

A SIMULATIONAL STUDY OF THE INFLUENCE OF COMBUSTION KINETICS ON THE REGENERATION PROCESS OF DIESEL PARTICULATE FILTER

Zdzisław Nagórski, Andrzej Teodorczyk
Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów
00-624 Warszawa, ul. Narbutta 84., POLSKA
Tel.: +(48 22) 660-8783 Fax: +(48 22) 849-0303
e-mail: znak@simr.pw.edu.pl; : ateod@itc.pw.edu.pl

Abstract

In this paper an evaluation of the influence of selected parameters characterizing chemical kinetics of PM combustion on the progress of thermal regeneration of particulate filter is performed. The published values of kinetic parameters of PM combustion which have dominant influence on filter regeneration, are very diversified. The review of published values of soot oxidation parameters that are used in simulation models of filter regeneration is given. The flow-thermal model of regeneration, developed by the authors, was used for simulations with selected values of pre-exponential constant and activation energy for soot oxidation. The results were used for the analysis and evaluation of influence of these parameters on regeneration process.

BADANIA SYMULACYJNE WPLYWU KINETYKI SPALANIA NA PRZEBIEG REGENERACJI FILTRA SPALIN

Streszczenie

W referacie podjęto próbę oceny wpływu wybranych parametrów, charakteryzujących kinetykę procesu spalania PM, na przebieg termicznej regeneracji filtra. Prezentowane w literaturze wartości parametrów, opisujących kinetykę tego procesu, są bardzo zróżnicowane, a ich wpływ na przebieg wypalania filtra - dominujący. Przedstawiono przegląd spotykanych w literaturze wartości parametrów, decydujących o szybkości reakcji utleniania sadzy, wykorzystywanych w modelach symulacyjnych tego procesu. Opracowany model przepływowo-ciepły procesu regeneracji wykorzystano do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych dla wybranych wartości stałej przedeksponencjalnej i energii aktywacji utleniania sadzy. Uzyskane wyniki wykorzystano do analizy i oceny wpływu tych parametrów na przebieg regeneracji.

1. Wprowadzenie

Współczesne metody ograniczania emisji cząstek stałych (PM) z silników ZS, opierają się na niskoemisyjnym spalaniu węglowodorów (HC) w komorach roboczych oraz na filtracji spalin w układzie wylotowym. Tylko połączenie tych działań pozwala spełnić bieżące wymagania ekologiczne i normy emisji PM. Nieustalony charakter pracy silnika ZS w samochodzie sprzyja – bez względu na zastosowany system organizacji zasilania i spalania (np. *common rail*) – produkcji PM. W tej sytuacji najskuteczniejszym sposobem ograniczania emisji PM jest filtracja spalin, która coraz częściej bywa stosowana także w samochodach osobowych.

W układzie filtracji spalin, montowanym zwykle wraz z reaktorem katalitycznym w układzie wylotowym silnika ZS, znajduje się filtr przepływowy – najczęściej porowata lub włókninowa struktura filtrująca, w której osadzają się niegazowe składniki spalin. W cyklu roboczym układu filtrującego rozróżnia się dwie fazy: filtracji spalin i regeneracji termicznej filtra, które w najczęściej stosowanym układzie z jednym filtrem (tzw. układ *simplex*) przebiegają współbieżnie. Po osiągnięciu stanu dopuszczalnego „zapchania” filtra, na proces nadal trwającej filtracji spalin, nakłada się proces wypalania PM (regeneracja filtra). Bazową

strukturą cząstek stałych jest sadza. Jej właściwości adsorpcyjne sprzyjają pochłanianiu ze spalin różnych substancji w fazie stałej lub/i ciekłej – one nadają PM cechy substancji szkodliwej. Sadza z osadzonymi substancjami niegazowymi zwykle dominuje w aerozolu cząsteczkowo-gazowym, jaki stanowią spaliny silnika ZS.

W układach wylotowych silników ZS podczas normalnej eksploatacji temperatura spalin rzadko przekracza 800 K. W tych warunkach termicznych utlenianie PM zachodzi bardzo wolno. Intensyfikację spalania PM można uzyskać dwoma sposobami:

- przez wzrost temperatury spalin w układzie wylotowym (np. dodatkowo ogrzanych elektrycznie, spowodowany dotryskiem paliwa itp.).
- przez obniżenie temperatury utleniania PM w obecności substancji katalitycznych, które mogą być: dodawane do paliwa, wtryskiwane do spalin lub osadzone na powierzchni filtrującej. Bardzo obiecującą jest koncepcja dodatku katalizatora do paliwa, zastosowana m.in. w pierwszym komercyjnym układzie regeneracji filtra spalin w samochodzie osobowym Peugeot 607 HDI. W nowym silniku V6 TDI - Audi zastosowano filtr cząstek stałych z materiałem katalitycznym osadzonym na powierzchni filtrującej [5].

W procesie spalania, w którym są obecne substancje o właściwościach katalitycznych, zmienia się próg energetyczny reakcji, określony wartością energii aktywacji. W procesach regeneracji filtrów interesujące są te katalizatory, które obniżają temperaturę inicjacji utleniania egzotermicznego (obniżają energię aktywacji), a tym samym pozwalają przeprowadzać regenerację przy znacznie niższej (bezpieczniejszej dla filtra) temperaturze i przy mniejszym zużyciu energii cieplnej. Podczas regeneracji z udziałem katalizatorów, utlenianie ma charakter katalityczno-termiczny, gdyż oprócz mechanizmów typowych dla utleniania termicznego, współuczestniczą w nim mechanizmy katalityczne.

Zastosowanie katalitycznych dodatków do paliwa, opartych na metalach takich, jak: Mn, Cu, Ce i Pb, rozproszonych w postaci bardzo małych drobin w paliwie lub w spalinach, prowadzi do obniżenia temperatury regeneracji nawet do 620 K [10, 23, 27], w której następuje samopodtrzymanie procesu spalania.

Oprócz efektów katalitycznych, obserwuje się zapłony PM w jeszcze niższych temperaturach rzędu 480 – 500 K, które są charakterystyczne dla tzw. regeneracji stochastycznej [15]. Ma ona przypuszczalnie swoje źródło w emisji gazowych HC, „zamrożonych” podczas spalania HC w komorze roboczej silnika w temperaturze poniżej 480 K; które kondensują i następnie są adsorbowane przez cząsteczki sadzy ze spalin. Przypuszczalnie regeneracja ta rozpoczyna się w kanalikach porowatych, w których znajduje się sadza z HC i gdzie panują najkorzystniejsze warunki cieplne, a następnie przenosi się do kanałów wlotowych filtra. Ciepło wytworzone podczas niskotemperaturowych reakcji egzotermicznych powoduje lokalne odgazowanie i zapłon HC, co prowadzi do wcześniejszej inicjacji spalania PM.

W układach simplex, w procesie regeneracji utleniaczem są spaliny silnikowe, w których udział molowy tlenu może zmieniać się od ok. 20% (bieg luzem) do ok. 5% (pełne obciążenie silnika), natomiast temperatura spalin w tych warunkach może przyjmować wartości z przedziału 450 – 950 K.

Regeneracja filtra, która przywraca filtrowi cechy filtracyjne, zachodzi w odpowiednich warunkach termiczno-tlenowych, które wyznacza technologia regeneracji filtra. Proces wypalania PM należy do najbardziej ryzykownych faz cyklu roboczego filtra. Dlatego w celu zapewnienia dużej trwałości i skuteczności filtra technologia regeneracji musi być bezpieczna (współczesne filtry spalin, podobnie jak reaktory katalityczne, mają przebiegi eksploatacyjne przekraczające 100 000 km). Znaczny udział w opracowaniu bezpiecznych technologii regeneracji oraz poznawaniu nowych możliwości prowadzenia tego procesu mają – oprócz badań doświadczalnych prototypów – badania symulacyjne modeli filtrów.

2. Wybrane modele symulacyjne procesu regeneracji filtra

W ostatnich 15 latach pojawiło się wiele publikacji na temat modelowania matematycznego regeneracji filtrów spalin. Pionierska praca Bisseta sprzed dwudziestu laty stanowi bardzo wartościową, poprawną matematycznie i strukturalnie procedurę, która nadal jest wykorzystywana w modelowaniu tego procesu. Model Bisseta [3], który był pierwowzorem dla wielu modeli regeneracji, adoptowano i rozwijano m. in. w pracach Bisseta i Shadmana [4], Koltsakisa i Stamatelosa [13], Konstandopoulou i Kostoglou [14], Janiszewskiego i in. [9]: dzięki czemu uzyskano coraz bardziej wiarygodne modele symulacyjne filtracji i regeneracji, często zweryfikowane eksperymentalnie. Fundamentalny model Bisseta z regeneracją termiczną [3] został uzupełniony o mechanizm utleniania katalityczno-termicznego w modelu Koltsakisa i Stamatelosa [13], a jego wersja jednowymiarowa po wszechstronnej weryfikacji doświadczalnej stanowi podstawę struktury komercyjnego programu komputerowego CATWALL [6], opracowanego na Uniwersytecie w Salonikach. Program ten jest wykorzystywany komercyjnie w projektowaniu układów wylotowych silników ZS.

Dwa aspekty modelowania procesów w filtrach spalin wymagają dalszej pracy w celu zwiększenia dokładności obliczeń. Pierwszy to modelowanie napełniania filtra PM i określanie relacji między tym napełnieniem a oporami hydraulicznymi przepływu spalin (spadkiem ciśnienia) przez filtr, których zbyt ni wzrost zmniejsza moc użytkową silnika. Drugi problem to kinetyka utleniania termicznego i katalityczno-termicznego PM (sadzy), z uwzględnieniem utleniania HC zaadsorbowanych przez PM. Ogólnie biorąc, jednowymiarowe modele regeneracji katalityczno-termicznej okazały się przydatne przede wszystkim w modelowaniu regeneracji przy względnie dużych prędkościach przepływu spalin, gdyż wówczas przebieg regeneracji w większości kanałów jest podobny.

Jednak w praktyce najwięcej problemów sprawia regeneracja przy małych prędkościach przepływu spalin, gdyż wówczas zaczynają dominować efekty trójwymiarowe, wynikające z lokalnego, indywidualnego przebiegu regeneracji w kanałach filtra. W takich przypadkach szczególnie przydatnymi są dwu- i trójwymiarowe modele procesu regeneracji filtra. Pierwszy dwuwymiarowy (osiowo-symetryczny) model katalityczno-termicznej regeneracji filtra został opracowany przez Oprisa i Johnsona [22]. Bardzo interesujące rozwiązanie, polegające na sprzężeniu jednowymiarowego modelu CATWALL z trójwymiarowym programem komercyjnym ABAQUS (służącym do obliczeń wytrzymałościowych) zostało przedstawione przez Pontikakisa i in. [25]. Metoda polega na zastosowaniu w programie ABAQUS specjalnej procedury, opartej na modelu CATWALL, która oblicza człony źródłowe reakcji chemicznych w kanałach wlotowych na podstawie pola temperatur, wyliczonego w kolejnym kroku czasowym przez program ABAQUS, oraz pola przepływu, określonego przez podmodel przyrostu masy sadzy w kanałach wlotowych filtra.

W większości modeli wykorzystuje się podmodele spalania węgla lub rzadziej sadzy, choć wiadomo, że przy rzeczywistym spalaniu PM o inicjacji spalania decydują także HC, zaadsorbowane przez sadzę. Inicjacja spalania PM przez niskotemperaturowy zapłon HC stwarza szansę na przeprowadzenie regeneracji filtra przy względnie niskiej temperaturze [11]: jak dotąd modelowego mechanizmu fizykochemicznego tego zjawiska jeszcze nie opublikowano.

3. Porównanie i analiza wybranych cech podmodeli spalania sadzy

Zwykle w modelach regeneracji, PM traktuje się jako sadzę - substancję jednoskładnikową o cechach czystego węgla. W regeneracji filtrów spalin różni się dwa podstawowe mechanizmy spalania sadzy: utlenianie termiczne i utlenianie katalityczno-termiczne. Każdy z wymienionych sposobów utleniania węgla charakteryzuje się inną kinetyką reakcji.

Termiczne utlenianie węgla z wykorzystaniem tlenu zawartego w spalinach (lub powietrzu) zachodzi w temperaturach powyżej 820 K. Podczas spalania termicznego (bez obecności katalizatorów), globalna szybkość termicznego utleniania sadzy k_t obliczana jest z zależności

$$k_t = K \cdot \exp\left(-\frac{E}{\bar{R} \cdot T}\right) \quad (1)$$

gdzie: E – energia aktywacji utleniania sadzy, przyjmująca wartości z przedziału od 80000 do 160000 kJ/kmol [4, 8, 23, 24, 26],

$K = A_\mu \cdot Y_\mu$ lub $K = A \cdot [C_{O_2}]$ – stała przedeksponencjalna,

$\bar{R} = 8,315$ [kJ/(kmol K)],

T [K] – temperatura bezwzględna,

Y_μ – udział molowy tlenu w spalinach,

$[C_{O_2}]$ [g/m³] – masowa koncentracja tlenu w spalinach,

A_μ lub A – stałe charakterystyczne, podane w tabelicy 1.

Tablica 1. Wybrane formuły do obliczania globalnych szybkości termicznego utleniania sadzy k_t [s⁻¹] (E_t – energia aktywacji utleniania termicznego);

Table 1. Selected formulas for calculation of global rates of thermal soot oxidation k_t [s⁻¹] (E_t – activation energy of thermal oxidation)

Autor	Formuła modelu	E_t [kJ/kmol]	Stała A_μ lub A
Field. 1967 [7]	$k_t = A_\mu \cdot Y_\mu \exp\left(-\frac{E_t}{\bar{R}T}\right)$	149 10 ³	7,8 · 10 ⁹ 1/s
Mogaka. 1982 [16]	$k_t = A_\mu \cdot Y_\mu \exp\left(-\frac{E_t}{\bar{R}T}\right)$	142 10 ³	3,68 · 10 ⁶ 1/s
Pauli. 1983 [24]	$k_t = A [C_{O_2}] \exp\left(-\frac{E_t}{\bar{R}T}\right)$	111 10 ³	300 m ³ /(g·s)
Awara. 1997 [11]	$k_t = A [C_{O_2}] \exp\left(-\frac{E_t}{\bar{R}T}\right)$	118 10 ³	300 m ³ /(g·s)

Elementarny ubytek masy sadzy dm_s [kg] utlenianej z szybkością, określoną równaniem (1), ma postać

$$\frac{dm_s}{m_s} = -k_t \cdot dt = -A_\mu \cdot Y_\mu \exp\left(-\frac{E}{\bar{R}T}\right) dt \quad (2)$$

gdzie: m_s [kg] – masa sadzy,

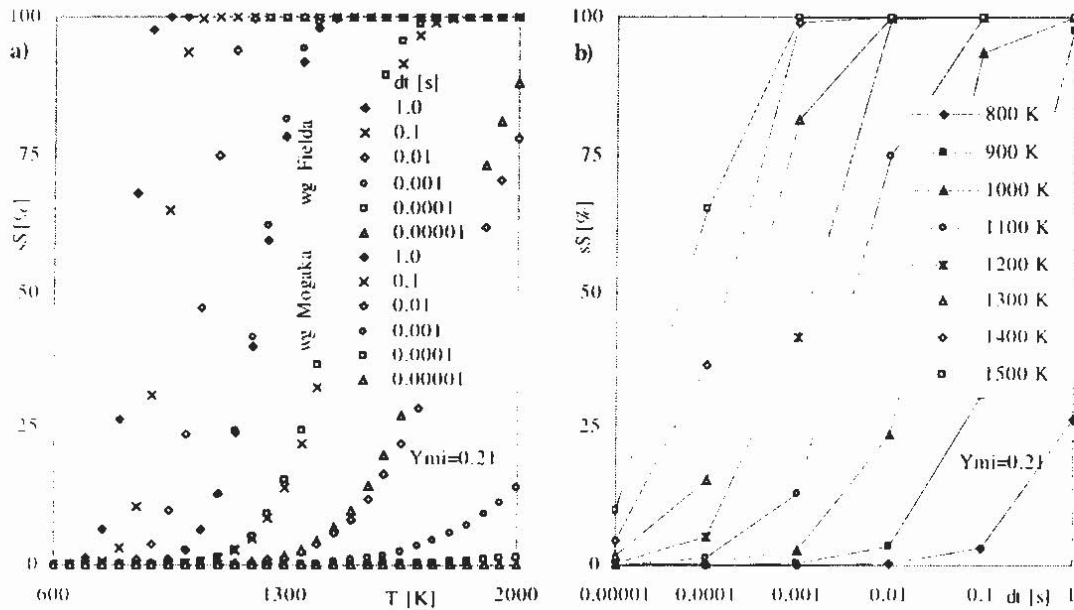
dt [s] – elementarny czas utleniania.

Równanie (2), po scałkowaniu i przekształceniu do postaci bezwymiarowej, pozwala obliczać procentowy ubytek masy sadzy s_s z zależności w postaci

$$s_s [\%] = \frac{m_s - \Delta m_s}{m_s} 100\% = \left\{ 1 - \exp\left[-A_\mu \cdot Y_\mu \cdot \Delta t \exp\left(-\frac{E}{8,315 \cdot T}\right)\right] \right\} 100\% \quad (3)$$

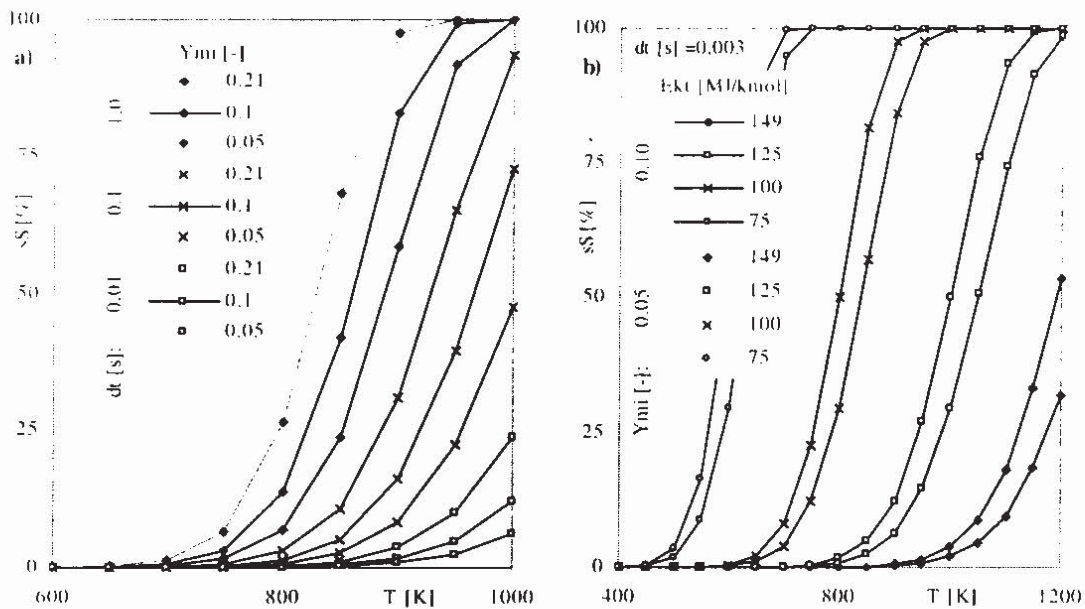
Wzór (3) wykorzystano do analizy wpływu wartości Y_μ , A_μ i E na intensywność ubytku masy sadzy w zależności od temperatury spalania (rys. 1 i 2). W tabelicy 1 zestawiono wybrane postacie formuły Arrheniusa (wzór (1)) oraz występujące w niej wartości E_t , A_μ lub A . W modelach regeneracji termicznej najczęściej przyjmowane są wartości E_t z zakresu 140 do 150 MJ/kmol [12], co uzasadnia ograniczenie dalszej analizy do zależności Fielda [7] i Mogaka [16]. Na rys. 1 porównano ubytki masy sadzy (mierzone wielkością s_s , podczas utleniania w powietrzu o $Y_\mu = 0,21$) w funkcji temperatury spalania i czasu trwania spalania, opisane

ww. zależnościami. Z rys. 1a wynika, że zależność Mogaka opisuje wysokotemperaturowe spalanie sadzy (nieprzydatne w regeneracji filtrów), natomiast zależność Fielda opisuje jej spalanie w zakresie temperatur bardziej typowych dla regeneracji. Z wykresu można oszacować procentowy ubytek masy sadzy przy jej izotermicznym spalaniu w wybranym przedziale



Rys. 1. Procentowy ubytek masy sadzy podczas spalania w powietrzu ($Y_{O_2} = 0,21$): a) w funkcji temperatury, obliczany wg zależności Fielda [7] i Mogaka [16], dla porównywalnych wartości czasów spalania Δt , b) w funkcji czasu spalania Δt , dla wybranych wartości temperatury (wg zależności Fielda [7]);

Fig. 1. Proportional decrease of soot mass during combustion in air ($Y_{O_2} = 0,21$): a) as a function of temperature, calculated from relationship of Field [7] and Mogaka [16], for similar periods of combustion Δt , b) as a function of combustion time Δt , for selected values of temperature (from formula of Field [7])



Rys. 2. Procentowy ubytek masy sadzy w funkcji temperatury spalania: a) obliczany wg zależności Fielda [7] dla wybranych wartości czasu spalania Δt i udziału molowego tlenu Y_{O_2} w spalinach, b) obliczany wg zależności Fielda [7] dla wybranych wartości energii aktywacji E_{kt} i udziału molowego tlenu Y_{O_2} , przy czasie spalania $\Delta t = 0,003$ s

Fig. 2. Proportional decrease of soot mass as a function of temperature of combustion: a) calculated from formula of Field [7] for selected values of combustion time Δt and oxygen mole fraction in combustion products Y_{O_2} , b) calculated from the formula of Field [7] for selected values of activation energy E_{kt} and oxygen mole fraction Y_{O_2} , for combustion time $\Delta t = 0,003$ s

czasu. Na rys. 1b pokazano wykres półlogarytmiczny, ujmujący związki między wielkością s_5 a czasem i temperaturą spalania, z którego wynika, że im wyższa jest temperatura procesu, tym spalanie 100% masy sadzy następuje szybciej. Do dalszej analizy kinetyki termicznego utleniania sadzy dla potrzeb regeneracji przyjęto jako bazową, zależność Fielda w postaci (3), ze stałą $A_{\mu} = 7,8 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ i energią aktywacji $E_i = 149 \text{ MJ/kmol}$.

Na kolejnych wykresach (rys. 2) pokazano – obliczony wg zależności Fielda – wpływ udziału molowego tlenu na kinetykę spalania. Z wykresu (rys. 2a) wynika, że zmniejszenie ilości tlenu w spalinach wyraźnie zmniejsza szybkość spalania sadzy, natomiast zmniejszenie czasu spalania nie zmienia istotnie charakteru tej zależności w analizowanym zakresie zmian temperatury. Na rys. 2b pokazano wpływ zmiany energii aktywacji (E_{kt} – katalityczno-termiczna energia aktywacji) na kinetykę spalania sadzy. Przy dwukrotnym zmniejszeniu wartości tej energii temperatura inicjacji spalania zmniejszyła się z ok. 800 do 450 K, a temperatura 50% ubytku masy sadzy zmniejszyła się z ok. 1200 do 550 K. Widoczna jest tendencja znacznego wzrostu szybkości spalania katalitycznego ze zmniejszaniem wartości energii aktywacji, natomiast zmniejszenie ilości tlenu w spalinach wpływa na spowolnienie procesu spalania. Powyższe zależności uzyskano przy stałych wartościach $A_{\mu} = 7,8 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ i czasu spalania $\Delta t = 0,003 \text{ s}$, który dalej będzie krokiem czasu w modelu symulacyjnym.

Z pokazanych zależności wynika, że kinetyka reakcji spalania sadzy wyraźnie zależy od energii aktywacji E i w mniejszym stopniu od stałej przedeksponencjalnej K (wzór (1)), zależnej m. in. od udziału molowego Y_{μ} tlenu w spalinach. Do analizy wpływu m. in. tych czynników na przebieg regeneracji filtra zbudowano przepływowo-ciepłny model regeneracji.

4. Porównanie procesów regeneracji przy zmianie kinetyki spalania pm

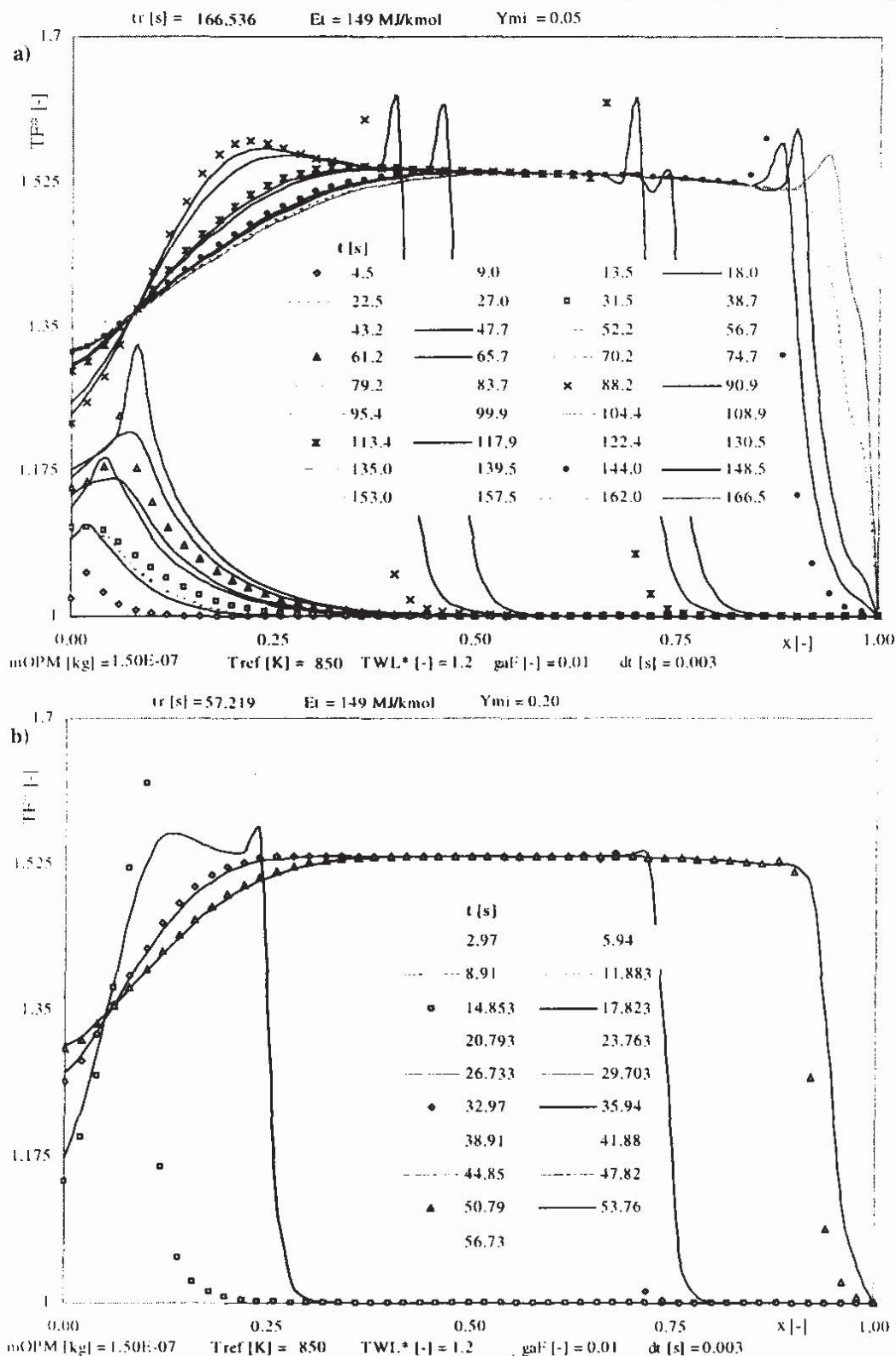
Jednowymiarowy, dyskretny model regeneracji filtra, zbudowany metodą KM3R [17] i opisany bliżej w opracowaniach [18, 19, 20, 21], pozwala na wieloparametryczne – przede wszystkim jakościowe – badania symulacyjne tego procesu. Istotna zależność przebiegu regeneracji od obecności lub nieobecności substancji katalitycznych, które determinują szybkość spalania sadzy – przy jednoczesnym braku dokładniejszych danych literaturowych na temat wartości energii aktywacji i stałej przedeksponencjalnej podczas regeneracji – skłoniły autorów do podjęcia badań, w tym także symulacyjnych, tego problemu.

Poniżej przedstawiono porównanie wyników symulacji dla dwóch wartości energii aktywacji (dla regeneracji bez katalizatora $E_i = 149 \text{ MJ/kmol}$ i z (jakąś) substancją katalityczną $E_{kt} = 125 \text{ MJ/kmol}$) oraz dla dwóch udziałów molowych tlenu w utleniaczu, tj. w spalinach silnikowych na biegu jałowym o $Y_{\mu} = 0,20$ i w spalinach silnika bardzo obciążonego o $Y_{\mu} = 0,05$. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono na modelu 50-elementowym filtra, przy stałych: jednakowej masie sadzy w każdym elemencie dyskretnym $\Delta m_{OPM} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$ (co odpowiada ok. 0,3 kg sadzy w filtrze), dyfuzyjnej grubości ścianki [21] $g_{aF} = 1\%$, kroku czasu $\Delta t = 0,003 \text{ s}$ i temperaturze referencyjnej $T_{ref} = 850 \text{ K}$. Na rysunkach 3 i 4 pokazano rozkłady temperatury bezwymiarowej T_F^* w ściance filtra o bezwymiarowej długości $x [-]$, dla kilkudziesięciu chwil czasu $t_i [s]$, spowodowane napływem spalin o temperaturze T_{WL}^* , z prędkością wlotową $u_{WL} = 0,15 \text{ m/s}$; podano również czasy trwania regeneracji $t_r [s]$.

Na rys. 3ab porównano regeneracje termiczne (bez katalizatorów), przeprowadzone przy dwóch różnych ilościach tlenu w spalinach $Y_{\mu} = 0,05$ i $0,20$. Przy napływie utleniacza o stałej temperaturze $T_{WL}^* = 1,2$ (ok. 1020 K) w obydwu przypadkach temperatura w ściance filtra T_F^* jest podobna i wzrasta o ok. 30 % w stosunku do T_{WL}^* , natomiast czas regeneracji skraca się 3-krotnie, przy 4-krotnym wzroście ilości tlenu w utleniaczu. Większa ilość tlenu w utleniaczu wydatnie przyspiesza spalanie sadzy, nie powodując istotnych różnic w maksymalnej temperaturze regeneracji (mierzonej wartością temperatury ścianki $T_F^* \approx 1300 \text{ K}$).

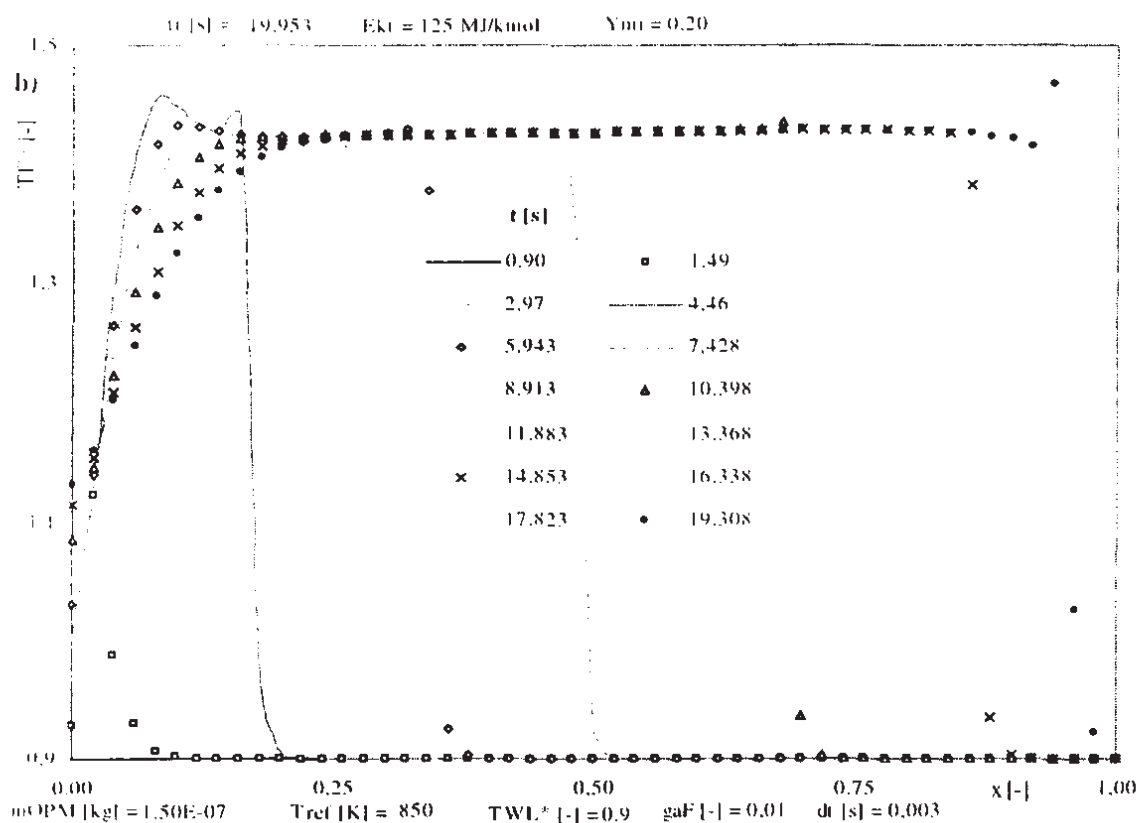
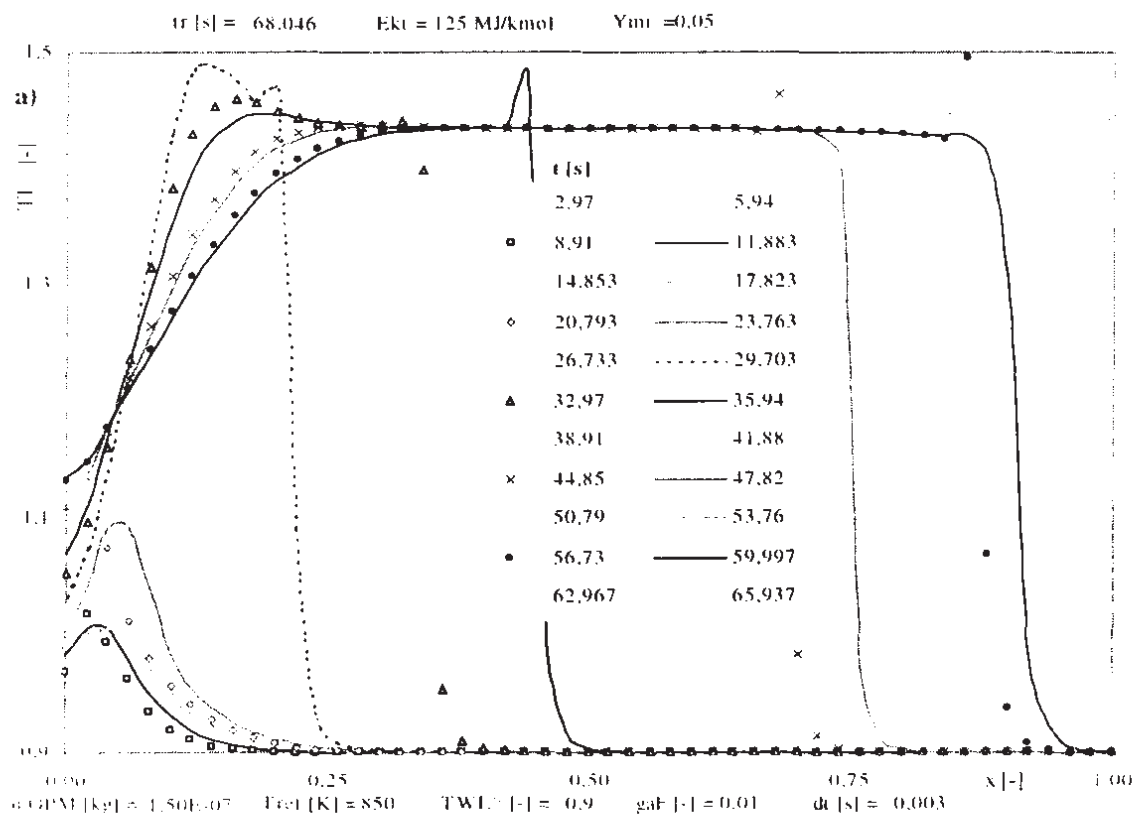
Na rys 4ab porównano regeneracje termiczne wspomagane katalitycznie, dla których

przyjęto mniejszą wartość $E_{kt} = 125$ MJ/kmol oraz zmniejszono temperaturę utleniacza na wlocie do wartości $T_{WL}^* = 0,9$ (ok. 765 K), ze względu na przewidywany znaczny przyrost



Rys. 3. Rozkłady bezwymiarowej temperatury T_F^* w ścianie filtra przy dużej wartości energii aktywacji (termicznej $E_t = 149$ MJ/kmol) w wybranych chwilach regeneracji: a) przy małej wartości udziału molowego tlenu $Y_{mi} = 0,05$ w utleniaczu, b) przy dużej wartości udziału molowego tlenu $Y_{mi} = 0,20$ w utleniaczu;

Fig. 3. Profiles of non-dimensional temperature T_F^* in the filter wall for large value of activation energy (thermal $E_t = 149$ MJ/kmol) for selected values of regeneration time: a) for small values of oxygen mole fraction $Y_{mi} = 0,05$ in oxidizer, b) for large value of oxygen mole fraction $Y_{mi} = 0,20$ in oxidizer



Rys. 4. Rozkłady bezwymiarowej temperatury T_F^* w ścianie filtra przy małej wartości energii aktywacji (katalityczno-termicznej $E_{kt} = 125$ MJ/kmol) w wybranych chwilach regeneracji: a) przy małej wartości udziału molowego tlenu $Y_{O_2} = 0,05$ w utleniaczu, b) przy dużej wartości udziału molowego tlenu $Y_{O_2} = 0,20$ w utleniaczu; Fig. 4. Profiles of non-dimensional temperature T_F^* in the filter wall for small value of activation energy (catalytic-thermal $E_{kt} = 125$ MJ/kmol) for selected values of regeneration time: a) for small values of oxygen mole fraction $Y_{O_2} = 0,05$ in oxidizer, b) for large value of oxygen mole fraction $Y_{O_2} = 0,20$ in oxidizer

maksymalnych temperatur regeneracji. Podczas spalania katalityczno-termicznego, przy spadku wartości energii aktywacji E_{kt} o ok. 17% w porównaniu do E_r , następuje przyrost maksymalnej temperatury regeneracji o ok. 57% (względem temperatury wlotowej) do wartości $T_F^* \approx 1220$ K, niezależnie od ilości tlenu w utleniaczu. Natomiast 4-krotny wzrost tej ilości powoduje w tych warunkach ok. 3,5-krotne zmniejszenie czasu regeneracji katalityczno-termicznej. Natomiast spadek wartości energii aktywacji o ok. 17 % powoduje ok. 2,5-krotne zmniejszenie czasu regeneracji t_r przy małej zawartości tlenu w utleniaczu (por. rys. 3a i 4a) i ok. 3-krotne przy dużej zawartości tlenu (por. rys. 3b i 4b).

5. Podsumowanie

Silny wpływ kinetyki spalania sadzy, opisany prawem Arrheniusa, na przebieg procesu regeneracji samochodowego filtra spalin, potwierdził się także w badaniach symulacyjnych modelu tego procesu. Przedstawione spostrzeżenia mają jedynie charakter jakościowy, gdyż silnie nieliniowy wpływ parametrów takich, jak energia aktywacji E i stała A_{μ} (zależne od mechanizmu chemicznego spalania) oraz czasu spalania na ubytek masy sadzy, ma słabe udokumentowanie eksperymentalne. Wyniki przeprowadzonych rozważań wykazują potrzebę podjęcia badań eksperymentalnych kinetyki spalania sadzy (a następnie PM) w warunkach zbliżonych do panujących podczas regeneracji samochodowego filtra spalin.

W referacie wykorzystano materiały opracowane w projekcie badawczym KBN Nr 9 T12D 026 19 i Pracy Statutowej Nr 504/G/1153/2890/000 realizowanej w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej

Literatura

- [1] Awara A.E., Opris C.N., Johnson J.H.: *A Theoretical and Experimental Study of the Regeneration Process in a Silicon Carbide Particulate Trap Using a Cooper Fuel Additive*. SAE Paper 970188
- [2] Bernhardt M., Nagórski Z., Teodorczyk A.: *Regeneracja samochodowego filtra spalin - badania symulacyjne i eksperymentalne*. Materiały Sesji Naukowej z okazji 80 rocznicy urodzin prof. M. Bernhardta pt.: „Ekonomiczne i Techniczne Problemy Motoryzacji”. ITS – PIMot – WAT – SIMR PW, 23 stycznia. Warszawa, 2003. str. 62-79
- [3] Bisset E.J.: *Mathematical Model of the Thermal Regeneration of a Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter*. Chem. Engineering Science 39, No. 7/8, 1984, pp. 1233-1244
- [4] Bisset E., Shadman F.: *Thermal Regeneration of Diesel Particulate Monolithic Filters*. AIChE Journal, 31(5), 1985, pp. 753-765
- [5] Brzeżański M.: *Nowy silnik V6 TDI firmy Audi z filtrem cząstek stałych*. Silniki Spalinowe nr1 (118), 2004, str. 60-62
- [6] *CATWALL Diesel Particulate Filter Modeling Software - Version VIR3*. University of Thessaly/LTTE, June 2001
- [7] Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B., Hawksley P.G.W. (1967): *Combustion of Pulverized Coal*, BCURA Leatherhead, Cheroy and Sons Ltd.
- [8] Hoffmann U., Ma J.(1990): *Study on Regeneration of Diesel Particulate Filter using a Laboratory Reactor*. Chem. Eng. Technol. 13, pp. 251-258
- [9] Janiszewski A., Nagórski Z., Teodorczyk A.: *TRAP 1.0 – A zero-dimensional computer program for the preliminary analysis of soot regeneration process in diesel particulate filter*. Journal of KONES Int. Comb. Engines, Vol. 8, No. 1-2, 2001, pp. 184-194
- [10] Johnson J., Bagley S.T., Gratz L., Leddy D.A.(1994): *A Review of Diesel Particulate*

Control Technology and Emissions Effects – 1992 Horning Memorial Award Lecture, SAE Paper 94023

- [11] Kandylas I.P., Stamatelos A.M.: *Modeling Catalytic Regeneration of Diesel Particulate Filters, Taking into Account Adsorbed Hydrocarbon Oxidation*. Ind. & Engineering Chemistry Research, No. 38, 1999, pp. 1866-1876
- [12] Koltsakis G.C., Stamatelos A.M.: *Modeling Thermal Regeneration of Diesel Particulate Traps*. AIChE Journal, Vol. 42, No. 6, 1996, pp.1662-1672
- [13] Koltsakis G.C., Stamatelos A.M.: *Modeling Catalytic Regeneration of Diesel Particulate Traps*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 35, 1996, pp. 2-13
- [14] Konstandopoulos A.G., Kostoglou M.: *Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filters*. Combustion and Flame, 121, 2000, pp. 488-500
- [15] Lepperhoff G., Huethwohl G., Qin L.: *Mechanismen zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern durch Kraftstoffadditive*. Motortech. Z. 56(1), 1995, pp. 28-32
- [16] Mogaka Z.N., Wong V.W., Shahed S.M.: *Performance and Regeneration Characteristics of a Cellular Ceramic Diesel Particulate Trap*, SAE Paper 820272
- [17] Nagórski Z.: *Modelowanie przewodzenia ciepła za pomocą arkusza kalkulacyjnego. MRS + Excel = KM3R*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001, str. 224
- [18] Nagórski Z.: *Jednowymiarowy model cieplny procesu regeneracji filtra spalin*. 28th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'2002. Conference Proceedings, Jurata, 8-11 September, 2002, p. 193-203.
- [19] Nagórski Z.: *Symulacyjne badania procesów regeneracji w samochodowym filtrze spalin*. Prace Naukowe Politechniki Radomskiej - Transport nr 1(15), Materiały VI Konferencji TransComp'2002, 4 - 6 grudnia, Zakopane, 2002, str. 421-428
- [20] Nagórski Z., Piechna J., Teodorczyk A.: *Modelling of Flow Phenomena and Soot Oxidation in Diesel Particulate Filter*. 29th International Symposium on Combustion, Sapporo, 22-25 July, 2002, p. 315.
- [21] Nagórski Z., Teodorczyk A., Bernhardt M.: *Regeneracja samochodowych filtrów spalin - tendencje rozwojowe, modelowanie i badania symulacyjne*. Monografia sfinansowana w projekcie KBN Nr 9 T12D 02619. Wyd. Prestisz, Warszawa 2003 (w druku).
- [22] Opris C., Johnson J.H.: *A 2-D Computational Model Describing the Heat Transfer, Reaction Kinetics and Regeneration Characteristics of a Ceramic Diesel Particulate Trap*. SAE Paper 980546
- [23] Pattas K., Michalopoulou C.C.: *Catalytic Activity in the Regeneration of the Ceramic Diesel Particulate Trap*. SAE Paper 920362
- [24] Pauli E., Lepperhoff G., Pischinger F.: *The Description of the Regeneration Behavior of Diesel Particulate Traps with the Aid of a Mathematical Model*. SAE Paper 830180
- [25] Pontikakis G., Stamatelos A., Bakasis K., Aravas N.: *3-D Catalytic Regeneration and Stress Modeling of Diesel Particulate Filters by ABAQUS FEM Software*. SAE Paper 2002-01-1017
- [26] Tognotti L., Longwell J.P., Sarofim A.F.: *Kinetics of soot combustion*. Twenty-Third Int. Symp. Comb., 1990, p.1207
- [27] Wiedemann B., Doerges U., Engeler W., Poettner B.: *Regeneration of Particulate Filters at Low Temperatures*. SAE Paper 850086