

ZASADY MODELOWANIA ZUŻYCIA PALIWA I ENERGII ORAZ EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ ZWIĄZANYCH Z UŻYTKOWANIEM POJAZDÓW DROGOWYCH

Streszczenie

Transport drogowy jest źródłem licznych zagrożeń dla zdrowia ludzi i ich środowiska, m.in. emisji zanieczyszczeń oraz wyczerpywania zasobów naturalnych w związku ze zużywaniem paliw i energii. O ile istnieje możliwość oszacowania całkowitego zużycia paliw w transporcie, o tyle wiedza o całkowitej emisji zanieczyszczeń i o całkowitym zużyciu energii może być uzyskana jedynie dzięki modelowaniu. W pracy przedstawiono usystematyzowanie problemów modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń. Przedstawiono również kluczowe dla modelowania zagadnienie wyznaczania charakterystyk zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń. Jako charakterystyki zaproponowano zależność drogowego zużycia paliwa, drogowego zużycia energii i emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej samochodu.

WSTĘP

Transport drogowy – oprócz wielu dobrodziejstw dla ludzi – jest również jednym ze znaczących powodów uciążliwości dla zdrowia ludzi i ich środowiska¹. Uciążliwość transportu drogowego może być traktowana jako związana z [7, 9]:

- projektowaniem i wytwarzaniem pojazdów drogowych², materiałów eksploatacyjnych transportu oraz elementów infrastruktury transportu drogowego,
- eksploatacją pojazdów drogowych, materiałów eksploatacyjnych transportu oraz elementów infrastruktury transportu drogowego,
- zagospodarowaniem zużytych pojazdów drogowych, materiałów eksploatacyjnych transportu oraz elementów infrastruktury transportu drogowego.

Szczególnie uciążliwe i społecznie zazwyczaj utożsamiane ze szkodliwością transportu dla środowiska jest oddziaływanie użytkowania pojazdów drogowych. W związku z tym temat niniejszej pracy jest związany ze szkodliwym oddziaływaniem na środowisko użytkowania pojazdów drogowych.

Spośród szkodliwych skutków oddziaływania użytkowania pojazdów drogowych [7] w pracy są rozpatrywane:

- emisja zanieczyszczeń,
- zużywanie energii,
- zużywanie zasobów naturalnych związane ze zużywaniem materiałów eksploatacyjnych transportu, przede wszystkim paliw.

Najbardziej odczuwalnymi ze względu na zdrowie ludzi substancjami emitowanymi z pojazdów drogowych są [1, 2, 7–9, 14–30, 32, 34, 35]:

- tlenek węgla – CO,

- związki organiczne, sprowadzane w badaniach silnikowych zazwyczaj do węglowodorów – HC – ang. *Hydrocarbons* (w badaniach silnikowych jest stosowane również oznaczenie THC – ang. *Total Hydrocarbons* – „całkowite węglowodory”³; stosuje się również termin: lotne związki organiczne – LZO, po angielsku – VOC lub VOCs – *Volatile Organic Compounds*),
- tlenki azotu – NO_x, sprowadzane w bilansowaniu emisji zanieczyszczeń do dwutlenku azotu – NO₂⁴,
- pyły⁵ nazywane cząstkami stałymi – PM (ang. *Particulate Matter*), często klasyfikowane ze względu na wymiary charakterystyczne⁶ na frakcje wymiarowe, najczęściej: TSP (ang. *Total Suspended Particles* – „całkowite cząstki zawieszone” o średniej średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 300 μm), PM10 – o średniej średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 10 μm, PM2.5 – o średniej średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 2,5 μm i PM1 – o średniej średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 1 μm.

Jako podstawową substancję dla środowiska – ze względu na zjawisko cieplarniane w atmosferze – traktuje się przede wszystkim dwutlenek węgla – CO₂ emitowany w związku ze zużywaniem kopalnych (czyli tzw. nieodnawialnych) nośników energii⁷.

O ile całkowite zużycie materiałów eksploatacyjnych jest możliwe do zbilansowania, o tyle całkowite zużycie energii i całkowita emisja zanieczyszczeń nie są wielkościami możliwymi do wyznaczenia na drodze pomiarów. W związku z tym tak znaczącego znaczenia nabiera modelowanie zużycia energii i emisji zanieczyszczeń

³ Niekiedy w artykule tłumaczenia terminów obcojęzycznych są podawane w cudzysłowach. Rozwiązanie to jest stosowane w wypadkach, gdy te nazwy, ugruntowane zarówno w nauce, jak i w praktyce, nie odpowiadają w pełni wymogom formalizmu naukowego.

⁴ W pracy jest stosowane nazewnictwo chemiczne używane w języku powszechnym (ponieważ praca nie jest z dziedziny chemii), bez zachowania pełnych formalizmów IUPAC (ang. *International Union of Pure and Applied Chemistry* – Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej).

⁵ Pod pojęciem pyłu rozumie się fazę rozproszoną układu dwufazowego, składającego się z ciała stałego – małych cząstek stałych zawieszonych w gazowej fazie rozpraszającej – powietrzu [12].

⁶ Zazwyczaj jako wymiar charakterystyczny ziarn pyłów jest przyjmowana średnia średnica aerodynamiczna [12].

⁷ Dwutlenek węgla emitowany w związku ze zużywaniem tzw. odnawialnych nośników energii nie jest substancją sprzyjającą zjawisku cieplarnianemu w atmosferze.

¹ Pojęcie „środowiska” jest używane w niniejszej pracy w sensie „środowiska ludzi”.

² W pracy jest używany termin „pojazd drogowy” w sensie środka transportu poruszającego się po drodze – w odróżnieniu od nie do końca precyzyjnego terminu „pojazd”, stosowanego w ustawie z dnia 20 czerwca 1997 r. prawo o ruchu drogowym, bowiem pojazd – wbrew temu, co jest zawarte w Ustawie – może również być przeznaczony do poruszania się nie tylko po drogach, jak np. pojazdy terenowe. W odróżnieniu od Ustawy, w Słowniku Języka Polskiego pojazd jest prawidłowo definiowany jako „urządzenie do transportu lądowego, a nie tylko drogowego”.

związanych z użytkowaniem pojazdów drogowych. Modelowanie zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń umożliwia nie tylko bilansowanie i prognozę, ale także badania symulacyjne zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń.

Od lat siedemdziesiątych XX w. są podejmowane prace nad modelowaniem emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych, w pierwszej kolejności emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych do napędu pojazdów drogowych. Jedną z pierwszych inicjatyw w tym zakresie były działania podjęte w ramach tzw. działania CORINAIR (ang. *Core Inventory of Air Emissions* – inwentaryzacja emisji do powietrza) [19]. Prowadzone były również programy europejskie COST⁸ 319 „Estimation of pollutant emissions from transport” (Oszacowanie emisji zanieczyszczeń pochodzących z transportu) [14] i MEET (ang. *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption* – Metodyka obliczania emisji i zużycia energii w transporcie) [15]. Z czasem do modelowania emisji zanieczyszczeń w działaniu CORINAIR zostało opracowane oprogramowanie do bilansowania zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń COPERT (ang. *Calculation of Emissions from Road Transport* – Obliczanie emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego) [20]. W związku z realizacją europejskich programów powstały liczne publikacje, m.in. [1, 2, 29, 30]. Sprawozdanie z realizacji programu COST 319 jest przedstawione w pozycji [30]. W Stanach Zjednoczonych Ameryki powstały wersje oprogramowań dla środków transportu drogowego i niedrogowego pod nazwą MOBILE [21]. W instytucie INFRAS AG [23] zostało przygotowane oprogramowanie do wyznaczania charakterystyk zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń (w postaci drogowego zużycia paliwa i emisji drogowej zanieczyszczeń), do którego jest opracowany przewodnik HBEFA (ang. *Handbook Emission Factors for Road Transport* – Przewodnik współczynników emisji zanieczyszczeń dla transportu drogowego) [29]. Oprócz tego powstały liczne oprogramowania do wspomagania szacowania emisji z różnych źródeł cywilizacyjnych, w tym z motoryzacji, m.in. GAINS (ang. *Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies* – Interakcje i synergie gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza) [17], TREMOVE (ang. *Transport & Mobility Leuven* – Mobilność i transport z Leuven) [25], ForFITS (ang. *Future Inland Transport Systems* – Przyszłe śródlądowe systemy transportowe) [27], TRANSTOOLS (*Tools for Transport Forecasting and Scenario Testing* – Narzędzia do prognozowania i testowania scenariuszy rozwoju transportu) [16], czy SULTAN (ang. *Sustainable Transport* – Zrównoważony transport) [22].

W większości wypadków modele te są znacznie uproszczone przede wszystkim ze względu na rodzaje pojazdów drogowych oraz warunków ruchu. Najbardziej zaawansowane są modele COPERT i INFRAS – modele te umożliwiają wyznaczanie drogowego zużycia paliwa i emisji drogowej zanieczyszczeń, a COPERT również całkowitego zużycia paliwa i całkowitej emisji zanieczyszczeń. Wyniki badań modeli COPERT i INFRAS nie zawsze są ze sobą spójne – niekiedy wyniki symulacji z użyciem obydwu modeli mogą się znacznie różnić [5, 6]. Podobnie jest w wypadku innych modeli. Warto również zwrócić uwagę, że modele amerykańskie MOBILE są słabo przystosowane do specyfiki motoryzacji w Europie. Istnieją również bardzo uproszczone modele emisji zanieczyszczeń, będące wspomaganiami oprogramowań do modelowania ruchu pojazdów drogowych, np. PTV Visum [18].

Modelowanie zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń ze źródeł transportu drogowego jest stosunkowo słabo sformalizowane. Większość prac ma charakter wyraźnie praktyczny [1,

29, 30]. W związku z tym w niniejszej pracy jest podjęta próba opisu najważniejszych problemów modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń w związku z użytkowaniem pojazdów drogowych.

1. FORMALNE PODSTAWY MODELOWANIA ZUŻYCIA PALIWA I ENERGII ORAZ EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ ZWIĄZANYCH Z UŻYTKOWANIEM POJAZDÓW DROGOWYCH

Niech wektor \mathbf{H} zawiera elementy, opisujące właściwości użytkowe samochodu, mianowicie: właściwości ekonomiczne ze względu na zużycie paliwa i energii oraz właściwości ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń:

- drogowe zużycie paliwa – q , będące pochodną masy zużywanego paliwa względem drogi⁹ przebytej przez pojazd¹⁰,
- drogowe zużycie energii – c , będące pochodną zużywanej energii względem drogi przebytej przez pojazd,
- emisja drogowa zanieczyszczeń – wektor \mathbf{b} , którego elementy są pochodnymi emisji¹¹ poszczególnych zanieczyszczeń względem drogi przebytej przez pojazd

$$\mathbf{H} = [q, c, \mathbf{b}]^T \quad (1)$$

W warunkach dynamicznych właściwości użytkowe samochodu zależą w sposób operatorowy¹² od przebiegów stanu pracy silnika spalinowego i – w konsekwencji – od przebiegu prędkości samochodu $v(t)$ oraz od przebiegu stanu cieplnego silnika spalinowego $\mathbf{T}(t)$, gdzie t oznacza czas [8]:

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{F}_s[\mathbf{S}(t)] \quad (2)$$

Stan pracy silnika spalinowego jest określony stanem cieplnym silnika – \mathbf{T} , będącym zbiorem temperatur części silnika i jego płynów eksploatacyjnych, oraz intensywnością pracy użytecznej, której miarą jest moc użyteczna – N_e . Moc użyteczna silnika jest określona jego prędkością obrotową – n oraz obciążeniem, którego miarą jest zazwyczaj moment obrotowy – M_e .

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{F}_s[n(t), M_e(t), \mathbf{T}(t)] \quad (3)$$

Dla silnika samochodowego jego stan pracy jest zdeterminowany przede wszystkim procesem prędkości samochodu – v oraz warunkami otoczenia. Warunki otoczenia mogą być określone wielkościami charakteryzującymi kształtowanie drogi – \mathbf{R} oraz warunki atmosferyczne – \mathbf{A} . Zatem

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{F}_v[v(t), \mathbf{R}(t), \mathbf{A}(t), \mathbf{T}(t)] \quad (4)$$

Dla ustabilizowanego stanu cieplnego silnika oraz warunków otoczenia procesem determinującym stan pracy samochodowego silnika spalinowego jest proces prędkości samochodu.

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{F}_v[v(t)] \quad (5)$$

W związku z tym dla ustabilizowanego stanu cieplnego silnika spalinowego wartość średnia właściwości użytkowych samochodu w czasie $t \in [0; \tau]$ wynosi

⁹ W pracy stosuje się powszechnie stosowany – w celu skrócenia zapisu – termin „droga” w sensie „długości drogi”.

¹⁰ Można również zamiennie – w stosunku do drogowego zużycia paliwa – stosować eksploatacyjne zużycie paliwa – Q , będące pochodną objętości zużywanego paliwa względem drogi przebytej przez pojazd, wyrażane w decymetrach sześciennych na sto kilometrów.

¹¹ W literaturze specjalistycznej jest przyjęte oboczne stosowanie terminu „emisja” jako zjawiska i wielkości fizycznej. Jako wielkość fizyczna emisja oznacza masę substancji wprowadzanej do środowiska.

¹² W artykule argumenty zależności operatorowej są zapisywane w nawiasach kwadratowych, w odróżnieniu od zapisu dla funkcji o wartościach liczbowych, dla których stosuje się nawiasy okrągłe.

⁸ COST – European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (Europejska Współpraca w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych).

$$\mathbf{H}_{AV}[t \in (0; \tau)] = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \mathbf{F}[v(t)] dt = \mathbf{f}_H(\tau) \quad (6)$$

Zależność operatorową (6) można aproksymować funkcją elementarną o wartościach liczbowych

$$\mathbf{H}_{AV}[t \in (0; \tau)] = \mathbf{f}\left(\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v(t) dt\right) \quad (7)$$

Oznaczając wartość średnią prędkości

$$v_{AV}[t \in (0; \tau)] = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v(t) dt = f_{v_{AV}}(\tau) \quad (8)$$

można zapisać

$$\mathbf{H}_{AV}[t \in (0; \tau)] = \mathbf{f}(v_{AV}[t \in (0; \tau)]) \quad (9)$$

Stosując uproszczony zapis:

$$v_{AV} = v_{AV}[t \in (0; \tau)] \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_{AV} = \mathbf{H}_{AV}[t \in (0; \tau)] \quad (11)$$

można zapisać, że w warunkach dynamicznych wartości średnie właściwości użytkowych samochodu modeluje się jako funkcję elementarną o wartościach liczbowych wartości średniej prędkości samochodu.

$$\mathbf{H}_{AV} = \mathbf{f}(v_{AV}) \quad (12)$$

W bilansowaniu zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń rozpatruje się zużycie energii i paliwa oraz emisję zanieczyszczeń dla poszczególnych kategorii pojazdów [1, 2, 8, 20, 29, 30].

Wartość średnia właściwości użytkowych samochodów kategorii k zależy od wartości prędkości średniej samochodów kategorii $k - v_k$:

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{f}_{HK}(v_k) \quad (13)$$

Wartość prędkości średniej samochodu opisuje jego model ruchu. Zależność (13) jest charakterystyką właściwości użytkowych samochodów w zależności od ich prędkości średniej:

– charakterystyką zużycia paliwa

$$q_k = f_{qk}(v_k) \quad (14)$$

– charakterystyką zużycia energii

$$c_k = f_{ck}(v_k) \quad (15)$$

– charakterystyką emisji zanieczyszczeń

$$b_k = f_{bk}(v_k) \quad (16)$$

Charakterystyki właściwości użytkowych poszczególnych kategorii samochodów są wyznaczane w testach jezdnych symulujących warunki rzeczywistego użytkowania.

Zakres modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń związanych z transportem drogowym w warunkach ustabilizowanego stanu cieplnego silników obejmuje:

1. Modelowanie struktury samochodów ze względu na ich przeznaczenie – skumulowane kategorie samochodów [2, 8, 20, 29]: samochody osobowe, lekkie samochody ciężarowe (tzw. samochody dostawcze), samochody ciężarowe, autobusy miejskie, autobusy dalekobieżne oraz motocykle i motorowery.
2. Modelowanie struktury samochodów ze względu na ich umowną wielkość, właściwości oraz poziom techniczny. Elementarne kategorie pojazdów drogowych są określone przez [2, 8, 20, 29]:
 - umowną wielkość ze względu na: dla samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych oraz dla motocykli i motorowców – objętość skokową silników spalinywych, dla samochodów ciężarowych oraz autobusów – masę maksymalną pojazdu,

- rodzaj systemu spalania silnika spalinowego: silniki o zapłonie iskrowym i silniki o zapłonie samoczynnym,
- rodzaj obiegu: silniki czterosuwowe i silniki dwusuwowe,
- poziom techniczny pojazdów drogowych ze względu na etap przepisów ochrony środowiska przed pojazdami drogowymi oraz ze względu na czas wprowadzenia pojazdów na rynek,
- zastosowane paliwa: benzynę silnikową, olej napędowy, skroplony gaz ropopochodny, gaz ziemny.

3. Modelowanie liczności i intensywności użytkowania samochodów poszczególnych kategorii; miarą intensywności użytkowania samochodów są ich średnie przebiegi roczne.
4. Modelowanie paliw, przede wszystkim: benzyna silnikowa, olej napędowy, gaz ziemny, LPG, biopaliwa (estry olejów roślinnych, bioetanol).
5. Modelowanie charakterystyk właściwości użytkowych poszczególnych kategorii samochodów.
6. Modelowanie ruchu samochodów.

Jako charakterystykę ruchu pojazdów drogowych przyjmuje się [2, 8, 20, 29]:

- rodzaj ruchu, klasyfikowanego jako ruch: w miastach (z możliwością wyodrębnienia ruchu w zatorach ulicznych), poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych;
 - średnią prędkość pojazdu drogowego.
7. Modelowanie emisji zanieczyszczeń [7, 8, 11]:

- emisja zanieczyszczeń pochodzących z układu wylotowego samochodów,
- emisja cząstek stałych pochodzących z innych układów samochodu niż silnik spalinowy oraz związanych z ruchem pojazdu.

Całkowite zużycie paliwa i energii oraz całkowita emisja zanieczyszczeń w czasie τ dla modeli ruchu, opisanych wartością średnią prędkości v_{AV} , wynoszą

$$\mathbf{D}(v_{AV}) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k(v_{AVk}) \cdot N_k \cdot p_k \quad (17)$$

gdzie: N_k – liczność pojazdów kategorii k ,

p_k – droga przebywana przez pojazd kategorii k w czasie τ ,

K – liczba kategorii pojazdów

oraz

$$\mathbf{D} = [\mathbf{G}_F, \mathbf{G}_E, \mathbf{P}]^T \quad (18)$$

gdzie: \mathbf{G}_F – całkowite zużycie paliwa w czasie τ ,

\mathbf{G}_E – całkowite zużycie energii w czasie τ ,

\mathbf{P} – całkowita emisja zanieczyszczeń w czasie τ .

Najważniejsze zadania związane z modelowaniem zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń związanych z transportem drogowym w warunkach ustabilizowanego stanu cieplnego silników obejmują:

- wyznaczenie charakterystyk właściwości użytkowych poszczególnych kategorii samochodów – zależności drogowego zużycia paliwa, drogowego zużycia energii oraz emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej samochodu dla elementarnych i skumulowanych kategorii pojazdów zasilanych rozpatrywanymi paliwami,
- badania weryfikacyjne charakterystyk właściwości użytkowych poszczególnych kategorii samochodów,
- wyznaczenie liczności i intensywności użytkowania samochodów poszczególnych kategorii,
- identyfikacja modelu ruchu samochodów,

- opracowanie modelu emisji cząstek stałych pochodzących z innych układów samochodu niż silnik spalinowy oraz związanych z ruchem pojazdu,
- opracowanie modelu całkowitego zużycia paliwa i energii oraz całkowitej emisji zanieczyszczeń.

Podstawowymi substancjami, które mogą być rozpatrywane – z wykorzystaniem dostępnych źródeł, m.in. [2, 8, 20, 29] – w modelowaniu emisji zanieczyszczeń są:

- tlenek węgla – CO,
- związki organiczne – HC, a także szczegółowo, m.in.: metan – CH₄ i niemetaanowe związki organiczne – NMHC (ang. *Non-Methane Hydrocarbons*), benzen – C₆H₆ oraz alkany, alkeny, alkiiny, furany, aldehydy, ketony, cykloalkany, aromaty, PAH – ang. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (WWA – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne),
- tlenki azotu – NO_x i dwutlenek azotu – NO₂ i podtlenek azotu – N₂O,
- cząstki stałe PM, cząstki stałe PM₁₀, cząstki stałe PM_{2.5}, cząstki stałe PM₁,
- dwutlenek węgla – CO₂ i dwutlenek węgla kopalnego – CO_{2f},
- ołów – Pb,
- tlenki siarki, sprowadzone do tlenku siarki – SO₂,
- amoniak – NH₃,
- metale ciężkie: Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn,

Do najtrudniejszych problemów modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń, związanych z użytkowaniem pojazdów drogowych, należy zaliczyć wyznaczanie charakterystyk zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń. Wyznaczanie tych charakterystyk wymaga prowadzenia bardzo rozbudowanych badań empirycznych na wielu pojazdach z użyciem skomplikowanej i kosztownej aparatury. Również poważnym problemem jest identyfikacja modeli liczności i – szczególnie trudnym – intensywności użytkowania samochodów poszczególnych kategorii. O ile liczność pojazdów jest możliwa do identyfikacji dzięki informacjom o rejestracji pojazdów, o tyle identyfikacja intensywności ich użytkowania wymaga prowadzenia szeroko zakrojonych badań ankietowych. Podobnie trudnym problemem jest identyfikacja ruchu poszczególnych kategorii pojazdów, zarówno w zakresie oceny rodzajów ruchu, jak i w zakresie wyznaczania średniej prędkości ruchu.

Istnieją jeszcze inne problemy związane z modelowaniem zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń, np. modelowanie zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń w fazie nagrzewania się silników spalinowych oraz modelowanie parowania paliwa z układu paliwowego samochodów [2, 8, 20, 29]. Rozpatrywanie tych zagadnień przekracza jednak możliwości objętościowe artykułu.

2. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK DROGOWEGO ZUŻYCIA PALIWA, DROGOWEGO ZUŻYCIA ENERGII ORAZ EMISJI DROGOWEJ ZANIECZYSZCZEŃ

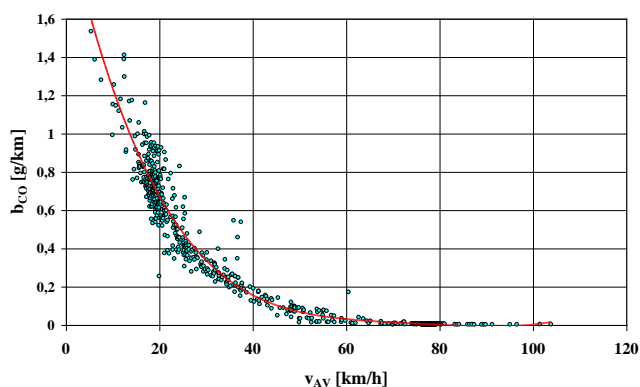
Jak wiadomo zużycie paliwa, zużycie energii i emisja zanieczyszczeń są zależne od stanów, w jakich znajdują się silniki spalinowe. Stany pracy silników samochodowych są zdeterminowane procesem prędkości samochodów. Podstawową charakterystyką zerowymiarową, opisującą proces prędkości samochodu, jest prędkość średnia [2, 8, 20, 29]. W związku z tym w modelowaniu zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń można wykorzystywać charakterystyki drogowego zużycia paliwa, drogowego zużycia energii oraz emisji drogowej zanieczyszczeń w zależności od prędkości średniej samochodów w testach jezdnych symulujących rzeczywiste użytkowanie trakcyjne pojazdów. Bazy danych drogowego zużycia paliwa i emisji drogowej zanieczyszczeń dla elementarnych

i skumulowanych kategorii pojazdów dla modeli ruchu, charakteryzujących się określonymi prędkościami średnimi, można znaleźć w oprogramowaniu INFRAS AG [29]. W oprogramowaniu COPERT są zawarte funkcje, aproksymujące charakterystyki drogowego zużycia paliwa i emisji drogowej zanieczyszczeń w dziedzinie średniej prędkości pojazdu.

Kluczową rolę odgrywa zatem przy wyznaczaniu charakterystyk zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń dobór odpowiednich testów jezdnych, symulujących rzeczywiste warunki użytkowania pojazdów. Wykorzystuje się do tego celu przede wszystkim testy stosowane w procedurach homologacyjnych. Jest to możliwe dla pojazdów, które są badane w procedurach homologacyjnych w testach jezdnych, a więc dla samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych. Znaczne zróżnicowanie rzeczywistych warunków ruchu samochodów powoduje, że do wyznaczania charakterystyk wykorzystuje się dodatkowo liczne testy specjalne, np. test Stop and Go do symulacji ruchu w zatorach ulicznych [2], czy Autobahn do symulacji ruchu na autostradach i drogach ekspresowych [2]. W literaturze, np. w [35], znajdują się opisy licznych testów opracowanych w instytutach naukowo-badawczych. Trudniejsza jest sytuacja dla pojazdów ciężkich, a więc samochodów ciężarowych i autobusów, których nie bada się w procedurach homologacyjnych w testach jezdnych na hamowni podwoziowej i dla których nie ma – w związku z tym – standardowych testów jezdnych. W takiej sytuacji często wyznacza się charakterystyki zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń na podstawie statycznych charakterystyk silników, ewentualnie na podstawie wyników badań silników w testach dynamicznych. Istnieją również testy specjalne, np. testy do badań autobusów SORT (ang. *Standardised On-Road Test Cycles* – testy standardowe do badań drogowych) [26], opracowane przez UITP (franc. *Union International des Transports Public* – Międzynarodowa Unia Transportu Publicznego). Testy te są jednak używane zazwyczaj tylko do badań zużycia paliwa. W ograniczonym zakresie – w stosunku do samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych – wykonuje się badania pojazdów ciężkich w specjalnych testach jezdnych [2]. Jest również możliwe wykorzystanie do badań trakcyjnych mobilnych systemów PEMS (ang. *Portable Emissions Measurement System* – przenośny system pomiaru emisji) [33].

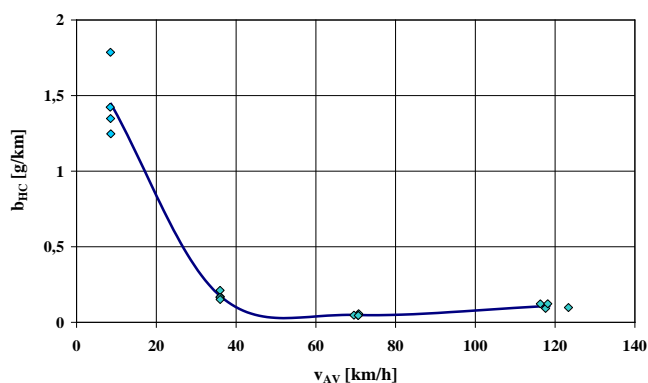
W artykule przedstawiono kilka rodzajów charakterystyk drogowego zużycia paliwa, drogowego zużycia energii i emisji drogowej zanieczyszczeń, wyznaczonych przez autora.

W pracy [4] zastosowano autorską metodę wyznaczania charakterystyk z zastosowaniem metody Monte Carlo [12, 31]. Do wyznaczania charakterystyki wykorzystano wyniki badań empirycznych samochodu na hamowni podwoziowej w teście homologacyjnym NEDC (ang. *New European Driving Cycle* – nowy europejski test jezdny) [35]. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystykę emisji drogowej tlenku węgla dla lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zaplonie samoczynnym.



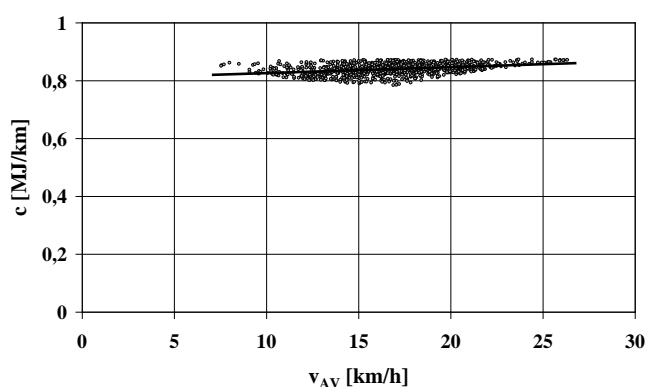
Rys. 1. Charakterystyka emisji drogowej tlenku węgla – b_{CO} w zależności od prędkości średniej – v_{AV} dla lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę wyznaczoną z zastosowaniem testów specjalnych do symulacji rzeczywistych warunków ruchu samochodu osobowego. Testy te zostały opracowane w ramach realizacji pracy [3]. Przy opracowaniu testów przyjęto koncepcję, aby procesy prędkości w charakterystycznych warunkach ruchu samochodów, tzn. w zatorach ulicznych, w miastach, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych, potraktować jako procesy stochastyczne. Opracowane testy stanowią realizację procesów stochastycznych prędkości pojazdu w warunkach ruchu w zatorach ulicznych, w miastach, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.



Rys. 2. Charakterystyka emisji drogowej węglowodorów – b_{HC} w zależności od prędkości średniej – v_{AV} dla samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę drogowego zużycia energii dla elektrycznego samochodu osobowego w warunkach ruchu w miastach. Badania przeprowadzono na hamowni podwoziowej w testach symulujących ruch samochodów w warunkach miejskich [10]. Charakterystykę drogowego zużycia energii wyznaczono z zastosowaniem metody Monte Carlo na podstawie wyników badań samochodu w teście UDC (ang. *Urban Driving Cycle* – miejski test jezdny) [35].



Rys. 3. Charakterystyka drogowego zużycia energii – c w zależności od prędkości średniej – v_{AV} dla elektrycznego samochodu osobowego

O ile w wypadku samochodów z silnikami spalinowymi istnieje znaczne podobieństwo charakterystyk emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa [2, 4, 6–8, 29, 30] i – w związku z tym – również zużycia energii, o tyle w wypadku specyficznych warunków ruchu pojazdu elektrycznego w miastach drogowo zużycie energii praktycznie jest niezależne od prędkości średniej.

PODSUMOWANIE

Modelowanie emisji zanieczyszczeń i zużycia energii jest jedynym sposobem uzyskania wiedzy o całkowitej emisji zanieczyszczeń i całkowitym zużyciu energii w transporcie drogowym. Inaczej jest w wypadku zużycia paliwa, jest bowiem możliwe – przynajmniej przybliżone – oszacowanie tej wielkości. Wiedza o całkowitym zużyciu paliwa i energii oraz całkowitej emisji zanieczyszczeń jest niezbędna do celów bilansowania tych wielkości. Informacje te są wykorzystywane do oceny oddziaływania na środowisko poszczególnych działań cywilizacyjnych. Wiedza, zdobyta dzięki modelowaniu zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń, może być wykorzystana do prognozowania i podejmowania – dzięki wynikom prognozowania – decyzji o planowanym rozwoju cywilizacyjnym społeczeństw.

Do najtrudniejszych problemów modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń należy zaliczyć: wyznaczanie charakterystyk zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń. Jest to zadanie niezwykle pracochłonne i kosztowne, w celu bowiem wyznaczenia charakterystyk dla elementarnych kategorii pojazdów (liczbę elementarnych kategorii można szacować nawet na kilkaset) należy badaniami objąć bardzo dużą liczbę pojazdów, dodatkowo w wielu testach jezdnych. Jest to szczególnie trudny problem dla pojazdów ciężkich: samochodów ciężarowych i autobusów, dla których jest bardzo mało hamowni podwoziowych spełniających wymagania metrologiczne.

Również trudnym problemem jest identyfikacja modeli liczności i intensywności użytkowania samochodów poszczególnych kategorii oraz modeli ruchu pojazdów: klasyfikacji ruchu (w miastach, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych) oraz wyznaczanie jej średniej prędkości.

Przedstawione w niniejszej pracy najważniejsze zasady modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń uprawniają do stwierdzenia, że modelowanie tych procesów jest skutecznym sposobem zdobywania wiedzy o całkowitym zużyciu paliwa i energii oraz całkowitej emisji zanieczyszczeń w związku z użytkowaniem pojazdów drogowych.

BIBLIOGRAFIA

- Berkowicz R., Winther M., Ketzel M.: Traffic pollution modelling and emission data. *Environmental Modelling & Software* 2006/21. 454–460.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), INFRAS AG (Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung): Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010, BUWAL-Bericht Nr. 255, 1995.
- Chłopek Z. et al.: Sprawozdanie z pracy N N509 556440 „Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zaplonie iskrowym. Warszawa, 2013. (Praca nie publikowana).
- Chłopek Z., Laskowski P.: Pollutant emission characteristics determined using the Monte Carlo Method. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2(42)/2009. 42–51.
- Chłopek Z., Zimakowska M.: Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych. Rozdział w monografii „Współczesne problemy inżynierii i ochrony środowiska”. Zeszyt „Inżynieria Środowiska” nr 55. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009. 53–66.
- Chłopek Z., Zimakowska M.: Ocena sposobów wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w modelach INFRAS i COPERT. Rozdział w monografii „Współczesne problemy inżynierii i ochrony środowiska”. Zeszyt „Inżynieria Środowiska” nr 58. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2010. 47–60.
- Chłopek Z.: Ekologiczne aspekty motoryzacji i bezpieczeństwo ruchu drogowego. Politechnika Warszawska. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych. Warszawa, 2012.
- Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1999.
- Chłopek Z.: Pojazdy samochodowe. Ochrona środowiska naturalnego. WKŁ. Warszawa, 2002.
- Chłopek Z.: Research on energy consumption by an electrically driven automotive vehicle in simulated urban conditions. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 15 (2)/2013. 75–82.
- Chłopek Z.: Testing of hazards to the environment caused by particulate matter during use of vehicles. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 14(2)/2012. 160–170.
- Chłopek Z.: The cognitive interpretation of the Monte Carlo method for the technical applications. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 3 (43)/2009. 38–46.
- EN 481: 1993. Workplace atmospheres. Size fraction definitions for measurement of airborne particles.
- <http://cordis.europa.eu/cost-transport/src/cost-319.htm>. (2014–08–24).
- <http://cordis.europa.eu/transport/src/meetrep.htm>. (2014–08–24).
- <http://energy.jrc.ec.europa.eu/transtools/index.html>. (2014–08–24).
- <http://gains.iiasa.ac.at/gains/EU/index.login>. (2014–08–24).
- <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-visum/>. (2014–08–24).
- <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5>. (2014–08–24).
- <http://www.emisia.com/copert/>. (2014–08–24).
- <http://www.epa.gov/otaq/mobile.htm>. (2014–08–24).
- <http://www.eutransportghg2050.eu/cms/assets/SULTAN-User-Guide.pdf>.
- <http://www.infras.ch/d/index.php>. (2014–08–24).
- <http://www.inrets.fr/ur/lte/cost319/>. (2014–08–24).
- <http://www.tmluven.be/methode/tremove/home.htm>. (2014–08–24).
- <http://www.uitp.org/>. (2014–08–24).
- http://www.unece.org/trans/theme_forfits.html. (2014–08–24).
- <https://cleanenergysolutions.org/content/illustrative-scenarios-tool-european-union-0>. (2014–08–24).
- INFRAS AG: Handbook emission factors for road transport 3.2. Quick reference. Version 3.2. Bern, 2014.
- Joumard R. et al.: Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the-art. Action COST 319. Final INRETS report N°LTE 9901. 1999.
- Metropolis N., Ulam S.: The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247 (Sep., 1949). 335–341.
- Siemiński M.: Środowiskowe zagrożenie zdrowia. PWN. Warszawa, 2001.
- Vlachos T.G. et al.: In-use emissions testing with portable emissions measurement systems (PEMS) in the current and future European vehicle emissions legislation: Overview, underlying principles and expected benefits. SAE 2014–01–1549.
- World Health Organization. Health effects of transport-related air pollution. Geneva, 2005.
- Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.

THE PRINCIPLES OF MODELING OF FUEL AND ENERGY CONSUMPTION AND POLLUTANT EMISSION RELATED TO THE USE OF ROAD VEHICLES

Abstract

Road transport is the source of numerous threats to human health and their environment, including pollutant emission and the depletion of natural resources in connection with the consumption of fuel and energy. Modeling is the only way to gain knowledge about the total pollutant emission and total energy consumption in road transport. The paper presents a systematization of the problems of modeling fuel and energy consumption and pollutant emission. It also presents a key issue for modeling the determination of the characteristics of fuel and energy consumption and pollutant emission.

Autor:

Prof. dr hab. **Zdzisław Chłopek** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji. 01-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55; e-mail: Zdzislaw.Chlopek@pimot.eu; Zdzislaw.Chlopek@gmail.com; tel. +48 22 7777019; +48 603861709.