

Artur BADYDA¹, Grzegorz MAJEWSKI²

¹Instytut Systemów Inżynierii Środowiska PW
Institute of Environmental Engineering Systems, Warsaw University of Technology

²Zakład Meteorologii i Klimatologii SGGW
Division of Meteorology and Climatology WAU

Analiza zmienności stężenia zanieczyszczeń komunikacyjnych w aglomeracji miejskiej na tle natężenia ruchu pojazdów i warunków meteorologicznych
Analysis of the variations of the traffic related air pollutants concentrations in the urban agglomeration against a background of the traffic volume changes and meteorological conditions

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia komunikacyjne, natężenie ruchu, warunki meteorologiczne

Key words: traffic related air pollutants, traffic volume changes, meteorological conditions

Wprowadzenie

Struktura tras komunikacyjnych ma duży wpływ na stan jakości powietrza w aglomeracji miejskiej, brak bowiem obwodowych połączeń międzydzielnicowych powoduje nadmierną koncentrację ruchu i wywołuje negatywny wpływ na stan zdrowotny zarówno

mieszkańców, jak i przechodniów. Wyższe stężenie zanieczyszczeń powietrza występuje wzdłuż ulic śródmiejskich, gęsto zabudowanych wysokimi budynkami. Ciągi komunikacyjne o dużym natężeniu ruchu samochodowego są typowymi źródłami zanieczyszczeń zarówno gazowych, jak i pyłowych emitowanych przez silniki pojazdów samochodowych, których liczba wzrasta z roku na rok. Z końcem 2004 roku zarejestrowanych było w Polsce ogółem niemal 17 milionów pojazdów (Bank danych..., GUS). Transport drogowy na obszarach aglomeracji miejskich uważany jest za dominujące źródło emisji zanieczyszczeń atmosferycznych (Kop-ta 2000, Liping i Yaping 2005). Według danych WIOŚ, na obszarze Warszawy emisja ze źródeł liniowych stanowi

*Część pracy, dotycząca pomiarów ruchu i zanieczyszczeń powietrza, została sfinansowana w ramach projektu badawczego ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji.

w przypadku tlenków azotu 61% całkowitej emisji tego zanieczyszczenia, w przypadku tlenku węgla 71% oraz w przypadku benzenu 40% (Stan środowiska..., 2005). Przyczyną takiego stanu rzeczy mogą być zatory komunikacyjne, licznie formujące się w systemach drogowo-ulicznych miast. W toku badań symulacyjnych wykazano, iż emisja drogowa produktów spalania paliw płynnych (w szczególności tlenku węgla i węglowodorów) w ścisły sposób zależy od średniej prędkości ruchu pojazdów (Chłopek 2001, Chłopek i Polichnowski 2002, Pelchner i Płoski 2003).

Duże zagrożenie, jakie niesie ze sobą motoryzacja, wynika ze specyficznych warunków emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach samochodowych. Są to źródła ruchome i niskie, a kierunek wylotu spalin jest z reguły poziomy lub zwrócony nieznacznie ku dołowi, co przy gęstej zabudowie i niekorzystnych warunkach meteorologicznych sprzyja kumulacji spalin w obrębie kanionu ulicznego i jego najbliższego sąsiedztwa, tuż nad powierzchnią ziemi, a więc w strefie bezpośredniego przebywania ludzi. Powszechnie ocenia się, że maksymalny zasięg emisji dochodzi do 300 m od osi drogi, przy czym maksymalne stężenie mieści się w granicach od 30 do 150 m (Greszta i in. 2002). Wyniki badań przeprowadzone w Gliwicach, dotyczące oddziaływania ruchliwej ulicy na środowisko, wskazują, że średniodobowe stężenie PM₁₀ na analizowanej ulicy wzrasta o 40 µg·m⁻³, w stosunku do miejsc oddalonych od drogi o 100 m. Stwierdzono, że dla osób mieszkających przy tej ulicy implikuje to ryzyko około 10% wzrostu zachorowań na choroby układu oddechowego,

a zasięg oddziaływania emisji pyłu z pojazdów samochodowych przemierzających się wzdłuż ulicy przekracza 100 m (Pastuszka i in. 2004). Potwierdzają to również publikacje zagraniczne, sugerujące związek między zamieszkiwaniem w pobliżu ruchliwych dróg a chorobami układu oddechowego (Jensen 2001). W Raporcie WHO z 1999 roku stwierdza się, że liczba zgonów, będących rezultatem szkodliwego oddziaływania zanieczyszczeń komunikacyjnych, jest większa od liczby śmiertelnych wypadków na drogach jako efekt wypadków samochodowych. Wśród dzieci zanieczyszczenia komunikacyjne są odpowiedzialne za 462 tysięcy przypadków chorób układu oddechowego, w tym zachorowań na astmę, i 15 tysięcy zachorowań na choroby serca (Report of WHO..., 1999).

Wstępne wyniki badań sprawności wentylacyjnej płuc (badania spirometryczne) wśród osób mieszkających wzdłuż al. Niepodległości w Warszawie, przeprowadzonych przez pracowników Instytutu Systemów Środowiska Politechniki Warszawskiej oraz lekarzy z Wojskowego Instytutu Medycznego, wskazują, że wśród zbadanych mieszkańców 14% wykazało cechy obturacji (zwężenia dróg oddechowych), w równolicznej zaś grupie osób zamieszkujących obszary pozamiejskie udział osób wykazujących cechy tego typu dolegliwości stanowił 5%. Z analizy wyników badań wyłączono uprzednio osoby leczące się z powodu schorzeń układu oddechowego oraz takie, które deklarowały obecność objawów związanych z zaburzeniami procesu oddychania (Badyda 2005).

Okresy wzrostu stężenia zanieczyszczeń w kanonie ulicznym (przy względnie stałym natężeniu ruchu w poszczególne robocze dni tygodnia) nie wynikają zazwyczaj z nagłego wzrostu emisji, ale z pogorszenia się zdolności atmosfery do dyspersji i propagacji zanieczyszczeń. Na niekorzystną sytuację w okresie zimowym oprócz czynnika emisyjnego wpływa większy udział pogody antycyklonowej. Osiadanie powietrza w centrum wyżu prowadzi do wykształcenia się warstwy o równowadze stałej. Mała prędkość wiatru oraz brak zachmurzenia w przypadku masy powietrza arktycznego i polarno-morskiego przyczyniają się do wychłodzenia radiacyjnego i powstania inwersji dolnej o wysokości dochodzącej do kilkuset metrów. Duża przezroczystość zalegających mas powietrza nie ogranicza dopływu promieniowania słonecznego, co wpływa korzystnie na intensywność procesów fizyko-chemicznych w atmosferze. Płytką warstwą mieszania doprowadza do znacznego nagromadzenia tuż przy powierzchni ziemi zanieczyszczeń, głównie NO i CO (Drzeniecka i in. 2000). Warunki pogodowe przedstawiają się odmiennie, gdy układ cyklonalny powoduje napływ powietrza polarno-morskiego. Dopływ promieniowania jest ograniczany dużym zachmurzeniem, częstym występowaniem mgieł. Mała prędkość wiatru oraz występowanie zazwyczaj płytkiej warstwy mieszania sprzyjają kumulacji zanieczyszczeń w bliskiej odległości od miejsca emisji (np. kanion ulicy). W przypadku cyrkulacji cyklonalnej warunki meteorologiczne podlegają częstym zmianom, zwłaszcza jeżeli z centrum niżu związa-

ne są układy frontalne. Większa prędkość wiatru, częste opady atmosferyczne przyczyniają się do poprawy jakości powietrza.

Ważnym czynnikiem w ocenie dyspersji zanieczyszczeń jest określenie stanów równowagi atmosfery, rozumianych jako zdolności atmosfery do stymulowania lub hamowania ruchów pionowych. Gdy w atmosferze panuje równowaga stała, oznacza to występowanie niekorzystnych warunków wentylacyjnych, natomiast gdy występuje równowaga chwiejna – poprawę tych warunków (szczególnie przez stymulację ruchów pionowych).

Wpływ różnych elementów meteorologicznych, oddziałujących na wzrost lub spadek zanieczyszczenia w zimie, ujmuje się w postaci wskaźników. W pracy Majewskiego i Przewoźniczuk (2006) przedstawiono zastosowanie zmodyfikowanego wskaźnika meteorologicznego (Walczewski 1997), określającego prawdopodobieństwo wzrostu zanieczyszczeń powietrza w okresie miesięcy zimowych XII 2003 – II 2004 i XII 2004 – II 2005. Wskaźnik WZ ujmuje łączne wskaźniki cząstkowe, odniesione do różnych elementów meteorologicznych (temperatura powietrza, prędkość wiatru, występowanie niskiej warstwy inwersyjnej, opad atmosferyczny i ciśnienie atmosferyczne). Jeżeli stężenie zanieczyszczeń rośnie w okresach złych warunków dyspersji, jest to zwykły objaw wpływu warunków meteorologicznych. Jeżeli jednak w jakimś okresie pogorszeniu warunków dyspersji nie towarzyszy wzrost stężenia zanieczyszczeń, oznacza to zmniejszenie emisji, wpływających na jakość powietrza w danym re-

jonie. Wykazano, że rejestrowane na stacji tła miejskiego (WaU) w Warszawie podwyższone dobowe wartości stężenia PM10 były powodowane najczęściej wystąpieniem niekorzystnych warunków meteorologicznych, które ujmował opracowany wskaźnik. Wskazuje to na fakt, że warunki meteorologiczne odgrywają istotną rolę w ocenie stanu imisyjnego w aglomeracji warszawskiej (Majewski i Przewoźniczuk 2006).

Podjęcie przez autorów tej tematyki wynika z faktu większego narażenia na zanieczyszczenia powietrza osób zamieszkujących obszary położone w bezpośrednim sąsiedztwie ciągów komunikacyjnych o dużym natężeniu ruchu w porównaniu z mieszkańcami terenów miejskich, znajdujących się w pewnym oddaleniu od ulic, a więc odseparowanych od bezpośredniego wpływu ruchu kołowego. Potwierdzeniem tego są istotne statystycznie ($p < 0,01$) różnice średnich wartości stężenia zanieczyszczeń typowych dla ruchu drogowego, rejestrowanych przez stację monitoringu zlokalizowaną wzdłuż ruchliwej ulicy w porównaniu z wynikami ze stacji tła miejskiego.

W pracy zaprezentowano analizę zmian stężenia wybranych zanieczyszczeń komunikacyjnych na tle wyników pomiarów natężenia ruchu pojazdów w kanionie al. Niepodległości, przy uwzględnieniu przebiegu warunków meteorologicznych.

Materiał i metoda

Do analizy wykorzystano dane pomiarowe pochodzące z automatycznej stacji monitoringu powietrza (stacja

komunikacyjna – WaK). Na stacji powstałej w roku 2003, zlokalizowanej w al. Niepodległości w Warszawie, wykonywane są pomiary stężenia zanieczyszczeń typowych dla ruchu drogowego, m.in.: tlenku węgla, tlenków azotu, pyłów respirabilnych (PM10), benzenu oraz etylobenzenu, toluenu, ksyłenu i dwutlenku siarki. Równocześnie monitorowane są podstawowe parametry meteorologiczne – temperatura i wilgotność powietrza. Wyniki pomiarów udostępnione zostały przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w formie średnich 1-godzinnych wartości stężenia wymienionych substancji. Dla celów niniejszego artykułu wykorzystano dane pomiarowe CO, NO₂ oraz PM10 z lat 2004–2005, uwzględniając również wyniki pomiarów z 2 stacji tła miejskiego (WaU – zlokalizowanej na terenie dzielnicy Ursynów, oraz WaT – położonej w dzielnicy Targówek). W pracy wykorzystano także dane meteorologiczne, pochodzące z automatycznej stacji należącej do Zakładu Meteorologii i Klimatologii SGGW (wysokość opadu atmosferycznego).

W celu oceny wpływu liczebności pojazdów poruszających się w al. Niepodległości na poziom zanieczyszczeń rejestrowanych przez stację monitoringu wykorzystano również cykl pomiarów natężenia ruchu pojazdów, przeprowadzonych przez Instytut Systemów Środowiska PW, z podziałem na trzy zasadnicze grupy: samochody osobowe, samochody ciężarowe oraz autobusy.

Przeanalizowano 1-godzinne przebiegi natężenia ruchu w dni robocze i wolne od pracy, z zastosowaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa.

Dokonano także analizy zmian stężenia zanieczyszczeń w tym samym okresie, jak również rozkładu wartości stężenia w latach 2004–2005 z 3 stacji monitoringu.

Związek między stężeniem poszczególnych zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym i natężeniem ruchu oraz warunkami meteorologicznymi został określony metodą analizy regresji wielokrotnej krokowej. Jako zmienne niezależne przyjęto natężenie ruchu oraz średnie godzinne wartości parametrów meteorologicznych: temperaturę powietrza, wilgotność względną, prędkość wiatru, natężenie promieniowania słonecznego, sumy opadu atmosferycznego, a jako zmienną zależną przyjęto średnią godzinną wartość stężenia zanieczyszczenia. Obliczenia wykonano osobno dla CO, NO₂ i PM10. Ze względu na duży zbiór danych do analizy wytypowano po dwa miesiące z sezonu letniego i zimowego. Zastosowana procedura regresji krokowej miała na celu dobór najlepszego równania. Każda zmienna niezależna, której udział jest nieistotny, jest usuwana z równania (Draper i Smith 1973).

Wyniki

Trwające przez kolejne 168 godzin pomiary natężenia ruchu, wykonane w bezpośrednim sąsiedztwie stacji mo-

onitorującej poziom zanieczyszczeń komunikacyjnych, wykazały, iż w dni robocze przekrój pomiarowy przekracza od 70 000 do 75 000 pojazdów na dobę. Struktura ruchu (według zastosowanego podziału) przedstawiona została w tabeli 1.

Analiza zebranych wyników wskazuje, iż szczytowe poranne natężenie ruchu w dni robocze notowane jest w godzinach między 08:00 a 09:00, popołudniowe zaś między godzinami 16:00 a 18:00. W okresach tych przez przekrój pomiarowy w ciągu każdej godziny przejeżdża średnio ponad 5000 pojazdów. W godzinach dziennych między szczytami komunikacyjnymi natężenie ruchu pojazdów utrzymuje się jednak na stałym, wysokim poziomie, wyraźnie przekraczającym 4000 pojazdów/h – w okresie tym maksymalny spadek 1-godzinne natężenia ruchu w stosunku do wartości szczytowej wyniósł (zależnie od dnia) od 13 do 25%. Najmniej pojazdów porusza się po ulicach w godzinach 02:00–05:00.

W dni wolne od pracy natomiast nie można wyróżnić porannego ani popołudniowego szczytu komunikacyjnego – natężenie ruchu narasta od godziny 07:00 do około 12:00–13:00, osiągając poziom około 3000 pojazdów na godzinę, który utrzymuje się do godziny 18:00. Liczba pojazdów, które w skali doby przekroczyły przekrój pomiarowy

TABELA 1. Średni udział poszczególnych kategorii pojazdów w całkowitym natężeniu ruchu w zależności od dni tygodnia

TABLE 1. Average contribution of particular vehicles categories in the entire traffic flow depending on day

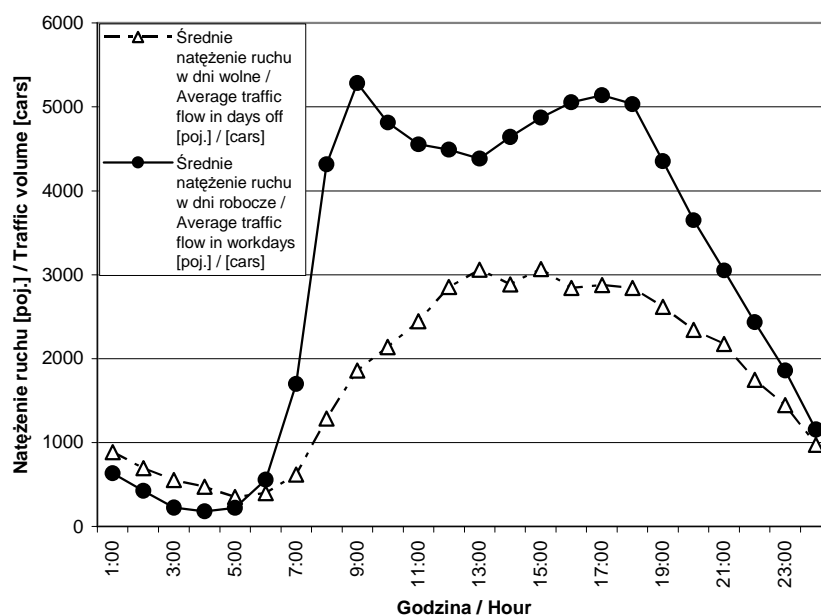
Dni robocze Workdays	Osobowe / Personal cars	Ciężarowe / Trucks	Autobusy / Busses
	97,2%	1,5%	1,3%
Sobota / Saturday	97,5%	1,1%	1,4%
Niedziela / Sunday	97,7%	0,3%	2,0%

w porównaniu ze średnim natężeniem ruchu z dni roboczych, jest istotnie statystycznie mniejsza (co potwierdza wynik testu Kruskala-Wallisa, przy $p < 0,05$) – o bez mała 35% w sobotę oraz o niemal 50% w niedzielę. Należy zauważyć, iż w tych dniach w godzinach nocnych (od 01:00 do 05:00) natężenie ruchu, mimo iż generalnie bardzo małe, jest jednak wyraźnie większe aniżeli w dni robocze – zależnie od godziny o 45–160%, natomiast w pozostałej części doby, w poszczególnych jej godzinach, stanowi 30–80% odpowiedniego natężenia ruchu z dni roboczych (rys. 1).

Taki stan rzeczy znajduje swoje odzwierciedlenie w stężeniach zanieczyszczeń rejestrowanych przez stację monitoringu. Zmianom natężenia ruchu pojazdów towarzyszą analogiczne

zmiany stężenia zanieczyszczeń powietrza, co potwierdzają współczynniki korelacji Pearsona (istotne z $p < 0,01$) obliczone dla rozkładów tych zmiennych (tab. 2), przy czym niejednokrotnie zdarza się, iż popołudniowemu szczytowi komunikacyjnemu nie towarzyszą maksymalne poziomy zanieczyszczeń (zwykle w przypadku NO_2 i PM_{10}). Są one przesunięte w czasie i rejestrowane około godziny 21:00–23:00 (rys. 2). Sytuacja taka najpewniej wynika ze zjawisk meteorologicznych, a zwłaszcza z ustania pionowych ruchów konwekcyjnych i pojawienia się zjawiska inwersji temperatury. Może być również (w przypadku NO_2) efektem przemian chemicznych.

Analizując rozkłady wartości stężenia poszczególnych zanieczyszczeń



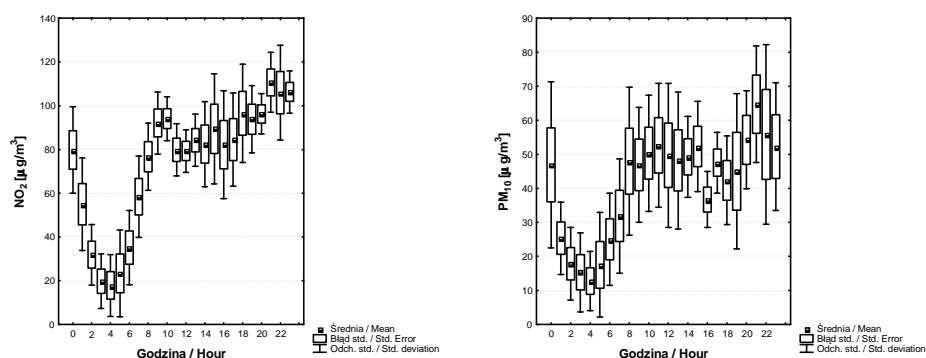
RYSUNEK 1. Przebieg 1-godzinnych wartości natężenia ruchu pojazdów w dni robocze oraz wolne od pracy

FIGURE 1. Hourly-average traffic volume changes in workdays and days off

TABELA 2. Współczynniki korelacji między natężeniem ruchu a stężeniami wybranych zanieczyszczeń

TABLE 2. Correlation coefficients between traffic volume and selected pollutants concentration

Wyszczególnienie / Specification	CO	NO ₂	PM10
CO	–		
NO ₂	0,93	–	
PM10	0,68	0,68	–
Natężenie ruchu / Traffic flow	0,70	0,69	0,45



RYSUNEK 2. Przebiegi dobowe (w dni robocze) średnich 1-godzinnych wartości stężenia (w $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) NO₂ oraz PM10 w okresie pomiarowym (2004–2005)

FIGURE 2. Circadian changes (in work days) of NO₂ and PM10 hourly-average concentrations (in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) in the measurement period (2004–2005)

z okresu od stycznia 2004 do grudnia 2005 roku, stwierdzić można, iż średnie wartości stężenia są istotnie statycznie większe w pobliżu stacji komunikacyjnej (zlokalizowanej przy krawędzi jezdni) w porównaniu ze stacjami tła miejskiego (zlokalizowanymi w taki sposób, aby wpływ zanieczyszczeń komunikacyjnych był ograniczony). Ze względu na fakt, iż odrzucono hipotezę o normalności rozkładów stężeń zanieczyszczeń (na podstawie wyników testów Kołmogorowa-Smirnowa oraz Lillieforsa), ocenę ich różnic na poszczególnych stacjach przeprowadzono z zastosowaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa (odpowiednik analizy wariancji). Na poziomie istotności $p < 0,01$

odrzucono hipotezę o równości rozkładów stężeń zanieczyszczeń mierzonych przez stację komunikacyjną oraz stacje tła. Z powyższych rozważań wynika, iż poziom zanieczyszczeń w pobliżu stacji komunikacyjnej jest statystycznie istotnie wyższy w porównaniu ze stężeniem odpowiednich zanieczyszczeń wokół stacji tła miejskiego. Potwierdza to graficzna interpretacja w postaci wykresów ramkowych (rys. 3).

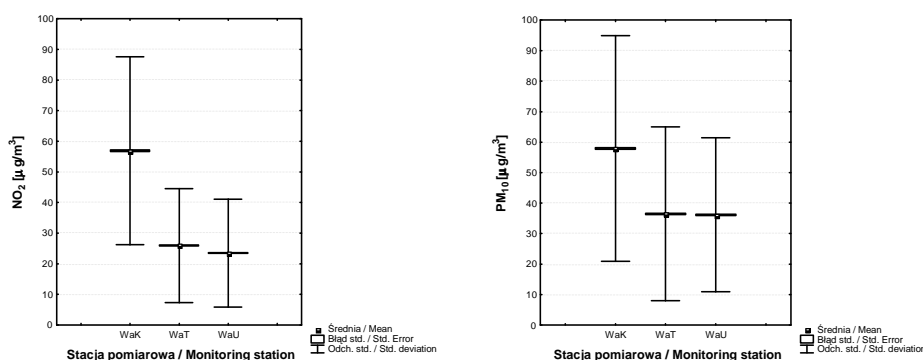
Na stacji komunikacyjnej ponadto wyraźnie częściej rejestrowane są przekroczenia dopuszczalnych poziomów stężenia tych substancji, przy czym niedotrzymywanie wartości dopuszczalnej normy dotyczy głównie PM10. W 2004 roku na stacji komunikacyjnej

zarejestrowano aż 211 przekroczeń dopuszczalnego poziomu PM10 o 24-godzinny okresie uśredniania. W tym samym okresie stacje tła zarejestrowały 62 (WaT) i 60 (WaU) przekroczeń. Rok później dobowy dopuszczalny poziom PM10 przekraczany był na stacji komunikacyjnej 190 razy, na stacjach zaś tła miejskiego 63 (WaT) oraz 75 (WaU) razy. Dodać przy tym należy, iż rozporządzenie, w którym określone są dopuszczalne poziomy stężenia zanieczyszczeń powietrza (DzU z 2002 r. nr 87, poz. 798) dopuszczało w 2004 roku niedotrzymywanie wartości normowej PM10 35-krotnie w ciągu roku kalendarzowego, natomiast począwszy od 2005 roku zapis ten już nie obowiązuje. Dopuszczalne poziomy stężenia NO₂ (o 1-godzinny czas uśredniania) oraz CO (8-godzinna średnia krocząca) nie są przekraczane na żadnej ze stacji. Wyniki ze stacji komunikacyjnej wskazują natomiast, iż nie są dotrzymywane dopuszczalne wartości o rocznym okresie uśredniania w przypadku PM10 oraz NO₂ (tab. 3).

Koncentracja zanieczyszczeń w powietrzu wykazuje wahania okresowe, roczne, dobowe, chwilowe, ponieważ stopień zanieczyszczenia powietrza zależy nie tylko od wielkości emisji, a w przypadku ciągów komunikacyjnych od natężenia ruchu, ale również od warunków meteorologicznych.

Wyniki analizy regresji i współczynniki korelacji między wartościami godzinnymi stężenia CO, NO₂ i PM10 a natężeniem ruchu i elementami meteorologicznymi przedstawiono w tabeli 4. Materiałem wyjściowym były wszystkie rozpatrywane elementy meteorologiczne oraz natężenie ruchu. W wyniku obliczeń otrzymano dla każdego rozpatrywanego zanieczyszczenia najlepsze równanie końcowe.

Analiza „najlepszych” równań, mogących służyć do obliczenia stężeń zanieczyszczeń powietrza na stacji komunikacyjnej, daje informację, iż stałym parametrem równań jest natężenie ruchu. Jak wynika z równań, średnie godzinowe natężenie ruchu dodatkowo wpływa na wartość zanieczyszczeń



RYSUNEK 3. Różnice średnich wartości stężenia NO₂ i frakcji pyłu PM10 rejestrowanych na stacji komunikacyjnej (WaK) oraz miejskich stacji sieci podstawowej (WaT i WaU)

FIGURE 3. Differences of NO₂ and PM10 fraction concentration registered on the traffic air pollution monitoring station (WaK) and urban sites of the basic network (WaT and WaU)

TABELA 3. Zestawienie stężeń średnich rocznych PM10 i NO₂ w latach 2004–2005 na stacji komunikacyjnej

TABLE 3. Comparison of annual mean concentrations of PM10 and NO₂ for the period of 2004–2005 for traffic oriented station

Zanieczyszczenie Pollution	Dopuszczalny poziom o rocznym czasie uśredniania Yearly-average allow- able concentration level D _a [μg·m ⁻³]	Średnie stężenie w 2004 roku (%D _a) Average concentration in 2004 (%D _a)	Średnie stężenie w 2005 roku (%D _a) Average concentration in 2005 (%D _a)
PM10	40	57,3 (143%)	58,5 (146%)
NO ₂	40	58,0 (145%)	55,9 (140%)

TABELA 4. Równania opisujące związek między stężeniem CO, NO₂ i PM₁₀ a natężeniem ruchu i elementami meteorologicznymi

TABLE 4. Multiple regression equations between CO, NO₂, PM₁₀ concentrations and traffic volume changes and meteorological elements

Okres Period	Postać równania regresji Multiple regression equation	R _{adj}	R ² _{adj} [%]	F	p-value	Licz- ność Num- ber
XII 2004 – I 2005	CO = 1164,78 + 0,32·N – 456,04·P – 33,43·t – 282,51·v	0,75	55,71	467,34	0,0000	1483
	NO ₂ = 156,47 + 0,05·N – 86,11·P – 2,07·t – 53,73·v	0,72	51,27	390,59	0,0000	1481
	PM10 = 143,98 – 0,85·f + 0,01·N – 22,72·P – 0,76·t – 17,37·v	0,56	31,19	135,62	0,0000	1485
V – VI 2005	CO = 621,94 – 0,88·I + 0,35·N + 29,58·t – 274,82·v	0,73	53,85	372,32	0,0000	1273
	NO ₂ = 39,97 – 0,03·I + 0,01·N + 1,48·t – 11,25·v	0,64	41,07	208,55	0,0000	1191
	PM10 = 34,04 – 0,03·I + 0,01·N + 1,69·t – 14,60·v	0,60	36,13	172,51	0,0000	1213

Objaśnienia / Explanations:

N – natężenie ruchu / traffic volume changes,

t – temperatura powietrza / air temperature [°C],

f – wilgotność względna powietrza / air humidity [%],

v – prędkość wiatru / wind speed [m·s⁻¹],

I – natężenie promieniowania słonecznego / radiant intensity [W·m⁻²],

d – wysokość opadu atmosferycznego / amount of precipitation [mm],

R²_{adj} – adjustowany współczynnik determinacji równania regresji / squared correlation coefficient (adjusted),

F – test Fishera-Snedecora / Fisher-Snedecore test.

powietrza, to znaczy, że jego wzrost towarzyszy wzrostowi rejestrowanych stężeń. Podobnie w dodatni sposób wpływa temperatura powietrza, ale tylko w okresie letnim. W ujemny sposób (w sensie statystycznym) we wszystkich równaniach wpływają: prędkość wiatru, natężenie promieniowania słonecznego, wilgotność względna powietrza, wysokość opadu atmosferycznego oraz temperatura powietrza w okresie zimowym.

W okresie letnim współczynniki korelacji (R) dla równań opisujących związek między stężeniem CO, NO₂, i PM10 a natężeniem ruchu i warunkami meteorologicznymi wynoszą odpowiednio: 0,73, 0,64 i 0,60. Wynika stąd, że kształtowanie się średnich godzinnych wartości stężenia zanieczyszczeń może być tłumaczone odpowiednio: 54, 41 oraz 36% 1-godzinnymi wartościami natężenia ruchu oraz średniogodzinnymi wartościami temperatury powietrza, prędkości wiatru i natężenia promieniowania słonecznego (tab. 4). W okresie zimowym współczynniki korelacji są wyższe w przypadku zanieczyszczeń gazowych i wynoszą odpowiednio 0,75 i 0,72, natomiast dla PM10 współczynnik jest niższy i wynosi 0,56. Wynika stąd, że kształtowanie się średnich godzinnych wartości stężenia zanieczyszczeń może być tłumaczone odpowiednio: 56, 51 oraz 36% 1-godzinnymi wartościami natężenia ruchu oraz średnimi 1-godzinnymi wartościami temperatury powietrza, prędkości wiatru i wysokości opadu atmosferycznego, jak również w przypadku PM10 wilgotnością względną powietrza (tab. 4). Wartości testu Fishera-Snedecora we wszystkich powstałych równaniach są duże, co odpowiada poziomowi wskaź-

nika istotności poniżej 0,001%. W obydwu okresach obliczeniowych równania opisujące związek między stężeniem rozpatrywanych zanieczyszczeń a natężeniem ruchu i elementami meteorologicznymi są wysoce istotne statystycznie.

Podsumowanie i wnioski

Ruch drogowy na terenie aglomeracji miejskich ma niewątpliwie dominujący udział w zanieczyszczaniu powietrza. Świadczą o tym zarówno dane publikowane przez GUS, WIOŚ, jak i pośrednio wyniki obserwacji omówione w niniejszej pracy.

Fakt zamieszkiwania w pobliżu ciągów komunikacyjnych o dużym natężeniu ruchu wpływa na wyraźnie silniejsze wyeksponowanie na oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza. Potwierdzają to statystycznie istotnie wyższe stężenia zanieczyszczeń notowane przez stację monitoringu położoną w pobliżu ruchliwej ulicy w porównaniu ze stacjami zlokalizowanymi w pewnym oddaleniu od bezpośredniego wpływu ruchu kołowego.

Na ponadnormatywne stężenia zanieczyszczeń powietrza w obrębie kanionu ulicznego narażeni są bierni i czynni uczestnicy ruchu, a w szczególności osoby przebywające na przystankach, w pojazdach poruszających się po drogach oraz mieszkańcy budynków sąsiadujących z infrastrukturą drogową. Najdrobniejsze frakcje pyłów o uziarnieniu poniżej 2,5 µm, których udział w PM10 stanowi od 60 do 80%, a czas utrzymywania się w atmosferze jest bardzo długi, mogą przenikać do pomieszczeń mieszkalnych, powodując

wzrost zachowań na choroby układu oddechowego nawet w okresie poza szczytem komunikacyjnym.

Wielkość stężenia zanieczyszczeń powietrza najlepiej objaśniana jest przez następujące zmienne niezależne: w okresie letnim – natężenie ruchu, prędkość wiatru, temperatura powietrza i natężenie promieniowania słonecznego, w okresie zimowym – natężenie ruchu, prędkość wiatru, temperatura powietrza, wysokość opadu atmosferycznego oraz w przypadku PM10 – wilgotność względna powietrza.

Literatura

- BADYDA A. 2005: Wieloaspektowy wpływ ruchu drogowego i zatorów komunikacyjnych na środowisko społeczne aglomeracji miejskiej, na przykładzie Warszawy. Materiały konferencyjne z I Konferencji Naukowej Doktorantów „Zagadnienia interdyscyplinarne w inżynierii ochrony środowiska”, Szklarska Poręba.
- Bank danych regionalnych Głównego Urzędu Statystycznego, <http://www.stat.gov.pl/>
- CENDROWSKA R. 1998: Warunki życia ludności w strefie podmiejskiej Warszawy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- CHŁOPEK Z. 2001: Główne problemy modelowania emisji substancji szkodliwych dla środowiska z silników spalinowych. Konferencja naukowa dla uczczenia 70-lecia Profesora Mariana Cichego „Modelowanie systemów energetycznych z silnikami spalinowymi”. Gdańsk.
- CHŁOPEK Z., POLICHOŃSKI T. 2002: Modelowanie emisji zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach. *Archiwum Motoryzacji* 4.
- DRAPER N.R., SMITH H. 1973: Analiza regresji stosowana. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- DRZENIECKA A., PERYMA J., PYKA J., SZCZUREK A. 2000: Wpływ warunków meteorologicznych na stężenie zanieczyszczeń powietrza w śródmieściu Wrocławia. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna* 7, 8/9: 865–882.
- GRESZTA J., GRUSZKA A., KOWALKOWSKA M. 2002: Wpływ imisji na ekosystem. Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice.
- JENSEN N.A.H., van VLIET P.H.N., AARTS F., HARSSEMA H., BRUNEKREEFF B. 2001: Assessment of exposure to traffic related air pollution of children attending schools near motorways. *Atmospheric Environment* 35: 3875–3884.
- KOPTA T. 2000: Spaliny samochodowe a zdrowie. *Transport Miejski* 12.
- LIPING X., YAPING S. 2005: Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong Island. *Environmental Modelling & Software* 20.
- MAJEWSKI G., PRZEWOŃCZUK W. 2006: Characteristics of the particulate matter PM10 concentration field and an attempt to determine the sources of air pollution in the living district of Ursynów on the basis of measurement data from an automatic air monitoring station. *Annals of Warsaw Agricultural University, Land Reclamation* (w druku).
- PASTUSZKA J.S., GRYNKIEWICZ-BYLINA B., KARWIC B. 2004: Współczynnik absorpcji aerozolu atmosferycznego w pobliżu ruchliwej drogi jako wskaźnik oddziaływania drogi na środowisko. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* 38, 5: 161–166.
- PELCHNER A., PŁOSKI T. 2003: Ocena uciążliwości zanieczyszczenia powietrza z powodu zwiększonego natężenia ruchu na wybranym węźle komunikacyjnym. Praca magisterska. Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Report of WHO Regional Office for Europe, 1999. Copenhagen.
- Stan środowiska w województwie mazowieckim w 2004 roku, 2005 Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- WALCZEWSKI J. 1997: Wskaźnik meteorologiczny określający prawdopodobieństwo wzrostu zanieczyszczenia powietrza w okresie zimowym. *Wiad. IMiGW XX (XLI)*, 1: 129–135.

Summary

Analysis of the variations of the traffic related air pollutants concentrations in the urban agglomeration against a background of the traffic volume changes and meteorological conditions.

This paper presents an analysis of the relationship between the traffic emissions concentration and the traffic flow changes measured in the cross-section of one of the thoroughfares in Warsaw (Poland). The changes in meteorological conditions were also taken into account.

The habitation in the vicinity of communication arteries with a substantial traffic flow, causes the more significant exposure to the influence of air pollutants. This is confirmed with statistically significant higher pollutant concentrations registered at the air pollution monitoring station localized near the relatively busy thoroughfare in comparison with stations situated in a certain distance of the direct impact of vehicular traffic.

Air pollutant concentrations are best explained by the following independent variables: in the summer period – traffic volume, wind velocity, temperature and solar radiation intensity; in the winter period – traffic volume, wind velocity, temperature, atmospheric precipitation quantity and for PM10 – relative humidity as well.

Authors' addresses:

Artur Badyda¹, Grzegorz Majewski²
¹Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Środowiska
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa
e-mail: artur.badyda@is.pw.edu.pl

²Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska
ul. Nowoursynowska 166, 02-776 Warszawa
e-mail: majewskig@alpha.sggw.waw.pl