

Regeneracja filtrów spalin w silnikowych systemach antysadzowych

MAREK SWAT

Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu

W pracy przedstawiono warunki i kryteria stosowalności dwustrumieniowej metody regeneracji samochodowych filtrów spalin ograniczających emisję cząstek stałych z silników o zapłonie samoczynnym. Zaprezentowano wyniki badań własnych wpływu charakteru i rodzaju podaży energii (w okresie egzo- i endotermicznym) na właściwości energetyczne i skuteczność procesu destrukcji separowanych w filtrze cząstek stałych.

1. Wprowadzenie

Świadomość ciągłego obniżania limitów emisji cząstek stałych zawartych 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 cząstek stałych, może być system antysadzowy [1, 2, 3]. Wydaje się, że w najbliższych latach największe szanse powodzenia mają środki skutecznie separujące cząstki stałe ze spalin, poza środkami ograniczającymi generowanie emisji cząstek stałych. Pojęcie „antysadzowy” jest umowne (z racji „sady silnikowej” jako głównego składnika cząstek stałych) 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 cząstek (silnik, jego układ wylotowy) i systemu antysadzowego (z jego charakterystycznymi cechami — skutecznością i energochłonnością).

Przy obecnym stanie techniki oczyszczanie spalin silnika o zapłonie samoczynnym poprzez filtrowanie cząstek stałych nie stanowi większego problemu. Usunięcie (destrukcja) odseparowanych cząstek stałych (regeneracja filtra), zwłaszcza podczas normalnej eksploatacji silnika napędzającego pojazd lub maszynę roboczą, stanowi już pewien problem natury technicznej. Stworzenie systemu antysadzowego, w którym ciągła i niezawodna (a zwłaszcza niskoenergetyczna) regeneracja elementów filtracyjnych podczas pracy silnika nie „pogarsza” jego parametrów eksploatacyjnych i nie wymaga dodatkowej obsługi, ma największe szanse aplikacji. Połączenie charakterystycznych cech aktywnych systemów regeneracji (wzrost energii w okresie endotermicz-

nym) i pasywnych (redukujących energię aktywacji utleniania cząstek) wydaje się dzisiaj rozwiązaniem optymalnym. Znaczące efekty energetyczne uzyskać można dzięki tzw. regeneracji dwustrumieniowej, w której niezbędna do destrukcji (utlenienia) cząstek stałych energia dostarczana jest dwustrumieniowo.

2. System antysadzowy — technologia filtracji i regeneracji

Na obecnym poziomie rozwoju techniki system antysadzowy ogranicza emisję cząstek stałych przez filtrowanie spalin w osadnikowych filtrach przepływowych, które po cyklu filtracji poddawane są regeneracji, a ta ma miejsce w układzie wylotowym silnika. Rodzaj elementu filtracyjnego (monolit ceramiczny, włóknina, siatka, element spiekany) nie ma tu znaczenia, a jest jedynie formą realizacji konstrukcji, wpływającą na wielkość masy osadnikowej i objętość filtra. Ponieważ oba procesy: filtracji i regeneracji charakteryzują się określonymi właściwościami dynamicznymi, wymagają parametryzacji, optymalizacji i sterowania nazwano je umownie technologiami. Z badań własnych [4, 5, 6, 7] wynika, że właściwy dobór technologii filtracji i regeneracji w systemie antysadzowym pozwala na spełnienie aktualnych i nowo projektowanych norm emisji cząstek stałych.

Podstawowym kryterium celu (efektu) przy doborze systemu antysadzowego jest minimum emisji jednostkowej cząstek stałych. Za bazę wyjściową należy przyjąć porównanie poziomów źródła emisji (silnik) i emisji określonej obowiązującym limitem. W procedurze trzeba uwzględnić kryteria ilościowe i jakościowe doboru. W algorytmie realizacji narzędziem parametryzacji poszczególnych „kroków” powinny być empiryczne badania identyfikacyjne lub (i) weryfikacyjne.

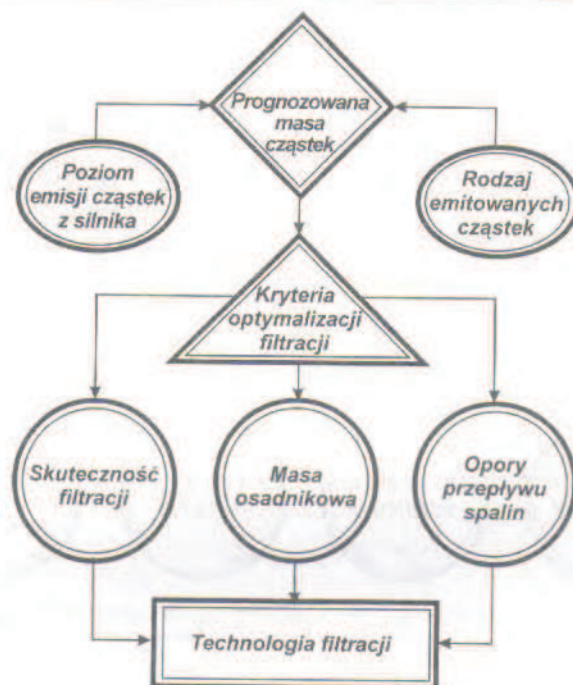
Największe szanse powszechnego stosowania wydają się mieć technologie wykorzystujące elementy filtracyjne typu osadnikowego, w których separowanie cząstek stałych ze spalin dokonuje się w porowatych wielokanalikowych monolitach z ceramiki kordierytowej.

Podstawowymi parametrami dla przyjmowanej technologii filtracji (rys. 1) są: skuteczność filtracji, masa osadnikowa i opory przepływu spalin przez elementy filtracyjne.

Skuteczność filtracji to zdolność do wychwytywania cząstek o określonym wymiarze przy średniej wielkości porów w filtrze np. $12\ \mu\text{m}$ — skuteczność wzrasta w miarę osadzania się cząstek, tj. filtr skuteczniej separuje cząstki o wymiarach mniejszych niż średni wymiar porów.

Masa osadnikowa to maksymalna masa cząstek jaką filtr jest w stanie przyjąć do tzw. stanu całkowitego napełnienia — określana przy stałym wydatku masowym spalin i ustalonej emisji cząstek stałych.

Opory przepływu przez elementy filtracyjne są miarą oddziaływania filtra na silnik i rozumiane jako hydrauliczne opory przepływu strugi spalin w wyniku strat lokalnych na wejściu i wyjściu z filtra, oporów przepływu spalin przez kanaliki filtra, opory przepływu przez strukturę ścianek i opory przepływu wynikające z odkładania się cząstek stałych na powierzchni filtrującej.



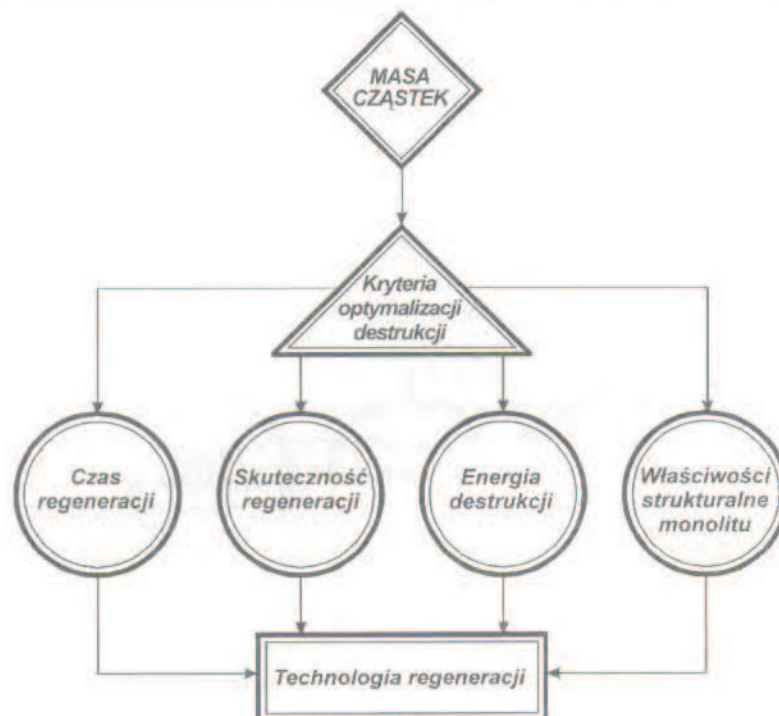
Rys. 1. Algorytm doboru technologii filtracji.

Fig. 1. The selection algorithm of the filtration technology.

W procedurze doboru technologii filtracji należy uwzględnić również właściwości samego elementu filtracyjnego, tj. właściwości materiału z jakiego jest zbudowany (temperatura stabilności strukturalnej, rozszerzalność cieplna, współczynnik przewodzenia ciepła, wytrzymałość na udary termiczne i mechaniczne) i jego parametry geometryczne (pole powierzchni czołowej swobodnego przepływu, stosunek długości monolitu do jego średnicy, udział zakrytych kanałków po stronie napływu i wypływu).

Dominujące znaczenie w technologii regeneracji (rys. 2) mają trzy podstawowe czynniki: masa odseparowanych cząstek, ilość utleniacza niezbędna do ich destrukcji i całkowita energia potrzebna do inicjacji i podtrzymania procesu propagacji utleniania w całej przestrzeni monolitu filtra.

Przyjmując że proces destrukcji realizuje się wykorzystując efekt egzotermiczny utleniania cząstek stałych jako „swoistego paliwa” o określonej wartości energetycznej, to minimalizacja energochłonności procesu regeneracji polega głównie na ograniczeniu energii dostarczonej w okresie endotermicznym. O jej wartości decydują głównie energia zakumulowana w monolicie filtra (energia wewnętrzna zgromadzona w procesie separacji przepływających spalin) i energia zewnętrzna niezbędna do inicjacji procesu utleniania odseparowanej masy cząstek stałych. Z tak pojmowanego modelu regeneracji wynika, że najbardziej korzystna energetycznie jest redukcja energii aktywacji utleniania albo zwiększanie podaży energii w okresie endotermicznym głównie przez maksymalizację energii zakumulowanej w monolicie filtra do wartości wystarczającej na inicjację procesu utleniania.



Rys. 2. Algorytm doboru technologii regeneracji.

Fig. 2. The selection algorithm of the regeneration technology.

3. Model systemu antysadzowego

Modele i badania symulacyjne procesu regeneracji zaczęto publikować od niedawna. Są to modele o różnym stopniu złożoności, od prostych termodynamicznych, do jedno- i dwuwymiarowych [8, 9, 10, 11]. Prace te koncentrują się na określaniu zależności czasowych zmiany masy cząstek stałych w filtrze w zależności od wybranych parametrów pracy silnika.

Do badań i analizy procesu regeneracji przyjęto model matematyczny opracowany przez A.E. Aware, C.N. Oprisa i J.H. Johnsona [8], ponieważ uznano, że bardzo dobrze odpowiada on założeniom realizowanej pracy. Model ten został wyprowadzony z podstawowych równań zasady zachowania masy i kinetyki reakcji chemicznych. Zmianę masy cząstek w filtrze [8] określono przez:

$$\left[\frac{dm_p}{dt} \right]_{\text{filtr}} = (\dot{m}_p)_{\text{wej.}} - (\dot{m}_p)_{\text{wyj.}} - (\dot{m}_p)_{\text{utleniona}} \quad (1)$$

gdzie: m_p — masa cząstek stałych osadzonych w filtrze w czasie t [g], $(\dot{m}_p)_{\text{wej.}}$ — natężenie masy cząstek stałych napływających do filtra [g/s], $(\dot{m}_p)_{\text{wyj.}}$ — natężenie masy cząstek stałych wypływających z filtra [g/s], $(\dot{m}_p)_{\text{utleniona}}$ — natężenie utleniania cząstek stałych w filtrze [g/s].

Powyższe równanie ukazuje, że masa cząstek stałych osadzonych w filtrze w dowolnie podanym czasie jest zależna zarówno od procesu filtracji fizycznej, jak i procesu utleniania chemicznego. Proces filtracji fizycznej reprezentuje osadzanie cząstek stałych na porowatych ściankach filtra i jest zależny głównie od warunków pracy silnika, parametrów geometrycznych filtra (grubość ścianek, porowatość) i rozkładu cząstek w jego przestrzeni.

Proces regeneracji chemicznej określono jako powierzchniowe utlenianie osadzonych cząstek, które ma miejsce wewnątrz filtra i zależy od warunków utleniania (np. temperatura spalin, zawartość tlenu w spalinach, pokrycie powierzchni filtra substancją katalityczną). Utlenianie cząstek, które przepływają osiowo przez kanaliki filtra (jeszcze nie są osadzone na ściankach kanałików), zostało określone jako nieistotne dla analizowanych procesów [8, 10]. Jest to spowodowane faktem, że czas obecności tych cząstek w kanałkach jest tak krótki, iż żaden znaczący proces utleniania nie może mieć miejsca. Natężenie utleniania masy cząstek stałych w filtrze określa zależność:

$$(\dot{m}_p)_{\text{utleniaona}} = m_p \cdot w_o \quad (2)$$

gdzie w_o — całkowity współczynnik prędkości reakcji utleniania.

$$w_o = w_p + w_a = a_p [\text{O}_2]^n \exp[-E_p/RT_p] + a_a [\text{O}_2]^n \exp[-E_a/RT_p] \quad (3)$$

gdzie: w_p — współczynnik prędkości termicznej reakcji utleniania na powierzchni cząstek stałych, a_p — stała prędkości reakcji termicznej utleniania cząstek stałych, E_p — energia aktywacji reakcji termicznej utleniania cząstek stałych, w_a — współczynnik prędkości reakcji utleniania na powierzchni cząstek stałych w obecności substancji katalitycznej, a_a — stała prędkości reakcji katalitycznej utleniania cząstek stałych, E_a — energia aktywacji reakcji katalitycznej utleniania cząstek stałych, $[\text{O}_2]$ — stężenie tlenu w spalinach, n — rząd reakcji, R — uniwersalna stała gazowa, T_p — temperatura na powierzchni cząstek stałych.

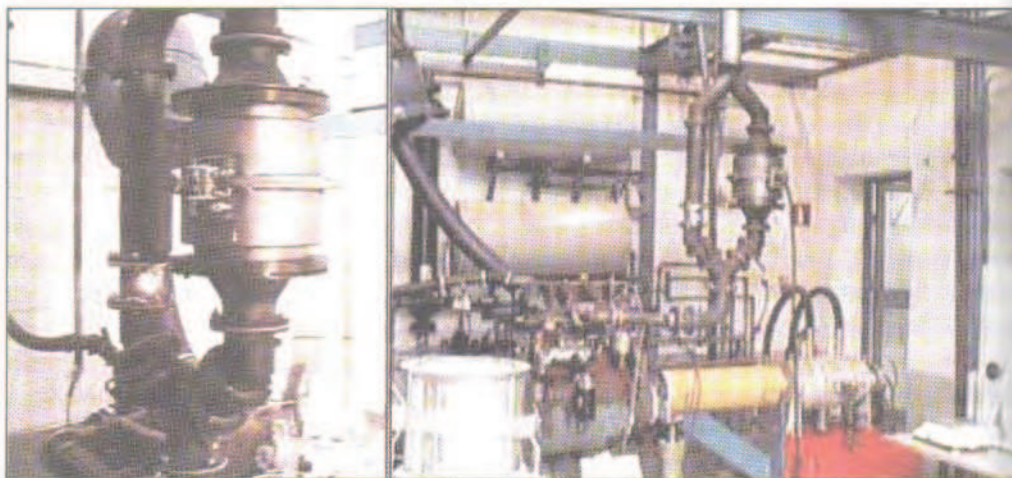
Pierwszy człon w równaniu (3) określa wskaźnik termicznej reakcji utleniania, drugi — wskaźnik katalitycznej reakcji utleniania, który zależy od pokrycia powierzchni filtra substancją katalityczną oraz od warunków pracy silnika.

Do funkcjonalnych i weryfikacyjnych badań modelu w warunkach rzeczywistych zbudowano system antysadzkowy z przepływowymi filtrami cząstek stałych o monolitach ceramicznych pracującymi w układzie dwufiltrowym z uwagi na możliwość określenia podczas regeneracji energochłonności procesu endotermicznego i ilości energii wydzielonej w okresie egzotermicznym po samozapłonie sadzy, co byłoby niemożliwe w rozwiązaniu jednofiltrowym ze względu na dodatkowe gromadzenie sadzy w trakcie regeneracji.

Przyjęto technologię regeneracji filtra polegającą na dostarczeniu niezbędnej porcji energii ze źródła zewnętrznego do ogrzania filtra (okres endotermiczny), która spowoduje samozapłon zgromadzonej w nim sadzy, a następnie w procesie egzotermicznym, sterowanym jedynie ilością utleniacza (po odjęciu energii zewnętrznej), jej całkowite utlenienie.

Zrealizowano założoną technologię, przyjmując dostarczanie wybranej porcji energii przez elektryczne ogrzewanie powietrza dopływającego do regenerowanego filtra i jego powierzchni zewnętrznej (pobocznicy). Dzięki temu prowadzono procesy regeneracji przy stałej ilości sadzy zgromadzonej w filtrze. Źródło energii stanowił rezystywny element grzejny w skonstruowanej do tego celu komorze regeneracyjnej i nagrzewnica segmentowa zabudowana na zewnętrznej powierzchni monolitu filtra. Jako rozwiązanie konstrukcyjne systemu dwufiltrowego przyjęto układ „by-pass” (rys. 3) z dwoma przepustnicami w rozgałęzieniach przewodu wylotowego, które pozwoliły na jednoczesne badania porównawcze filtrów o dwóch różnych pojemnościach osadnikowych lub filtrów regenerowanych jedno- i dwustrumieniowo.

Wybrano średnie wartości masy osadnikowej filtrów 12, 35 i 40 g dla trzech odmian skuteczności filtracji, odpowiednio 90%, 75% i 65% (filtry: E_x-47, E_x-54 i E_x-66 — wg oznaczenia producenta Corning Glass Works). Filtry pokryto substancją katalizującą CuV obniżającą temperaturę samozapłonu sadzy. Uwzględniając specyfikę wymuszeń cieplnych, gwarancję dobrej izolacji zewnętrznej i hydrauliczną szczelność w układzie wylotowym, monolity kordierytowe osadzono w specjalnych obudowach (rys. 3), w których zamontowano nagrzewnice segmentowe umożliwiające dostarczenie pomocniczego strumienia energii.



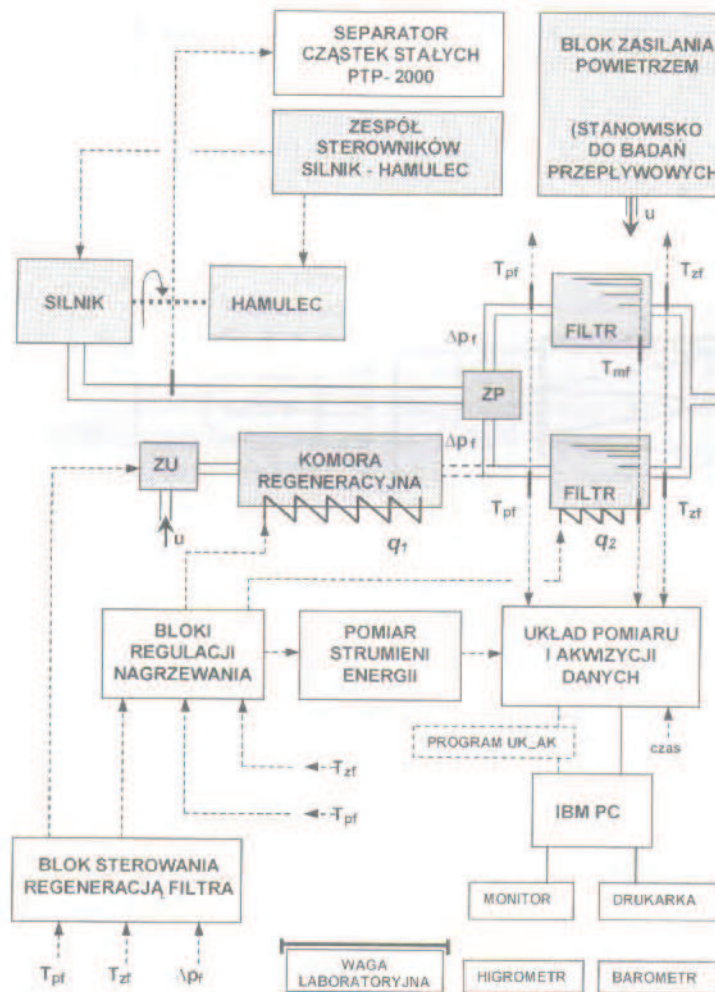
Rys. 3. Konstrukcja zabudowy filtra z nagrzewnicą segmentową do regeneracji dwustrumieniowej i układ „by-pass” systemu antysadzowego na stanowisku badawczym.

Fig. 3. The filter building construction with the heating segment to the two streams regeneration and the “by-pass” scheme of the anti soot system on the research place.

3. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Jako źródła emisji cząstek stałych użyto silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 pracującego w standardowym układzie hamownianym, którego układ wylotowy wyposażono w system antysadzowy pracujący w układzie dwufiltrowym (rys. 4). W systemie

zamontowano dwa tory grzejno-filtrujące pracujące naprzemiennie. Dla regeneracji dwustrumieniowej w skład każdego toru grzejnego wchodził blok grzewczy komory regeneracyjnej (główny strumień energii q_1) i nagrzewnica segmentowa filtra (pomocniczy strumień energii q_2).



Rys. 4. Schemat funkcjonalny stanowiska badawczego

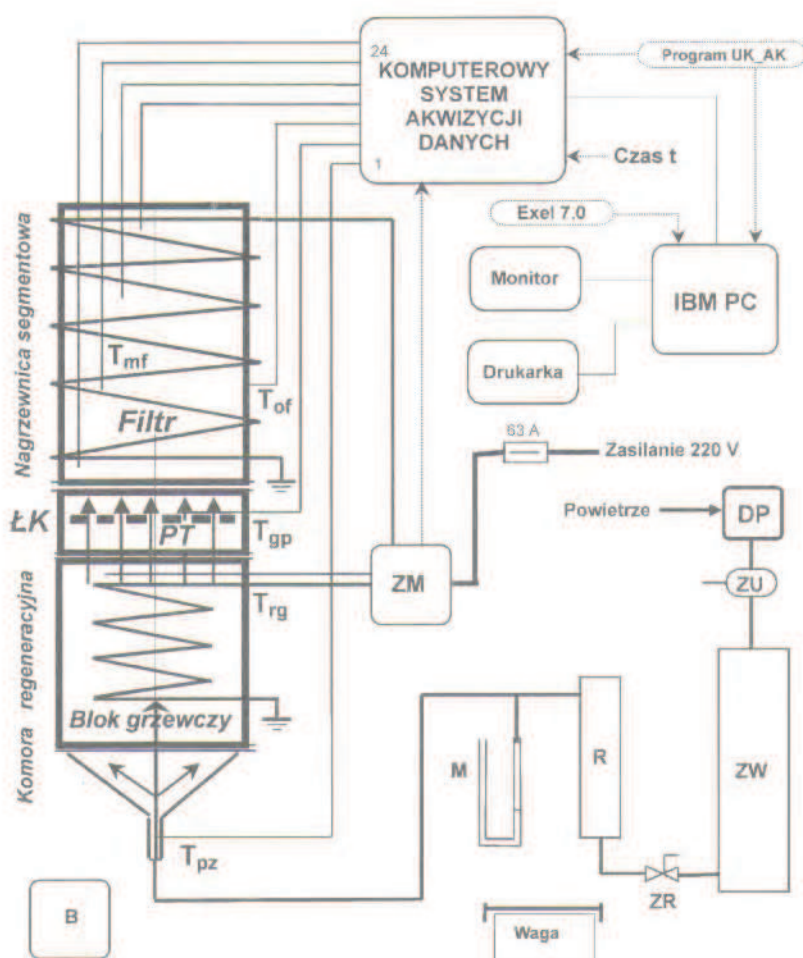
q_1, q_2 — główny i pomocniczy strumień energii; u — powietrze do regeneracji filtra; Δp_f — różnica ciśnień na filtrze; T_{mf}, T_{pf} i T_{zf} — temperatury sterujące regeneracją; ZP i ZU — zawory (przełączający i sterujący powietrzem).

Fig. 4. The research place functional scheme.

Pomiaru emisji jednostkowej cząstek stałych dokonywano zgodnie z programowanymi 13-fazowymi testami badawczymi przy pomocy separatora cząstek stałych PTP-2000 z mikrotunelem rozcieńczającym (firmy Pierburg). Masa cząstek stałych określana była metodą grawimetryczną z dokładnością 0,001 mg w ściśle określonej, stałej

temperaturze i wilgotności względnej powietrza, a po wprowadzeniu wartości tej do programu obliczeniowego testu (uwzględniający zebrane dane oraz współczynniki przeliczeniowe — według norm) otrzymywano wynik testu emisji cząstek w $\text{g/kW} \cdot \text{h}$. Warunki i realizację wszystkich pomiarów emisji cząstek stałych dokonywano zgodnie z dyrektywą 91/542/ECE i normą ISO 8178.

Technologia regeneracji filtra jest procedurą określającą przebiegi podaży mocy nagrzewania oraz masowego natężenia przepływu powietrza dla określonej masy cząstek



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska do realizacji technologii i badania energochłonności regeneracji filtrów spalin.

ŁK — łącznik kolmierzowy; PT — przesłona turbulizująca przepływ; ZM- zasilacz mocy; DP- sprężarka; ZW — zbiornik wyrównawczy; ZU i ZR — zawory: (upustowy i regulacyjny); R- rotametr; M- manometr; B — barometr; T — termoelementy: (T_{mf} — monolitu filtra, T_{of} — obudowy filtra, T_{gp} — gorącego powietrza, T_{pz} — powietrza zasilającego, T_{rg} — rezystora grzewczego).

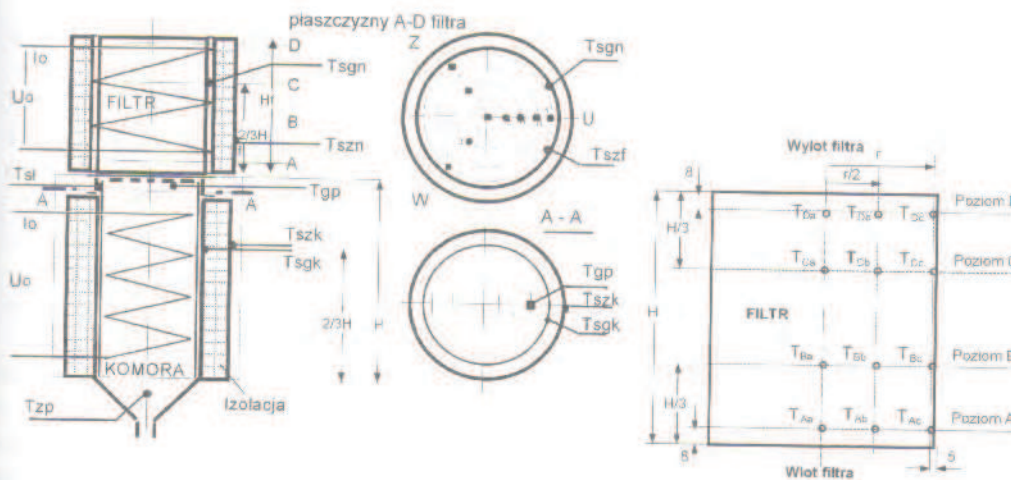
Fig. 5. The block scheme of the place to realization of the technology and the energy consumption of the soot filters regeneration process.

zgromadzonej w filtrze oraz dla przyjętych warunków granicznych wymiany ciepła w filtrze. Energochłonność regeneracji filtra obliczano na podstawie pomiarów mocy elektrycznej dostarczonej w czasie ogrzewania filtra.

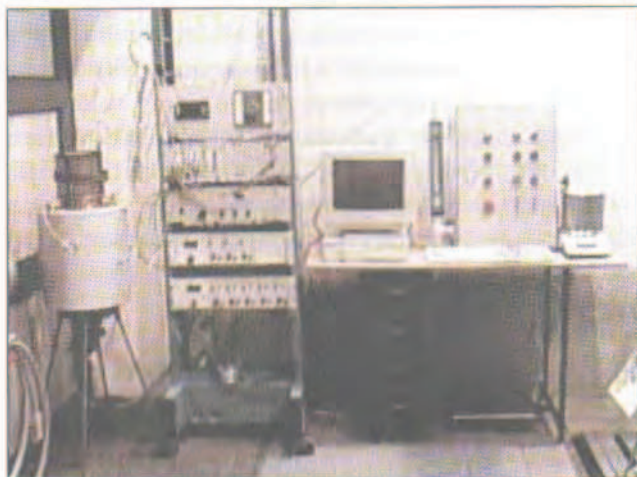
W badaniach energochłonności, początek regeneracji wyznaczano jako początek dostarczania energii (bez względu na stan cieplny filtra), koniec regeneracji określano na podstawie zmian temperatury pod koniec procesu egzotermicznego w przestrzeni filtra. W badaniach porównawczych regeneracji dwustrumieniowej suma dostarczanej energii w strumieniach głównym i pomocniczym ($q_1 + q_2$) była równa całkowitej energii w regeneracji jednostrumieniowej.

Schemat blokowy stanowiska do realizacji technologii i badania energochłonności regeneracji filtrów spalin pokazano na rys. 5. Do stanowiska podłączono fragment instalacji sprężonego powietrza ze stanowiska do badań przepływowych z urządzeniami do pomiaru masowego natężenia przepływu, wielokanałowy układ pomiaru temperatury i mocy elektrycznej współpracujący z systemem komputerowej akwizycji danych. Rejestrację danych wykonywano przy pomocy specjalistycznego programu komputerowego.

Do pomiaru temperatury w kanałkach filtra, nagrzewnicy segmentowej i komory regeneracyjnej wykorzystano termoelementy Ni-NiCr. W zależności od programu badań wykorzystywano jednocześnie od kilku do kilkudziesięciu termoelementów pomiarowych. Najczęściej do pomiarów pola temperatury wewnątrz filtra — 12 termoelementów rozmieszczonych po trzy wzdłuż promienia monolitu na czterech poziomach pomiarowych (rys. 6).



Rys. 6. Rozmieszczenie termoelementów w czteropozomowej konfiguracji filtra, komorze regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej podczas badań energetycznych.
 temperatury: T_{zrk} i T_{zrk} — ścian („zimnej i gorącej”) komory, T_{zrn} i T_{zrn} — ścian („zimnej i gorącej”) nagrzewnicy, T_{z} — ściany łącznika, T_{gp} i T_{gp} — powietrza (gorącego i zasilającego).
 Fig. 6. The distribution of the thermocouples in the four level filter configuration, in the regeneration chamber and in the heating segment during energetic researches.



Rys. 7. Laboratoryjne stanowisko do realizacji technologii i badania procesów regeneracji.
Fig. 7. The laboratory place to realization of the technology and the regeneration processes research.

Przyjęto, że badania regeneracji odbywać się będą w warunkach:

- w regeneracji jedno- i dwustrumieniowej utlenianiu poddaje się tę samą masę cząstek,
- dostarczana energia dla obu rodzajów regeneracji jest taka sama, tj suma strumieni (głównego i pomocniczego) w dwustrumieniowej jest równa dostarczonej energii w jednostrumieniowej — z komory regeneracyjnej,
- zasilanie strumieni głównego i pomocniczego w regeneracji dwustrumieniowej jest równoległe (jednoczesne),
- całkowita energia do regeneracji podawana jest w postaci ciągłej lub impulsowej (jedna, dwie lub trzy porcje energii),
- maksymalne wyprzedzenie pomocniczego strumienia (w badaniach okresu indukcji — patrz rys. 12) jest nie większe niż czas dostarczania strumienia głównego (porcja energii strumienia pomocniczego kończy się z chwilą rozpoczęcia podaży głównego strumienia energii),
- współczynnik nadmiaru powietrza (utleniacza) w obu rodzajach regeneracji jest taki sam.

Przyjęto rozróżnienie dla dwóch podstawowych okresów w procesie regeneracji:

- endotermiczny — od początku dostarczania energii w celu ogrzania filtra do chwili wystąpienia samozapłonu sadzy (osiągnięcia temperatury regeneracji),
- egzotermiczny — od chwili wystąpienia samozapłonu sadzy do chwili zakończenia regeneracji.

Jako temperaturę samozapłonu sadzy (temperaturę regeneracji T_{reg}) przyjęto wartość odpowiadającą zmianie nachylenia krzywej przebiegu temperatury w najcieplejszym miejscu filtra w odniesieniu do krzywej przebiegu temperatury gorącego powietrza w filtrze czystym (bez sadzy). Miejscem tym jest najczęściej punkt położony w pobliżu czoła filtra na wlocie, w osi monolitu (punkt „Aa” — rys. 6). Na etapie badań wstępnych wyznaczono temperaturę samozapłonu sadzy dla filtrów bez katalizatora $T_{reg} = 600^{\circ}\text{C}$, a dla filtrów z katalizatorem CuV $T_{reg} = 520^{\circ}\text{C}$. Oznaczono je na charakterystykach przebiegu regeneracji jako „zapłon 520” lub „zapłon 600”.

Przebiegi temperatur w wybranych punktach monolitu tworzą obraz zmiennego w czasie przestrzennego pola temperatur. Na ich podstawie kontrolowano przebieg zjawisk termicznych i regulowano parametry technologiczne procesu regeneracji, zwłaszcza w okresie egzotermicznym. Po wstępnych badaniach silnikowych stwierdzono dość równomierny rozkład sadzy na czołowej powierzchni wlotu monolitu, co pozwoliło wnioskować o jej równomiernym rozkładzie w objętości monolitu. Na tej podstawie przyjęto dwuwymiarowy, osiowosymetryczny model wymiany ciepła do opisu przestrzennego pola temperatury w monolicie filtra. Uznano, że w okresie endotermicznym model ten dobrze odwzorowuje rzeczywiste pole temperatury w monolicie, natomiast w okresie egzotermicznym (przy zbyt dużych różnicach rozkładu masy sadzy w objętości monolitu) może on niedokładnie odwzorowywać stan rzeczywisty.

Podczas regeneracji filtra, masa sadzy do chwili samozapłonu jest stała i nie można jej zmieniać (właściwości systemu dwufiltrowego), dwa pozostałe parametry, tj. ilość utleniacza i energii mogą być zmieniane w trakcie procesu. Założono, że w okresie endotermicznym nastawy parametrów wymuszających będą niezmiennie, natomiast w egzotermicznym dobierane tak, aby możliwie szybko (bez ryzyka uszkodzenia monolitu) zakończyć proces utleniania sadzy.

Natężenie przepływu utleniacza, energia wydzielona w blokach grzejnych (komory regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej) i energia uzyskana w procesie utleniania cząstek stałych są parametrami wymuszającymi przebieg zjawisk cieplnych w monolicie filtra, których obrazem jest nieustalone, przestrzenne pole temperatury. Reprezentuje ono odpowiedź obiektu (monolitu) na to wymuszenie i może być podstawą do ilościowej i jakościowej oceny procesu regeneracji filtrów.

W okresie regeneracji od chwili rozpoczęcia procesu do monolitu filtra dostarczana jest energia:

- Q_{el} — ze źródła zewnętrznego (z komory regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej), na którą składają się:
 - energia zużyta od chwili rozpoczęcia procesu t_{pocz} do chwili osiągnięcia temperatury regeneracji $t_{T_{reg}}$,
 - energia zużyta w okresie od chwili $t_{T_{reg}}$ do chwili wyłączenia zasilania komory regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej t_{wytk} , $t_{wytł}$
 - energia zakumulowana w pojemności cieplnej komory regeneracyjnej w okresie t_{pocz} do t_{wytk} i energia zakumulowana w pojemności cieplnej nagrzewnicy segmentowej t_{pocz} do $t_{wytł}$
 - energia oddana do otoczenia przez komorę regeneracyjną i nagrzewnicę segmentową filtra w okresie t_{pocz} do $t_{wytł}$
- Q_m — ze źródła wewnętrznego (okres egzotermiczny), której ilość zależy od masy cząstek stałych utlenionej w okresie od chwili początku regeneracji $t_{T_{reg}}$ do chwili zakończenia utleniania t_{kutil} (lub t_{kutil0}). W przypadku regeneracji całkowitej energia Q_m wywiązuje się z całej masy cząstek osadzonej w filtrze, natomiast w przypadku niecałkowitej jest proporcjonalna do utlenionej masy cząstek. To źródło energii pozwala kontynuować utlenianie cząstek stałych po wyłączeniu zewnętrznych źródeł energii.

$$Q_m = m_{\text{utl}} \cdot W_m \quad (4)$$

gdzie: m_{utl} — masa utlenionych cząstek stałych, w przypadku regeneracji całkowitej — równa masie cząstek w filtrze przed regeneracją; W_m — wartość opałowa cząstek stałych,

• Q_{pk} i Q_{pn} — ze źródeł zewnętrznych, których działanie ujawnia się w okresach wyłączenia zasilania komory regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej po zainicjowaniu utleniania cząstek stałych. Źródłami energii Q_{pk} i Q_{pn} , zakumulowanymi w pojemnościach cieplnych komory regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej (w okresach ich zasilania), jest część energii Q_{cl} . Porcje tej energii; jedna — oddawana przez nagrzaną komorę regeneracyjną ogrzewa zimne powietrze do bieżącej temperatury T_{gp} ; druga — przejmowana od nagrzewnicy segmentowej ogrzewa pobocznice monolitu filtra do bieżącej temperatury T_{sgn} , (patrz rys. 6), przeciwdziałają szybkiemu stygnięciu monolitu filtra w okresach przerw w zasilaniu komory i nagrzewnicy segmentowej. Można przyjąć, że od chwili wyłączenia zasilania komory regeneracyjnej i nagrzewnicy segmentowej lub przy wyłączeniach cyklicznych, za kontynuację procesu regeneracji odpowiedzialna jest suma energii $Q_m + Q_{pk} + Q_{pn}$.

$$Q_{pk} = c_p \rho \cdot \sum_{k=1}^s m_{pk} \cdot (T_{gpk} - T_{zp}) \quad (5)$$

gdzie: $c_p \rho$ [kJ/kgK] — średnie ciepło właściwe powietrza w zakresie temperatur (300÷1000) K, m_{pk} [kg] — masa powietrza w okresie k -tego wyłączenia komory regeneracyjnej, T_{gpk} [K] — średnia temperatura gorącego powietrza na wlocie do filtra w okresie k -tego wyłączenia komory regeneracyjnej, $T_{zp} \cong 300$ K (temperatura powietrza wpływającego do komory regeneracyjnej, s — liczba okresów wyłączeń zasilania komory regeneracyjnej w okresie regeneracji.

4. Wyniki badań

Uzyskane wyniki wykazują właściwy dobór systemu antysadzowego do silnika w celu obniżenia jego poziomu emisji cząstek stałych. Zrealizowana konstrukcja spełnia aktualne normy emisji cząstek stałych (rys. 8). Zastosowanie badanego systemu antysadzowego obniża poziom emisji źródła do wartości określonej normą. Jedynym problemem jest wówczas wybór filtra o odpowiednim stopniu filtracji, a co za tym idzie czas po jakim masa separowanych cząstek w filtrze osiągnie wartość osadnikową, która ze względów energetycznych, eksploatacyjnych, ekonomicznych (lub innych przyjętych za kryterium) pozwoli na jego skuteczną regenerację.

Wyniki uzyskane podczas badań skuteczności regeneracji wskazują na to, że po pełnej (całkowitej) regeneracji filtr uzyskuje swoje parametry w ograniczaniu emisji jak filtr „czysty” (przed pierwszą regeneracją).

Przy tej liczbie przeprowadzonych cykli filtracyjno-regeneracyjnych nie stwierdzono zmniejszenia się masy osadnikowej filtrów spowodowaną gromadzeniem niepal-

nych cząstek stałych. Badania poziomu emisji dla filtra napełnionego sadzą wskazują jego większą skuteczność filtracji uzależnioną od stopnia osiągnięcia przez masę odfiltrowanych cząstek pełnej masy osadnikowej filtra.



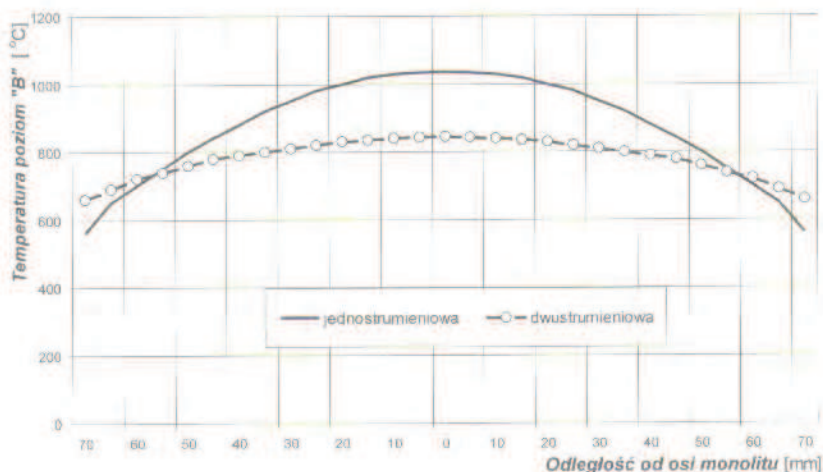
Rys. 8. Wyniki badań emisji jednostkowej cząstek stałych silnika AD3.152 (dla wybranych warunków regulacji) z systemem antysadzkowym dla filtrów przed pierwszą regeneracją
 Fig. 8. The research results of the individual PM emission from the engine AD3.152 (for selected regulation conditions) with the anti soot system, for filters before first regeneration.

Regeneracja niecałkowita filtra nie dyskredytuje właściwości eksploatacyjnych układu antysadzkowego. Nie utleniona w wyniku regeneracji część sadzy, głównie w kanałkach najzimniejszych (część monolitu w okolicach pobocznic) powoduje, że filtr dla przykładu Ex-66 w miarę oddalania od jego osi filtruje coraz skuteczniej. Bardziej obrazowym przedstawieniem zjawiska będzie przekrój poprzeczny monolitu filtra. W jego osi i pobliżu filtr zachowuje się jak Ex-66, dalej jak Ex-54 (gdzie część sadzy jest utleniona), a na skraju jak Ex-47 (sadza nie utleniona).

Proces filtracji po „niepełnej” regeneracji powoduje „wyrównanie” przestrzennego rozkładu sadzy, korzystniejszego dla następnego procesu regeneracji. Zatem niepełna regeneracja zmienia jedynie (w tym cyklu — zmniejsza) masę osadnikową filtra i powoduje, że następny czas filtracji (po osiągnięciu przez separowane cząstki PM masy osadnikowej) jest krótszy, ale następująca po nim regeneracja ze względów energetycznych — korzystniejsza z powodu zwiększenia dynamiki procesu w okresie egzotermicznym. Z uwagi na poziom emisji także korzystna, gdyż filtr częściowo napełniony sadzą wykazuje większy stopień filtracji. Który z tych czynników — energetyczny (częstość regeneracji), czy ekologiczny (minimum emisji cząstek PM) może mieć znaczenie dominujące, decyduje przyjęte „kryterium celu”.

Znaczący efekt energetyczny uzyskuje się przy regeneracji z podzielonym strumieniem energii, gdzie energia cieplna dostarczana jest do monolitu nie tylko z utleniaczem, ale również przez nagrzewnicę segmentową. Taka podaż energii niweluje znaczny gradient temperatury w kierunku promieniowym monolitu (rys. 9.) i wyrównuje prędkość propagacji utleniania w jego przestrzeni. Energetyczny efekt kumulacyjny dwu-

strumieniowej regeneracji uzyskuje się zwłaszcza w przypadkach cyklicznych niepełnej regeneracji (w następnych procesach regeneracji mniejszemu gradientowi temperatury towarzyszy wyrównanie rozkładu przestrzennego cząstek stałych do utlenienia).



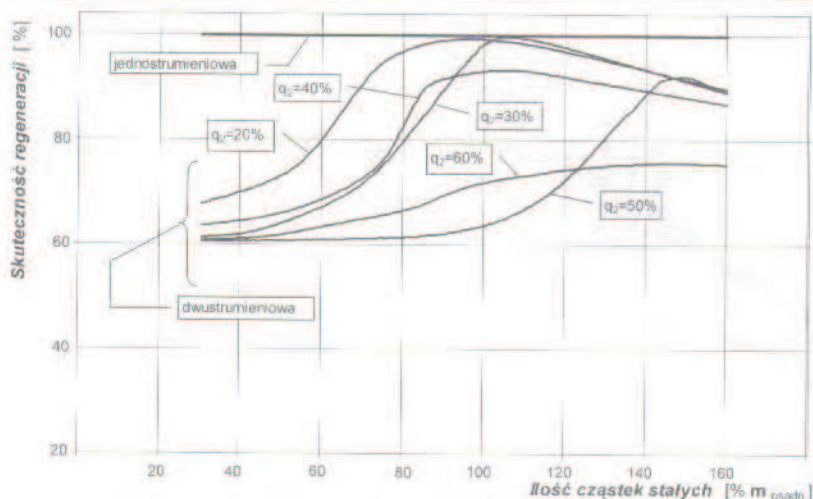
Rys. 9. Przykład rozkładu temperatur w wybranym przekroju monolitu filtra Ex-47 z powłoką CuV, dla pełnej regeneracji jedno- i dwustrumieniowej (pomocniczy strumień $q_2 = 35\% q$; $m_{\text{utl}} = 34$ g).

Fig. 9. The schedule of temperatures example in the selected section of the filter monolith Ex-47 with CuV cover, for the full one and two streams regeneration (the auxiliary stream $q_2 = 35\% q$; $m_{\text{utl}} = 34$ g).

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki badań skuteczności regeneracji dwustrumieniowej w zależności od masy cząstek do utlenienia oraz wielkości strumieni energii (głównego q — z komory regeneracyjnej i pomocniczego q_2 — z nagrzewnicy segmentowej). Wyniki badań odniesiono do pełnej (100%) regeneracji jednostrumieniowej dla tych samych warunków podaży energii (energia dostarczana w sposób ciągły od chwili rozpoczęcia procesu do chwili osiągnięcia temperatury regeneracji — pierwszy lokalny samozapłon w dowolnym punkcie monolitu), utleniacza i masy cząstek do utlenienia m_{utl} .

Badaniom utleniania poddano masy cząstek stałych w zakresie (8÷46) g (odpowiedni procentowy udział w odniesieniu do masy osadnikowej regenerowanego filtra) w filtrze Ex-54 z powłoką katalityczną CuV. Procesy regeneracji dwustrumieniowej prowadzono dla zakresu $q_2 = (20÷60)\% q$ udziału pomocniczego strumienia q_2 (z nagrzewnicy segmentowej) w całkowitym strumieniu energii zewnętrznej q .

Największą skuteczność regeneracji uzyskano dla zakresu $q_2 = (20÷35)\% q$ porcji strumienia z nagrzewnicy segmentowej i masy cząstek stałych do utlenienia, bliskiej masie osadnikowej regenerowanego filtra ($m_{\text{utl}} \cong m_{\text{osadu}}$). Dla takiego zakresu porcji drugiego strumienia energii prowadzono większość procesów regeneracji dwustrumieniowej.



Rys. 10. Wpływ ilości cząstek (w odniesieniu do masy osadnikowej) i rozdziału strumieni energii na skuteczność regeneracji dwustrumieniowej.

Fig. 10. The PM quantities influence (with reference to the residue mass) and the energy streams distribution on the two streams regeneration efficiency.

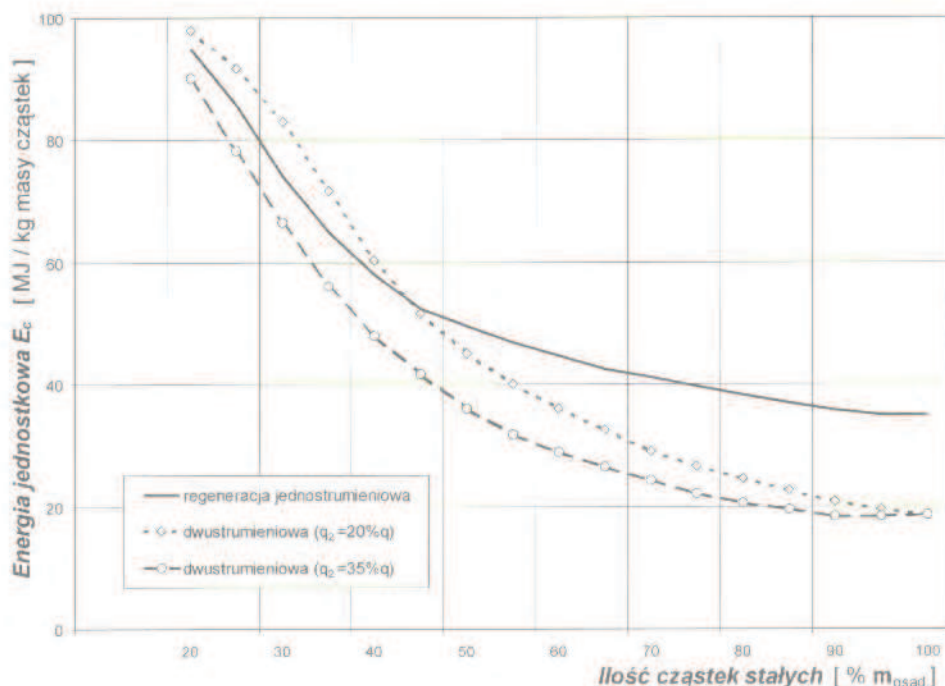
Na rysunku 11 przedstawiono wyniki badań wpływu rodzaju i charakteru dostarczanych strumieni energii na sumaryczną energię jednostkową regeneracji odniesioną do masy cząstek stałych.

Badania prowadzono w oparciu o metodę polegającą na dostarczaniu strumienia Q_{e1} (lub strumieni) energii w okresie endotermicznym, w postaci ciągłej albo przerywanej, do momentu wywołania pierwszych „ognisk” samozapłonu cząstek (pierwszy lokalny początek utleniania), po czym wyłączano zewnętrzne źródła energii (komorę regeneracyjną i nagrzewnicę segmentową). Do dyspozycji rozpoczynającego się wówczas procesu utleniania (okres egzotermiczny) pozostawało głównie źródło energii wewnętrznej Q_m (ciepło wydzielone z utleniania cząstek PM) i część energii pochodzącej z zasobów energii zakumulowanej w komorze regeneracyjnej Q_{pk} i nagrzewnicy segmentowej Q_{pn} .

Można ogólnie stwierdzić, że w miarę wzrostu masy cząstek do utlenienia rośnie udział energii wewnętrznej Q_m w całkowitej sumie energii regeneracji. Dla masy cząstek m_{utl} równej masie osadnikowej monolitu filtra uzyskano trzykrotny spadek zapotrzebowania energii (w porównaniu z $m_{utl} = 25\% m_{osadn}$) do przeprowadzenia procesu pełnej regeneracji.

Dla regeneracji dwustrumieniowej znaczący efekt energetyczny (w odniesieniu do jednostrumieniowej) obserwuje się dla utlenianej masy cząstek $m_{utl} > 60\% m_{osadn}$, a największy dla masy cząstek zbliżonej do masy osadnikowej monolitu filtra.

Efektem przeprowadzonych eksperymentów są charakterystyki przebiegu regeneracji zawierające zmiany temperatur, mocy elektrycznej i natężenia przepływu utleniacza w zależności od czasu. Ze względu na ich czytelność zawierają jedynie przebiegi wybranych temperatur.

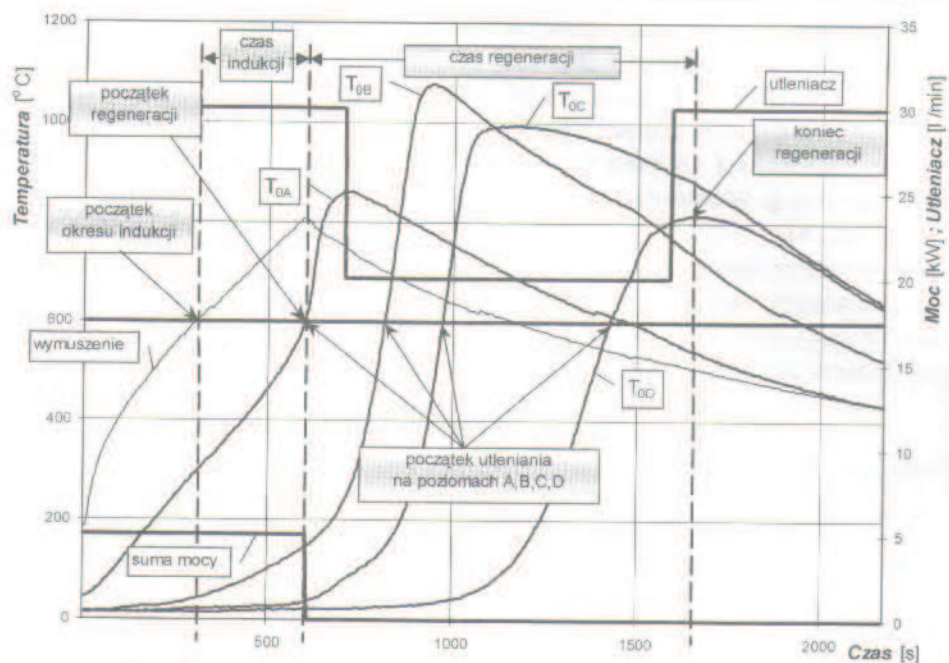


Rys. 11. Wpływ ilości cząstek (w odniesieniu do masy osadnikowej) i rozdziału strumieni energii na sumaryczną energię jednostkową regeneracji, gdzie $E_c = Q_{rl} + Q_m + Q_{pk} + Q_{pn}$.

Fig. 11. The PM quantities influence (with reference to the residue mass) and the energy streams distribution on the total individual regeneration energy. Where: $E_c = Q_{rl} + Q_m + Q_{pk} + Q_{pn}$.

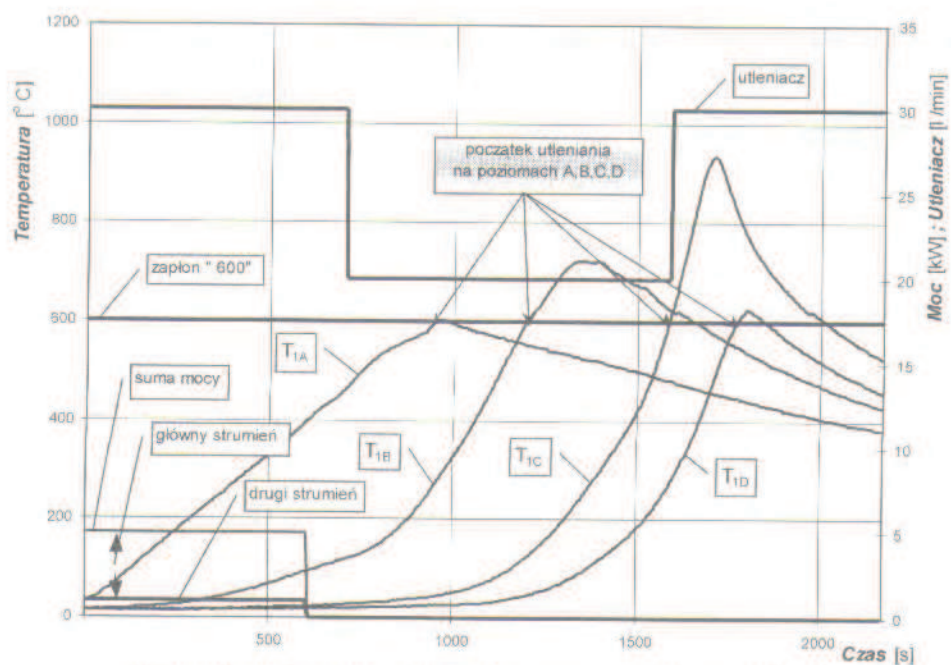
Typowa charakterystyka przebiegu regeneracji (rys. 12), zawiera:

- przebieg temperatury: gorącego powietrza T_{gp} (jako podstawowego nośnika energii) na wlocie do filtra, (tzw. krzywa „wymuszenie”),
- przebieg temperatury T_{An} w „najcieplejszym” punkcie monolitu na poziomie „A” w jego osi (patrz rys. 6),
- przebieg temperatury T_{Dc} w „najzimniejszym” punkcie monolitu tj. na poziomie „D”- wylot w pobliżu pobocznicy,
- przebiegi wybranych temperatur „pośrednich” na poziomach „A, B, C, D”,
- wartość temperatury regeneracji $T_{reg} = T_{520}$ dla filtrów z powłoką katalityczną CuV i T_{600} dla filtra bez powłoki (oznaczone na charakterystykach jako linie „zapłon 520” lub „zapłon 600”),
- przebieg zmian mocy elektrycznej nagrzewania N_e (oznaczone na charakterystykach jako linie „suma mocy” — dla regeneracji jednostrumieniowej: „suma mocy” to dostarczana moc do komory regeneracyjnej, — dla regeneracji dwustrumieniowej: „suma mocy” była równa sumie mocy strumienia głównego z komory i mocy drugiego (pomocniczego) strumienia z nagrzewnicy segmentowej — patrz rys. 13),
- przebieg zmian objętościowego natężenia przepływu utleniacza V (oznaczone na charakterystykach jako linie „utleniacz”).



Rys. 12. Przykład charakterystyki przebiegu regeneracji jednostrumieniowej.

Fig. 12. The course characteristic of the one stream regeneration example.

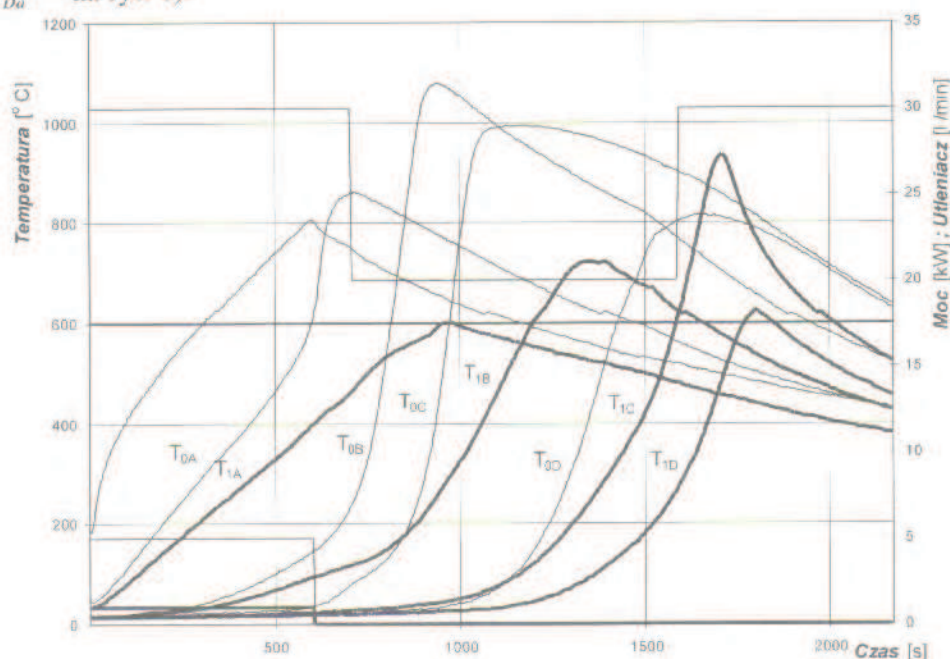


Rys. 13. Przykład charakterystyki przebiegu regeneracji dwustrumieniowej.

Fig. 13. The course characteristic of the two streams regeneration example.

Dla większej przejrzystości opisu charakterystyk wszystkie przebiegi temperatur regeneracji jednostrumieniowej oznaczono jako „ T_0 ”, natomiast regeneracji dwustrumieniowych jako „ T_1, T_2, T_3 ”, „.....”, na odpowiednich poziomach konfiguracji monolitu „A, B, C, D”.

Na rysunkach 13 i 14 opis np. T_{1D} oznacza przebieg temperatury w monolicie podczas regeneracji dwustrumieniowej na poziomie „D” (wylot monolitu) w osi filtra (T_{Da} — na rys. 6).



Rys. 14. Przykład przebiegów porównawczych dla regeneracji jedno- (temperatury T_0) i dwustrumieniowej (temperatury T_1).

Fig. 14. The comparative courses example for the one stream regeneration (temperatures T_0) and the two streams regeneration (temperatures T_1).

Osiągnięcie temperatury regeneracji przez utleniacz nie jest równoznaczne z początkiem utleniania cząstek. Punkt przecięcia krzywej „wymuszenie” z linią „zapłon” (patrz rys. 12) nazwano umownie początkiem okresu indukcji, który trwa do chwili osiągnięcia przez cząstki temperatury zapłonu w jakimkolwiek miejscu monolitu. Z reguły jest to poziom „A” na wlocie monolitu, ale nie zawsze. Wielokrotnie podczas realizacji procesów regeneracji zaobserwowano inicjację początku utleniania na dalszych (B i C) poziomach konfiguracji, zwłaszcza podczas regeneracji dwustrumieniowej, kiedy masa separowanych cząstek znacznie przekraczała masę osadnikową filtra.

Przekroczenie temperatury regeneracji cząstek stałych w określonych miejscach monolitu oznacza rozpoczęcie lokalnego utleniania sadzy, które nazwano początkiem regeneracji. Początek regeneracji filtra wyznacza punkt przecięcia linii „zapłon 520 (lub 600)” z przebiegiem temperatury T_0 (lub T_1, T_2 — dla regeneracji dwustrumieniowej) na poziomie „A” (pełne oznaczenie wg rys. 6 — T_{Aa0}).

Czas końca regeneracji wyznacza punkt określany jako maksimum krzywej przebiegu temperatury T_{Dc0} (lub T_{Dc1} , T_{Dc2} — dla regeneracji dwustrumieniowej) po jej (ich) uprzednim przecięciu linii „zapłon 520 (lub 600)”.

Jeśli któraś z linii T_{Dc} nie przecinała linii „zapłon 520 (lub 600)” funkcję oznaczania końca regeneracji przejmował „pośredni” przebieg temperatury (po uprzednim przecięciu linii „zapłon 520 lub 600”), określając w ten sposób koniec tzw. regeneracji niepełnej.

Weryfikację eksperymentalną przyjętego modelu teoretycznego procesu regeneracji przeprowadzono w oparciu o wybrane przebiegi charakterystyk regeneracji filtrów cząstek stałych typ 100/17/Ex-54B (bez pokrycia monolitu substancją katalityczną).

Dla każdego przypadku regeneracji obliczano natężenie utleniania cząstek stałych w filtrze jako:

$(\dot{m}_p)_{utleniaona}$ — teoretyczne natężenie utleniania z równań modelu,

\dot{m}_{utl} — rzeczywiste natężenie utleniania uzyskane z badań eksperymentalnych.

Teoretyczne natężenie utleniania cząstek stałych obliczano z równania (3) dla przypadku filtra o monolicie bez pokrycia substancją katalityczną ($w_a = 0$, stąd $w_o = w_p$):

$$(\dot{m}_p)_{utleniaona} = m_p \cdot W_o$$

$$(\dot{m}_p)_{utleniaona} = m_p a_p [O_2]^n \exp[-E_p/RT_p]$$

gdzie: m_p — utleniana masa cząstek stałych [g], a_p — stała prędkości reakcji utleniania cząstek stałych (przyjęto $a_p = 300 \text{ m}^3/\text{g s} - \text{wg}[8]$), E_p — energia aktywacji reakcji utleniania cząstek stałych (dla filtra bez powłoki katalitycznej przyjęto $E_p = 118 \text{ kJ/gmol} - \text{wg}[8]$), $[O_2]$ — stężenie tlenu w spalinach [g/m^3]; dane z badań, n — rząd reakcji ($n=1$ dla reakcji Arrheniusa pierwszego rzędu), R — uniwersalna stała gazowa [$8,314 \text{ kJ/kmol K}$], T_p — temperatura powierzchni cząstek stałych [K]; przyjęto $T_p = T_{sr}$ — jako średnią temperaturę warstwy cząstek w okresie utleniania t_{utl} (średnia po objętości z 12 temperatur w okresie t_{utl}); dane z badań.

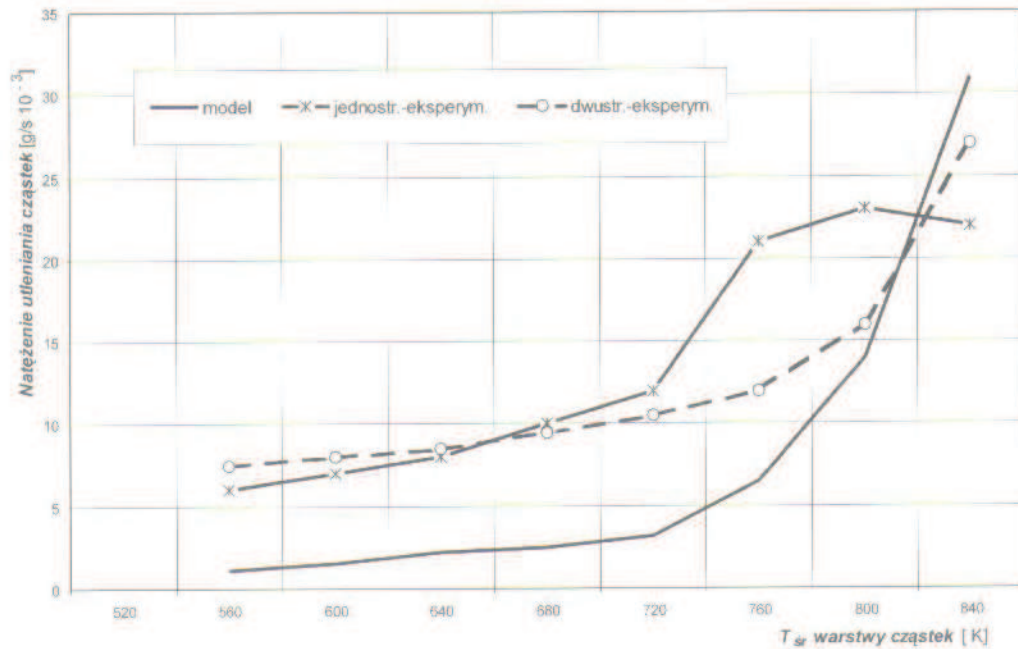
Rzeczywiste średnie natężenie utleniania cząstek stałych w procesie regeneracji obliczano z zależności:

$$\dot{m}_{utl} = \frac{m_{utl}}{t_{utl}} \quad (6)$$

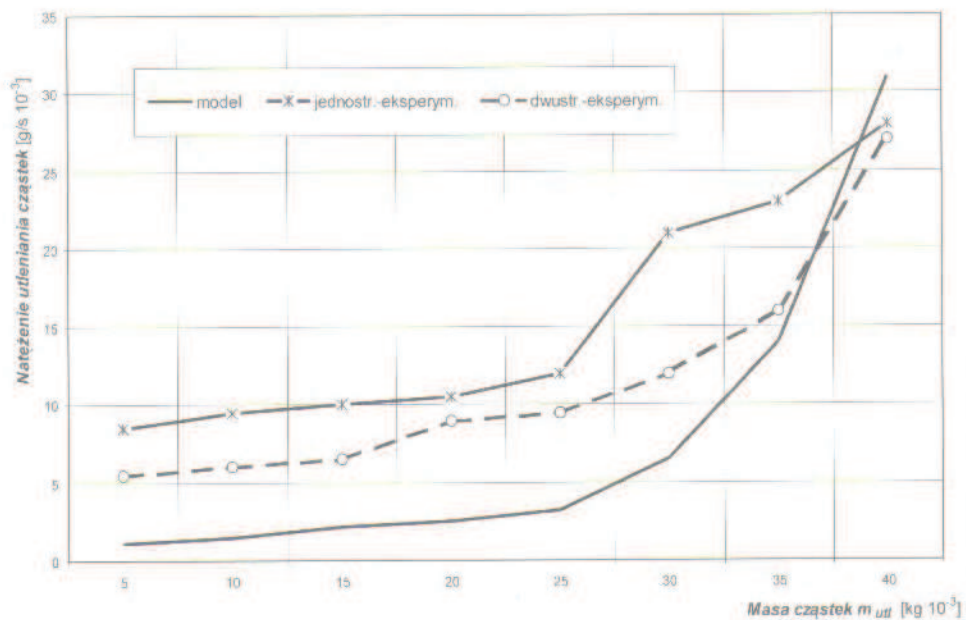
gdzie: m_{utl} — masa cząstek stałych utleniana w procesie regeneracji [g]; dane z badań, t_{utl} — czas utleniania w okresie egzotermicznym [s]; $t_{utl} = t_{reg}$; dane z badań.

Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono porównanie teoretycznego natężenia utleniania cząstek stałych $(\dot{m}_p)_{utleniaona}$ (linia „model”) z rzeczywistym natężeniem utleniania \dot{m}_{utl} uzyskanym z badań (dla regeneracji jedno- linia „jednostr.-eksperyment.” i dwustrumieniowej — linia „dwustr.-eksperyment.”) w zależności od masy cząstek stałych oraz średniej temperatury warstwy cząstek w czasie utleniania.

Dla weryfikowanego modelu istotne znaczenie ma temperatura warstwy cząstek stałych w czasie utleniania. Dla temperatur przekraczających 800 K porównywalność



Rys. 15. Wpływ średniej temperatury warstwy cząstek w monolicie na natężenie utleniania cząstek stałych.
 Fig. 15. The PM coat in the monolith average temperature influence on the intensity of the oxygenation process.



Rys. 16. Wpływ masy cząstek na natężenie utleniania.
 Fig. 16. The PM mass influence on the fast of the oxygenation process.

wyników uzyskanych w modelu i eksperymencie jest największa, a różnica względna nie przekracza 5%. Zakres temperatur $T_{cr} > 800$ K występuje w przypadku dużej masy cząstek stałych utlenianych w okresie egzotermicznym ($m_{utl} > m_{osad}$). Poniżej temperatury 800 K wyniki otrzymane z analizy modelu nie odpowiadają wynikom z badań, co dowodzi słuszności przyjętego modelu jedynie dla masy utlenianych cząstek stałych zbliżonej do masy osadnikowej monolitu filtra.

Dla regeneracji dwustrumieniowej rzeczywiste natężenie utleniania cząstek \dot{m}_{utl} uzyskane z badań wykazuje większe podobieństwo do teoretycznego natężenia (\dot{m}_p)_{utleniająca} niż dla regeneracji jednostrumieniowej, głównie przez zmniejszenie gradientu temperatury w kierunku promieniowym monolitu i wyrównanie prędkości propagacji utleniania w jego przestrzeni.

5. Wnioski, zakończenie

Na podstawie przeprowadzonych badań poziomu emisji cząstek stałych silnika z systemem antysadzkowym i badań procesów regeneracji jedno- i dwustrumieniowej dla przyjętego systemu antysadzkowego można sformułować następujące wnioski:

- Zrealizowana konstrukcja zapewnia spełnienie przez silnik aktualnych norm emisji cząstek stałych, a uzyskane wyniki jednoznacznie wykazują właściwy dobór systemu antysadzkowego do silnika w celu obniżenia jego poziomu emisji cząstek stałych.

- Dwustrumieniowa podaż energii niweluje znaczny gradient temperatury w kierunku promieniowym monolitu i wyrównuje prędkość propagacji utleniania w jego przestrzeni.

- Energetyczny efekt kumulacyjny dwustrumieniowej regeneracji występuje zwłaszcza w przypadkach cyklicznych niepełnej regeneracji.

- Największą skuteczność dla dwustrumieniowej regeneracji uzyskuje się przy współczynniku rozdziału strumienia energii zbliżonym do 30/70 (30% energii dla poboczniczy i 70% podawanej przez utleniacz), dla masy utlenianych cząstek stałych bliskiej masie osadnikowej filtra).

- Optymalny współczynnik rozdziału strumienia energii ma zmienną wartość zależną od masy utlenianych cząstek stałych, przestrzennego rozkładu tych cząstek w monolicie filtra i struktury odfiltrowanych cząstek (głównie aglomeraty sadzy). W przypadku aglomeratów podzielony strumień energii umożliwia, w tym samym cyklu regeneracji, ponowną inicjację utleniania (zwłaszcza w warstwie przypobocznicowej) w przestrzeni monolitu, gdzie pozostają nie utlenione cząstki po przejściu czoła utleniania od głównego strumienia energii.

- Dwustrumieniowy proces regeneracji determinowany jest przez kilka podstawowych czynników. Podobnie jak w regeneracji jednostrumieniowej, aby uzyskać pełną regenerację filtra głównie w wyniku efektu egzotermicznego, masa odseparowanych cząstek stałych (jako potencjalne źródło energii wewnętrznej) musi być nie mniejsza od 20% jego masy osadnikowej. Masa odfiltrowanych cząstek stałych w stosunku do masy osadnikowej filtra decyduje o właściwościach dynamicznych procesu utleniania, czasie

jego trwania oraz skuteczności regeneracji. Najbardziej optymalną dla energochłonności procesu regeneracji i czasu destrukcji jest masa cząstek stałych zbliżona do masy osadnikowej filtra.

- W przypadku regeneracji jednostrumieniowej zbyt mała masa cząstek wymusza doprowadzenie większej ilości energii z zewnątrz, zbyt duża (grozi lokalnymi przekroczeniami dopuszczalnej temperatury stabilności strukturalnej monolitu filtra. Regeneracja dwustrumieniowa, dzięki mniejszemu promieniowemu gradientowi temperatury, pozwala na optymalne sterowanie współczynnika nadmiaru powietrza i zmniejszanie natężenia procesu utleniania w przypadku zbyt dużej masy cząstek. Dla regeneracji dwustrumieniowej proces utleniania prowadzony w zbyt małej masie cząstek traktowany jest jako cykliczny (korzystny energetycznie) przypadek niepełnej regeneracji.

- Natężenie przepływu utleniacza (powietrza) jest wielkością, od której zależy w mniejszym stopniu (w porównaniu do regeneracji jednostrumieniowej) intensywność przejmowania ciepła przez monolit, a w większym stopniu szybkość utleniania cząstek. Sterowanie natężenia przepływu utleniacza ma jednak podstawowe znaczenie w obu rodzajach technologii regeneracji filtrów spalin. Pozwala na skuteczne wygaszanie lub intensyfikowanie procesu utleniania cząstek. Sterowanie natężenia przepływu utleniacza jest szczególnie ważne w okresie egzotermicznym.

- W regeneracji dwustrumieniowej, podobnie jak w jednostrumieniowej, proces utleniania powinien być prowadzony ze średnim współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1,5 \div 2,0$.

- Temperatura stabilności strukturalnej monolitu filtra ogranicza szybkość propagacji czoła utleniania, dlatego sterowanie przebiegu regeneracji w okresie egzotermicznym (dla równości odfiltrowanej masy cząstek stałych i masy osadnikowej) powinno odbywać się tak, aby maksymalny przyrost temperatur nie przekraczał 12 K/s.

- Przyjęty model teoretyczny procesu regeneracji (zweryfikowany eksperymentalnie w warunkach pracy silnikowej dwufiltrowego systemu antysadżowego), jest słuszny głównie dla masy utlenianych cząstek stałych zbliżonej do masy osadnikowej monolitu filtra.

- Dla temperatur warstwy utlenianych cząstek stałych przekraczających 800 K, porównywalność wyników uzyskanych w modelu i eksperymencie jest największa, a różnica względna nie przekracza 5%.

- Dla regeneracji dwustrumieniowej rzeczywiste natężenie utleniania \dot{m}_{utl} uzyskane z badań wykazuje większe podobieństwo do natężenia teoretycznego $(\dot{m}_p)_{\text{utleniająca}}$ niż dla regeneracji jednostrumieniowej, głównie przez zmniejszenie gradientu temperatury w kierunku promieniowym monolitu i wyrównanie prędkości propagacji utleniania w jego przestrzeni.

- Maksymalne wykorzystanie efektu egzotermicznego utleniania cząstek stałych i minimalizacja energii w okresie endotermicznym przy jednoczesnej redukcji energii aktywacji utleniania, przy dwustrumieniowej podaży energii, to sposób na realizację poszukiwanej niskoenergetycznej regeneracji samochodowych filtrów spalin.

Literatura

- [1.] JOHNSON J.H., BAGLEY S.T., GRATZ L.D., LEDDY D.G.: *A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emission Effects*, SAE Paper No. 940233.
- [2.] MERKISZ J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych. Tom 1 i 2*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
- [3.] NAGÓRSKI Z., SWAT M.: *Ograniczenie emisji cząstek stałych pochodzenia motoryzacyjnego*. Problemy Eksploatacji 1/95, Zeszyty Naukowe ITeE, Radom 1995.
- [4.] SOBOCIŃSKI R., SWAT M.: *Ograniczenie emisji cząstek stałych ze spalinami silników o zapłonie samoczynnym*. Problemy Eksploatacji Nr 2/97, Zeszyty Naukowe ITeE, Radom 1997.
- [5.] SWAT M., MADEJ K.: *Badania procesu regeneracji ceramicznych filtrów cząstek stałych dla różnej masy sadzy zgromadzonej w filtrze*. Problemy Eksploatacji nr 3/97, Zeszyty Naukowe ITeE, Radom 1997.
- [6.] SWAT M.: *Badania modelu procesu regeneracji filtrów spalin silników o ZS*. Problemy Eksploatacji Nr 4/98, Zeszyty Naukowe ITeE, Radom 1998.
- [7.] SWAT M.: *Wpływ pojemności osadnikowej filtra cząstek stałych na jego proces regeneracji*. Kwartalnik Naukowy ILuT, Wydanie Specjalne, IV Sympozjum EKODIESEL'98, Warszawa 1998.
- [8.] 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.
- [9.] JORGENSEN M.W., SORENSON S.C.: *A 2-Dimensional Simulation Model for a Diesel Particulate Filter*, SAE Paper no. 970471.
- [10.] MUTTER J., LEPRINCE T., ALEIXO J.: *Steady State and Transient Performance Simulation for Diesel Particulate Filters*. SAE Paper No. 970476.
- [11.] ROMERO A.F., GUTIERREZ R., GARCIA-MORENO R.: *Combustion Processes of Particulate Matter and Soot in Ceramic Filter Traps for Diesel Engines and Numerical Modelling*, SAE Paper No. 970475.

The regeneration process of exhaust gas filters in engine anti soot systems

Summary

The paper describes conditions and criteria of applicability of the two energy streams regeneration method of automotive exhaust gas filters limiting PM emission from Diesel engines. The paper presents results of own investigations of the influence of the character and the energy supply type (in the exo- and endothermic period) on energy consumption and effectiveness of the destruction process of PM separated in the filter.