

Elżbieta Bukowy

PLANOWANIE UKŁADÓW KOMUNIKACYJNYCH  
Z UWAGI NA ZACHOWANIE DOPUSZCZALNYCH STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ  
Z GAZÓW WYDECHOWYCH POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

**Streszczenie.** W pracy omówiono problemy związane z zanieczyszczeniem atmosfery spalinami pojazdów samochodowych.

Szczególne uwagi zwrócono na wpływ rodzaju silnika na emisję spalin oraz wpływ zabudowy na rozpraszanie zanieczyszczeń.

Przedstawiono analityczną metodę wyznaczania stężeń CO dla potoków pojazdów na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną.

1. Stężenie dopuszczalne zanieczyszczeń gazowych

Podczas pracy silników spalinowych emitowane są w ich gazach wydechowych zależnie od rodzaju silnika i rodzaju jego pracy szkodliwe dla człowieka związki chemiczne:

- CO
- CmHn
- Pb
- NOx

Najdokładniej znane są szczególnie niebezpieczne dla organizmów wpływy CO i Pb, występujących zawsze w spalinach (Pb dla benzyn etylizowanych) oraz rakotwórcze działanie węglowodorów - benzo - A - pirenu.

Obowiązujące w Polsce wartości stężeń dopuszczalnych są różne dla obszarów przemysłowych i ich stref ochronnych, dla obszarów specjalnie chronionych - uzdrowisk, parków narodowych, rezerwatów oraz dla pozostałych obszarów zwanych chronionymi.

Stężenie dopuszczalne CO dla obszarów specjalnie chronionych wynosi  $0,5 \text{ mg/m}^3$  na dobę (może być przekroczone 1 raz na 10 dni) oraz  $3,0 \text{ mg/m}^3$  na 20 minut (przekroczone może być 1 raz na dobę).

Dla obszarów chronionych (a więc terenów centrów miast, mieszkaniowych, rolniczych) nie zostało określone.

W normach ZSRR natomiast dla terenów mieszkaniowych:

- S dop. 20 min. =  $3,0 \text{ mg/m}^3$
- S dop. dobowe =  $1,0 \text{ mg/m}^3$ .

Proponuję uznać ludzi za przykładem norm ZSRR za równie intensywnie chronionych jak obiekty przyrody żywej i nieożywionej w rezerwach polskich oraz ludzi w warunkach uzdrowiskowych, szczególnie w przypadku CO,

który jest bardzo toksyczny i ma istotny wpływ na przyswajanie tlenu przez organizm ludzki (200 razy łatwiej od tlenu przyswajalny przez hemoglobinę) (rys. 8).

A więc dążyć należy do osiągnięcia:

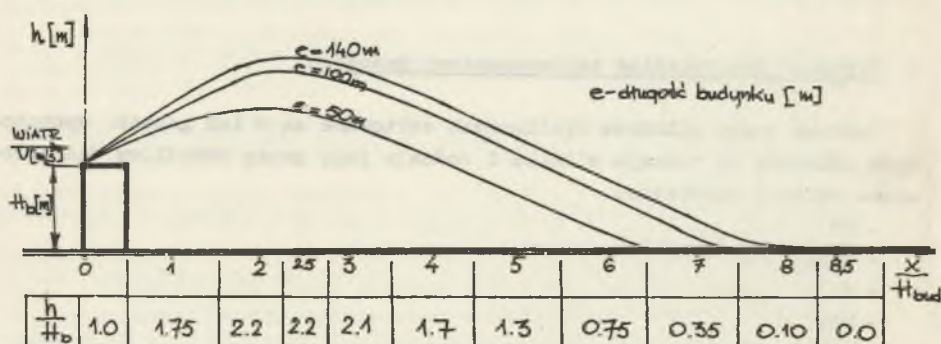
$$S \text{ dop.} = 3,0 \text{ mg/m}^3/20 \text{ minut,}$$

$$S \text{ dop.} = 0,5 \text{ mg/m}^3/\text{dobę}$$

na terenach centrów miast i w osiedlach.

## 2. Obliczenie stężeń zanieczyszczeń emitowanych w cieniu aerodynamicznym

Zaburzenia przepływu powietrza nad budynkami i innymi przeszkodami nie przepuszczalnymi powodują powstanie cienia aerodynamicznego.



Rys. 1. Parametry cienia aerodynamicznego dla budynku

Ruch powietrza w cieniu aerodynamicznym jest słaby, powstają zawirowania, a wydostawanie się powietrza poza cień aerodynamiczny jest utrudnione, przeciętnie wymiana powietrza jest 6-krotnie mniejsza w porównaniu z przepływem powietrza powyżej cienia aerodynamicznego.

A więc stężenia w wypadku źródła leżącego poza cieniem aerodynamicznym są sześciokrotnie mniejsze niż dla źródła położonego w zasięgu cienia (J.N. Lejkin [9]):

w cieniu aerodynamicznym

$$q_A = \frac{0,16 \cdot m}{U \cdot H_b}$$

$m$  - emisja ze źródła  $\frac{g}{m \cdot h}$

$U$  - średnia szybkość wiatru  $\frac{m}{s}$

$H_b$  - wysokość budynku,  $m$

poza cieniem aerodynamicznym

$$q = \frac{0,16 \cdot m}{6 \cdot U \cdot H_b}$$

- sześć razy mniejsze stężenie przy tej samej wydajności źródła

Emisje przemysłowe CO występują lokalnie przy spalaniu węgla: zasięg ich działania i ilości można ściśle określić. Są one emitowane przez wysokie kominy i intensywnie rozpraszane.

Dla terenów miejskich istotna jest emisja CO z gazów spalinowych pojazdów samochodowych, sięgająca 60÷80% ilości CO oznaczonego w powietrzu.

### 3. Przykład obliczenia stężeń CO na skrzyżowaniu ulic

Na przykładzie chcę wyjaśnić rozkład stężeń CO zależnie od rodzaju pracy silnika danego typu, natężenia ruchu w pojazdach na godzinę, szybkości ruchu i lokalnych zmian sposobu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń.

#### a) Założenia

Przyjmuję potok pojazdów Fiat 125p (1300) dla ulicy  $N_I$  (jezdnie szerokości 21 m, dwukierunkowa, pochylenie niwelety 0,3%, nawierzchnia bitumiczna w dobrym stanie).

Zakładam skrzyżowanie z inną ulicą  $N_{II}$  o tych samych parametrach jak wyżej, przy 100% ruchu wprost (bez skrętów w prawo i w lewo) na obu ulicach. Szybkość ruchu  $V = 50$  km/h na odcinku  $L \cong 100$  m w każdą stronę od skrzyżowania.

Ulice proste, obustronnie równoległe do osi zabudowane,  $H_b = 15$  m, brak przerw w zabudowie na długości ulic  $L = 1,5$  km.

Odległość zabudowy w liniach rozgraniczających 50 m.

Kierunek wiatru prostopadły do jednej z ulic  $U = 1$  m/s na wysokości 10 m.

Dla takiego teoretycznego przykładu sygnalizacja świetlna na skrzyżowaniu działa w obliczonym cyklu:

światło czerwone	- 28 sek,
światło zielone	- 28 sek,
światło żółte	- 4 sek.

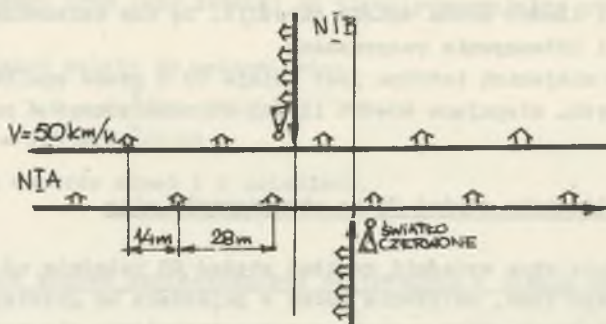
Natężenie ruchu obliczone wg HCM-65  $N_{KC} = 1800$  poj./h w każdym kierunku.

Na odcinkach ulicy poza skrzyżowaniem (około 100 m w każdą stronę) zakładam równomierny rozkład pojazdów w odstępie czasowym

$$o = \frac{N_{KC}}{t_e} = \frac{1800 \text{ poj./h}}{3600 \text{ sek.}} = 2 \text{ sek.}$$

dla jednego kierunku ruchu (rys. 2).

Droga przebywana przez samochód w czasie "0" -  $L_0 = V \cdot o = 14,1 \text{ m/s} \cdot 2 \text{ s} = 28,2 \text{ m.}$



Rys. 2. Model zanieczyszczenia ulic NI przez pojazdy o szybkości  $V = 50 \text{ km/h}$  w czasie 1 sekundy

b) Określenie wielkości emisji na odcinku ulicy dla stałej szybkości  $V$

$$g_{CO}^V = \frac{g_{N,n} \cdot N_e}{3600}$$

$g_{CO}^V$  - emisja jednostkowa przy szybkości, ( $\frac{g}{s}$ )

$g_{N,n}$  - emisja jednostkowa CO w  $\frac{g}{KMh}$

$N_e$  - moc efektywna silnika, KM.

Korzystając z wykresów (rys. 3) wskaźnika dynamicznego dla PF 125p (1300) oraz z wyników badań tego silnika, przeprowadzonych w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie [1], odczytuję na rysunku 3 moc efektywna dla  $V = 50 \text{ km/h}$  i  $n = 2750 \text{ obr/min}$  na II biegu

$$N_e = 30 \text{ KM}$$

$$g_{N,n} = 22 \text{ g/KMh} - \text{z rys. 4}$$

$$g_{CO}^V = \frac{g_{N,n} \cdot N_e}{3600 \text{ sek. poj.}} = \frac{22 \cdot 30}{3600} = \frac{660}{3600} = 0,184 \frac{g}{s \text{ poj.}}$$

Przy określonej, stałej szybkości  $V$  ilość zanieczyszczeń  $g_{CO}^V$  rozkłada się równomiernie na drodze pojazdu, a więc emisja jednostkowa liniowa dla 1 pojazdu - " $e^V$ "

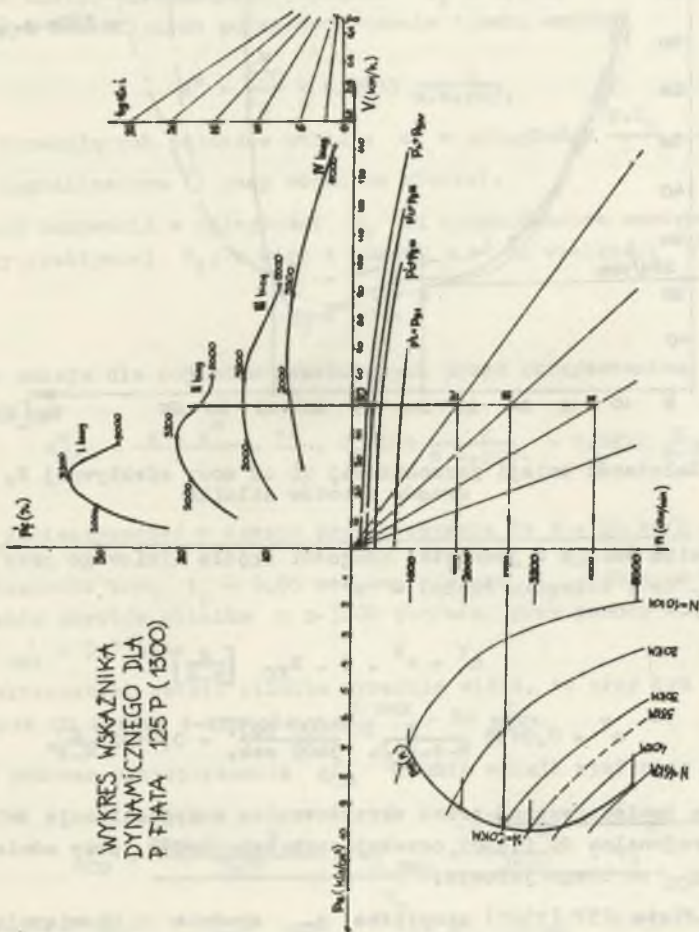
$$e^V = \frac{g_{CO}^V \cdot 3,6}{V} \left[ \frac{g}{m.s. \text{ poj.}} \right]$$

$g_{CO}^V$  - emisja jednostkowa,  $g/s$ , dla danej szybkości  $V$

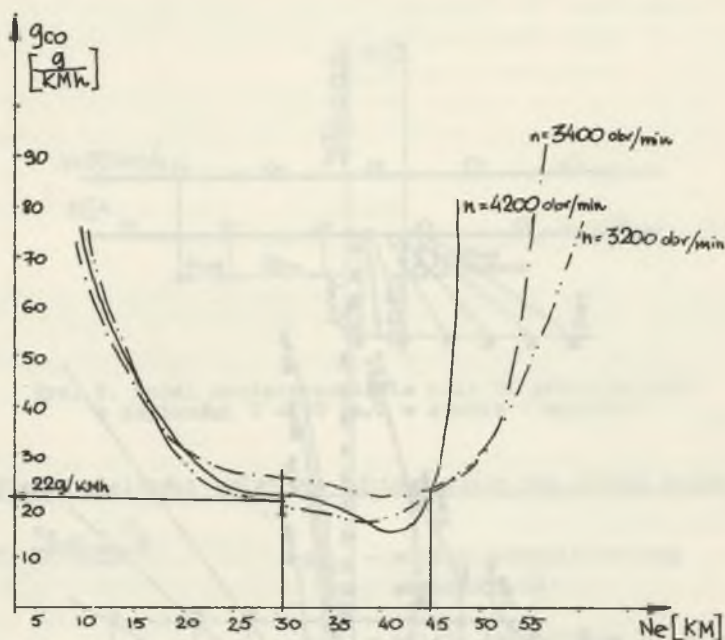
$V$  - szybkość pojazdu w  $km/h$

3,6 - przelicznik z  $km/h$  na  $\frac{m}{s}$

$$e^V = \frac{0,184 \cdot 3,6}{50} = 0,0132 \frac{g}{m.s. \text{ poj.}}$$



Rys. 3. Wykres wskaźnika dynamicznego dla PFIATA 125P (116.C)



Rys. 4. Zależność emisji jednostkowej CO od mocy efektywnej  $N_e$  dla 3 zakresów obrotów silnika

Całkowita emisja z jednostki długości źródła liniowego przy natężeniu ruchu  $N_{KC}$  (w 1 kierunku ruchu) - "m"

$$m^V = e^V \cdot 2 \cdot N_{KC} \left[ \frac{g}{m \cdot s} \right]$$

$$m^V = 0,0132 \frac{g}{m \cdot s \cdot poj.} \cdot \frac{3600 \text{ poj.}}{3600 \text{ sek.}} = 0,0132 \frac{g}{m \cdot s}$$

c) Emisja zanieczyszczeń przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną jest proporcjonalna do ilości oczekujących samochodów, przy odmiennym wskaźniku  $g_{CO}$  na biegu jałowym.

Dla P.Fiata 125P (1300) przyjmę  $g_{CO}$  zgodnie z obowiązującą normą międzynarodową wg ECE Regulation nr 15 - 4,5% CO max, co przy użyciu paliwa na biegu jałowym 0,5 kg/h (wg [1]) wynosi:

$$g_{CO}^* = 85 \frac{g}{h} = 0,0235 \text{ g/s}$$

Maksymalna ilość samochodów oczekujących przed sygnalizatorem z jednej strony skrzyżowania

$$z = \frac{N_{KC} \cdot G_{cz}}{3600} \quad N_{KC} - \text{natężenie ruchu poj/h}$$

$$G_{cz} - \text{czas trwania światła czerwonego, s}$$

$$z = \frac{1800,28 \text{ sek}}{3600 \text{ sek}} = 14 \text{ pojazdów.}$$

Zakładam odstęp oczekujących pojazdów  $l_s = 6,0 \text{ m}$ .

Pierwszy z oczekujących pojazdów w czasie 1 sek. emituje

$$e^* = \frac{g_{CO}^*}{1 \text{ s}} = 0,0039 \frac{\text{g}}{\text{s.m.poj.}}$$

ostatni z oczekujących pojazdów emituje  $e^*$  w odległości  $\frac{z \cdot l_s}{3} = \frac{14,6 \text{ m}}{3} = 28 \text{ m}$  od sygnalizatora (3 pasy ruchu na wlocie).

Na skutek hamowania w odległości  $S_H$  od sygnalizatora następuje zmniejszenie mocy efektywnej  $N_e$ , a więc i emisji z  $e^V$  do wielkości  $e^*$

$$S_H = 40 \text{ m.}$$

Średnia emisja dla pojazdów oczekujących przed skrzyżowaniem:

$$m_{sr}^* = \frac{z \cdot e^*}{2} = \frac{14}{2} \cdot 0,0039 \frac{\text{g}}{\text{s.m.poj.}} = 0,0272 \frac{\text{g}}{\text{s.m}}$$

d) Emisja zanieczyszczeń w czasie przyspieszenia do  $V = 50 \text{ km/h}$

Przyspieszenie trwa  $t_p = 6,05 \text{ sek}$ , na odcinku  $l_p = 40 \text{ m}$ , w tym czasu wykorzystania obrotów silnika  $n > 3200 \text{ obr/min}$ , przy pomocy 40÷45 KM wynoszą  $t_{N \max} = 3,7 \text{ sek}$ .

Z charakterystyki emisji silnika wyraźnie widać, że przy tym sposobie pracy emisja CO rośnie 4-krotnie -  $g_{CO}^{N \max} = 80 \frac{\text{g}}{\text{KMh}}$ .

A więc podczas przyspieszenia  $g_{CO}^p$  średnia emisji wyniesie:

$$g_{CO}^p = \frac{g_{CO}^{N \max} \cdot N_{\max}}{3600} \cdot t_{N \max} + \frac{g^V \cdot N_e}{3600} \cdot t_V =$$

$$= \frac{\frac{80 \text{ g}}{\text{KMh}} \cdot 45 \text{ KM}}{3600} \cdot 3,7 \text{ sek} + \frac{\frac{22 \text{ g}}{\text{KMh}} \cdot 20 \text{ KM}}{3600} \cdot 235 \text{ sek} =$$

$$= \frac{3,71 \text{ g} + 0,29 \text{ g}}{6,05 \text{ sek}} = \frac{4,0}{6,05} = 0,66 \text{ g/s}$$

$$g_{CO}^p = 0,66 \text{ g/s.}$$

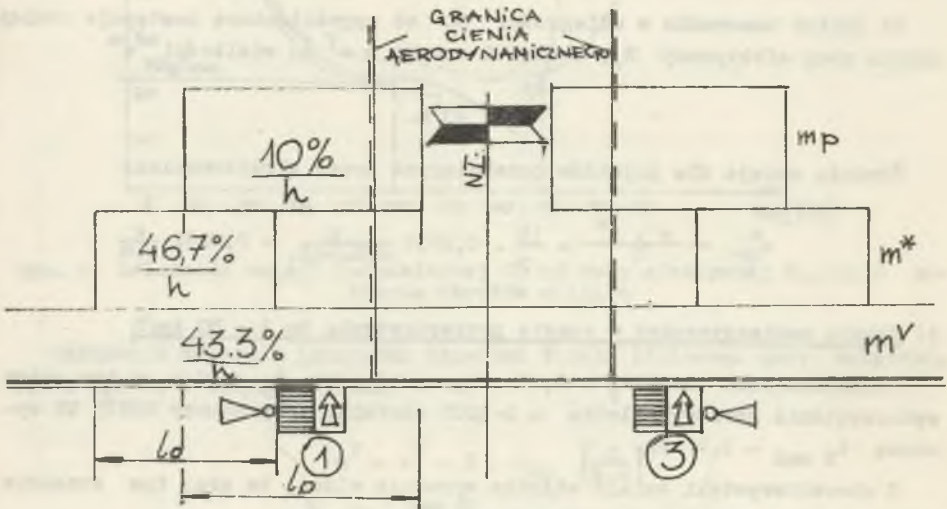
Emisja jednostkowa na długości odcinka przyspieszenia

$$e_p^p = \frac{g_{CO}^p}{l_p} = \frac{0,66 \text{ g/s}}{40 \text{ m} \cdot \text{poj.}} = 0,0165 \frac{\text{g}}{\text{s.m.poj.}}$$

Średnia emisja dla ilości pojazdów ruszających ze skrzyżowania:

$$m_{sr}^p = \frac{z}{2} \cdot e_p^p = \frac{14}{2} \cdot 0,0165 \frac{\text{g}}{\text{s.m. poj.}} = 0,116 \text{ g/s.m}$$

e) Określanie stężeń sumarycznych na jednej ulicy N I w czasie godziny



Rys. 5. Określenie emisji średniej dla jednej z ulic NI w czasie godziny

$l_0 = \frac{z \cdot l_g}{3}$  - odcinek postoju z pojazdów przed sygnalizatorem o świetle czerwonym,  $l_p$  - odcinek przyspieszenia

Udziały czasowe danego rodzaju emisji w godzinie dla 1 kierunku ruchu:

$$T_p = \frac{t_p \cdot n}{h} \cdot 100\%$$

$G_{cz}$  - czas światła czerwonego (sek)

$$T^* = \frac{G_{cz} \cdot n}{h} \cdot 100\%$$

$n$  - ilość cykli sygnalizacyjnych na godzinę

$$T_p = \frac{6,60}{3600} \cdot 100\% = 10,0\%$$

$t_p$  - czas jazdy ruchem przyspieszonym

$$T^* = \frac{28,60}{3600} \cdot 100\% = 46,7\%$$

Razem 56,7%

$$T_v = 100\% - (T_p + T^*) = 43,3\%$$



Emisja całkowita na N I w czasie godziny, M:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3600}{h} (m^V \cdot T_V + m^{\text{K}} \cdot T^{\text{K}} + m^P \cdot T^P) = M^V + M^{\text{K}} + M^P = \\ &= \frac{3600}{h} (m^V \cdot 0,433 + m^{\text{K}} \cdot 0,467 + m^P \cdot 0,10) = \\ &= 20,57 \text{ g/h} (M^V) + 45,5 \text{ g/h} (M^{\text{K}}) + 41,8 \text{ g/h} (M^P) = 107,8 \frac{\text{g}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Taka emisja średnia istnieje na obu ulicach NI w czasie godziny na odcinku od  $\frac{z \cdot l_B}{3}$  do  $+\frac{z \cdot l_B}{3}$  (patrz rys. 4) na wlocie 1 i 3 skrzyżowania.

#### f) Określenie stężeń na charakterystycznych odcinkach ulicy N IA

Dla ulicy prostopadłej wg metody J.N. Lejkina [9]

$$q_A = \frac{0,16 \text{ m}}{U \cdot H_b}$$

gdzie:

m - emisja w źródle liniowym  $\frac{\text{g}}{\text{h} \cdot \text{m}}$

U - średnia obliczeniowa szybkość wiatru  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  w przyziemnej warstwie atmosfery i sprawdzam na nomogramie rys. 6 -  $H_b$  - wysokość zabudowy (m).

Dla przyjętej zabudowy i założeń

na odcinku od  $\frac{z}{6} \cdot l_B$  do końca przyspieszenia  $l_p$   $q_A^P = \frac{0,16 \cdot 41,8 \text{ g/h}}{1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 15 \text{ m}} = 0,445 \text{ mg/m}^3$

na odcinku od  $l_B \cdot z$   $q_A^{\text{K}} = \frac{0,16 \cdot 45,5 \text{ g/h}}{1,15} = 0,486 \text{ mg/m}^3$

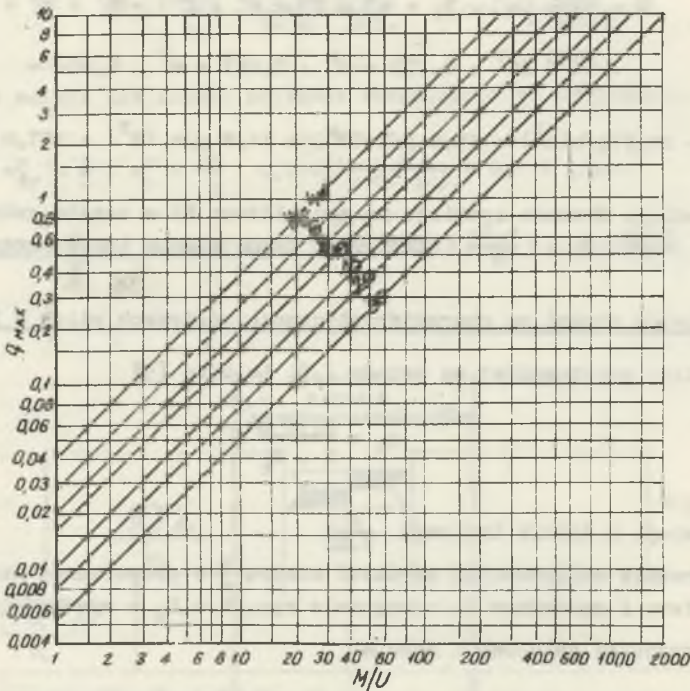
na odcinku jazdy swobodnej z szyb.  $V - q_A^V = \frac{0,16 \cdot 20,5 \text{ g/h}}{1,15} = 0,22 \text{ mg/m}^3$

Średnie stężenie CO w powietrzu ulicy N I prostopadłej do kierunku wiatru, na wlocie 1 i 3 w obszarze przejść dla pieszych

$$q_A^{\text{sr}} = \frac{0,16(m^V \cdot T_V + m^{\text{K}} \cdot T^{\text{K}} + m^P \cdot T^P)}{U \cdot H_b} = 1,15 \text{ mg/m}^3 = 0,92 \text{ ppm} = 0,0000009 - 0,0009\%$$

Sprawdzenie  $q_A^{\text{sr}} = q_A^P + q_A^{\text{K}} + q_A^V = 1,151 \text{ mg/m}^3$ .

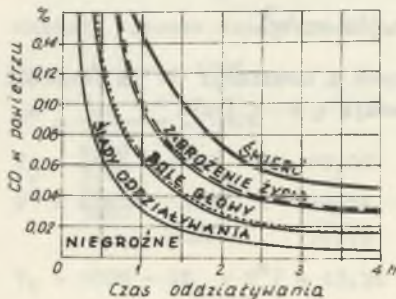
Nie uwzględniłam stężeń CO wynikających z kumulacji CO na długości  $NI_B = 750 \text{ m}$ , które ok. 30-krotnie przewyższają  $q_{NIA}$  [12].



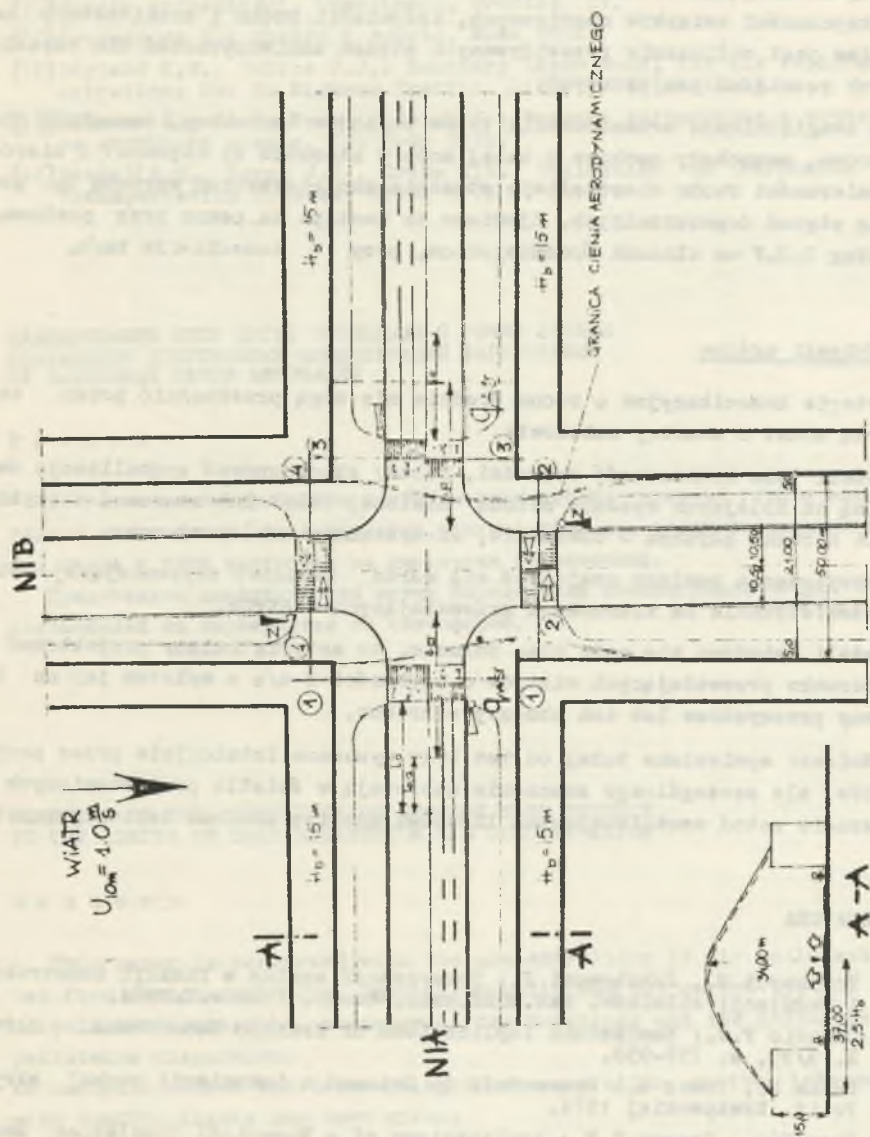
Rys. 6. Nomogram do określania maksymalnego stężenia w warstwie przyziemnej szkodliwych par, gazów i pyłów, emitowanych w strefie cienia aerodynamicznego przez źródło liniowe

$H_b$  - wysokość budynku do brzegu dachu (m);  $q_{max}$  - maksymalne stężenie w warstwie przyziemnej, ( $mg/m^3$ );  $M$  - liniowa emisja zanieczyszczeń ( $g/m$ );  $U$  - obliczeniowa szybkość wiatru (m/s)

g) Określenie stężenia zanieczyszczeń w strefie ruchu pieszego na skrzyżowaniu - rys. 7 i rys. 8



Rys. 8. Oddziaływanie CO na organizm ludzki (wg poz.bibl. [7])



Rys. 7. Szkic sytuacyjny skrzyżowania NIA i NIB z naniesionym zasięgiem cienia aerodynamicznego

#### 4. Wnioski z przykładu

- przy istniejącym stanie wiedzy w zakresie rozpraszania zanieczyszczeń, toksyczności związków chemicznych, inżynierii ruchu i architektury możliwe jest obliczenie przewidywanych stężeń zanieczyszczeń dla określonych rozwiązań projektowych,
- po uwzględnieniu zróżnicowania typów pojazdów (autobusy, samochody ciężarowe, samochody osobowe o małej mocy w stosunku do ciężaru) i nierównomierności ruchu niewątpliwie stężenia zanieczyszczeń wzrosną do granic stężeń dopuszczalnych. Zjawisko to nastąpi na pewno przy poziomach usług D,E,F na ulicach śródmiejskich, przy  $V$  komunik  $\leq 24$  km/h.

#### 5. Wnioski ogólne

- arterie komunikacyjne o ruchu średnim nie mogą przechodzić przez centrum miast o zwartej zabudowie,
- jeżeli taka konieczność zachodzi, należy skoordynować sygnalizację świetlną na kolejnych węzłach metodą "zielonej fali" lub stosować skrzyżowania o ruchu płynnym - obwiednie, skrzyżowania wielopoziomowe,
- skrzyżowania powinny znajdować się wśród zabudowy zapewniającej dobre przewietrzanie na kierunkach przeważających wiatrów,
- jeżeli zabudowa nie może ulec zmianie, to arterię należy projektować na kierunku przeważających wiatrów o szybkości 2 m/s z wylotem jej na tereny przemysłowe lub ich obszary ochronne.

Wnioski wymienione tutaj od lat były wysuwane intuicyjnie przez projektantów, ale szczególnego znaczenia nabierają w świetle przedstawionych w referacie metod umożliwiających liczbową analizę poziomemu zanieczyszczeń.

#### LITERATURA

- [1] Bernhardt M., Jakubowski J.: Toksyczność spalin w funkcji konstrukcji i regulacji silników. Mat.konf.nauk.-techn. Kraków,V,1974.
- [2] Cesario F.J.: Emissions Implications of Traffic Reductions. JAPCA, N. 9/75, s. 757-958.
- [3] Datka S., Tracz M.: Przewodnik do ćwiczeń z inżynierii ruchu" skrypt Polit. Krakowskiej 1974.
- [4] Egan B.A., Lavery T.F.: Applications of a Numerical Simulation Model to the Dispersion of Vehicular Emissions Near Highways. 3 International Clean Air Congress, Düsseldorf 1973.
- [5] Głowiak B., Kabsch P., Kukliński A., Rutkowski J.D.: Inżynieria ochrony atmosfery. Wrocław 1973.
- [6] Jante A.: Mechanika ruchu samochodu. Warszawa 1959.

- [7] Juda J., Chróściel S.: Ochrona powietrza atmosferycznego. W-wa 1974.
- [8] Krell K.: "Strasse und Umwelt" - Strasseverkehrs-technik 1/75, s. 1-7.
- [9] Lejkin J.M.: Projektirovanije ventilacionnyh i promyšlennyh vybrosov v atmosferu. Chimia, Moskwa 1971.
- [10] Miasto przyszłości. Ossolineum, Wrocław 74.
- [11] Orzeszkowa B.: Zielen i miasto. W-wa 1972.
- [12] Regland K.W., Peirce J.J.: Boundary Layer Model for Air Pollutant Concentrations Due to Highway Traffic. JAPCA 1/75, s. 48-51.
- [13] Różycka W., Gacka-Grzesikiewicz E.: Warunki klimatyczne a przestrzena struktura miaste. IUA W-wa 1972.
- [14] Wendell R.E., Norco J.E., Croke K.G.: Evaluation of Pollution from Transportation Systems. JAPCA 2/73 s. 91-97.

ПЛАНИРОВАНИЕ СЕТИ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ  
СОХРАНЕНИЯ ДОПУСКАЕМЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
ОТ ВЫХОПНЫХ ГАЗОВ АВТОМАШИН

Р е з ю м е

В статье рассматриваются проблемы загрязнения воздуха города выхлопными газами автомобилей. Анализируется влияние типа двигателя на эмиссию выхлопных газов и типа застройки на дисперсию загрязнений.

Представлен аналитический метод определения концентрации CO для потока автомобилей на перекрестке со светофором.

PLANNING OF THE COMMUNICATION NETWORK WITH RESPECT  
TO THE LIMITS OF CARS EXHAUSTION GAS CONCENTRATION

S u m m a r y

This paper is concerned with the concentrations of air pollutants emitted from various vehicles. Special emphasis was put on the type of engine, on pollutants, emission, geometry of the buildings and its influence on pollutants dispersion.

An analytic method for determining CO concentration on the intersection with traffic lights has been given.