

## **Model natężenia emisji dodatkowej po zimnym rozruchu silnika**

**KRZYSZTOF BRZOZOWSKI**

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej

W artykule przedstawiono model umożliwiający odwzorowanie rzeczywistego charakteru natężenia emisji dodatkowej po zimnym rozruchu silnika. Do opisu przebiegu natężenia emisji zaproponowano dwie postacie funkcji i porównano uzyskane rezultaty z wynikami pomiarów, wykonanych na hamowni podwoziowej. Dla jednej z proponowanych postaci funkcji sformułowano model określający natężenie emisji po zimnym rozruchu w zależności od temperatury otoczenia i średniej prędkości pojazdu. Model oparto na danych dyskretnych z modelu HBEFA, a do określenia jego parametrów wykorzystano metodę optymalizacji Nelder-Meada. Dla wybranej kategorii pojazdów przeprowadzono porównanie własnego modelu z modelem EXEMPT, uzyskując akceptowalną zgodność wyników. Własny model zastosowano w zadaniu dyspersji zanieczyszczeń, wskazując na jakościową i ilościową różnicę pomiędzy wynikami uzyskanymi dla proponowanego modelu i modelu uproszczonego, nie uwzględniającego zmiennego w czasie natężenia emisji dodatkowej.

### **1. Wstęp**

Aby móc zbadać wpływ oddziaływania motoryzacji na otoczenie (środowisko), należy dysponować danymi, które określają emisję (bądź natężenie emisji) związków szkodliwych spalin. Emisja powinna być zdefiniowana w zależności od parametrów charakteryzujących silniki napędzające pojazdy oraz parametrów ich ruchu. Parametrami tymi są na ogół dane dotyczące: rodzaju silnika i jego objętości skokowej, spełnianych wymagań legislacyjnych, prędkości i przyspieszenia pojazdu. W związku z tym w ośrodkach krajowych i zagranicznych od szeregu lat prowadzone są prace zmierzające do utworzenia tzw. modeli emisji. Modele emisji to formuły matematyczne, określające emisję drogową bądź natężenie emisji związków szkodliwych spalin dla pewnych kategorii pojazdów w zależności od parametrów ich ruchu. Modele te uzyskuje się w wyniku aproksymacji (czasem ekstrapolacji) danych eksperymentalnych, uzyskiwanych w różnych ośrodkach badawczych.

Posiadanie modeli emisji warunkuje prace związane z bilansowaniem emisji i obliczaniem stężeń zanieczyszczeń w okolicach ciągów komunikacyjnych oraz modelowaniem ich rozprzestrzeniania się (dyspersji) w pracach prognostycznych.

Sposób użytkowania samochodów osobowych w Europie charakteryzuje się małymi przebiegami pomiędzy kolejnymi uruchomieniami silnika. Wynika to z ich eks-

ploatacji głównie w warunkach miejskich, stąd też duży odsetek rozruchów stanowią rozruchy zimnego lub nie nagrzanego silnika. Zwiększona emisja, powstająca w tych warunkach, powinna być uwzględniana w modelowaniu oddziaływania transportu na jakość powietrza [1].

W związku z powyższym, w artykule rozważono problem dodatkowej emisji w warunkach zimnego rozruchu i zaproponowano własny model, umożliwiający obliczenie natężenia dodatkowej emisji po uruchomieniu zimnego silnika. Przedstawiono również zastosowanie tego modelu w rozwiązaniu zadania dyspersji zanieczyszczeń.

## 2. Emisja w fazie zimnego rozruchu

Emisja składników spalin z pojazdów samochodowych w początkowej fazie rozruchu (fazie zimnej) zależy przede wszystkim od stanu cieplnego silnika. Pojęcie zimnego rozruchu obejmuje zarówno rozruch silnika, którego temperatura jest równa temperaturze otoczenia, jak i nagrzewanie się silnika i reaktora katalitycznego do temperatury roboczej [2]. Zależność emisji od stanu cieplnego silnika jest szczególnie wyraźna dla silników o zapłonie iskrowym. W przypadku samochodów z silnikami ZS zimny rozruch także wpływa na emisję, ale wpływ ten jest znacznie mniejszy [1], [2]. W pracy [2] autorzy cytują badania szwedzkie, według których emisja w fazie zimnego rozruchu silników samochodów osobowych może stanowić od 50 - 90 % całkowitej emisji poszczególnych związków szkodliwych spalin.

Zagadnienie szacowania emisji składników spalin z pojazdów samochodowych podczas zimnego rozruchu i ruchu w fazie nagrzewania się silnika i jego osprzętu (w tym reaktora katalitycznego) znajduje różne odzwierciedlenie w istniejących i tworzonych w Europie modelach emisji. Sposób przedstawienia emisji, w poszczególnych modelach, zależy głównie od ich przeznaczenia. Emisję podczas zimnego rozruchu i ruchu pojazdów z nie nagrzanym silnikiem w modelach europejskich, definiuje się najczęściej w postaci:

- dodatkowej średniej emisji drogowej,
- dodatkowej emisji od chwili uruchomienia zimnego silnika w zależności od przebytej drogi lub od chwili uruchomienia do osiągnięcia stabilizacji termicznej przez silnik.

Dodatkowa emisja związana z zimnym rozruchem, w postaci dodatkowej średniej emisji drogowej, zdefiniowana została w modelu COPERT [3] oraz w modelu zaproponowanym przez INRETS [4]. Wymienione modele umożliwiają uwzględnienie w obliczeniach wpływu fazy zimnego rozruchu i nagrzewania silnika. W obu modelach dodatkowa średnia emisja drogowa, w fazie nagrzewania się silnika, uzależniona jest od średniej prędkości ruchu oraz przejeżdżanego dystansu. Umożliwiają one zatem uzyskanie charakterystyk statycznych dodatkowej średniej emisji drogowej w zależności od średniej prędkości ruchu [5].

Charakterystyki dodatkowej emisji drogowej, uzyskane z modelu COPERT lub INRETS, pod względem jakościowym są spójne [5]. Umożliwiają one ocenę stopnia oddziaływania motoryzacji na środowisko w skali regionalnej lub większej. Mogą być

użyte do oceny stopnia oddziaływania motoryzacji na środowisko również w skali lokalnej (ulicy, parkingu), jednakże przy przyjęciu szeregu uproszczeń.

W skali lokalnej wskazane byłoby posługiwanie się charakterystykami natężenia emisji dodatkowej w zależności od czasu po rozruchu zimnego silnika  $t$ , średniej prędkości ruchu  $v$  i temperatury otoczenia  $T$ . Uzyskanie tego rodzaju charakterystyk umożliwia postępowanie opisane w dalszej części pracy.

### 3. Charakterystyki natężenia emisji dodatkowej

Natężenie emisji danego związku szkodliwego spalin z pojedynczego pojazdu poruszającego się z prędkością  $v$  w temperaturze  $T$ , po upływie czasu  $t$  od uruchomienia zimnego silnika można przedstawić następująco:

$$e[t, v, T] = e_h[v] + \varepsilon[t, v, T], \quad (1)$$

gdzie  $e_h$  - natężenie emisji składnika w warunkach nagrzanego silnika, zależne od prędkości pojazdu  $v$ ,  $\varepsilon$  - natężenie dodatkowej emisji składnika w fazie nagrzewania się silnika i reaktora katalitycznego, zależne od prędkości pojazdu  $v$ , temperatury otoczenia  $T$  oraz czasu pracy silnika po rozruchu  $t$ .

Jeżeli założyć (przy ustalonych  $v$  i  $T$ ), że dodatkowa emisja podczas nagrzewania się silnika i reaktora katalitycznego  $\Delta E(t)$  jest znana, wówczas problem wyznaczenia natężenia emisji  $\varepsilon(t)$  można sprowadzić do rozwiązania równania całkowego typu Volterra, postaci:

$$\int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau = \Delta E(t). \quad (2)$$

Równanie (2) można rozwiązać w sposób przybliżony, przyjmując, że natężenie dodatkowej emisji po upływie czasu  $t$  od rozruchu zimnego silnika zmienia się według znanej zależności [6].

W niniejszej pracy rozpatrzono dwie postacie funkcji  $\varepsilon(t)$ . Jeżeli przyjąć funkcję  $\varepsilon(t)$  jako wykładniczą:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-bt}, \quad (3)$$

gdzie  $\varepsilon_0, b$  są parametrami zależnymi od prędkości  $v$  i temperatury otoczenia  $T$ , wówczas:

$$\Delta E(t) = \int_0^t \varepsilon_0 \cdot e^{-b\tau} d\tau = \frac{\varepsilon_0}{b} (1 - e^{-bt}). \quad (4)$$

Zachodzi przy tym:

$$\Delta E(t_n) = \frac{\varepsilon_0}{b} (1 - e^{-bt_n}), \quad (5)$$

gdzie  $t_n$  to czas, po którego upływie  $\mathcal{E}$  ma pomijalnie małą wartość.

Z równań (4) i (5) otrzymuje się:

$$\Delta E(t) = \Delta E(t_n) \cdot (1 - e^{-bt}) (1 - e^{-bt_n})^{-1}. \quad (6)$$

Można również przyjąć potęgową aproksymację funkcji  $\mathcal{E}(t)$ , a więc postać:

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 (t_n - t)^b, \quad (7)$$

wówczas:

$$\Delta E(t) = \int_0^t \mathcal{E}_0 (t_n - \tau)^b d\tau = -\frac{\mathcal{E}_0}{b+1} [(t_n - t)^{b+1} - t_n^{b+1}]. \quad (8)$$

Z zależności (8) dla  $t = t_n$  otrzymuje się zależność:

$$\Delta E(t_n) = \frac{\mathcal{E}_0}{b+1} t_n^{b+1}. \quad (9)$$

Jeżeli uwzględnić wzór (9), to funkcję  $\Delta E(t)$  można w tym przypadku przedstawić w postaci:

$$\Delta E(t) = \Delta E(t_n) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{t_n} \right)^{b+1} \right]. \quad (10)$$

Otrzymane zależności (6) lub (10) umożliwiają sformułowanie zadania wyznaczenia wykładnika  $b$  na drodze aproksymacji. Jeżeli znane są wartości  $\Delta E$  dla pewnych dyskretnych wartości  $t$ , tzn. dane są  $\Delta E_1, \Delta E_2, \dots, \Delta E_n$  odpowiednio dla  $t = t_1, t_2, \dots, t_n$ , to wykładnik  $b$  można wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów.

Problem można zdefiniować jako poszukiwanie takiej wartości parametru  $b$ , przy której funkcjonal  $\Omega_i$ , określający sumę kwadratów błędów osiąga minimum. I tak, po przyjęciu wykładniczej postaci funkcji  $\mathcal{E}(t)$  określonej w (3) otrzymuje się:

$$\Omega_1(b) = \sum_{i=1}^n [\Delta E(t_i) - \Delta E_i]^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \Delta E(t_n) \cdot (1 - e^{-bt_i}) (1 - e^{-bt_n})^{-1} - \Delta E_i \right]^2. \quad (11)$$

Z kolei dla postaci potęgowej funkcji  $\mathcal{E}(t)$  określonej wzorem (7) otrzymuje się:

$$\Omega_2(b) = \sum_{i=1}^n [\Delta E(t_i) - \Delta E_i]^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \Delta E(t_n) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t_i}{t_n} \right)^{b+1} \right] - \Delta E_i \right]^2. \quad (12)$$

Warunkami koniecznymi osiągnięcia przez  $\Omega_1(b)$  i  $\Omega_2(b)$  minimum są odpowiednio:

$$\frac{\partial \Omega_i}{\partial b} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (13)$$

Uwzględniając warunek (13) i postać (11) funkcjonału  $\Omega_1$ , otrzymuje się równanie nieliniowe ze względu na  $b$  w postaci:

$$\sum_{i=1}^{n-1} [\Delta E_n a_n^{-2} (a_n t_i e^{-bt_i} - a_i t_n e^{-bt_n})] [\Delta E_n a_i a_n^{-1} - \Delta E_i] = 0, \quad (14)$$

gdzie  $a_i = 1 - e^{-bt_i}$ ,  $a_n = 1 - e^{-bt_n}$ .

Z kolei uwzględniając warunek (13) i postać (12) funkcjonału  $\Omega_2$ , otrzymuje się następujące równanie nieliniowe ze względu na  $b$ :

$$\sum_{i=1}^{n-1} [\Delta E_n d_i^{b+1} \ln d_i] [\Delta E_n (d_i^{b+1} - 1) + \Delta E_i] = 0, \quad (15)$$

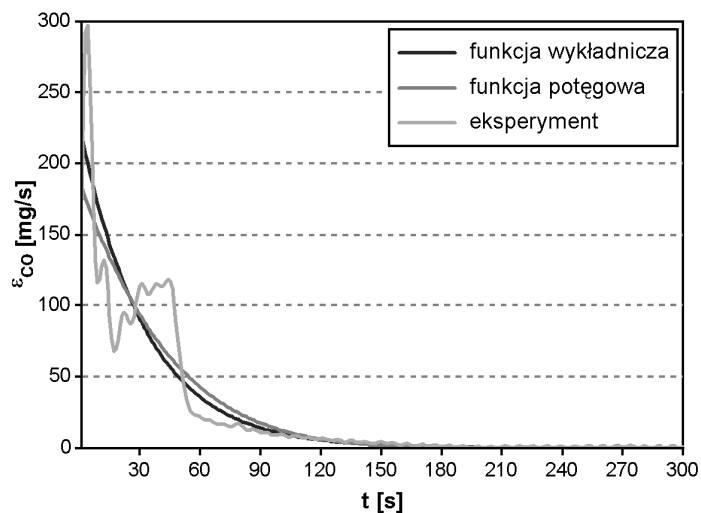
gdzie  $d_i = 1 - t_i / t_n$ .

Rozwiązanie numeryczne równań (14) lub (15) prowadzi do wyznaczenia wykładnika  $b$ , optymalnego w sensie metody najmniejszych kwadratów.

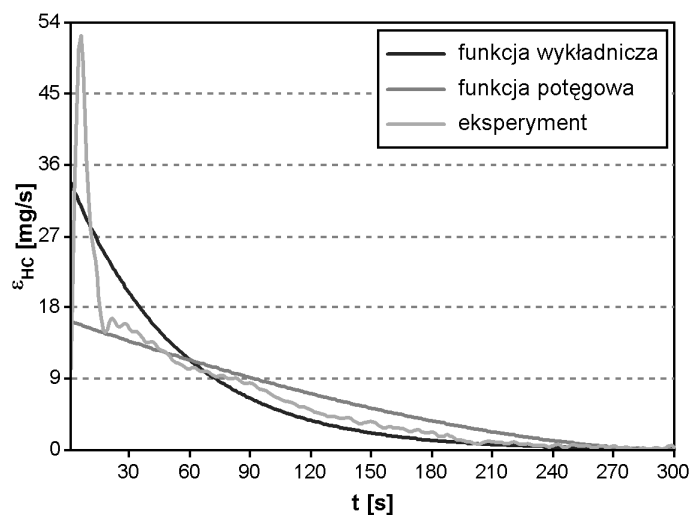
Warto zwrócić uwagę, że postępowanie prowadzące do wyznaczenia wykładnika  $b$  z równań (14) lub (15) należy prowadzić oddzielnie dla każdej kombinacji wartości parametrów  $v$  i  $T$ . Znajdują one bowiem bezpośrednie odzwierciedlenie w wartościach emisji dodatkowej  $\Delta E_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

Korzystając z przedstawionych zależności (3) i (7) można aproksymować natężenie dodatkowej emisji  $\varepsilon(t)$  w czasie  $t$  po rozruchu. Przedstawione powyżej sposoby aproksymacji wykorzystano do wyznaczenia funkcji  $\varepsilon(t)$  dla danych otrzymanych w wyniku eksperymentu pomiarowego. Pomiar natężenia emisji po zimnym rozruchu przeprowadzono dla pojazdu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym, spełniającego wymagania przepisów EURO III, o objętości skokowej  $V_s < 1,4 \text{ dm}^3$ . Uruchomienie zimnego silnika pojazdu w temperaturze  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , poruszającego się następnie ze średnią prędkością około  $7 \text{ km/h}$ , odwzorowano na hamowni podwoziowej, rejestrując natężenie dodatkowej emisji tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC) i tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ), w zależności od czasu po zimnym rozruchu. W przypadku aproksymacji funkcją wykładniczą (3), jak i w metodzie aproksymacji z wykorzystaniem postaci potęgowej (7), współczynnik  $b$  dobrano odpowiednio według równań (14) i (15), osobno dla każdego z rozpatrywanych składników spalin, na podstawie zarejestrowanego eksperymentalnie natężenia dodatkowej emisji. Wyniki pomiarów poddano wcześniej analizie harmonicznej.

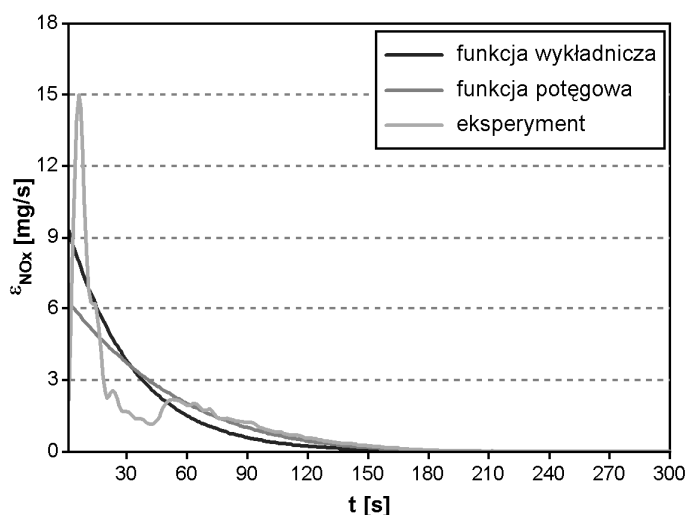
Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyki natężenia dodatkowej emisji  $\varepsilon(t)$  tlenku węgla w zależności od czasu  $t$  po zimnym rozruchu, uzyskane po przyjęciu formuł aproksymacyjnych (3) i (7) (wykładniczych i potęgowych) oraz wyników pomiarów. Z kolei na rysunkach 2 oraz 3 przedstawiono charakterystyki  $\varepsilon(t)$  uzyskane dla natężenia dodatkowej emisji węglowodorów i tlenków azotu.



Rys. 1. Zmierzone i aproksymowane natężenie dodatkowej emisji tlenku węgla  
Fig. 1. Courses of carbon monoxide emission intensity after cold start of engine:  
measured and approximated



Rys. 2. Zmierzone i aproksymowane natężenie dodatkowej emisji węglowodorów  
Fig. 2. Courses of hydrocarbon emission intensity after cold start of engine:  
measured and approximated



Rys. 3. Zmierzone i aproksymowane natężenie dodatkowej emisji tlenków azotu  
 Fig. 3. Courses of nitrogen oxides emission intensity after cold start of engine:  
 measured and approximated

Analiza wyników przedstawionych na rysunkach 1 - 3 wskazuje, że obie postaci funkcji  $\varepsilon(t)$  dobrze oddają rzeczywisty przebieg natężenia emisji. Przyjęcie postaci wykładniczej, określonej w (3), wydaje się bardziej celowe z uwagi na większe (bliższe wynikom pomiarów) wartości natężenia dodatkowej emisji w początkowej fazie nagrzewania silnika.

Przedstawione powyżej postępowanie można stosować, gdy dane są wartości dodatkowej emisji  $\Delta E$  dla pewnych dyskretnych wartości  $t$ . Nie dysponując jednak wynikami pomiarów eksperymentalnych, można wykorzystać istniejące modele emisji. Nie wszystkie modele emisji definiują jednak dodatkową emisję, wygenerowaną od chwili uruchomienia zimnego silnika w zależności od przebytej drogi lub od chwili uruchomienia, aż do nagrzania się silnika i jego osprzętu. Do grupy modeli określających  $\Delta E$  należą: INRETS, EXEMPT i HBEFA [4, 7, 8].

#### 4. Modele określające dodatkową emisję

Model zaproponowany przez INRETS [4] umożliwia określenie dodatkowej emisji związków szkodliwych spalin po zimnym rozruchu w zależności od temperatury otoczenia, średniej prędkości i dystansu pokonanego przez pojazd po rozruchu. Pojazdy, dla których sformułowano zależność na dodatkową emisję, podzielono na cztery kategorie: samochody z silnikami ZI z reaktorem katalitycznym i bez reaktora oraz samochody z silnikami ZS z i bez reaktora katalitycznego.

W tym modelu dodatkową emisję danego związku szkodliwego spalin dla pojazdu kategorii  $k$  przedstawiono w postaci funkcji [4]:

$$\Delta E_{k,i} = \varpi_k (\alpha_k + \beta_k - 1) \chi_k, \quad (16)$$

gdzie:

$\Delta E_{k,i}$  - dodatkowa emisja danego składnika spalin dla pojazdu kategorii  $k$ , wygenerowana do chwili  $t_i$  podczas jazdy ze średnią prędkością  $v$  na dystansie  $l$  po zimnym rozruchu w temperaturze  $T$ ,

$\varpi_k$  - emisja odniesienia dla  $v = 20$  km/h i  $T = 20^\circ\text{C}$ ,

$\alpha_k$  - funkcja średniej prędkości ruchu  $v$ ,

$\beta_k$  - funkcja temperatury otoczenia  $T$ ,

$\chi_k$  - funkcja pokonanego przez pojazd dystansu  $l$ .

Funkcje  $\alpha_k$  i  $\beta_k$  zdefiniowano jako liniowe, postaci:

$$f_k = a_{k,1}x + a_{k,2} \quad \text{dla} \quad \begin{cases} x = v, \text{ dla } f_k = \alpha_k \\ x = T, \text{ dla } f_k = \beta_k \end{cases}, \quad (17)$$

a funkcję  $\chi_k$  przyjęto jako [4]:

$$\chi_k = \left(1 - e^{-a_{k,3}\delta}\right) \left(1 - e^{-a_{k,3}}\right)^{-1}, \quad (18)$$

gdzie  $\delta = l/L_k$  jest ilorazem przebytej drogi  $l$  i całkowitego dystansu ze zwiększo-

ną emisją po zimnym rozruchu  $L_k$ .

Współczynniki  $a_{k,1}, a_{k,2}, a_{k,3}$ , emisje odniesienia  $\varpi_k$  oraz szczegółowy opis uzyskanych zależności dla pojazdów rozważanych kategorii można znaleźć w pracy [4]. Wartości współczynników i emisje odniesienia podano także w pracy [6].

W pracy [7] przedstawiono model EXEMPT (EXcess EMissions Planning Tool), będący wynikiem programu badawczego, dotyczącego wyznaczenia dodatkowej emisji po zimnym lub po chłodnym rozruchu. Dodatkową emisję poszczególnych związków szkodliwych spalin dla pojazdu kategorii  $k$  w tym modelu przedstawić można w postaci [7]:

$$\Delta E_{k,i} = \Delta E_k \left(1 - e^{-b_k t_i}\right), \quad (19)$$

gdzie:

$\Delta E_k$  - całkowita emisja dodatkowa jako funkcja różnicy temperatur  $\gamma(\Delta T_0)$  pomiędzy temperaturą nagrzanego silnika  $T_{k,c}$  i temperaturą silnika w chwili rozruchu  $T_{k,0}$ ,

$b_k$  - współczynnik empiryczny.



Funkcję  $\gamma$  zdefiniowano następująco:

$$\Delta E_k = \gamma(\Delta T_0) = \begin{cases} a_{k,0} \Delta T_0^{a_{k,1}} + a_{k,2}^{(s)} \Delta T_0^{a_{k,3}}, & \text{dla } \Delta T_0 < T_{k,ref} \\ a_{k,4} + a_{k,5} \Delta T_0, & \text{dla } \Delta T_0 \geq T_{k,ref} \end{cases}, \quad (20)$$

gdzie:

$$\Delta T_0 = T_{k,c} - T_{k,0}, \quad T_{k,c} = a_{k,c} + b_{k,c} T,$$

$a_{k,c}, b_{k,c}$  - współczynniki empiryczne,

$T$  - temperatura otoczenia,

$T_{k,ref}$  - wartość decydująca o rodzaju zależności określającej całkowitą emisję dodatkową danego składnika spalin.

Przydatność modelu EXEMPT w zadaniu wyznaczenia natężenia emisji dodatkowej jest ograniczona, bowiem nie uzależnia on wprost emisji dodatkowej od średniej prędkości ruchu. Ponadto model został utworzony w oparciu o najuboższą bazę danych pomiarowych w porównaniu do innych modeli.

Kolejnym modelem, określającym dodatkową emisję związków szkodliwych spalin po zimnym i chłodnym rozruchu pojazdów osobowych, jest model HBEFA [8]. W modelu tym podano dodatkową emisję poszczególnych związków szkodliwych spalin dla pewnych dyskretnych wartości takich parametrów jak: temperatura otoczenia, rodzaj ruchu i odpowiadająca mu średnia prędkość ruchu, dystans pokonywany przez pojazd oraz czasu postoju przed rozruchem.

Wymienione modele umożliwiają wyznaczenie natężenia emisji dodatkowej poprzez poszukiwanie minimum funkcjonau (11) lub (12) w zależności od średniej prędkości ruchu i temperatury otoczenia (model HBEFA i INRETS) lub wyłącznie temperatury (EXEMPT). Wyznaczanie jednak dla każdej z kombinacji parametrów niezależnych  $v$  i  $T$  wykładnika  $b$  jest nieefektywne numerycznie. W związku z powyższym w niniejszej pracy zaproponowano model, w którym wykładnik  $b$  jest uniwersalny w tym sensie, że jest właściwy (stały) dla różnych wartości  $v$  i  $T$ . Proponowany algorytm postępowania przedstawiono poniżej.

## 5. Model określający natężenie emisji dodatkowej dla określonej kategorii pojazdów wyłącznie w zależności od czasu po rozruchu

Rozpatrzmy zależność opisującą natężenie emisji danego składnika spalin w postaci (3), jako bardziej ogólną od postaci (7) i nie wymagającą precyzyjnego określenia czasu  $t_n$ , który może być różny w zależności od średniej prędkości i temperatury otoczenia, a po którym dodatkowa emisja ma pomijalnie małą wartość.

Ogólnie można napisać, że po przyjęciu  $\mathcal{E}$  w postaci:

$$\mathcal{E}(t, v, T) = \mathcal{E}_0(v, T) \cdot e^{-bt}, \quad (21)$$

problem sprowadza się do przyjęcia zależności opisującej  $\varepsilon_0(v, T)$  dla pewnej kategorii pojazdów. Rozważmy zależność  $\varepsilon_0(v, T)$  od średniej prędkości ruchu i temperatury otoczenia, w której silnik jest uruchamiany w dwóch postaciach: wielomianu potęgowego i funkcji potęgowej.

Jeżeli przyjmując zależność  $\varepsilon_0(v, T)$  w postaci wielomianu potęgowego, to zgodnie z równaniem (21) można napisać:

$$\varepsilon(t, v, T) = \sum_{i=0}^{n_v} \sum_{j=0}^{n_T} a_{ij} v^i T^j \cdot e^{-bt}, \quad (22)$$

gdzie  $a_{ij}$  współczynniki wielomianu dla  $i = 0, \dots, n_v; j = 0, \dots, n_T$ .

Jeżeli z kolei przyjmujemy, że wykładniki  $v$  i  $T$  mogą być liczbami rzeczywistymi niecałkowitymi, wówczas można przyjmując zależność  $\varepsilon_0(v, T)$  w postaci funkcji potęgowej, otrzymując:

$$\varepsilon(t, v, T) = a_0 v^{a_1} T^{a_2} \cdot e^{-bt}, \quad (23)$$

gdzie  $a_0, a_1, a_2$  - liczby rzeczywiste.

Całkując wg (2) zależność (22) i (23) otrzymuje się:

$$\Delta E(t, v, T) = \begin{cases} b^{-1} \sum_{i=0}^{n_v} \sum_{j=0}^{n_T} a_{ij} v^i T^j (1 - e^{-bt}) & \text{dla wielomianu (22)} \\ b^{-1} a_0 v^{a_1} T^{a_2} (1 - e^{-bt}) & \text{dla funkcji (23).} \end{cases} \quad (24)$$

Jeśli przyjmując, że dane są wartości emisji dodatkowej  $\Delta E_p$  dla pewnych dyskretnych kombinacji parametrów  $t_p, v_p, T_p$  ( $p = 0, 1, \dots, m$ ), to dla obu postaci  $\varepsilon_0(v, T)$  problem sprowadza się do znalezienia wartości współczynników  $a_{ij}$ , bądź  $a_0, a_1, a_2$  i wykładnika  $b$  w taki sposób, aby zminimalizować funkcjonal  $\Omega$ :

$$\Omega = \sum_{p=0}^m \left[ b^{-1} \varepsilon_0(v_p, T_p) (1 - e^{-bt_p}) - \Delta E_p \right]^2, \quad (25)$$

gdzie  $m + 1$  jest liczbą danych dyskretnych wartości  $\Delta E_p(t_p, v_p, T_p)$ .

W związku z tym, że  $\Omega$  nie jest formą kwadratową poszukiwanych współczynników, do znalezienia minimum funkcji wielu zmiennych (25) zastosowano metodę optymalizacji Nelder-Meada [9].

Wartości  $\Delta E_p(t_p, v_p, T_p)$  przyjęto według modelu HBEFA [8], wykorzystując udostępnioną autorowi pracy przez INFRAS bazę danych. Prezentowane dalej wyniki dotyczą zadania aproksymacji dodatkowej emisji tlenu węgla. Do obliczeń przyjmowano różne konfiguracje wartości  $t_p, v_p, T_p$  spełniających warunki:

$t_p \in \langle 30\text{s}; 871\text{s} \rangle$ ,  $v_p \in \langle 18,6\text{ km/h}; 58,4\text{ km/h} \rangle$  i  $T_p \in \langle -9^\circ\text{C}; 25^\circ\text{C} \rangle$ . W sumie wartości  $\Delta E_p$  wyznaczono wg modelu HBEFA dla  $m+1=1798$  dyskretnych wartości  $\Delta E_p$ , dla dwóch kategorii pojazdów z silnikami ZI (EURO III) o objętości skokowej  $V_s < 1,4\text{ dm}^3$  oraz  $1,4 < V_s < 2\text{ dm}^3$ .

Aby określić poprawność otrzymanych zależności opisujących  $\Delta E(t, v, T)$  według (24), wprowadzono wielkość  $R$ :

$$R = \frac{\sum_{p=0}^m \left[ b^{-1} \varepsilon_0(v_p, T_p) (1 - e^{-bt_p}) - \Delta E_p \right]^2}{\sum_{p=0}^m [\Delta E_p]^2} 100\%, \quad (26)$$

charakteryzującą błąd aproksymacji.

W przypadku zależności wielomianowej (22) opisującej  $\varepsilon_0(v, T)$  przyjęto  $n_v \leq 2$ ;  $n_T \leq 2$ . Uzyskane wartości  $R$  dla rozważanego zadania aproksymacji dodatkowej emisji tlenku węgla po zimnym rozruchu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Błąd aproksymacji  $R$  dla proponowanych funkcji aproksymujących dodatkową emisję tlenku węgla

Table 1. Approximation error  $R$  of functions proposed for carbon monoxide excess emission

Pojazd z silnikiem ZI (EURO III) o objętości skokowej	$R$				Funkcja potęgowa
	Wielomian potęgowy				
	$n_v = 1$ $n_T = 1$	$n_v = 2$ $n_T = 1$	$n_v = 1$ $n_T = 2$	$n_v = 2$ $n_T = 2$	
$V_s < 1,4\text{ dm}^3$	2,7 %	2,5 %	2,7 %	1,9 %	5,2 %
$1,4 < V_s < 2\text{ dm}^3$	2,7 %	1,8 %	2,6 %	2,6 %	5,2 %

Uzyskane wartości błędów aproksymacji  $R$  potwierdzają przydatność proponowanych postaci funkcji.

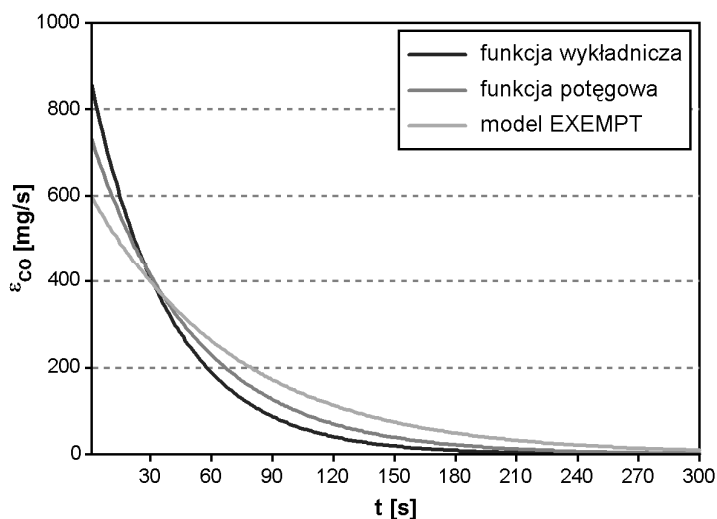
Z kolei w tabeli 2 zestawiono wartości wykładnika  $b$ , uzyskane w wyniku minimalizacji funkcjonu (25) dla różnych postaci funkcji aproksymujących. Analizując wartości wykładnika  $b$  można stwierdzić, że wyznaczone wartości tego wykładnika w skrajnym przypadku różnią się nie więcej niż o 20 %.

Tabela 2. Wartości wykładnika  $b$  dla proponowanych funkcji aproksymujących dodatkową emisję tlenku węgla

Table 2. Values of exponent  $b$  for functions proposed when approximating carbon monoxide excess emission

Pojazd z silnikiem ZI (EURO III) o objętości skokowej	$b$				Funkcja potęgowa
	Wielomian potęgowy				
	$n_v = 1$ $n_T = 1$	$n_v = 2$ $n_T = 1$	$n_v = 1$ $n_T = 2$	$n_v = 2$ $n_T = 2$	
$V_s < 1,4 \text{ dm}^3$	0,024	0,022	0,024	0,02	0,026
$1,4 < V_s < 2 \text{ dm}^3$	0,024	0,025	0,024	0,023	0,025

Na rysunku 4 porównano obliczone natężenie emisji dodatkowej tlenku węgla w temperaturze otoczenia  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ , przy średniej prędkości  $30 \text{ km/h}$  dla pojazdu z silnikiem ZI (EURO III) o objętości skokowej  $V_s < 1,4 \text{ dm}^3$  według proponowanego wielomianu potęgowego ( $n_v = n_T = 2; b = 0,02$ ), funkcji potęgowej ( $b = 0,026$ ) oraz natężenia emisji uzyskanego dla danych z modelu EXEMPT ( $b = 0,014$ ).

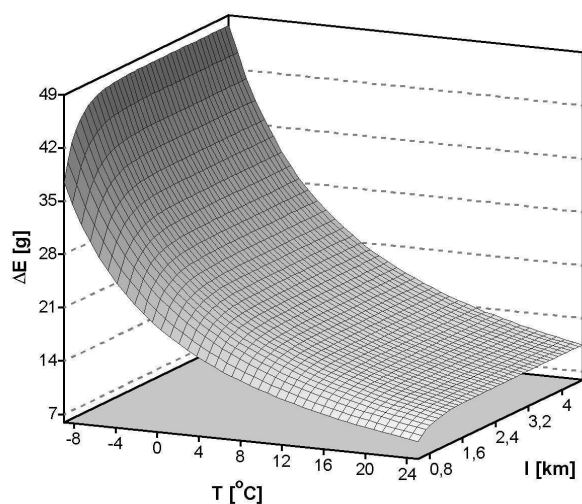


Rys. 4. Natężenie dodatkowej emisji tlenku węgla według modelu własnego i modelu EXEMPT

Fig. 4. Carbon monoxide emission intensity after cold start of engine: proposed models and EXEMPT model

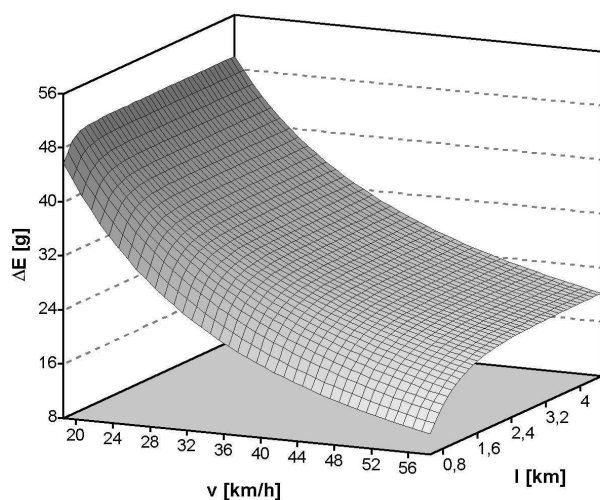
Na kolejnych rysunkach przedstawiono dodatkową emisję tlenku węgla w zależności od poszczególnych parametrów niezależnych, po przyjęciu funkcji potęgowej w zadaniu aproksymacji. Parametrami niezależnymi są  $t, v$  i  $T$ . Znając jednak  $v$  i  $t$  można obliczyć dystans jaki przejechał pojazd  $l = vt$ . Stąd na rysunkach 5 i 6 dystans  $l$  traktowano jako parametr niezależny. Na rys. 5 przedstawiono dodatko-

wą emisję tlenku węgla dla pojazdu z silnikiem ZI (EURO III) o objętości skokowej  $V_s < 1,4 \text{ dm}^3$  w zależności od temperatury otoczenia (temperatury rozruchu) i przejechanego dystansu. Z kolei na rysunku 6 przedstawiono zależność dodatkowej emisji tlenku węgla od średniej prędkości ruchu i przejechanego dystansu po rozruchu.



Rys. 5. Zależność dodatkowej emisji tlenku węgla od temperatury rozruchu i przejechanego dystansu przy średniej prędkości 30 km/h dla pojazdu z silnikiem ZI (EURO III,  $V_s < 1,4 \text{ dm}^3$ )

Fig. 5. Excess emission of carbon monoxide in relation to ambient temperature and distance travelled after cold start with an average speed 30 km/h for a vehicle with SI engine (EURO III,  $V_s < 1.4 \text{ dm}^3$ )



Rys. 6. Zależność dodatkowej emisji tlenku węgla od średniej prędkości ruchu i przejechanego dystansu po rozruchu w temperaturze otoczenia  $-5^\circ \text{C}$  dla pojazdu z silnikiem ZI (EURO III,  $V_s < 1,4 \text{ dm}^3$ )

Fig. 6. Excess emission of carbon monoxide in relation to average vehicle speed and distance travelled after cold start at ambient temperature  $-5^\circ \text{C}$  for a vehicle with SI engine (EURO III,  $V_s < 1.4 \text{ dm}^3$ )

Przedstawione postępowanie umożliwi wyznaczenie charakterystyk natężenia emisji dodatkowej dla różnych średnich prędkości ruchu i temperatur otoczenia pod warunkiem jednak, że mieszczą się w przedziałach wartości, dla których rozwiązano zadanie aproksymacji.

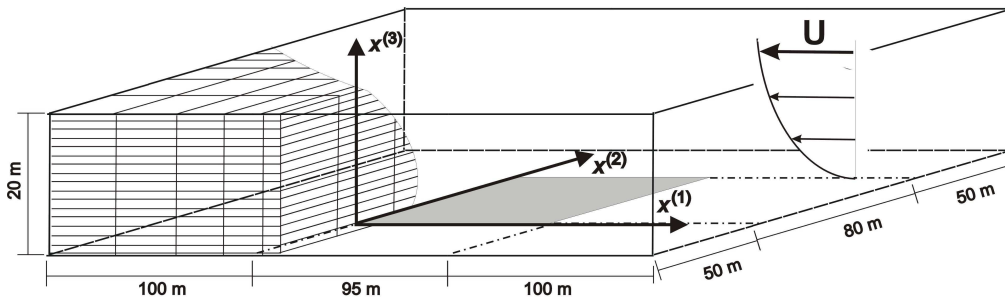
Proponowany model znajduje zastosowanie w obliczeniach, w których uwzględnia się zmienne w czasie natężenie emisji z silnika pojazdu. Jednym z ważnych problemów obliczeniowych jest określenie stopnia zanieczyszczenia powietrza w wyniku emisji spalin [5, 6]. Poniżej przeanalizowano wyniki uzyskiwane w przypadku zastosowania proponowanego modelu oraz modelu uproszczonego, w którym zakłada się stałe natężenie emisji dodatkowej w czasie nagrzewania się silnika. W uproszczonym modelu przyjmuje się więc, że:

$$\varepsilon(t, v, T) \cong \Delta E(t_n, v, T) \cdot t_n^{-1} = \text{const}, \quad t \leq t_n. \quad (27)$$

## 6. Zastosowanie modeli emisji w zadaniu dyspersji

Rozważane są warunki emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia gazowego w niskiej temperaturze otoczenia, w obszarze parkingu zlokalizowanego w terenie otwartym. Przyjęto, że jest to plac manewrowy do nauki jazdy pojazdami osobowymi. Typowymi reprezentantami pojazdów, używanych w tym celu, są pojazdy osobowe klasy handlowej B z silnikami ZI spełniającymi EURO III o objętości skokowej mniejszej niż  $1,4 \text{ dm}^3$ . Rozważono wpływ przyjętego modelu emisji spalin na przykładzie tlenku węgla, emitowanego podczas jednoczesnego uruchomienia 4 pojazdów i jazdy ze średnią prędkością około  $20 \text{ km/h}$  w obszarze rozważanego placu o wymiarach  $95 \times 80 \text{ m}$ . Przyjęto, iż obszar dyskretyzacji ma wymiary  $295 \times 180 \times 50 \text{ m}$  jak na rys. 7 (obszar placu manewrowego zacięniowano). Do dyskretyzacji zagadnienia dyspersji zastosowano metodę objętości skończonych, szczegółowo opisaną w pracach [5, 6].

Liczba węzłów siatki obliczeniowej wynosi  $n = n_1 \times n_2 \times n_3$  (w obliczeniach  $n_1 = 59$ ,  $n_2 = 36$  i  $n_3 = 40$ , a więc  $n = 84960$ ).



Rys. 7. Rozważany obszar  
Fig. 7. Considered domain

Poszukiwany wektor niewiadomych, którymi są stężenia substancji emitowanych przez silniki pojazdów (w rozważanym przypadku tlenku węgla), ma postać [10]:

$$\Phi = [\phi_{1,1,1}, \dots, \phi_{n_1,1,1}, \dots, \phi_{i,j,k}, \dots, \phi_{n_1,n_2,n_3}]^T. \quad (28)$$

Przyjmijmy także (rys. 7), że znany jest wektor prędkości powietrza  $\mathbf{U}$  o składowych  $U^{(1)}(x^{(3)})$ ,  $U^{(2)} = U^{(3)} = 0$ . Rozkład pola prędkości otrzymać można metodą iteracyjną opisaną w [6, 11].

W wyniku dyskretyzacji równania adwekcji-dyfuzji opisującego proces rozprzestrzeniania się masy zanieczyszczenia w ośrodku, zadanie sprowadza się do rozwiązania układu  $n$  równań różniczkowych zwyczajnych, pierwszego rzędu względem zmiennej  $t$ , który może być zapisany w postaci [5, 6]:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \Lambda(\Phi) = \mathbf{f}, \quad (29)$$

gdzie:

$\Lambda(\Phi)$  - określone w [5, 6],

$$\mathbf{f} = [I_{1,1,1}, \dots, I_{n_1,1,1}, \dots, I_{i,j,k}, \dots, I_{n_1,n_2,n_3}]^T,$$

$I_{i,j,k}$  - zmiana masy zanieczyszczenia w wyniku emisji ze źródeł, procesów fizycznych oraz reakcji chemicznych.

W rozpatrywanym zadaniu, związanym z emisją zanieczyszczenia gazowego w niskich temperaturach otoczenia, wpływ reakcji chemicznych i procesów fizycznych jest pomijalny. Można więc wobec (1) napisać:

$$I_{i,j,k} = \frac{1}{V_{i,j,k}} (e_h[v] + \mathcal{E}[t, v, T]), \quad (30)$$

gdzie  $V_{i,j,k}$  oznacza objętość obszaru kontrolnego obejmującego węzeł siatki  $x^{(1)} = x_i$ ,  $x^{(2)} = x_j$ ,  $x^{(3)} = x_k$ .

Równania (29) należy uzupełnić o odpowiednie dla rozpatrywanego zagadnienia warunki początkowe:

$$\Phi(t_0) = \Phi^{(0)}. \quad (31)$$

Oznacza to przyjęcie, że w chwili początkowej  $t_0$  znane są wartości stężeń  $\Phi^{(0)}$ , przyjmowane jako równe stężeniu tła oraz odpowiednie warunki brzegowe I i II rodzaju [5, 6]:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x^{(3)}} \right|_{x^{(3)}=0} = 0, \quad (32.1)$$

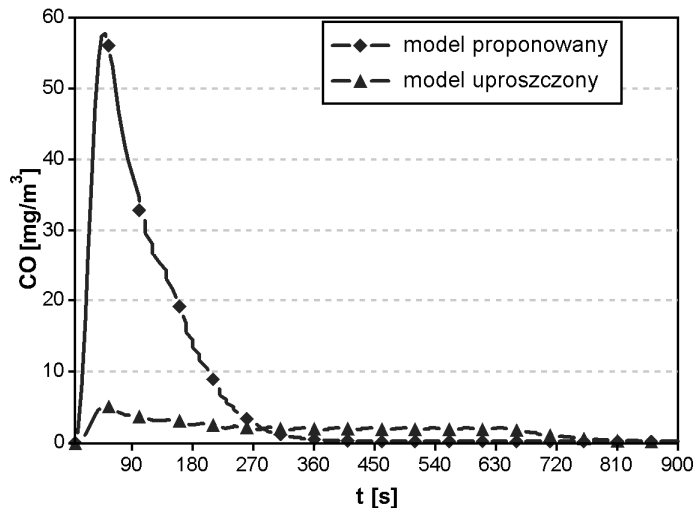
na pozostałych brzegach

$$\phi = \phi^0. \quad (32.2)$$

Wykorzystując pakiet EDCAR opisany w pracy [6], symulowano rozruch zimnych silników w temperaturze otoczenia  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  i jazdę manewrową pojazdów w czasie 15 min. w warunkach stratyfikacji neutralnej atmosfery [5, 11, 12], po przyjęciu prędkości wiatru  $U|_{x^{(3)}=14m} = 1,2\text{ m/s}$ . Emisję w warunkach nagrzanego silnika przyjęto wg modelu HBEFA [8], a natężenie emisji dodatkowej po zimnym rozruchu wg zaproponowanego w artykule modelu (w postaci funkcji potęgowej (23)), wyznaczając współczynniki  $a_0, a_1, a_2, b$  w oparciu o dane z modelu HBEFA.

W wyniku wykonanych obliczeń (dla przyjętego jednakowego scenariusza ruchu pojazdów po placu), przedstawiono rozbieżności uzyskiwane dla dyskutowanego w artykule modelu emisji po zimnym rozruchu i modelu uproszczonego, w którym natężenie emisji dodatkowej jest stałe i wyznaczone według (27).

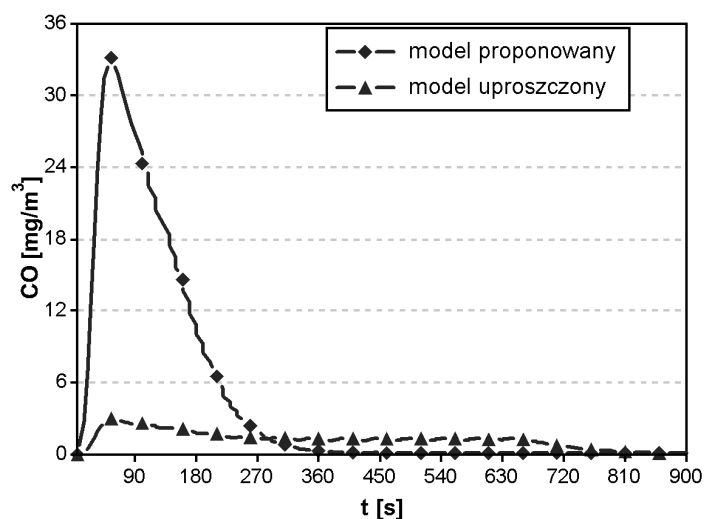
Poniżej porównano maksymalne chwilowe i średnie obliczone stężenie tlenku węgla w obszarze placu, po którym poruszały się pojazdy, dla obu modeli natężenia emisji dodatkowej. Na rysunkach 8 i 9 zestawiono chwilowe stężenia tlenku węgla w objętości kontrolnej, dla której obliczono maksymalną wartość stężenia według obu rozważanych modeli.



Rys. 8. Stężenie chwilowe tlenku węgla na wysokości 1,75 m ( $x^{(1)} = 7,5\text{ m}$ ;  $x^{(2)} = -2,5\text{ m}$ )

Fig. 8. Instantaneous carbon monoxide concentration at height of 1.75 m ( $x^{(1)} = 7,5\text{ m}$ ;  $x^{(2)} = -2,5\text{ m}$ )

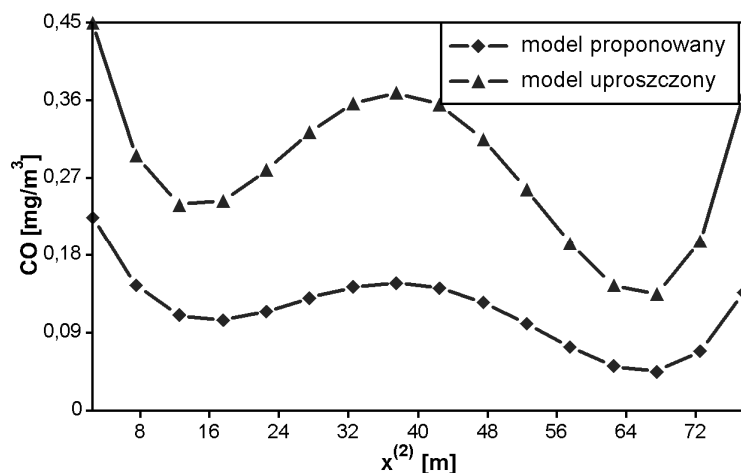




Rys. 9. Stężenie chwilowe tlenku węgla na wysokości 3,75 m ( $x^{(1)} = 7,5$  m;  $x^{(2)} = -2,5$  m)

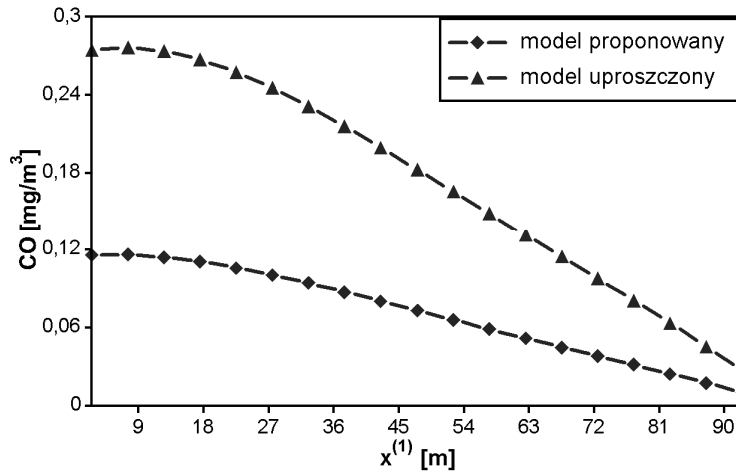
Fig. 9. Instantaneous carbon monoxide concentration at height of 3,75 m ( $x^{(1)} = 7,5$  m;  $x^{(2)} = -2,5$  m)

Łatwo zauważyć, że obliczone chwilowe stężenie maksymalne w przypadku modelu uproszczonego, zakładającego stałe natężenie dodatkowej emisji, jest blisko 10-krotnie mniejsze. Porównując z kolei obliczone stężenia średnie zauważyć można, że model uproszczony wpływa na ich zawyżenie. Odpowiednio na rysunkach 10 i 11 przedstawiono uzyskane wartości średniego stężenia na wysokości 1,75 m w dwóch przekrojach rozważanego w obliczeniach obszaru.



Rys. 10. Średnie stężenie tlenku węgla w przekroju dla  $x^{(1)} = 45$  m,  $x^{(3)} = 1,75$  m

Fig. 10. Average carbon monoxide concentration for  $x^{(1)} = 45$  m,  $x^{(3)} = 1,75$  m



Rys. 11. Średnie stężenie tlenku węgla w przekroju dla  $x^{(2)} = 40$  m,  $x^{(3)} = 1,75$  m

Fig. 11. Average carbon monoxide concentration for  $x^{(2)} = 40$  m,  $x^{(3)} = 1.75$  m

Przeprowadzone obliczenia prowadzą do sformułowania wniosku, że model uproszczony stosowany w zagadnieniach oceny stopnia zanieczyszczenia powietrza powoduje zawyżenie obliczanych wartości średnich stężeń, przy jednoczesnym zaniżaniu chwilowych wartości maksymalnych. W rozpatrywanym w pracy przypadku różnica pomiędzy obliczonymi na podstawie obu modeli wartościami średnimi stężenia tlenku węgla wahała się od 60 % do 300 %.

## 7. Podsumowanie

W artykule zaproponowano model umożliwiający odwzorowanie rzeczywistego charakteru natężenia emisji dodatkowej po zimnym lub chłodnym rozruchu silnika. Przedstawione postępowanie umożliwia uzyskanie modelu natężenia emisji po zimnym rozruchu w zależności od temperatury otoczenia i średniej prędkości pojazdu.

Wykazano, że modele uproszczone, uniezależniające natężenie emisji od czasu (np. charakterystyki dodatkowej średniej emisji drogowej), użyte w skali lokalnej w zadaniach oceny stopnia skażenia powietrza mogą prowadzić do błędnych wniosków. Nie powinny być zatem używane do oceny szybkozmiennych stanów zanieczyszczenia powietrza. Nie umożliwiają one bowiem oceny ryzyka związanego z chwilowymi znacznymi koncentracjami substancji szkodliwych (np. parkingi podziemne czy osiedlowe przy słabych warunkach przewietrzania). Przy rozwiązywaniu tego typu zadań przydatny może być sformułowany w artykule model.

Przedstawiona metodyka uzyskiwania charakterystyk emisyjnych natężenia dodatkowej emisji umożliwia odwzorowanie rzeczywistej emisji zarówno w pojedynczym przypadku, jak i w zadaniu oceny stopnia oddziaływania emitowanych zanieczyszczeń na środowisko w większej skali.

Artykuł powstał w ramach projektu badawczego nr 4T12D00826 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

### Literatura

- [1] CHŁOPEK Z.: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Zeszyt 173, Seria Mechanika, 1999.
- [2] BIELACZYC P., MERKISZ J., PIELECHA J.: *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [3] NTZIACHRISTOS L., SAMARAS Z. : *Copert III Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport. Methodology and Emission Factors*. European Environment Agency, Copenhagen 2000.
- [4] JOMARD R., SERIE E. : *Modelling of cold start emissions for passenger cars*. INRETS report LTE 9931, 1999.
- [5] BRZOWSKA L., BRZOWSKI K., WOJCIECH S.: *Computational Modelling of car Pollutant Dispersion*. WN Śląsk, Katowice 2001.
- [6] BRZOWSKA L., BRZOWSKI K.: *Modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*. WN Śląsk, Katowice-Warszawa 2003.
- [7] BLAIKLEY D.C.W., SMITH A.P., FEEST E.A., READING A.H.: *UG219 TRAMAQ – cold start emissions. Summary report*. AEA Technology, AEAT/ENV/R/0638 Issue 1, 2001.
- [8] *Handbook Emission Factors for Road Transport*, Version 1.2 , INFRAS, Bern 1999.
- [9] WIT R.: *Metody programowania nieliniowego*. WNT, Warszawa 1986.
- [10] BRZOWSKI K.: *Numerical modelling of car exhaust pollutant dispersion after cold start Part I: Open car park*. Archiwum Motoryzacji, Vol. 7, No. 1, pp. 3-23, 2004.
- [11] *COST Action 710- Final report: Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models*. Luxemburg 1998.
- [12] ZANNETTI P.: *Air pollution modeling. Theories, computational methods and available software*. Van Nostrand Reinhold, New York 1990.

## A model of pollutant emission intensity after cold start of engine

### Summary

The paper presents a model of additional exhaust emission after cold start of vehicle engine. Two different functions (exponential and power) have been used for approximation of emission intensity. Calculation results obtained using these functions have been compared with results of experiment. The exponential function in the model of additional exhaust emission gives better results. The values of coefficients of the proposed model were obtained using optimization method on the base of HBEFA discrete emission data. Results of comparison with EXEMPT model show that the proposed model is correct. The model was also applied to solve pollutant dispersion task. Some comments for results of numerical calculation done for the model and a simpler one, are presented in the last part of the paper.