

Zbigniew BAGIŃSKI

Józef GRABOWSKI

Politechnika Poznańska

Instytut Inżynierii Środowiska

METODYKA WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKÓW DYFUZJI ATMOSFERYCZNEJ  
PRZY UŻYCIU LIDARU

**Streszczenie.** Zagadnienie dotyczy jednego z końcowych etapów obróbki sygnału lidarowego.

W wyniku przetworzenia sygnału lidarowego, odbitego od molekuł badanego gazu, otrzymuje się pewną wartość stężenia tego gazu. Jeżeli celem pomiaru jest określenie wartości stężeń w smudze lub otaczającym powietrzu, konieczne jest uzupełnienie tego wyniku o spręcyzowanie występującego w danym przedziale czasowym stanu równowagi atmosfery.

Odpowiednie zaplanowanie pomiarów lidarowych umożliwia określenie stanu równowagi atmosferycznej oraz wnioskowanie o wartości emisji z badanego źródła.

Przyjmując, że rozkład koncentracji w smudze kominowej gazu będącego zanieczyszczeniem spełnia w przybliżeniu prawo rozkładu Gaussa, określono procedurę obliczeniową oraz dokonano symulacji komputerowej wg tej procedury. Wyniki symulacji dla różnych smug zanieczyszczeń umożliwiły sformułowanie zaleceń co do metodyki pomiarów w zależności od wysokości emitora oraz oszacowanych wstępnie wartości emisji i warunków równowagi atmosferycznej.

## 1. WPROWADZENIE

Analizując rozprzestrzenianie zanieczyszczeń pyłowych i gazowych w powietrzu atmosferycznym aglomeracji miejskoprzemysłowych, badamy procesy zachodzące w "granicznej warstwie atmosferycznej", tj. w tej jej części (o grubości 1000-1500 m), która przylega bezpośrednio do powierzchni ziemi. Jako górną granicę warstwy granicznej przyjmuje się wysokość, na której zanika wpływ podłoża, a turbulencyjne strumienie ciepła, masy i pędu dążą do zera.

Przepływy w przestrzeni warstwy granicznej mają charakter turbulencyjny, a intensywność turbulencji zależy głównie od bilansu promieniowania powierzchni ziemi, którego wielkością wymierną jest pionowy gradient temperatury oraz od prędkości wiatru i topografii podłoża. W obszarach zurbanizowanych dodatkowymi czynnikami kształtującymi intensywność turbulencji są prądy konwekcyjne, radiacja, zwiększona koncentracja pary wodnej oraz jąder kondensacji, a także znaczne, przestrzenne zróżnicowanie struktury pokrycia terenu.

Waga określenia lokalnych współczynników turbulencji wynika z faktu, że mają one decydujący wpływ na poziomy i pionowy rozkład stężeń emitowanych z kominów toksycznych zanieczyszczeń, a stąd na ich koncentrację w strefie przebywania ludzi. Turbulencyjne mieszanie mas powietrza powoduje zjawisko dyfuzji turbulentnej, stąd dyfuzja substancji gazowych lub drobnych pyłów, zawartych w smudze kominowej może być miarą turbulencyjności.

Dla obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza przyjmuje się, że rozkład koncentracji składnika gazowego w smudze spełnia w przybliżeniu prawo rozkładu Gaussa, a jako charakterystyki meteorologiczne stosuje się klasy stabilności Pasquille'a, których statystyka jest obliczana w układzie róży wiatru. Opracowany przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Katalog charakterystyk warstwy granicznej [1] umożliwia wprowadzenie do obliczeń struktury warstwy granicznej dla różnych wysokości zalegania warstwy hamującej. Modele dyfuzyjne typu Gaussa wraz z charakterystykami meteorologicznymi umożliwiają statystyczną, w zakresie czasowym i przestrzennym, analizę procesów rozpraszania zanieczyszczeń. Nie stanowią jednak jednoznacznej podstawy do opisu procesów lokalnych i chwilowych, specyficznych dla konkretnych warunków aglomeracji miejskiej. Podstawę taką mogą stanowić jedynie empiryczne badania turbulencji dla analizowanego obszaru. Wyniki takich badań umożliwią dostosowanie ogólnych modeli obliczeniowych dyspersji zanieczyszczeń do warunków lokalnych.

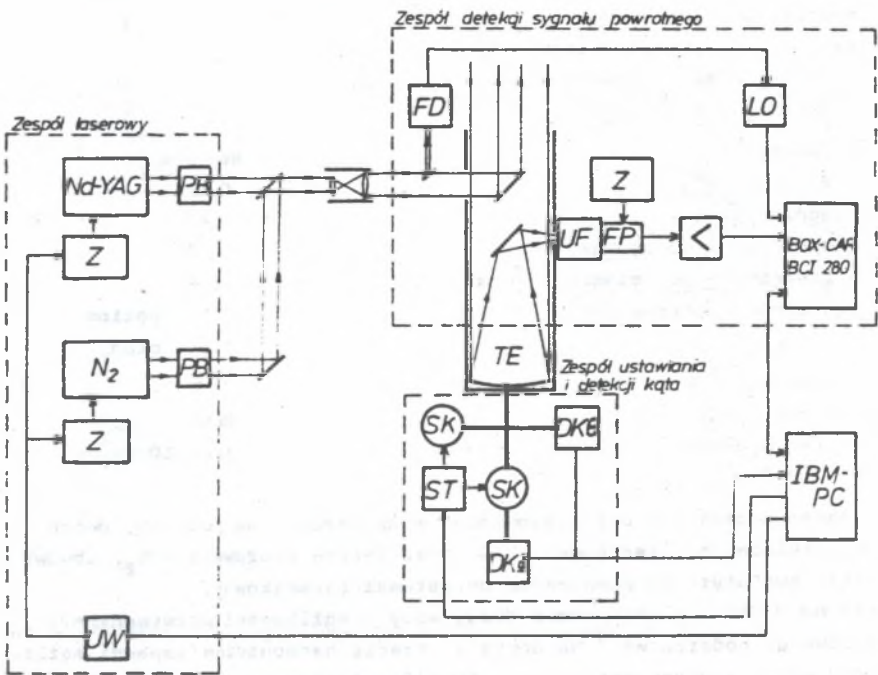
W literaturze podawane są różne metody badań turbulencji powietrza: wzloty balonowe, pomiary przy użyciu samolotu, fotografowanie w krótkich odstępach czasu smugi dymu [3], lub sztuczne emitowanie do atmosfery substancji modelowej (np.  $SF_6$ ) połączone z detekcją jej stężeń, nawet w bardzo dużych odległościach od źródła emisji [2].

Wprowadzenie techniki lidarowej do badań stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego umożliwia dokonywanie szybkich, zdalnych pomiarów warunków dyfuzji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych na różnych wysokościach z uwzględnieniem lokalnych źródeł turbulencji.

## 2. BUDOWA "LIDARU POZNAŃSKIEGO"

W Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej od 1985 roku prowadzone są prace nad budową i uruchomieniem lideru mobilnego ("lidar na samochodzie") przeznaczonego do badania emisji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych z kominów oraz koncentracji tych zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Prace, obok konstrukcji urządzenia wraz z układami automatycznego sterowania i rejestracją wyników, obejmują również badania teoretyczne (wraz z symulacją komputerową) interpretacji sygnałów lidarowych dla różnych sygnałów laserowych oraz przy wykorzystaniu różnych zjawisk fizycznych - oddziaływania światła z molekułami gazu [4].

W realizacji tematu Instytut Inżynierii Środowiska współpracuje głównie z Instytutem Fizyki Politechniki Wrocławskiej (opracowanie i budowa układu optycznego) oraz Instytutem Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie (budowa laserów). Całość prac finansowana jest przez Wydział Ochrony Środowiska, Gospodarki Wodnej i Geologii Urzędu Wojewódzkiego w Poznaniu. Przy realizacji tematu, zwłaszcza w jego początkowym okresie, korzystano z doświadczeń uzyskanych przez twórców wcześniejszych polskich liderów klasycznych: lideru gdańskiego (Instytut Fizyki Uniwersytetu Gdańskiego) oraz lidera krakowskiego (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Oddział w Krakowie), a także z doświadczeń ośrodków zagranicznych zajmujących się techniką liderową.



Rys. 1. Schemat blokowy lidaru poznańskiego

Nd-YAG - laser neodymowy,  $N_2$  - laser azotowy, Z - zasilacz, UW - układ wyzwalania, PW - poszerzacz wiązki, FD - fotodioda, TE - teleskop, UF - układ filtrów (lub monochromator), FP - fotopowielacz, LO - linia opóźniająca, BOX-CAR - wielokanałowy analizator impulsów, ST - sterownik silników krokowych, SK - silnik krokowy, DK - detektor kąta, IBM PC - mikrokomputer, PB - przystawka barwnikowa

Fig. 2. Block diagram of the Poznań lidar

Obecny stan zaawansowania pracy umożliwi przeprowadzenie pierwszych pomiarów koncentracji wybranych zanieczyszczeń - w jesieni 1988 roku.

Schemat blokowy lideru poznańskiego przedstawia rys. 1, a jego istotne parametry zawarto w tabeli 1.

Tabela 1

## Istotne parametry lideru poznańskiego

1. Lasery:	Nd : YAG	gazowy N <sub>2</sub>
robocza długość fali [nm]:	532,355	337,1
	+ przystawka barwnikowa	
moc w impulsie [MW]:	2,5; 0,5	1,0
energia impulsu [mJ]	25; 5	1
czas trwania impulsu [ns]	10	1
częstotliwość repetycji [Hz]	1/3	10
rozbieżność wiązki [mrad]	≤ 3	5
2. Teleskop:	Newtona	
apertura [m <sup>2</sup> ]	0,125	
średnica [m]	0,4	
długość ogniskowej [mm]	1280	
przeźrzany kąt widzenia [mrad]	~1,5	
dokładność nastawy [mrad]	0,5 - poziom	
	1,0 - pion	
3. Detekcja		
fotopowielacz	R666	
zakres spektralny	160÷910 nm	

W liderze przewiduje się stosowanie, w zależności od potrzeb, dwóch laserów impulsowych: lasera Nd : YAG oraz lasera azotowego - N<sub>2</sub>. Obydwa będą mogły być użyte do pompowania przystawki barwnikowej.

Laser Nd : YAG - o stosunkowo dużej mocy i możliwości przetwarzania częstotliwości podstawowej na drugą i trzecią harmoniczną zapewni możliwość sondowania zanieczyszczeń powietrza (gazów i pyłów) na stosunkowo duże odległości (do kilku kilometrów). Laser ten jest traktowany jako źródło silnego impulsu. Laser azotowy charakteryzuje się stosunkowo krótkim czasem trwania impulsu - około 1 ns. Daje to dużą przestrzenną zdolność rozdzielczą - około 0,5 m. Stwarza zatem unikalną możliwość wyznaczenia profilu poprzecznego stężeń wybranego zanieczyszczenia analizowanej smugi kominowej, co z kolei pozwala określić (między innymi) poziom warstwy hamującej oraz lokalne współczynniki dyfuzji.

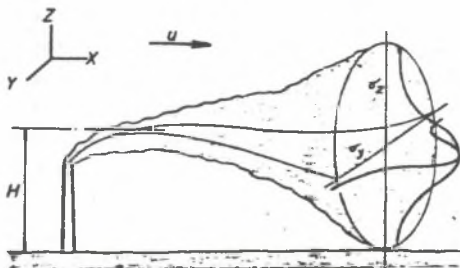
## 3. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW DYFUZJI ATMOSFERYCZNEJ

Przyjmując, że rozkład koncentracji w smudze kominowej gazu będącego zanieczyszczeniem spełnia prawo rozkładu Gaussa, otrzymuje się zależność opisującą wartość stężenia w punkcie atmosfery o współrzędnych  $x, y, z$ , w postaci:

$$S(x, y, z) = \frac{E}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

gdzie:

- E - emisja danego zanieczyszczenia,
- H - wysokość pozornego punktu emisji,
- $\bar{u}$  - średnia prędkość wiatru w warstwie od poziomu terenu do H,
- $\sigma_y, \sigma_z$  - współczynniki dyfuzji Pasquille'a dla kierunków  $y, z$  (patrz rys. 2).



Rys. 2. Schemat strugi emitowanej z kominu

Fig. 2. Diagram of the stream emitted from the chimney

$$S_x = \frac{E}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \quad (3)$$

a rozkład stężeń w osi pionowej (czyli dla  $y = 0$ ) w zależności od  $S_x$ , jest:

$$S_z = S_x \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (4)$$

Ponieważ sondowanie smugi przy użyciu lideru odbywać się będzie przed osiągnięciem przez krawędź smugi poziomu terenu, a więc dla:  $x < x_{\max}$  oraz przenosząc początek układu współrzędnych do pozornego punktu emisji, czyli przyjmując, że dla  $z = H$ , rzędna  $z = 0$ , otrzyma się zależność:

$$S(x, y, z) = \frac{E}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

Maksymalne stężenie w osi smugi, czyli dla:  $y = 0, z = 0$ , opisane jest więc zależnością:

oraz w osi  $y$ , tj. dla  $z = 0$ :

$$s_y = s_x \exp \left[ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (5)$$

Dla stałej wartości "x" słuszne są zależności:

$$\frac{s_{z_2}}{s_{z_1}} = \exp \left[ -\frac{z_2^2 - z_1^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (6)$$

$$\frac{s_{y_2}}{s_{y_1}} = \exp \left[ -\frac{y_2^2 - y_1^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (7)$$

w których:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= A \cdot x^a \\ \sigma_z &= B \cdot x^b \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie  $A$ ,  $B$ ,  $a$ ,  $b$  - przyjmują stałe wartości dla niezmiennych w czasie: warunków emisji, prędkości wiatru oraz stanu równowagi atmosferycznej. Wynika z tego, że przy sondowaniu smugi przy użyciu lideru, w krótkim przedziale czasowym, z dwóch (lub więcej) przekrojach odległych od źródła emisji o  $x_1, x_2, x_3, \dots$ , przy niewielkich względnych różnicach "x", różnice między kolejnymi wartościami  $\sigma_y$  oraz między kolejnymi wartościami  $\sigma_z$  wynikać będzie tylko z wartości "x".

Wymagania: krótkich przedziałów czasowych oraz niewielkich względnych różnic odległości "x", wynikają z konieczności zachowania stałych (w pewnym zakresie tolerancji) warunków meteorologicznych i topograficznych. Wtedy:

$$\frac{\sigma_{z_2}}{\sigma_{z_1}} = \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^b \quad (9)$$

oraz

$$\frac{\sigma_{y_2}}{\sigma_{y_1}} = \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^a \quad (10)$$

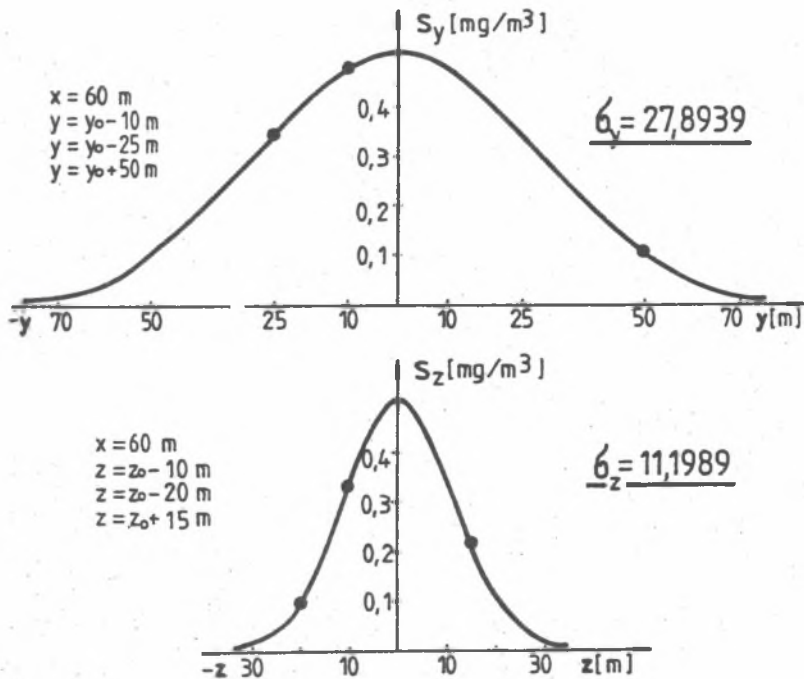
Wyznaczenie zatem współczynników dyfuzji oraz parametrów charakteryzujących stan równowagi atmosfery wymaga następującej procedury pomiarowo-obliczeniowej:



- 1) dla znanej odległości  $x_1$  od źródła emisji pomiarzenie przy użyciu lidar, w posł "z", kilku (teoretycznie co najmniej dwóch) wartości stężeń gazu:  $S_{z_1}, S_{z_2}, S_{z_3}, \dots$ , przy równoczesnym określeniu kolejnych rzędnych "z", jako:  $z_1 - z_0, z_2 - z_0, z_3 - z_0, \dots$ ;
- 2) wyznaczenie wg równania (6) wartości  $\sigma_z$  oraz  $S_x$  jako ekstremum funkcji:  $S_z = f(\sigma_z, z)$  dla odległości  $x_1$ ;
- 3) pomiarzenie i wyznaczenie odpowiednio wartości  $S_z, \sigma_z$  dla kilku kolejnych odległości:  $x_2, x_3, \dots$  (teoretycznie tylko dla  $x_2$ ),
- 4) wyznaczenie z równań (8), (9) współczynników b, B;
- 5) przeprowadzenie analogicznej procedury pomiarowo-obliczeniowej dla poziomego (wzdłuż osi "y") przekroju smugi i wyznaczenie odpowiednio:  $\sigma_y = f(x)$  oraz współczynników a, A.

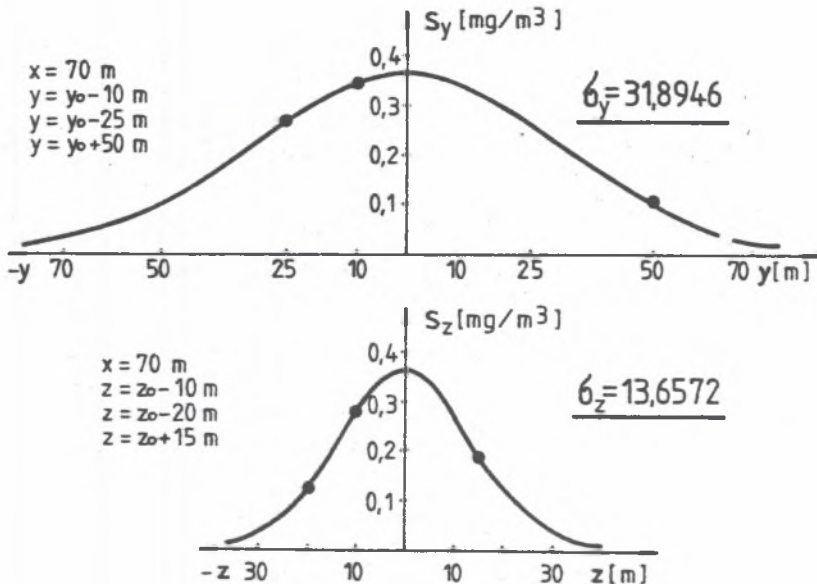
Wyniki symulacji komputerowych opisanej procedury dwóch przykładowych smug kominowych zanieczyszczeń przedstawiono odpowiednio na rysunkach:

- smuga I - rys. 3, 4 - współczynniki: a, b wskazują na stan równowagi atmosferycznej: silnie chwiejny;



Rys. 3. Wyniki symulacji komputerowej smugi I - odległość  $x = 60 \text{ m}$   
 Fig. 3. Results of the computer simulation of the trail I - distance  $x = 60 \text{ m}$

- smuga II - rys. 5, 6 - współczynniki: a, b wskazują na stan równowagi obojętnej.



Rys. 4. Wyniki symulacji komputerowej smugi I - odległość  $x = 70$  m  
 Fig. 4. Results of the computer simulation of the trail I - distance  $x = 70$  m

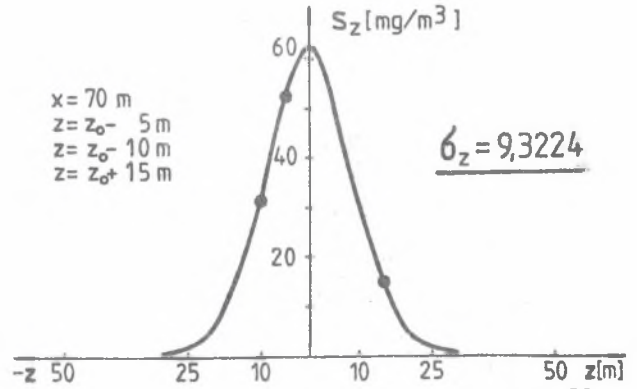
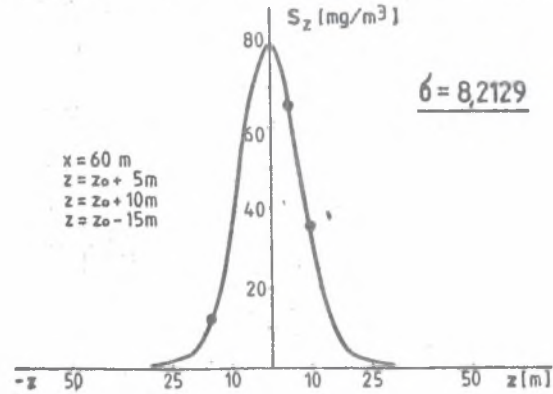
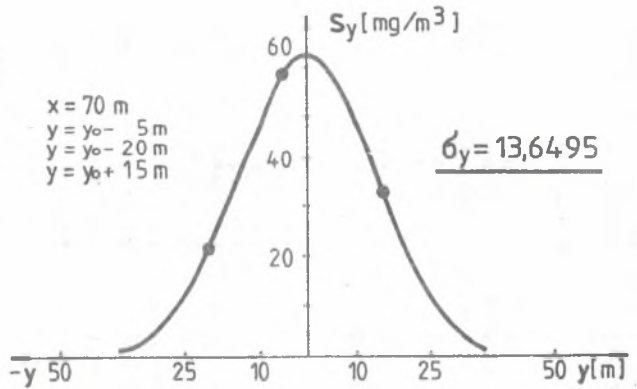
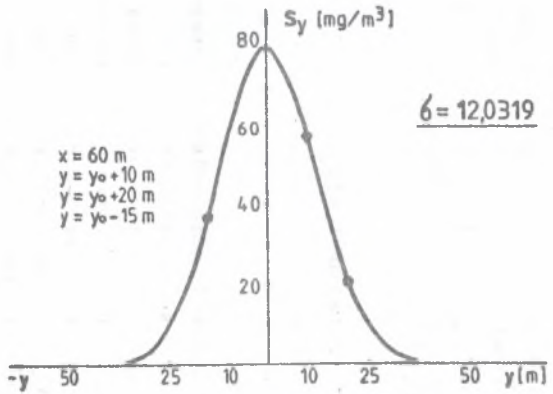
#### 4. ZAKOŃCZENIE

W opracowaniu przedstawiono metodykę wyznaczania współczynników dyfuzji oraz określania stanu równowagi atmosferycznej dla klasycznego gausowskiego rozkładu stężeń w smudze kominowej. Dalsze prace nad tym zagadnieniem dotyczyć będą przypadków odbiegających od modelu klasycznego a występujących na obszarze zurbanizowanym.

#### LITERATURA

- [1] Lityńska Z.: Analiza zmienności charakterystyk warstwy granicznej oraz próba oszacowania reprezentatywności przestrzennej standardowego radiosondażu. Synteza prac naukowo-badawczych wykonanych w kierunku 7, Rządowego Programu Badawczo-Rozwojowego PR-8, Warszawa 1986, s. 131-154.





Rys. 5. Wyniki symulacji komputerowej smugi II - odległość 60 m

Fig. 5. Results of the computer simulation of the trail II - distance  $x = 60$  m

Rys. 6. Wyniki symulacji komputerowej smugi II - odległość 70 m

Fig. 6. Results of the computer simulation of the trail II - distance  $x = 70$  m

- [2] Bareña R., Góldon A., Zięba K.: Opracowanie i wdrożenie metody oznaczania substancji modelowej do badań dyfuzji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. j.w. s. 109-118.
- [3] Sorbian Z.: Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze. PWN, Warszawa 1983.
- [4] Grabowski J., Bagieński Z., Prussek W., Rakalski J., Figas Z.: Budowa i uruchomienie lidarów - urządzenia do detekcji koncentracji zanieczyszczeń emitowanych przez kominy. Sprawozdania z realizacji pracy IK-13/153/85; 1985, 1986, 1987.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИДАРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
КОЭФИЦИЕНТОВ АТМОСФЕРНОЙ ДИФУЗИИ

Р е з ю м е

Проблема касается одного из последних этапов обработки лидарного сигнала. В результате обработки лидарного сигнала отраженного от молекул исследуемого газа, получается определенное значение концентрации этого газа. Если целью измерений является определение значений концентрации в окрашенной струйке или в окружающем воздухе, необходимо пополнить этот результат уточнением, выступающего в данном промежутке времени, состояние равновесия атмосферы.

Хорошо запланированное лидарных измерений делает возможным определение состояния атмосферного равновесия и оценку значения эмиссии из исследуемого источника.

Принимая, что распределение концентрации в трубной полосе газа являющегося загрязнением, отвечает закону распределения Гаусса, определено расчетную процедуру и проведено компьютерное моделирование по этой процедуре. Результаты моделирования для разных полос загрязнения облегчили формулировку указаний по методике измерений в зависимости от высоты эмиттера, и предвзительно оцениваемых значений эмиссии и условий атмосферного равновесия.

ANALYSIS OF POSSIBILITIES TO APPLY A LIDAR FOR MEASUREMENTS  
OF ATMOSPHERIC DIFFUSION COEFFICIENT

S u m m a r y

An adequate plan for lidar measurements makes it possible to determine the atmosphere equilibrium state and to estimate the value of emission from the tested source. Assuming the Gaussian distribution of pollutants concentration in the emitted gas smoke the calculation procedure has been defined and computer simulation has been carried out according to this procedure. The simulation results obtained for various pollutant smokes have enabled the author to give some indications with reference to the measurement method depending on the emitter height, the estimated emission on atmosphere equilibrium conditions.