

BADANIA EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH Z UKŁADU HAMULCOWEGO POJAZDU SAMOCHODOWEGO

A STUDY OF THE PARTICULATE MATTER EMISSION FROM THE BRAKING SYSTEMS OF MOTOR VEHICLES

W pracy przedstawiono problem emisji cząstek stałych, związanej z ruchem pojazdów samochodowych. Zwrócono uwagę na szczególne zagrożenie przez pyły emitowane z par trybologicznych pojazdu, przede wszystkim z układu hamulcowego. W celu zbadania zjawiska emisji cząstek stałych z układu hamulcowego opracowano i wykonano specjalne stanowisko badawcze, umożliwiające pomiar emisji cząstek stałych dla różnych warunków pracy par trybologicznych. Opracowano układ do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego w postaci specjalnej ssawki, umieszczonej za zaciskiem tarczy hamulcowej. W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych stwierdzono możliwość zmniejszenia emisji cząstek stałych z układu hamulcowego nawet więcej niż o 70% dzięki zastosowaniu opracowanego układu.

Słowa kluczowe: pojazdy samochodowe, układ hamulcowy, emisja cząstek stałych.

This paper looks at the question of particulate matter emission in connection with motor vehicle traffic. Attention is called to the special threat posed by particulate matter emitted from a vehicle's tribological vapors, primarily as stemming from the braking system. A special test stand allowing the measurement of particulate matter emission subject to various modes of tribological vapor activity was designed and built in order to examine the phenomenon of the emission of particulate matter by braking systems. A system for decreasing the emission of particulate matter from braking systems has been developed in the form of special suction nozzles placed behind the disc brake caliper. Preliminary tests as conducted show that it is possible to decrease the emission of particulate matter from braking systems by even more than 70% thanks to the application of the developed system.

Keywords: motor vehicles, braking systems, emission of particulate matter.

1. Wprowadzenie

Jednym z najpoważniejszych zanieczyszczeń powietrza, szczególnie w aglomeracjach miejskich, jest pył – PM (particulate matter) [1–3, 6–14, 16, 17, 23, 20–26]. W zależności od umownych wymiarów cząstek pyłu wyróżnia się [7, 14, 16, 17, 24, 25]:

- pył całkowity TSP (total suspended particles) – mieszaninę małych cząstek stałych o umownych wymiarach mniejszych niż 300 μm , zawieszonych w powietrzu (faza rozproszona układu dwufazowego ciała stałe – gaz) [14, 16, 17, 24, 25],
- pył zawieszony PM10 – o umownych wymiarach mniejszych od 10 μm ,
- pył drobny PM2.5 – o umownych wymiarach mniejszych od 2,5 μm

W badaniach silników spalinowych dodatkowo wyróżnia się tzw. nanocząstki o wymiarach charakterystycznych rzędu nanometrów, tzn. mniejsze od 1 μm [14, 19, 22], stanowiące pył praktycznie niewidzialny.

Szkodliwość pyłów w powietrzu dla zdrowia jest powszechnie znana. Pierwszą pracą zawierającą informacje o szkodliwym oddziaływaniu pyłów na zdrowie ludzi było dzieło Georgiusa Agricoli z 1524 roku pt. „De re metalica” [1]. Od tego czasu literatura tematu jest niezwykle obszerna, m.in. [6, 7, 11, 12, 14, 20, 22–26].

Szkodliwość pyłów dla zdrowia jest zróżnicowana w zależności od składu chemicznego i mineralogicznego oraz budowy

1. Introduction

One of the most serious forms of air pollution, especially in municipal agglomerations, is particulate matter (PM) [1–3, 6–14, 16, 17, 23, and 20–26]. Depending on the defined sizes of the particles, particulate matter may be identified as [7, 14, 16, 17, 24, and 25]:

- total suspended particles (TSP) – a mixture of particulate matter with defined dimensions less than 300 μm that are suspended in the air (dispersed dual-phase particulate matter – gas phase) [14, 16, 17, 24, 25],
- suspended particulate matter PM10 – defined dimensions of less than 10 μm , and
- fine particulate matter PM2.5 – defined dimensions of less than 2.5 μm .

In the study of combustion engines, what are known as nanoparticles, with dimensions in the nanometer range – i.e. less than 1 μm [14, 19, 22] – are additionally identified and make up particulate matter that, in practice, is invisible.

The hazard to health caused by particulate matter in the air is universally known. The first study containing information about the dangers of particulate matter impact on human health was a work by Georgius Agricola from the year 1524 entitled *De re metalica* [1]. From that time onwards, topical literature is exceptionally broad, including [6, 7, 11, 12, 14, 20, and 22–26].

The hazard represented by particulate matter to health varies depending on chemical and mineralogical makeup as well as the physical structure of the particulate matter particles

fizycznej cząstek pyłu [2, 3, 6, 7, 11, 12, 16, 17, 23–26]. Sposób oddziaływania pyłów na organizmy żywe jest również silnie uzależniony od wymiarów cząstek pyłów [2, 3, 6, 7, 12, 16, 17, 19, 25, 26].

Sposób oddziaływania pyłów na zdrowie ludzi można przedstawić w postaci udziałów depozycji pyłów zatrzymywanych przez różne części układu oddechowego ludzi w zależności od średnic ziaren – rysunek 1 (na podstawie [25]).

Oprócz negatywnego oddziaływania pyłów na zdrowie ludzi i zwierząt stwierdza się również szkodliwe wpływanie pyłów na rośliny oraz na glebę i wody. Wspólnie z dwutlenkiem siarki, tlenkiem węgla i innymi związkami pyły przyczyniają się do powstawania zjawiska smogu londyńskiego [10]. Pyły mają również wpływ osłabiający na zjawisko cieplarniane w atmosferze [14]. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że pyły ograniczają widoczność.

Podstawowymi naturalnymi źródłami pyłów są materiały osadowe, aerozole morskie, roślinne i zwierzęce, wybuchy wulkanów i pożary lasów. Antropogennymi źródłami pyłów w powietrzu są właściwie wszystkie procesy produkcyjne i procesy spalania paliw (przede wszystkim paliw stałych). Szczególnie dużo pyłów jest emitowanych z energetyki, przemysłu chemicznego, wydobywczego, metalurgicznego oraz budowlanego [21], zwłaszcza z produkcji cementu, a także z transportu [3, 6–10, 12–15, 17–20, 22, 23].

Szczególną rolę w procesach emisji pyłów ze źródeł antropogennych zajmuje transport drogowy ze względu na masowość użytkowania samochodów. Pyły ze źródeł motoryzacyjnych pochodzą z [6, 7, 15, 20]:

- samochodów,
- ogumienia kół jezdnych i nawierzchni drogi,
- zanieczyszczeń stałych znajdujących się na drodze – w postaci wzniesienia pyłów.

Źródłami pyłów, pochodzących z samochodu, są [3, 6, 7, 12, 14, 15, 17, 20, 24]:

- silnik spalinowy – cząstki stałe są zawarte w spalinach [6–10, 13–15, 19–23],
- pary trące – przede wszystkim w układzie hamulcowym oraz w sprzęgle,
- części samochodu, ulegające zużyciu eksploatacyjnemu.

Emisja cząstek stałych zawartych w spalinach pochodzi głównie z silników o zapłonie samoczynnym, chociaż w najnowszych regulacjach prawnych na poziomie Euro 5 (ew. Euro V) i Euro 6 (Euro VI)¹ przewiduje się również uwzględnianie

[2, 3, 6, 7, 11, 12, 16, 17, and 23–26]. The impact of particulate matter on living organisms is also strongly linked with the dimensions of the particulate matter particles [2, 3, 6, 7, 12, 16, 17, 19, 25, and 26].

The manner of influence of particulate matter on human health may be presented in the form of the share of depositions of particulate matter stopped by various parts of the human respiratory system, depending on the diameter of the grain – Figure No. 1 (on the basis of [25]).

Apart from the negative impact of particulate matter on human and animal health, the detrimental influence of particulate matter on plants as well as soil and water has also been noted. Together with sulfur dioxide, carbon monoxide, and other compounds, particulate matter plays a part in the occurrence of phenomena such as London smog [10]. Particulate matter also has a weakening influence on the greenhouse effect of the atmosphere [14]. Attention should also be called to the fact that particulate matter restricts visibility.

The primary natural sources of particulate matter are sedimentary materials, marine, plant and animal aerosols, volcanic eruptions, and forest fires. Anthropogenic sources of particulate matter in the air include all manufacturing and fuel burning processes (primarily solid fuels). Particularly large amounts of particulate matter are emitted by power engineering and the chemical, mining, metallurgical, and construction industries [21], especially the production of cement, as well as transportation [3, 6–10, 12–15, 17–20, 22, and 23].

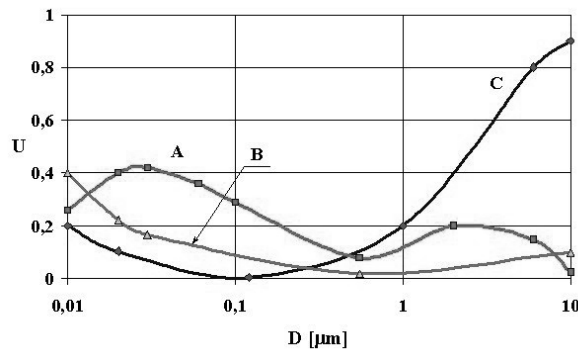
Due to the widespread use of motor vehicles, a special role in the process of particulate matter emission from anthropogenic sources is played by road transportation. Particulate matter from motoring sources is derived from [6, 7, 15, 20]:

- motor vehicles,
- road wheels and road surfaces, and
- particulate pollution found on the road in the form of stirred up particulate matter.

Sources of particulate matter stemming from motor vehicles include [3, 6, 7, 12, 14, 15, 17, 20, and 24]:

- combustion engines – particulate matter as found in fumes [6–10, 13–15, and 19–23],
- friction vapors – particularly from the braking and clutch systems, and
- motor vehicle parts subject to wear through use.

The emission of particulate matter as contained in fumes mainly stems from spontaneous ignition engines, although the newest legal regulations at level Euro 5 (or Euro V) and Euro 6 (or Euro VI)¹ also assume the taking into account of the emis-



Rys. 1. Rozkład średnic pyłów (udział depozycji – U), zatrzymywanych w różnych częściach układu oddechowego człowieka (na podstawie [25]): A – płuca, B – tchawica i oskrzela, C – nosogardło

Fig. 1. Distribution of particulate matter diameters (share of depositions – U) stopped by various parts of the human respiratory system (on the basis of [25]): A – lungs, B – trachea and bronchial tubes, and C – nose-throat

¹ Przyjęto się używać numeracji arabskiej do kategorii samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych, badanych na hamowni podwozowej w testach jezdnych (wyznacza się emisje drogowe zanieczyszczeń), oraz numeracji rzymskiej do silników samochodów ciężarowych i autobusów, dla których badania są wykonywane na hamowni silnikowej (wyznacza się emisje jednostkowe zanieczyszczeń) [18].

¹ The common practice is to use Hindu–Arabic numerals in the category of automobiles and light trucks tested on chassis test beds in driving tests (defining specific road emission) and Roman numerals in the case of truck and bus engines for which the tests are conducted on an engine test bed (defining specific brake emission) [18].

emisji cząstek stałych z silników o zapłonie iskrowym, które mogą być znaczącym źródłem pyłu drobnego (w tym nanocząstek), szczególnie w wypadku silników o wtrysku bezpośrednim [18]. Wiedza na temat emisji cząstek stałych z silników spalinyowych jest stosunkowo najlepiej rozpoznana spośród wszystkich źródeł emisji pyłów z transportu drogowego. W wyniku zgromadzenia obszernej wiedzy empirycznej o emisji cząstek stałych z trakcyjnych silników spalinyowych udało się stworzyć bazy danych, umożliwiającą skuteczne modelowanie tej emisji w różnych warunkach pracy silników spalinyowych [6, 7, 10, 14]. Wiedza na temat emisji cząstek stałych z innych niż silnik źródeł motoryzacyjnych jest znacznie skromniejsza i mniej usystematyzowana [6, 7, 15, 20].

Istniejące modele emisji cząstek stałych ze źródeł transportu drogowego są przedstawione i przeanalizowane w pracach [6, 7]. W wyniku przeprowadzonej analizy zaproponowano w pracach [6, 7] autorski sposób usystematyzowania zagadnień modelowania emisji cząstek stałych z pojazdów samochodowych.

Spośród par trybologicznych w samochodach szczególną rolę ze względu na wytwarzanie pyłów odgrywa układ hamulcowy. Pary trące w układzie hamulcowym są znaczącym źródłem emisji pyłów w związku z zadaniem spełnianym przez układ hamulcowy w postaci rozpraszania energii kinetycznej pojazdu. Ocenia się, że przeciętny samochód zużywa rocznie około 0,5 kg materiału ciernego z układu hamulcowego.

Emisja pyłów z układów hamulcowych pojazdów jest dotychczas niedostatecznie przebadana – w związku z tym podjęto się zadania oceny tej emisji w warunkach symulujących pracę w pojeździe, co jest tematem niniejszej publikacji.

2. Badania empiryczne emisji pyłów z par trących układu hamulcowego samochodu

Badania empiryczne emisji pyłów z par trących układu hamulcowego samochodu przeprowadzono w celu opracowania metody zmniejszenia tej emisji.

Badania przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałowych w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie. W wyniku przeprowadzonych wstępnych rozpoznawczych badań emisji pyłów z układu hamulcowego opracowano badawcze urządzenia do zmniejszania tej emisji z układów zarówno tarczowych, jak i bębnowych. Na rysunku 2 przedstawiono schemat urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego, a na rysunku 3 – z bębnowego.

Dokładny opis metody i sposobu podejścia do zagadnienia zamieszczono w zgłoszeniach patentowych nr P 386829 i nr P 386923.

Do badań wykorzystano stanowisko Krauss II RWS75A typu AB-738, przeznaczone do badania współczynnika tarcia między materiałami ciernymi w tarczowym układzie hamulcowym. W układzie zmniejszania emisji pyłów przeanalizowano dwie możliwości sterowania przemieszczania się pyłów w wyniku obiegu powietrza wymuszonego:

- nadciśnieniem,
- podciśnieniem.

emission of particulate matter from spark ignition engines that may be a significant source of fine particulate matter (including nanoparticles), especially in the case of direct injection engines [18]. Knowledge concerning particulate matter emission from combustion engines is relatively the most complete from among all sources of particulate matter emission in road transportation. As a result of the accumulation of wide-ranging empirical knowledge on the emission of particulate matter from combustion traction engines it was possible to create a data base making possible the efficient modeling of such emission subject to various combustion engine operating conditions [6, 7, 10, 14]. Knowledge regarding the emission of particulate matter from motor vehicle sources other than engines is much more modest and less systematized [6, 7, 15, and 20].

The existing models of particulate matter emission from road transportation sources are presented and analyzed in papers [6 and 7]. As a result of the conducted analysis, what is proposed in papers [6 and 7] is a proprietary method for systematizing the question of modeling of particulate matter emission from motor vehicles.

Among tribological vapors in motor vehicles, a special role is played by the braking system due to its generation of particulate matter. Friction vapors in the braking system are a significant source of particulate matter emission in connection with the job performed by the braking system – the dissipation of the vehicle's kinetic energy. It is estimated that the average motor vehicle uses approximately 0.5 kg of braking system friction material each year.

The emission of particulate matter from vehicle braking systems is still poorly investigated. It is for this reason that work was undertaken at assessing such emission subject to simulated vehicle operating conditions. This is the topic of this publication.

2. Empirical tests of particulate matter emission by friction vapors from motor vehicle braking systems

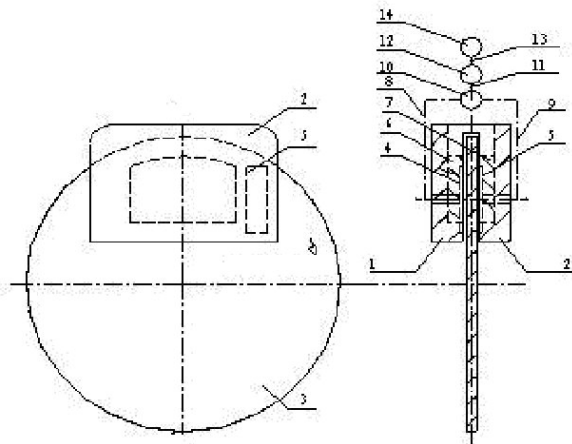
Empirical studies of particulate matter emission stemming from the friction vapors of the motor vehicle braking system were conducted in order to develop methods for decreasing such emission.

Research was conducted at the Material Testing Laboratory (LBM) of the Automotive Industry Institute of Warsaw. As a result of the preliminary investigative testing as conducted on the emission of particulate matter from braking systems, a test device has been developed to decrease such emission in the case of both disc and drum brakes. Figure No. 2 presents the schematic diagram of the device for decreasing the emission of particulate matter from disc brake system, while Figure No. 3 shows the device for drum brakes.

A detailed description of the method and approach to this question is found in patent application No. P 386829 and No. P 386923.

An AB-738 Krauss II RWS75A test machine designated for testing the friction value between friction materials in disc brake systems was used in the study. The system for decreasing particulate matter emission analyzed two possibilities for controlling the movement of particulate matter as a result of the circulation of forced air:

- positive pressure, and
- negative pressure.



Rys. 2. Schemat urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego. Oznaczenia: 1 i 2 – zaciski, 3 – tarcza hamulcowa, 4 i 5 – otwory ssące, 6 i 7 – nakładki cierne, 8, 9, 13 – przewody metalowe, 10 – trójnik, 11 – przewody elastyczne, 12 – filtr, 14 – kolektor ssący

Fig. 2. Schematic diagram of device for decreasing particulate matter emission from disc brake systems. Legend: 1 and 2 – calipers, 3 – brake disc, 4 and 5 – suction openings, 6 and 7 – friction pads, 8, 9, and 13 – metal conduits, 10 – T-connection, 11 – flexible conduits, 12 – filter, 14 – suction manifold

W wyniku wstępnych badań rozpoznawczych wybrano rozwiązanie z zastosowaniem podciśnienia. Za takim rozwiązaniem przemawia m.in. możliwość wykorzystania w samochodzie podciśnienia z kolektora dolotowego silnika.

Do odsysania pyłów z par trących w układzie hamulcowym wykorzystano produkty firmy Schmalz: płaską owalną ssawkę NBR45G1/4, współpracującą z eżektorem SEM100SDA oraz filtrem STF3/4⁷-IGN do pyłów o wymiarach większych niż 3 μm . W układzie pneumatycznym odsysania pyłów było stosowane podciśnienie 36,5 kPa. Prędkość obrotowa tarczy hamulcowej wynosiła w badaniach 667 min^{-1} .

Obiektem badań były:

- tarcza hamulcowa do samochodu Mercedes o grubości 12 mm i średnicy zewnętrznej 270 mm,
- zaciski W 123 dwustronnego działania do samochodu Mercedes,
- nakładki cierne o polu powierzchni 55 cm^2 .

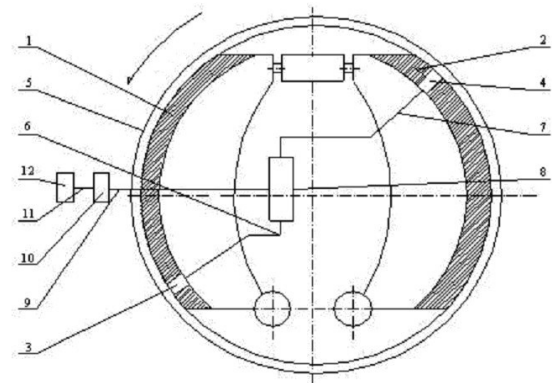
Stanowisko badawcze przedstawiono na zdjęciach – rysunki 4 i 5.

Do badań opracowano specjalny program komputerowy sterujący pracą stanowiska. Wielkościami sterującymi są:

- liczba cykli hamowań,
- temperatura tarczy hamulcowej, przy której następuje włączenie wyciągu – t_a ,
- temperatura tarczy hamulcowej, przy której następuje wyłączenie wyciągu – t_z .

Liczba cykli hamowań była przyjmowana w próbach od 10 do 100. Temperaturę włączania wyciągu przyjęto na podstawie wstępnych badań równą 300°C, a wyłączenia 100°C.

W wyniku wstępnych badań przyjęto położenie ssawki nad nakładkami ciernymi z zastosowaniem szczeliny o szerokości 1,5 mm.



Rys. 3. Schemat urządzenia do zmniejszania emisji pyłów z bębnowego układu hamulcowego. Oznaczenia: 1 i 2 – szczęki hamulcowe, 3 i 4 – otwory ssące, 5 – bęben hamulcowy, 6, 7 i 11 – przewody metalowe, 8 – trójnik, 9 – przewody elastyczne, 10 – filtr, 12 – kolektor ssący

Fig. 3. Schematic diagram of device for decreasing particulate matter emission from drum brake systems. Legend: 1 and 2 – brake shoes, 3 and 4 – suction openings, 5 – brake drum, 6, 7, and 11 – metal conduits, 8 – T-connection, 9 – flexible conduits, 10 – filter, 12 – suction manifold

As a result of the preliminary investigative tests, the solution using negative pressure was selected. This solution is favored due to the possibility of utilizing the negative pressure of the engine intake manifold of the motor vehicle, for example.

Schmalz manufactured products – an NBR45G1/4 flat oval suction nozzle operating with an SEM100SDA ejector and an STF3/4⁷-IGN filter for particulate matter of a size more than 3 μm – were used to suck away particulate matter from friction vapors in the braking systems. A negative pressure of 36.5 kPa was used in the pneumatic system for sucking away the particulate matter. The speed of the brake disc amounted to 667 min^{-1} in the tests.

The subject of the tests was:

- a brake disc for a Mercedes motor vehicle of a thickness of 12 mm and an external diameter of 270 mm,
- W 123 dual-sided calipers for a Mercedes motor vehicle, and
- friction pads with a surface area of 55 cm^2 .

The testing station is presented in the photographs – Figures No. 4 and No. 5.

A special computer program controlling the operation of the test station was developed. The control values are:

- number of braking cycles,
- temperature of the brake disc at which the exhaust suction is engaged – t_a , and
- temperature of the brake disc at which the exhaust suction is disengaged – t_z .

The number of braking cycles was assumed as between 10 and 100 for the tests. The temperature of engagement of the exhaust suction was assumed equal to 300°C on the basis of preliminary studies, while the disengagement temperature was set at 100°C.

As a result of preliminary test, the location of the suction nozzle was assumed above the friction pads, applying a gap with a width of 1.5 mm.



Rys. 4. Widok zestawu hamulcowego i położenia ssawki
Fig. 4. View of the brake assembly and the location of the suction nozzle

Wyniki badań wstępnych przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 6. Względne zmniejszenie emisji pyłów δ z układu hamulcowego zdefiniowano jako:

$$\delta = 1 - \frac{m_k - m_f}{m_f} \quad (1)$$

gdzie: m_k – różnica masy filtra, m_f – różnica masy klocka.

Wartość średnia względnego zmniejszenia emisji pyłów wyniosła około 62%. Odchylenie standardowe wyniosło ponad 7%, a zatem rozrzut wyników jest znaczny – współczynnik zmienności wynosi ponad 11%. Tak znaczny rozrzut wyników badań jest prawdopodobnie na skutek małej liczby prób oraz małej liczby cykli hamowań.

Zasadnicze badania przeprowadzono ze ssawką umieszczoną tuż za zaciskiem. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 7.

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że uzyskano bardzo obiecujące wyniki. Średnia wartość względnego zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego wynosi prawie 75% przy odchyleniu standardowym niewiele ponad 3%, co sprawia, iż współczynnik zmienności wynosi około 4%. Oznacza to bardzo dobrą powtarzalność wyników badań przy tak małej liczbie prób. Ponieważ są to pierwsze badania tego typu, uzyskane wyniki należy uznać za pozytywne.



Rys. 5. Widok zestawu podciśnieniowego – dysza eżektorowa z wakuometrem i filtrem połączonym z ssawką
Fig. 5. View of the negative pressure assembly – the ejector nozzle with vacuum gauge and filter connected to the suction nozzle

The results of preliminary tests were presented in Table No. 1 and on Figure No. 6. A relative decrease in the emission of particulate matter δ from the braking system was defined as:

$$\delta = 1 - \frac{m_k - m_f}{m_f} \quad (1)$$

where: m_k – difference in filter mass, m_f – difference in brake pad mass.

The average value of the relative decrease in the emission of particulate matter amounted to approximately 62%. The standard deviation amounted to over 7%, thus the spread of results is significant – the coefficient of variability amounts to over 11%. Such a significant spread of test results is probably caused by the small number of samples or small number of braking cycles.

Basic tests were conducted with the suction nozzle placed just behind the caliper. Test results are presented in Table No. 2 and Figure No. 7.

Pursuant to the conducted tests, it is possible to state that the results received are very promising. The average value of the relative decrease in the emission of particulate matter from the braking system amounts to almost 75%, with a standard deviation of not more than 3%. This means that the coefficient of variability amounts to approximately 4%. This signifies a very

Tab. 1. Badania względnego zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego
Tab. 1. Tests of the relative decrease in particulate matter emission from braking systems

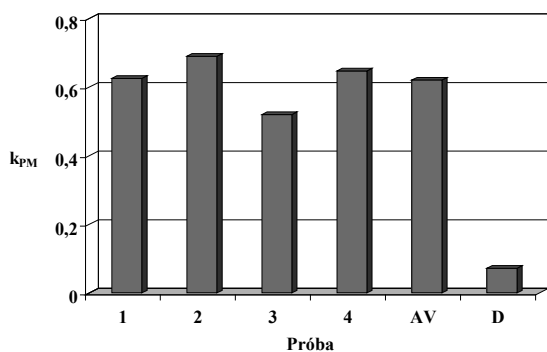
Nr próby Number of tests	Różnica masy filtra Difference in filter mass m_f [g]	Różnica masy klocka Difference in brake pad mass m_k [g]	Względne zmniejszenie emisji pyłów Relative decrease in particulate matter emission k_{PM}	Liczba cykli hamowań Number of braking cycles
1	0,200	0,320	0,6250	10
2	0,100	0,145	0,6897	20
3	0,220	0,423	0,5201	45
4	0,440	0,680	0,6470	50
AV			0,6204	
D			0,0720	

AV – wartość średnia, D – odchylenie standardowe
AV – Average value, D – Standard deviation

Tab. 2. Badania względnego zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego
 Tab. 2. Tests of the relative decrease in particulate matter emission from braking systems

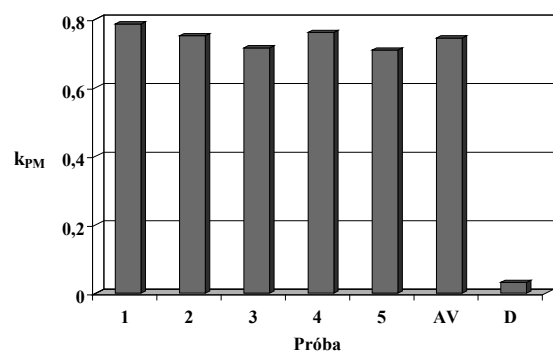
Nr próby Number of tests	Różnica masy filtra Difference in filter mass m_f [g]	Różnica masy klocka Difference in brake pad mass m_k [g]	Względne zmniejszenie emisji pyłów Relative decrease in particulate matter emission k_{PM}	Liczba cykli hamowań Number of braking cycles
1	0,907	1,155	0,7853	100
2	1,455	1,937	0,7512	100
3	1,163	1,625	0,7157	100
4	1,128	1,483	0,7606	100
5	1,013	1,428	0,7094	100
AV			0,7444	
D			0,0317	

AV – wartość średnia, D – odchylenie standardowe
 AV – Average value, D – Standard deviation



Rys. 6. Wyniki badań względnego zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego

Fig. 6. Results of tests of relative decrease in the emission of particulate matter from braking systems



Rys. 7. Wyniki badań względnego zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego

Fig. 7. Results of tests of relative decrease in the emission of particulate matter from braking systems

3. Modelowanie skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego

Proponuje się przyjąć model skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego z zastosowaniem ssawki w postaci modelu zbudowanego na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego, czyli tzw. modelu behawiorystycznego [4]. Za przyjęciem takiego rozwiązania przemawia stosunkowo słaba wiedza na temat zjawisk determinujących skuteczność zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego dla proponowanego rozwiązania. Argumentem za takim wyborem jest również pragmatyczny cel, jakim jest optymalizacja parametrów, decydujących o skuteczności układu zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego.

Model jest przyjęty w postaci funkcji

$$k_{PM} = f(t_a, t_z, \Delta p) \quad (2)$$

gdzie: Δp – podciśnienie w układzie ssącym.

Do identyfikacji modelu można wykorzystać teorię planowania doświadczeń [5]. Jeśli przyjąć model w postaci np.

3. Modeling the efficiency of decrease in the emission of particulate matter from the braking system

What is proposed is the assumption of an efficiency model for decreasing braking system particulate matter emission using a suction nozzle in the form of a model built in line with the principle of functional similarity – i.e. a behavioral model [4]. In favor of assuming such a solution is the relatively poor knowledge on phenomena determining the efficiency of decreasing braking system particulate matter emission for the proposed solution. Another argument for this selection is the pragmatic objective – the optimizing of parameters determining the efficiency of the system for decreasing braking system particulate matter emission.

The assumed model is in the form of the following function:

$$k_{PM} = f(t_a, t_z, \Delta p) \quad (2)$$

where: Δp – negative pressure in the suction system.

Experiment planning theory may be utilized in identifying the model [5]. If the model to be assumed is in the form of a po-

funkcji wielomianowej stopnia drugiego, to model (2) przyjmie postać

$$k_{PM} = a_0 + a_{a1} \cdot t_a + a_{a2} \cdot t_a^2 + a_{z1} \cdot t_z + a_{z2} \cdot t_z^2 + a_{p1} \cdot \Delta p + a_{p2} \cdot (\Delta p)^2 + a_{az} \cdot t_a \cdot t_z + a_{ap} \cdot t_a \cdot \Delta p + a_{zp} \cdot t_z \cdot \Delta p + a_{azp} \cdot t_a \cdot t_z \cdot \Delta p \quad (3)$$

Do zidentyfikowania jest w takim wypadku 11 parametrów. W celu realizacji badań empirycznych jest konieczne przyjęcie zakresów zmiennych niezależnych oraz planu doświadczeń. Zidentyfikowany model matematyczny (3) może być podstawą do optymalizacji temperatur włączania i wyłączania układu ssącego oraz podciśnienia ssania ze względu na maksymalizację skuteczności zmniejszenia emisji pyłów z układu hamulcowego. Badania takie są planowane w następnym etapie pracy.

4. Uwagi końcowe

Emisja pyłów ze źródeł antropogennych należy do najważniejszych problemów ekologicznych współczesności. Przekroczenia dopuszczalnych stężeń cząstek stałych PM10 są w Polsce i w innych krajach rozwiniętych gospodarczo jednymi z najczęściej występujących powodów podejmowania przez władze działań naprawczych, dotyczących jakości środowiska. Od 2009 r. w Unii Europejskiej obowiązuje również limitowana stężenia cząstek stałych PM2.5.

Obszarami szczególnie narażonymi na emisję pyłów ze źródeł antropogennych są wielkie aglomeracje miejskie, w których znaczący udział w emitowaniu pyłów ma ruch samochodowy. Wszelkie działania ograniczające emisję pyłów ze źródeł motoryzacyjnych należy – w związku z tym – zaliczyć do priorytetowych działań ekologicznych. Zaproponowana metoda zmniejszania emisji pyłów z układów hamulcowych samochodów już na etapie rozpoznawczych badań wykazała obiecującą skuteczność. W związku z tym jest planowane kontynuowanie rozpoczętych badań i docelowo wdrożenie rozwiązania w praktyce.

5. References

1. Agricola G.: De re metalica. <http://www.farlang.com/gemstones/agricola-metallica/>.
2. Bayona J. M., Markides K. E., Lee M. L.: Characterization of polar polycyclic aromatic compounds in heavy-duty diesel exhaust particulate by capillary column gas chromatography and high-resolution mass spectrometry. *Environ Sci Technol* 1988. 22: 1440–1447.
3. Canagaratna M.: Chase studies of particulate emissions from in-use New York City vehicles. *Aerosol Science and Technology* 2004; 38(6): 555–573.
4. Chłopek Z., Piaseczny L.: Remarks about the modelling in science researches. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 4(11)/2001: 47–57.
5. Chłopek Z., Piaseczny L.: Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach ekologicznych właściwości silników spalinowych. *Archiwum Motoryzacji* 2–3/2002: 69–94.
6. Chłopek Z., Żegota M.: Problemy modelowania emisji cząstek stałych PM10 w ruchu drogowym. *Archiwum Motoryzacji* 1/2004: 25–42.
7. Chłopek Z., Żegota M.: The emission of particulate matter PM10 from vehicles. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 1 (21)/2004: 3–13.
8. Chłopek Z.: Ecological aspects of using bioethanol fuel to power combustion engines. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 3 (35)/2007: 65–69.
9. Chłopek Z.: Effects of using CRT particulate matter filters for self ignition engines. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 4 (36)/2007: 20–23.
10. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
11. Christoforou C. S.: Trends in fine particle concentration and chemical composition in Southern California. *Journal of the Air & Waste Management Association* 2000;50(1): 43–53.

ynomial of the second degree, for example, then the model (2) takes on the form of:

In such a case, there are 11 parameters to identify. In order to perform the empirical tests it is necessary to assume a range of independent variables as well as a plan covering the experiment. The identified mathematical model (3) may serve as a basis for optimizing the temperature of engaging and disengaging the suction system as well as the suction negative pressure in light of maximum efficiency of decreasing braking system particulate matter emission. Such tests are planned for the next phase of the investigation.

4. Final remarks

The emission of particulate matter derived from anthropogenic sources is among the most pressing environmental problem of today. Exceeding allowable concentrations of particulate matter PM10 in Poland and other economically developed countries is among the most frequent causes for undertaking remedial action by the authorities with respect to the quality of the environment. As of 2009, restricting concentrations of particulate matter PM2.5 is also in force in the European Union.

Areas particularly threatened by particulate matter emission from anthropogenic sources are major municipal agglomerations where a significant share in the emission of particulate matter is generated by motor vehicle traffic. Thus, all actions aimed at decreasing particulate matter emission from motor vehicle sources should be ranked as priority environmental actions. The proposed method for decreasing motor vehicle braking system particulate matter emission in its investigative phase of research is already proving very promising. For this reason, commenced research shall be continued, ultimately leading to the implementation of a solution in practice.

12. Coburg T. C.: Statistical analysis of on-road particulate matter emissions from diesel vehicles. *Inhalation Toxicology International Forum for Respiratory Research*, Volume 12 Supplement 2 2000: 23–33.
13. Dzieniszewski G., Krzaczek P.: The economic and ecological aspects of driving city buses with CNG gas on an example of Rzeszów. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 1 (33)/2007: 6–13.
14. Eastwood P.: *Particulate emissions from motor vehicles*. Chichester: John Wiley, 2008.
15. EPA: Addendum to Emission Factor Documentation for AP-42, Section 11.2.5 and 11.2.6 (now 13.2.1), Paved Roads, Final Report, September 1997.
16. Forsberg B., Hansson H.-Ch., Johansson Ch., Areskoug H., Persson K., Järholm B.: Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia. *Journal of the Human Environment* 34(1) 2005: 11–19.
17. Harrison R. M., Jones A. M., Lawrence R. G.: Major component composition of PM10 and PM2.5 from roadside and urban background sites. *Atmos. Environ* 38. 2004: 4531–4538.
18. <http://www.dieselnet.com/standards/>.
19. Kittelson D. B.: Engines and nanoparticles: a review. *J. Aerosol Sci.* Vol. 29, No. 5/6. Elsevier Science Ltd. 1998: 575–588.
20. Lohmeyer, A., Düring, I., Lorentz, H.: Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Staubbildung von Straßen, Schildhornstraße in Berlin. Auftraggeber: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin, April 2001.
21. Marecka-Chłopek E., Chłopek Z.: Pollutants emission problems from the combustion engines of other applications than motor cars. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* Nr 3 (35)/2007: 81–85.
22. Mayer A., Kasper M., Mosimann T., Legerer F., Czerwinski J., Emmenegger L., Mohn J., Ulrich A., Kirchen P.: Nanoparticle-emissions of EURO 4 and EURO 5 HDV compared to EURO 3 with and without DPF. *SAE Emissions Measurement and Testing*. 2007: 335–43.
23. Merksiz J.: *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1997.
24. Prajapati S. K., Tripathi B. D.: Biomonitoring trace-element levels in PM10 Released from vehicles using leaves of *saraca indica* and *lantana camara*. *Journal of the Human Environment* 36(8)2007: 704–705.
25. Siemiński M.: *Środowiskowe zagrożenie zdrowia*. Warszawa: PWN, 2001.
26. Yuh-Shen Wu, Guor-Cheng Fang, Pi-Cheng Fu Peter, Chang-Ju Yang: The measurements of ambient particulates (TSP, PM2.5, PM2.5–10), chemical component concentration variation, and mutagenicity study during 1998–2001 in central Taiwan. *Journal of Environmental Science and Health, Part C Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, Volume 20 Issue 1 2002: 45–59.

Prof. nzw. dr hab. inż. Zdzisław CHŁOPEK
Mgr inż. Andrzej JAKUBOWSKI

Przemysłowy Instytut Motoryzacji w Warszawie
ul. Jagiellońska 55, 03–301 Warszawa
e-mail: moriarty@o2.pl; a.jakubowski@pimot.org.pl
