

Władysław KOZAK  
Maciej BAJERLEIN  
Tomasz BOROWCZYK  
Łukasz RYMANIAK

PTNSS–2013–SC–169

## Charge motion and combustion processes in the combustion engine cylinder

*The paper analyzes the possibilities of improving the efficiency and sustainability of a combustion engine. It describes the main factors which determine combustion engines production as well as widespread means of decreasing their exhaust emission. In the analysis, the fundamental laws of chemical kinetics are referred to combustion processes in the engine cylinder in order to identify the main factors that determine these processes. The paper focuses mainly on charge motion inside the cylinder during fuel inlet and, in conclusion, it shows that precise air control allows controlling exhaust emission to a certain extent, and consequently, allows controlling engine efficiency.*

Keywords: *charge motion, combustion, exhaust emission*

### Wpływ ruchu ładunku na proces spalania w cylindrze silnika spalinowego

*W artykule zaprezentowano rozważania dotyczące poprawy sprawności oraz własności ekologicznych silników spalinowych. Omówiono czynniki kształtujące rozwój obecnie produkowanych jednostek spalinowych, a także powszechnie stosowane rozwiązania obniżające ich emisję. Przedstawiono podstawowe prawa kinetyki chemicznej i odniesiono je do procesu spalania w cylindrze. Na podstawie tych praw określono najważniejsze czynniki mające wpływ na przebieg spalania. W pracy skupiono się głównie na procesie napełniania oraz ruchu ładunku podczas suwu ssania. Wykazano, że odpowiednie sterowanie powietrzem dostarczanym do cylindra umożliwi uzyskanie pewnej kontroli nad przebiegiem spalania, a co za tym idzie pozwoli wpłynąć na emisyjność oraz sprawność silnika spalinowego.*

Słowa kluczowe: *ruch ładunku, proces spalania, emisja spalin*

### 1. Wprowadzenie

Pomimo wielu wad silnika spalinowego jest on i w dalszym ciągu będzie głównym źródłem energii w wielu obszarach techniki. Szczególnie ważnym obszarem jest motoryzacja, w której jednostki spalinowe powszechnie wykorzystywane są do napędu pojazdów. Ze względów ekonomicznych, ekologicznych oraz legislacyjnych prowadzone są nieustanne działania dążące do uzyskania maksymalnej sprawności ogólnej silnika (obniżania emisji CO<sub>2</sub>) z uwzględnieniem ograniczeń emisji czterech podstawowych składników toksycznych gazów wylotowych: CO, HC, PM i NO<sub>x</sub> [4]. Na terenie Unii Europejskiej dokładne regulacje dotyczące wartości dopuszczalnych wymienionych związków chemicznych zawarte są w normach EURO. W chwili obecnej zapowiadane jest wejście w życie limitów EURO 6 od roku 2014 [2,3].

Konstruktorzy nieustannie dążą w swoich pracach do uzyskania jak najwyższych sprawności silników z jednoczesnym uwzględnieniem spełnienia norm ograniczających ich emisję. W tym celu poszukują nowych rozwiązań konstrukcyjnych, które dotyczą bezpośrednio jednostki spalinowej, a także układów pozasilnikowych. W rozwoju na przestrzeni kilkunastu lat wymienić można poja-

wianie się najważniejszych układów: regulacji kąta początku wtrysku (kąta zapłonu) i ciśnienia wtrysku paliwa, recyrkulacji spalin i regulacji strumienia spalin EGR, różnego rodzaju reaktory katalityczne, chłodzenie powietrza doładowanego za sprężarką, chłodzenie spalin EGR, stosowanie SCR czy podział dawki na części. Jednak nie zawsze podjęte działania zapewniają spełnienie norm ograniczających emisję szkodliwych składników spalin. To oznacza, że konieczne jest prowadzenie dalszych poszukiwań rozwiązania przedstawionego problemu.

Pole pracy silników samochodów osobowych zawarte jest na ogół w następującym, orientacyjnym przedziale: na osi prędkości obrotowej od 750 (900) obr/min do 5000 (7000) obr/min (liczby w nawiasach dotyczą silników o zapłonie iskrowym), a na osi obciążenia między momentem tarcia i charakterystyką pełnej mocy. Przy tak dużych zmianach konieczna jest regulacja i korekcja wartości wielu parametrów pracy silnika (konstrukcyjnych, regulacyjnych itp.). Wymagania do regulacji wzrastają, jeżeli uwzględnia się ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin. W tym przypadku konieczną staje się kontrola przebiegu spalania. Podsumowując, potrzebny jest środek konstrukcyjny, który pozwoli w sposób ciągły oddziaływać na

kinetykę reakcji chemicznych, najlepiej bez konieczności zatrzymywania silnika. Rodzaj środka wynika z teoretycznych podstaw kinetyki reakcji. Dla jego wyjaśnienia przytoczono podstawowe prawa kinetyki.

## 2. Prawa kinetyki chemicznej

Podstawowe prawa kinetyki chemicznej mają charakter fenomenologiczny. W ich postaci wykorzystano prawo statyki chemicznej, ale wyrażenie zmieniono jego sens, jak również zmieniono sens stałej reakcji. Kinetykę reakcji chemicznej opisuje się najczęściej za pomocą czterech praw, zaproponowanych przez Boudarta [6]. Do wyjaśnienia podmiotowego problemu wykorzystane zostaną trzy pierwsze.

**I Prawo:** Szybkość nieodwracalnej reakcji chemicznej  $r$  wyraża równanie:

$$r = k \cdot f(c_i) \quad (1)$$

gdzie współczynnik  $k$ , zwany stałą szybkości reakcji, jest niezależny od stężeń  $c_i$  reagentów. Jest on natomiast zależny od temperatury. Funkcja  $f(c_i)$  opisuje stężenia substratów i produktów reakcji. W przypadku komory spalania silnika substraty tworzą wszystkie składniki paliwa i powietrza, a produktami są wszystkie składniki, jakie znajdują się w komorze po zakończeniu spalania. Szybkość reakcji może być definiowana na różne sposoby. W omawianym przypadku definiowana jest jako:

$$r_i = \frac{R}{V} \quad (2)$$

gdzie  $R$  jest pochodną liczby  $\xi$  postępu reakcji, definiowanego jako:

$$\frac{\delta n_i}{\nu_i} \stackrel{def}{=} d\xi \quad (3)$$

Występujące w tych związkach wielkości oznaczają:  $V$  – objętość komory spalania,  $\nu_i$  – współczynnik stechiometryczny. Wielkość  $\delta n_i$  rozumiana jest jako zmiana liczby moli  $i$  – tego składnika reakcji, jaka nastąpiła w czasie  $dt$ . Uwzględniając powyższe w układach zamkniętych, tak jak w przypadku komory spalania silnika spalinowego, szybkość reakcji  $i$ -tego składnika układu można wyrazić przez stężenie  $c_i$  jako [1]:

$$r_i = \frac{R}{V} = \frac{1}{\nu_i} \cdot \frac{dc_i}{dt} \quad (4)$$

Jest to najczęściej stosowana definicja szybkości reakcji przy wykorzystaniu praw kinetyki.

**II Prawo:** Funkcja  $f(c_i)$  ma postać:

$$f(c_i) = \prod_i c_i^{\lambda_i} \quad (5)$$

gdzie iloczyn rozciąga się na wszystkie składniki układu. Wykładnik potęgi  $\lambda$  nazywany jest rzędem reakcji. Należy zaznaczyć, że rząd reakcji nie jest wielkością zdefiniowaną teoretycznie. Jego wartość wyznaczana jest na drodze eksperymentalnej. Rząd reakcji  $\lambda_i$  zawarty jest w granicach:  $-2 \leq \lambda_i \leq 2$ . W praktyce dla reakcji prostych korzysta się często z równości  $\lambda_i = \nu_i$ , czego nie można rozumieć jako utożsamianie sensu rzędu reakcji z sensem współczynnika stechiometrycznego.

**III Prawo:** Stała szybkości reakcji zależy wykładniczo od temperatury. Zależność tę wyraża równanie Arrheniusa w postaci:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (6)$$

gdzie występują dwie stałe: współczynnik przedwykładniczy  $A$  i energia aktywacji  $E$ . Sens fizyczny obu stałych wynika z istniejących teorii budowy materii [1]. Nie mniej ze względu na złożoność tych teorii ich wartości wyznaczane są najczęściej eksperymentalnie.

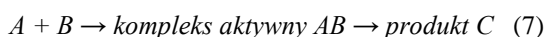
## 3. Jakościowa ocena kinetyki reakcji chemicznych procesu spalania

Ze względu na złożoność układu substratów i produktów oraz warunków panujących w komorze spalania silników spalinowych przytoczone wcześniej prawa są wykorzystywane do obliczeń ilościowych w bardzo ograniczonym zakresie. Najczęściej obliczenia takie mają charakter wstępny i ich celem jest przybliżone oszacowanie skutków spalania. Natomiast są one bardzo cenne do rozważań jakościowych. W takim zakresie zostaną wykorzystane w niniejszym artykule.

Po pierwsze wskazują skuteczny środek oddziaływania na kinetykę reakcji w postaci funkcji stężeń. W silnikach spalinowych funkcja ta jest wykorzystana do regulacji efektu termochemicznego reakcji w postaci ciepła spalania. Środek ten jest na tyle skuteczny, że w połączeniu z regulacją dawkowania paliwa umożliwia nawet zmniejszenie nierównomierności prędkości obrotowej silnika. Jednocześnie nie jest wystarczający z punktu widzenia emisji szkodliwych składników spalin.

Po drugie, w powiązaniu z praktyką to oznacza również, że w tym zakresie nie jest wystarczający wpływ efektu temperaturowego, widocznego w II prawie kinetyki (6) w postaci członu wykładniczej. W związku z tym szukać należy innego środka konstrukcyjnego. Teoria przewiduje taki środek.

Według teorii absolutnej prędkości spalania [1, 6] każda reakcja chemiczna przebiega wg schematu, który opisany zostanie na przykładzie najprostszej reakcji chemicznej między dwoma atomami A i B. Jeżeli w reakcji udział biorą substrat A i substrat B, a w wyniku reakcji powstaje produkt C, to zgodnie z tą teorią zawsze pojawia się po drodze produkt pośredni AB, nazywany w literaturze kompleksem aktywnym. Schemat ten zapisywany jest w postaci:



Kompleks aktywny nie jest jakimś szczególnym związkiem. Wyróżniony został pod potrzeby teorii. Podstawowym aksjomatem teorii absolutnej szybkości reakcji jest założenie, że iloczyn odwrotności czasu życia i funkcji rozdziału oscylacji kompleksu aktywnego jest stałą uniwersalną niezależną od rodzaju rozpatrywanej reakcji. Zatem iloczyn ten limituje czas istnienia kompleksu aktywnego i, tym samym, szybkość reakcji. Wartość stałej  $A_{AB}$  kompleksu aktywnego obliczyć można metodami termodynamiki statystycznej [6]. Wynika z niej, że:

$$A_{AB} = \nu \cdot N \cdot \frac{f_{AB}}{f_A \cdot f_B} \quad (8)$$

gdzie:

$\nu$  – odwrotność czasu życia kompleksu aktywnego,  
 $N$  – liczbę cząsteczek w  $\text{dm}^3$  [ $\text{mol}/\text{dm}^3$ ],  
 $f$  – funkcję rozdziału energii.

Występującą w tym równaniu ogólną funkcję  $f$  rozdziału aproksymuje się dla każdej cząstki (substratu i produktu) jako iloczyn funkcji rozdziału translacji  $f_T$ , rotacji  $f_R$  i oscylacji  $f_W$ :

$$f = f_T \cdot f_R \cdot f_W \quad (9)$$

Uwzględniając ten związek otrzymuje się:

$$A_{AB} = \frac{k_B \cdot T}{h} \cdot \frac{N}{10^3} \cdot \frac{f_{AB,T} \cdot f_{AB,R} \cdot f_{AB,W}}{f_{A,T} \cdot f_{A,R} \cdot f_{A,W} \cdot f_{B,T} \cdot f_{B,R} \cdot f_{B,W}} \quad (10)$$

gdzie:

$k_B$  – stała Boltzmana ( $k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$  [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ]),  
 $h$  – stała Plancka ( $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  [ $\text{J} \cdot \text{s}$ ]),  
 $T$  – temperatura.

Więcej uwagi składowym poświęcono w [1].

Wzór (10) ujawnia istnienie bardzo skutecznego środka oddziaływania na kinetykę reakcji, co wynika z oszacowania przytaczanego w podręcznikach chemii fizycznej. Dla cząsteczki dwuatomowej

można znaleźć następujące oszacowanie: "funkcja rozdziału energii oscylacyjnej około  $10^0$ , funkcja rozdziału energii rotacyjnej około  $10^1 \div 10^2$ , funkcja rozdziału energii translacyjnej około  $10^{23} \div 10^{30}$ , a funkcja rozdziału energii elektronowej około  $10^{6n}$ " [6]. W przytoczonym cytacie zawarta jest niespójność polegająca na tym, że człony: oscylacji, rotacji i elektronowy dotyczą jednej cząsteczki, a translacji – mola cząsteczek. Jednak po uwzględnieniu, że liczba Avogadro  $L_A$  równa jest  $L_A = 6,02252 \cdot 10^{23}$  i tak funkcja rozdziału translacji jednej cząstki osiąga wartość rzędów  $10^2$ - $10^7$ . Jak wynika z przytoczonego oszacowania w rozdziale energii zdecydowanie dominuje translacja. Zatem jej zmiany powinny być skutecznym środkiem oddziaływania na kinetykę reakcji. Fakt ten podsuwa pomysł o charakterze praktycznym. Do ruchu pochodzenia temperaturowego dodanie ruchu wymuszanego czynnikiem zewnętrznym o charakterze zmiennym musi, szczególnie w warunkach komory spalania (ruch tłoka i kształt komory), wywołać zmiany wszystkich funkcji rozdziału wszystkich składników reakcji, a tym samym kształtować kinetykę reakcji zachodzących w komorze spalania.

Translacyjna funkcja rozdziału energii jest niewątpliwie wypadkową rozdziałów wszystkich substratów. Ze względu na koncepcję metody rozwiązania problemu regulacji kinetyki spalania podmiotem opracowania jest ładunek zasysany do cylindra podczas suwu ssania. W silnikach ZS oprócz powietrza, które jest głównym składnikiem, w zasysanym ładunku mogą opcjonalnie znajdować się spaliny EGR i to w znaczącej ilości. Opcjonalnie, gdyż strumień spalin EGR  $\dot{m}_{EGR}$  jest regulowany zależnie od warunków pracy silnika. W warunkach charakterystyki zewnętrznej najczęściej  $\dot{m}_{EGR} = 0$ . Ponadto samo powietrze jest mieszaniną różnych gazów, w której największy udział mają azot i tlen.

Czy zmiana ta może wpływać korzystnie na emisję nie pogarszając energetycznych wskaźników pracy silnika? Podstawowymi substratami reakcji zachodzących w komorze spalania są cząsteczki tlenu i cząsteczki paliwa (węgiel i wodór). Obecne są także inne składniki zarówno powietrza jak i paliwa (np. azot, siarka itp.) Ze względu na wymiary komory spalania wszystkie stosowane dotychczas zabiegi konstrukcyjne w obrębie układu dolotowego i kształtu komory spalania (ukształtowanie denka tłoka i powierzchni głowicy) mają na celu oddziaływanie na ruch cząsteczek powietrza. Przede wszystkim kształtowany jest ruch postępowy wszystkich składników powietrza, a więc translacja. Wraz z nią następują nieuchronnie zmiany rotacji cząsteczek. Działania te są zgodne z przesłankami wynikającymi z teorii absolutnej szybkości reakcji. Natomiast w przypadku paliwa sytuacja jest bardziej złożona. Zakładając, że ścianki otworków i cząstki paliwa są sztywne, przy małej średnicy otworków wtryskiwacza duża prędkość przepływu paliwa w otworkach wymusza silną rotację

cząstek paliwa, szczególnie w strefie przyściennej otworków (działanie czynnika lepkościowego). Nawet przy kształcie bardzo odległym od kulistego cząstki (krople) paliwa będą miały tendencję do toczenia się po powierzchni ścianki (o kształcie walca). Natomiast duża prędkość w osi strugi tendencję tę powinna wzmacniać. Zatem w otoczeniu powierzchni strugi dominować powinien ruch rotacyjny kropel paliwa, natomiast w rdzeniu – postępowy.

Problemy ze spełnieniem istniejących norm ograniczających dopuszczalną emisję oraz niezadawalająco duża emisja CO<sub>2</sub> świadczą, że opisane wyżej zmiany nie rozwiązują w pełni problemu emisji. Powodem są wymagane zmienne warunki pracy silnika. W związku z tym poszukiwać należy dodatkowych środków konstrukcyjnych, które, łącznie z istniejącymi, umożliwią skuteczniejsze oddziaływanie na translację. Skuteczność oddziaływania należy rozumieć w kontekście kształtowania translacji odpowiednio do wymaganej kinetyki spalania.

#### 4. Kształtowanie ruchu powietrza podczas suwu ssania

W dotychczasowych konstrukcjach istnieje stosunkowo dużo środków oddziaływania na ruch powietrza podczas suwu ssania. Jako przykład wymienić można rozdzielenie kanału dolotowego (jeden o kształcie spiralnym, drugi usytuowany stycznie względem osi cylindra), głowice z dwoma lub trzema zaworami ssącymi, regulacja długości przewodu dolotowego (Audi, Volvo i inni) itp. Cechą charakterystyczną wszystkich tego typu zabiegów jest to, że ich oddziaływanie na ruch ładunku kończy się w momencie zamknięcia zaworu ssącego. Przez prawie cały suw ssania objętość komory spalania jest zamknięta. W związku z tym pozostaje niedostępna dla oddziaływań o charakterze zewnętrznym. Mimo to stosowane zabiegi są na tyle skuteczne, że pozwalają uzyskać zadawalające parametry energetyczne. To oznacza, że istniejący w momencie zamknięcia zaworu ssącego ruch ładunku nie zanika do momentu pojawienia się zapłonu czy samozapłonu i wpływa na kinetykę reakcji, ogólnie spalania. Utrzymaniu ruchu sprzyja symetria kształtu objętości komory oraz kształt i stan powierzchni zamykającej ruch: cylinder – powierzchnia walca o odpowiedniej chropowatości, głowica – prawie powierzchnia płaska, denko tłoka – symetryczne zagłębienie o kształcie wargowym, który słabo tłumy ruch obrotowy ładunku (swirl) względem osi cylindra. Zgodnie z (10) ruch wywołany przez układ dolotowy może być wykorzystany jako środek oddziaływania na składową translacji cząsteczek ładunku w czasie spalania. Ze względu na emisję wymagana jest jego regulacja.

Powyższe uwagi mają charakter ogólny i dotyczą zarówno silników o zapłonie iskrowym (ZI) jak

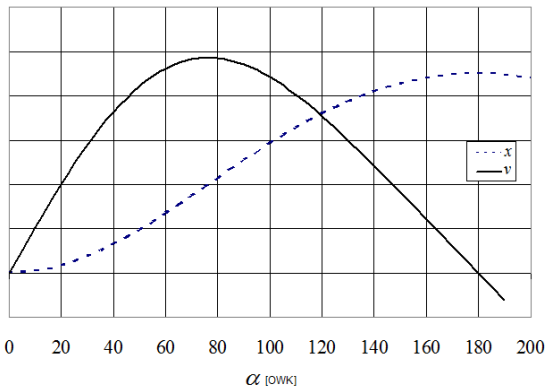
i silników o zapłonie samoczynnym (ZS). W dalszej części artykułu wszelkie rozważania dotyczyć będą silników o ZS. Uwzględniając powyższe możliwości kształtowania ruchu powietrza w momencie zamknięcia zaworu ssącego poszukiwać należy w oddziaływaniu konstrukcyjnym na układ dolotowy. Oddziaływanie to powinno mieć charakter zewnętrzny, tzn. realizowane przez zewnętrzną konstrukcję. Dzięki temu po ustaleniu parametru konstrukcyjnego, który wykorzystany zostanie w celach regulacyjnych i wyposażeniu konstrukcji w układ regulacji wartości tego parametru, stanie się możliwa regulacja wpływu translacji na kinetykę spalania. Oddziaływanie to powinno być sprzężone z kształtowaniem funkcji stężeń (5) (kształtowanie przebiegu doprowadzania paliwa), tj. odpowiednim przebiegiem wtrysku paliwa.

Efektom oddziaływania powinna być zmiana kierunku wektora prędkości cząsteczek i jego wartości. Jednocześnie współczynnik napełnienia silnika nie powinien ulegać znacznemu pogorszeniu. Jego wartość nie powinna być zmniejszana szczególnie w warunkach charakterystyki zewnętrznej, gdyż bezpośrednio wpływa to na moc i moment obrotowy silnika. Natomiast w warunkach obciążeń częściowych bieżąca wartość współczynnika napełnienia nie powinna być mniejsza od wartości progu gwarantującego uzyskanie temperatury samozapłonu. Ponieważ możliwości oddziaływania zewnętrznego kończą się w momencie zamknięcia zaworu ssącego w poszukiwaniu sposobu oddziaływania uwzględnić należy kinematykę tłoka.

Zmianę prędkości ruchu ładunku na drodze konstrukcyjnej najłatwiej jest uzyskać metodą dławieniową przez zwężenie przekroju przepływowego. Jednak ze względu na współczynnik napełnienia zwężenie nie powinno mieć charakteru stałego. Raczej powinien to być chwilowy impuls, a więc wywołany w odpowiednim momencie. Tym samym jego działanie powinno polegać przede wszystkim na chwilowym zaburzeniu przepływu. Ponieważ zaburzenie to ma „przetrwąć” do momentu samozapłonu (prawie cały suw sprężania), więc powinno pojawić się w momencie przewidywanego pojawienia się najsilniejszego oddziaływania bodźca zaburzającego na ruch ładunku. Zatem musi być to skojarzone z ruchem tłoka. Typowy charakter zmian przemieszczenia i prędkości tłoka w konwencjonalnym mechanizmie korbowym pokazano na rys. 1. Pominięto tutaj jednostki na osi pionowej, gdyż prędkość tłoka zależy od prędkości obrotowej wału korbowego. Maksymalna wartość prędkości tłoka przypada na położenie wału korbowego około 80° OWK po GMP.

Prędkość tłoka jest bodźcem wymuszającym ruch ładunku w układzie dolotowym. Ze względu na podatność gazu sprzężenie między prędkością tłoka i prędkością ładunku nie jest sztywne. Jednak wzorując się na rys. 1 szacunkowo można stwierdzić, że ze względu na charakter zmian prędkości

łoka oczekiwać należy, że po wykonaniu około  $\pi/2$  obrotu prędkość przepływu zasysanego czynnika w układzie dolotowym osiągnie wartość maksymalną. Zatem jeżeli w tym momencie na krótko (istotne jest otoczenie kąta obrotu wału, przy którym prędkość przepływu osiąga maksimum) uruchomiony zostanie bodziec zaburzający przepływ, to wywołane nim zaburzenie ruchu ładunku będzie najsilniejsze, a więc najbardziej pożądane z punktu widzenia zewnętrznego oddziaływania na translację ładunku w okresie spalania.



Rys. 1. Przybliżony przebieg przemieszczenia  $x$  i prędkości  $v$  tłoka [5]

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule prawa dotyczące kinetyki chemicznej można z powodzeniem wykorzystać do obliczeń związanych z procesem spalania w silniku spalinowym. Biorąc pod uwagę złożoność tego procesu, trudno jest przeprowadzić analizę ilościową, jednak w ujęciu jakościowym obliczenia takie są bardzo cenne. Opierając się na przedstawionych przesłankach teoretycznych formułowana jest teza, że procesy spalania można kontrolować kształtując ruch ładunku przez układ rozrządu. Oceniając teoretyczne możliwości oddziaływania na powietrze zasysane do cylindra wyciągnięto wniosek, że zaburzenie jego ruchu najłatwiej uzyskać metodą dławieniową. Z teoretycznego punktu widzenia powinno to bardzo korzystnie wpłynąć na poprawę procesu spalania, zmniejszając jednocześnie emisję związków szkodliwych w różnych warunkach pracy jednostki.

The research was funded by the National Science Centre (Narodowe Centrum Nauki) – research project (contract No. 5069/B/T02/2011/40).

Prace sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki – projekt badawczy (umowa nr 5069/B/T02/2011/40).

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

EGR Exhaust Gas Recirculation/*układ recyrkulacji spalin*

SCR Selective Catalytic Reduction/*układ selektywnej redukcji katalitycznej*

## Bibliography/Literatura

- [1] Atkins W. P.: Physical chemistry. PWN, Warszawa 2003.
- [2] Delphi, Worldwide emission standards. Heavy Duty & Off – Road Vehicles 2012/2013, 2012.
- [3] Delphi, Worldwide emission standards. Passenger Cars & Light Duty Vehicles 2012/2013, 2012.
- [4] Merkisz J., Radzimirski S.: The analysis of the possibilities of fulfillment of EU carbon

dioxide emission requirements through non construction methods; a 2011 update. Combustion Engines / Silniki Spalinowe nr 4/2011 (147), p. 22-34, (2011).

- [5] Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe. Wydanie trzecie. WKŁ, Warszawa 1983.
- [6] Praca zbiorowa: Chemia fizyczna. PWN Warszawa 1980.

Władysław Kozak, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Dr hab. inż. Władysław Kozak – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

Tomasz Borowczyk, MSc, Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Tomasz Borowczyk – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*



Maciej Bajerlein, DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Dr inż. Maciej Bajerlein – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

Łukasz Rymaniak, MSc, Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Łukasz Rymaniak – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

