

Zbigniew Stępień, Stanisław Oleksiak
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Zagadnienia współdziałania pasywnej i aktywnej regeneracji filtrów cząstek stałych silników z ZS do autobusów miejskich

W artykule przedstawiono tendencje rozwoju systemów regeneracji DPF, stosowanych w silnikach ZS (zwłaszcza typu HD). Przeanalizowano zalety oraz wady systemów pasywnej i aktywnej regeneracji filtrów cząstek stałych, oceniając potencjał, jakim dysponują w przypadku wykorzystywania ich do retrofitingu starszych generacji silników typu HD. Opisano dotychczasowe, wybrane doświadczenia INiG w wyżej wymienionym zakresie, koncentrując się na problematyce możliwości współdziałania pasywnej i aktywnej regeneracji w układach ograniczających emisję cząstek stałych, stosowanych do silników z ZS autobusów miejskich. Szczególną uwagę zwrócono na właściwości użytkowo-eksploatacyjne przedmiotowych systemów, potwierdzone w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Joint action questions of passive and active DPF regeneration of city bus Diesel engines

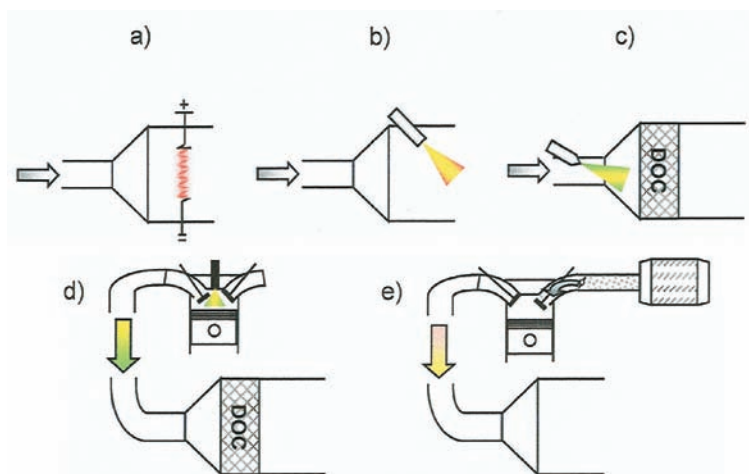
The paper presented development trends of DPF regeneration systems in HD Diesel engines. It has been analyzed advantages and disadvantages of passive and active DPF regeneration, evaluating its potential in cause of application to retrofitting of older HD Diesel engines generations. The selected experiences of Oil and Gas Institute has been described, focused on of joint action passive and active regeneration possibilities in PM reduction systems applied to city bus Diesel engines. Special attention has been brought to utility performance those systems confirmed in real service conditions.

Wstęp

Nieustanne, globalne zaostrożenie przepisów ograniczających emisję szkodliwych dla zdrowia człowieka i środowiska naturalnego składników gazów wylotowych z tłokowych silników spalinowych sprawia, że dalsze obniżanie zarówno masy jak i liczby emitowanych cząstek stałych (PM – *Particle Matter*) stanowi duże wyzwanie dla producentów silników, zwłaszcza z ZS. Wielokierunkowy rozwój systemów wtrysku paliwa oraz zmiany w przebiegu procesów spalania mogą wpływać na skład i budowę cząstek stałych, a w pewnym stopniu również na ich regulacje ilościowe i jakościowe, jednak nie rozwiązują problemu ich emisji. Zatem systemy następczej obróbki spalin, w tym w szczególności nowoczesne filtry cząstek stałych (DPF – *Diesel Particle Filter*), stanowią obecnie jedyny środek skutecznie zmniejszający przedmiotową emisję. Sprawność działania DPF, szacowana na 95-99% w zakresie całkowitej liczby zatrzymanych PM, i około 90-95% w zakresie całkowitej masy zatrzymanych PM nie budzi zastrzeżeń, natomiast stosowane obecnie systemy i strategie regeneracji filtrów cząstek stałych wciąż wymagają dalszego rozwoju.

Ogólnie, systemy regeneracji można podzielić na pracujące w sposób ciągły lub okresowy, przy czym sam proces regeneracji może być wspomagany przy wykorzystaniu

środków aktywnych lub pasywnych. W przypadku systemów aktywnych niezbędne jest dostarczanie do układu energii umożliwiającej dodatkowe podgrzewanie gazów spalinowych silnika przed DPF, natomiast systemy regeneracji pasywnej wykorzystują procesy katalitycznego obniżania temperatury zainicjowania i prowadzenia procesów wypalania PM. Począwszy od pierwszej generacji DPF, rozpowszechniły się różne rodzaje systemów regeneracji aktywnej. Do najbardziej popularnych można zaliczyć rozwiązania z elektrycznym modułem grzewczym; z palnikiem wykorzystującym silnikowe paliwo do okresowego ogrzewania gazów spalinowych przed DPF, z dławieniem powietrza w przewodzie dolotowym za pomocą przepustnicy w celu obniżenia współczynnika nadmiaru powietrza w mieszance palnej lub z dławieniem gazów wylotowych silnika w przewodzie wylotowym umożliwiającym podniesienie temperatury spalin przed DPF oraz z umieszczonym przed DPF katalizatorem utleniającym rozpylone przed nim paliwo (inicjującym spalanie węglowodorów), w celu monitorowanego ogrzania gazów spalinowych – rysunek 1. W tym ostatnim przypadku paliwo może być rozpylane przed DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) za pomocą dyszy specjalnego układu dozującego (w silnikach starszej ge-



Rys. 1. Systemy regeneracji aktywnej DPF

a) z elementem grzewczym, b) z palnikiem, c) z katalizatorem i układem rozpylającym paliwo, d) z katalizatorem współpracującym z układem wtryskowym *common rail*, e) z przepustnicą dławiącą przepływ powietrza

neracji albo przy retrofitingu) lub wykorzystując ostatnią fazę dzielonej dawki paliwa wtryskiwanego przy stosowaniu układów typu *common rail* (fabryczne rozwiązanie stosowane w wielu nowoczesnych silnikach).

W drugiej generacji DPF zaczęto wykorzystywać regenerację wspomaganą pasywnie, za pomocą dodatków typu FBC (*Fuel Born Catalyst*) dozowanych do paliwa lub katalitycznych pokryć ścianek monolitów filtrujących. W trzeciej generacji DPF coraz częściej realizuje się kombinacje syste-

mów regeneracji pasywnej i aktywnej sterowanych (w przypadku nowoczesnych silników) za pomocą PCM (*Powertrain Control Module*). Układy regeneracji aktywnej są zazwyczaj dość skomplikowane, często zawodne i podwyższają ilość zużywanego przez silnik paliwa. Z kolei układy regeneracji pasywnej nie funkcjonują zadowalająco przy zbyt niskiej temperaturze gazów spalinowych silnika, powodują odkładanie się popiołów w monolicie filtrującym i często prowadzą do niekontrolowanych (stochastycznych) regeneracji, mogących skutkować miejscowym, termicznym uszkodzeniem wkładu DPF (popękaniem lub stopieniem). W przypadku nowoczesnych silników pojazdów typu LDV (*Light Duty Vehicles*) temperatura gazów wylotowych jest za niska, aby układ pasywnej regeneracji mógł zagwarantować właściwą regenerację DPF w różnych

warunkach pracy silnika. Temperatura gazów wylotowych lub ich skład (stosunek NO_x/PM) silników pojazdów typu HDV (*Heavy Duty Vehicles*), nie są wystarczające do podtrzymywania procesów ciągłej regeneracji pasywnej (CRT – *Continuously Regeneration Trap*) w każdych warunkach pracy silnika. Konieczne jest zatem dalsze poszukiwanie optymalnych strategii prowadzenia sprawnych, efektywnych, a równocześnie kontrolowanych procesów regeneracji filtrów cząstek stałych.

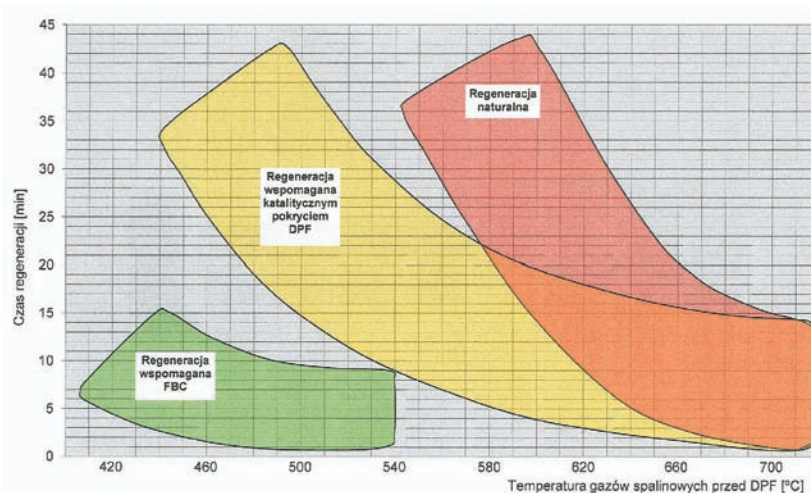
Strategie regeneracji DPF

W ostatnich latach poczyniono znaczne postępy w zakresie udoskonalania, na różnych płaszczyznach, procesów regeneracji DPF. Złożyło się na to wprowadzenie zaawansowanych systemów wtrysku paliwa (takich jak *common rail*), umożliwiających podział i sterowanie dawką paliwa w sposób istotnie ułatwiający optymalizowanie przebiegu procesów regeneracji DPF, a także opracowanie i rozpowszechnienie nowych materiałów monolitów filtracyjnych; jak węgiel krzemowy, spieki metaliczne (w tym filtry aluminiowo-tytanowe) oraz rozwój dodatków typu FBC. Warto jednak podkreślić, że strategie regeneracji wykorzystujące wszystkie wyżej wymienione środki konstrukcyjno-technologiczne mogą i są wykorzystywane przede wszystkim w nowoczesnych zespołach napędowych. Do rozwiązania pozostaje problem tzw. retrofitingu silników pojazdów starszych generacji.

Regeneracja naturalna, a zatem bez jakiegokolwiek wspomaganie katalitycznego, może być przeprowadzona w zakresie temperatur od około 620°C do ponad 700°C , jako że temperatura zainicjowania procesu utleniania sadzy

(stanowiącej główny składnik cząstek stałych) mieści się w granicach $600\text{--}620^\circ\text{C}$. W przypadku wspomaganie regeneracji za pomocą pokrycia ścianek monolitu filtrującego warstwą katalizatora, zazwyczaj platynowego, temperaturę utleniania sadzy można obniżyć do około $440\text{--}460^\circ\text{C}$, natomiast stosowanie dodatków typu FBC, może zredukować temperaturę aktywowania przedmiotowego procesu do około $300\text{--}350^\circ\text{C}$. W każdym z powyższych przypadków, dalsze podwyższanie temperatury gazów spalinowych prowadzi (w pewnych granicach) do skrócenia czasu przebiegu procesu regeneracji. Na rysunku 2 przedstawiono przybliżone zależności czasu trwania regeneracji od temperatury gazów spalinowych – bez i z wykorzystaniem różnych technik katalitycznego wspomaganie regeneracji.

Rozważając strategię procesów regeneracji należy wziąć pod uwagę różny skład cząstek stałych, zależny między innymi od warunków pracy silnika, związanych z niejednakowym współczynnikiem nadmiaru powietrza spalanej mieszanki paliwowo-powietrznej, co ma wpływ na temperaturę zainicjowania, a następnie prowadzi do



Rys. 2. Zależność czasu regeneracji DPF od temperatury gazów spalinowych przed filtrem; bez i z wykorzystaniem różnych technik katalitycznego wspomaganie

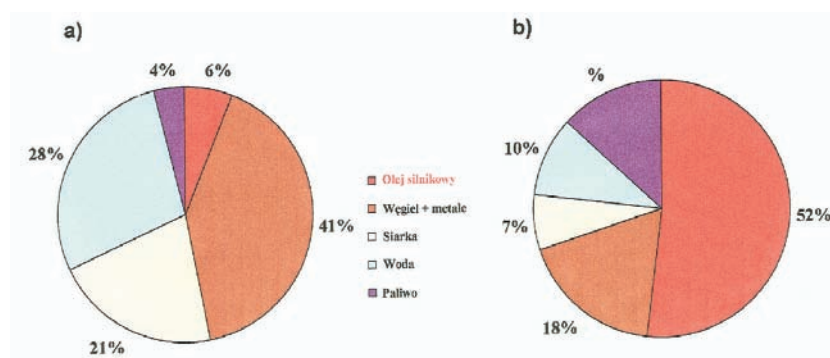
równowagowego bądź całkowitego utleniania sadzy. Jak wykazały badania, zarówno skład, jak i morfologia cząstek stałych powstałych podczas spalania ubogiej i bogatej mieszanki w silniku wykazują znaczne różnice [1, 2, 3, 4]. Ponadto na skład cząstek stałych ma wpływ:

- sposób tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej,
- stosowany, smarowy olej silnikowy i jego właściwości użytkowo-eksploatacyjne [5],
- stopień degradacji smarowego oleju silnikowego,
- wielkość zużycia smarowego oleju silnikowego,
- skład paliwa,
- chemiczne procesy współdziałania paliwa z olejem smarowym,
- warunki pracy silnika – rysunek 3.

Obecnie szeroko wykorzystywaną strategią regeneracji DPF jest stosowanie dozowanych do paliwa dodatków typu FBC (najczęściej żelazowych lub cerowych), mających na celu obniżenie temperatury zainicjowania procesu regenera-

cji oraz zwiększenie prędkości jej przebiegu (skrócenie czasu). Taka pasywna regeneracja współdziała z układem regeneracji aktywnej, którego głównymi elementami są umieszczony przed DPF katalizator (DOC) oraz układ wtrysku paliwa typu *common rail* wraz z centralną jednostką sterującą pracą silnika – rysunek 1d. Paliwo z dodatkiem FBC, dostarczane przez *common rail* w ostatniej fazie dzielonej dawki wtrysku, zostaje spalone w DOC, a wytworzona w ten sposób energia cieplna podwyższa temperaturę gazów wylotowych przed DPF (zazwyczaj do około 500-550°C), co w połączeniu z działaniem dodatku FBC (obniżającym temperaturę utleniania sadzy o około 100-150°C) umożliwia przeprowadzenie procesu regeneracji DPF w przeciągu 2-5 minut. Wykorzystanie DOC do spalania węglowodorów zawartych we wtryskiwanym paliwie jest uwarunkowane nagraniem katalizatora do temperatury co najmniej 200-250°C. Stosowanie DOC może jednak mieć szkodliwy wpływ na środowisko naturalne, zwłaszcza przy zasilaniu silnika olejem napędowym o podwyższonej zawartości siarki. W takim przypadku procesy utleniania katalitycznego wiążą się z formowaniem – wraz ze wzrostem temperatury – siarczanów, stanowiących niebezpieczną emisję wtórną. Zależnie od temperatury gazów wylotowych silnika i zawartości siarki w paliwie, wzrost tworzonych cząstek siarczanowych może zrównoważyć, a nawet przewyższyć zredukowaną przez działanie DOC ilość ciekłych HC, a zatem SOF (*Soluble Organic Fraction*), stanowiących średnio 20-30% masowej emisji PM. Zmniejszenie emisji SOF ma duże znaczenie, ponieważ stanowi ona prekursorów nanocząstek o właściwościach mutagennych i kancerogennych.

W dążeniu do ograniczenia częstotliwości prowadzenia procesów regeneracji, a zarazem skrócenia czasu ich trwania – co ma w wyżej opisywanym przypadku bezpośredni wpływ na wielkość podwyższenia zużycia paliwa poprzez jego dodatkowy wtrysk przez układ *common rail* – zakłada się jak największe, dopuszczalne (bezpieczne) obciążenie DPF sadzą. Jak się szacuje w przedmiotowej strategii, podczas kilkunastominutowego procesu regeneracji wielkość zużycia paliwa wzrasta nawet o około 80%, a średnia wielkość zużycia paliwa przez



Rys. 3. Porównanie składu cząstek stałych dla różnych parametrów pracy silnika z ZS [5]

a) prędkość obrotowa: 1000 obr./min, wielkość obciążenia: 80%, b) prędkość obrotowa: 1800 obr./min, wielkość obciążenia: 15%

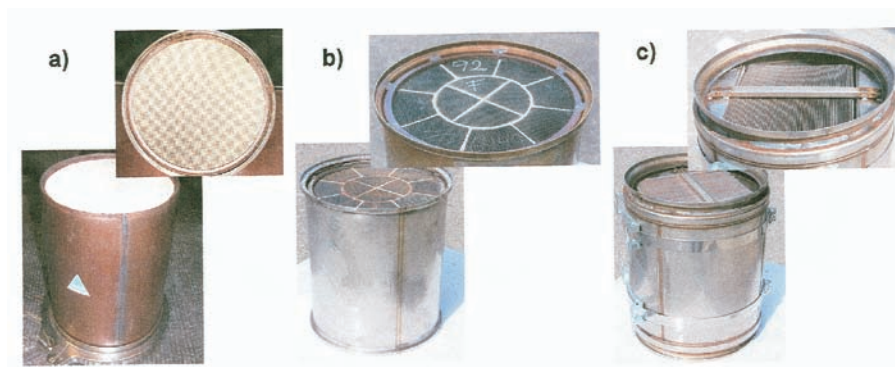
pojazd z taką okresową strategią regeneracji jest większa o około 3-6% [6]. Równocześnie, rosnące opory przepływu gazów spalinowych przez DPF, w miarę jego coraz większego obciążania przez PM, także negatywnie wpływają na wielkość zużycia paliwa przez silnik, a ponadto stwarzają zagrożenie gwałtownego wzrostu temperatury, często nierównomiernie przebiegającej reakcji egzotermicznej w całej objętości monolitu filtrującego. Może to prowadzić do jego trwałego uszkodzenia, a zarazem stanowi wyzwanie dla dalszego rozwoju technologii materiałowej w tym zakresie. W konsekwencji, opracowując strategię regeneracji DPF niezbędne jest ustalenie kompromisu pomiędzy wielkością obciążenia (naładowania) filtra sadzą i wynikającym z tego podwyższeniem oporów przepływu spalin przez DPF, a ilością ciepła wytworzoną podczas egzotermicznej reakcji w procesie regeneracji. Alternatywnym rozwiązaniem dla dodatków typu FBC dozowanych do paliwa jest zastosowanie filtra z pokryciem katalitycznym. Rozwiązanie takie charakteryzuje się niższymi szczytowymi temperaturami towarzyszącymi procesom regeneracji, które równocześnie zachodzą wolniej aniżeli ma to miejsce w przypadku stosowania FBC. Opracowując strategię regeneracji DPF z pokryciem katalitycznym należy wziąć pod uwagę, że takie rozwiązanie charakteryzuje się zwiększonymi w stosunku do FBC oporami przepływu, a warstwa pokrycia katalitycznego może ulegać uszkodzeniom – zwłaszcza podczas przerywanych (niepełnych) procesów regeneracji. Dla częściowego ograniczenia tych niedogodności, najnowsze technologie umożliwiają nanoszenie pokrycia katalitycznego nie na powierzchnie ścianek filtrujących monolitu, ale wprowadzanie go do wnętrza struktury, co skutkuje zmniejszeniem oporów przepływu względem tradycyjnego pokrycia nawet o około 70%. Filtry opisywanego typu bezwzględnie wymagają stosowania paliwa niskosiarkowego, jako że popioły siarczanowe łatwo je zatykają. Ponadto, w przeciwieństwie do rozwiązań wykorzystujących FBC, filtry z pokryciem katalitycznym mogą wytwarzać emisję wtórną w postaci NO_2 . Jednak wykorzystanie systemu filtracji składającego się z DOC oraz filtra cząstek stałych z pokryciem katalitycznym (CSF) stwarza możliwości rozszerzenia zakresu regeneracji, przy równoczesnym ograniczeniu emisji PM, HC, CO oraz NO_x . Dodatki typu FBC zawierające metale, jako katalizatory utleniania sadzy, powodują powstawanie niepalnych popiołów, które wraz z popiołami pochodzącymi ze spalania dodatków uszlachetniających smarowe oleje silnikowe oraz materiałami pochodzącymi z procesów zużycia silnika i korozji układu wydechowego stopniowo akumulują się w filtrze, ograniczając jego efektywną (roboczą) pojemność,

zwiększając zarazem opory przepływu przez DPF. Ilość i skład popiołów pochodzących z dodatków FBC zależy od ich kompozycji, reaktywności, wielkości dozowania do paliwa i charakterystyki wielkości zużycia paliwa przez silnik. Doświadczenia zdobyte podczas praktycznej eksploatacji pojazdów wskazują, że silniki pracujące w warunkach niskich temperatur i obciążeń (np. autobusy komunikacji miejskiej), charakteryzuje podwyższone zużycie oleju smarowego, w porównaniu z pojazdami pracującymi przy wyższych średnich temperaturach i obciążeniach silnika, czego wynikiem jest większa ilość popiołów odkładających się w DPF [7]. Duże znaczenie dla wielkości oporów przepływu stwarzanych przez gromadzące się w monolicie filtrującym popioły ma też ich przestrzenne rozmieszczenie oraz możliwość ewentualnych reakcji chemicznych, w jakie mogą one wchodzić z materiałem monolitu. Jedną z możliwości ograniczenia tego problemu jest zastosowanie monolitu filtrującego o większym rozmiarze komórek na wlocie do DPF, względem tych na wylocie, oraz zagwarantowanie odporności materiału filtrującego na szkodliwe oddziaływanie popiołów. Takie rozwiązanie pozwala na większe o około 50% obciążenie DPF cząstkami stałymi, przy utrzymaniu oporów przepływu w dopuszczalnych granicach [8]. Często jednak stopniowy wzrost oporów przepływu przez filtr jest spowodowany występowaniem niepełnych regeneracji. W takim przypadku, masa częściowo utlenionych PM pozostaje w kanałach wlotowych DPF, zakłócając prawidłowy przebieg procesów kolejnych regeneracji. Zalegająca w DPF niezupełnie „wypalona” sadza podlega procesom starzenia bądź może wchodzić w niekorzystne interakcje z popiołami, co w znacznym stopniu utrudnia jej późniejsze utlenianie. Dla przykładu pochodzący z oleju smarowego fosfor, stanowiący składnik popiołów zalegających w DPF, może formować rodzaj izolującej warstwy na powierzchniach cząsteczek niedopalonej sadzy, utrudniając jej utlenianie. Zatem opracowując strategię regeneracji DPF należy uwzględnić konieczność okresowej, pełnej regeneracji filtra. Zignorowanie powyższych zjawisk w powiązaniu z osadzającymi się popiołami sprawia, że opory przepływu przez filtr narastają szybko, co prowadzi do konieczności oczyszczenia filtra lub jego wymiany – biorąc pod uwagę ekonomiczne względy eksploatacji pojazdu. Te obserwacje wskazują na potrzebę dalszej optymalizacji wielkości komórek oraz porów monolitu filtrującego przeznaczonego do określonych zastosowań, ale także organizacji samego przebiegu procesu regeneracji poprzez wykorzystywanie synergizmu różnych metod jego prowadzenia.

Doświadczenia eksploatacyjne i badania stanowiskowe

Instytut Nafty i Gazu ma blisko dziesięcioletnie doświadczenie w zakresie badania emisji cząstek stałych oraz procesów regeneracji DPF; prowadzonych zarówno w warunkach stanowisk silnikowych, jak i rzeczywistej eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej, a także w opracowywaniu dodatków typu FBC [5, 7, 9, 10]. Aktualnie, w ramach Przedsięwzięcia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Inicjatywa technologiczna I”, realizowany jest m.in. projekt pt. „Nowy dodatek uszlachetniający do paliwa silnikowego przeznaczonego do nowoczesnych silników z zapłonem samoczynnym, spełniających wymagania EURO IV: Opracowanie systemu filtracji spalin z zastosowaniem pasywnej regeneracji filtra (DPF) za pomocą nowego typu dodatków FBC do olejów napędowych”.

Dzięki współpracy z kilkoma wiodącymi ośrodkami na świecie możliwe było między innymi prowadzenie badań przy wykorzystaniu różnych monolitów filtracyjnych, stanowiących kolejne kroki w rozwoju DPF – rysunek 4.



Rys. 4. Widok monolitów DPF badanych w zakresie procesów regeneracji w INiG

a) cordierytowy (w wersji bez i z pokryciem katalitycznym – platynowym), b) z węglika krzemu SiC (w wersji bez i z pokryciem katalitycznym – platynowym), c) ze spieków metalicznych – Sintermetal

Wykonane kilka lat temu we współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Komunikacyjnym w Krakowie monitorowane badania zainstalowanych w autobusach, pasywnie regenerowanych DPF z ceramicznymi monolitami cordierytowymi wykazały, że – na skutek zbyt niskich temperatur gazów spalinowych – taki sposób regeneracji nie zawsze jest wystarczający do niezawodnego i sprawnego zregenerowania filtra [7, 9]. Niskie średnie obciążenie silnika autobusu poruszającego się w korkach miejskich (zwłaszcza w okresie wiosennym lub jesienno-zimowym) sprawiało, że temperatury gazów wylotowych przed DPF często przez ponad 30% czasu eksploatacji nie przekraczały 200°C, co było zdecydowanie niewystarczające do zainicjowania, a następnie prowadzenia kontrolowanego, pełnego procesu

regeneracji, pomimo stosowania dodatków FBC obniżających temperaturę utleniania sadzy do poziomu 280-300°C. Jednoskładnikowe dodatki metaliczne (popiołowe), jak i niemetaliczne (bezpociolowe), oraz pakiety dodatków stanowiących wytypowane kombinacje dodatków jednoskładnikowych zostały opracowane wówczas w ITN, a dwa spośród nich zyskały bardzo pozytywną ocenę w uznanym na całym świecie, powstałym w Szwajcarii teście VSET (*VERT Secondary Emission Test*).

Obecnie kontynuowane są prace nad wytworzeniem bardziej efektywnych dodatków typu FBC oraz zaprojektowaniem niezawodnej strategii regeneracji DPF stosowanej do retrofitingu autobusów komunikacji miejskiej, w ramach wyżej wymienionego projektu z „Inicjatywy Technologicznej I”. W tym celu zbudowano stanowisko badawcze, którego głównymi elementami są: silnik wysokoprężny typu HD (*Heavy Duty*) i doświadczalny modułowy układ filtracji spalin, w skład którego wchodzi zespół filtrujący, obejmujący katalizator utleniający (DOC) i filtr cząstek stałych DPF (*Diesel Particulate Filter*), system dozujący do paliwa zasilającego silnik dodatek aktywujący (FBC) i katalitycznie wspomagający procesy regeneracji DPF oraz elektroniczny układ sterujący. Przedmiotowy układ daje szerokie możliwości w zakresie precyzyjnej regulacji wielkości dozowania dodatku FBC w czasie. Zespół filtrujący został tak zaprojektowany i wykonany, że umożliwia łatwą zmianę testowanych filtrów cząstek stałych – DPF.

Jako zamiennie filtry DPF stosowane są aktualnie najbardziej zaawansowane technologicznie monolity filtrujące; wykonane z węglika krzemu bez pokrycia katalitycznego, węglika krzemu z pokryciem katalitycznym i ze spieków metalicznych. Ponadto, na stanowisku zastosowano automatycznie włączany (według wcześniej zaprogramowanych parametrów) system regeneracji aktywnej z DOC i układem rozpylającym paliwo – rysunek 1c. W skład tego systemu wchodzi też układ monitorowania i rejestracji istotnych parametrów pracy DPF oraz przebiegu procesów jego regeneracji. Symulację różnorodnych warunków pracy silnika umożliwia połączony z nim, bardzo nowoczesny hamulec elektrowirowy z programowanym sterowaniem. Całe badawcze stanowisko silnikowe zostało wyposażo-

ne dodatkowo w wielofunkcyjny system monitorowania i rejestracji parametrów jego pracy, ze szczególnym uwzględnieniem warunków działania układu filtracji spalin i przebiegu procesów regeneracji DPF – rysunek 5.

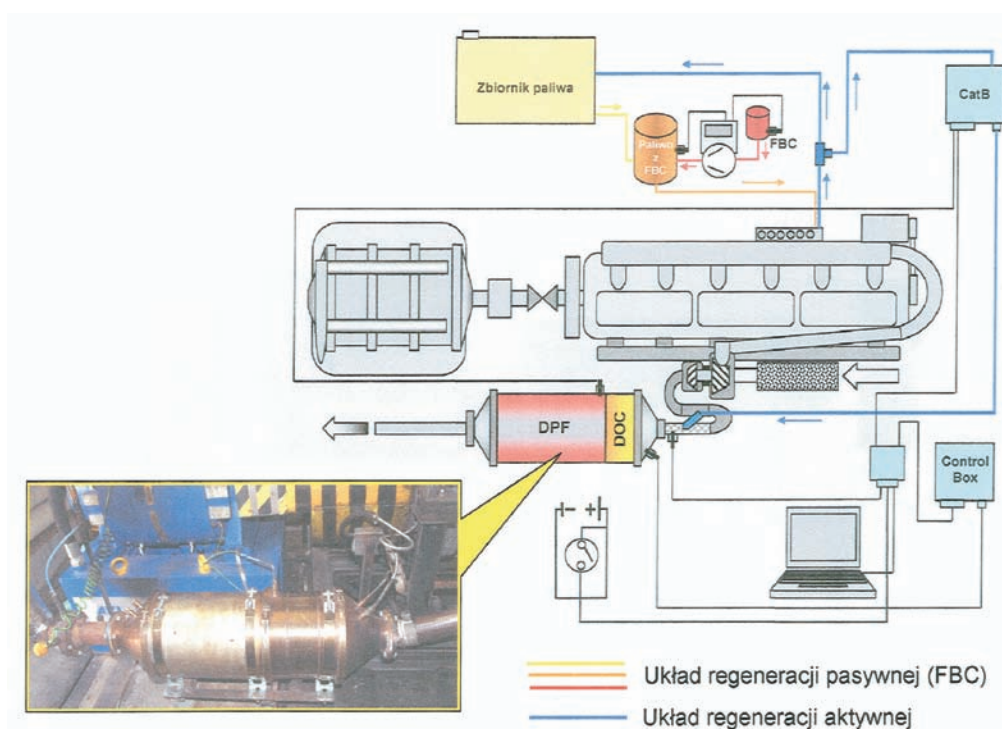
Matrycę aktualnie opracowywanych, a następnie badanych w warunkach testów silnikowych dodatków FBC stanowią koloidalne tlenki żelaza w dyspersjach organicznych o różnej strukturze chemicznej oraz, alternatywnie, domieszki tlenków lub kompleksów metali i związków zawierających azot. W tej części pracy, o charakterze badawczo-poznawczym, proces wytwarzania dodatków FBC prowadzony jest w skali laboratoryjnej w reaktorach o pojemnościach 0,5 dm³, a następnie w reaktorach o pojemnościach 2 dm³ (4-krotne zwiększenie namiarów surowców). Ponadto wykonuje się badania średnicy hydrodynamicznej koloidalnych nanocząsteczek dodatków FBC metodą spektroskopii korelacyjnej fotonów (według PN-ISO 13321) za pomocą analizatora Zetasizer Nano S2 i jej wpływu na jakość dodatku. Obecne wersje dodatków otrzymane według opracowanej technologii i weryfikowane w warunkach testów silnikowych w zakresie, m.in. efektywności działania oraz stabilności, charakteryzują się mniejszymi średnicami hydrodynamicznymi cząstek (18-25 nm) oraz wyższą zawartością żelaza (10-20% (m/m)), w porównaniu z dodatkami otrzymywanymi we wcześniejszym okresie realizacji projektu. Olej napędowy uszlachetniony dodatkiem FBC opracowanym w wyżej opisany

sposób wyróżnia się wysoką stabilnością termooksydacyjną w temperaturze 95°C (według PN-ISO 12205) i wysoką stabilnością termiczną, ocenianą za pomocą metody własnej przyspieszonego starzenia w temperaturze 80°C (*in house test method*), spełniającą wymagania dla uszlachetnionego oleju napędowego. W przypadku średnich temperatur gazów spalinowych przed DPF osiągających 380-400°C, zastosowanie opracowanych dodatków FBC do pasywnej regeneracji DPF w teście silnikowym odzwierciedlającym warunki jazdy miejskiej gwarantuje okresowy, stabilnie przebiegający w czasie proces pełnej regeneracji DPF – rysunek 6.

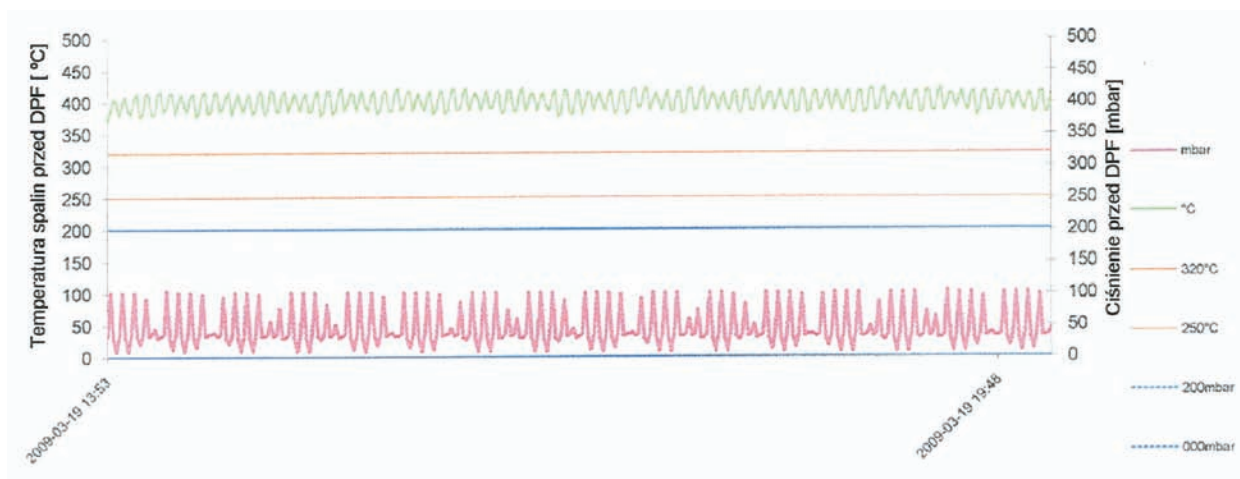
Obniżenie średniej temperatury gazów spalinowych przez DPF do wielkości rzędu 240-270°C, nie gwarantuje już pełnego procesu regeneracji realizowanej w sposób jedynie pasywny przy wykorzystaniu FBC. Wprawdzie obserwowane procesy pasywnej regeneracji DPF zachodzą cyklicznie, jak to miało miejsce w przypadku wyższych średnich temperatur gazów spalinowych, ale w tym przypadku nie są one pełne – rysunek 7. Nie całkowicie spalone cząsteczki sadzy, w połączeniu z popiołami tworzącymi na ich powierzchni rodzaj warstewki izolującej, coraz bardziej utrudniają ich pełne dopalenie w kolejnych procesach regeneracji, co sprawia, że opory przepływu gazów spalinowych przez DPF ulegają stopniowemu zwiększaniu. Prowadzi to do konieczności przedwczesnego czyszczenia DPF lub konieczności jego wymiany w przypadku

termicznego uszkodzenia monolitu, będącego wynikiem niekontrolowanego przebiegu regeneracji stochastycznych.

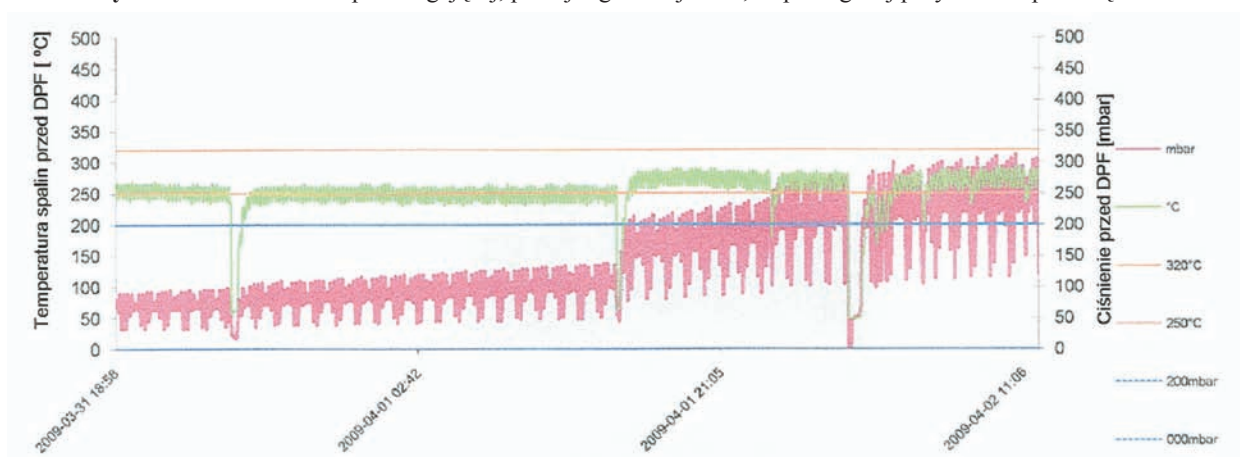
W przypadku eksploatacji pojazdu w warunkach małych obciążeń silnika, wiążących się z niskimi temperaturami gazów spalinowych, co jest charakterystyczne np. dla autobusów komunikacji miejskiej, rozwiązaniem wyżej opisanego problemu jest okresowe wspomaganie regeneracji pasywnej za pomocą regeneracji aktywnej. Strategia związanej regeneracji pasywno-aktywnej gwarantuje pełną regenerację DPF, niezależ-



Rys. 5. Schemat blokowy silnikowego stanowiska badawczego z zaznaczonymi układami pasywnej i aktywnej regeneracji DPF



Rys. 6. Proces okresowo przebiegającej, pełnej regeneracji DPF, wspomaganą pasywnie za pomocą FBC



Rys. 7. Proces okresowo przebiegającej, niepełnej regeneracji DPF, wspomaganą pasywnie za pomocą FBC



Rys. 8. Okresowe wspomaganie pasywnej regeneracji DPF za pomocą regeneracji aktywnej

nie od średniej temperatury gazów spalinowych silnika (rysunek 8), przy równoczesnym maksymalnym ograniczeniu podwyższonego zużycia paliwa, wynikającego zarówno ze stopniowo rosnących oporów przepływu gazów spalinowych przez DPF, jak i zastosowania regeneracji aktywnej. Zastosowanie takiej strategii wypalania sadzy w DPF

zapobiega też występowaniu regeneracji stochastycznych oraz gwarantuje stabilne warunki przepływu przez DPF we wcześniej określonych granicach, wydłużając równocześnie czas pracy filtra do jego regeneracji.

Opisana wyżej regeneracja kombinowana odznacza się dużą elastycznością w zakresie sposobu działania zależnego

od warunków pracy DPF, a zatem i reżimu pracy silnika, wykazując duży potencjał przy optymalizacji wybranych

parametrów pracy DPF, jak i niektórych właściwości użytkowych silnika.

Podsumowanie

Dotychczas opracowane pasywne systemy wspomaganie regeneracji DPF, dla efektywnego i pełnego jej prowadzenia wymagają dość wysokiej temperatury gazów spalinowych emitowanych przez silnik. Przykładowo, zainicjowanie procesu utleniania sadzy, przy zachowaniu dopuszczalnej (bezpiecznej dla monolitu filtrującego) wielkości jej masy jaka została osadzona w DPF, wymaga, aby temperatura gazów spalinowych osiągała przed filtrem powyżej 300°C przez co najmniej 5% czasu przebiegu eksploatacyjnego pojazdu. W przypadku miejskiej eksploatacji np. autobusów, warunki te są w praktyce często niemożliwe do spełnienia [7]. Z perspektywy współczesnego rozwoju technologii systemów regeneracji DPF, nawet tych stanowiących *state of the art* w przedmiotowej dziedzinie, jedynie współdziałanie dwóch systemów stanowiących kombinację metod regeneracji pasywnej i aktywnej umożliwi opracowanie optymalnej strategii procesów regeneracji, dostosowanej do warunków pracy silnika oraz wielkości i jakości emitowanych przez niego cząstek stałych. Strategia taka musi zapewniać nie tylko prowadzenie pełnych regeneracji DPF w warunkach nie stwarzających zagrożeń dla jego trwałości, ale także optymalny moment ich zapoczątkowania, a następnie najkrótszy czas ich trwania (przy stosunkowo małym stopniu

naładowania DPF), dla zminimalizowania ewentualnego wzrostu zużycia paliwa przez silnik. Sterowanie współdziałaniem obydwóch systemów musi być realizowane za pośrednictwem elektronicznego układu monitorującego pracę całości systemu filtracji spalin. W przypadku retrofitingu pojazdów starszej generacji, układ sterujący stanowi jednostkę niezależną od tej sterującej pracą silnika i umożliwia kontrolowanie poprawności pracy DPF oraz inicjowanie działania układów aktywnej i pasywnej regeneracji, w zależności od potrzeb. Zazwyczaj układ taki daje też możliwość wprowadzenia granicznych wielkości minimalnych i maksymalnych oporów przepływu gazów spalinowych przez DPF oraz minimalnej temperatury gazów spalinowych, po przekroczeniu których bezwzględnie musi być uruchamiany układ regeneracji aktywnej dla zapewnienia bezpiecznej regeneracji filtra. W miarę dalszego rozwoju technologii systemów regeneracji DPF, ze względów ekonomicznych oraz trwałości filtra, należy dążyć do coraz większego, czasowego udziału metod pasywnych w procesach kombinowanych regeneracji DPF, nad czym aktualnie pracuje między innymi INiG. Osiągnięcie tego celu jest uwarunkowane opracowaniem jeszcze bardziej efektywnie działających, nisko- a najlepiej bezpopiołowych dodatków typu FBC.

Recenzent: doc. dr Michał Krasodowski

Literatura

- [1] Pischinger S., Sliwinski B., Schnitzler J., Wiartalla A.: *Concepts for Integrated Regeneration of Diesel Particulate Traps and NO_x-Storage Catalyst*. 27th International Vienna Motor Symposium 2006.
- [2] Lepperhoff G., Kroon G.: *Verminderung der Partikelemission von Dieselmotoren für PKW durch Abgasnachbehandlung*. Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr 259, 1983.
- [3] Lepperhoff G., Huthwohl G., Li Q.: *Additivunterstützte Oxidation von emittierten Partikeln aus Dieselmotoren*. Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr 419, 1990.
- [4] Li Q.: *Mechanismen und Einflüsse der additivunterstützten Partikelzundung und Verbrennung im Rußfilter von Dieselmotoren*. Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- [5] Urzędowska W., Stępień Z.: *Badania wpływu oleju smarującego silnik o zapłonie samoczynnym na emisję cząstek stałych w spalinach*. Dokumentacja ITN nr 3633/2002.
- [6] Hermann H.-O., Lang O., Mikulic I., Scholz V.: *Particulate Filter Systems*. MTZ worldwide 9/2001, volume 62.
- [7] Szczerski B., Stępień Z.; Oleksiak S.: *Development of Diesel Exhaust Gases Filtration Technology With Application of Fuel Additives Enabling Continuous Regeneration of Filters to Minimize the Particulate Emission of City Buses*. Projekt DEXFIL 1999-70982, realizowany w ramach programu CRAFT (Cooperative Research Action for Technology) – 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej wspierania innowacyjnych firm (małych i średnich przedsiębiorstw, tzw. SME), 2001-2004.
- [8] Heibel A. et al.: *Performance and Durability Evaluation of the New Corning DuraTrap AT Diesel Particulate Filter – Results from Engine Bench and Vehicle Tests*. 14th Aachen Colloquium, Aachen, Germany, 5th-6th October 2005.
- [9] Stępień Z., Krasodowski M., Ziemiański L.: *Badania silnika z zapłonem samoczynnym zasilanego olejem napędowym z dodatkiem umożliwiającym ciągłą regenerację filtra spalin*. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 8 T12D 006 20, realizowanego w ITN w okresie 01.03.2001 do 31.10.2003.
- [10] Urzędowska W., Stępień Z., Mazur-Badura X., Krasodowski M.: *Badanie wpływu oleju smarującego silnik o zapłonie samoczynnym na emisję cząstek stałych w spalinach, przy zasilaniu silnika paliwem z biokomponentami*. Dokumentacja ITN nr 3836/2004 oraz 4101/2007.