

MODELOWANIE EMISJI W UKŁADACH KOMUNIKACYJNYCH W OPARCIU O DANE Z MIKROSKOPOWEGO MODELU RUCHU POTOKU POJAZDÓW

W artykule przedstawiono postępowanie umożliwiające obliczenie emisji wzdłuż układu komunikacyjnego. Parametry wejściowe do modelu emisji otrzymano z mikroskopowego modelu ruchu potoku pojazdów. Symulacje ruchu pojazdów wykonano w pakiecie Vissim. Bilansowanie emisji w układzie przeprowadzono dyskretyzując odcinki drogowe na segmenty o stałej długości. Zamieszczono przykładowe wyniki modelowania obejmujące analizę zmiany emisji wzdłuż poszczególnych pasów ruchu na wlotach skrzyżowania, na którym przepływ potoku pojazdów jest sterowany przez sygnalizację świetlną.

WSTĘP

Jednym z negatywnych skutków dynamicznego rozwoju transportu drogowego jest występowanie podwyższonego poziomu stężenia zanieczyszczenia powietrza w pobliżu układów komunikacyjnych. Na jego rozkład wzdłuż dróg ma wpływ szereg czynników, takich jak: natężenie ruchu drogowego, struktura rodzajowa potoku pojazdów, geometria i rodzaj infrastruktury drogowej oraz sposób sterowania ruchem.

Eksploatacja trakcyjna pojazdów w warunkach ruchu miejskiego, charakteryzującego się częstymi zmianami dynamiki ruchu pojazdów, stwarza warunki do zwiększenia emisji i kumulacji zanieczyszczeń w bezpośrednim sąsiedztwie węzłów drogowych. Podwyższone poziomy stężenia zanieczyszczeń rejestrowane w pobliżu dróg mają negatywny wpływ na ludzi i zwierzęta, oraz są przyczyną powstawania chorób nowotworowych [1,7]. Dlatego, z punktu ochrony organizmów żywych przed ponadnormatywnym poziomem zanieczyszczenia powietrza ważne jest monitorowanie zanieczyszczeń na najbardziej zatłoczonych arteriach miast, gdzie w godzinach porannego i popołudniowego szczytu komunikacyjnego rejestrowane są wysokie natężenia ruchu pojazdów.

Inną metodą określenia wpływu motoryzacyjnego na środowisko jest modelowanie emisji i dyspersji zanieczyszczeń. Prowadzenie badań z użyciem komputerów pozwala na zrozumienie funkcjonowania systemu, identyfikację jego podstawowych charakterystyk oraz umożliwia optymalizację jego elementów składowych. Do najważniejszych zalet badań symulacyjnych można zaliczyć: możliwość symulacji systemu dla dowolnych warunków, powtarzalność warunków wejściowych, możliwość jednoczesnego badania wielu wariantów, niski koszt, w porównaniu do badań prowadzonych na rzeczywistych obiektach. Wady, dotyczą: konieczności wprowadzania uproszczeń, co może wiązać się z możliwością przyjęcia błędnych założeń, oraz definiowania warunków brzegowych, które mogą być trudne w opisie.

Szczegółowe informacje na temat sposobów modelowania emisji i dyspersji zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego z zastosowaniem technik komputerowych można znaleźć między innymi w pracach [2,5,6].

Przeprowadzenie szczegółowej oceny wpływu pojazdów samochodowych na środowisko wymaga wykonania obliczeń i bilansowania emisji na podstawie parametrów obrazujących rzeczywiste warunki eksploatacji. W pracy dane wejściowe do modelu emisji

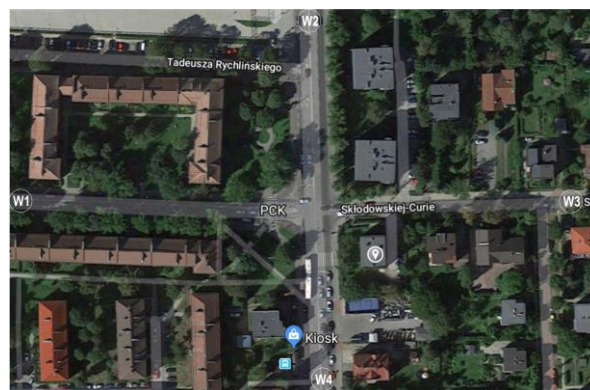
uzyskano z mikroskopowego modelu ruchu potoku pojazdów, w którym odwzorowano rzeczywisty ruch pojazdów na skrzyżowaniu. Symulacje ruchu drogowego wykonano dla największego obciążenia układu komunikacyjnego ruchem drogowym. Strukturę rodzajową i kierunkową potoku pojazdów oraz natężenie ruchu na wlotach do układu ustalono wykonując pomiary ruchu drogowego.

1. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW DYNAMIKI RUCHU POJAZDÓW

1.1. Badania drogowe

W celu poprawnego odzwierciedlenia dynamiki samochodów w ruchu drogowym w programach komputerowych do symulacji ruchu potoku pojazdów wykonuje się szczegółowe badania drogowe. Rejestrowane są: natężenie ruchu pojazdów na każdym wlocie do układu, struktura rodzajowa i kierunkowa pojazdów oraz sposób organizacji ruchu (identyfikowane są grupy sygnalizacyjne, czasy trwania poszczególnych faz sygnalizacji świetlnej, ograniczenia prędkości ruchu).

Dane wejściowe do modelu symulacyjnego uzyskano przeprowadzając kompleksowe badania pomiarowe w węźle drogowym zlokalizowanym w Bielsku-Białej, w miejscu przecięcia ulicy Żywieckiej z ulicami PCK i Marii Skłodowskiej-Curie (rys.1). Ulica Żywiecka stanowi ważną arterie miasta. Zapewnia dogodne połączenie komunikacyjne pomiędzy wschodnimi dzielnicami i centrum miasta. Ulica PCK łączy centrum miasta z ulicą Żywiecką, a ulica Marii Skłodowskiej-Curie umożliwia dojazd do posesji mieszkalnych i szkoły.



Rys. 1. Analizowany układ komunikacyjny (www.google.pl/maps)

Na podstawie przeprowadzonych badań pilotażowych ustalono, że największe obciążenie układu komunikacyjnego ruchem drogowym występuje w godzinach porannego i popołudniowego szczytu komunikacyjnego (około godziny 7 i 15). Dlatego szczegółowe badania drogowe, umożliwiające identyfikację podstawowych parametrów ruchu potoków, prowadzono w godzinach od 7 do 9 i od 14 do 17. Badania wykonano metodą rejestracji. Parametrów potoku pojazdów na poszczególnych wlotach na skrzyżowaniu wyznaczono po dokładnym przeanalizowaniu zarejestrowanego materiału wideo. W analizowanym układzie drogowym największe obciążenie układu wynoszące 3079 poj./h zarejestrowano między godziną 7 i 8 (poranny szczyt komunikacyjny). Natężenie ruchu pojazdów na poszczególnych wlotach do układu przedstawiono w tab. 1. Największe natężenie ruch pojazdów $Q=1503$ poj./h odnotowano na ulicy Żywieckiej w kierunku do miasta. Znacznie mniejsze natężenia ruchu, na poziomie około $Q=320$ poj./h, zarejestrowano na ulicach PCK i Marii Skłodowskiej-Curie.

Tab.1. Natężenie ruchu pojazdów w analizowanym węźle komunikacyjnym zarejestrowane w porannym szczyt komunikacyjnym

Wlot	Natężenie ruchu pojazdów Q [poj./h]
W1 - ul. PCK	317
W2 - ul. Żywiecka, w kierunku od centrum	941
W3 - ul. Marii Skłodowskiej-Curie	318
W4 ul. Żywiecka, w kierunku do centrum	1503
Suma	3079

Strukturę rodzajową i kierunkową pojazdów przedstawiono w tab. 2 i 3. Najliczniejszą grupę pojazdów stanowią samochody osobowe (ponad 96 % całkowitej liczby zarejestrowanych pojazdów). Kolejnymi grupami pod względem liczebności są samochody dostawcze i ciężarowe oraz autobusy (odpowiednio 2,57 % i 1,33 %).

Tab.2. Struktura rodzajowa pojazdów

Wlot	Kategoria pojazdów		
	samochody osobowe [%]	samochody dostawcze i ciężarowe [%]	autobusy [%]
W1	97,16	0,63	2,21
W2	94,69	4,14	1,17
W3	99,37	0,63	0,00
W4	96,07	2,40	1,53

Tab.3 Kierunkowy rozkład ruchu pojazdów

Wlot	Kierunek ruchu		
	w lewo [%]	na wprost [%]	w prawo [%]
W1	60,88	19,87	19,25
W2	1,06	63,55	35,39
W3	15,72	74,84	9,44
W4	25,75	73,65	0,60

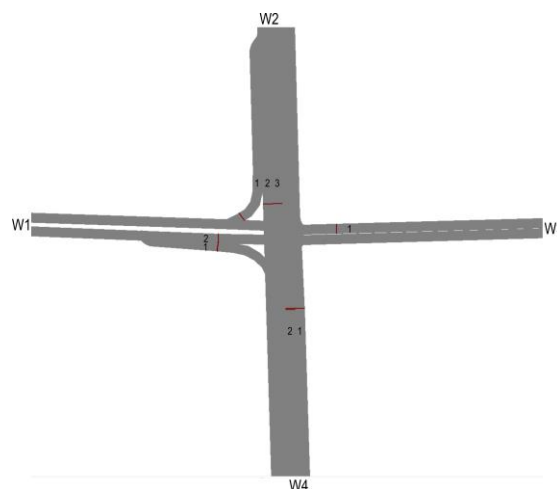
W trakcie przeprowadzania pomiarów drogowych zidentyfikowano również czasy trwania poszczególnych faz sygnalizacji świetlnej dla wszystkich grup sygnalizacyjnych.

1.2. Modelowanie ruchu potoku pojazdów

Na podstawie danych zarejestrowanych w pomiarach drogowych utworzono model symulacyjny ruchu potoków pojazdów. Model ruchu na skrzyżowaniu został opracowany w pakiecie Vissim. Budowa modelu symulacyjnego wiązała się z wykonaniem następujących czynności:

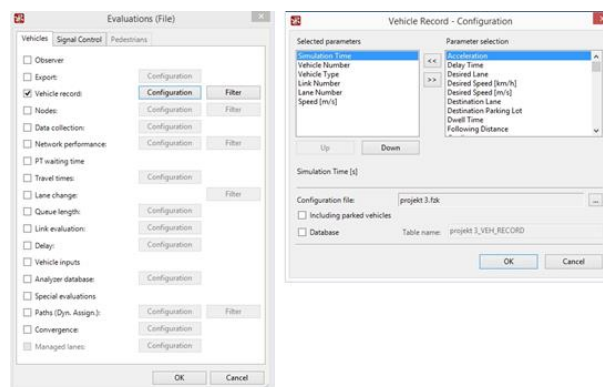
- wczytaniem podkładu graficznego przedstawiającego analizowany układ komunikacyjny,
- dobraniem odpowiedniej skali odwzorowania układu,
- odwzorowaniem geometrii infrastruktury drogowej (utworzenie odcinków i łączników),
- zdefiniowaniem struktury rodzajowej pojazdów na każdym wlocie do układu,
- wprowadzeniem informacji o trasach przejazdu wraz z określeniem struktury kierunkowej,
- ustawieniem generatora pojazdów na wszystkich wlotach do układu komunikacyjnego,
- definiowaniem pól kolizji i określeniem pierwszeństwa przejazdu na skrzyżowaniu,
- budową modelu sygnalizacji świetlnej.

Na rys. 2 przedstawiono analizowany układ komunikacyjny wraz informacją o numerach odcinków i łączników.



Rys. 2. Analizowany układ komunikacyjny odwzorowany w środowisku symulacyjnym Vissim

Modelowanie ruchu pojazdów z użyciem pakietów komputerowych bazujących na modelach mikroskalowych ruchu potoków pojazdów pozwala na określenie parametrów dynamiki ruchu, wszystkich uczestników ruchu w każdym kroku symulacji. Dane te w programie Vissim można zapisać do pliku tekstowego. Sposób konfigurowania formatu pliku wyjściowego zawierającego niezbędne dane do obliczenia emisji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Okna konfiguracyjne pliku wyjściowego

Na potrzeby modelowania emisji, w każdym kroku symulacji, muszą zostać zapisane następujące dane:

- aktualny czas symulacji,
- numer i typy pojazdu,

- numer odcinka lub łącznika, po którym w danej chwili czasu porusza się pojazd,
- numer zajmowanego pasa ruchu przez pojazd,
- aktualna prędkości pojazdu.

Strukturę pliku zawierającego przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4. Ze względu na to, że parametry ruchu pojazdów rejestrowane są z krokiem 0,1 s (najmniejszy, możliwy do ustawienia krok rejestracji wyników symulacji), rozmiar zbioru danych może zawierać do kilku milionów wierszy.

```

2 Rejestr pojazdu
3
4 Plik:      d:\Symulacje\Model.inp
5 Komentarz:
6 Data:      26 marca 2018 14:06:48
7 VISSIM:    5.40-08 [38878]
8
9 t:         Czas symulacji [s]
10 NrPoj:    Numer pojazdu
11 Typ:      Numer typu pojazdu
12 Odc:      Numer aktualnego odcinka
13 Pas:      Numer aktualnego pasa
14 vMS:      Prędkość [m/s] na końcu tego kroku symulacji
15
16 t:         NrPoj: Typ:      Odc: Pas:      vMS:
17 0.1:       1: 100:      9:  1: 14.77:
18 0.2:       1: 100:      9:  1: 14.80:
19 0.3:       1: 100:      9:  1: 14.83:
20 0.4:       1: 100:      9:  1: 14.85:
21 0.5:       1: 100:      9:  1: 14.88:
22 0.6:       1: 100:      9:  1: 14.90:
    
```

Rys. 4. Struktura pliku wyjściowego

Dane uzyskane w modelu ruchu drogowego mogą być następnie użyte do modelowania i bilansowania emisji. Wymaga to opracowania i zastosowania odpowiedniego algorytmu podziału układu komunikacyjnego na segmenty, na których obliczana jest średnia prędkość ruchu pojazdów.

Bilansowanie emisji może być wykonane na poszczególnych segmentach, wybranych pasach ruchu dróg wlotowych i wylotowych do/ze skrzyżowania, oraz dla całego skrzyżowania. Analizowana może być zarówno zmienność przestrzenna, jak i czasowa emisji.

2. MODELOWANIE EMISJI W UKŁADACH KOMUNIKACYJNYCH

Modelowanie emisji związków szkodliwych spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej zazwyczaj odbywa się z wykorzystaniem jednej z dwóch podstawowych metod: średniej emisji drogowej i natężenia emisji [3,4]. Zamieszczona w publikacji [2] analiza porównawcza wyników modelowania natężenia emisji odniesionego do jednostki długości wzdłuż układu komunikacyjnego uzyskanego według obu sposobów modelowania wskazuje, że obie metody modelowania dają zbliżone wyniki.

Ze względu na ograniczoną dostępność danych w modelach bazujących na metodzie natężenia emisji, bilansowanie emisji w większości przypadków odbywa się według metody średniej emisji drogowej.

Uwzględnienie wpływu sygnalizacji świetlnej na przepływ potoku pojazdów ma zasadnicze znaczenie podczas bilansowania emisji. W trakcie formowania się kolejki pojazdów przed skrzyżowaniem następuje zaburzenie prędkości ruchu potoku pojazdów. Kierowcy dostosowują prędkość jazdy do prędkości pojazdu poprzedzającego. Zmniejszenie prędkości ruchu pojazdów w pobliżu skrzyżowania wywołuje kongestie, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie emisji. Zjawisko to można zaobserwować analizując wykresy przedstawiające przestrzenną zmienność emisji wzdłuż drogi.

Analiza emisji wzdłuż poszczególnych elementów układu komunikacyjnego umożliwia również na wskazanie fazy swobodnego ruchu pojazdów pomiędzy poszczególnymi węzłami oraz miejsc zakończenia kolejek pojazdów oczekujących na przejazd przez skrzyżowanie.

Aby wykonać przestrzenną analizę emisji w pierwszej kolejności należy dokonać podziału układu drogowego na segmenty. Dłu-

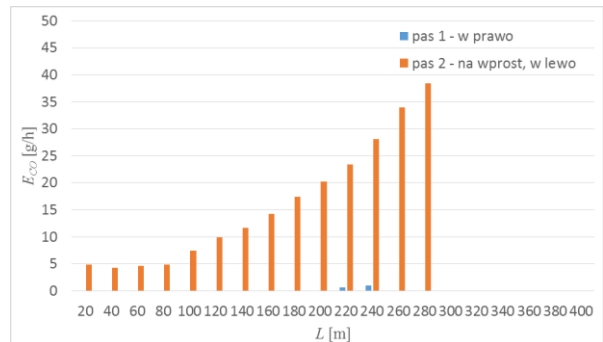
gość poszczególnych segmentów dobierana jest doświadczalnie. Pojedynczy segment musi zapewnić miejsce dla kilku pojazdów. Zazwyczaj, w obliczeniach przyjmuje się, że segmenty mają jednakową długość (np. 20 m). Po dyskretyzacji układu na segmenty, obliczana jest na nich średnia prędkość ruchu pojazdów. Następnie z wykorzystaniem metody średnich emisji drogowych wykonuje się sumowanie emisji we wszystkich segmentach.

Należy pamiętać, że w metodzie podziału na segmenty musi zostać zachowany bilans pojazdów uczestniczących w ruchu, i czas bilansowania emisji nie powinien być mniejszy niż 900 s.

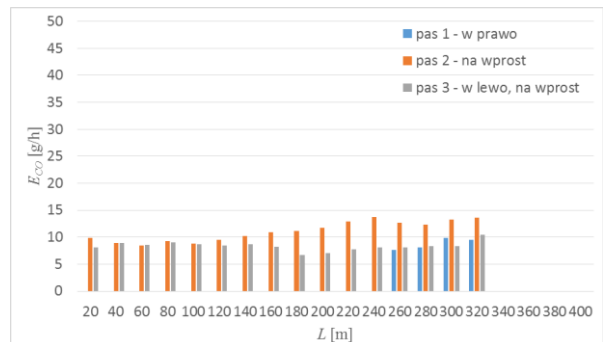
3. WYNIKI MODELOWANIA EMISJI

Przedstawione wcześniej postępowanie umożliwia obliczenie średniej prędkości pojazdów na poszczególnych segmentach. Na jej podstawie obliczana jest emisja drogowa oraz analizowane są zmiany emisji wzdłuż wybranych dróg układu komunikacyjnego.

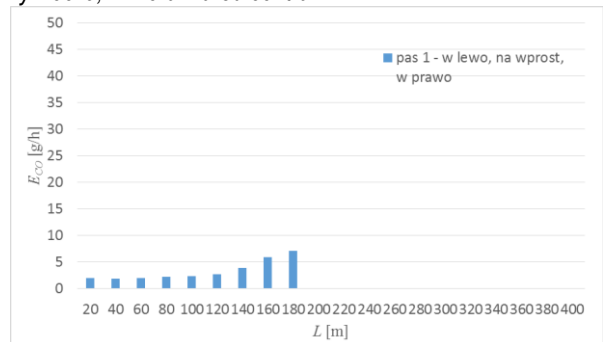
Na kolejnych rysunkach (rys.5-8) przedstawiono wyniki modelowania emisji tlenku węgla w oparciu o dane uzyskane z modelu symulacyjnego ruchu pojazdów dla wszystkich dróg wlotowych analizowanego skrzyżowania.



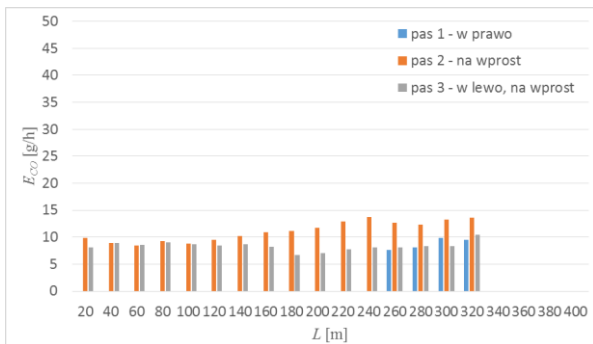
Rys. 5. Sumaryczna emisja tlenku węgla wzdłuż drogi - wlot 1, ul. PKC



Rys. 6. Sumaryczna emisja tlenku węgla wzdłuż drogi - wlot 2, ul. Żywiecka, w kierunku od centrum



Rys. 7. Sumaryczna emisja tlenku węgla wzdłuż drogi - wlot 3, ul. Marii Skłodowskiej-Curie



Rys. 8. Sumaryczna emisja tlenu węgla wzdłuż drogi - wlot 4, ul. Żywiecka, w kierunku do centrum

Analiza wykresów emisji tlenu węgla wzdłuż drogi dla poszczególnych wlotów na skrzyżowaniu pozwala wskazać segmenty, na których występuje kumulacja zanieczyszczeń. Segmenty te zlokalizowane są поблизу skrzyżowania, czyli w miejscu występowania największych zmian w dynamice ruchu pojazdów. W tab. 4 zamieszczono zestawienie maksymalnych emisji tlenu węgla dla wszystkich dróg wlotowych z rozgraniczeniem na pasy ruchu.

Tab. 4 Maksymalna sumaryczna emisja tlenu węgla na drogach wlotowych skrzyżowania

Wlot	E_{co} [g/h]		
	Pas ruchu		
	1	2	3
W1	38,45	0,96	-
W2	9,82	13,55	10,43
W3	7,09	-	-
W4	48,22	24,88	-

Największą sumaryczną emisję odnotowano na pasie 1 ulicy Żywieckiej w kierunku do centrum miasta. Podczas porannego szczytu komunikacyjnego w tym kierunku podróżuje ok. 30 % wszystkich pojazdów. Natężenie ruchu pojazdów na wlocie W1 i W2 jest zbliżone. Jednak, znacznie większa emisja występuje na segmentach drogi W1. Sytuacja ta jest spowodowana formowaniem się znacznie dłuższej kolejki pojazdów na wlocie W1, niż na wlocie W2. Prawie 61% pojazdów jadących ulicą PCK skręca w lewo, i jest zmuszona przepuścić pojazdy jadące na wprost ulicą Marii Skłodowskiej-Curie. Niewystarczający czas trwania fazy zielonego światła powoduje, że nie wszystkie pojazdy, oczekujące w kolejce, zdążą przejechać przez skrzyżowanie.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy postępowanie pozwala na obliczanie i bilansowanie emisji w układach komunikacyjnych. Zaproponowane podejście umożliwia prowadzenie badań symulacyjnych z wykorzystaniem technik komputerowych.

Uzyskane wyniki modelowania emisji potwierdzają słuszność podziału układu komunikacyjnego na segmenty w celu obrazowania przestrzennej zmienności emisji.

Kolejnym etapem prowadzonych prac będzie opracowanie metody optymalizacji dynamicznej zapewniającej odpowiedni dobór

czasów trwania poszczególnych faz sygnalizacji świetlnej tak, aby uzyskać jak najmniejszą sumaryczną emisję zanieczyszczeń w całym układzie komunikacyjnym.

BIBLIOGRAFIA

1. Badyta A., Kraszewski A.: Analiza zależności pomiędzy natężeniem ruchu a wynikami monitoringu zanieczyszczeń komunikacyjnych w przekroju automatycznej stacji pomiarowej państwowego monitoringu środowiska w Warszawie, Pojazd a środowisko, Pol. Rad. i Urząd Miejski Radom, 2005.
2. Brzozowska L., Brzozowski K., Drag Ł., *Transport drogowy a jakość powietrza atmosferycznego. Modelowanie komputerowe w mezoskali*, WKŁ, Warszawa, 2009.
3. Brzozowska L., Brzozowski K., *Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*, Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice-Warszawa, 2003.
4. Chłopek Z., *Pojazdy Samochodowe: Ochrona środowiska naturalnego*, WKiŁ, Warszawa, 2002.
5. Drag Ł. *Modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze środków transportu drogowego*, Archiwum Motoryzacji, 2007, nr 1.
6. Jaworski A., Lejda K., Mądziel M., *Metody modelowania emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych*, Eksploatacja i testy, 2017. nr 6.
7. Skrzypiński J.: Zintegrowane zarządzanie jakością w miastach. Problemy ochrony powietrza w aglomeracjach miejsko-przemysłowych, Praca zbiorowa pod redakcją Konieczki J., Zarzycki R., Zakład graficzny Politechniki Śląskiej, 2003.

Modelling of car exhaust emission on the basis of data obtained from microscopic traffic flow model

In the paper the procedure for car exhaust emission calculation along the road network has been presented. Input parameters for an emission model were obtained from the microscopic traffic flow model. Traffic simulations have been performed in Vissim software. To analyse emission in a road sections whole network has been discretized into fixed length segments. The examples of traffic flow emission modelling for selected lanes at intersection where the traffic flow is controlled by traffic lights are also presented.

Autorzy:

Mikołaj Wiewióra – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, student kierunku Transport
 dr hab. inż. **Łukasz Drag** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu

JEL: O18 DOI: 10.24136/atest.2018.175

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15