

RESEARCHES OF SELECTED VERSION AXIALLY SYMMETRICAL MODEL PLASMA REACTOR TO CLEANING DIESEL EXHAUST GAS OF PARTICULATES

Andrzej Zawadzki

Andrzej Irzycki

Piotr Kalina

Krzysztof Snopkiewicz

*Institute of Aeronautics
Al. Krakowska 110/114, 00-256 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 8460011 w 683, fax.: +48 22 8465774
e-mail: andzaw@ilot.edu.pl andrzej.irzycki@ilot.edu.pl*

Abstract

The investigations concerning application of plasma reactor to cleaning Diesel exhaust gas of particulates have been led at Institute of Aviation for several years. Crown discharges having positive potential generated in the reactor hand this positive charge over to solid particles contained in engine's fumes. Positively charged particles are subject to agglomeration and then acceleration in electrostatic field, which makes possible their catching in filter module. In present publication one of studied versions of device was described, in which the additional airflow against the high-voltage electrode protecting insulator was applied to prevent the settling down of soot on them. The plasma reactor was powered by 15 kV - high voltage, which allow generating of fully developed corona discharge. The extensive investigations of value of corona discharge current were conducted depending on applied elements generating the discharge (the mesh of thin wires or linear blades) as well as on their configuration. It was found, that the best effects were achieved applying linear blades in form of two compact sets. The flow of fumes behind the reactor was divided in two zones – the internal one, leading the more pure part of fumes and the external one, containing the particulates deflected in electrostatic field, directed to filter module. The swirling vanes were placed on inlet of this module with the aim of producing the field of force of inertia, in which the heavier then fumes particles could be thrown away outside the channel limited with metal mesh and external side. The above mentioned elements form the space allowing the accumulation of caught particulates. Preliminary investigations showed over 60% effectiveness of cleaning of Diesel exhaust gas from solid particles and/or particulates.

Keywords: *exhaust gas, particulate matter, plasma reactor, experimental investigation*

BADANIA WYBRANEJ WERSJI OSIOWO-SYMETRYCZNEGO MODELOWEGO REAKTORA PLAZMOWEGO DO OCZYSZCZANIA SPALIN SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM Z CZĄSTEK STAŁYCH

Streszczenie

Od kilku lat w Instytucie Lotnictwa prowadzone są badania nad zastosowaniem reaktora plazmowego do oczyszczania spalin silnika o zapłonie samoczynnym z cząstek stałych. W reaktorze generowane są wyładowania koronowe o potencjale dodatnim, który przekazuje cząstkom stałym zawartym w spalinach jednoimienny ładunek. Dodatnio naładowane cząstki ulegają następnie aglomeracji i akceleracji w polu elektrostatycznym, co umożliwia ich wychwytywanie w module filtracyjnym. W niniejszej publikacji opisano jedną z badanych wersji urządzenia oczyszczającego, w którym zastosowano nadmuch dodatkowego powietrza zabezpieczający izolator wysokonapięciowej elektrody przed osadzaniem się na niej sadzy. Reaktor plazmowy pracował pod napięciem 15 kV

generując w pełni rozwinięte wyładowania koronowe. Przeprowadzono obszerne badania wartości prądu wyładowań koronowych w zależności od zastosowanych elementów generujących wyładowania (siatki cienkich drutów, bądź ostrzy liniowych) oraz od ich konfiguracji. Stwierdzono, iż najlepsze efekty można uzyskać stosując ostrza liniowe w postaci dwóch zwartych zestawów. Przepływ spalin za reaktorem rozdzielono na dwie strefy - wewnętrzną czystszych spalin oraz zewnętrzną spalin zawierających odchylone w polu elektrostatycznym cząstki stałe kierowane do modułu filtracji. Moduł ten wyposażono na wlocie w łopatki silnie zawirowujące spaliny w celu wytworzenia pola sił masowych odrzucających cięższe od spalin cząstki na zewnątrz kanału ograniczonego metalową siatką i ścianką zewnętrzną. Elementy te tworzyły przestrzeń umożliwiającą gromadzenie wychwyconych cząstek. Wstępne badania wykazały ponad 60% skuteczność oczyszczania spalin z cząstek stałych.

1. Wprowadzenie

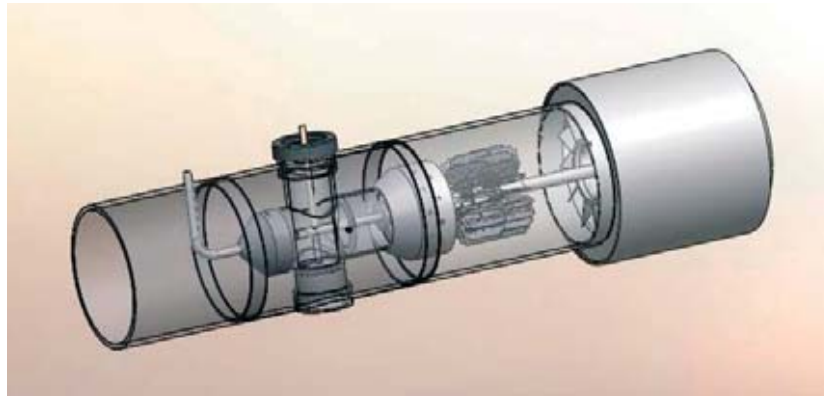
Z dostępnych publikacji wynika, że w wielu renomowanych ośrodkach badawczych w ostatnim dziesięcioleciu XX wieku rozpoczęto badania reaktorów plazmowych w kierunku oczyszczania spalin silnika Diesla z cząstek stałych, bądź w kierunku redukcji toksycznych składników spalin. Większość cząstek stałych zawartych w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym jest zjonizowana, ładunek niesiony przez cząstki waha się od 1 do 5 jednostek elektrostatycznych, zaś udział cząstek naładowanych stanowi 70-88% [1, 2]. Zachętą do podjęcia badań nad elektrostatycznym oczyszczaniem spalin z cząstek stałych był fakt, iż nie trzeba było sztucznie jonizować cząstek, a efekty uzyskiwano już przy napięciu kilku kV, podczas gdy w elektrofiltrach stosowane są napięcia co najmniej o rząd wielkości wyższe [3]. Efektywność oczyszczania uzyskiwana tą drogą okazała się zbyt niska wobec szybko zaostrażających się przepisów ekologicznych i wobec konkurencyjnego rozwoju filtrów sadzowych. Wkrótce pojawiły się informacje o badaniach zmierzających do obniżenia emisji NO_x poprzez wyładowania koronowe w spalinach [4, 5]. Podstawowe informacje o reaktorach plazmowych zostały dobrze przedstawione w [5]. Badano wiele rodzajów reaktorów plazmowych. Do najczęściej opisywanych należą reaktory oparte o zjawisko wyładowań koronowych poprzez warstwę dielektryka lub warstwę granulatu, w których stosuje się napięcie zmienne. Inną ideą było stosowanie wyładowań koronowych wywoływanych przez stały wysokonapięciowy potencjał dodatni lub ujemny w celu jednoimiennego naładowania cząstek z następną ich akceleracją w polu elektrostatycznym i wychwytywaniem w specjalnych modułach. Przykładem rozwoju tej idei były opisane w [6] badania prowadzone w firmie Robert Bosch A.G. nad urządzeniem, w którym zastosowano układ zębatach wkładek wirowych wtryskiwacza jako generatora wyładowań koronowych. Naładowane cząstki przyspieszane w polu elektrostatycznym ulegały aglomeracji i kierowane były do cyklonu wychwytyjącego. W 2000 r. podobne badania rozpoczęto w Instytucie Lotnictwa uzyskując w „płaskim” urządzeniu oczyszczającym efektywność oczyszczania dochodzącą do 40%, [6]. Obecnie badania są kontynuowane w ramach projektu badawczego 4 T12D 042 29, w którym za cel postawiono sobie opracowanie urządzenie pracującego w układzie osiowo-symetrycznym. Pierwsze efekty tej ostatniej pracy przedstawiano na konferencjach KONES [7,8]. Jednym z najtrudniejszych do rozwiązania problemów było szybkie osadzanie się sadzy na izolatorach elektrod, co uniemożliwiało skuteczną pracę urządzenia w dłuższym okresie czasu. W wersji urządzenia opisanej poniżej uzyskano znaczny postęp w tym zakresie.

2. Badana wersja urządzenia oczyszczającego

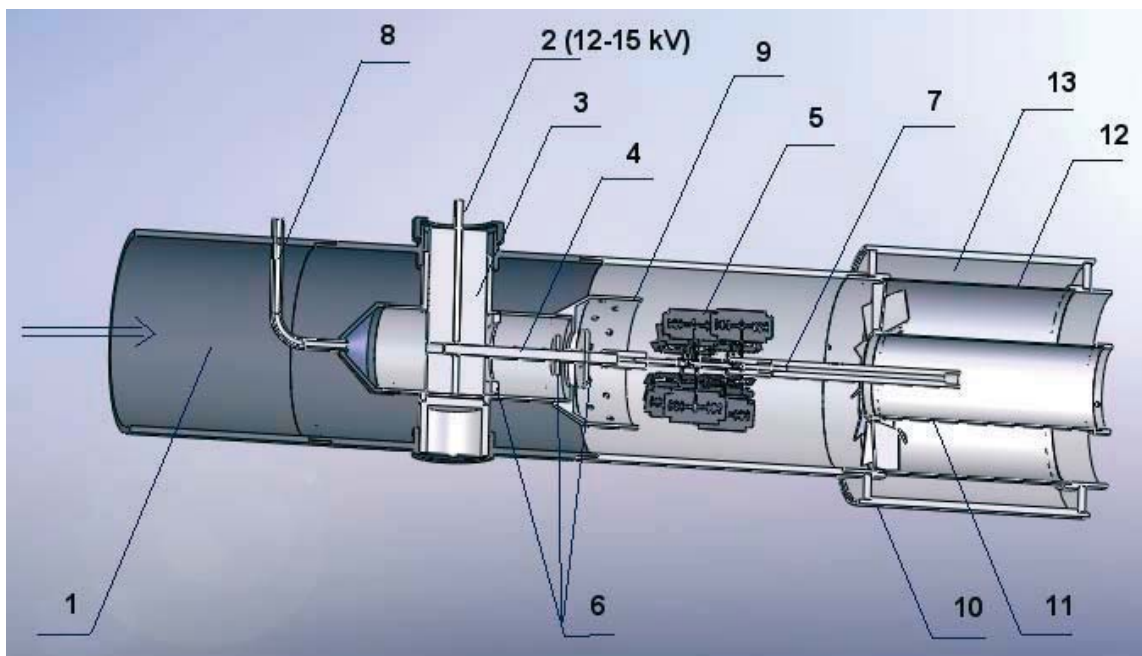
Na poniższym Rys. 1. przedstawiono badane osiowo-symetryczne modelowe urządzenie oczyszczające spaliny z cząstek stałych.

W kanale (1) odprowadzającym spaliny z silnika (4-cyl. silnik doświadczalny Ursus 4390), usytuowanym za kolektorem wylotowym silnika, zabudowano reaktor plazmowy i moduł filtracyjny. Potencjał dodatni (12 – 15 kV względem obudowy) generowany przez zasilacz f-my Ultravolt doprowadzono poprzez elektrodę (2) umieszczoną wewnątrz ceramicznego wspornika-izolatora (3). Na poziomej elektrodzie roboczej (4) mocowano kolejne warianty elementów generujących wyładowania koronowe (5) (na rysunku - wariant zdwojonych ostrzy

liniowych), tarczki (6) zapobiegające osadzaniu się sadzy na izolatorze oraz elektrodę (7) odchylającą dodatnio naładowane cząstki stałe w kierunku odśrodkowym.



Rys. 1. Osiowo-symetryczny model reaktora plazmowego spalin silnika o zapłonie samoczynnym z cząstek stałych
Fig. 1. Axially symmetrical model plasma reactor to cleaning diesel exhaust gas of particulates



Rys. 2. Przekrój - urządzenie oczyszczające spaliny z cząstek stałych
Fig. 2. Cross section - device for purifying exhaust fumes of particulates

Penetracji sadzy w kierunku izolatora (3) przeciwdziałał strumień powietrza wdmuchiwany przewodem (8). Centralna osłona (9) poziomej elektrody (4) rozszerzała się w końcowej części, w której nawiercono szereg otworów. Zmniejszenie przekroju poprzecznego przepływu spalin w tej części kanału powodowało wzrost prędkości przepływu spalin i spadek ciśnienia statycznego. Wewnątrz centralnej osłony ciśnienie statyczne było wyższe, co generowało przepływ zwrotny poprzez otwory w osłonie zapobiegający penetracji sadzy w głąb osłony. Za obszarem wyładowań koronowych przepływ spalin rozdzielono na dwie części. Dodatkowo naładowane cząstki stałe odchylane w polu elektrostatycznym między obudową a elektrodą odchylającą (7) kierowane były na zewnątrz. Ta część spalin przepływała poprzez łopatki zawirowujące (10) modułu filtrującego wyposażonego w dwie cylindryczne siatki. Siatka (11) tworzyła równocześnie przestrzeń ograniczającą centralną część przepływu spalin, siatka (12) umożliwiała przedostawanie się cząstek stałych do przestrzeni (13), w której gromadzono wychwycone cząstki. Cząstki stałe niesione przez przepływ zawirowany łopatkami (10) poddane były dodatkowo odchylaniu w polu sił masowych wywołanych ruchem wirowym. Cząstki stałe,

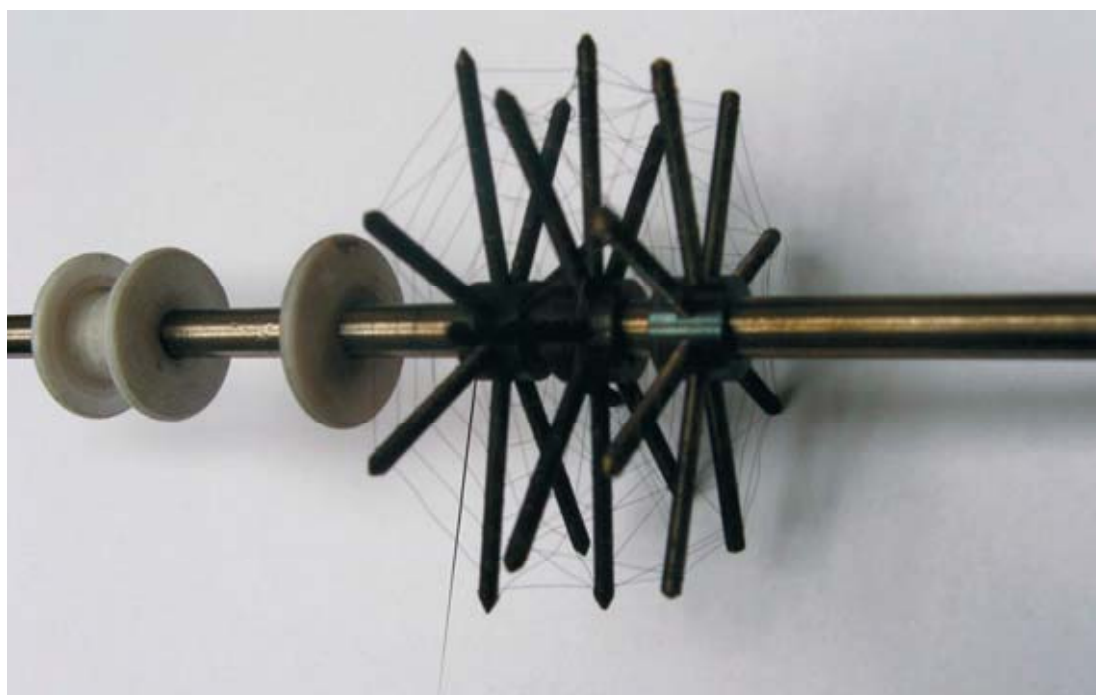
które mogły być niesione przez centralny przepływ spalin odchylane były w kierunku siatki (11) pod warunkiem, iż uzyskiwały one ładunek dodatni. Opisany wariant urządzenia oczyszczającego umożliwiał wykonywanie testów, np. testu 8-fazowego ECE, bez konieczności częstego czyszczenia izolatora elektrody. Natomiast konstrukcja wyodrębniająca przestrzeń (13) przeznaczoną do magazynowania cząstek stałych wymaga modyfikacji, jeśli ma spełniać swoją rolę w dłuższym okresie czasu. W trakcie badań przestrzeń (13) opróżniana była z sadzy przed każdym testem, co nie było kłopotliwe ze względu na możliwość poziomego przemieszczania zewnętrznej ścianki zamocowanej suwliwie względem obudowy.

3. Dobór elementów generujących wyładowania koronowe

Empirycznego doboru dokonano na podstawie porównania wartości prądu wyładowań koronowych generowanych poprzez badane warianty elementów w urządzeniu zabudowanym w kolektorze wylotowym spalin. Przebadano dwa zasadnicze warianty elementów - wariant z siatką cienkich drutów i wariant ostrzy liniowych. W trakcie badań zmieniano nie tylko rodzaj elementów, lecz także wzajemne usytuowanie elementów względem siebie, względem centralnej osłony i względem modułu filtracji. Usytuowanie to miało istotny wpływ na prąd wyładowań koronowych. Poniżej przedstawiono wyniki badań porównawczych ograniczając się do najbardziej istotnych.

3.1. Badane elementy generujące wyładowania koronowe

Przebadano pojedynczą, podwójną i potrójną siatkę cienkich drutów oraz pojedynczy, podwójny i potrójny zwarty układ ostrzy liniowych. Na Rys. 3-4 przedstawiono niektóre z badanych elementów generujących wyładowania koronowe.



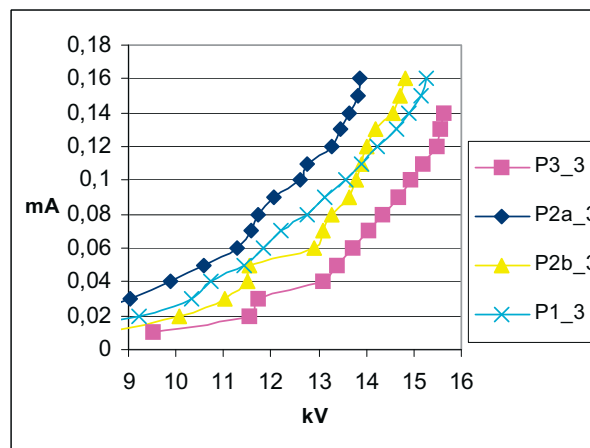
Rys. 3. Potrójna siatka cienkich drutów
Fig. 3. Threefold mesh of thin wires

3.2. Wartości natężenia prądu wyładowań koronowych

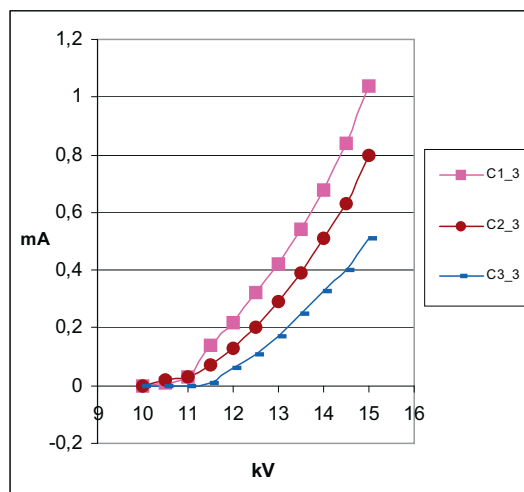
Na poniższych rysunkach przedstawiono porównanie wartości natężenia prądu wyładowań koronowych dla zasadniczych wariantów elementów generujących te wyładowania (rozdz. 3.1).



Rys. 4. Pojedynczy układ ostrzy liniowych
Fig. 4. Single configuration of linear blades



Rys. 5. Porównanie natężenia prądu wyładowań koronowych na siatkach z cienkich drutów
Fig. 5. The comparison of crown discharges amperage on meshes from thin wires

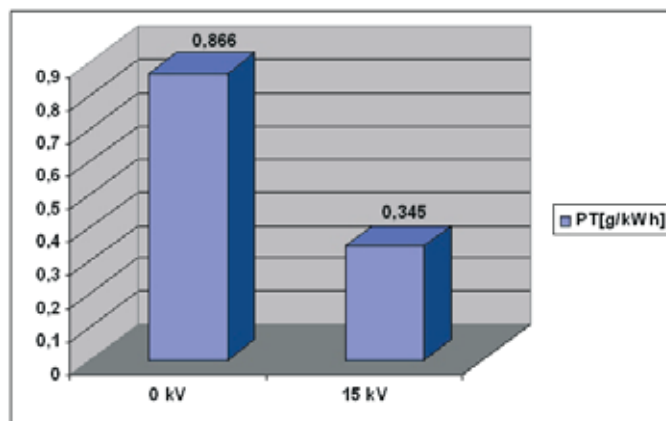


Rys. 6. Porównanie natężenia prądu wyładowań koronowych na ostrzach liniowych
Fig. 6. The comparison of crown discharges amperage on linear blades

Z porównania powyższych wykresów wynika, że natężenie prądu wyładowań koronowych generowanych na przebadanych ostrzach liniowych jest znacznie wyższe niż w przypadku siatki cienkich drutów. Najbardziej efektywny okazał się zwarty podwójny układ ostrzy liniowych (Rys. 2.).

4. Uzyskana efektywność oczyszczania spalin z cząstek stałych

Poniżej przedstawiono wyniki efektywności oczyszczania spalin w wariancie (Rys. 1.) dobranym w trakcie opisanych wyżej badań.



Rys. 7. Emisja cząstek stałych w g/kWh wg dyrektywy europejskiej 97/68/EC przy napięciu zasilającym 15 kV i bez napięcia

Fig. 7. Particulates emission in [g/kWh] in acc. with 97/68/EC Directive at 15 kV DC supply and without voltage

Badany układ oczyszczania spalin charakteryzował się ponad 60% skutecznością separacji cząstek stałych.

5. Podsumowanie

- Skutecznie zabezpieczono izolator wysokonapięciowej elektrody przed osadzaniem się na nim sadzy wprowadzając nadmuch dodatkowego powietrza i odpowiednio kształtując pole przepływu spalin w końcowej części reaktora plazmowego. Dla potwierdzenia skuteczności rozwiązania przewiduje się wykonanie próby 10-godzinnej,
- W wyniku badań stwierdzono, iż prąd wyładowań koronowych zależy zarówno od rodzaju zastosowanych ostrzy generujących te wyładowania jak też od ich geometrycznej konfiguracji i położenia względem poszczególnych elementów urządzenia. Celowe są dalsze pogłębione badania w tym zakresie,
- Dopracowania wymaga moduł filtracji spalin dla umożliwienia gromadzenia wychwyconych cząstek w oddzielnym zasobniku. Użyty moduł częściowo zastępuje cyklon poprzez zastosowanie intensywnego zawirowania spalin. Jednakże nie występuje w nim zmiana kierunku przepływu, zaś osadzone cząstki mogą powracać do strumienia spalin. W układzie płaskim [6, 7] układ konstrukcyjny był znacznie korzystniejszy niż w układzie osiowo-symetrycznym,
- Mimo to, iż moduł filtracji należy udoskonalić, uzyskano 60% skuteczność oczyszczania spalin w 8-fazowym teście wg Dyrektywy ECE,
- W dalszych badaniach przewiduje się wykonanie testów emisji toksycznych składników spalin.

Literatura

- [1] Schweimer, G. W., *Ion probe in the exhaust manifold of diesel engines*, SAE 860012.
- [2] Kittelson, D. B., Reinertsen, J., Michalski, J., *Further Studies of Electrostatic Collection and Agglomeration of Diesel Particles*, SAE 910329.

- [3] Bertoli, C. & all, *Performance Evaluation of Particulate Traps for Passenger Car Diesel Engines*, SAE ICE-Vol. 5.
- [4] Roth, G. J., Ekchian, J., Rush (Litex Inc.), J., *Reduction of exhaust gas emissions using a low power corona discharge device*, SAE 1999-0103636.
- [5] Wegst, R., Russ, H., Neiger, M., Liu (Univ. of Karlsruhe), S., *Experimental and Theoretical Investigations of Removal of NO_x from Diesel-type Engine Exhaust Using Dielectric Barrier Discharge*, SAE 1999-01-3686.
- [6] Zawadzki, A., *Elektrostatyczne oczyszczanie spalin silnika o zapłonie samoczynnym z cząstek stałych*, Problemy eksploatacji, Zeszyty naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, Nr 4/2003.
- [7] Zawadzki, A., Irzycki, A., Kalina, P., Snopkiewicz, K., *Reserches of axially symmetrical model plasma reactor to cleaning diesel exhaust gas of particulates*, Journal of KONES Powertrain and Transport 2007, Vol. 14 No. 4 Warsaw 2007.
- [8] Zawadzki, A., Irzycki, A., Kalina, P., Snopkiewicz, K., *Reserches of model plasma reactor for purify diesel exhaust gas of particulates*, Journal of KONES Powertrain and Transport 2006, Vol. 13, No. 3 Warsaw 2006.

