

The principles of the modeling of the particulate matter fraction from car vehicles

Abstract: The formal principles of the modelling of the particulate matter emission from car vehicles have been presented in the paper. Sources of the particulate matter emission from an internal-combustion engine and other systems of the vehicle have been classified. The fractions of particulate matter: total dust – TSP, fine dust – PM10, fine respirabilny dust – PM2.5, and nanoparticles PM1 have been formally defined. The principles of the modelling of the particulate matter PM10 and PM2.5 emission have been presented. The suggested method of the modelling of the PM10 and PM2.5 emission have been illustrated with the identification of the model on the basis of empirical research conducted on stations to the monitoring of atmospheric air. Received results of the modelling confirm a thesis about the usefulness of the modelling of the particle emission PM2.5 for distinguished classes of conditions of emission and dispersion of particulate matter.

Key words: car vehicles, particulate matter, PM10, PM2.5, PM1, modeling of pollutant emission.

Zasady modelowania emisji frakcji cząstek stałych z pojazdów samochodowych

Streszczenie: W pracy przedstawiono formalne zasady modelowania emisji cząstek stałych z pojazdów samochodowych. Sklasyfikowano źródła emisji cząstek stałych, pochodzących z silnika spalinowego oraz innych zespołów pojazdu, a także źródła związane z oddziaływaniem pojazdu na infrastrukturę drogową. Formalnie zdefiniowano frakcje cząstek stałych: całkowity pył zawieszony TSP, pył drobny PM10, pył drobny respirabilny PM2,5, a także tzw. nanocząstki PM1. Przedstawiono zasady modelowania emisji cząstek stałych PM10 oraz cząstek stałych PM2,5. Zaproponowany sposób modelowania emisji cząstek stałych PM2,5 i PM10 zilustrowano identyfikacją modelu na podstawie wyników badań empirycznych przeprowadzanych na stacjach nadzorowania stanu powietrza atmosferycznego. Otrzymane wyniki modelowania potwierdzają tezę o celowości modelowania emisji cząstek stałych PM2,5 dla wyróżnionych klas warunków emisji cząstek stałych i ich rozprzestrzeniania.

Słowa kluczowe: pojazdy samochodowe, cząstki stałe, PM10, PM2,5, PM1, modelowanie emisji zanieczyszczeń

1. Wprowadzenie

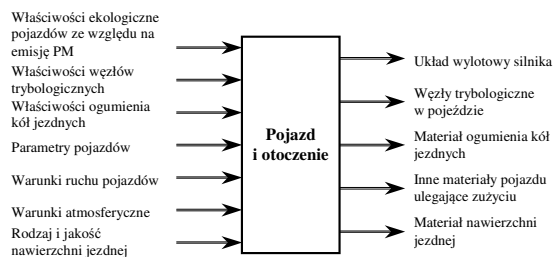
Pyły stanowią jedno z najpoważniejszych zagrożeń zdrowia ludzi [1–3, 10–15, 19–21]. Pył jest fazą rozproszoną układu dwufazowego, składającego się z ciała stałego – małych cząstek stałych zawieszonych w gazowej fazie rozpraszającej – powietrzu. Szkodliwość pyłów dla zdrowia ludzi zależy przede wszystkim od składu i budowy fizycznej ziaren oraz ich wymiarów [1–3, 10–15, 19–21]. W zależności od umownych wymiarów cząstek pyłu wyróżnia się [2–5]:

- całkowity pył zawieszony TSP (total suspended particles) – o umownym wymiarze (średnicy aerodynamicznej) mniejszym niż 300 μm ,
- pył drobny PM10 – o umownym wymiarze mniejszym od 10 μm ,
- pył drobny PM2,5 – o umownym wymiarze mniejszym od 2,5 μm ,
- pył PM1 – o umownym wymiarze mniejszym od 1 μm .

Przekroczenia dopuszczalnych wartości stężeń poszczególnych frakcji cząstek stałych PM10, szczególnie w centrach miast, są najczęstszą przy-

czyną konieczności podejmowania działań naprawczych w związku z negatywną oceną jakości powietrza. Jakość powietrza ocenia się na podstawie uśrednionych w przewidzianych przepisami czasach imisji zanieczyszczeń – stężeń zanieczyszczeń rozproszonych w powietrzu na wysokości 1,5 m [16]. Tylko w nielicznych wypadkach istnieje możliwość empirycznego badania imisji poszczególnych frakcji cząstek stałych PM10, podobnie jak i innych zanieczyszczeń. W pozostałych sytuacjach istnieje konieczność oceny imisji frakcji cząstek stałych na podstawie modelowania ich emisji oraz modelowania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń.

Istnieje wiele źródeł emisji pyłów. Naturalne źródła emisji są związane m.in. z procesami zachodzącymi z udziałem materiałów osadowych, z wybuchami wulkanów i pożarami [2]. Antropogenne przyczynami są wszelkie działania cywilizacyjne, w szczególności przemysł, energetyka i transport. W miastach jednym z najważniejszych źródeł emisji cząstek stałych jest transport samochodowy. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę czynników determinujących emisję cząstek stałych oraz źródeł emisji cząstek stałych.



Rys. 1. Struktura czynników determinujących emisję cząstek stałych oraz źródeł emisji cząstek stałych

2. Zasady modelowania frakcji cząstek stałych

Dotychczas nadzorowaniu podlega emisja frakcji cząstek stałych: PM10 oraz PM2,5. W związku z tym istnieje konieczność modelowania emisji lub imisji tych frakcji. Tradycyjnie modele imisji tych frakcji są nazywane również modelami emisji, ponieważ dla innych zanieczyszczeń modeluje się emisję i – następnie – wykorzystując modele rozprzestrzeniania zanieczyszczeń, modeluje się imisję tych zanieczyszczeń.

Istnieją dwie grupy modeli emisji cząstek stałych PM10:

- modele zbudowane na zasadzie podobieństwa strukturalnego (morfologicznego) [3, 7–9, 17]; emisja cząstek stałych PM10 jest modelowana jako zależność funkcyjna wielkości charakteryzujących jakość nawierzchni jezdnej, masę pojazdu oraz – w niektórych wypadkach – udział dni z opadami atmosferycznymi [17], a w innych modelach jest również uwzględniana średnia prędkość pojazdów;
- modele zbudowane na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego (behawiorystyczne) [3, 4, 6]; do modelowania emisji cząstek stałych PM10 jest wykorzystywana zależność korelacyjna imisji cząstek stałych PM10 oraz imisji tlenków azotu i imisji tlenku węgla, postulowana jako liniowa na podstawie wyników badań empirycznych.

Imisję cząstek stałych PM2,5 – $I_{PM2,5}$ można modelować jako liniowo zależną od imisji cząstek stałych PM10 – I_{PM10} [2, 5]:

$$I_{PM2,5} = k \cdot I_{PM10} \quad (1)$$

gdzie: k – współczynnik modelu emisji cząstek stałych PM2,5; $k \in \langle 0;1 \rangle$.

Cząstki stałe PM2,5 w miejscu badania pochodzą z różnych źródeł emisji, a imisja zanieczyszczeń zależy również od warunków rozprzestrzeniania emitowanych substancji. W związku z tym należy oczekiwać, iż współczynnik modelu emisji cząstek stałych PM2,5 będzie zależny od wielkości,

charakteryzujących źródła emisji cząstek oraz warunki rozprzestrzeniania zanieczyszczeń.

Emisję cząstek stałych PM10 dotychczas jedynie bada się empirycznie, oceniając emisję cząstek stałych zawartych w spalinach silników [2, 5, 15].

3. Badania modeli emisji frakcji cząstek stałych

Badaniom emisji cząstek stałych PM10 poddano modele zbudowane na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego. Założono strukturę ogólnego modelu behawiorystycznego [3, 4]

$$I_{PM10} = f_{PM10-NOx-CO}(I_{NOx}, I_{CO}) \quad (2)$$

w postaci:

$$I_{PM10} = a_0 + a_1 \cdot I_{NOx} \quad (3)$$

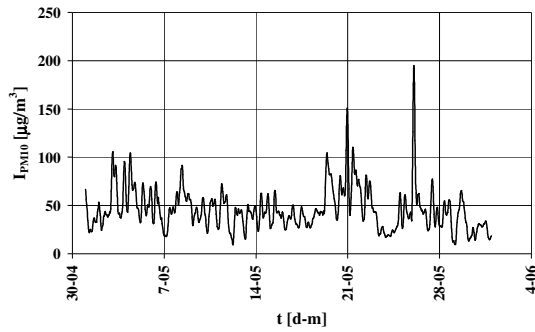
$$I_{PM10} = a_0 + a_2 \cdot I_{CO} \quad (4)$$

gdzie: I_{PM10} – imisja cząstek stałych PM10,
 I_{NOx} – imisja tlenków azotu,
 I_{CO} – imisja tlenku węgla
 a_0, a_1, a_2 – parametry modeli.

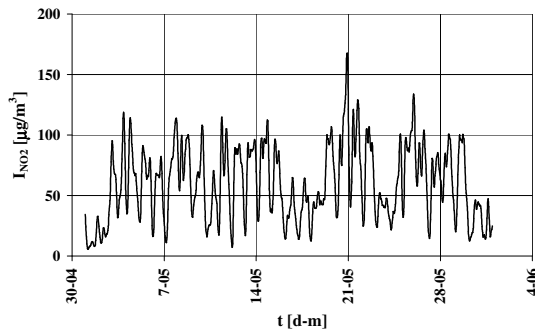
Do identyfikacji modeli wykorzystano wyniki badań empirycznych imisji zanieczyszczeń ze stacji nadzorowania jakości powietrza Warszawa–Komunikacyjna w maju 2009 r. W badaniach zarejestrowano imisję cząstek stałych, tlenku węgla i dwutlenku azotu z odstępem próbkowania wynoszącym 1h. Do badań wykorzystano pomiary imisji dwutlenku azotu, traktowanego jako tlenki azotu, jako że tlenki azotu to głównie tlenek azotu NO i dwutlenek azotu NO₂, sprowadzone do dwutlenku azotu.

Zarejestrowane wyniki badań poddano wstępnemu przetworzeniu w celu wyeliminowania grubych błędów, uzupełnienia braków pomiarów oraz filtracji dolnoprzepustowej w celu zmniejszenia udziału szumów o dużych częstotliwościach. Grube błędy eliminowano, wykorzystując bieżącą analizę wariancji sygnału. Do uzupełnienia braków pomiarów oraz filtracji dolnoprzepustowej wykorzystano filtr Golaya–Savitzky'ego [18] z parametrami: stopień wielomianu aproksymującego – 2, liczba aproksymowanych punktów – obustronnie po 3.

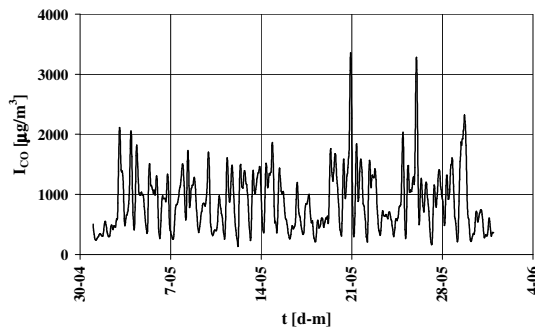
Na rysunkach 2–4 zostały przedstawione przykładowe przetworzone przebiegi imisji cząstek stałych PM10, tlenków azotu oraz dwutlenku azotu.



Rys. 2. Przebieg emisji cząstek stałych PM10 w maju 2009 r. na stacji Warszawa–Komunikacyjna

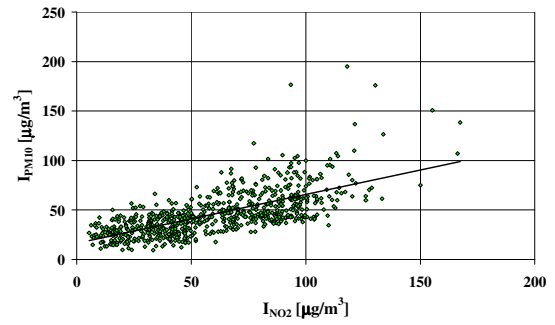


Rys. 3. Przebieg emisji dwutlenku azotu w maju 2009 r. na stacji Warszawa–Komunikacyjna

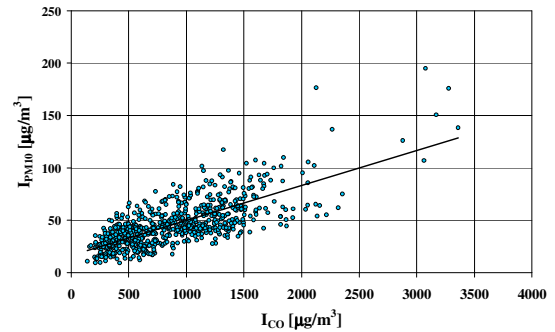


Rys. 4. Przebieg emisji tlenu węgla w maju 2009 r. na stacji Warszawa–Komunikacyjna

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zależności korelacyjne emisji cząstek stałych PM10 i emisji dwutlenku azotu i tlenu węgla w maju 2009 r. na stacji Warszawa–Komunikacyjna.



Rys. 5. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych PM10 i emisji dwutlenku azotu w maju 2009 r. na stacji Warszawa–Komunikacyjna



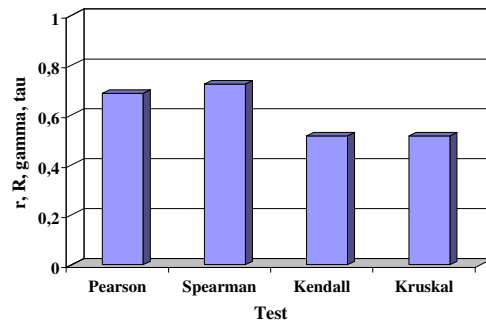
Rys. 6. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych PM10 i emisji tlenu węgla w maju 2009 r. na stacji Warszawa–Komunikacyjna

Modele (3) i (4) emisji cząstek stałych PM10 zostały zidentyfikowane zgodnie z kryterium minimum sumy kwadratów w postaci

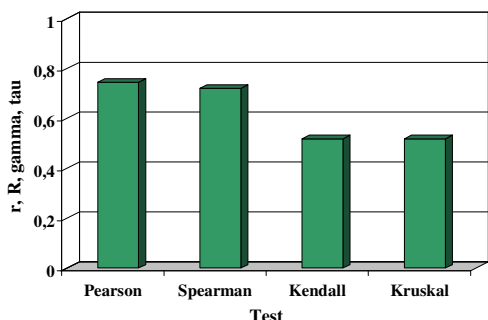
$$I_{PM10} = 4,95 \cdot 10^{-1} + 1,62 \cdot 10^1 \cdot I_{NOx} \quad (5)$$

$$I_{PM10} = 3,34 \cdot 10^{-2} + 1,65 \cdot 10^1 \cdot I_{CO} \quad (6)$$

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono współczynniki korelacji liniowej Pearsona, rang Spearmana, gamma Kendalla i tau Kruskala zidentyfikowanych modeli.



Rys. 7. Współczynniki korelacji modelu (3) emisji cząstek stałych PM10



Rys. 8. Współczynniki korelacji modelu (4) emisji cząstek stałych PM10

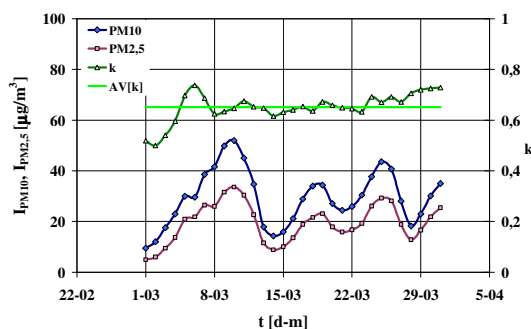
Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji między badanymi zbiorami jest we wszystkich wypadkach mniejsze od $1 \cdot 10^{-10}$.

Do identyfikacji modelu (1) cząstek stałych PM2,5 wykorzystano uśredniane w ciągu jednej doby wyniki badań w 2010 r. na stacji w Szczecinie na ul. Andrzejewskiego. Oryginalne przebiegi imisji cząstek stałych PM10 i cząstek stałych PM2,5 zostały poddane filtracji dolnoprzepustowej filtrem nierekursywnym rzędu pierwszego:

$$y_i = \frac{x_{i-1} + x_i + x_{i+1}}{3} \quad (2)$$

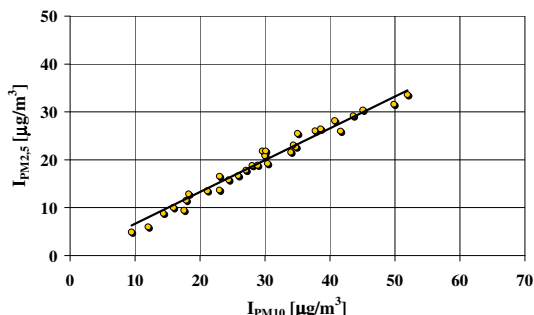
gdzie: x – sygnał pierwotny,
 y – sygnał przefiltrowany.

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi imisji cząstek stałych PM10 i PM2,5 oraz przebieg współczynnika modelu emisji cząstek stałych PM2,5 i wartość średnią tego współczynnika w okresie zmienności czasu kalendarzowego.



Rys. 9. Przebieg imisji cząstek stałych PM10 i PM2,5 oraz współczynnika modelu emisji cząstek stałych PM2,5 w Szczecinie na ul. Andrzejewskiego w 2010 r.

Na rysunku 11 przedstawiono zależność korelacyjną imisji cząstek stałych PM2,5 i PM10.

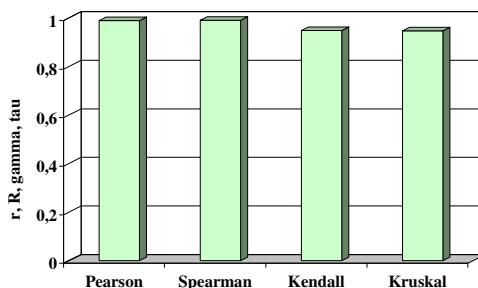


Rys. 11. Zależność korelacyjną imisji cząstek stałych PM2,5 i imisji cząstek stałych PM10 dla wyników pomiarów w Szczecinie na ul. Andrzejewskiego w 2010 r.

Model (1) emisji cząstek stałych PM2,5 zidentyfikowano zgodnie z kryterium minimum sumy kwadratów w postaci

$$I_{PM2,5} = 6,639 \cdot 10^{-1} \cdot I_{PM10} \quad (7)$$

Na rysunku 12 przedstawiono współczynniki korelacji liniowej Pearsona, rang Spearmana, gamma Kendalla i tau Kruskala zidentyfikowanego modelu.



Rys. 12. Współczynniki korelacji modelu (1) emisji cząstek stałych PM2,5

Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji między badanymi zbiorami jest we wszystkich wypadkach mniejsze od $1 \cdot 10^{-10}$.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- 1) Modelowanie imisji cząstek stałych PM10 jako liniowej zależności imisji tlenków azotu i imisji tlenku węgla jest skuteczną metodą oceny zagrożenia środowiska ze strony cząstek stałych PM10.
- 2) Z badań przedstawionych w niniejszej pracy oraz z zawartych w literaturze [3, 4] wynika, że korelacja imisji cząstek stałych PM10 i tlenku węgla jest silniejsza niż cząstek stałych PM10 i tlenków azotu.

- 3) Modelowanie emisji cząstek stałych PM_{2,5} jako liniowej zależności emisji cząstek stałych PM₁₀ jest skuteczną metodą oceny zagrożenia środowiska przez cząstki stałe PM_{2,5}.
- 4) Porównanie parametru modelu emisji cząstek stałych PM_{2,5} z parametrami spotykanymi w literaturze [2, 5] wskazuje, że parametr ten

może być w istotny sposób zależny od warunków emisji cząstek stałych i ich rozprzestrzeniania, co uzasadnia celowość modelowania emisji cząstek stałych PM_{2,5} w kategoriach porównywalnych warunków emisji i rozprzestrzeniania cząstek stałych.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

PM ₁₀	frakcja cząstek stałych o umownych wymiarach mniejszych od 10 μm
PM _{2,5}	frakcja cząstek stałych o umownych wymiarach mniejszych od 2,5 μm
PM ₁	frakcja cząstek stałych o umownych wymiarach mniejszych od 1 μm
I	emisja

k	współczynnik modelu emisji cząstek stałych PM _{2,5}
a ₀ , a ₁ , a ₂	parametry modeli
r	współczynnik korelacji liniowej Pearsona
R	współczynnik korelacji rang Spearmana
gamma	współczynnik korelacji gamma Kendalla
tau	współczynnik korelacji tau Kruskala
AV	operator uśredniania

Bibliography/Literatura

- [1] Canagaratna M.: Chase studies of particulate emissions from in-use New York City vehicles. *Aerosol Science and Technology* 2004. 38(6). 555–573.
- [2] Chłopek Z., Skibiński F.: Wprowadzenie do tematyki emisji cząstek stałych PM_{2,5} z transportu samochodowego. *Transport Samochodowy* 3/2010. 73–87.
- [3] Chłopek Z., Żegota M.: The emission of particulate matter PM₁₀ from vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 1 (21)/2004. 3–13.
- [4] Chłopek Z.: Modele behawiorystyczne emisji cząstek stałych PM₁₀ ze źródeł transportu drogowego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej* 1(82)/2011.
- [5] Chłopek Z.: Ocena stanu zagrożenia środowiska przez cząstki stałe PM_{2,5} ze źródeł transportu drogowego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej*. 1(82)/2011.
- [6] Environment Australia: Emission estimation technique manual for aggregated emission from motor vehicles. Version 1.0. Canberra 2000.
- [7] 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.
- [8] EPA: Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, 5. Edition, Vol. I, Chapter 13, Section 13.2.1. Miscellaneous sources. October 1997.
- [9] EPA: Compilation of Air Pollution Emission Factors – AP 42, Emission Factor Documentation, Section 13.2.1, Paved Roads. Appendix C.1: Procedures for Sampling Surface Dust Loading and Appendix C.2: Procedures for Laboratory Analysis of Surface Loading Samples. 1993.
- [10] Forsberg B. et al: Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia. *Journal of the Human Environment* 34(1). 2005. 11–19.
- [11] Harrison R. M., Jones A. M., Lawrence R. G.: Major component composition of PM₁₀ and PM_{2.5} from roadside and urban background sites. *Atmos. Environ* 38. 2004. 4531–4538.
- [12] Hoek G. et al.: Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet* 2002. 360.1203–1209.
- [13] Houthuijs D. et al.: PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in central and eastern Europe: results from the CESAR study. *Atmospheric Environment*, 35, 2001. 2757–2771.
- [14] Kinney P.L. et al.: Airborne concentration of PM_{2.5} and diesel exhaust particles on Harlem sidewalks. A community – based pilot study. *Environmental Health Perspectives*, 108, 2000. 213–218.
- [15] Kittelson D. B.: Engines and nanoparticles: a review. *J. Aerosol Sci.* Vol. 29, No. 5/6. Elsevier Science Ltd. 1998. 575–588.
- [16] Leksykon ekoinżynierii. Pod red. Gabriela Borowskiego. Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej. Warszawa 2010.
- [17] Lohmeyer A., Düring I.: Validierung von PM₁₀-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Staubbildung von Straßen, Lützner Straße in Leipzig. *Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden über Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft. Radebeul, Februar 2001.*
- [18] Savitzky A., Golay M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares

procedures. Analytical Chemistry. 1964. 36. 1627–1639.

- [19] Schwartz J., Laden F., Zanobetti A.: The concentration–response relation between PM_{2.5} and daily deaths. Environmental Health Perspectives 2002. Vol 110, No. 10. 1025–1029.
- [20] Venn A.J. et al.: Living near a main road and the risk of wheezing illness in children. Ameri-

can Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 2001. 164. 177–2180.

- [21] Wilkinson P. et al.: Case–control study of hospital admission with asthma in children aged 5–14 years: relation with road traffic in north west London. Thorax 1999; 54. 1070–1074.

Mr Zdzisław Chłopek, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering at Warsaw University of Technology.

Dr hab. inż. Zdzisław Chłopek – profesor na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej

