

AN INFLUENCE OF TRAFFIC PRODUCED TURBULENCE ON CAR EXHAUST POLLUTANT CONCENTRATION

Lucyna Brzozowska, Krzysztof Brzozowski

University of Bielsko-Biala
Department of Mechanics and Computer Methods
Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland
tel.: +48 33 8279285, fax: +48 33 8279289
e-mail: kbrzozowski@ath.bielsko.pl

Abstract

A problem of influence of traffic produced turbulence on car exhaust pollutant concentration in some road areas is examined in the paper. The linear source model has been applied in order to describe the emission of pollutants. This model allows defining a relationship between average vehicle speed and traffic intensity. The emission and dispersion of carbon monoxide have been analysed for four different configurations of roads (including one for flat terrain). A numerical model of wind field and car exhaust pollutant dispersion has been used in order to analyse the impact of traffic turbulence on dispersion conditions. The emission intensity for the linear source has been obtained using INFRAS database. The results presented shows, that omitting of traffic turbulence causes overestimation of calculated pollutants concentration. This is some kind of evidence that the traffic induced turbulence should be taken into account in air quality modelling especially close to the road areas.

In particular the relation between average traffic speed and traffic intensity, domain area and cases considered and carbon monoxide concentration calculated for different cases are presented in the paper.

Keywords: modelling, air quality, traffic, emission, dispersion

WPLYW TURBULENCJI GENEROWANEJ PRZEZ POJAZDY NA WARTOŚCI STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W OBSZARZE CIĄGÓW KOMUNIKACYJNYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy wpływu turbulencji generowanej ruchem pojazdów na wartości stężeń zanieczyszczeń w pobliżu ciągów komunikacyjnych. Do modelowania emisji związków szkodliwych spalin przyjęto koncepcję źródła liniowego o natężeniu zależnym od średniej prędkości ruchu pojazdów. Analizowano emisję i rozprzestrzenianie się tlenku węgla, rozważając przy tym cztery różne układy komunikacyjne, w tym jeden w obszarze niezabudowanym. Do analizy wpływu turbulencji generowanej przez pojazdy na warunki początkowe rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pochodzenia samochodowego wykorzystano numeryczny model pola prędkości powietrza i dyspersji zanieczyszczeń. Natężenie emisji dla źródła liniowego obliczono przy wykorzystaniu danych z modelu INFRAS. Uzyskane w pracy wyniki wskazują, że pominięcie dodatkowego źródła energii kinetycznej turbulencji jakie stanowią pojazdy w ruchu, prowadzi do zawyżania obliczanych stężeń zanieczyszczeń. Świadczy to o konieczności uwzględniania turbulencji generowanej ruchem pojazdów w badaniach oceny jakości powietrza, zwłaszcza wokół ciągów komunikacyjnych.

Zależność średniej prędkości ruchu pojazdów od natężenia ruchu, obszar dyskretyzacji i rozważane warianty obliczeniowe oraz obliczone rozkłady stężenia tlenku węgla dla różnych wariantów są przedstawione w artykule.

Słowa kluczowe: modelowanie, jakość powietrza, ruch pojazdów, emisja, dyspersja

1. Wstęp

Jednym z istotnych czynników wpływających na warunki początkowe rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w obszarze ciągów komunikacyjnych jest dodatkowa energia kinetyczna

turbulencji generowana ruchem pojazdów. Intensyfikuje ona proces rozprzestrzeniania się (dyspersji) zanieczyszczeń, wpływając na stężenia zanieczyszczeń w sąsiedztwie drogi. Zagadnienia te są przedmiotem badań eksperymentalnych prowadzonych w tunelach aerodynamicznych i badań polowych [5, 8]. W ich wyniku powstają modele parametryzacji tego zjawiska, które wykorzystuje się zarówno w analitycznych, empiryczno-analitycznych jak i numerycznych modelach dyspersji zanieczyszczeń. W przypadku dwóch pierwszych grup modeli, wprowadza się dodatkowy człon w równaniu dla pionowego współczynnika dyspersji [9]. Z kolei w modelach numerycznych, sposób parametryzacji zależy od struktury modelu. W modelach opartych o teorię K (modelach z domknięciem I rzędu), w których nie rozwiązuje się równań opisujących ruch powietrza, modyfikowany jest bezpośrednio tensor dyfuzji turbulentnej [3]. Natomiast w numerycznych modelach klasy CFD (Computational Fluid Dynamic) możliwy jest opis tego zjawiska poprzez wprowadzenie dodatkowego członu źródłowego do równania na energię kinetyczną turbulencji [7].

W niniejszej pracy wykorzystywany jest model numeryczny, w którym wprowadzono wspomniany powyżej dodatkowy człon źródłowy. Przeprowadzono symulacje numeryczne w przypadku ciągu komunikacyjnego w terenie niezabudowanym i zabudowanym (trzy różne warianty). W każdym z analizowanych przypadków wykonano obliczenia oraz porównano z wynikami obliczeń, gdy człon źródłowy energii kinetycznej turbulencji generowany ruchem pojazdów nie jest uwzględniany.

2. Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

Rozkład stężeń zanieczyszczeń dla substancji pasywnej, nie podlegającej przemianom chemicznym uzyskuje się po rozwiązaniu równania adwekcji-dyfuzji w postaci [1, 2]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + I, \quad (1)$$

gdzie:

ϕ - stężenie zanieczyszczenia,

t - czas,

U_j - składowe wektora prędkości powietrza,

x_j - współrzędne w układzie kartezjańskim,

I - człon źródłowy opisujący natężenie źródeł masy w jednostce objętości,

λ - współczynnik dyfuzji turbulentnej.

Podstawowym problemem przy rozwiązywaniu równania adwekcji jest wyznaczenie pola prędkości powietrza, a więc obliczenie składowych wektora prędkości \mathbf{U} oraz współczynnika dyfuzji turbulentnej λ .

W mikroskali przestrzennej rozważanej w pracy zastosowano model klasy CFD, co oznacza, że pole prędkości powietrza obliczono przy założeniu nieściśliwości i lepkości powietrza z domknięciem turbulentnych strumieni pędu i masy przy wykorzystaniu modelu turbulencji $k - \varepsilon$. Rozwiązywany zatem jest układ równań w postaci [1, 2]:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right], \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S - \rho \varepsilon + S_k, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} S - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

$$S = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\varepsilon}, \quad (7)$$

gdzie:

ρ - gęstość powietrza,

p - ciśnienie,

μ - dynamiczny współczynnik lepkości,

μ_t - współczynnik lepkości turbulentnej,

δ_{ij} - delta Kroneckera,

k - energia kinetyczna ruchu turbulentnego,

ε - dyssypacja energii kinetycznej,

S_k - człon źródłowy związany z energia kinetyczną generowana ruchem pojazdów,

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2, C_\mu$ - stałe empiryczne.

Wówczas współczynnik dyfuzji turbulentnej oblicza się jako:

$$\lambda = \frac{1}{\rho} \frac{\mu_t}{Sc_t}, \quad (8)$$

gdzie: Sc_t jest turbulentną liczbą Schmidta.

Przedstawione równania są rozwiązywane z wykorzystaniem metody objętości skończonych. Rozwiązanie uzyskuje się dla warunków ustalonych poprzez rozwiązanie ciągu zagadnień niestacjonarnych. Szczegółowy opis postępowania zamieszczono w [2].

3. Modelowanie emisji związków szkodliwych spalin

W pracy rozpatrywany jest ruch pojazdów poza obszarem skrzyżowań. W takim przypadku można przyjąć źródło liniowe do opisu natężenia emisji związków szkodliwych spalin emitowanych przez silniki pojazdów. Natężenie emisji odniesione do jednostki długości będzie zatem stałe na całej długości rozpatrywanego ciągu komunikacyjnego i może być wyznaczone ze wzoru [2]:

$$e_t = \sum_{i=1}^n N \gamma_i b_i(v_s), \quad (9)$$

gdzie:

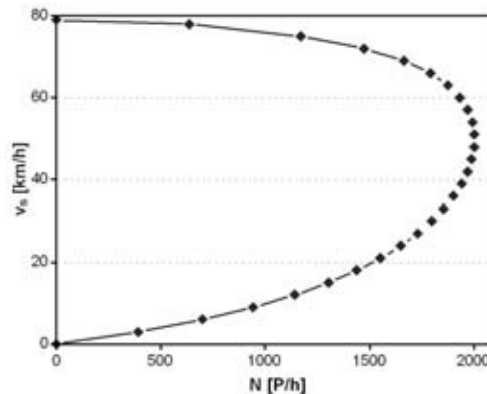
N - natężenie ruchu,

γ_i - udział i -tej kategorii pojazdów,

$b_i(v_s)$ - emisja drogowa zanieczyszczenia dla pojazdów kategorii i podczas ruchu ze średnią prędkością v_s ,

n - liczba kategorii pojazdów uczestniczących w ruchu.

Jak można zauważyć, wymagana jest znajomość średniej prędkości ruchu pojazdów, średniej emisji drogowej, natężenia ruchu oraz struktury rodzajowej pojazdów. Wśród wymienionych wielkości wzajemnie powiązane ze sobą są natężenie ruchu oraz średnia prędkość pojazdów [4]. Wykres tej zależności przy założeniu swobodnego ruchu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zależność średniej prędkości ruchu pojazdów od natężenia ruchu
Fig. 1. Relation between average traffic speed and traffic intensity

W pracy modelowany jest ruch pojazdów poruszających się ze średnią prędkością 55 km/h przy natężeniu ruchu pojazdów równym 2000 pojazdów na godzinę. Ponadto przyjęto, że 70% ogółu pojazdów to pojazdy osobowe (PC), 20% to lekkie pojazdy dostawcze (LDV) a pozostałe należą do kategorii ciężkich pojazdów dostawczych (HDV) oraz, że struktura pojazdów odpowiada strukturze charakterystycznej dla Niemiec w roku 2000. Średnie emisje drogowe z pojazdów poszczególnych kategorii wyznaczono według modelu INFRAS [6] dla trzech skumulowanych kategorii pojazdów: PC, LDV oraz HDV.

4. Modelowanie turbulencji generowanej przez pojazdy

Punktem wyjścia w parametryzacji członu źródłowego S_k z równania (4) jest zależność opisująca siłę oporu ruchu pojazdu. Siłę tę można obliczyć ze wzoru [3, 9]:

$$F = \frac{1}{2} c_x A \rho V_r^2, \quad (10)$$

gdzie:

- c_x - współczynnik oporu powietrza,
- A - powierzchnia czołowa pojazdu,
- V_r - względna prędkość pojazdu wyrażona jako:

$$V_r = \frac{(V_1 - U_1)V_1 + (V_2 - U_2)V_2}{\sqrt{(V_1^2 + V_2^2)^2}},$$

V i V_2 - składowe prędkości ruchu pojazdu.

Ponieważ rozpatrywany jest stan ustalony ruchu, w którym uczestniczą pojazdy różnych kategorii, a sam ruch pojazdów jest traktowany jako ciągły strumień, obliczyć można średnią wywieraną siłę oporu powietrza w postaci:

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^3 \gamma_i c_{x,i} A_i \right) \rho V_r^2, \quad (11)$$

gdzie: $i = 1, 2, 3$ oznacza odpowiednio kategorię pojazdów PC, LDV i HD.

Średnie wartości współczynnika oporu powietrza oraz powierzchni czołowej dla poszczególnych kategorii przyjęto za pracę [3] jak w tabeli 1.

Tab. 1. Średnie wartości współczynników we wzorze (11)
 Tab. 1. Average values of coefficients in equation (11)

kategoria	$c_{x,i}$	$A_i = w_i h_i$
PC oraz LDV	0,3	2,52
HDV	0,9	8,4

Przyjmując, że rozważany jest ustalony ruch strumienia pojazdów o natężeniu N i stosując model numeryczny przedstawiony w rozdziale 2, człon źródłowy opisujący produkcję energii kinetycznej na jednostkę objętości w wyniku ruchu pojazdów można zapisać w postaci [9]:

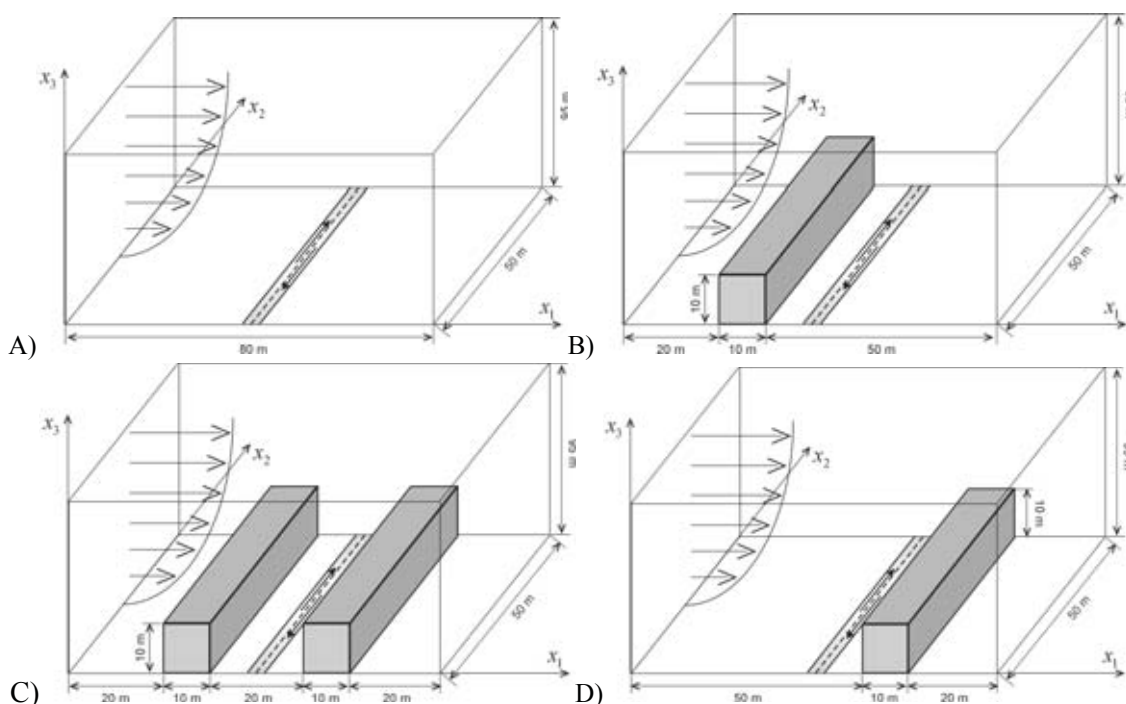
$$S_k = \bar{F} N \frac{d}{V_{i,j,k}}, \quad (12)$$

gdzie d jest długością jezdni w objętości kontrolnej $V_{i,j,k}$.

Człon źródłowy określający energię kinetyczną generowaną w wyniku ruchu pojazdów jest zatem proporcjonalny do natężenia ruchu i kwadratu względnej prędkości pojazdu. W modelu numerycznym człon źródłowy S_k ma wartość niezerową według (12) wyłącznie w tych komórkach siatki dyskretyzacyjnej, które pokrywają obszar ciągu komunikacyjnego [7].

5. Analiza numeryczna

Przedstawione w poprzednich rozdziałach modele wykorzystano do analizy numerycznej intensywności rozprzestrzeniania się tlenku węgla emitowanego przez silniki pojazdów w czasie eksploatacji trakcyjnej. Rozważano ruch pojazdów na drodze dwukierunkowej o jednakowym natężeniu dla każdego z kierunków ruchu. Przyjęto ponadto prostopadły do drogi kierunek przepływu powietrza (wiatru) rozpatrując proces dyspersji zanieczyszczeń dla obszaru niezabudowanego (jeden przypadek) i w obszarze zabudowanym (trzy przypadki) jak na rys. 2.



Rys. 2. Obszar dyskretyzacji i rozważane warianty obliczeniowe: A,B,C,D
 Fig. 2. Domain area and cases considered: A,B,C,D

W obliczeniach, w obszarze niezaburzonego przepływu (warunek typu *Inlet*, $x_1 = 0$) przyjęto prędkość powietrza, energię kinetyczną turbulencji i jej dyssypację w zależności od wysokości x_3 nad podłożem według następujących zależności [2]:

$$U_1(x_3) = U_\tau \kappa^{-1} \ln(x_3 h_0^{-1}), \quad (13)$$

$$k(x_3) = \sqrt{C_\mu}^{-1} U_\tau^2, \quad (14)$$

$$\varepsilon(x_3) = C_\mu^{0,75} k(x_3)^{1,5} (\kappa x_3)^{-1}, \quad (15)$$

$$\phi(x_3) = 0, \quad (16)$$

gdzie:

U_τ - prędkość dynamiczna, przyjęto $U_\tau = 0,15$ m/s,

h_0 - szorstkość aerodynamiczna podłoża, przyjęto $h_0 = 0,05$ m,

κ - stała Karmana.

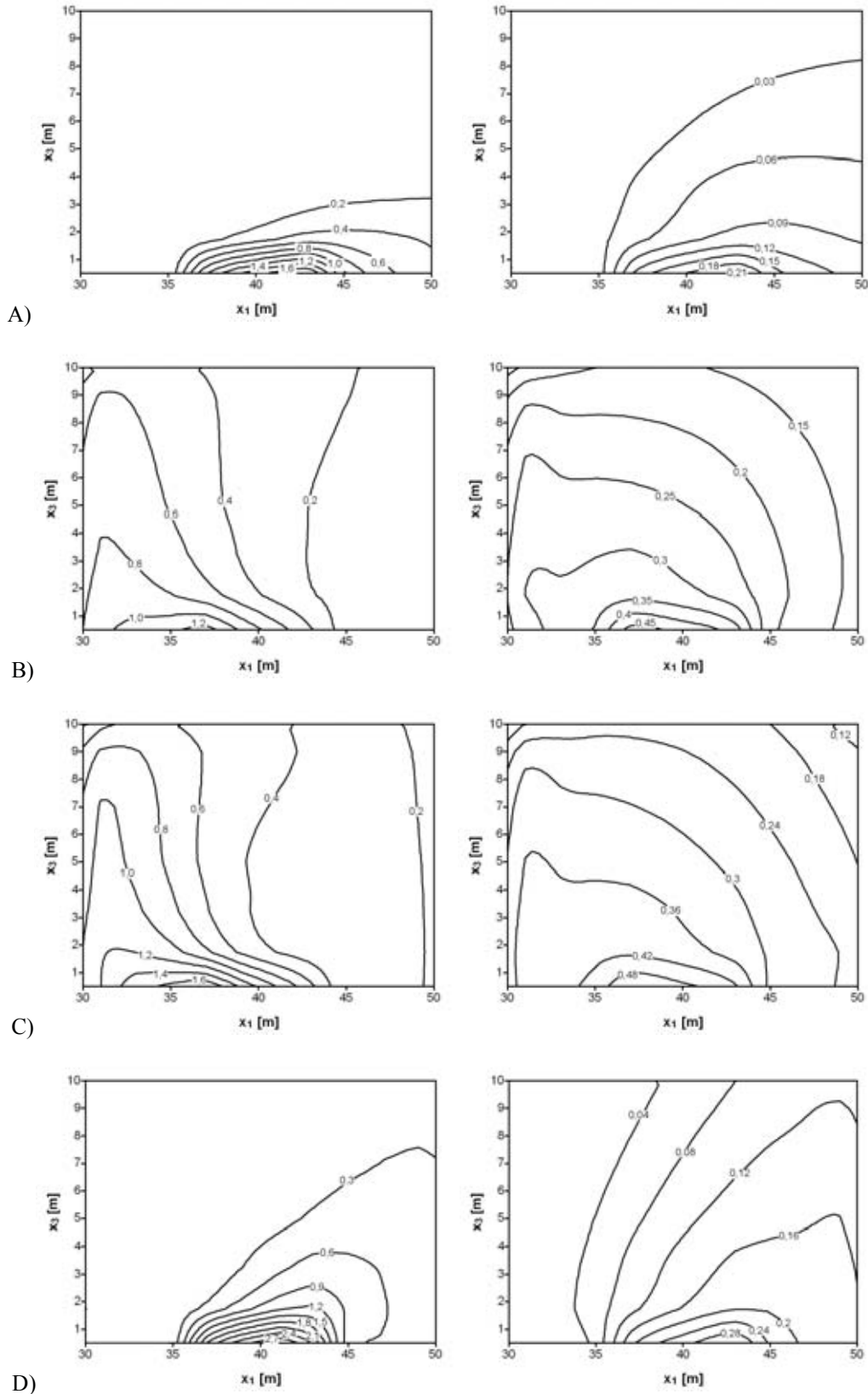
Również pozostałe warunki brzegowe w każdym z przypadków przyjęto identyczne tj. dla $x_1 = 80$ oraz $x_3 = 95$ przyjmowano warunek typu *Free*, a dla $x_2 = 0$ oraz $x_2 = 50$ warunek typu *Symmetry*. Na ścianach budynków oraz na podłożu ($x_3 = 0$) przyjęto warunek typu *Wall*. Warunek typu *Inlet* oznacza, że znane są wartości poszukiwanych wielkości, które mogą być stałe (niezmienne w czasie symulacji) lub określone jako odpowiednia funkcja czasu. Z kolei warunek typu *Free* oznacza, że znana jest wartość pochodnej w kierunku normalnym do brzegu, przyjmowana jako równa zero. Warunek typu *Wall*, stosowany w przypadku kontaktu obszaru z ciałem stałym, w zależności od rozpatrywanej wielkości określony jest warunkiem Dirichleta (np. zerowa prędkość ruchu) lub Neumanna (np. odbicie zanieczyszczenia od przeszkody) [2].

Porównanie stężeń tlenu węgla obliczonych dla każdego z rozpatrywanych wariantów przedstawiono na rys. 3. Uzyskane wyniki wskazują, że w rozpatrywanych przypadkach uwzględnienie dodatkowej energii kinetycznej turbulencji generowanej w wyniku ruchu pojazdów istotnie wpływa na obliczone pola stężenia tlenu węgla. Oczywiście, w przypadku mniejszej prędkości ruchu i natężenia ruchu pojazdów należy się spodziewać, że wpływ ten będzie także mniejszy. Dodatkowe źródło energii kinetycznej jakim jest turbulencja spowodowana ruchem pojazdów powoduje szybsze rozprzestrzenianie się zanieczyszczenia i w ten sposób prowadzi do obniżenia maksymalnego stężenia. Wartości liczbowe maksymalnego stężenia otrzymane zarówno w przypadku uwzględnienia i nieuwzględnienia dodatkowego źródła energii kinetycznej turbulencji dla poszczególnych konfiguracji obszaru zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Maksymalne stężenie tlenu węgla
Tab. 2. Maximal concentration of carbon monoxide

Konfiguracja	CO [mg/m ³] dla $S_k = 0$	CO [mg/m ³] dla $S_k \neq 0$
A	1,98	0,22
B	1,34	0,51
C	1,79	0,55
D	3,02	0,32

Analiza wartości stężenia maksymalnego przedstawionych w tabeli 2 potwierdza wcześniejszy wniosek, że w tych samych warunkach ruchu pojazdów (ta sama emisja) oraz meteorologicznych, w zależności od ukształtowania obszaru maksymalne stężenia emitowanych przez silnik pojazdów zanieczyszczeń znacznie się różnią. Potwierdza to potrzebę stosowania zaawansowanych modeli numerycznych w ocenie stopnia oddziaływania motoryzacji na lokalne środowisko.



Rys. 3. Obliczone rozkłady stężenia tlenku węgla dla wariantów: A, B, C, D
(po lewej dla $S_k = 0$, po prawej dla $S_k \neq 0$)

Fig. 3. Carbon monoxide concentration calculated for cases: A, B, C, D
(on left for $S_k = 0$, on right for $S_k \neq 0$)

6. Podsumowanie

W pracy wykorzystano mikroskalowy model klasy CFD do oceny wpływu turbulencji generowanej ruchem pojazdów na wartości stężeń zanieczyszczeń w otoczeniu ciągów komunikacyjnych. Modele tej klasy umożliwiają prognozowanie stężeń zanieczyszczeń w obszarach o złożonej geometrii, nadają się więc do analizy stężeń zanieczyszczeń w obszarach miejskich. Ograniczeniem ich użyteczności jest jednak skala przestrzenna obszarów, dla których obliczenia są możliwe do zrealizowania. W przeciwieństwie do modeli analitycznych i analityczno-empirycznych modele tego typu umożliwiają nie tylko analizę stężeń maksymalnych ale również analizę rozkładu przestrzennego stężeń z uwzględnieniem istniejącej zabudowy. Modele te mogą przy tym być modelami zintegrowanymi czyli modelami, w których połączono modele emisji z modelem dyspersji zanieczyszczeń [2].

Jak wskazują przedstawione w pracy wyniki, modele te można również zastosować do analizy wpływu poszczególnych zjawisk na procesy transportu zanieczyszczeń. Jednym z tych istotnych zjawisk, które powinny być uwzględniane przy ocenie wpływu motoryzacji na jakość powietrza atmosferycznego w zakresie emisji związków szkodliwych spalin, jest dodatkowa energia kinetyczna turbulencji powstająca w wyniku ruchu pojazdów. W przypadku gdy występuje ruch strumienia pojazdów powstająca energia ma znaczny wpływ na początkowe warunki rozprzestrzeniania się związków szkodliwych spalin i w konsekwencji, na poziom stężeń zanieczyszczeń. Sprzyja ona intensyfikacji procesów dyfuzyjnego wyrównywania stężeń, co prowadzi do obniżenia stężeń emitowanych zanieczyszczeń w obszarze ciągów komunikacyjnych.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu badawczego nr 4T1200830, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Brzozowska, L., Brzozowski, K., *Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*, WN Śląsk, Katowice-Warszawa 2003.
- [2] Brzozowski, K., *Mikroskalowe modele emisji i dyspersji zanieczyszczeń samochodowych*, Rozprawy Naukowe, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, nr 18, Bielsko-Biała 2006.
- [3] Bäumer, D., Vogel, B., Fiedler, F., *A new parameterisation of motorway-induced turbulence and its application in a numerical model*, Atmospheric Environment 39, pp. 5750-5759, 2005.
- [4] Datka, S., Suchorzewski, W., Tracz, M., *Inżynieria ruchu*, WKŁ, Warszawa 1997.
- [5] Di Sabatino, S., Kastner-Klein, P., Berkowicz, R., Britter, R.E., Fedorovich, E., *The modeling of turbulence from traffic in urban dispersion models – part I: Theoretical considerations*, Environmental Fluid Mechanics 3, pp. 129-143, 2003.
- [6] HBEFA: *Handbook of emission factors for road traffic*, Version 2.1, Infras AG, Bern 2004.
- [7] Katolický, J., Jicha, M., *Eulerian-Lagrangian model for traffic dynamics and its impact on operational ventilation of road tunnels*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93, pp. 61-77, 2005.
- [8] Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., Ketznel, M., Berkowicz, R., Britter, R., *The modeling of turbulence from traffic in urban dispersion models – part II: Evaluation against laboratory and full-scale concentration measurements in street canyons*, Environmental Fluid Mechanics 3, pp. 145-172, 2003.
- [9] Stern, R., Yamartino, R. J., *Development and first evaluation of micro-calgrid: a 3-D, urban-canopy-scale photochemical model*, Atmospheric Environment 35, Supplement No. 1, pp. S149-S165, 2001.