

Aleksandra KUTRZYK, Jan FILIPCZYK

METODY OKREŚLANIA EMISJI SPALIN SILNIKÓW TRAKCYJNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis metodyki szacowania emisji spalin przez samochody w ruchu drogowym. W opracowaniu algorytmu wzorowano się na programach Copert. Program umożliwia obliczenie poziomu emisji zanieczyszczeń pochodzących od transportu drogowego, w zależności od liczby pojazdów, rodzaju pojazdów, konstrukcji silnika, jego pojemności i ładowności pojazdu itp.

THE METHODS FOR ESTIMATING TRAFFIC EMISSION IN TRACTION ENGINES

Summary. This paper presents the methodology of the traffic emission calculation. The methodology is based on computer programme Copert III. Copert III methodology can be applied for the calculation of traffic emission from road transport depending on the number of vehicles, the type of vehicles, the engine construction, the capacity etc.

1. WPROWADZENIE

Wzrastająca liczba pojazdów przyczynia się do stale rosnącej emisji zanieczyszczeń. Spaliny i pyły emitowane przez pojazdy wpływają na zanieczyszczenie powietrza, wód, gleb. Zanieczyszczenie powietrza występuje wskutek wprowadzenia do niego substancji stałych, ciekłych i gazowych w ilościach, które mogą oddziaływać na zdrowie człowieka, klimat, przyrodę żywą itp. Substancje zanieczyszczające atmosferę, ze względu na swój charakter oraz łatwość rozprzestrzeniania się, oddziałują na wszystkie elementy środowiska. U ludzi powodują one choroby układu oddechowego, zaburzenia centralnego układu nerwowego (np. bóle głowy, bezsenność), choroby oczu, zaburzenia układu krążenia. Zjawiska związane z zanieczyszczeniem atmosfery to smog, kwaśne deszcze, efekt cieplarniany itp. Woda oraz gleba zanieczyszczana jest przez oleje, smary, benzynę, także związki metali ciężkich, takich jak np. ołów. Metale ciężkie są niezwykle toksyczne dla organizmów żywych. Mogą powodować trwałe i nieodwracalne uszkodzenia różnych narządów, np. nerek, mózgu czy rdzenia kręgowego [1].

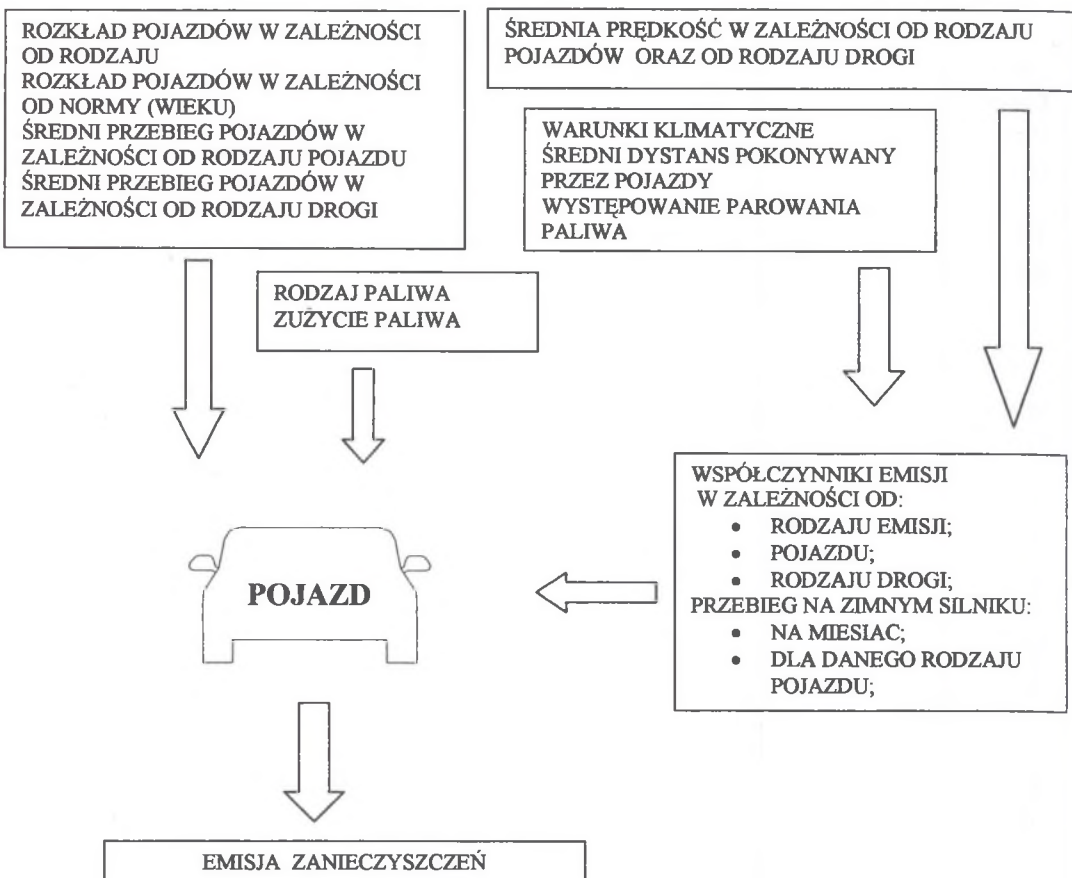
Dlatego też bardzo istotne jest określenie poziomu emisji zanieczyszczeń z pojazdów, aby można było skutecznie ją redukować. Jednym ze sposobu określania emisji spalin jest szacowanie na podstawie obliczeń uwzględniających natężenie ruchu, rodzaj i strukturę wiekową pojazdów. Obliczenia tego typu są możliwe do wykonania m.in. przy zastosowaniu programów serii Copert [2].

2. OPIS METODOLOGII

Program Copert III jest to program, za pomocą którego możliwe jest obliczenie emisji zanieczyszczeń, których źródłem jest transport drogowy.

Obliczenia całkowitej emisji wykonywane są przy uwzględnieniu danych dla różnych rodzajów pojazdów oraz odpowiednich współczynników. Współczynniki obliczane są w zależności od warunków drogowych, klimatycznych, średniej prędkości itp. W obliczeniach uwzględnione są także informacje na temat zużycia paliwa.

Na rysunku 1 przedstawiono wszystkie dane brane pod uwagę podczas obliczeń.



Rys.1. Schemat danych wejściowych

Fig.1. The scheme of input data

W celu dokładnego obliczenia poziomu emisji pojazdy podzielone zostały pod względem rodzaju na następujące klasy:

- samochody osobowe;
- samochody dostawcze;
- samochody ciężarowe;
- autobusy;
- jednoślady.

Dodatkowo pojazdy zostały podzielone pod względem rodzaju silnika i jego pojemności oraz ładowności pojazdu. W tablicy 1 przedstawiono szczegółowy podział pojazdów.

Tablica 1

Podział pojazdów pod względem rodzaju silnika i jego pojemności, ładowności

Samochody osobowe		Samochody dostawcze	Samochody ciężarowe		Autobusy	Motorowery	Motocykle
ZI	< 1,4 l	ZI < 3,5 t	ZI		miejskie	< 50 cm ³	dwusuw > 50 cm ³
	1,4 ÷ 2 l						czterosuw 50 + 250 cm ³
	≥ 2 l						czterosuw 250 + 750 cm ³
ZS	< 2 l	ZS < 3,5 t	ZS	< 7,5 t	dalekobieżne		czterosuw 250 + 750 cm ³
	≥ 2 l			7,5 + 16 t			czterosuw > 750 cm ³
LPG				16 + 32 t			
dwusuw				> 32 t			

Z punktu widzenia emisji pojazdów istotne znaczenie ma również wiek pojazdu, a w związku z tym norma emisji, którą dany pojazd spełnia. Dlatego podział rozszerzono o informacje dotyczące wieku pojazdu oraz normę.

W tablicy 2 przedstawiono normy oraz odpowiadający jej rok produkcji dla samochodów osobowych z silnikiem ZI

Tablica 2

Norma oraz odpowiadający jej rok produkcji dla samochodów osobowych z silnikiem ZI

Norma emisji	Rok produkcji
Pre ECE	Do 1971
ECE 15 00 i 01	1972 – 1977
ECE 15 02	1978 – 1980
ECE 15 03	1981 – 1985
ECE 15 04	1985 – 1992
EURO I	1993 – 1996
EURO II	1996 - 2000
EURO III	2000 - 2005
EURO IV	od 2005

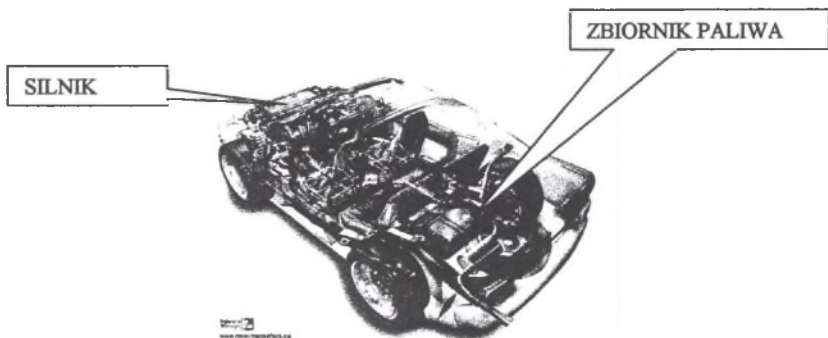
Za pomocą programu Copert możliwe jest obliczenie czterech grup zanieczyszczeń. W tablicy 3 podano związki wchodzące w skład poszczególnych grup.

Tablica 3

Zanieczyszczenia możliwe do obliczenia (program Copert III)

Nr grupy	Zanieczyszczenia
1	CO, NO _x , CH, PM
2	CO ₂ , SO ₂ , Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn
3	NH ₃ , N ₂ O, węglowodory wieloaromatyczne, dioksyny, furany
4	alkany, alkeny, alkiny, aldehydy, ketony, cykloalkany

Całkowita emisja obliczana jest poprzez sumowanie emisji z różnych źródeł w pojeździe.



Rys. 2. Źródła emisji w pojeździe [3]

Fig. 2. Sources of traffic emission [3]

Całkowita emisja obliczana jest według następującego wzoru:

$$E_{\text{całk}} = E_{\text{hot}} + E_{\text{cold}} + E_{\text{Ev}} \quad (1)$$

$E_{\text{całk}}$ – całkowita emisja spalin;

E_{hot} – emisja podczas pracy gorącego silnika;

E_{cold} – emisja podczas zimnego rozruchu silnika;

E_{Ev} – emisja par paliwa.

Emisję powstającą przy pracy gorącego silnika oblicza się według wzoru:

Poziom emisji [g] = współczynnik emisji [g/km] x liczba pojazdów x dystans pokonywany przez dany pojazd [km/poj]

Stąd:

$$E_{\text{HOT};i,j,k} = N_j \times M_{j,k} \times e_{\text{HOT};i,j,k} \quad (2)$$

gdzie:

$E_{\text{HOT};i,j,k}$ – emisja zanieczyszczeń w gramach w ciągu roku, pochodząca od danego typu pojazdów poruszających się po określonych drogach przy gorącym silniku;

N_j – liczba pojazdów danego rodzaju [g];

$M_{j,k}$ – przebieg pojazdów danego typu poruszających się po określonych drogach [km/poj.];

$e_{\text{HOT};i,j,k}$ – średni współczynnik emisji danego rodzaju zanieczyszczeń w zależności od klasy pojazdu, rodzaju drogi, przy pracy gorącego silnika [g/km].

Emisję przy zimnym silniku oblicza się wg następującego wzoru:

$$E_{\text{cold } i,j} = \beta_{ij} \times N_j \times M_j \times e_{\text{HOT};i,j} \times (e^{\text{COLD}} / e^{\text{HOT}} |_{ij} - 1) \quad (3)$$

gdzie:

$E_{\text{cold } i,j}$ – emisja poszczególnych zanieczyszczeń przy zimnym silniku dla danego rodzaju pojazdu (obliczana dla 1 roku);

β_{ij} – odległość pokonana przez pojazd przy zimnym silniku;

N_j – liczba pojazdów danego rodzaju;

M_j – całkowity przebieg pojazdów;

$e^{\text{COLD}} / e^{\text{HOT}} |_{ij}$ – stosunek emisji zanieczyszczeń.

Wielkość β zależy od temperatury otoczenia, sposobu pracy pojazdu oraz od średniego dystansu pokonywanego przez pojazd, który jest różny w poszczególnych krajach.

S_{urban} – przebieg przy niestabilizowanych warunkach pracy silnika przypisany jeździe w warunkach miejskich.

Jeżeli $\beta_{ij} > S_{\text{urban}}$, to

$$E_{\text{cold } i,j, \text{urban}} = S_{\text{urban};i,j} \times N_j \times M_j \times e_{\text{HOT};i,j, \text{urban}} \times (e^{\text{COLD}} / e^{\text{HOT}} |_{ij} - 1) \quad (4)$$

$$E_{\text{cold } i,j, \text{rural}} = (\beta_{ij} - S_{\text{urban};i,j}) \times N_j \times M_j \times e_{\text{HOT};i,j, \text{urban}} \times (e^{\text{COLD}} / e^{\text{HOT}} |_{ij} - 1) \quad (5)$$

Emisję par paliwa można podzielić na trzy rodzaje:

- emisja dzienna pochodząca ze zbiornika paliwa, przy niepracującym silniku;
- emisja po wyłączeniu gorącego silnika;
- emisja pochodząca z całego układu paliwowego podczas pracy silnika.

Emisja węglowodorów spowodowana parowaniem paliwa

$$E_{\text{EVAj}} = 365 \times N_j \times (e^{\text{d}} + S^{\text{C}} + S^{\text{fr}}) + R \quad (6)$$

gdzie:

E_{EVA_j} – emisja w zależności od pojazdu;

N_j – liczba pojazdów danego rodzaju z silnikiem ZI;

e^d – współczynnik emisji dla dziennych strat paliwa dla pojazdów wyposażonych w metalowy zbiornik paliwa, w zależności od miesięcznych temperatur otoczenia, wahania temperatur;

S^C – średni współczynnik emisji z układów gaźnikowych;

S^{fi} – średni współczynnik emisji z układów wtryskowym;

R – emisja;

przy czym:

$$S^C = (1 - q) \times (p \times x \times e^{s,hot} + w \times x \times e^{s,warm}) \quad (7)$$

$$S^{fi} = q \times e^{fi} \times x \quad (8)$$

$$R = M_j \times (p \times e^{r,hot} + w \times e^{r,warm}) \quad (9)$$

gdzie:

q – odsetek pojazdów z silnikiem ZI z wtryskiem paliwa;

p – odsetek przejazdów kończonych przy rozgrzanym silniku;

w – odsetek przejazdów kończonych przy zimnym silniku;

x – liczba przejazdów danego pojazdu w ciągu dnia, średnia w ciągu roku,

tj. $x = M_j / (365 \times I_{trip})$;

$e^{s,hot}$ – współczynnik emisji przy wyłączeniu gorącego silnika;

$e^{s,warm}$ – współczynnik emisji przy wyłączeniu nierozgrzanego silnika;

e^{fi} – współczynnik emisji po wyłączeniu silnika dla pojazdów z silnikiem ZI z wtryskiem paliwa;

$e^{r,hot}$ – średni współczynnik emisji dla pojazdów z silnikiem ZI pochodzący z całego układu paliwowego podczas pracy gorącego silnika;

$e^{r,warm}$ – średni współczynnik emisji dla pojazdów z silnikiem ZI pochodzący z całego układu paliwowego podczas pracy ciepłego silnika;

M_j – roczny przebieg pojazdów z silnikiem ZI danego rodzaju.

Liczba przejazdów, kończona przy zimnym lub rozgrzanym silniku, jest powiązana ze współczynnikiem β . Współczynniki w i β zależą między innymi od temperatury otoczenia. Współczynnik β zależy od średniego dystansu pokonanego przez pojazd I_{trip} . To wskazuje na to, iż dla obliczeń emisji przy rozruchu i przy wyłączeniu silnika istotny jest średni dystans pokonywany przez pojazd.

W programie w pierwszej kolejności obliczane są zanieczyszczenia, które zależą od rodzaju paliwa, na podstawie zużycia paliwa dla danej klasy pojazdów, a następnie przeprowadzona zostaje korekta na podstawie faktycznego zużycia paliwa.

Z matematycznego punktu widzenia korektę można wyrazić za pomocą równania:

$$E_{i,jm}^{CORR} = E_{i,jm}^{CALC} \times \sum_{jm} FC_m^{STAT} \quad (10)$$

gdzie:

j_m - rodzaj pojazdu j w zależności od rodzaju paliwa m ;

$E_{i,jm}^{CORR}$ - skorygowana emisja zanieczyszczeń zależnych od paliwa (SO₂, CO₂, Pb, HM) dla danego rodzaju pojazdów j_m ;

$E_{i,jm}^{CALC}$ - emisja zanieczyszczeń zależnych od paliwa na podstawie obliczonego zużycia paliwa dla danego rodzaju pojazdów j_m ;

FC_m^{STAT} - statystyczne całkowite zużycie danego typu paliwa m (benzyna, olej napędowy, LPG);

$\sum_{jm} FC_{jm}^{CALC}$ - całkowite obliczone zużycie danego paliwa m dla pojazdów.

Obliczenia dla poszczególnych zanieczyszczeń

Określenie emisji CO₂

Najwyższy poziom CO₂ jest obliczony na podstawie tylko zużycia paliwa. Stosowana jest następująca formuła:

$$E_{CO_2,j}^{CALC} = 44,011 \times \frac{FC_{jm}^{CALC}}{12,011 + 1,008 r_{H,C,m}} \quad (11)$$

$r_{H,C,m}$ - stosunek liczby atomów wodoru do liczby atomów węgla w paliwie (~1,8 dla benzyny, ~2,0 dla oleju napędowego).

Jeżeli określana jest emisja w końcowym odcinku układu wydechowego, także brany jest pod uwagę węgiel w innej postaci, tj. CO, węglowodory oraz cząstki stałe, wtedy stosowana jest formuła:

$$E_{CO_2,j}^{CALC} = 44,011 \times \frac{FC_{jm}^{CALC}}{12,011 + 1,008 r_{H,C,m}} \frac{E_{jm}^{CO}}{28,011} \frac{E_{jm}^{VOC}}{13,85} \frac{E_{jm}^{PM}}{12,011} \quad (12)$$

Określenie emisji SO₂

Emisja SO₂ jest określana przy założeniu, że cała siarka w paliwie jest całkowicie przekształcana w SO₂, przy użyciu wzoru:

$$E_{SO_2}^{CALC} = 2 \times k_{S,m} \times FC_{jm}^{CALC} \quad (13)$$

gdzie:

$k_{s,m}$ – wskaźnik odnoszący się do zawartości siarki w paliwie [kg/kg paliwa].

Metale ciężkie

Emisję metali ciężkich określa się na podstawie:

$$E_{i,j}^{CALC} = k_{i,j} \times FC_{jm}^{CALC} \quad (14)$$

gdzie:

$k_{i,m}$ – wskaźnik odnoszący się do zanieczyszczenia i w paliwie m [kg/kg paliwa].

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodologię, która może być wykorzystywana do obliczenia poziomu emisji zanieczyszczeń, których źródłem jest transport drogowy. W celu obliczenia poziomu zanieczyszczeń konieczna jest znajomość danych, takich jak średni przebieg pojazdów, struktura rodzajowa pojazdów, zużycie paliwa, rodzaj stosowanego paliwa oraz obliczenie współczynników emisji. Współczynniki emisji oblicza się na podstawie danych dotyczących warunków klimatycznych, średnich odległości pokonywanych przez pojazdy, rodzaju pojazdów oraz dróg etc. Nie we wszystkich przypadkach istnieje możliwość jednoznacznego obliczenia współczynników emisji, ze względu na brak szczegółowych danych. Taka sytuacja występuje w przypadku emisji takich związków, jak tlenek tlenku azotu (podtlenek azotu) czy amoniaku. Dla tych związków nie są określane współczynniki emisji przy rozruchu zimnego silnika, lecz tylko dla całkowitej emisji. W przypadku wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i cząstek stałych określone są współczynniki w zależności od rodzaju paliwa, rodzaju wtrysku, typu pojazdu oraz normy emisji spełnianej przez pojazd. Dioksyny i furany zostały oddzielone od pozostałych związków ze względu na to, iż znana jest wartość współczynnika toksyczności. W odniesieniu do alkanów, alkenów, aldehydów – współczynnik emisji jest określany w zależności od rodzaju pojazdu, silnika i norm, jakie dany pojazd spełnia. Szczegółowe dane nie są także całkowicie określane dla pojazdów jednośladowych.

Literatura

1. Pyłka – Gutowska E.: Ekologia z ochroną środowiska. Warszawa 1997.
2. Nitziachristos L, Samaras Z.: Copert III. Computer programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors. Copenhagen 2000.
3. Strona internetowa: www.movinggraphics.ca – 10.10.2006 (rysunek samochodu).

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Wyciślik, prof. Pol. Śl.