., RADZIMIRSKI S.: *Motoryzacyjne skażenie powietrza*, WKŁ, Warszawa 1976.
[10] MERKISZ J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Tom 1 i 2. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
[11] ZABŁOCKI M., EKERT K.: *Emisja nanocząstek nowym wyzwaniem dla silników o zapłonie samoczynnym*, Kwartalnik Naukowy ILot, Wydanie Specjalne, IV Sympozjum EKODIESEL'98, Warszawa 1998.

The filter-reactor influence on toxic substance emission with diesel engine exhaust gases

Summary

An own research results of the filter-reactor influence on another toxic component of Diesel engine exhaust gases, as integral installation, in which the oxidizing activation energy reduction effect of catalyst NO_2 activity was used to oxidizing of separated particulate matter, were presented in this paper.