

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział
Inżynierii Sanitarnej i Wodnej



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. **MARII MARKIEWICZ**

pt. „Gaussowski model
rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze
uwzględniający zmienność parametrów wejściowych”

WARSZAWA

1989

519.688:551.510.4:551.511:043

E

P O L I T E C H N I K A W A R S Z A W S K A

Instytut Inżynierii Środowiska

Maria Markiewicz

GAUSSOWSKI MODEL ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ
ZANIECZYSZCZEN W ATMOSFERZE UWZGLĘDNIAJĄCY
ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH

Rozprawa doktorska

Promotor:

doc.dr hab.inż. Maciej Nowicki

Warszawa 1989

SPIS TREŚCI

| | str. |
|---|------|
| WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ | |
| 1. WSTĘP, CEL I ZAKRES PRACY | 1 |
| 2. PRZEGLĄD MATEMATYCZNYCH MODELI ROZPRZESZTRZENIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA | 4 |
| 2.1. Zakres przeglądu | 4 |
| 2.2. Modele teorii K | 5 |
| 2.3. Smugowe modele gaussowskie | 12 |
| 2.4. Rozszerzone modele gaussowskie | 20 |
| 3. SFORISULOWANIE MODELU | 29 |
| 3.1. Podstawowe założenia | 29 |
| 3.2. Matematyczne podstawy modelu | 33 |
| 3.2.1. Etapowość wyznaczania przestrzennego rozkładu stężenia zanieczyszczenia..... | 33 |
| 3.2.2. Określenie obszaru obliczeniowego | 34 |
| 3.2.3. Wyznaczanie liczby epizodów meteorolo- gicznych uwzględnianych w obliczeniach dla pojedynczego źródła emisji | 34 |
| 3.2.4. Podział smugi na segmenty | 36 |
| 3.2.5. Długość segmentu smugi | 37 |
| 3.2.6. Wysokość położenia osi segmentu | 38 |
| 3.2.7. Współczynniki dyfuzji atmosferycznej.. | 40 |
| 3.2.8. Ograniczenie rozpraszania się zanie- czyszczeń w pionie | 42 |
| 3.2.9. Procesy usuwania zanieczyszczeń z atmo- sfery..... | 43 |

| | |
|--|----|
| 3.2.10. Średnia prędkość wiatru w warstwie powietrza od powierzchni podłoża do wysokości pozornego punktu emisji | 45 |
| 3.2.11. Wyznaczanie stężenia zanieczyszczenia - podstawowe równanie modelu ... | 46 |
| 3.3. Przegląd formuł na wyniesienie smugi | 48 |
| 3.3.1. Wpływ wyniesienia na wyznaczanie rozkładu stężeń zanieczyszczeń | 48 |
| 3.3.2. Zestawienie formuł na obliczanie wyniesienia smugi | 50 |
| 3.3.3. Analiza formuł na wyniesienie smugi i wybór formuł do zastosowania w opracowanym modelu | 58 |
| 3.4. Przegląd formuł na wyznaczanie współczynników dyfuzji atmosferycznej | 60 |
| 4. REALIZACJA KOMPUTEROWA MODELU SPM | 65 |
| 5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU SPM | 69 |
| 5.1. Uwagi wstępne | 69 |
| 5.2. Analiza możliwości uzyskania danych pomiarowych do weryfikacji modelu | 70 |
| 5.3. Opis eksperymentu pomiarowego w Kincaid i wybór danych do weryfikacji modelu | 71 |
| 5.4. Wskaźniki statystyczne zastosowane do oceny jakości modelu | 76 |
| 5.5. Wyniki weryfikacji doświadczalnej modelu ... | 78 |

| | |
|--|--------|
| 6. MOŻLIWOSCI ZASTOSOWANIA MODELU SPM | 84 |
| 7. WNIOSKI KOŃCOWE | 87 |
| LITERATURA | 89 |
| DODATEK A Opis danych wejściowych do programu SPM | A1-A8 |
| DODATEK B Wartości stężeń pomiarowych i obliczo- nych modelem SPM oraz modelem Pasquill- la, stosowanym w obliczeniach rutyno- wych w Polsce | B1-B6 |
| Wartości wskaźników statystycznych ja- kości modelu SPM i modelu Pasquilla. /Na podstawie danych z eksperymentu z substancją znacznikową SF ₆ w Kincaid, Illinois, USA/ | B7-B11 |
| DODATEK C Obliczenia napływu dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego wg modelu SPM | C1-C6 |

WYKAZ WAZNIEJSZYCH OZNACZENÍ

- a - wykładnik potęgi we wzorze na współczynnik poziomej dyfuzji atmosferycznej σ_y
- A - współczynnik we wzorze na σ_y
- b - wykładnik potęgi we wzorze na współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej σ_z
- \bar{b} - średnie odchylenie kwadratowe
- B - współczynnik we wzorze na σ_z
- c_i - stała a lub b w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- C_i - współczynnik A lub B w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- d - wewnętrzna średnica przewodu emitującego zanieczyszczenie
- \bar{d} - średnie odchylenie bezwzględne
- \bar{d}_r - stosunek średniego odchylenia bezwzględnego do średniego stężenia pomiarowego
- E - natężenie emisji zanieczyszczenia
- E_w - wirtualne natężenie emisji zanieczyszczenia dla segmentu położonego najbliżej rozpatrywanego receptora
- $E_{w,i}$ - wirtualne natężenie emisji zanieczyszczenia dla segmentu w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- E/x/ - funkcja opisująca zanik zanieczyszczeń w atmosferze na skutek przemian chemicznych, wymywanie przez opady atmosferyczne oraz pochłanianie zanieczyszczeń przez podłoże
- F - strumień wyporu
- h - wysokość geometryczna komina
- Δh - wyniesienie gazów
- h_a - wysokość anemometru
- H - wysokość pozornego punktu emisji
- I - funkcja wyrażająca działanie objętościowego źródła emisji

- k_1 - współczynnik przemiany chemicznej zanieczyszczenia
- $k_{1,i}$ - współczynnik uwzględniający wpływ przemiany chemicznej zanieczyszczenia na zmianę stężenia w i -tym kroku czasu śledzenia smugi
- k_2 - współczynnik wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne
- $k_{2,i}$ - współczynnik uwzględniający wpływ wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne na zmianę stężenia w i -tym kroku czasu śledzenia smugi
- $k_{3,i}$ - współczynnik uwzględniający wpływ pochłaniania zanieczyszczenia przez podłoże na zmianę stężenia w i -tym kroku czasu śledzenia smugi
- K - współczynnik dyfuzji turbulencji atmosfery o składowych: K_x, K_y, K_z
- l - długość drogi transportu zanieczyszczenia od źródła emisji do receptora
- Δl_i - długość segmentu smugi powstałego w i -tym kroku czasu jej śledzenia
- l_{ps}, l_{ks} - długości drogi transportu zanieczyszczenia od źródła emisji dla początku i końca segmentu
- l_w - odległość wirtualna
- $l_{w,ps}$ - odległości wirtualne odpowiednio dla początku
- $l_{w,ks}$ i końca segmentu
- L - wysokość warstwy mieszania
- L_i - wysokość warstwy mieszania w i -tym kroku czasu śledzenia smugi
- $L_{max,i}$ - wysokość warstwy mieszania dla końca danego segmentu w i -tym kroku czasu śledzenia smugi
- $L_{s,i}$ - grubość smugi w i -tym kroku czasu jej śledzenia
- N - liczebność próby /liczba punktów pomiarowych/
- m - stała zależna od stanu równowagi atmosfery

- Q - emisja ciepła z komina
- r - odległość punktu recepcyjnego od osi smugi
- R - współczynnik korelacji
- s - parametr stabilności atmosfery
- S - stężenie usrednione
- $\overline{S'U'}$ - strumień turbulencyjny stężenia o składowych:
 $\overline{S'u'}$, $\overline{S'v'}$, $\overline{S'w'}$
- S_{oi} - wartość i-tego stężenia obliczeniowego
- \bar{S}_o - średnie stężenie obliczeniowe
- S_{pi} - wartość i-tego stężenia pomiarowego
- \bar{S}_p - średnie stężenie pomiarowe
- t - czas
- Δt - czas trwania epizodu meteorologicznego
- T - temperatura gazów na wylocie z komina
- T_o - temperatura otaczającego powietrza
- u_a - prędkość wiatru na wysokości anemometru
- u_h - prędkość wiatru na wysokości geometrycznej komina
- u_H - prędkość wiatru na wysokości pozornego punktu emisji
- \bar{u} - średnia w warstwie rozprzestrzeniania się prędkość wiatru
- \bar{u}_i - średnia prędkość wiatru w warstwie od powierzchni podłoża do punktu pozornego emisji w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- U - uśredniony wektor prędkości wiatru o składowych:
u, v, w
- v_g - prędkość gazów na wylocie z komina
- v_d - prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia
- $v_{d,i}$ - prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia dla danego segmentu w i-tym kroku czasu śledzenia smugi

- V_c - wariancja wyjaśniona przez model
- W_z - współczynnik zmienności modelu
- x_e, y_e - współrzędne poziome źródła emisji
- $x_{ks,i}$
 $y_{ks,i}$ - współrzędne poziome końca smugi w i-tym kroku czasu jej śledzenia
- $x_{ps,i}$
 $y_{ps,i}$ - współrzędne poziome początku segmentu smugi w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- x_w, y_w - współrzędne poziome w-tego wierzchołka prostokąta /obszaru obliczeniowego/, $w = 1, 2, 3, 4$
- z_0 - współczynnik szorstkości podłoża
- α_i - kąt między osią y a kierunkiem wiatru zmierzonym zgodnie z ruchem wskazówek zegara w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- θ - temperatura potencjalna otaczającego powietrza
- σ - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej dla danego punktu recepcyjnego
- σ_c - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej uwzględniający poprawkę Pasquilla
- σ_i - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej dla końca danego segmentu w i-tym kroku czasu śledzenia smugi
- σ_{ps}, σ_{ks} - współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej odpowiednio dla początku i końca segmentu
- σ_y - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej
- σ_z - współczynnik dyfuzji atmosferycznej pionowej

1. WSTĘP, CEL I ZAKRES PRACY

Jednym z podstawowych narzędzi do oceny stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego są modele matematyczne rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze.

W Polsce do wyznaczania stężeń w sposób rutynowy zgodnie z metodyką opisaną w "Wytycznych obliczenia stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego" /52/ stosowany jest model oparty na formule Pasquilla. Dla realizacji obliczeń przy użyciu tego modelu dostępne są pełne dane wejściowe. Dane meteorologiczne uzyskiwane są z rutynowych pomiarów prowadzonych na stacjach rozmieszczonych na terenie całego kraju. Wykorzystywanie wymienionego modelu do wyznaczania rozkładu stężeń związane jest z przyjęciem stacjonarności i jednorodności przestrzennej parametrów wpływających na proces dyspersji zanieczyszczeń w atmosferze. W szczególności zakłada się stałe w czasie parametry emisji zanieczyszczeń ze źródła: natężenie emisji, prędkość i temperatura gazów wylotowych z komina. Przyjmuje się jednorodne przestrzenne warunki terenowe charakteryzowane stałym dla obszaru współczynnikiem szorstkości podłoża oraz stałe w czasie i przestrzeni warunki meteorologiczne: stan równowagi atmosfery, prędkość i kierunek wiatru. Wspomniany model jest jednym z wielu smugowych modeli gaussowskich szeroko opisywanych w literaturze.

Inną grupę stanowią modele oparte na numerycznym rozwiązaniu równania dyfuzji turbulencyjnej. Pozwalają one na uwzględnienie, przy opisie procesu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, czasowej zmienności parametrów emisji, zróżnicowania terenu, czasowej i przestrzennej zmienności warunków meteorologicznych. Zastosowanie tych modeli do oceny stanu zanieczyszczenia atmosfery wymaga danych meteorologicznych, które nie są w Polsce określane w sposób rutynowy. Rozważane modele charakteryzują się ponadto zdecydowanie dłuższym niż modele gaussowskie czasem obliczeń. Wobec ograniczonych możliwości systemów komputerowych, aktualnie dostępnych w kraju, praktyczne zastosowanie tych modeli jest więc utrudnione.

Z tych względów autorka podjęła próbę opracowania modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze, który uwzględniałby czasową zmienność parametrów emisji i warunków meteorologicznych oraz zmienność warunków terenowych na drodze transportu zanieczyszczeń między źródłem emisji i receptorem oraz umożliwiał wykonywanie obliczeń w oparciu o dane meteorologiczne dostępne z prowadzonych w Polsce pomiarów rutynowych.

W ramach niniejszej pracy podjęto następujące zadania:

- sformułowanie w/w modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza,
- opracowanie i uruchomienie programu komputerowego dla realizacji tego modelu,

- przeprowadzenie weryfikacji opracowanego modelu, przy wykorzystaniu danych z eksperymentu pomiarowego z użyciem substancji znacznikowej,
- porównanie wskaźników jakości dla tego modelu ze wskaźnikami uzyskanymi dla smugowego modelu gaussowskiego, stosowanego w obliczeniach rutynowych w Polsce,
- określenie możliwości zastosowania opracowanego modelu.

2. PRZEGLĄD MATEMATYCZNYCH MODELI ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA

2.1. Zakres przeglądu

Niniejszy przegląd obejmuje matematyczne modele rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza, które w różnym stopniu uwzględniają, przy opisie procesu dyspersji zanieczyszczeń, czasową zmienność parametrów emisji, zróżnicowanie terenu oraz czasową i przestrzenną zmienność warunków meteorologicznych.

Rozdział 2.2. zawiera omówienie modeli teorii K opartych na numerycznym rozwiązaniu równania różniczkowego dyfuzji turbulencyjnej. W modelach tych możliwe jest uwzględnienie w pełnym zakresie zmienności parametrów emisji, warunków meteorologicznych i terenowych.

W rozdziale 2.3. przedstawione są smugowe modele gaussowskie, w których stężenie zanieczyszczeń powietrza jest wyznaczane przy wykorzystaniu formuły Pasquilla będącej analitycznym rozwiązaniem równania dyfuzji turbulencyjnej. W modelach tych przyjmuje się stacjonarność i jednorodność przestrzenną parametrów wpływających na proces dyspersji zanieczyszczeń.

Modele stanowiące rozszerzenie smugowego modelu gaussowskiego, umożliwiające uwzględnienie zmienności wymienionych wyżej parametrów, omówiono w rozdziale 2.4. W dalszej części pracy modele te określać się będzie terminem "rozszerzone modele gaussowskie".

2.2. Modele teorii K

Punktem wyjścia dla budowy większości modeli matematycznych rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze jest równanie dyfuzji molekularnej w postaci /47/:

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{S}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{S}}{\partial y} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{S}}{\partial z} =$$
$$D \left(\frac{\partial^2 \tilde{S}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{S}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{S}}{\partial z^2} \right) + I \quad /2.1/$$

gdzie:

\tilde{S} - stężenie zanieczyszczenia w punkcie (x, y, z)
w kartezjańskim układzie współrzędnych,

t - czas,

\tilde{U} - wektor prędkości wiatru o składowych: \tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{w} ,

D - współczynnik dyfuzji molekularnej,

I - funkcja wyrażająca działanie objętościowego źródła emisji.

Powyższe równanie opisuje dyfuzję molekularną w cieczy nieściśliwej o przepływie laminarnym. W przypadku przepływu turbulencyjnego równanie /2.1/ wymaga przekształcenia.

Przyjmuje się, że:

$$\tilde{S} = S + S' \quad /2.2/$$

$$\tilde{U} = U + U' \quad /2.3/$$

gdzie:

S - stężenie uśrednione,

S' - odchylenie stężenia od wartości średniej,

U - uśredniony wektor prędkości wiatru,

U' - wektor odchylen składowych wektora wiatru od ich wartości średnich.

W wyniku uśrednienia metodą Reynoldsa uzyskuje się:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial (\overline{S'u'})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{S'v'})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{S'w'})}{\partial z} = \\ = D \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) + I \end{aligned} \quad /2.4/$$

gdzie:

$(\overline{S'u'})$, $(\overline{S'v'})$, $(\overline{S'w'})$ - składowe strumienia turbulencyjnego stężenia $(\overline{S'U'})$.

Równanie /2.4/ jest niedomknięte ze względu na strumień turbulencyjny stężenia $(\overline{S'U'})$.

W modelach teorii K domykanie realizowane jest przez wprowadzenie hipotezy, że strumień turbulencyjny stężenia jest proporcjonalny do gradientu stężenia średniego.

Relację tę opisuje zależność:

$$\overline{S'U'} = \begin{bmatrix} \overline{S'u'} \\ \overline{S'v'} \\ \overline{S'w'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_x \frac{\partial S}{\partial x} \\ -K_y \frac{\partial S}{\partial y} \\ -K_z \frac{\partial S}{\partial z} \end{bmatrix} \quad /2.5/$$

gdzie:

K_x, K_y, K_z - składowe współczynnika dyfuzji turbulencyjnej atmosfery K .

Uwzględniając wyrażenie /2.5/, równanie /2.4/ można zapisać jako:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(K_x + D) \frac{\partial S}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_y + D) \frac{\partial S}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_z + D) \frac{\partial S}{\partial z} \right] + i \quad /2.6/$$

Ponieważ współczynnik dyfuzji molekularnej jest pomijalnie mały w porównaniu ze współczynnikiem dyfuzji turbulencyjnej przyjmuje się, że:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + i \quad /2.7/$$

Opisana powyżej metoda domykania równania dyfuzji turbulencyjnej w oparciu o teorię K nazywana jest metodą domykania na poziomie momentów pierwszego rzędu.

Domykanie równania dyfuzji na poziomie momentów wyższego rzędu prowadzi do modeli z domknięciem rzędu drugiego lub wyższych /15, 26, 53/.

Przegląd modeli z domknięciem pierwszego rzędu zawiera tablica 2.1. Umieszczono w niej wybrane, zweryfikowane modele teorii K. W tablicy, dla poszczególnych modeli, określono: typ modelu /zależny od stosowanego układu odniesienia/, wymiar modelu, sposób wyznaczania pola wiatru oraz krok dyskretyzacji przestrzennej i czasowej. Dla wszystkich modeli podano ich przeznaczenie i miejsce weryfikacji.

Tab. 2.1.1. Wybrane modele teorii K

| 1. Nazwa modelu 2. Ośrodek autorski | 1. Typ modelu 2. Wymiar modelu | Sposób wyznaczania pola wiatru 1. Dostępność danych pomiarowych 2. Interpolacja danych 3. Wyznaczanie pola wiatru | Krok dyskretyzacji 1. Przestrzennej 2. Czasowej | 1. Przeznaczenie 2. Miejsce weryfikacji |
|---|--|--|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <p>1. ADPIC</p> <p>2. Lawrence Livermore Laboratory of California, USA /25, 28/</p> | <p>1. Hybrydowy /Cząsteczki emitowane ze źródła przemieszczają się pod wpływem pseudo-prędkości reprezentującej transport przez wiatr i dyfuzję turbulencyjną. Stężenie jest określone przez zliczanie liczby cząstek w komórce siatki obliczeniowej dla danej chwili czasowej/.</p> <p>2. Trójwymiarowy</p> | <p>1. Dane o prędkości i kierunku wiatru oraz stabilności atmosfery ze stacji naziemnych. Pionowe profile wiatru z sondaży aerologicznych.</p> <p>2. Poziomo: interpolacja z wagą $1/r^2$, gdzie r jest odległością od stacji pomiarowej. Pionowo: ekstrapolacja przy założeniu profilu potencjalnego ze współczynnikiem zależnym od stabilności atmosfery.</p> <p>3. Minimalizacja dywergencji pola wiatru.</p> | <p>1. Poziomo - 1 km pionowo -50 km</p> <p>2. 1 godzina</p> | <p>1. Symulacja rozprzestrzeniania się toksycznych zanieczyszczeń w terenie o różnicowanej rzeźbie w skali regionu.</p> <p>2. Stacja eksperymentalna w Idaho Falls, ID, USA /113J/</p> <p>-Zakłady Du Ponta w Aiken, SC, USA /41 Ar/</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|--|-----------------------------------|---|
| <p>1. IMPACT Science Appli- cations Inc., Westlake Villa- ge, CA, USA /28/</p> | <p>1. Eulerowski 2. Trójwymiarowy</p> | <p>jak ADPIC</p> | <p>1. Zadany 2. 1 godzina</p> | <p>1. Jako baza dla opraco- wania standardowych modeli dla służb kon- troli jakości powie- trza atmosferycznego. 2. -Obszar Garfield, UT, USA (SF₆) -Cobb Valey, Sonoma County, CA, USA (SF₆)</p> |
| <p>1. MESOGRID 2. Environmental Research and Technology Inc., Concord, MA, USA /28/</p> | <p>1. Eulerowski 2. Trójwymiarowy</p> | <p>1. Dane o prędkości i kierunku wiatru z sondaży aerologicz- nych wykonanych przez National Weather Ser- vice /NWS/. 2. Poziomo: interpolacja z wagą $1/r^2$, gdzie r jest odległością od punktu pomiarowego. Liniowa interpolacja w czasie pomiędzy terminami pomiarowy- mi. 3. Minimalizacja dywer- gencji pola wiatru.</p> | <p>1. Zadany 2. 1 godzina</p> | <p>1. Symulacja rozprze- strzeniania się za- nieczyszczeń ze źró- deł punktowych w skali regionu. 2. Obszar Four Corners, USA (SO₂, SO₄).</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|--|--|--|--|
| <p>1. MODKJEM</p> <p>2. Politechnika Warszawska /21/</p> | <p>1. Eulerowski /Dla symulacji początkowej fazy rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z wysockich źródeł punktowych zastosowano La.grangeowski model gaussofski. Równanie dyfuzji rozwiązywane jest w układzie Eulera dla każdej warstwy modelu osobno. Wymianę zanieczyszczeń między warstwami parametryzują odpowiednie strumienie zanieczyszczeń/.</p> <p>2. Dwuwymiarowy trójwarstwowy.</p> | <p>1. Dane o prędkości i kierunku wiatru z sondaży aerologicznych.</p> <p>2. Jednorodność w warstwie.</p> <p>3. Uśrednianie prędkości i kierunku wiatru w poszczególnych warstwach /model dyspersji zanieczyszczeń może pracować z modelem pola wiatru/.</p> | <p>1. Poziomo - zadany, pionowo - podział na trzy warstwy o zadanej grubości.</p> <p>2. 30 minut</p> | <p>1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza w obszarach zurbanizowanych.</p> <p>2. Eksperyment pomiarowy MONAT-84 w Krakowie (SO₂).</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| 1. PDM 2. System Applications Inc., San Rafael, CA, USA /28/ | 1. Eulerowski /Dla opisu rozprzeszczenia się zanieczyszczeń w pobliżu źródeł punktowych wykorzystuje się model Lagrangeowski - model obłoku. Dla opisu dalszej fazy dyspersji zanieczyszczeń równanie dyfuzji jest rozwiązywane w układzie Eulera/. 2. Trójwymiarowy | 1. Dane o prędkości i kierunku wiatru oraz stabilności atmosfery ze stacji naziemnych. Pionowe profile wiatru z sondażu aerologicznego. 2. Poziomo: interpolacja z wagą $1/r^2$, gdzie r jest odległością od stacji pionowej. Pionowo: jednorodność w warstwie. 3. Interpolacja. | 1. Poziomo - 1 km pionowo - 50 km 2. 1 godzina | 1. Symulacja rozprzeszczenia się zanieczyszczeń ze źródeł punktowych w obszarach zurbanizowanych. 2. Elektrownie Los Alamitos i Maynes w Los Angeles, CA, USA (SO_2, SO_4). |
| 1. URFOR 2. Instytut Badań Systemowych PAN /19, 43/ | 1. Lagrangeowski 2. Dwuwymiarowy jednowarstwowy | 1. Dane o wysokości wiatru, prędkości i kierunku wiatru geostroficznego oraz stabilności atmosfery wg prognozy meteorologicznej. 2. Poziomo: jednorodność w warstwie. Pionowo: aproksymacja zmian prędkości i kierunku wiatru z wysokością wg spirali Ekmana. 3. Minimalizacja dywergencji pola wiatru. | 1. Zadany 2. 30 minut | 1. Prognoza rozprzeszczenia się zanieczyszczeń dla potrzeb sterowania operacyjnego źródłami emisji w obszarze zurbanizowanym. 2. Eksperyment pomiarowy MONAT-84 w Krakowie (SO_2). |

2.3. Smugowe modele gaussowskie

Równanie dyfuzji turbulencyjnej /2.7/ może być znacznie uproszczone przez przyjęcie następujących założeń /44/:

- 1/ Pole stężenia jest ustalone w czasie: $\frac{\partial S}{\partial t} = 0$,
- 2/ Jedynym ruchem powietrza w dużej skali jest ruch poziomy z prędkością \bar{u} w kierunku osi x ,
- 3/ Nie ma objętościowych źródeł emisji: $I = 0$,
- 4/ Strumień adwekcyjny zanieczyszczeń wzdłuż kierunku wiatru jest dużo większy w porównaniu ze strumieniem turbulencyjnym: $\bar{u} \frac{\partial S}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)$,
- 5/ Współczynniki dyfuzji atmosferycznej nie zależą od wysokości nad powierzchnią ziemi.

Uwzględniając powyższe założenia równanie dyfuzji turbulencyjnej upraszcza się do postaci:

$$\bar{u} \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad /2.8/$$

Po wprowadzeniu zależności:

$$K_y = \frac{\bar{\sigma}_y^2}{2} \bar{u} \quad /2.9/$$

$$K_z = \frac{\bar{\sigma}_z^2}{2} \bar{u} \quad /2.10/$$

gdzie:

$\bar{\sigma}_y$ - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej,

$\bar{\sigma}_z$ - współczynnik dyfuzji atmosferycznej pionowej,

\bar{u} - średnia w warstwie rozprzestrzeniania się prędkość wiatru.

rozwiązanie równania /2.8/ prowadzi do grupy wzorów typu Pasquilla. Najprostszą formułą do określania stężeń zanieczyszczeń uzyskuje się rozwiązując wymienione równanie przy następujących warunkach granicznych:

1/ Punktowe źródło o emisji ciągłej w czasie, położone w punkcie /0,0,H/:

$$x \rightarrow 0, \quad S \rightarrow \frac{E}{u} \delta(z-H) \delta(y),$$

2/ Brak pochłaniania zanieczyszczenia przez podłoże:

$$z = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0,$$

3/ Brak górnej warstwy inwersyjnej:

$$z \rightarrow \infty, \quad S \rightarrow 0,$$

gdzie:

E - emisja zanieczyszczenia,

δ - symbol funkcji delta Diraca.

Uwzględnienie tych warunków prowadzi do formuły Pasquilla o postaci:

$$S(x, y, z) = \frac{E}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} / 2.11/$$

Występujące we wzorze współczynniki dyfuzji atmosferycznej σ_y , σ_z , w ujęciu podanym przez Pasquilla, były

określane w oparciu o wykresy przedstawiające ich wartości w funkcji stanu równowagi atmosfery i odległości od źródła emisji. Obecnie dla określenia wartości σ_y i σ_z stosuje się formuły analityczne.

Współczynniki dyfuzji atmosferycznej, od strony matematycznej, są odchyleniami standardowymi rozkładu normalnego stężenia zanieczyszczeń w smudze.

Formuła /2.11/ może być rozbudowana w celu uwzględnienia zjawisk takich jak wymywanie zanieczyszczeń, ich przemiana w atmosferze, pochłanianie zanieczyszczeń przez podłoże oraz odbicie smugi od górnej warstwy inwersyjnej. Zmodyfikowana formuła Pasquilla przyjmuje następującą postać:

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

/2.12/

gdzie:

- L - wysokość warstwy mieszania,
- $E(x)$ - funkcja opisująca zanik zanieczyszczeń w atmosferze na skutek przemian chemicznych, wymywanie przez opady atmosferyczne oraz pochłanianie zanieczyszczeń przez podłoże.

Funkcja $E(x)$ dana jest zależnością:

$$E(x) = E \exp \left\{ \left[- (k_1 + k_2) \frac{x}{\bar{u}} \right] + \right. \\ \left. - \sqrt{\frac{2}{j_1}} \frac{v_d}{\bar{u}} \int_0^x \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{H+2nL}{6z} \right)^2 \right] dx' \right\} / 2.13/$$

gdzie:

k_1 - współczynnik przemiany chemicznej zanieczyszczenia,

k_2 - współczynnik wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne,

v_d - prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia.

Przegląd smugowych modeli gaussowskich przedstawiono w tabelicy 2.2. Dla poszczególnych modeli podano krótką charakterystykę, przeznaczenie, status formalny oraz miejsce weryfikacji. Jako parametry charakteryzujące model przyjęto: rodzaj źródeł emisji, okres uśredniania stężeń, sposób wyznaczania wyniesienia smugi, prędkości wiatru, stanu równowagi atmosfery i współczynników dyfuzji atmosferycznej oraz uwzględnienie procesów zaniku zanieczyszczeń w atmosferze.

Tab.2.2. Wybrane smugowe modele gaussowskie

| | | |
|---|--|---|
| <p>1. Nazwa modelu</p> <p>2. Ośrodek autor- ski</p> | <p>Charakterystyka modelu</p> <ol style="list-style-type: none"> Rodzaj źródeł emisji Okres uśredniania stężeń Wyniesienie smugi Pole wiatru Klasy równowagi atmosfery Współczynniki dyfuzji atmosferycznej Uwzględnione procesy zaniku zanieczyszczenia w atmosferze | <p>1. Przeznaczenie</p> <p>2. Status formalny</p> <p>3. Miejsce weryfikacji</p> |
| <p>1. AQSTM</p> <p>2. Illinois Environmental Protection Agency, Springfield, IL, USA /28/</p> | <p>2</p> <ol style="list-style-type: none"> Źródła punktowe (do 200) Od 1 do 24 godzin Formuła Briggsa Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego ze współczynnikami wg Suttona Klasy równowagi wg Pasquilla-Gifforda-Turnera (PGT) Aproksymacja współczynników dyfuzji Pasquilla-Gifforda (PG) wg IEPA. Poprawka Turnera na czas uśredniania. Nie uwzględnia się | <p>3</p> <ol style="list-style-type: none"> Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w obszarze wybrzeża Nieoficjalny - |
| <p>1. ATMO</p> <p>2. Zakład Ochrony Atmosfery, Politechnika Warszawska /52/</p> | <p>1</p> <ol style="list-style-type: none"> Źródła punktowe 30 minut, 1 godzina, 24 godziny, 1 rok Dla źródeł o emisji ciepła $Q \leq 20$ MJ/s formuła Hollanda, dla pozostałych formuła CONCAWE Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego Klasy równowagi wg metody IMGW Współczynniki dyfuzji wg Nowickiego Nie uwzględnia się | <ol style="list-style-type: none"> Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze źródeł punktowych Zatwierdzony przez MAGTOS jako obowiązujący w Polsce do obliczeń rutynowych Eksperymenty pomiarowe w Piascznie /42/, Krakowie /40/ i Głogowie/12/ (SF₆) |

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|--|
| 1. GEM 2. Science Applications Inc., Westlake Village, CA, USA /28/ | 1. Źródło punktowe 2. 1 godzina 3. Użytkownik podaje jedną z opcji: - formuły Briggsa - formuły Montgomerego 4. Model numeryczny pola wiatru WEST 5. Klasy równowagi wg PGT 6. Użytkownik podaje jedną z opcji: - specyfikacja wg użytkownika - aproksymacja współczynników dyfuzji PG wg krzywych Turnera - współczynniki dyfuzji wg Pasquilla 7. Przemiana chemiczna | 1. Jako baza dla oceny innych modeli dyspersji zanieczyszczeń w obszarach zurbanizowanych 2. Nieoficjalny 3. - Elektrownia w Garfield, UT, USA (SO ₂) - Elektrownia Moss Landing w pobliżu Monterey, CA, USA (SO ₂) - Elektrownia w Ormond Beach, CA, USA (SO ₂) |
| 1. MPTER 2. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA /20,28/ | 1. Liczbę źródeł punktowych podaje użytkownik 2. Od 1 do 24 godzin 3. Formuły Briggsa 4. Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego 5. Klasy równowagi wg PGT 6. Aproksymacja współczynników dyfuzji PG wg krzywych Turnera 7. Przemiana chemiczna | 1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze źródeł punktowych w terenie otwartym 2. Nieoficjalny 3. - |



| 1 | 2 | 3 |
|--|---|--|
| <p>1. OML</p> <p>2. Danish Air Pollution Laboratory Risø, Dania /2/</p> | <p>1. Źródło punktowe</p> <p>2. 1 godzina</p> <p>3. Formuły Briggsa z 1975 r. Uwzględnienie kryteriów Briggsa z 1980 r. na penetrację smugi w warstwie inwersyjną</p> <p>4. W warstwie przyziemnej profil prędkości wiatru wyznaczony w oparciu o teorię Monina-Obuchowa. Powyżej prędkość wiatru stała z wysokością</p> <p>5. Ciągła klasyfikacja stabilności atmosfery w oparciu o parametry warstwy granicznej</p> <p>6. Formuły uzależniające współczynniki dyfuzji od parametrow warstwy granicznej. Oddzielnie uwzględniono wpływ turbulencji generowanej mechanicznie i przez konwekcję. Uwzględnienie poprawki Pasquilla na turbulencję wewnątrz gorącej smugi oraz poprawki na pionowy ruch smugi zanieczyszczeń.</p> <p>7. Nie uwzględnia się</p> | <p>1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z wysokich źródeł punktowych</p> <p>2. Nieoficjalny</p> <p>3. -Praire Grass Experiment, USA (SO₂)</p> <p>-Kopenhaga, Dania (SF₆)</p> <p>-Cabauw, Holandia (SF₆)</p> <p>-Elektrownia w Kincaid, IL, USA (SF₆)</p> |
| <p>1. PAL</p> <p>2. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, USA /20, 28/</p> | <p>1. Źródła: punktowe, powierzchniowe, liniowe i nieliniowe poziome, liniowe i nieliniowe o specjalnym przebiegu (do 30 źródeł każdego rodzaju)</p> <p>2. Od 1 do 24 godzin</p> <p>3. Dla źródeł punktowych formuły Briggsa, dla pozostałych brak wyniesienia</p> <p>4. Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego ze współczynnikami wg Petersona</p> <p>5. Klasy równowagi wg FGT</p> <p>6. Początkowe współczynniki dyfuzji wg Hubera. Aproksymacja współczynników dyfuzji PG wg krzywych Turnera z uwzględnieniem początkowych σ_{yo}, σ zo</p> <p>7. Nie uwzględnia się</p> | <p>1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń niereaktywnych z różnego rodzaju źródeł emisji</p> <p>2. Nieoficjalny</p> <p>3. -</p> |

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|---|
| 1. PPS 2. Environmental Center, Baltimore, MD, USA /51/ | 1. Źródło punktowe 2. 1 godzina 3. Formuły Briggsa z 1975 r. uwzględnienie kryteriów Briggsa z 1980 r. na penetrację smugi w warstwie inwersyjną 4. Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego 5. Klasy równowagi wg PGT wyznaczone w oparciu o parametry warstwy granicznej 6. Współczynniki dyfuzji wg Briggsa. Uwzględnienie poprawki Pasquilla na turbulencję wewnątrz gorącej smugi gazów 7. Nie uwzględnia się | 1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z wysokich źródeł punktowych w płaskim terenie 2. Nieoficjalny 3. Elektrownie w Maryland, USA (SO ₂) |
| 1. RAM 2. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA /20, 28/ | 1. Liczbę źródeł punktowych i powierzchniowych podaje użytkownik 2. Od 1 do 24 godzin 3. Formuły Briggsa 4. Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego 5. Klasy równowagi wg PGT 6. Dla obszarów zurbanizowanych współczynniki dyfuzji Briggsa, dla terenów otwartych aproksymacja współczynników dyfuzji PG wg Bussa i Zimmermana 7. Przemiana chemiczna | 1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze źródeł punktowych w obszarach zurbanizowanych lub w terenach otwartych 2. Zatwierdzony przez U.S. EPA 3. -Michigan City, IN, USA (SO ₂) -Indianapolis, IN, USA (SO ₂) -Wayne County, MI, USA (SO ₂) |
| 1. TEM 2. Texas Air Control Board, Austin, TX, USA /28/ | 1. Źródła punktowe (do 200) i źródła powierzchniowe (do 200) 2. 10 min, 30 min, 1 godz., 3 godz., 4 godz., 24 godz 3. Formuły Briggsa 4. Ekstrapolacja prędkości wiatru wg profilu potęgowego ze współczynnikami wg PGT 5. Klasy równowagi wg PGT 6. Aproksymacja współczynników dyfuzji PG wg Bussa i Zimmermana. Poprawka Turnera dla czasów uśrednienia dłuższych niż 3 minuty 7. Przemiana chemiczna | 1. Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze źródeł energetycznych 2. Zatwierdzony przez U.S. EPA 3. - |

2.4. Rozszerzone modele gaussowskie

Poniżej przedstawiono ważniejsze rozszerzone smugowe modele gaussowskie uwzględniające czasową zmienność parametrów emisji, zróżnicowanie terenu oraz zmienność warunków meteorologicznych w czasie transportu zanieczyszczeń od emitora do punktu recepcyjnego.

K.J. Vogt i wsp. z Kernforschungsanlage Jülich GmbH w RFN /48, 50/ opracowali model, który uwzględnia zmianę stanu równowagi atmosfery i prędkość wiatru w kolejnych przedziałach czasu Δt . Kierunek wiatru pozostaje stały.

W modelu rozpatrywane jest źródło punktowe o emisji ciągłej w czasie. "Śledzone" są zanieczyszczenia emitowane na początku poszczególnych przedziałów Δt . W kolejnych chwilach $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ dla $i = 1, 2, 3, \dots, n$ - gdzie t_0 jest momentem wyrzutu "śledzonych" zanieczyszczeń - rozważa się przepływ zanieczyszczeń przez płaszczyznę prostopadłą do osi smugi przechodzącą przez czoło smugi. Określa się strumienie zanieczyszczeń przepływające przez nieskończenie małe elementy tej płaszczyzny. W chwili t_{i+1} strumienie te traktowane są jako wyrzuty zanieczyszczeń z elementarnych źródeł punktowych. Stężenie zanieczyszczenia wyznaczane jest przez całkowanie udziałów wszystkich elementarnych źródeł punktowych.

Przyjmując, że zmiana warunków meteorologicznych zaszła $n-1$ razy, stężenie zanieczyszczenia w punkcie (x, y, z) dla $x_{n-1} \leq x < x_n$, w przedziale czasu Δt_n ,

określane jest z formuły Pasquilla /2.11/, w której współczynniki dyfuzji σ_y , σ_z zastąpiono efektywnymi współczynnikami dyfuzji $\sigma_{y,ef}$, $\sigma_{z,ef}$.

Wartości efektywnych współczynników dyfuzji atmosferycznej w chwili t , dla $t_{n-1} \leq t < t_n$, zależą wyłącznie od wartości tych parametrów w chwili t_{n-1} oraz aktualnych przyrostów w czasie $t - t_{n-1}$:

$$\sigma_{ef}^2(t) = \sigma_{ef}^2(t_{n-1}) + \Delta[\sigma^2(t - t_{n-1})] \quad /2.14/$$

przy czym:

$$\Delta[\sigma^2(t - t_{n-1})] = \sigma^2(t) - \sigma^2(t_{n-1}) \quad /2.15/$$

gdzie:

$\sigma_{ef}(t)$, $\sigma_{ef}(t_{n-1})$ - efektywne współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej odpowiednio w chwili t , t_{n-1} .

W modelu przyjmuje się:

$$\Delta[\sigma^2(t - t_{n-1})] = c_n^2 (x^{2c_n} - x_{n-1}^{2c_n}) \quad /2.16/$$

gdzie:

c_n , c_n - stałe zależne od stanu równowagi atmosfery w przedziale czasu Δt_n , różne dla współczynnika dyfuzji atmosferycznej poziomej i pionowej.

Wielkości x_n , x wyznacza się korzystając z zależności:

$$x_n = x_{n-1} + \bar{u}_n \Delta t \quad /2.17/$$

$$x = x_{n-1} + \bar{u}_n (t - t_{n-1}) \quad /2.18/$$

gdzie:

$$x_0 \equiv 0,$$

\bar{u}_n - średnia prędkość wiatru w przedziale czasu Δt_n .

Model Vogta nie był weryfikowany w oparciu o dane doświadczalne. Przeprowadzono jedynie porównanie wyników modelu z wynikami smugowego modelu gaussowskiego dla stanu ustalonego /50/.

M. Bennett z Central Electricity Research Laboratories w Leatherhead w Wielkiej Brytanii /1/ zaproponował adaptację smugowego modelu gaussowskiego dla warunków zróżnicowanego przestrzennie pola wiatru i pola turbulencji.

W modelu zakłada się, że w każdym przedziale czasu źródło emituje łatwą do identyfikacji cząstkę, która przemieszcza się zgodnie z lokalnym kierunkiem wiatru. W ten sposób wyznaczana jest trajektoria smugi. Stężenie zanieczyszczenia w smudze podlega rozkładowi normalnemu. Każda cząstka "pamięta" natężenie emisji zanieczyszczenia oraz pionowe i poziome rozproszenie smugi. Te ostatnie

zwiększają się wraz z odległością cząstek od źródła emisji w stopniu zależnym od warunków lokalnych.

Bennett określał pola wiatru i turbulencji w sieci 5 km x 5 km. Dostateczne wygładzenie interpolacji parametrów smugi dla dowolnego punktu recepcyjnego otrzymał "śledząc" cząstki na odcinku $\Delta l = 9,5$ km.

W modelu, do wyznaczania współczynników dyfuzji atmosferycznej w mieście przyjęto eksperymentalne formuły CEEB postaci:

$$\sigma_z^2 = \beta l \quad /2.19/$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_z^2 + \sigma^2 l^2, \quad /2.20/$$

gdzie:

- β - parametr rozproszenia smugi na wysokości jej osi, określany na podstawie wcześniej wyznaczonych parametrów meteorologicznych,
- σ - współczynnik empiryczny zależny od prędkości wiatru na wysokości osi smugi,
- l - długość drogi transportu zanieczyszczenia od źródła emisji do receptora.

Uwzględniając /2.19/, /2.20/, przyrosty współczynników dyfuzji atmosferycznej na odcinku Δl określano wg zależności:

$$\Delta(\sigma_z^2) = \beta \Delta_1 \quad /2.21/$$

$$\Delta(\sigma_y^2) = \beta \Delta_1 + 2\beta(\sigma_y^2 - \sigma_z^2)^{0,5} \Delta_1 + \sigma^2 \Delta_1^2 \quad /2.22/$$

Wielkości β i σ przyjmują wartości lokalne. W szczególności β powyżej warstwy mieszania wynosi zero.

Wyniesienie smugi określano wg formuły Moora i Lucasa. Stężenie zanieczyszczenia wyznaczano przy wykorzystaniu formuły gaussowskiej uwzględniającej wielokrotne odbicia od górnej warstwy inwersyjnej.

Model Bennetta został zastosowany w warunkach podniesienia warstwy inwersyjnej nad obszarem zurbanizowanym /Londyn/. Wyniki modelu wykazują zgodność z pomiarami /1/.

M.W. Chan i wsp. z AeroVironment Incorporation w Pasadena w USA /7/ adaptowali smugowy model gaussowski dla zmiennego przestrzennie i czasowo pola wiatru i pola turbulencji w terenie o zróżnicowanej rzeźbie. Model znany jest pod nazwą AVACTA I.

W modelu rozważa się emisję zanieczyszczeń z punkowego źródła, ciągłą w czasie. Trajektoria smugi w danym przedziale czasu Δt wyznaczana jest przez śledzenie "cząstek" powietrza, które przeszły ponad źródłem. Smuga dzielona jest na segmenty. Długość odcinka smugi powstałego w danym przedziale czasu określana jest przez odległość transportu zanieczyszczeń od źródła w tym przedziale.

Każdy kolejny segment smugi obserwowanej wzdłuż trajektorii począwszy od źródła emisji jest o Δt "starszy" od poprzedniego. Każdy odcinek smugi w następujących po sobie przedziałach czasu podlega działaniu różnych warunków meteorologicznych i terenowych. Aktualny stan smugi jest określany przez poprzeczny przekrój smugi. Stężenie zanieczyszczenia w smudze podlega rozkładowi normalnemu.

Zmiana współczynników dyfuzji atmosferycznej w przedziale czasu $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ uwzględniana jest w modelu jak następuje:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_i &= \bar{\sigma}_{i-1} + \frac{d\bar{\sigma}}{dt} \Delta t = \\ &= \bar{\sigma}_{i-1} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial l} \Big|_{l=l_{i-1}} \bar{u}_i \Delta t + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \Big|_{t=t_{i-1}} \Delta t = \\ &= \bar{\sigma}_{i-1} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial l} \Big|_{l=l_{i-1}} \bar{u}_i \Delta t \quad /2.23/\end{aligned}$$

gdzie:

$\bar{\sigma}_i, \bar{\sigma}_{i-1}$ - współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej odpowiednio w chwili t_i, t_{i-1} ,

\bar{u}_i - średnia prędkość wiatru w przedziale czasu Δt_i ,

l - długość drogi transportu zanieczyszczenia od źródła emisji do receptora.

Uwzględniając, że w przedziale czasu Δt obowiązuje założenie o stanie ustalonym, przyjmuje się $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = 0$. Wielkość $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial l}$ wyznaczana jest przez zróżniczkowanie względem l zależności opisujących współczynniki dyfuzji atmosferycznej $\bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z$. Wartości $\bar{\sigma}_y$ określa się ze wzoru:

$$\bar{\sigma}_y = 0,009 \cdot l \left(\bar{\sigma}_\theta^2 + \Delta_\theta^2 \right)^{0,5} \left(1 + 0,0003 \cdot l \right)^{0,5} \quad /2.24/$$

Współczynnik $\bar{\sigma}_z$ dla stanów równowagi atmosfery A, B, C, D, E wg klasyfikacji Pasquilla-Gifforda-Turnera /PGT/, opisuje zależność:

$$\bar{\sigma}_z = v_0 + 0,45 z_0^{0,13} u^{-0,475} \bar{\sigma}_\theta^{0,5} \left(1 + 0,0003 \cdot l \right)^{m_1} \quad /2.25a/$$

zaś dla stanów równowagi atmosfery F, G wg klasyfikacji PGT, wzór:

$$\bar{\sigma}_z = v_0 + 0,46 z_0^{0,21} u^{-0,39} \bar{\sigma}_\theta^{0,5} \left(1 + 0,0003 \cdot l \right)^{m_2} \quad /2.25b/$$

gdzie:

$$m_1 = 0,860 - \exp \left(-0,03 \bar{\sigma}_\theta \right)$$

$$m_2 = 0,928 - \exp \left(-0,03 \bar{\sigma}_\theta \right)$$

$\bar{\sigma}_\theta, \Delta_\theta$ - współczynniki określające poziomą fluktuację i meandrowanie kierunku wiatru,

v_0 - początkowa prędkość smugi,

z_0 - współczynnik szorstkości podłoża.

Pole wiatru dla potrzeb modelu określane jest w trójwymiarowej sieci wg metody Sklarewa i Wilsona /7/. Wyniesienie smugi wyznaczone jest w oparciu o zmodyfikowane przez Turnera w 1973 r. formuły Briggsa /17/. Stężenie zanieczyszczeń opisuje podstawowa formuła Pasquilla.

Model AVACTA I został zweryfikowany przy wykorzystaniu danych z eksperymentu w złożonym terenie z użyciem substancji znacznikowej SF₆. Uzyskano dobrą zgodność między wartościami obliczonymi przez model i pomiarowymi. Jak wynika z dyskusji przeprowadzonej na Konferencji NATO/CCMS, zorganizowanej w październiku 1974 r. w Rzymie, dobrą zgodność obliczeń z wynikami pomiarów uzyskano jedynie dla przypadków, w których dysponowano danymi meteorologicznymi z dostatecznie gęstej sieci stacji pomiarowych /7/.

Rozwinięciem modelu Chany jest model opracowany przez P. Zanettiego i wsp. w 1985 r. nazwany AVACTA II /54/. Model ten łączy zalety segmentowego modelu smugowego i modelu "obłoku" opisanego w szeregu prac /23,30,31,32,46/.

W modelu Zanettiego smuga dzielona jest na elementy - segmenty lub obłoki - zależnie od stosunku długości elementu Δl do współczynnika dyfuzji poziomej σ_y . Dla segmentu przyjmuje się: $\Delta l / \sigma_y > 2$, dla obłoku $\Delta l / \sigma_y \leq 2$. Wartość σ_y rośnie w czasie transportu zanieczyszczeń, stąd każdy segment smugi potencjalnie może "zamienić się" w obłok. W warunkach słabych wiatrów,

zanieczyszczenia emitowane są ze źródła bezpośrednio w postaci obłoków.

Według autorów modelu, zastosowane rozwiązanie winno zapewniać równocześnie dużą szybkość obliczeń i realistyczny opis rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warunkach słabych wiatrów.

Model AVACTA II był weryfikowany w oparciu o dane z eksperymentów z substancją znacznikową SF₆ w Turbigo we Włoszech. Wyniki symulacji dyspersji zanieczyszczeń w warunkach słabych wiatrów wykazują zawyżanie wartości stężeń.

Przedstawiony powyżej przegląd prac nad rozszerzonymi modelami gaussowskimi potwierdza możliwość adaptacji smugowego modelu gaussowskiego dla zmiennych warunków terenowych i meteorologicznych. Wyniki symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń przy zastosowaniu tych modeli upewniły autorkę odnośnie celowości podjęcia prac, których założenia przedstawiono w rozdziale 3.

3. SFORMULOWANIE MODELU

3.1. Podstawowe założenia

Opracowany model przeznaczony jest do obliczania przestrzennego rozkładu stężeń zanieczyszczeń powietrza, emitowanych przez zespół emitorów punktowych, przy uwzględnieniu czasowej zmienności parametrów emisji i warunków meteorologicznych oraz zmienności warunków terenowych na drodze transportu zanieczyszczeń.

Wyznaczane przy użyciu modelu średnie wartości stężeń odnoszą się do pojedynczego "epizodu meteorologicznego". Epizod meteorologiczny definiowany jest jako przedział czasu Δt , w którym przyjmuje się stacjonarność parametrów emisji i warunków meteorologicznych. Jako typowe wartości dla Δt przyjmuje się 30 minut lub 1 godzinę.

Model przeznaczony jest do określania rozkładów stężeń zanieczyszczeń w średniej skali przestrzennej, tj. w promieniu kilkudziesięciu kilometrów od źródła emisji.

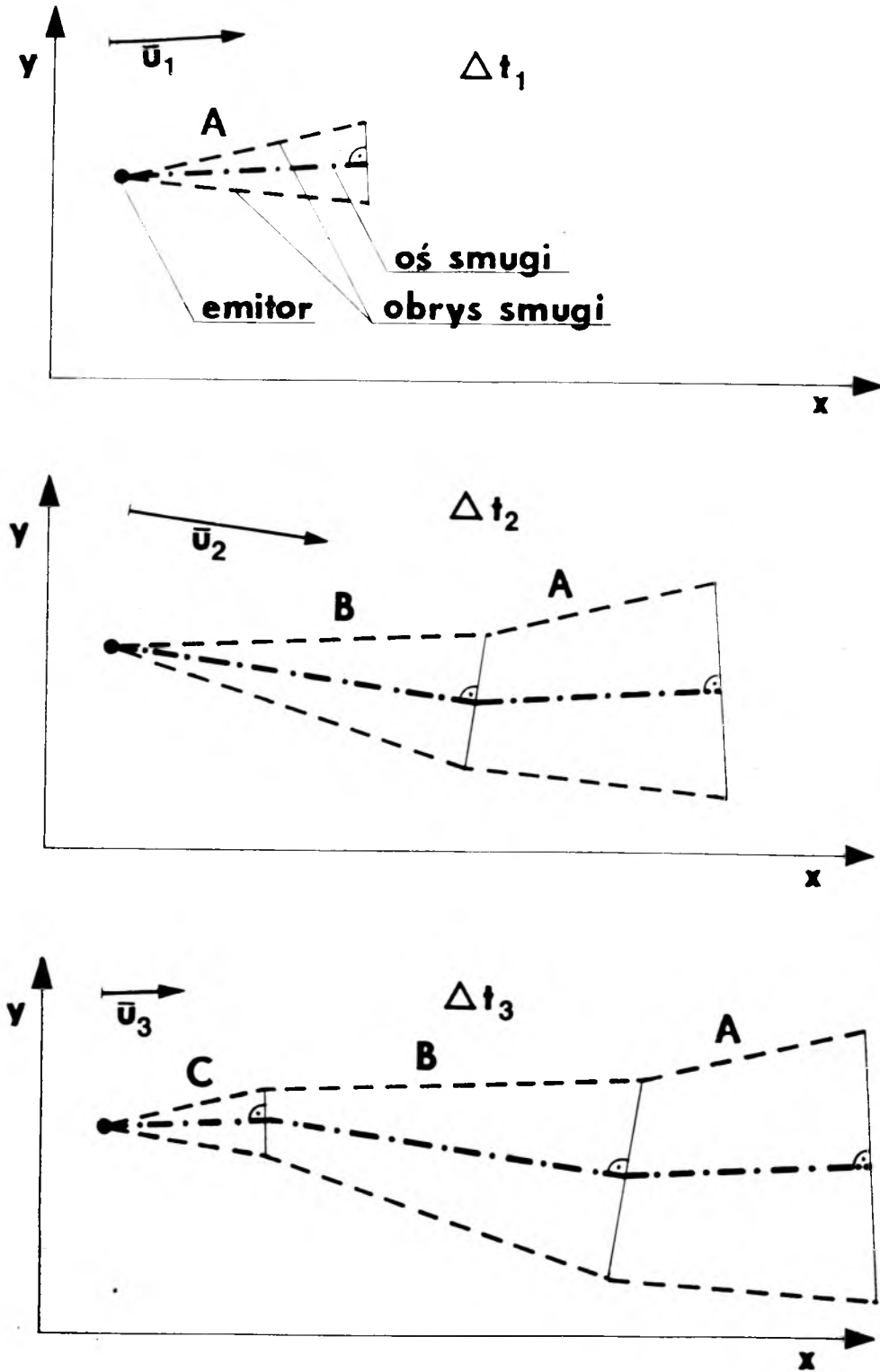
Przy opracowaniu modelu wykorzystano ideę smugowego modelu gaussowskiego. Przyjęto przy tym następujące założenia:

1/ Warunki meteorologiczne są jednorodne przestrzennie.

Zmiana warunków w czasie następuje w sposób skokowy

dla kolejnych epizodów meteorologicznych. Czasowej zmianie podlegają: stan równowagi atmosfery, wysokość warstwy mieszania, prędkość i kierunek wiatru, rodzaj i natężenie opadów atmosferycznych.

- 2/ Natężenie emisji zanieczyszczenia ze źródła i parametry wyrzutu zmieniają się w czasie analogicznie do warunków meteorologicznych, tzn. w sposób skokowy dla kolejnych epizodów meteorologicznych.
- 3/ Zanieczyszczenia emitowane z punktowego źródła emisji w przedziale czasu Δt tworzą segment smugi, którego długość zależy od prędkości wiatru w rozpatrywanym epizodzie meteorologicznym. Wysokość położenia osi segmentu jest określona przez wysokość pozornego punktu emisji. Kierunek osi segmentu jest zgodny z aktualnym kierunkiem wiatru. Rozkłady stężeń w przekroju smugi mają charakter gaussowski.
- 4/ Długość i wysokość położenia oraz kierunek osi danego segmentu nie ulegają zmianie w kolejnych przedziałach czasu. Na drodze transportu od emitora do receptora rosną poprzeczne wymiary segmentu. W każdym przedziale czasu przeprowadzana jest translacja wszystkich istniejących segmentów smugi. Długość wektora translacji jest równa długości segmentu smugi, powstałego w rozpatrywanym przedziale czasu Δt . Kierunek wektora zgodny jest z kierunkiem wiatru w tym przedziale. Położenie osi smugi w kolejnych przedziałach czasu Δt ilustruje rysunek 1.



Rys.1. Położenie smugi w kolejnych przedziałach czasu Δt . A, B, C - segmenty smugi utworzone w przedziałach czasu odpowiednio: $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$.

- 5/ Przy istnieniu górnej inwersji temperatury, zanieczyszczenia emitowane do atmosfery poniżej warstwy inwersji są od niej całkowicie odbijane.
- 6/ Obecne w atmosferze zanieczyszczenia nie ulegają kompresji pod wpływem obniżania się górnej warstwy inwersyjnej. Unoszenie się warstwy inwersyjnej umożliwia ich dalsze rozprzestrzenianie się w pionie.
- 7/ W warunkach istnienia górnej inwersji temperatury, w pewnej odległości od źródła następuje jednorodne wymieszanie zanieczyszczeń. Cecha ta zostaje zachowana w trakcie dalszej wędrówki zanieczyszczeń, przy czym przy unoszeniu się warstwy inwersyjnej, zanieczyszczenia wypełniają jednorodnie całą warstwę.
- 8/ Zanieczyszczenia mogą ulegać w atmosferze: zanikowi w wyniku przemiany chemicznej, wymywaniu przez opady atmosferyczne i pochłanianiu przez podłoże.
- 9/ Zróżnicowanie terenu uwzględniane jest przez wprowadzenie zmiennych przestrzennie: współczynnika szorstkości podłoża z_0 i prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia v_d .
- 10/ Stężenie zanieczyszczenia w każdym wyodrębnionym przedziale czasu Δt opisuje formuła Pasquilla, rozszerzona o elementy uwzględniające: przemianę chemiczną zanieczyszczenia, jego wymywanie przez opady atmosferyczne, pochłanianie zanieczyszczenia przez podłoże oraz odbicia smugi od górnej warstwy inwersyjnej. Występujące w równaniu parametry mają tę samą interpretację fizyczną co w smugowym modelu gaussowskim.

Każdy segment definiują następujące parametry:

- współrzędne początku segmentu,
- długość segmentu,
- wysokości położenia osi segmentu dla jego początku i końca,
- współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej i pionowej dla początku segmentu,
- współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej i pionowej dla końca segmentu,
- wysokości warstwy mieszania dla początku i końca segmentu,
- prędkości wiatru dla początku i końca segmentu uśrednione w warstwie od powierzchni podłoża do osi segmentu,
- "wirtualne natężenie emisji" zanieczyszczenia ze źródła, to jest natężenie emisji zanieczyszczenia ze źródła zmniejszone na skutek przemiany chemicznej zanieczyszczenia, jego wymywania przez opady atmosferyczne oraz pochłaniania przez podłoże.

Opracowany model spełniający powyższe założenia nazwano SPM /Segmented Plume Model/.

3.2. Matematyczne podstawy modelu

3.2.1. Etapowość wyznaczania przestrzennego rozkładu stężenia zanieczyszczenia

Określanie przestrzennego rozkładu stężenia zanieczyszczenia dla rozpatrywanego epizodu meteorologicznego od

pojedynczego punktowego źródła emisji przeprowadzane jest w trzech etapach. W pierwszym etapie wyznaczana jest liczba epizodów meteorologicznych, które należy wziąć pod uwagę w obliczeniach. Uwzględniany jest epizod meteorologiczny rozpatrywany oraz epizody wcześniejsze. Etap drugi obejmuje "definiowanie smugi", to jest określanie parametrów segmentów smugi. W etapie trzecim wykonywane są właściwe obliczenia, tj. wyznaczane są stężenia zanieczyszczenia w zadanych punktach recepcyjnych.

3.2.2. Określanie obszaru obliczeniowego

Obszar obliczeniowy określany jest w prostokątnym układzie współrzędnych $/x,y,z/$, w którym oś x skierowana jest na wschód, oś y na północ a oś z pionowo ku górze.

3.2.3. Wyznaczanie liczby epizodów meteorologicznych, uwzględnianych w obliczeniach dla pojedynczego źródła emisji

Liczba epizodów meteorologicznych n , które należy uwzględnić w obliczeniach, zależy od: położenia źródła emisji względem obszaru obliczeniowego, kierunku i prędkości wiatru dla przedziału czasu Δt , dla którego wyznaczany jest rozkład stężeń oraz od wartości tych parametrów dla epizodów wcześniejszych.

Algorytm obliczeniowy polega na rozpoczynaniu "śledzenia smugi", to jest na określaniu położenia trajektorii smugi w momencie czasowym odpowiadającym $k=0,1,2\dots$

epizodom wstecz w stosunku do epizodu dla którego wyznaczony jest rozkład stężeń a następnie sprawdzeniu czy smuga, składająca się odpowiednio z $k+1$ segmentów, obejmuje obszar obliczeniowy. Przyjmuje się, że obszar obliczeniowy ma kształt prostokąta.

Położenie końca smugi złożonej z $k+1$ segmentów, tzn. w $k+1$ -szym kroku czasu jej śledzenia, określają zależności:

$$x_{ks,k+1} = x_e + \sum_{i=1}^{k+1} (\Delta l_i \sin \alpha_i) \quad /3.1/$$

$$y_{ks,k+1} = y_e + \sum_{i=1}^{k+1} (\Delta l_i \cos \alpha_i) \quad /3.2/$$

gdzie:

- $x_{ks,k+1}, y_{ks,k+1}$ - współrzędne końca osi smugi w $k+1$ -szym kroku czasu jej śledzenia / m /,
- x_e, y_e - współrzędne źródła emisji / m /,
- Δl_i - długość segmentu smugi powstałego w i -tym kroku czasu jej śledzenia / m /,
- α_i - kąt między osią y a kierunkiem wiatru zmierzonym zgodnie z ruchem wskazówek zegara w i -tym kroku czasu śledzenia smugi / stopnie /.

Smuga obejmuje cały obszar obliczeniowy /tzn. $n \equiv k+1$ /, jeśli spełniony jest warunek:

$$d_{ks,k+1} \leq 0 \quad \text{dla } w = 1, 2, 3, 4 \quad /3.3/$$

gdzie:

$$d_{ks,k+1} = (x_w - x_{ks,k+1}) \sin \alpha_{k+1} + (y_w - y_{ks,k+1}) \cos \alpha_{k+1}$$

x_w, y_w - współrzędne w -tego wierzchołka prostokąta /obszaru obliczeniowego/ / m /,

3.2.4. Podział smugi na segmenty

Współrzędne początku danego segmentu w każdym kolejnym kroku czasu śledzenia smugi określone są z zależności:

$$x_{ps,i+1} = x_{ps,i} + \Delta l_{i+1} \sin \alpha_{i+1} \quad /3.4/$$

$$y_{ps,i+1} = y_{ps,i} + \Delta l_{i+1} \cos \alpha_{i+1} \quad /3.5/$$

gdzie:

$x_{ps,i+1}, y_{ps,i+1}$ - współrzędne początku danego segmentu w $i+1$ -szym kroku czasu śledzenia smugi / m /,

$x_{ps,i}, y_{ps,i}$ - współrzędne początku danego segmentu w i -tym kroku czasu śledzenia smugi / m /.

Dla przedziału czasu Δt , w którym dany segment jest tworzony, przyjmuje się: $x_{ps} \equiv x_e, y_{ps} \equiv y_e$.

3.2.5. Długość segmentu smugi

Długość segmentu smugi Δl określana jest z zależności:

$$\Delta l = u_H \Delta t \quad /3.6/$$

gdzie:

u_H - prędkość wiatru na wysokości H / m/s /,

H - wysokość pozornego punktu emisji / m /,

Δt - czas trwania epizodu meteorologicznego / s /.

Zmiana prędkości wiatru z wysokością może być opisana wzorem logarytmicznym lub potęgowym. W modelu przyjęto, że prędkość wiatru rośnie potęgowo z wysokością:

$$u_z = u_a \left(\frac{z}{h_a} \right)^m \quad /3.7/$$

gdzie:

u_z - prędkość wiatru na wysokości z / m/s /,

u_a - prędkość wiatru na wysokości h_a / m/s /,

h_a - wysokość anemometru / m /,

m - stała zależna od stanu równowagi atmosfery.

Zgodnie z literaturą /34/ wzór ten lepiej opisuje profil wiatru w warstwie o grubości większej niż 100 m.

Długość j -tego segmentu, licząc od źródła emisji w n -tym kroku czasu śledzenia smugi, wyznaczana jest przy wykorzystaniu danych z epizodu / $n-j+1$ /.

Wartości m przyjęte w modelu podaje tablica 3.1.

Tab. 3.1. Wartości parametru m przyjęte w modelu wg Nowickiego /39/

| Stan równowagi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m | 0,080 | 0,143 | 0,196 | 0,270 | 0,363 | 0,440 |

3.2.6. Wysokość położenia osi segmentu

Wysokość położenia osi segmentu jest określona przez wysokość pozornego punktu emisji H .

$$H = h + \Delta h \quad / \text{ m } / \quad /3.8/$$

gdzie:

h - wysokość geometryczna komina / m /,

Δh - wyniesienie gazów / m /.

Na podstawie analizy formuł na wyniesienie smugi, przedstawionej w rozdziale 3.3, do wyznaczania Δh dla emitorów o emisji ciepła nie przekraczającej 20 /MJ/s / przyjęto wzór Hollanda /37/:

$$\Delta h = (1,5 v_g d + 0,00974 Q) c \cdot u_h^{-1} \quad /3.9/$$

zaś dla emitorów o większej emisji ciepła wzór CONCAWE /5/:

$$\Delta h = 1,44 Q^{0,55} u_h^{-0,67} \quad /3.10/$$

gdzie:

v_g - prędkość gazów na wylocie z komina / m/s /,

d - wewnętrzna średnica przewodu emitującego zanieczyszczenia / m /,

Q - emisja ciepła z komina / kJ/s /,

c - współczynnik we wzorze Hollanda,

u_h - prędkość wiatru na wysokości h / m /.

W obu formułach dla $v_g \leq 0,5 h^{0,6}$ przyjmuje się:
 $\Delta h = 0$.

Wartości współczynnika c , przyjęte w modelu dla wzoru Hollanda podaje tabela 3.2.

Tab. 3.2. Wartości współczynnika c przyjęte w modelu wg Hollanda cyt. za Mosesem i Kraimerem /37/

| Stan równowagi atmosfery | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| c | 1,2 | 1,15 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |

Dany segment smugi charakteryzują wysokości położenia osi segmentu dla początku i końca segmentu. W modelu, parametr H jest określany dla końca każdego segmentu smugi. Wartość H dla końca segmentu jest równocześnie wartością tego parametru dla początku następnego segmentu.

Przy wyznaczaniu wysokości położenia osi segmentu dla jej końca wykorzystywane są dane z epizodu meteorologicznego, w którym segment smugi był tworzony. Oznacza

to, że w n-tym kroku czasu śledzenia smugi wysokość pozornego punktu emisji dla końca j-tego segmentu, licząc od źródła emisji, jest określona przy użyciu danych z /n-j+1/ tego kroku. Przyjmuje się, że wysokość położenia osi smugi dla początku segmentu najbliższego źródłu jest równa wartości tego parametru dla końca segmentu.

3.2.7. Współczynniki dyfuzji atmosferycznej

Na podstawie analizy formuł do określania współczynników dyfuzji atmosferycznej, przedstawionej w rozdziale 3.4, do wyznaczania σ_y , σ_z dla segmentu smugi przyjęto zależności podane przez Nowickiego /39/:

$$\sigma_y = A x^a \quad /3.11/$$

$$\sigma_z = B x^b \quad /3.12/$$

gdzie:

σ_y - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej
/ m /,

σ_z - współczynnik dyfuzji atmosferycznej pionowej
/ m /,

x - odległość punktu recepcyjnego od emitora / m /,

A, B, a, b - stałe określane z zależności /3.13/ ÷ /3.16/:

$$A = 0,08 \left[6 m^{-0,3} + 1 - \ln \left(\frac{H}{z_0} \right) \right] \quad /3.13/$$

$$a = 0,367 (2,5 - m) \quad /3.14/$$

$$B = 0,38 m^{1,3} \left[8,7 - \ln \left(\frac{H}{z_0} \right) \right] \quad /3.15/$$

$$b = 1,55 \exp (-2,35 m) \quad /3.16/$$

gdzie:

z_0 - współczynnik szorstkości podłoża / m /.

Dla $\frac{H}{z_0} < 10,0$ przyjmuje się: $\frac{H}{z_0} = 10,0$, natomiast dla $\frac{H}{z_0} > 1500,0$ odpowiednio: $\frac{H}{z_0} = 1500,0$.

W modelu istnieje możliwość uwzględnienia przestrzennego zróżnicowania współczynnika szorstkości podłoża. W przypadku zmienności tego parametru, jego wartość obliczana jest oddzielnie dla każdego segmentu w rozpatrywanym przedziale czasu Δt , jako średnia arytmetyczna wartości z_0 na drodze transportu zanieczyszczeń.

W celu uwzględnienia zmienności warunków meteorologicznych i współczynnika szorstkości wzdłuż drogi transportu zanieczyszczeń od emitora do punktu recepcyjnego, formuły /3.11/, /3.12/ zmodyfikowano wprowadzając w miejsce x "odległość wirtualną" l_w . Wartość l_w określana jest z formuły:

$$l_{w,i+1} = \left(\frac{\sigma_i}{c_{i+1}} \right)^{\frac{1}{c_{i+1}}} \quad /3.17/$$

gdzie:

l_w - odległość wirtualna / m /,

σ_i - współczynnik dyfuzji atmosferycznej, poziomej lub pionowej, dla końca danego segmentu w i -tym kroku czasu śledzenia smugi / m /,

c_{i+1}, c_{i+1} - stałe A,a lub B,b określone z zależności /3.13/ ÷ /3.14/ lub /3.15/÷/3.16/ w $i+1$ -szym kroku czasu śledzenia smugi.

Dany segment smugi charakteryzują współczynniki dyfuzji atmosferycznej dla początku i końca segmentu. W modelu, parametry $\bar{\sigma}_y$, $\bar{\sigma}_z$ są określone dla końca każdego segmentu smugi. Wartość współczynnika dyfuzji dla końca segmentu jest równocześnie wartością tego parametru dla początku następnego segmentu.

Przy wyznaczaniu współczynników dyfuzji atmosferycznej, określonych wzorami /3.11/, /3.12/, w każdym kolejnym kroku śledzenia smugi wykorzystana jest zależność /31,54/:

$$\bar{\sigma}_{i+1} = C_{i+1} (l_{w,i+1} + \Delta l_{i+1})^{C_{i+1}} \quad /3.18/$$

Dla przedziału czasu Δt , w którym dany segment jest tworzony, przyjmuje się $l_w \equiv 0$.

3.2.8. Ograniczenie rozpraszania się zanieczyszczeń w pionie

Rozpraszanie się zanieczyszczeń w pionie uwarunkowane jest wysokością warstwy mieszania. Parametr ten może ulegać zmianie na drodze transportu zanieczyszczeń.

Dany segment smugi charakteryzują wysokości warstwy mieszania L dla początku i końca segmentu. W modelu, parametr ten jest wyznaczany dla końca każdego segmentu smugi. Wartość L dla końca segmentu jest równocześnie wartością tego parametru dla początku następnego segmentu. Przyjmuje się, że wysokość warstwy mieszania dla początku

segmentu najbliższego źródłu jest równa wartości tego parametru dla końca segmentu.

Przy wyznaczaniu wysokości warstwy mieszania dla końca segmentu w każdym kolejnym kroku czasu śledzenia smugi wykorzystywana jest zależność:

$$L_{\max, i+1} = \begin{cases} L_{\max, i} & \text{dla } L_{\max, i} \geq L_{i+1} \\ L_{i+1} & \text{dla } L_{\max, i} < L_{i+1} \end{cases} \quad /3.19/$$

gdzie:

$L_{\max, i+1}, L_{\max, i}$ - wysokości warstwy mieszania dla końca danego segmentu odpowiednio w $i+1$ -szym oraz i -tym kroku czasu śledzenia smugi /m/,

L_{i+1} - wysokość warstwy mieszania w $i+1$ -szym kroku czasu śledzenia smugi /m/.

Dla przedziału czasu Δt , w którym dany segment jest tworzony, przyjmuje się: $L_{\max} \equiv L$.

3.2.9. Procesy usuwania zanieczyszczeń z atmosfery

Stężenia zanieczyszczeń w atmosferze ulegają zmianie na skutek przemiany chemicznej, wymywania zanieczyszczeń przez opady atmosferyczne oraz ich pochłaniania przez podłoże.

W modelu wirtualne natężenie emisji zanieczyszczenia dla danego segmentu, to jest natężenie emisji zanieczysz-

czenia ze źródła zmniejszone na skutek usuwania zanieczyszczenia z atmosfery wyznaczone jest z zależności podanej przez Zanettiego /54/:

$$E_{w,i+1} = E_{w,i} \exp \left[\left(-k_{1,i+1} - k_{2,i+1} - k_{3,i+1} \right) \frac{\Delta t}{360000} \right] / 3.20 /$$

gdzie:

- $E_{w,i+1}, E_{w,i}$ - wirtualne natężenia emisji zanieczyszczenia odpowiednio w $i+1$ -szym oraz i -tym kroku czasu śledzenia smugi / mg/s /,
- $k_{1,i+1}$ - współczynnik uwzględniający wpływ przemiany chemicznej zanieczyszczenia na zmianę stężenia w $i+1$ -szym kroku czasu śledzenia smugi / %/godz /,
- $k_{2,i+1}$ - współczynnik uwzględniający wpływ wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne na zmianę stężenia w $i+1$ -szym kroku czasu śledzenia smugi / %/godz /,
- $k_{3,i+1}$ - współczynnik uwzględniający wpływ pochłaniania zanieczyszczenia przez podłoże na zmianę stężenia w $i+1$ -szym kroku czasu śledzenia smugi / %/godz /.

Współczynnik uwzględniający wpływ pochłaniania zanieczyszczenia przez podłoże określany jest z zależności:

$$k_{3,i} = \frac{360000 v_{d,i}}{L_{s,i}} \quad /3.21/$$

gdzie:

$v_{d,i}$ - prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia dla danego segmentu w i-tym kroku czasu śledzenia smugi / m/s /,

$L_{s,i}$ - grubość smugi, / m /, w i-tym kroku czasu jej śledzenia zdefiniowana jako /22/:

$$L_{s,i} = \min \left\{ L_{\max,i}, 2,15 \left(\sigma_{z,i-1} + \sigma_{z,i} \right) \right\}$$

W modelu istnieje możliwość uwzględnienia przestrzennego zróżnicowania prędkości suchego osiadania. W przypadku zmienności tego parametru jego wartość obliczana jest, oddzielnie dla każdego segmentu w rozpatrywanym przedziale czasu Δt , jako średnia arytmetyczna wartości v_d na drodze transportu zanieczyszczenia.

3.2.10. Średnia prędkość wiatru w warstwie powietrza od powierzchni podłoża do wysokości pozornego punktu emisji

Średnia prędkość wiatru w warstwie powietrza od powierzchni podłoża do wysokości pozornego punktu emisji, \bar{u} , wyznaczana jest z zależności:

$$\bar{u} = \frac{u_a}{m+1} \left(\frac{H}{h_a} \right)^m, \quad / m / s / \quad /3.22/$$

Dany segment smugi charakteryzują średnie prędkości wiatru dla początku i końca segmentu. W modelu parametr \bar{u}

określany jest dla końca każdego segmentu smugi. Wartość średniej prędkości wiatru dla końca segmentu jest równocześnie wartością tego parametru dla początku następnego segmentu.

3.2.11. Wyznaczanie stężenia zanieczyszczenia

- podstawowe równanie modelu

Stężenie zanieczyszczenia w modelu określane jest przy użyciu formuły gaussowskiej uwzględniającej zjawiska takie jak przemiana chemiczna zanieczyszczenia, jego wymywanie przez opady atmosferyczne, pochłanianie zanieczyszczenia przez podłoże oraz odbicia smugi od górnej warstwy inwersyjnej. Dla stosunku $\sigma_z/L < 1,08$ /9/ formuła ma postać:

$$S = \frac{E_w}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \sum_{k=-5}^4 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{-z+H+2kL}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \sum_{k=-5}^4 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H-2kL}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad /3.23/$$

natomiast dla $\sigma_z/L > 1,08$:

$$S = \frac{E_w}{\sqrt{2\pi} \sigma_y uL} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad /3.24/$$

gdzie:

E_w - wirtualne natężenie emisji zanieczyszczenia dla segmentu położonego najbliżej rozpatrywanego receptora / mg/s /,

r - odległość receptora od osi smugi / m /.

Wartości parametrów $E_w, H, L, \bar{u}, \sigma_y, \sigma_z$ dla danego punktu recepcyjnego oblicza się w oparciu o ich wartości dla segmentu smugi położonego najbliższego receptora. Przyjmuje się, że wartość parametru E_w jest stała dla segmentu. Wysokość pozornego punktu emisji H i wysokość warstwy mieszania L oraz średnią prędkość wiatru \bar{u} wyznacza się przez interpolację liniową wartości tych parametrów dla początku i końca segmentu. Wartości współczynników poziomej i pionowej dyfuzji atmosferycznej σ_y, σ_z określa się przy wykorzystaniu zależności:

$$\sigma = c_{ks} \left[l_{w,ps} + \frac{l_{w,ks} - l_{w,ps}}{l_{ks} - l_{ps}} (l - l_{ps}) \right] c_{ks} \quad /3.25/$$

$$l_{w,ks} = \left(\frac{\sigma_{ks}}{c_{ks}} \right) \frac{1}{c_{ks}} \quad /3.26/$$

$$l_{w,ps} = \left(\frac{\sigma_{ps}}{c_{ks}} \right) \frac{1}{c_{ks}} \quad /3.27/$$

gdzie:

- σ - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej dla rozpatrywanego punktu recepcyjnego / m /,
- σ_{ps}, σ_{ks} - współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej odpowiednio dla początku i końca segmentu / m /,
- $l_{w,ps}, l_{w,ks}$ - odległości wirtualne odpowiednio dla σ_{ps}, σ_{ks} ,

l_{ps}, l_{ks} - długości drogi transportu zanieczyszczenia od źródła emisji dla początku i końca segmentu / m /,

C_{ks}, c_{ks} - stałe A,a lub B,b dla końca segmentu smugi.

Wpływ turbulencji wewnątrz gorącej smugi na wzrost współczynników dyfuzji uwzględnia się przez wprowadzenie poprawki Pasquilla. Współczynnik dyfuzji wyznaczany jest wówczas z zależności /2/:

$$\sigma_c^2 = \sigma^2 + \left(\frac{\Delta h}{3,5} \right)^2 \quad /3.28/$$

gdzie:

σ_c - współczynnik dyfuzji atmosferycznej poziomej lub pionowej uwzględniający poprawkę Pasquilla / m /.

3.3. Przegląd formuł na wyniesienie smugi

3.3.1. Wpływ wyniesienia smugi na rozkład stężeń zanieczyszczeń

Wartość wyniesienia smugi Δh ma duży wpływ na wyniki obliczonych stężeń. Wyniesienie smugi, po uwzględnieniu geometrycznej wysokości komina, stanowi o wysokości H pozornego punktu emisji zanieczyszczeń. Wielkość H jest istotnym parametrem w modelowaniu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. Przykładowo, przy zastosowa-

niu modelu Pasquilla, wykorzystywanego w obliczeniach rutynowych w Polsce, stosunek stężeń maksymalnych obliczonych dla tych samych warunków meteorologicznych i dla tego samego emitora lecz przy różnych wartościach wyniesienia /uzyskiwanych z różnych formuł obliczeniowych/ jest w przybliżeniu równy:

$$\frac{S_{m1}}{S_{m2}} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{g_1} \quad /3.29/$$

gdzie:

S_{m1} , S_{m2} - stężenia maksymalne uzyskane przy zastosowaniu formuły Pasquilla dla różnych wysokości pozornego punktu emisji H_1, H_2 ,
 g_1 - stała zależna od stanu równowagi atmosfery. Wartość g_1 zmienia się od 1,692 do 2,372 /52/.

Zgodnie z powyższym, różnice w oszacowaniu H_1 i H_2 rzędu 10% dają różnice w określeniu stężeń maksymalnych od 17,5% do 25,4%.

Wyniesienie smugi ma także duży wpływ na odległość punktu występowania maksymalnego stężenia od emitora.

Dla oceny tego wpływu można wykorzystać zależność:

$$\frac{x_{m1}}{x_{m2}} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{1}{b}} \quad /3.30/$$

gdzie:

x_{m1} , x_{m2} - odległości punktów występowania stężeń maksymalnych od emitora dla różnych H_1 i H_2 .

b - stała zależna od stanu równowagi atmosfery. Wartość b waha się od 1,284 do 0,551 /52/.

Przy 10% błędzie w oszacowaniu wartości H odległość od emitora do miejsca występowania stężenia maksymalnego zmienia się od 7,7% do 18,9%.

3.3.2. Zestawienie formuł do obliczania wyniesienia smugi

W literaturze znaleźć można wiele metod wyznaczania wyniesienia smugi Δh . Ponad 30 z nich autorka niniejszej pracy opisała w opracowaniu /35/. W celu wytypowania formuł do wykorzystania w modelu zastosowano następujące kryteria:

- 1/ Formuła powinna być wyprowadzona w oparciu o badania dla rzeczywistych kominów. Jeżeli badania były prowadzone w tunelach lub formuła na wyniesienie została opracowana na drodze teoretycznej to wzór powinien być dokładnie sprawdzony dla warunków rzeczywistych,
- 2/ Należy rozróżnić formuły dla małych i średnich kominów /wysokość do około 100 m/ oraz dla kominów wysokich /wysokość od 100 m do 300 m/.
- 3/ Należy preferować formuły oparte na dużej liczbie pomiarów jednostkowych.

W oparciu o przyjęte kryteria dokonano wstępnej eliminacji formuł zawartych w w/w opracowaniu. Wybrane do

dalszej analizy formuły proponowane przez Briggsa, przedstawiono w tablicy 3.3. Formuły proponowane przez innych autorów zawiera tablica 3.4.

W formułach zestawionych w tablicach 3.3 i 3.4 wyniesienie smugi z komina uzależnione jest od parametrów emitatora i warunków meteorologicznych. Do parametrów emitatora zalicza się: wewnętrzną średnicę przewodu emitującego zanieczyszczenia, prędkość i temperaturę oraz ciepło właściwe gazów na wylocie z komina. Wielkości te pozwalają na wyznaczenie strumienia wyporu F i emisji ciepła Q . Warunki meteorologiczne są określone przez: stan równowagi atmosfery /lub gradient temperatury potencjalnej/, prędkość wiatru, temperaturę otaczającego powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne.

W tablicach 3.3 i 3.4 przyjęto następujące oznaczenia:

- c_p - ciepło właściwe gazów na wylocie z komina przy stałym ciśnieniu / $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$ /; przyjęto $c_p = 1,3$ / $\text{kJ}/\text{m}^3 \text{K}$ /
- d - wewnętrzna średnica przewodu emitującego zanieczyszczenia / m /
- F - strumień wyporu / m^4/s^3 /
- g - przyspieszenie ziemskie / m/s^2 /
przyjęto $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$
- h - wysokość geometryczna komina / m /
- Δh - wyniesienie smugi / m /
- p - ciśnienie atmosferyczne / hPa /

Tab.3.3. Formuły na wyniesienie smugi według Briggsa 1/ / 4,28/

| Lp. | Formuła | Warunki |
|-----|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | $\Delta h = 1,6 F^{1/3} (10h)^{2/3} u_h^{-1}$ $\Delta h = 2,9 F^{1/3} (s u_h)^{-1/3}$ $\Delta h = 5,0 F^{1/4} s^{-1/3}$ | <p>ELEKTROWNIE WĘGLOWE /1969a/</p> <p>Równowaga chwiejna i obojętna</p> <p>Równowaga stała</p> <p>- warunki wietrzne</p> <p>- cisza</p> <p>/patrz Uwaga 2/</p> |
| 2 | $\Delta h = 1,6 F^{1/3} (x^*)^{2/3} u_h^{-1}$ <p>gdzie:</p> $x^* = 6,48 F^{2/5} h^{3/5} \text{ dla } h \leq 305 \text{ m}$ $x^* = 201 F^{2/5} \text{ dla } h > 305 \text{ m}$ $\Delta h = 2,9 F^{1/3} (s u_h)^{-1/3}$ $\Delta h = 5,0 F^{1/4} s^{-1/3}$ | <p>INNE ŹRÓDŁA EMISJI /1969b/</p> <p>Równowaga chwiejna i obojętna</p> <p>Równowaga stała</p> <p>- warunki wietrzne</p> <p>- cisza</p> <p>/Patrz Uwaga 2/</p> |

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|--|
| 3 | $\Delta h = 1,6 F^{1/3} (3,5 x^*)^{2/3} u_h^{-1}$ <p>gdzie:</p> $x^* = 14 F^{5/8} \quad \text{dla } F \leq 55 \text{ m}^4/\text{s}$ $x^* = 34 F^{2/5} \quad \text{dla } F > 55 \text{ m}^4/\text{s}$ $\Delta h = 2,9 F^{1/3} (s u_h)^{-1/3}$ $\Delta h = 5,0 F^{1/4} s^{-1/3}$ | <p>MODYFIKACJA FORMUŁ (1) i (2) /1970/ Równowaga chwiejna i obojętna</p> <p>Równowaga stała - warunki wietrzne - cisza /Patrz Uwaga 2/</p> |

UWAGA 1/ Klasyfikacja stanów równowagi wg Briggsa /28/

| Stan równowagi atmosfery | Klasa stabilności | / °K/m / |
|--------------------------|-------------------|---|
| chwiejna | 0 | $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} < -0,0022$ |
| obojętna | 1 | $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} < -0,0015$ |
| obojętna | 2 | $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} < 0,0085$ |
| stała | 3 | $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} \leq 0,0085$ |

UWAGA 2/ We wzorze na wyniesienie dla równowagi stałej i warunków wietrznych Briggs zmodyfikował

wartość stałej $c=2,9$. W 1972 r. przyjął $c=2,6$ a w 1975 r. $c=2,4$.

Tab. 3.4. Formuły na wyniesienie smugi wg innych autorów

| Lp | Autor/Nazwa | Formuła | Warunki |
|----|-------------------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Holland /6, 37/ | $\Delta h = (1,5 \sqrt{g d + 0,04 Q}) u_h^{-1}$ $\Delta h = c \Delta h$ $\Delta h = c \Delta h$ | Równowaga obojętna $l/$ Równowaga chwiejna $l/ c \in \langle 1,1 + 1,2 \rangle$ Równowaga stała $l/ c \in \langle 0,8 + 0,9 \rangle$ Kominy o wysokości kilkudziesięciu m. |
| 2 | CONCAWE /5/ | $\Delta h = 3,17 Q^{0,55} u_h^{-0,67}$ | Równowaga chwiejna, obojętna i stała. Analizowano 438 obserwacji zebranych podczas różnych eksperymentów, wysokości kominów wahały się od 50 do 200 m |
| 3 | Lucas, Moore, Spurr /3/ | $\Delta h = 0,254 a^* Q^{0,25} u_h^{-1}$ gdzie: $a^* = 475 - 2(h - 100m)$ dla $h \leq 100$ m $a^* = 475 (h/100 m)$ dla $h > 100$ m | Równowaga obojętna. Formuła zmodyfikowana z 1963 r., wysokość kominów wahała się od 50 do 150 m |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------------------------------|---|--|
| 4 | ASME /37/ | $\Delta h = 5,7 Q u_h^{-3}$ $\Delta h = 0,672 Q^{1/3} \left(u_h \frac{g}{T_0} \frac{\Delta \theta}{\Delta z} \right)^{-1/3}$ | <p>Równowaga obojętna i chwiejna</p> <p>Równowaga stała</p> |
| 5 | Moses-Carson /1968a/ /37/ | $\Delta h = (-0,029 v_{gd} + 5,35 Q^{0,5}) u_h^{-1}$ | <p>Równowaga stała, obojętna i chwiejna.</p> <p>Weryfikacja zbioru obserwacji z 1967 r. Analizowano 711 obserwacji. Wysokości kominów wahały się od 34 do 183 m</p> |
| 6 | Moses-Carson /1968b/ /6/ | $\Delta h = c (-0,029 v_{gd} + 5,35 Q^{0,5}) u_h^{-1}$ | <p>Równowaga chwiejna $^2/$: $c = 2,65$ Równowaga obojętna $^2/$: $c = 1,08$ Równowaga stała $^2/$: $c = 0,68$</p> |
| 7 | NAVAJO /28/ | $\Delta h = 0,408 (Q u_h^{-3})^{0,27} \cdot$ $\cdot (135-1288,8 \frac{\Delta \theta}{\Delta z})$ | <p>Równowaga chwiejna, obojętna i stała $^3/$</p> |

| | | | |
|---|-----------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 8 | Montgomery /36/ | $\Delta h = 175 F^{1/3} \exp(-64 \frac{\Delta\theta}{\Delta z}) u_h^{-1}$ | Równowaga chwiejna, obojętna i stała. Analizowano 1146 fotografii dla 3 kominów o wysokości powyżej 100 m każdy. |

UWAGA 1 / Podział na stany równowagi w oparciu o klasyfikację Pasquilla:

równowaga chwiejna: A, B, C; równowaga obojętna: D; równowaga stała: E, F.

UWAGA 2 / Klasyfikacja stanów równowagi wg Mosesa i Carsona oparta na gradientie temperatury potencjalnej:

równowaga chwiejna $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} < -0,0022 / ^\circ K/m /$; równowaga obojętna: $-0,0022 \leq \frac{\Delta\theta}{\Delta z} < 0,0085$
 / $^\circ K/m /$; równowaga stała: $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} \geq 0,0085 / ^\circ K/m /$.

UWAGA 3 / Formuła wyprowadzona z pomiarów w elektrowni w Navajo. Wg autorów dla kolejnych stanów równowagi atmosfery wg klasyfikacji Pasquilla przyjmuje się następujące wartości:

$\frac{\Delta\theta}{\Delta z} / ^\circ K/m /$ A: -0,010 B: -0,008 C: -0,005 D: 0,000 E: 0,020.

| | | |
|----------------------------------|--|----------------------|
| Q | - emisja ciepła z komina | /kcal/s / * |
| s | - parametr stabilności atmosfery | / 1/s ² / |
| T_0 | - temperatura otaczającego powietrza | / °K / |
| $\frac{\Delta T_0}{\Delta z}$ | - gradient temperatury T_0 | / °K/m / |
| T | - temperatura gazów na wylocie z komina | / °K / |
| u_h | - prędkość wiatru na wysokości h | / m/s / |
| v_g | - prędkość gazów na wylocie z komina | / m / s / |
| θ | - temperatura potencjalna otaczającego powietrza | / °K / |
| $\frac{\Delta \theta}{\Delta z}$ | - gradient temperatury θ | / °K/m /. |

Dla wymienionych wyżej wielkości obowiązują zależności:

$$\theta = T_0 \left(\frac{p}{1000} \right)^{-0,286} \quad /3.31/$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta z} = \left(0,01 + \frac{\Delta T_0}{\Delta z} \right) \frac{\theta}{T_0} \quad /3.32/$$

$$s = - \frac{g}{\theta} \frac{\Delta \theta}{\Delta z} \quad /3.33/$$

$$F = - \frac{1}{4} \tilde{\pi} v_g d^2 \left(\frac{T - T_0}{T} \right) g \quad /3.34/$$

$$Q = 0,24 \frac{\tilde{\pi}}{4} v_g d^2 \left(\frac{T - T_0}{T} \right) 273,16 c_p \frac{p}{1013,25} \quad /3.35/$$

* Zachowano jednostkę przyjętą w oryginalnych formułach.

W tablicy 3.3 nie przedstawiono metody wyznaczania wyniesienia smugi, opracowanej przez Briggsa w latach 1975-1980, uwzględniającej penetrację smugi w warstwę inwersyjną. Metoda ta opiera się na parametrach warstwy granicznej takich jak: turbulencyjny strumień ciepła przy powierzchni ziemi, prędkość dynamiczna, wysokość warstwy granicznej. Wyznaczenie wartości tych parametrów wymaga stosowania "preprocesora meteorologicznego". Preprocesor meteorologiczny rozumiany jest jako zespół algorytmów do wyznaczania wspomnianych parametrów na podstawie rutynowych pomiarów z sieci stacji meteorologicznych i sieci stacji aerologicznych. Obecnie w Zakładzie Meteorologii Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej kończone są prace nad uruchomieniem takiego preprocesora /33, 49/.

Proste formuły na wyniesienie smugi nie opisują właściwie wyniesienia w warunkach dużej pionowej zmienności stabilności atmosfery i prędkości wiatru. Zróznicowanie tych parametrów wraz z wysokością umożliwia numeryczne modele wyniesienia smugi opisane w szeregu prac /14,16, 18,24,45/.

3.3.3. Analiza formuł na wyniesienie smugi i wybór formuł do zastosowania w opracowanym modelu SPM

Zgodnie z przyjętymi kryteriami, najlepsza dla obliczania wyniesienia smugi z małych i średnich kominów jest formuła Hollanda /punkt 1 w tablicy 3.4/. Powyższą formułę

zastosowano w opracowaniu modelu dla emitów o emisji ciepła nie przekraczającej 20 / MJ/s /.

Przy wyborze formuły na wyniesienie smugi dla wysokich kominów oparto się na wynikach badań przeprowadzonych przez EPRI /Electric Power Research Institute/ /29/. W ramach tych badań porównywano wyniki obliczeń wysokości wyniesienia Δh przy zastosowaniu formuł Briggsa, Montgomery, CONCAWE, Mosesa-Carsona oraz Lucasa z wynikami pomiarów wyniesienia smugi prowadzonych przy zastosowaniu lidar.

Formuła CONCAWE w porównaniu z innymi wzorami, na największy współczynnik korelacji wyników obliczeń Δh z wartościami pomiarowymi i najmniejsze średnie odchylenie kwadratowe. Formuły Briggsa mają największe odchylenie średnie wyników obliczeń Δh od wartości pomiarowych i największe średnie odchylenie kwadratowe. Zestawienie wskaźników oceny statystycznej wg opracowania EPRI zawiera tablica 3.5.

Tab. 3.5. Wskaźniki oceny statystycznej wybranych

formuł na wyniesienie smugi wg EPRI /N = 98/

| Formuła | Odchylenie średnie /m/ | Średnie odchylenie kwadratowe /m/ | Współczynnik korelacji |
|-------------------------------------|------------------------------|--|---------------------------|
| Briggs /1969a/ Briggs /1970/ | - 150 - 143 | 257 268 | 0,52 0,52 |
| CONCAWE | - 40 | 130 | 0,63 |
| Lucas Moses-Carson Montgomery | - 104 - 84 - 37 | 190 239 170 | 0,53 0,58 0,40 |

Jak wynika z powyższego zestawienia, najlepsze wskaźniki jakości uzyskiwano dla formuły CONCAWE. Powyższą formułę zastosowano w opracowanym modelu dla emitorów o emisji ciepła większej niż 20 / MJ/s /.

3.4. Przegląd formuł na wyznaczanie współczynników dyfuzji atmosferycznej

W celu wyznaczenia wartości współczynników dyfuzji atmosferycznej dla danych warunków meteorologicznych, niezbędna jest znajomość stanu równowagi atmosfery. Stan równowagi atmosfery można wyznaczać wg różnych metod /17, 22, 29, 47/.

Największą popularność zyskała klasyfikacja stanów równowagi atmosfery Pasquilla-Gifforda-Turnera /PGT/. Stany równowagi określone zostały w tej klasyfikacji w oparciu o następujące parametry: prędkość wiatru, intensywność promieniowania słonecznego i stopień zachmurzenia.

Poniżej zestawiono wybrane formuły do wyznaczania współczynników dyfuzji atmosferycznej dla poszczególnych klas PGT. Algorytm aproksymujący współczynniki dyfuzji Pasquilla-Gifforda wg krzywych Turnera ma następującą postać /28/:

$$\sigma_y = 465,1 \arctan \left(\frac{a-b \ln x}{57,2958} \right) \cdot x \quad /3.36/$$

$$\sigma_z = c x^d \quad /3.37/$$

gdzie:

σ_y, σ_z - współczynniki dyfuzji atmosferycznej poziomej i pionowej / m /,

x - odległość od źródła emisji / km /,
 a, b, c, d , - współczynniki zależne od stanu równowagi atmosfery.

Wartość współczynników a, b, c, d podano w tabelicy 3.6.

Smith, dla określenia współczynników σ_y i σ_z przyjęła zależności potęgowe /17/:

$$\sigma_y = A x^a \quad /3.38/$$

$$\sigma_z = B x^b \quad /3.39/$$

gdzie:

x - odległość od źródła emisji / m /,
 A, a, B, b - współczynniki zależne od stanu równowagi atmosfery.

Wartości współczynników A, a, B, b zawiera tabela 3.7.

Briggs zaproponował inny sposób wyznaczania współczynników dyfuzji, oparty jednak na wcześniej omówionych /29/. Podane przez Briggsa zależności zawiera tabela 3.8.

Wartości współczynników dyfuzji atmosferycznej wyznaczone w oparciu o w/w wzory, jak też inne formuły znane z literatury znacznie różnią się od siebie. Wynika to zarówno z niejednorodności danych pomiarowych stanowiących podstawę opracowanych formuł, /np. różne warunki terenowe, odległości od źródła emisji, wysokości źródeł, czasu uśredniania danych/, jak i z różnic w uwzględnianiu we wzorach czynników warunkujących rozpraszanie smugi /47/.

Tab. 3.6. Parametry do wyznaczania współczynników dyfuzji atmosferycznej wg zależności /3.36/, /3.37/

| Stan równowagi atmosfery | Odległość od źródła emisji /m/ | Parametr | | | |
|--------------------------|--------------------------------|----------|---------|--------|---------|
| | | a | b | c | d |
| Silnie-chwiejna | x | 24,167 | 2,5334 | 158,08 | 1,0542 |
| | 150 < x | | | | |
| | 200 < x | | | | |
| | 250 < x | | | | |
| | 300 < x | | | | |
| | 400 < x | | | | |
| 500 < x | | | | | |
| Chwiejna | 200 < x | 18,333 | 1,8096 | 90,673 | 0,93198 |
| | 400 < x | | | | |
| | 400 < x | | | | |
| Lekko-chwiejna | wszystkie x | 12,5 | 1,0857 | 61,141 | 0,91465 |
| | 300 < x | | | | |
| Obojętna | 1000 < x | 8,3333 | 0,72382 | 34,459 | 0,86974 |
| | 3000 < x | | | | |
| | 10000 < x | | | | |
| | 30000 < x | | | | |
| | 30000 < x | | | | |
| | 30000 < x | | | | |
| Lekko-stała | 300 < x | 6,25 | 0,54287 | 23,331 | 0,81956 |
| | 1000 < x | | | | |
| | 2000 < x | | | | |
| | 4000 < x | | | | |
| | 10000 < x | | | | |
| | 20000 < x | | | | |

* Dla $x > 3110$ m przyjmuje się: $\sigma_z = 5000$ m.

Tab. 3.7. Parametry do wyznaczania współczynników dyfuzji atmosferycznej wg Smitha /17/

| Stan równowagi atmosfery | A | a | B | b |
|--------------------------|------|------|------|------|
| Silnie-chwiejna | 0,41 | 0,91 | 0,40 | 0,91 |
| Chwiejna | 0,33 | 0,86 | 0,36 | 0,86 |
| Lekko-chwiejna | 0,33 | 0,86 | 0,36 | 0,86 |
| Obojętna | 0,22 | 0,78 | 0,32 | 0,78 |
| Lekko-stała | - | - | - | - |
| Staća | 0,06 | 0,71 | 0,31 | 0,71 |

Tab. 3.8. Formuły na wyznaczenie współczynników dyfuzji atmosferycznej wg Briggsa * /29/

| Stan równowagi atmosfery | Teren otwarty | |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | σ_y / m / | σ_z / m / |
| Silnie-chwiejna | $0,22x(1+0,0001x)^{-0,5}$ | $0,20x$ |
| Chwiejna | $0,16x(1+0,0001x)^{-0,5}$ | $0,12x$ |
| Lekko-chwiejna | $0,11x(1+0,0001x)^{-0,5}$ | $0,08x(1+0,0002x)^{-0,5}$ |
| Obojętna | $0,08x(1+0,0001x)^{-0,5}$ | $0,06x(1+0,0015x)^{-0,5}$ |
| Lekko-staća/staća | $0,06x(1+0,0001x)^{-0,5}$ | $0,03x(1+0,0003x)^{-1}$ |
| Stan równowagi atmosfery | Obszar zurbanizowany | |
| | σ_y / m / | σ_z / m / |
| Silnie-chwiejna/ chwiejna | $0,32x(1+0,0004x)^{-0,5}$ | $0,24x(1+0,001x)^{0,5}$ |
| Lekko-chwiejna | $0,22x(1+0,0004x)^{-0,5}$ | $0,20x$ |
| Obojętna | $0,16x(1+0,0004x)^{-0,5}$ | $0,14x(1+0,0003x)^{-0,5}$ |
| Lekko-staća/staća | $0,11x(1+0,0004x)^{-0,5}$ | $0,08x(1+0,0015x)^{-0,5}$ |

* Odległości x podano w metrach.

Nowicki określił współczynniki dyfuzji σ_y , σ_z przyjmując zależności /3.38/, /3.39/ w oparciu o wyniki serii pomiarowej obejmującej 24 eksperymenty z lat 1960-1975 /39/. Dla uwzględnienia dodatkowo wpływu turbulencji mechanicznej współczynniki A, B uzależnił od stosunku wysokości H pozornego punktu emisji do współczynnika szorstkości podłoża z_0 .

Ostatnio dla określania stanu równowagi atmosfery proponuje się wykorzystanie parametrów warstwy granicznej /49,51/. Na podstawie stosunku średniej prędkości wiatru w warstwie mieszania do skali prędkości turbulencji wyznacza się klasy równowagi PGT. Współczynniki dyfuzji mogą więc być obliczane z dotychczas stosowanych formuł wykorzystujących tę klasyfikację. Przedstawioną metodę realizuje w praktyce model PPSP /51/.

Dalszym krokiem jest rezygnacja z dyskretnych klas równowagi atmosfery i uzależnienie współczynników dyfuzji w sposób ciągły od parametrów warstwy granicznej. Rozwiązanie to znalazło praktyczną realizację w modelu OML /2/.

Zastosowanie nowszych formuł na wyznaczanie współczynników dyfuzji atmosferycznej uzależnione jest jednak od możliwości wyznaczenia parametrów warstwy granicznej na podstawie rutynowych pomiarów z sieci stacji meteorologicznych i sieci stacji aerologicznych. W opracowanym modelu SPM do określania współczynników dyfuzji atmosferycznej zastosowano formuły Nowickiego. Dla uwzględnienia wpływu turbulencji wewnątrz gorącej smugi na wzrost współczynników dyfuzji wprowadzono poprawkę Pasquilla /równanie 3.28/.

4. REALIZACJA KOMPUTEROWA MODELU SPM

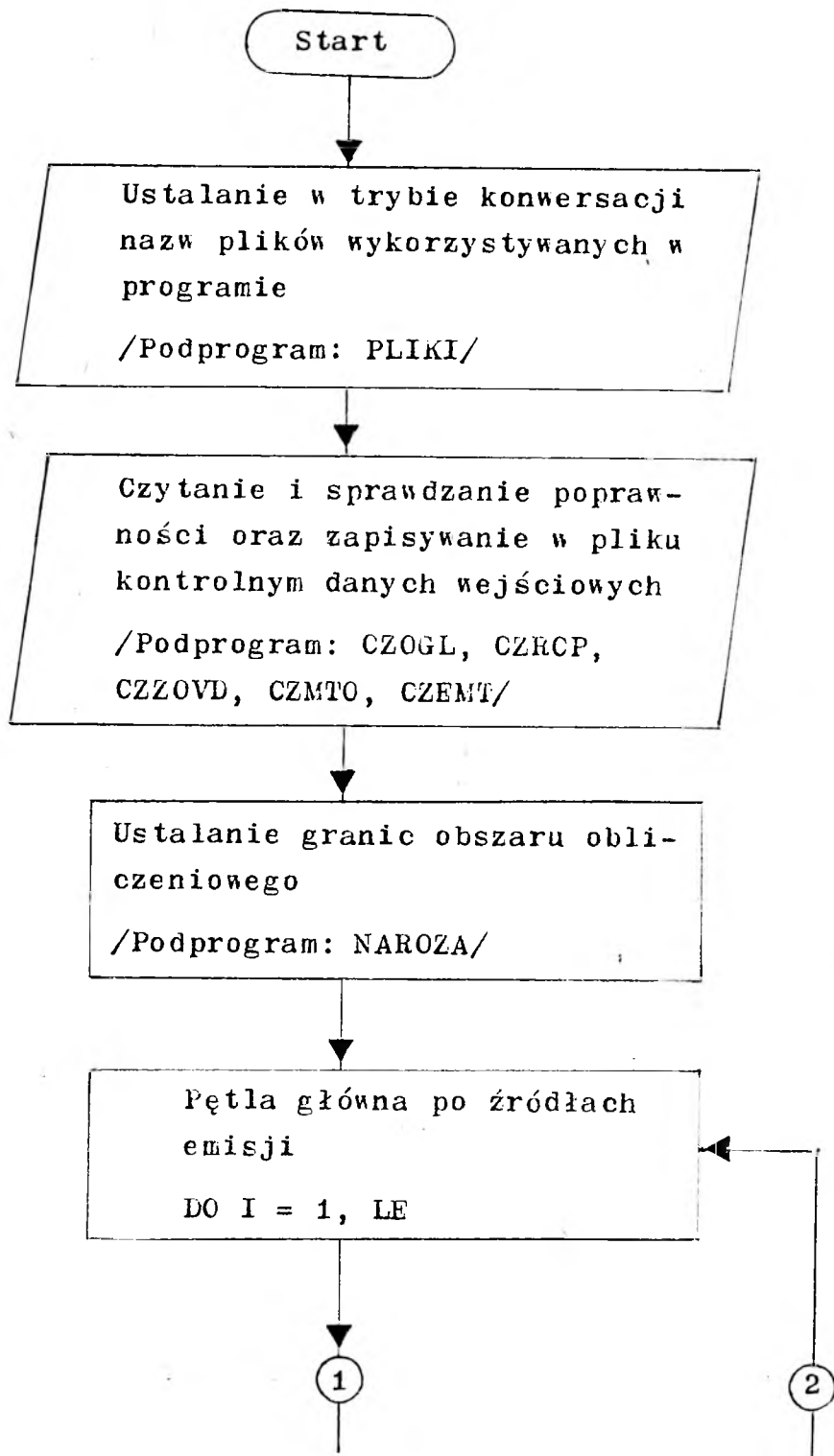
Model SPM zrealizowano w postaci programu o tej samej nazwie napisanego w języku FORTRAN 77. Program SPM uruchomiono na mikrokomputerze IMP-86 /IBM-PC/AT/, w Zakładzie Ochrony Atmosfery Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

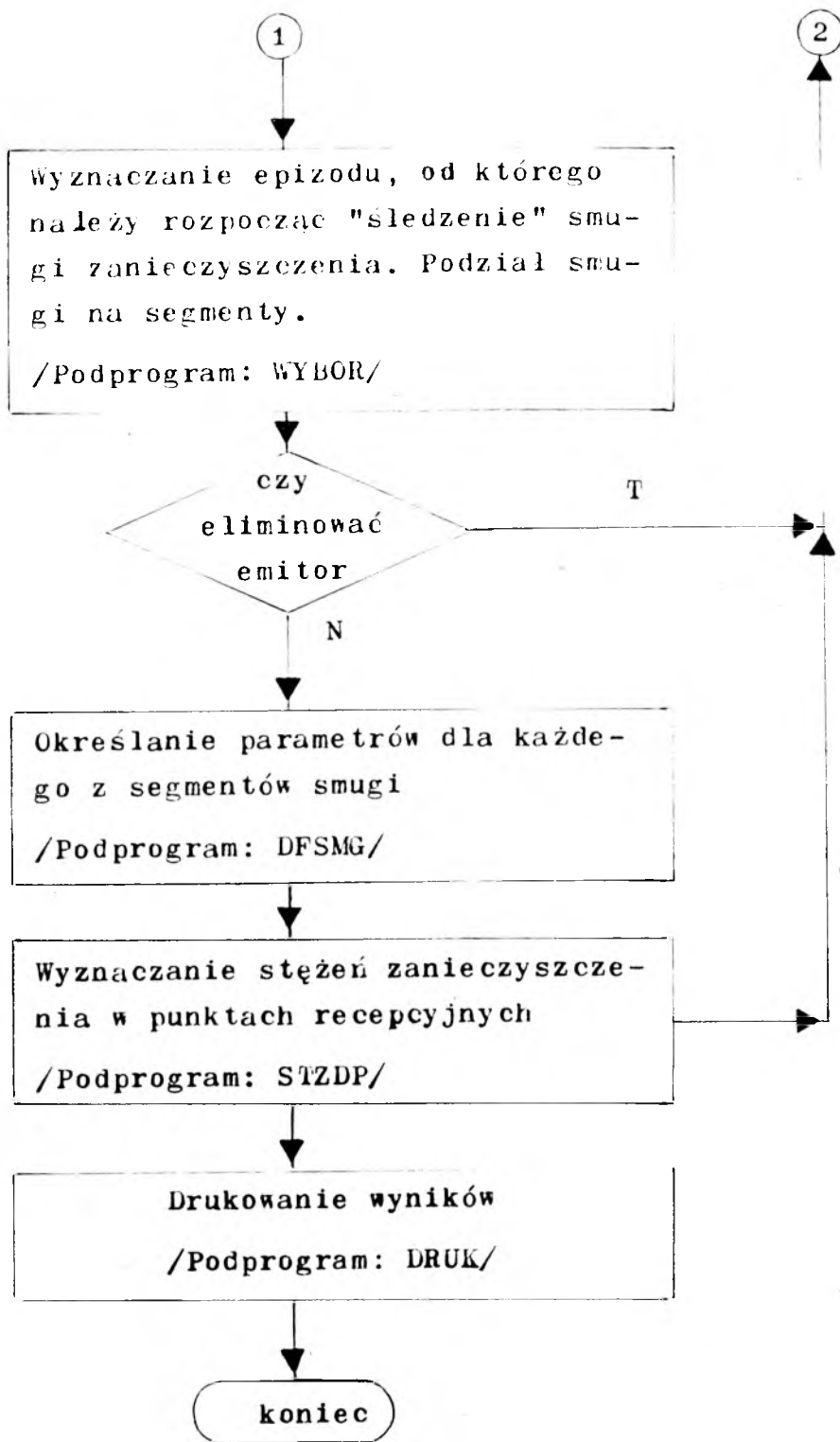
Program ma strukturę modułarną i składa się z programu głównego i 22 podprogramów. Poszczególne funkcje: czytanie i sprawdzanie poprawności danych wejściowych, właściwe obliczenia oraz drukowanie wyników realizowane są przez podprogramy lub ich zespoły, których działania koordynuje program główny. Uproszczony schemat blokowy programu SPM, ilustrujący jego strukturę, przedstawiono na rysunku 2. Wydruk programu, zawierający liczne komentarze, jest dostępny w Zakładzie Ochrony Atmosfery.

Dane wejściowe do programu pogrupowano w trzech plikach. Dane wejściowe obejmują: zmienne sterujące, dane o obszarze objętym obliczeniami, dane meteorologiczne oraz dane o źródłach emisji.

Do plików wykorzystywanych w programie należą ponadto:

- plik kontroli danych, w którym zapisywane są dane wejściowe w kolejności ich wczytywania,
- plik pomocniczy, w którym zapisywane są informacje o błędach,
- plik wynikowy.





Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy programu SPM

Nazwy wszystkich plików współdziałających z programem ustalane są w trybie konwersacji.

Dane wejściowe do programu SPM zestawiono w dodatku A.

Wyniki programu obejmują:

- nagłówek z informacją tekstową charakteryzującą obliczenia. Jest ona wprowadzana przez użytkownika wraz z innymi danymi wejściowymi,
- wartości stężeń zanieczyszczenia dla pojedynczego epizodu meteorologicznego w receptorach siatki regularnej i/lub w punktach ustalonych.

Współrzędne punktów recepcyjnych w prostokątnym układzie współrzędnych /x,y,z/ są podane w metrach, wartości stężeń w mg/m^3 .

5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU

5.1. Uwagi wstępne

Przedstawiony w niniejszej pracy model, podobnie jak i inne matematyczne modele rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze, jest modelem teoretyczno-empirycznym. Dla oceny prawidłowości opisu przez model złożonych procesów, jakim zanieczyszczenia podlegają w atmosferze, konieczne jest przeprowadzenie jego doświadczalnej weryfikacji. Polega ona na porównaniu stężeń zanieczyszczeń obliczonych za pomocą modelu z wynikami pomiarów.

Do weryfikacji modelu SPM niezbędne jest dysponowanie wynikami pomiarów stężeń zanieczyszczenia uśrednionymi dla okresu od 30 minut do 1 godziny /krok dyskretyzacji czasowej modelu/.

Zanieczyszczenie winno być łatwe do weryfikacji aby wykluczyć wpływ tła. Spełnienie tego warunku możliwe jest przy zastosowaniu substancji znacznikowej.

Skala przestrzenna pomiarów powinna być na tyle duża, aby czas transportu zanieczyszczenia od źródła emisji do receptora był dłuższy niż przyjęty krok dyskretyzacji czasowej modelu. W trakcie "wędrowki" zanieczyszczenia od emitora do punktu recepcyjnego winna zachodzić zmiana warunków meteorologicznych.

Istotna jest również czasowa zmienność parametrów emisji zanieczyszczenia ze źródła.

Pomiary powinny być prowadzone w terenie płaskim.

Badania doświadczalne spełniające powyższe warunki nie mogły być zrealizowane, z uwagi na ich zakres, w ramach niniejszej pracy. Z tego względu przeprowadzono analizę możliwości uzyskania danych pomiarowych do weryfikacji modelu, której wyniki przedstawiono w rozdziale 5.2.

5.2. Analiza możliwości uzyskania danych pomiarowych do weryfikacji modelu

W Polsce tak zwany monitoring zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego, obejmujący równoczesny pomiar emisji i imisji zanieczyszczeń oraz pomiar parametrów meteorologicznych jest realizowany sporadycznie. Żaden z eksperymentów, znanych autorce, zorganizowanych do tej pory w kraju nie spełnia podanych w rozdziale 5.1. warunków.

Program pierwszej tego typu akcji pomiarowej w Polsce, nazwanej MONAT-84 /monitoring atmosfery/, prowadzonej w Krakowie w lutym 1984 roku nie uwzględniał emisji substancji znacznikowej /9,10,41/.

Dane pomiarowe z eksperymentów zorganizowanych w latach następnych, z zastosowaniem substancji znacznikowej również nie mogą być wykorzystane przy weryfikacji modelu SPM z uwagi na skalę przestrzenną pomiarów. W akcjach prowadzonych w 1985 roku z udziałem autorki w Krakowie i Piaszcznie /40,42/ oraz późniejszych w Głogowie /12/ stężenia substancji znacznikowej mierzone były w promieniu kilku lub co najwyżej kilkunastu kilometrów od źródła emisji.

Przegląd eksperymentów pomiarowych zawarty w opracowaniu "Directory of atmospheric tracer experiments" /13/ wskazuje, że w Europie nie prowadzono pomiarów w wymaganej dla weryfikacji modelu SPM skali przestrzennej w płaskim terenie.

Z tych względów do weryfikacji modelu wykorzystano dane z eksperymentu w Kincaid, Illinois, USA, zorganizowanego w ramach programu badawczego EPRI /Electric Power Research Institute/. Szeroki zakres prac pomiarowych tego programu sprawił, że z bogatego materiału udało się wybrać serie pomiarowe, użyteczne do weryfikacji modelu /29,38/.

5.3. Opis eksperymentu pomiarowego w Kincaid i wybór danych do weryfikacji modelu

Pomiary w Kincaid z użyciem substancji znacznikowej prowadzone były w trzech okresach:

22 kwiecień - 10 maj 1980 r.,

9 lipiec - 29 lipiec 1980 r.,

9 maj - 1 czerwiec 1981 r.

Substancja znacznikowa - SF_6 emitowana była z komina elektrowni o wysokości 187 m i średnicy 9 m. Natężenie emisji SF_6 wynosiło od 45 do 90 kg/godz. Prowadzono ciągłe pomiary parametrów emisji. Wyniki pomiarów uśredniano dla okresu jednej godziny.

Pomiary stężeń SF_6 prowadzono przy wykorzystaniu sieci składającej się z około 1500 punktów. Punkty rozmieszczone były wokół źródła emisji na współśrodkowych łukach. Przy lokalizacji punktów w terenie dostosowano się do istniejącej

sieci dróg. Średnie promienie łuków wynosiły: $1/2$, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50 kilometrów. Odległości między punktami na łuku, w mierze kątowej, wahały się od dwóch do ośmiu stopni.

Stężenia SF_6 mierzono w sposób ciągły i uśredniano dla okresu jednej godziny. W poszczególnych dniach pomiary prowadzono przez sześć do dziewięciu godzin. Łączny czas pomiarów stężeń substancji znacznikowej wyniósł 300 godzin. W ciągu każdej godziny pomiary stężeń SF_6 wykonywano w około 200 punktach, rozmieszczonych po nawietrznej stronie źródła emisji. Wybór łuków i liczbę punktów na łuku uzależniano od prognozowanych warunków meteorologicznych.

Dla pomiaru temperatury, prędkości i kierunku oraz fluktuacji kierunku wiatru wykorzystywano dwa maszty meteorologiczne o wysokościach: 10 m i 100 m. Maszty zlokalizowane były około jednego kilometra od elektrowni. Pomiary wykonywano na wysokościach: 10, 30, 50, 100 m w sposób ciągły a następnie uśredniano dla okresu jednej godziny.

Na poziomie ziemi prowadzono ciągle pomiary promieniotworzenia oraz codzienne pomiary ciśnienia atmosferycznego i opadów. Wykonywano obserwacje zachmurzenia. Ponadto w odstępach godzinowych rejestrowano wyniki pionowych sondaży temperatury, prędkości i kierunku wiatru.

Z eksperymentu przeprowadzonego w Kincaid autorka uzyskała dane pomiarowe jedynie za okres od 12 do 31 maja 1981 roku. Z tego dostępnego materiału, do weryfikacji modelu, wybrano dane dla pięciu terminów pomiarowych:

- 12.05.1981 r., godzina 12 - 13,
- 16.05.1981 r., godzina 9 - 10,
- 16.05.1981 r., godzina 12 - 13,
- 24.05.1981 r., godzina 17 - 18,
- 27.05.1981 r., godzina 10 - 11.

Pierwszym kryterium selekcji był zasięg pomiarów, który, jak zaznaczono w rozdziale 5.1., powinien być większy niż odległość jednogodzinnego transportu zanieczyszczenia. Drugim zastosowanym kryterium było występowanie zmienności warunków meteorologicznych i/lub istotnej zmienności parametrów emisji w okresie obejmującym rozpatrywany epizod meteorologiczny oraz epizody wcześniejsze uwzględniane w obliczeniach.

W dalszej części pracy dla poszczególnych epizodów przyjęto nazwy utworzone w oparciu o dzień wykonywania i godzinę zakończenia pomiarów. Zgodnie z tą zasadą np. ostatni wymieniony termin pomiarowy oznaczany jest jako: "D27G11" /dzień 27 godzina 11/.

Wybrane terminy pomiarowe cechuje różny charakter zmienności parametrów opisujących rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w okresie obejmującym dany epizod oraz epizody wcześniejsze. Dla terminu D24G18 występuje zmiana stanu równowagi atmosfery i wysokości warstwy mieszania. Dla epizodu D27G11 zachodzi ponadto zmiana kierunku wiatru. W przypadku terminu pomiarowego D16G10 występuje zmiana stanu równowagi i kierunku wiatru. Dla terminu D12G13 zachodzi znaczna zmiana natężenia emisji zanieczyszczenia

oraz zmiana wysokości warstwy mieszania i kierunku wiatru. Dla epizodu D16G13 występuje zmiana kierunku wiatru. We wszystkich omówionych wyżej przypadkach zachodzi zmiana prędkości wiatru.

Wartości parametrów meteorologicznych i parametrów emisji dla wyróżnionych terminów pomiarowych oraz poprzedzających je epizodów uwzględnianych w obliczeniach, podano w tabelicy 5.1.

Wysokość warstwy mieszania określono w oparciu o pionowe sondażę temperatury. Przyjmowano, że podstawa górnej warstwy izotermicznej o gradiencie temperatury $\frac{\Delta T}{\Delta z} \geq 0 \frac{^{\circ}\text{C}}{100 \text{ m}}$ ogranicza pionowe rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń /27/. Ze względu na małe zróżnicowanie terenu, przyjęto stały dla obszaru współczynnik szorstkości podłoża. Wartość $z_0 = 0,21 \text{ m}$.

Wartości stężeń pomiarowych dla pięciu wybranych terminów, wykorzystane do oceny jakości modelu zawarte są w tabulogramach wyników programu /dodatek B/. Są one zestawione z wartościami stężeń obliczonych modelem SPM i modelem Pasquilla, stosowanym w obliczeniach rutynowych w Polsce. Uwzględniono punkty pomiarowe położone na lulkach o promieniu większym od drogi jednogodzinnego transportu zanieczyszczenia.

Tab. 5.1. Charakterystyka wybranych terminów pomiarowych oraz epizodów meteorologicznych je poprzedzających uwzględnianych w obliczeniach

| Termin pomiarowy | Epizod wcześniejszy | Parametry meteorologiczne | | | | | | Parametry emisji | | |
|------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|--|---------|--|-------|------------------------|---|-------|
| | | Stan równowagi atmosfery | Wysokość warstwy mieszanina | Prędkość i kierunek wiatru / pomiar na wysokości ci z = 100 m/ | | Temperatura otoczenia i ciśnienie atmosferyczne / z = 186 m/ | | Emisja SF ₆ | Prędkość i temperatura gazów wylotowych | |
| | | | | m/s | stopnie | °C | h Pa | | kg/godz | m/s |
| D24G18 | D24G16 | 3 | 2000 | 5,5 | 267,1 | 21,0 | 966,0 | 61,69 | 14,8 | 395,0 |
| | D24G17 | 3 | 2000 | 4,6 | 267,3 | 19,8 | 966,0 | 63,05 | 14,9 | 396,6 |
| | | 4 | 1002 | 5,2 | 268,1 | 19,9 | 965,7 | 65,77 | 15,4 | 395,8 |
| D27G11 | D27G10 | 2 | 675 | 2,3 | 6,3 | 19,4 | 967,0 | 45,81 | 15,7 | 440,0 |
| | | 1 | 2000 | 1,6 | 19,3 | 21,1 | 968,0 | 41,73 | 15,5 | 442,0 |
| D16G10 | D16G8 | 2 | 2000 | 5,9 | 142,7 | 16,2 | 973,2 | 58,06 | 14,17 | 442,0 |
| | D16G9 | 2 | 2000 | 5,0 | 128,1 | 16,8 | 973,2 | 58,51 | 16,00 | 442,0 |
| | | 3 | 2000 | 6,2 | 110,9 | 18,2 | 973,4 | 58,97 | 17,92 | 417,0 |
| D12G13 | D12G10 | 1 | 644 | 1,7 | 147,7 | 11,8 | 976,0 | 41,28 | 13,00 | 408,9 |
| | D12G11 | 1 | 614 | 2,4 | 154,4 | 11,8 | 975,9 | 54,43 | 13,10 | 407,4 |
| | | 1 | 742 | 3,3 | 123,1 | 13,1 | 975,1 | 31,75 | 13,90 | 403,8 |
| D16G13 | D16G11 | 3 | 2000 | 6,8 | 117,4 | 18,9 | 973,7 | 60,33 | 13,00 | 409,9 |
| | D16G12 | 3 | 2000 | 6,5 | 113,6 | 20,7 | 973,5 | 58,97 | 13,10 | 407,4 |
| | | 3 | 2000 | 7,7 | 129,1 | 20,0 | 974,4 | 58,51 | 13,90 | 403,8 |

5.4. Wskaźniki statystyczne zastosowane do oceny jakości modelu

Jak wynika z literatury /8,10,21/ ocena jakości modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze nie może być przeprowadzona na podstawie pojedynczej miary statystycznej. W związku z tym do oceny jakości modelu SPM zastosowano wskaźniki statystyczne najczęściej spotykane w literaturze o stosunkowo prostej interpretacji:

- średnie stężenie pomiarowe

$$\bar{S}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{pi} \quad /5.1/$$

- średnie stężenie obliczeniowe

$$\bar{S}_o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{oi} \quad /5.2/$$

gdzie:

S_{pi} - wartość i-tego stężenia pomiarowego,

S_{oi} - wartość i-tego stężenia obliczeniowego,

N - liczebność próby /liczba punktów pomiarowych/

- średnie odchylenie bezwzględne

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{oi} - S_{pi}| \quad /5.3/$$

- stosunek średniego odchylenia bezwzględnego do średniego stężenia pomiarowego

$$\bar{d}_r = \left[\sum_{i=1}^N |S_{oi} - S_{pi}| \right] / \left[\sum_{i=1}^N S_{pi} \right] \quad /5.4/$$

- średnie odchylenie kwadratowe

$$\bar{b} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_{oi} - S_{pi})^2 \right]^{0,5} \quad /5.5/$$

- współczynnik zmienności modelu

$$W_z = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_{pi} - S_{oi})^2 \right]^{0,5} / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{pi} \right] \quad /5.6/$$

- współczynnik korelacji

$$R = \left[\sum_{i=1}^N (S_{pi} - \bar{S}_p) (S_{oi} - \bar{S}_o) \right] / \left[\sum_{i=1}^N (S_{pi} - \bar{S}_p)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (S_{oi} - \bar{S}_o)^2 \right]^{0,5} \quad /5.7/$$

- wariancja wyjaśniona przez model

$$V_c = \left[\sum_{i=1}^N (S_{pi} - \bar{S}_p)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N (S_{pi} - S_{oi}) \right)^2}{N} \right] / \left[\sum_{i=1}^N (S_{pi} - \bar{S}_p)^2 \right] \quad /5.8/$$

- równanie regresji liniowej zmiennej objaśnianej \hat{S}_o względem zmiennej objaśniającej S_p

$$\hat{S}_o = a_r + b_r S_p \quad /5.9/$$

gdzie:

a_r, b_r - współczynniki równania regresji wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów

$$a_r = \bar{S}_o - b_r \bar{S}_p \quad /5.10/$$

$$b_r = \left[\sum_{i=1}^N S_{pi} S_{oi} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{pi} \sum_{i=1}^N S_{oi} \right] / \left[\sum_{i=1}^N S_{pi}^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N S_{pi} \right)^2 \right] \quad /5.11/$$

5.5. Wyniki weryfikacji doświadczalnej modelu

Jak podano wcześniej, weryfikację doświadczalną opracowanego modelu przeprowadzono wykorzystując dane uzyskane z eksperymentu z substancją znacznikową SF₆ w Kincaid.

Charakterystykę wybranych terminów pomiarowych oraz epizodów meteorologicznych je poprzedzających, uwzględnianych w obliczeniach zestawiono w tabelicy 5.1. Do oceny jakości modelu SPM zastosowano wskaźniki statystyczne zamieszczone w rozdziale 5.4.

Wskaźniki statystyczne obliczono także dla modelu Pasquilla, stosowanego w obliczeniach rutynowych w Polsce. Umożliwiło to porównanie obu tych modeli. W tym celu program SPM rozszerzono o dwa dodatkowe podprogramy: PASQ, który wyznacza rozkład stężeń zanieczyszczeń wg modelu Pasquilla oraz WERYF, który wyznacza statystyczne wskaźniki jakości modelu.

Wskaźniki jakości modelu SPM i modelu Pasquilla podano w tabelicy 5.2.

Tab.5.2. Zestawienie wskaźników jakości modelu SPM i modelu Pasquilla PASQ

| Wskaźnik | Jedn. | Termin pomiarowy | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|------------------|------|---------|--------|--------|------|---------|------|--------|--------|--------|------|--------|------|--|
| | | D24G18 | | | D27G11 | | | D16G10 | | | D12G13 | | | D16G13 | | |
| | | SPM | PASQ | SPM | PASQ | SPM | PASQ | SPM | PASQ | SPM | PASQ | SPM | PASQ | SPM | PASQ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | | | | |
| Liczba punktów pomiarowych | - | 75 | | 23 | | 34 | | 40 | | 37 | | | | | | |
| Promień łuku pomiarowego | km | 30 ; 50 | | 10 ; 15 | | 50 | | 15 ; 20 | | 50 | | | | | | |
| Średnie stężenie pomiarowe | ppt | 7,516 | | 46,691 | | 8,132 | | 58,005 | | 2,655 | | | | | | |
| Średnie stężenie obliczeniowe | ppt | 7,541 | | 34,457 | | 2,609 | | 0,788 | | 33,773 | | 2,174 | | 1,415 | | |
| Średnie odchylenie bezwzględne | ppt | 4,137 | | 17,397 | | 5,740 | | 8,093 | | 38,996 | | 55,831 | | 2,846 | | |
| Stosunek średniego odchylenia bezwzględnego do średniego stężenia pomiarowego | - | 0,550 | | 0,373 | | 0,706 | | 0,995 | | 0,672 | | 0,963 | | 1,068 | | |
| Średnie odchylenie kwadratowe | ppt | 14,227 | | 32,037 | | 12,706 | | 15,891 | | 60,927 | | 90,892 | | 7,585 | | |

c.d. Tab. 5.2.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|-----|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Współczynnik zmienności modelu | - | 1,906 | 2,757 | 0,702 | 1,225 | 1,586 | 1,983 | 1,064 | 1,587 | 1,977 | 2,885 |
| Wariancja wyjaś- niona przez model | - | 0,602 | 0,167 | 0,814 | 0,432 | 0,224 | -0,214 | 0,300 | -0,557 | 0,533 | 0,004 |
| Współczynnik korelacji | - | 0,861 | 0,849 | 0,953 | 0,983 | 0,652 | 0,216 | 0,643 | 0,384 | 0,732 | 0,274 |
| Współczynnik a _r równania re- gresji | ppt | -0,449 | -0,459 | 3,582 | 2,140 | 0,387 | 0,459 | 11,617 | 1,245 | 0,944 | 1,063 |
| Współczynnik b _r równania re- gresji | - | 1,063 | 1,346 | 0,661 | 0,352 | 0,273 | 0,040 | 0,382 | 0,016 | 0,579 | 0,132 |

Z danych zestawionych w tabelicy 5.2. wynika, że dla przeprowadzonych pięciu serii pomiarowych w dwóch przypadkach /serie: D24G18 i D16G13/ średnie stężenia obliczone modelem SPM wykazują bardzo dobrą zgodność z pomiarami. Dla serii pomiarowych: D27G11 i D12G13 występuje dobra zgodność. Zgodność stężeń średnich wyznaczonych modelem SPM i pomierzonych można więc uznać za zadawalającą. Dla stężeń średnich obliczonych wg modelu Pasquilla zgodność z danymi otrzymanymi z pomiarów jest znacznie gorsza.

Wartość stosunku średniego odchylenia bezwzględnego do średniego stężenia pomiarowego winna być jak najmniejsza. Przyjmuje się, że dla dobrego modelu wartość tego wskaźnika powinna być mniejsza od jedności. Wartości tego wskaźnika dla opracowanego modelu zawarte są w przedziale od 0,373 do 0,712. Dla modelu Pasquilla wartości wskaźnika wahają się od 0,636 do 1,068.

Dla wszystkich przypadków współczynnik korelacji dla modelu SPM zweryfikowany statystycznie ma wartości znacznie wyższe od wartości krytycznych tego współczynnika dla poziomu istotności 5%. Natomiast dla modelu Pasquilla współczynnik korelacji dla trzech na pięć rozpatrywanych serii pomiarowych nie osiąga krytycznej wartości tego wskaźnika /serie: D16G10, D12G13, D16G13/.

Wartości współczynnika zmienności dla opracowanego modelu wahają się od 0,702 do 1,986. Dla modelu Pasquilla wartości tego wskaźnika zawierają się w przedziale od 1,225 do 2,885. Przyjmuje się, że wartości współczynnika

zmienności dla dobrego modelu powinny być mniejsze od jedności. Duże wartości tego wskaźnika wynikają z dużych wartości średniego odchylenia kwadratowego.

Średnie odchylenie kwadratowe pomiędzy wynikami modelu SPM i pomiarami ma stosunkowo duże wartości. Wyjaśnienie tego faktu jest stosunkowo proste. Wynika on z natury fizycznej rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza na duże odległości. Na trajektorię ruchu mas powietrza nakładają się bliżej nieokreślone wielko i średnio skalowe ruchy turbulencyjne. W efekcie tych zjawisk rzeczywista oś smugi oscyluje w otoczeniu trajektorii, która w modelu SPM aproksymowana jest ciągiem segmentów. Weryfikacja smugowych modeli transportu i dyfuzji zanieczyszczeń w atmosferze opisana w opracowaniu "Diagnostic validation of plume models at a plains site" /29/ przeprowadzona na podstawie wyników eksperymentu w Kincaid /tego samego, który posłużył do weryfikacji modelu SPM/ wykazała, że dla większości rozpatrywanych modeli, w tym dla stosowanych w obliczeniach rutynowych w USA, wskaźniki statystyczne nie osiągnęły zadawalających wartości. Pomiary w Kincaid, jak wspomniano, przeprowadzono dla pojedynczego punktowego źródła emisji. W praktyce spotykamy się głównie z zespołami źródeł emisji. W tych warunkach należy się spodziewać znacznie mniejszych wartości średniego odchylenia kwadratowego.

Dla modelu SPM wariancja wyjaśniona przez model waha się od 0,224 do 0,814. Tylko dla jednej serii pomiarowej

/seria: D16G10/, wartość tego wskaźnika jest mniejsza od 0,3, która uznawana jest za dolną granicę dla dobrych modeli. Wyniki badań modelu Pasquilla natomiast wykazują, że tylko w jednym przypadku na pięć wariancja wyjaśniona przez model przekracza wartość 0,3.

Idealne wartości współczynników regresji, przy pełnej zgodności wyników modelu z pomiarami, wynoszą $a_r = 0$ i $b_r = 1$. Dla modelu SPM wartości współczynnika a_r w czterech przypadkach na pięć nie przekraczają 10% wartości średniego stężenia pomiarowego. Współczynnik regresji b_r dla trzech przypadków jest większy od 0,5 /dla serii: D24G18 jest nawet bardzo bliski jedności/. Dla pozostałych przypadków jego wartość waha się od 0,273 do 0,383 lecz jest statystycznie istotna. Model Pasquilla daje gorsze wyniki.

Reasumując można stwierdzić, że dla wszystkich przypadków wskaźniki jakości modelu SPM są lepsze lub znacznie lepsze od wskaźników uzyskanych dla modelu Pasquilla. Model SPM można uznać za poprawny i nadający się do zastosowania w praktyce.

6. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA MODELU SPM

Opracowany segmentowy, smugowy model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze umożliwia symulację dyspersji zanieczyszczeń pochodzących z emitorów punktowych, przy uwzględnieniu czasowej zmienności parametrów emisji i warunków meteorologicznych oraz zmienności warunków terenowych na drodze transportu zanieczyszczeń, w oparciu o dane meteorologiczne pochodzące z prowadzonych w Polsce pomiarów rutynowych.

Uwzględnienie zmienności w/w parametrów zwiększa zakres zastosowania modelu SPM w stosunku do modelu Pasquilla stosowanego w obliczeniach rutynowych w Polsce, w którym zakładana jest jednorodność i stacjonarność parametrów wpływających na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w atmosferze.

Model SPM może być stosowany, podobnie jak w/w model Pasquilla, do wyznaczania rozkładów stężeń zanieczyszczeń 30-minutowych, 24-godzinnych i średniorocznych, jak również częstotści przekraczania zadanych poziomów stężeń.

Opracowany model pozwala na zwiększenie skali przestrzennej obliczeń do kilkudziesięciu kilometrów podczas gdy przy zastosowaniu modelu Pasquilla skala przestrzenna nie może przekraczać dziesięciu kilometrów.

Zwiększenie skali przestrzennej obliczeń przy zastosowaniu modelu SPM jest możliwe przez uwzględnienie w opracowanym modelu zmienności: parametrów emisji /natężenie emisji, prędkość i temperatura gazów wylotowych z komina/, warunków meteorologicznych /prędkość i kierunek wiatru, wysokość warstwy mieszania, stan równowagi atmosfery, rodzaj i natężenie opa-

dów atmosferycznych/ oraz warunków terenowych na drodze transportu zanieczyszczeń /współczynnik szorstkości terenu, prędkość suchego osiadania zanieczyszczeń/, jak również procesów usuwania zanieczyszczeń z atmosfery /przemiana chemiczna, wymywanie zanieczyszczeń przez opady atmosferyczne, pochłanianie zanieczyszczeń przez podłoże/.

Skala przestrzenna obliczeń modelu SPM pozwala na stosowanie tego modelu między innymi do symulacji napływu zanieczyszczeń na analizowany obszar. Wykorzystanie tej możliwości jest szczególnie istotne dla obszarów objętych systemem automatycznego monitoringu zanieczyszczeń.

Możliwość zastosowania modelu SPM do wyznaczania napływu zanieczyszczeń została potwierdzona praktycznie przez wykonanie obliczeń napływu dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego. Zakres i wyniki tych obliczeń zostały przedstawione w dodatku C.

Ze względu na fakt, że w modelu SPM uwzględnia się czasową zmienność parametrów emisji, model ten może być również wykorzystany do oceny stanu zagrożenia środowiska w warunkach awarii.

Charakterystyka danych wejściowych do modelu SPM jest następująca:

- | | |
|--|---|
| • liczba źródeł emisji | - dowolna |
| • liczba epizodów meteorologicznych | - dowolna |
| • natężenie emisji zanieczyszczenia ze źródła | } zmienne w czasie z krokiem dyskretyzacji czasowej modelu Δt , |
| • prędkość i temperatura gazów na wylocie z komina | |

| | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• prędkość wiatru• kierunek wiatru• wysokość warstwy mieszania• stan równowagi atmosfery• współczynnik przemiany chemicznej zanieczyszczenia• współczynnik wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne | } zmiennie w czasie z krokiem dyskretyzacji czasowej modelu Δt , |
| <ul style="list-style-type: none">• współczynnik szorstkości terenu• prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia | } zmiennie w zadanej siatce kwadratów lub stałe dla analizowanego obszaru |
| <ul style="list-style-type: none">• skala przestrzenna | - kilkadziesiąt kilometrów |
| <ul style="list-style-type: none">• czas uśredniania stężeń zanieczyszczenia | } krok dyskretyzacji czasowej. Typowe wartości dla Δt : 30 minut, 1 godzina. |

Zakres zastosowania modelu SPM może zostać rozszerzony jak to przedstawiono poniżej.

Przy wykorzystaniu algorytmów zawartych w opracowaniu: "Metody obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza. Źródła liniowe i powierzchniowe" /11/ model SPM może być zastosowany do symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza ze źródeł liniowych i powierzchniowych.

7. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie niniejszej pracy można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Opracowany segmentowy, smugowy model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze /Segmented Plume Model/ i jego realizacja komputerowa umożliwiają symulację dyspersji zanieczyszczeń pochodzących z zespołu emitorów punktowych, przy uwzględnieniu czasowej zmienności parametrów emisji i warunków meteorologicznych oraz zmienności warunków terenowych na drodze transportu zanieczyszczeń, w oparciu o dane meteorologiczne pochodzące z prowadzonych w Polsce pomiarów rutynowych.
2. Weryfikacja modelu SPM, przeprowadzona przy wykorzystaniu danych z eksperymentu w Kincaid, Illinois, USA, potwierdza przydatność modelu do wyznaczania rozkładów stężeń zanieczyszczeń w warunkach zmienności w/w parametrów.
3. Porównanie statystycznych wskaźników jakości modelu SPM i modelu Pasquilla, stosowanego w obliczeniach rutynowych w Polsce wskazuje, że dla wszystkich rozpatrywanych serii pomiarowych z eksperymentu w Kincaid model SPM daje znacznie lepsze wyniki.
4. Model SPM może być stosowany do wyznaczania rozkładów stężeń zanieczyszczeń: 30-minutowych, 24-godzinnych i średniorocznych, jak też częstości przekracza-

- nia zadanych poziomów stężeń zgodnie z wymaganym w Polsce zakresem obliczeń. Uwzględnienie w modelu SPM zmienności: parametrów emisji, warunków meteorologicznych i terenowych na drodze transportu zanieczyszczeń oraz procesów usuwania zanieczyszczeń z atmosfery pozwala na zwiększenie skali przestrzennej obliczeń do kilkudziesięciu kilometrów.
5. Możliwość wykonywania obliczeń przy użyciu modelu SPM w skali przestrzennej do kilkudziesięciu kilometrów pozwala na stosowanie tego modelu do obliczania napływu zanieczyszczeń.
 6. Uwzględnienie w opracowanym modelu czasowej zmienności parametrów emisji umożliwia stosowanie modelu w szczególności do oceny stanu zagrożenia środowiska w warunkach awarii.
 7. Istnieje możliwość wykorzystania modelu SPM do symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze źródeł liniowych i powierzchniowych.



LITERATURA

1. Bennett M.: Development of a gaussian plume model appropriate to an urban area. W: Atmospheric Pollution 1980. Ed. M.M. Benarie, Elsevier, Amsterdam, 1980
2. Berkowicz R., Olesen H.R., Torp U.: The danish gaussian air pollution model /OML/: description, test and sensitivity analysis in view of regulatory applications. Proc. 15 ITM: Air Pollution Modelling and Its Applications, St. Louis, USA, 16-19 April, 1985
3. Briggs G.A.: Discussion on the comparative consequences of different plume rise formulas, Atm. Env., 1968, 2, 197-225
4. Briggs G.A.: Plume rise predictions. W: Atmospheric Science and Power Production, Ed. D.Randerson, Office of Scientific and Technical Information, U.S. Department of Energy, 1984
5. Brummage K.G.: The calculation of atmospheric dispersion from a stack. Atm. Env., 1968, 2, 197-224
6. Carson J.E., Moses H.: The validity of several plume rise formulas. J. Air Poll. Control. Ass., 1969, 19, 862-866
7. Chan M.M., Head S.J., Machiraju S.: Development and validation of an air pollution model for complex terrain application. Proc. 10 ITM: Air Pollution Modelling and Its Application, Rome, Italy, 23-26 October, 1979

8. Chrósciel St., Kraszewski A.: Wytyczne dotyczące implementacji komputerowej modeli matematycznych rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. Zadanie 7.2.3.2 w PR-8. Maszynopis, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982
9. Chrósciel St., Markiewicz M.: Modelling of the atmospheric dispersion of sulphur dioxide in the urban area referred to the Cracow agglomeration. Env. Prot. Eng., 1985, 2, 65-72
10. Chrósciel St., Markiewicz M.: Weryfikacja matematycznego gaussowskiego modelu dyfuzji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym dla obszarów zurbanizowanych w eksperymencie MONAT-84. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej: Strategia i Technika Ochrony Powietrza Atmosferycznego, Kraków, 16-17 maj, 1985, Zeszyt B
11. Chrósciel St., Czaja L., Jaworski W., Markiewicz M.: Metody obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Źródła liniowe i powierzchniowe. Wydawnictwa PZITS, Warszawa 1986
12. Chrósciel St., Czaja L., Arcichowski P., Jurkiewicz G.: Przeprowadzenie badań terenowych z zastosowaniem substancji znacznikowych w hucie miedzi Głogów dla potrzeb opracowania metod weryfikacji modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza. Zadanie 04.10.10.01.05 w CPBP Nr 04.10. Maszynopis, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1988

13. Directory of atmospheric tracer experiments. Ed. H.M. Ap.Simon, Air Pollution Mechanical Engineering Dept., Imperial College, London, 1988
14. Djurfors S., Nettville D.: Buoyant plume rise in nonuniform wind conditions. J. Air Poll. Contr. Ass., 1978, 28, 780-785
15. Enger L.: A higher order closure model applied to dispersion in a convective PBL. Atm. Env., 1986, 20, 879-895
16. Glending J.W., Businger J.A., Farber R.J.: Improving plume rise prediction accuracy for stable atmospherics with complex vertical structure. J. Air Poll. Contr. Ass., 1984, 34, 1128-1133
17. Hanna S.R.: Handbook on Atmospheric Diffusion. Technical Information Center, U.S. Department of Energy, 1982
18. Henderson-Sellers B.: Numerical Simulation of plume rise. J. Air Poll. Contr. Ass., 1988, 38, 46-51
19. Holnicki P., Kałuszko A., Ostrowski R., Zochowski A.: Testowanie i weryfikacja programu prognozowania stężenia zanieczyszczeń atmosferycznych. Badania symulacyjne różnych wariantów sterowania emisją w wybranej aglomeracji miejskiej. Zadanie 7.2.6.6 w PR-8. Maszynopis, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1985
20. Information on availability of UNAMAP /Version 5/. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, 1983

21. Juda-Kuczka K.: Trójwarstwowy model matematyczny rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza na obszarach zurbanizowanych /na przykładzie Krakowa/. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska ISiW, Warszawa 1986
22. Juda J., Chróściel St.: Ochrona powietrza atmosferycznego, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974
23. Kasprzycki A.: Model numeryczny rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń konwencjonalnych i radioaktywnych w atmosferze z pojedynczego wysokiego źródła uwzględniający zmienność wielkości emisji, warunków meteorologicznych i topograficznych. Maszynopis, IMGW, Warszawa 1980
24. Krishnamurthy R., Hall J.G.: Numerical and approximate solutions for plume rise. *Atm. Env.*, 1987, 2, 2083-2091
25. Lange R.: ADPIC - A three-dimensional transport diffusion model for the dispersal of atmospheric pollutants and its validation against regional tracer studies. *J. Appl. Meteor.*, 1978, 17, 320-329
26. Lewellen W.S., Teske M.: Second-order closure modelling of diffusion in the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 1976, 10, 69-90
27. Lityńska Z., Adamska B.: Opracowanie statystyk meteorologicznych dla modeli typu REGSIM z 4 stacji aerologicznych. Zadanie 7.2.1.2 w PR-8. Maszynopis, IMGW, Warszawa 1984

28. Liu M.K., Moore G.E., Holman H.Y.: Survey of plume models for atmospheric application. EPRI Interim Report EA - 2243, System Applications Inc., San Rafael, 1982
29. Liu M.K., Moore G.E.: Diagnostic validation of plume models at a Plains site. EPRI Final Report, EA - 3077, System Applications Inc., San Rafael, 1984
30. Ludwig F.L., Gasiorek L.S., Ruff R.E.: Simplification of a gaussian puff model for real-time microcomputer use. *Atm. Env.*, 1976, 11, 431-436
31. Ludwig F.L.: Effect of a change of atmospheric stability on the growth rate of puffs used in plume simulation models. *J. Appl. Met.*, 1982, 21, 1371-1374
32. Ludwig F.L., Salvador R., Bornstein R.: An adaptive volume plume model. *Atm. Env.*, 1989, 23, 127-138
33. Łobodzki L., Madany A.: Określenie parametrów warstwy przyziemnej na podstawie rutynowych obserwacji meteorologicznych. Materiały seminarium Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985
34. Madany A.: Promieniowanie i dynamika atmosfery. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1971
35. Markiewicz M.: Wyznaczanie wyniesienia smugi. W pracy zbiorowej pod kierunkiem doc. St. Chróściela: Modyfikacja założeń metodycznych i kalibracji aparatury pomiarowej dla potrzeb badań zanieczyszczeń powietrza przy użyciu substancji znacznikowych. Zadanie 0.4.10.10.01.05 w CPBP Nr 04.10. Maszynopis, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1987

36. Montgomery T.L., Carpenter S.B.: Results of recent TVA investigations of plume rise. J. Air Poll. Contr. Ass., 1972, 22, 779-784
37. Moses H., Kraimer M.R.: Plume rise determination—a new technique without equations. J. Air Poll. Contr. Ass., 1972, 22, 621-630
38. Myers T.C., Reynolds S.D.: EPRI plume model validation and development data formats: plains site. System Applications Inc., San Rafael, 1984
39. Nowicki M.: Uniwersalne współczynniki dyfuzji atmosfery. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1976
40. Nowicki M., Jaworski W., Bzowski J., Dobija J., Markiewicz M., Radwańska A., Szumanowska M., Arcichowski P.: Opracowanie metodyki wykorzystywania ruchomej stacji pomiarowej dla oceny stanu zagrożenia atmosfery. Zadanie 7.1.5.9 w PR-8. Maszynopis, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985
41. Nowicki M.: MONAT-84: Experimental study for the needs of air pollution control in Cracow, Poland. Env. Prot. Eng., 1985, 2, 11-16
42. Nowicki M.: Wyznaczanie strefy ochronnej i emisji dopuszczalnej dla Zakładu Kineskopów kolorowych. Maszynopis, Opracowanie dla ORPOT - SIMP, Warszawa 1985

43. Ostrowski R., Holnicki P., Żochowski A.: Wstępna koncepcja modelu URFOR przeznaczonego do krótkoterminowego prognozowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych w skali miasta. Zadanie 7.02.06 w PR-8. Maszynopis. Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1981
44. Pasquill F.: Atmospheric Diffusion. Second edition. John Wiley and Sons Lmt. New York, 1974
45. Petersen B.L.: Performance evaluation of integral and analytical plume rise algorithms. J. Air Poll. Contr. Ass., 1988, 37, 1314-1319
46. Sheih C.M.: A puff pollutant dispersion model with wind shear and dynamic plume rise. Atm. Env., 1978, 18, 1933-1938
47. Sorbjan Z.: Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze. PWN, Warszawa 1983
48. Straka J., Geis H., Vogt K.J.: Diffusion of waste air puffs and plumes under changing weather conditions. Contribution to Atmospheric Physics, 1981, 54, 207-221
49. Uliasz M.: Propozycje nowych rozwiązań w inżynierskim modelowaniu stanu zanieczyszczenia atmosfery. Materiały z seminarium Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1987
50. Vogt K.J., Straka J., Geis H.: An extension of the gaussian plume model for the case of changing weather

- conditions. Proc. 10 ITM: Air Pollution Modelling and Its Application, Rome, Italy, 23-26 October, 1979
51. Weil J.C., Brower R.P.: An updated gaussian plume model for tall stacks. J. Air Poll. Contr. Ass., 1984, 34, 818-827
 52. Wytyczne obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. MAGTOŚ, Warszawa 1981
 53. Yamada T.: An application of a three-dimensional simplified second-moment closure numerical model to study atmospheric effects of a large cooling pond. Atm. Env., 1979, 13, 693-704
 54. Zanetti P.: A new mixed segment-puff approach for dispersion modelling. Atm. Env., 1986, 20, 1121-1130.

DODATEK A

Opis danych wejściowych
do programu SPM

Tab.A.1.1. Plik wejściowy zawierający zmienne sterujące oraz dane o obszarze objętym obliczeniami 1/

| Zmienna | Typ ² / | Opis | Jednostka |
|---------|--------------------|---|-----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| LCHEM | I | Zmienna sterująca uwzględnianiem w obliczeniach przemiany chemicznej zanieczyszczenia | - |
| LDP | I | Zmienna sterująca uwzględnianiem w obliczeniach pochłaniania zanieczyszczenia przez podłoże | - |
| LWYM | I | Zmienna sterująca uwzględnianiem w obliczeniach wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne | - |
| N | I | Uwaga: Zmienne mogą przyjmować wartości 1/0 co oznacza odpowiednio: uwzględnienie/pominięcie zjawiska w obliczeniach /1 rekord/ | - |
| WRSZ | Byte | Liczba wierszy informacji tekstowej drukowanej w nagłówku pliku wynikowego Uwaga: $N \geq 1$ /1 rekord/ | - |
| IRG | I | Informacja tekstowa drukowana w nagłówku pliku wynikowego: format 80A1 Zmienna sterująca czytaniem danych o siatce regularnej receptorów. Uwaga: Zmienna może przyjmować wartość 1/0 co oznacza odpowiednio: plik wejściowy zawiera/nie zawiera danych o siatce regularnej receptorów /1 rekord/ | - |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|---|---|---|
| LX | I | Liczba węzłów regularnej siatki receptorów w kierunku osi x w prostokątnym układzie współrzędnych (x,y,z) | - |
| LY | I | Liczba węzłów regularnej siatki receptorów w kierunku osi y w układzie (x,y,z) | - |
| LZ | I | Liczba węzłów regularnej siatki receptorów w kierunku osi z w układzie (x,y,z) | - |
| DX | R | Krok regularnej siatki receptorów w kierunku osi x | m |
| DY | R | Krok regularnej siatki receptorów w kierunku osi y | m |
| DZ | R | Krok regularnej siatki receptorów w kierunku osi z | m |
| XO | R | Współrzędna x-owa węzła regularnej siatki receptorów położonego najbliższej początku układu (x,y,z) | m |
| YO | R | Współrzędna y-owa węzła regularnej siatki receptorów położonego najbliższej początku układu (x,y,z) | m |
| ZO | R | Współrzędna z-owa węzła regularnej siatki receptorów położonego najbliższej początku układu (x,y,z) | m |
| | | Uwaga: LX·LY·LZ ≤ 400 | |
| | | DX > 0 | |
| | | DY > 0 | |
| | | DZ > 0 | |
| | | IRG = 0 to rekord należy pominąć | |
| | | /1 rekord/ | |
| IWR | I | Zmienna sterująca czytaniem danych o punktach ustalonych | - |
| | | Uwaga: Zmienna może przyjmować wartość 1/0 co oznacza odpowiednio: plik zawiera/nie zawiera danych o punktach ustalonych | |
| | | /1 rekord/ | |
| IPW | I | Liczba punktów ustalonych | - |
| | | Uwaga: LX·LY·LZ ≤ 400 | |
| | | IWR = 0 to rekord należy pominąć | |
| | | /1 rekord/ | |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|-------------|---|-------------|
| TPX/I/ TPY/I/ TPZ/I/ | R R R | Współrzędna x-owa punktu ustalonego, w układzie (x,y,z) Współrzędna y-owa punktu ustalonego, w układzie (x,y,z) Współrzędna z-owa punktu ustalonego, w układzie (y,y,z) Uwaga: $I = LX \cdot LY \cdot LZ + 1$, $LX \cdot LY \cdot LZ + LPW$ $LX \cdot LY \cdot LZ + LPW \leq 400$ IWR = 0 to rekord należy pominąć /1 rekord powtórzony LPW razy/ | m m m |
| IZOC | I | Zmienna sterująca czytaniem danych o współczynniku szorstkości podłoża Uwaga: Zmienna może przyjmować wartość 1/0 co oznacza odpowiednio: stałą/zmienną wartość współczynnika szorstkości podłoża w obszarze obliczeniowym /1 rekord/ | - |
| ZOLX | I | Liczba węzłów regularnej siatki współczynnika szorstkości podłoża w kierunku osi x w układzie (x,y,z) | - |
| ZOLY | I | Liczba węzłów regularnej siatki współczynnika szorstkości podłoża w kierunku osi y w układzie (x,y,z) | - |
| ZODX | R | Krok regularnej siatki współczynnika szorstkości podłoża w kierunku osi x | m |
| ZODY | R | Krok regularnej siatki współczynnika szorstkości podłoża w kierunku osi y | m |
| ZOXO | R | Współrzędna x-owa węzła siatki współczynnika szorstkości podłoża położonego najbliższej początku układu (x,y,z) | m |
| ZOYO | R | Współrzędna y-owa węzła siatki współczynnika szorstkości podłoża położonego najbliższej początku układu (x,y,z) Uwaga: $1 \leq ZOLX \leq 20$ $1 \leq ZOLY \leq 20$ $ZODX > 0$ $ZODY > 0$ IZCC = 1 to rekord należy pominąć /1 rekord/ | m |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|---|--|---|
| ZODEL | R | <p>Krok do wyznaczenia średniej wartości współczynnika szorstkości podłoża dla segmentu smugi</p> <p>Uwaga: ZODEL > 0 IZOC = 1 to rekord należy pominąć</p> <p style="text-align: right;">/1 rekord/</p> | m |
| /TZO/I, J/, I=1, ZOLX/ | R | <p>Współczynnik szorstkości podłoża</p> <p>Uwaga: J = 1, ZOLY TZO/I, J/ > 0 IZOC = 1 to rekord należy pominąć</p> <p style="text-align: right;">/1 rekord powtórzony ZOLY razy/</p> | m |
| ZO | R | <p>Współczynnik szorstkości podłoża</p> <p>Uwaga: ZO > 0 IZOC = 0 to rekord należy pominąć</p> <p style="text-align: right;">/1 rekord/</p> | - |
| IVDC | I | <p>Zmienna sterująca czytaniem danych o prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia</p> <p>Uwaga: Zmienna może przyjmować wartości 1/0 co oznacza odpowiednio: stałą/zmienną wartość prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia w obszarze obliczeniowym</p> <p style="text-align: right;">/1 rekord/</p> | - |
| VDLX | I | <p>Liczba węzłów regularnej siatki prędkości osiadania zanieczyszczenia w kierunku osi x w układzie (x, y, z)</p> | - |
| VDLY | I | <p>Liczba węzłów regularnej siatki prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia w kierunku osi y w układzie (x, y, z)</p> | - |
| VDDX | R | <p>Krok regularnej siatki prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia w kierunku osi x</p> | m |
| VDDY | R | <p>Krok regularnej siatki prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia w kierunku osi y</p> | m |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------|---|--|-----|
| VDXO | R | Współrzędna x-owa węzła siatki prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia położonego najbliższej początku układu (x,y,z) | m |
| VDYO | R | Współrzędna y-owa węzła siatki prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia położonego najbliższej początku układu (x,y,z) Uwaga: $1 \leq VDLX \leq 20$ $1 \leq VDLY \leq 20$ $VDXO > 0$ $VDYO > 0$ IVDC = 1 to rekord należy pominąć | m |
| VDDEL | R | Krok do wyznaczenia średniej wartości prędkości suchego osiadania zanieczyszczenia dla segmentu smugi Uwaga: $VDDEL \geq 0$ IVDC = 1 to rekord należy pominąć | m |
| /TVD/I, J/ I=1, VDLX/ | R | Prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia Uwaga: $J = 1, VDLY$ $TVD/I, J/ > 0$ IVDC = 1 to rekord należy pominąć | m/s |
| VD | R | Prędkość suchego osiadania zanieczyszczenia Uwaga: $VD \geq 0$ IVDC = 0 to rekord należy pominąć | m/s |

UWAGA 1/ Dane wprowadzane formatem swobodnym.

UWAGA 2/ Przyjęto oznaczenia: I - zmienna typu INTEGER, R - zmienna typu REAL.

Tab. A.2. Plik wejściowy zawierający dane meteorologiczne 1/

| Zmienna | Typ ^{2/} | Opis | Jednostka |
|---------|-------------------|---|-----------|
| WRSZ | Byte | Informacja tekstowa ułatwiająca identyfikację pliku z danymi; format 80A1 /1 rekord/ | - |
| LWE | I | Liczba wszystkich epizodów meteorologicznych w pliku | - |
| IRE | I | Liczba rozpatrywanych epizodów przy ustalaniu czy eliminować emitor z dalszych obliczeń Uwaga: $1 \leq LWE \leq 30$ $1 \leq IRE \leq LWE$ /1 rekord/ | - |
| HA | R | Wysokość anemometru | m |
| DT | R | Kroki dyskretyzacji czasowej modelu /czas trwania epizodu meteorologicznego/ Uwaga: Typowymi wartościami dla DT są: 30 minut, 1 godzina /1 rekord/ | s |
| N/I/ | I | Numer epizodu meteorologicznego. Epizody należy uporządkować w kolejności ich występowania rozpoczynając od epizodu, dla którego wyznaczony jest rozkład stężeń zanieczyszczenia. | |
| TALF/I/ | R | Kierunek wiatru /skąd wieje/ licząc od Pn zgodnie ze wskazówkami zegara | stopnie |
| TU/I/ | R | Prędkość wiatru na wysokości anemometru | m/s |
| TTC/I/ | R | Temperatura otoczenia | oC |
| TR/I/ | R | Stan równowagi atmosfery | - |
| TPI/I/ | R | Grubość przyziemnej warstwy inwersyjnej, temperatury /brak przyziemnej warstwy inwersyjnej to TPI/I/ = TWM/I/ | m |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------|-------------|--|-----------------------|
| TWM/I/ TCHEM/I/ TWYM/I/ | R R R | <p>Wysokość warstwy mieszania Współczynnik przemieszania chemicznej zanieczyszczenia Współczynnik wymywania zanieczyszczenia przez opady atmosferyczne</p> <p>Uwaga: $I = 1, LWE$ $0^\circ \leq TAF/I \leq 360^\circ$ $TU/I \geq 1$ $1 \leq TR/I \leq 6$ $TP/I > 0$ $TWM/I > 0$</p> <p>/1 rekord powtórzony LWE razy/</p> | m %/godz %/godz |

UWAGA 1/ Dane wprowadzane formatem swobodnym.

UWAGA 2/ Przyjęto oznaczenia: I - zmienna typu INTEGER, R - zmienna typu REAL

Tab. A.3. Plik zawierający dane o źródłach emisji 1/

| Zmienna | Typ 2/ | Opis | Jednostka |
|---------|--------|--|-----------|
| LE | I | Liczba wszystkich emitorów | - |
| LWEL | I | Liczba wszystkich epizodów meteorologicznych Uwaga: $1 \leq LE \leq 300$ $1 \leq LWEL = LWE \leq 30$ | - |
| NR/I/ | I | Numer emitora | - |
| TEX/I/ | R | Współrzędna x-owa emitora w prostokątnym układzie współrzędnych (x,y,z) | m |
| TEY/I/ | R | Współrzędna y-owa emitora w prostokątnym układzie współrzędnych (x,y,z) | m |
| TH/I/ | R | Wysokość geometryczna komina | m |
| TD/I/ | R | Średnica wewnętrzna przewodu emitującego zanieczyszczenia /1 rekord/ | m |
| J | I | Numer epizodu meteorologicznego | - |
| TE/I,J/ | R | Natężenie emisji zanieczyszczenia | mg/s |
| TT/I,J/ | R | Temperatura gazów na wylocie z komina | °K |
| TV/I,J/ | R | Prędkość gazów na wylocie z komina Uwaga: J = 1, LWEL /1 rekord powtórzony dla ustalonego emitora LWEL razy/ | m/s |
| | | Uwaga: TH/I/ > 0 TD/I/ > 0 TE/I/ > 0 TT/I/ > 273,15°K TV/I/ > 0 /sekwencję NR/I=...TV/I,J/ składającą się z 1+LWEL rekordów należy powtórzyć LE razy/ | |

UWAGA 1/ Dane wprowadzane formatem swobodnym.

UWAGA 2/ Przyjęto oznaczenia: I - zmienna typu INTEGER, R - zmienna typu REAL.

DODATEK B

Wartości stężeń pomiarowych i obliczonych modelem SPM oraz modelem Pasquilla stosowanym w obliczeniach rutynowych w Polsce.

Wartości wskaźników statystycznych jakości modelu SPM i modelu Pasquilla.

/Na podstawie danych z eksperymentu z substancją znacznikową SF₆ w Kincaid, Illinois, USA/.

TAB. B.1.

WARTOSCI STEZEN POMIAROWYCH I OBLICZONYCH MODELEM SPM ORAZ MODELEM PASQUILLA PASQ STOSOWANYM W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE
(EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA , 24.05.1981 GODZ. 17-18)

| LP | PUNKT WSP. X | RECEPCYJNY WSP. Y | STEZENIE POMIAROWE | STEZENIA OBLICZONE SPM | PASQ |
|----|--------------|-------------------|--------------------|------------------------|--------|
| / | m | m | ppt | ppt | ppt |
| 1 | 316455. | 4384582. | 77.60 | 62.66 | 68.43 |
| 2 | 335121. | 4383675. | 78.90 | 12.22 | 13.63 |
| 3 | 316480. | 4385860. | 102.80 | 183.68 | 231.95 |
| 4 | 335155. | 4386272. | 67.10 | 50.85 | 128.49 |
| 5 | 315705. | 4387098. | 86.00 | 131.42 | 141.92 |
| 6 | 335155. | 4388293. | 28.90 | 44.78 | 75.40 |
| 7 | 315645. | 4387884. | 80.30 | 47.39 | 42.19 |
| 8 | 335145. | 4389742. | 9.00 | 21.13 | 15.18 |
| 9 | 315681. | 4389030. | 13.20 | 3.86 | 2.17 |
| 10 | 314900. | 4389918. | 4.40 | .13 | .05 |
| 11 | 314895. | 4391138. | .00 | .00 | .00 |
| 12 | 290887. | 4356395. | .00 | .00 | .00 |
| 13 | 294897. | 4336300. | .00 | .00 | .00 |
| 14 | 293000. | 4356406. | .00 | .00 | .00 |
| 15 | 298947. | 4336207. | .00 | .00 | .00 |
| 16 | 294259. | 4356406. | .00 | .00 | .00 |
| 17 | 300040. | 4337793. | .00 | .00 | .00 |
| 18 | 295239. | 4356356. | .00 | .00 | .00 |
| 19 | 301417. | 4338553. | .00 | .00 | .00 |
| 20 | 296306. | 4356400. | .00 | .00 | .00 |
| 21 | 297820. | 4356199. | .00 | .00 | .00 |
| 22 | 304890. | 4340152. | .00 | .00 | .00 |
| 23 | 297890. | 4357949. | .00 | .00 | .00 |
| 24 | 306491. | 4340133. | .00 | .00 | .00 |
| 25 | 298483. | 4359607. | .00 | .00 | .00 |
| 26 | 308632. | 4340895. | .00 | .00 | .00 |
| 27 | 299493. | 4359547. | .00 | .00 | .00 |
| 28 | 300215. | 4360394. | .00 | .00 | .00 |
| 29 | 312006. | 4341079. | .00 | .00 | .00 |
| 30 | 301250. | 4360405. | .00 | .00 | .00 |
| 31 | 312991. | 4341546. | .00 | .00 | .00 |
| 32 | 302800. | 4360293. | .00 | .00 | .00 |
| 33 | 304053. | 4360197. | .00 | .00 | .00 |
| 34 | 316907. | 4343028. | .00 | .00 | .00 |
| 35 | 304600. | 4361650. | .00 | .00 | .00 |
| 36 | 317005. | 4346106. | .00 | .00 | .00 |
| 37 | 304625. | 4362949. | .00 | .00 | .00 |
| 38 | 317906. | 4347769. | .00 | .00 | .00 |
| 39 | 306176. | 4364050. | .00 | .00 | .00 |
| 40 | 319556. | 4350906. | .00 | .00 | .00 |
| 41 | 307742. | 4364100. | .00 | .00 | .00 |

C.D. TAB. B.1

| | | | | | |
|----|---------|----------|------|------|------|
| 42 | 320058. | 4352508. | .00 | .00 | .00 |
| 43 | 307800. | 4365859. | .00 | .00 | .00 |
| 44 | 321250. | 4354106. | .00 | .00 | .00 |
| 45 | 324027. | 4353900. | .00 | .00 | .00 |
| 46 | 310900. | 4365587. | .00 | .00 | .00 |
| 47 | 311000. | 4368900. | .00 | .00 | .00 |
| 48 | 326644. | 4358250. | .00 | .00 | .00 |
| 49 | 311045. | 4369689. | .00 | .00 | .00 |
| 50 | 328244. | 4359366. | .00 | .00 | .00 |
| 51 | 311589. | 4370508. | .00 | .00 | .00 |
| 52 | 328356. | 4361793. | .00 | .00 | .00 |
| 53 | 312700. | 4371878. | .00 | .00 | .00 |
| 54 | 328305. | 4363157. | .00 | .00 | .00 |
| 55 | 312744. | 4372694. | .00 | .00 | .00 |
| 56 | 329906. | 4364417. | .00 | .00 | .00 |
| 57 | 312201. | 4373755. | .00 | .00 | .00 |
| 58 | 329909. | 4366199. | .00 | .00 | .00 |
| 59 | 313043. | 4374594. | .00 | .00 | .00 |
| 60 | 331558. | 4367065. | .00 | .00 | .00 |
| 61 | 313689. | 4375341. | .00 | .00 | .00 |
| 62 | 331559. | 4369079. | .00 | .00 | .00 |
| 63 | 313093. | 4376733. | .00 | .00 | .00 |
| 64 | 331606. | 4370154. | .00 | .00 | .00 |
| 65 | 315645. | 4377313. | .00 | .00 | .00 |
| 66 | 331591. | 4371919. | .00 | .00 | .00 |
| 67 | 314690. | 4378539. | .00 | .00 | .00 |
| 68 | 314719. | 4379384. | .00 | .00 | .00 |
| 69 | 333406. | 4375496. | .00 | .00 | .00 |
| 70 | 314744. | 4380523. | .00 | .00 | .00 |
| 71 | 335056. | 4376982. | .00 | .00 | .00 |
| 72 | 316396. | 4381173. | .00 | .00 | .00 |
| 73 | 316445. | 4382933. | .00 | 1.74 | 1.07 |
| 74 | 335056. | 4380422. | 6.40 | .15 | .01 |
| 75 | 316444. | 4383356. | 9.10 | 5.53 | 4.11 |

TAB. B.2.

WARTOSCI STEZEN POMIAROWYCH I OBLICZONYCH MODELEM SPM ORAZ MODELEM PASQUILLA PASQ STOSOWANYM W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE
(EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID, USA , 27.05.1981 GODZ. 10-11)

| LP | PUNKT WSP. X | RECEPCYJNY WSP. Y | STEZENIE POMIAROWE | STEZENIA OBLICZONE SPM | PASQ |
|----|--------------|-------------------|--------------------|------------------------|-------|
| / | m | m | ppt | ppt | ppt |
| 1 | 275800. | 4379668. | .00 | .00 | .00 |
| 2 | 277144. | 4379657. | .00 | .00 | .02 |
| 3 | 277420. | 4378809. | .00 | .02 | .19 |
| 4 | 277820. | 4377990. | .00 | .15 | 1.07 |
| 5 | 279134. | 4378000. | .00 | 2.62 | 5.88 |
| 6 | 280009. | 4378023. | 11.90 | 11.96 | 15.61 |
| 7 | 280613. | 4377472. | 85.90 | 32.88 | 33.02 |
| 8 | 281024. | 4376261. | 146.20 | 62.21 | 48.07 |
| 9 | 281784. | 4376239. | 156.60 | 104.77 | 63.81 |
| 10 | 282509. | 4376215. | 182.20 | 139.23 | 72.78 |
| 11 | 283158. | 4376198. | 236.10 | 150.05 | 72.00 |
| 12 | 283805. | 4376176. | 159.00 | 136.10 | 62.06 |
| 13 | 284463. | 4376155. | 96.00 | 103.04 | 45.64 |
| 14 | 285758. | 4370406. | .00 | 31.40 | 4.45 |
| 15 | 286563. | 4370406. | .00 | 15.11 | 2.18 |
| 16 | 287964. | 4370344. | .00 | 2.83 | .43 |
| 17 | 289849. | 4370293. | .00 | .13 | .02 |
| 18 | 290906. | 4371414. | .00 | .01 | .00 |
| 19 | 292277. | 4372806. | .00 | .00 | .00 |
| 20 | 292365. | 4373587. | .00 | .00 | .00 |
| 21 | 293119. | 4374273. | .00 | .00 | .00 |
| 22 | 296494. | 4375423. | .00 | .00 | .00 |
| 23 | 299024. | 4378988. | .00 | .00 | .00 |

TAB. B.3.

WARTOSCI STEZEN POMIAROWYCH I OBLICZONYCH MODELEM SPM ORAZ MODELEM PASQUILLA PASQ STOSOWANYM W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE
(EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID, USA , 16.10.1981 GODZ. 9-10)

| LP | PUNKT WSP. X | RECEPCYJNY WSP. Y | STEZENIE POMIAROWE | STEZENIA OBLICZONE SPM | STEZENIA OBLICZONE PASQ |
|----|--------------|-------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| / | m | m | ppt | ppt | ppt |
| 1 | 291400. | 4435800. | .00 | .00 | .00 |
| 2 | 289365. | 4435800. | .00 | .00 | .00 |
| 3 | 286100. | 4435980. | .00 | .00 | .00 |
| 4 | 284540. | 4435980. | .00 | .00 | .00 |
| 5 | 282369. | 4435990. | .00 | .00 | .00 |
| 6 | 280100. | 4436000. | .00 | .00 | .00 |
| 7 | 278179. | 4435400. | .00 | .00 | .00 |
| 8 | 276900. | 4435360. | .00 | .00 | .00 |
| 9 | 273513. | 4435379. | .00 | .00 | .00 |
| 10 | 271650. | 4434400. | .00 | .00 | .00 |
| 11 | 269600. | 4432206. | .00 | .00 | .00 |
| 12 | 267050. | 4431855. | .00 | .00 | .00 |
| 13 | 265300. | 4431846. | .00 | .00 | .00 |
| 14 | 263616. | 4432008. | .00 | .00 | .00 |
| 15 | 261444. | 4430850. | .00 | .00 | .00 |
| 16 | 260457. | 4429607. | .00 | .00 | .00 |
| 17 | 257889. | 4427695. | .00 | .00 | .00 |
| 18 | 253844. | 4424565. | .00 | .00 | .00 |
| 19 | 252634. | 4423293. | .00 | .00 | .00 |
| 20 | 250837. | 4423294. | .00 | .00 | .00 |
| 21 | 248096. | 4420379. | 6.40 | .04 | .00 |
| 22 | 247647. | 4418105. | 7.40 | .08 | .00 |
| 23 | 246395. | 4417077. | 13.80 | .34 | .00 |
| 24 | 244106. | 4416107. | 28.50 | 3.04 | .00 |
| 25 | 243895. | 4414301. | 32.70 | 5.48 | .00 |
| 26 | 244000. | 4412231. | 30.00 | 9.20 | .00 |
| 27 | 241704. | 4411525. | 31.50 | 17.59 | .05 |
| 28 | 242055. | 4409316. | 25.60 | 22.40 | .46 |
| 29 | 239493. | 4408695. | 43.20 | 21.41 | 2.05 |
| 30 | 238995. | 4404786. | 5.30 | 8.95 | 14.78 |
| 31 | 235992. | 4399907. | 52.10 | .14 | 6.20 |
| 32 | 235194. | 4398793. | .00 | .03 | 2.71 |
| 33 | 235095. | 4396742. | .00 | .00 | .49 |
| 34 | 235458. | 4394290. | .00 | .00 | .03 |

TAB. B.4.

WARTOSCI STEZEN POMIAROWYCH I OBLICZONYCH MODELEM SPM ORAZ MODELEM PASQUILLA PASQ STOSOWANYM W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE
(EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA , 12.05.1981 GODZ. 12-13)

| LP | PUNKT WSP. X | RECEPCYJNY WSP. Y | STEZENIE POMIAROWE | STEZENIA OBLICZONE SPM | STEZENIA OBLICZONE PASQ |
|----|--------------|-------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| / | m | m | ppt | ppt | ppt |
| 1 | 297302. | 4391964. | 27.20 | .00 | .00 |
| 2 | 287601. | 4399793. | 6.40 | .00 | .00 |
| 3 | 287650. | 4403497. | .00 | .00 | .00 |
| 4 | 286572. | 4400281. | 7.70 | .00 | .00 |
| 5 | 286432. | 4404300. | .00 | .00 | .00 |
| 6 | 285642. | 4404900. | .00 | .00 | .00 |
| 7 | 285150. | 4400398. | 7.70 | .00 | .00 |
| 8 | 284200. | 4405618. | .00 | .00 | .00 |
| 9 | 282940. | 4406544. | .00 | .13 | .00 |
| 10 | 281073. | 4406633. | .00 | .79 | .00 |
| 11 | 281900. | 4400400. | 14.20 | .00 | .00 |
| 12 | 279600. | 4406300. | .00 | 2.41 | .00 |
| 13 | 279250. | 4404449. | 4.30 | 3.83 | .00 |
| 14 | 280134. | 4400620. | 16.80 | .02 | .00 |
| 15 | 279850. | 4399050. | 25.80 | .18 | .01 |
| 16 | 277300. | 4404100. | 7.40 | 13.15 | .01 |
| 17 | 276250. | 4403500. | 11.20 | 23.38 | .03 |
| 18 | 277700. | 4397324. | 112.50 | 4.82 | .68 |
| 19 | 274850. | 4402919. | 15.10 | 42.44 | .14 |
| 20 | 277050. | 4396900. | 145.20 | 41.53 | 1.40 |
| 21 | 272700. | 4402000. | 56.40 | 77.66 | .70 |
| 22 | 276200. | 4396699. | 230.60 | 62.91 | 2.44 |
| 23 | 271750. | 4400850. | 239.40 | 95.16 | 1.54 |
| 24 | 275100. | 4396775. | 26.00 | 88.50 | 3.46 |
| 25 | 271325. | 4399725. | 281.50 | 103.90 | 2.54 |
| 26 | 272725. | 4395125. | 243.50 | 130.88 | 8.13 |
| 27 | 272484. | 4394475. | 113.60 | 129.98 | 9.01 |
| 28 | 270100. | 4395949. | 79.90 | 92.19 | 6.44 |
| 29 | 272430. | 4393100. | 52.10 | 125.30 | 10.00 |
| 30 | 269350. | 4395175. | 51.80 | 69.80 | 6.33 |
| 31 | 271842. | 4392704. | 62.60 | 105.04 | 8.95 |
| 32 | 267625. | 4394350. | 66.90 | 30.54 | 4.76 |
| 33 | 267300. | 4393600. | 86.30 | 20.20 | 4.06 |
| 34 | 272003. | 4391086. | 50.40 | 49.18 | 7.30 |
| 35 | 271171. | 4390112. | 45.50 | 24.51 | 4.09 |
| 36 | 269909. | 4389468. | 39.70 | 8.17 | 1.98 |
| 37 | 265553. | 4390650. | 71.00 | .98 | 1.05 |
| 38 | 265581. | 4389875. | 66.50 | .45 | .71 |
| 39 | 269445. | 4388281. | 27.90 | 2.74 | .76 |
| 40 | 265234. | 4389150. | 27.10 | .14 | .41 |

TAB. B.5.

WARTOSCI STEZEN POMIAROWYCH I OBLICZONYCH MODELEM SPM ORAZ MODELEM PASQUILLA PASQ STOSOWANYM W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE
(EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA , 16.05.1981 GODZ. 12-13)

| LP | PUNKT WSP. X | RECEPCYJNY WSP. Y | STEZENIE POMIAROWE | STEZENIA OBLICZONE SPM | STEZENIA OBLICZONE PASQ |
|----|--------------|-------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| / | m | m | ppt | ppt | ppt |
| 1 | 291400. | 4435800. | .00 | .00 | .00 |
| 2 | 289365. | 4435800. | .00 | .00 | .00 |
| 3 | 286100. | 4435980. | .00 | .00 | .00 |
| 4 | 284540. | 4435980. | .00 | .00 | .00 |
| 5 | 282369. | 4435990. | .00 | .00 | .00 |
| 6 | 280100. | 4436000. | .00 | .00 | .00 |
| 7 | 278179. | 4435400. | .00 | .00 | .00 |
| 8 | 276900. | 4435360. | .00 | .00 | .00 |
| 9 | 273513. | 4435379. | .00 | .00 | .00 |
| 10 | 271650. | 4434400. | .00 | .00 | .00 |
| 11 | 269600. | 4432206. | .00 | .00 | .00 |
| 12 | 267050. | 4431855. | .00 | .00 | .00 |
| 13 | 265300. | 4431846. | .00 | .00 | .00 |
| 14 | 263616. | 4432008. | .00 | .00 | .00 |
| 15 | 261444. | 4430850. | .00 | .00 | .00 |
| 16 | 260457. | 4429607. | .00 | .00 | .00 |
| 17 | 257889. | 4427695. | .00 | .00 | .00 |
| 18 | 254946. | 4425804. | .00 | .00 | .00 |
| 19 | 253844. | 4424565. | .00 | .00 | .00 |
| 20 | 252634. | 4423293. | .00 | .00 | .05 |
| 21 | 248096. | 4420379. | .00 | .32 | 5.71 |
| 22 | 247647. | 4418105. | 2.80 | 2.74 | 12.63 |
| 23 | 246395. | 4417077. | 3.30 | 7.71 | 15.16 |
| 24 | 244106. | 4416107. | 13.00 | 17.20 | 10.58 |
| 25 | 243895. | 4414301. | 32.70 | 23.75 | 5.72 |
| 26 | 244000. | 4412231. | .00 | 21.14 | 2.06 |
| 27 | 241704. | 4411525. | 28.30 | 12.91 | .36 |
| 28 | 242055. | 4409316. | 18.50 | 4.50 | .05 |
| 29 | 239493. | 4408695. | .00 | 1.46 | .00 |
| 30 | 239400. | 4406750. | .00 | .23 | .00 |
| 31 | 238995. | 4404786. | .00 | .02 | .00 |
| 32 | 238969. | 4403108. | .00 | .00 | .00 |
| 33 | 235995. | 4401878. | .00 | .00 | .00 |
| 34 | 235992. | 4399907. | .00 | .00 | .00 |
| 35 | 235194. | 4398793. | .00 | .00 | .00 |
| 36 | 235095. | 4396742. | .00 | .00 | .00 |
| 37 | 235458. | 4394290. | .00 | .00 | .00 |

TAB. B.6.

WARTOSCI WSKAZNIKOW STATYSTYCZNYCH JAKOSCI MODELU SPM I MODELU PASQUILLA PASO STOSOWANEGO W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE (EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID, USA, 24.05.1981 GODZ. 17-18)

| WSKAZNIK STATYSTYCZNY | JEDN. | SPM | PASO |
|---|-------|--------|--------|
| SREDNIE STEZENIE POMIAROWE | ppt | 7.516 | 7.516 |
| SREDNIE STEZENIE OBLICZENIOWE | ppt | 7.541 | 9.661 |
| SREDNIE ODCHYLENIE BEZWZGLEDNE | / | 4.137 | 5.860 |
| STOSUNEK SREDNIEGO ODCHYLENIA BEZWZGLEDNEGO DO SREDNIEGO STEZENIA POMIAROWEGO | / | .550 | .780 |
| SREDNIE ODCHYLENIE KWADRATOWE | ppt | 14.227 | 20.584 |
| WSPOLCZYNNIK ZMIENNOSCI | / | 1.906 | 2.757 |
| WARIANCJA WYJASNIONA PRZEZ MODEL | / | .602 | .167 |
| WSPOLCZYNNIK KORELACJI | / | .861 | .849 |
| WSPOLCZYNNIK a ROWNANIA REGRESJI | ppt | -.449 | -.459 |
| WSPOLCZYNNIK b ROWNANIA REGRESJI | / | 1.063 | 1.346 |

TAB. B.7.

WARTOSCI WSKAZNIKOW STATYSTYCZNYCH JAKOSCI MODELU SPM I MODELU PASQUILLA PASQ STOSOWANEGO W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE (EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA ,27.05.1981 GODZ.10-11)

| WSKAZNIK STATYSTYCZNY | JEDN. | SPM | PASQ |
|---|-------|--------|--------|
| SREDNIE STEZENIE POMIAROWE | ppt | 46.691 | 46.691 |
| SREDNIE STEZENIE OBLICZENIOWE | ppt | 34.457 | 18.576 |
| SREDNIE ODCHYLENIE BEZWZGLEDNE | / | 17.397 | 29.677 |
| STOSUNEK SREDNIEGO ODCHYLENIA BEZWZGLEDNEGO DO SREDNIEGO STEZENIA POMIAROWEGO | / | .373 | .636 |
| SREDNIE ODCHYLENIE KWADRATOWE | ppt | 32.037 | 55.928 |
| WSPOLCZYNNIK ZMIENNOSCI | / | .702 | 1.225 |
| WARIANCJA WYJASNIONA PRZEZ MODEL | / | .814 | .432 |
| WSPOLCZYNNIK KORELACJI | / | .953 | .983 |
| WSPOLCZYNNIK a ROWNANIA REGRESJI | ppt | 3.582 | 2.140 |
| WSPOLCZYNNIK b ROWNANIA REGRESJI | / | .661 | .352 |

TAB. B.8.

WARTOSCI WSKAZNIKOW STATYSTYCZNYCH JAKOSCI MODELU SPM I MODELU PASQUILLA PASQ STOSOWANEGO W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE (EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA ,16.10.1981 GODZ. 9-10)

| WSKAZNIK STATYSTYCZNY | JEDN. | SPM | PASQ |
|---|-------|--------|--------|
| SREDNIE STEZENIE POMIAROWE | ppt | 8.132 | 8.132 |
| SREDNIE STEZENIE OBLICZENIOWE | ppt | 2.609 | .788 |
| SREDNIE ODCHYLENIE BEZWZGLEDNE | / | 5.740 | 8.093 |
| STOSUNEK SREDNIEGO ODCHYLENIA BEZWZGLEDNEGO DO SREDNIEGO STEZENIA POMIAROWEGO | / | .706 | .995 |
| SREDNIE ODCHYLENIE KWADRATOWE | ppt | 12.706 | 15.891 |
| WSPOLCZYNNIK ZMIENNOSCI | / | 1.586 | 1.963 |
| WARIANCJA WYJASNIONA PRZEZ MODEL | / | .224 | -.214 |
| WSPOLCZYNNIK KORELACJI | / | .652 | .216 |
| WSPOLCZYNNIK a ROWNANIA REGRESJI | ppt | .387 | .459 |
| WSPOLCZYNNIK b ROWNANIA REGRESJI | / | .273 | .040 |

TAB. B.9.

WARTOSCI WSKAZNIKOW STATYSTYCZNYCH JAKOSCI MODELU SPM I MODELU PASQUILLA PASQ STOSOWANEGO W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE (EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA ,12.05.1981 GODZ.12-13)

| WSKAZNIK STATYSTYCZNY | JEDN. | SPM | PASQ |
|---|-------|--------|--------|
| SREDNIE STEZENIE POMIAROWE | ppt | 58.005 | 58.005 |
| SREDNIE STEZENIE OBLICZENIOWE | ppt | 33.773 | 2.174 |
| SREDNIE ODCHYLENIE BEZWZGLEDNE | / | 38.966 | 55.831 |
| STOSUNEK SREDNIEGO ODCHYLENIA BEZWZGLEDNEGO DO SREDNIEGO STEZENIA POMIAROWEGO | / | .672 | .963 |
| SREDNIE ODCHYLENIE KWADRATOWE | ppt | 60.927 | 90.892 |
| WSPOLCZYNNIK ZMIENNOSCI | / | 1.064 | 1.587 |
| WARIANCJA WYJASNIONA PRZEZ MODEL | / | .300 | -.557 |
| WSPOLCZYNNIK KORELACJI | / | .643 | .386 |
| WSPOLCZYNNIK a ROWNANIA REGRESJI | ppt | 11.617 | 1.245 |
| WSPOLCZYNNIK b ROWNANIA REGRESJI | / | .382 | .016 |

TAB. B.10.

WARTOSCI WSKAZNIKOW STATYSTYCZNYCH JAKOSCI MODELU SPM I MODELU PASQUILLA PASQ STOSOWANEGO W OBLICZENIACH RUTYNOWYCH W POLSCE (EKSPERYMENT POMIAROWY W KINCAID , USA , 16.05.1981 GODZ.12-13)

| WSKAZNIK STATYSTYCZNY | JEDN. | SPM | PASQ |
|---|-------|-------|-------|
| SREDNIE STEZENIE POMIAROWE | ppt | 2.665 | 2.665 |
| SREDNIE STEZENIE OBLICZENIOWE | ppt | 2.486 | 1.415 |
| SREDNIE ODCHYLENIE BEZWZGLEDNE | / | 1.896 | 2.846 |
| STOSUNEK SREDNIEGO ODCHYLENIA BEZWZGLEDNEGO DO SREDNIEGO STEZENIA POMIAROWEGO | / | .712 | 1.068 |
| SREDNIE ODCHYLENIE KWADRATOWE | ppt | 5.196 | 7.585 |
| WSPOLCZYNNIK ZMIENNOSCI | / | 1.977 | 2.885 |
| WARIANCJA WYJASNIONA PRZEZ MODEL | / | .533 | .004 |
| WSPOLCZYNNIK KORELACJI | / | .732 | .274 |
| WSPOLCZYNNIK a ROWNANIA REGRESJI | ppt | .944 | 1.063 |
| WSPOLCZYNNIK b ROWNANIA REGRESJI | / | .579 | .132 |

DODATEK C

**Obliczenia napływu dwutlenku siarki
na teren województwa katowickiego
wg modelu SPM**

Obliczenia napływu dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego wykonano dla dnia 10 marca 1988 roku, dla trzech terminów. Wyznaczono średnie przyziemne stężenia SO_2 dla godzin: $6^{00}-7^{00}$, $8^{00}-9^{00}$, $10^{00}-11^{00}$.

Obszar obliczeniowy obejmujący teren województwa katowickiego zdefiniowano w prostokątnym układzie współrzędnych $/x, 0, y/$, o osi x skierowanej na wschód a osi y skierowanej na północ. Obszar ten ma kształt prostokąta o bokach: 70 km wzdłuż osi x i 50 km wzdłuż osi y . Lewe dolne narożne prostokąta znajduje się w odległości 1,5 km na zachód i 7 km na północ od Wodzisławia Śląskiego. Punkty recepcyjne tworzą regularną siatkę 5 km x 5 km.

Na w/w obszarze przewidziane jest uruchomienie systemu automatycznego monitoringu zanieczyszczeń atmosfery.

W obliczeniach uwzględniono źródła emisji SO_2 leżące w odległości 100 km od granic w/w obszaru. Dane o emitorach przyjęto z Katalogu emitorów znajdujących się w komputerowym zbiorze danych Zakładu Ochrony Atmosfery Instytutu Ochrony Środowiska w Warszawie. Katalog obejmuje 483 emitory. Średnia całkowita emisja wynosi ~ 200 ton SO_2 /godz.

W obliczeniach uwzględniono przestrzenną zmienność współczynnika szorstkości terenu z_0 i prędkości suchego osiadania SO_2 na podłożu v_d . Wartości tych parametrów na analizowanym obszarze zestawiono w regularnej siatce 10 km x 10 km, na podstawie map opracowanych w ramach Programu Rządowego PR-8. /Sypowicz W.: Ocena współczynników aerodynamicznej szorstkości podłoża w rozbiciu na gminy, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, War-

szawa 1982; Nowicki M., Radwanska A., Szumanowska M.: Obliczanie zróżnicowanych współczynników SO_2 dla warunków polskich, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982/.

Wartości parametru z_0 na omawianym obszarze wahają się od 0,05 m do 1,78 m. Wartości współczynnika v_d wynoszą od 0,45 cm/s do 0,75 cm/s.

Przyjęto, że współczynnik przemiany chemicznej dwutlenku siarki wynosi 10%/godz.

Parametry meteorologiczne dla wybranych terminów obliczeniowych oraz epizodów je poprzedzających uwzględnianych w obliczeniach przyjęto na podstawie danych zestawionych przez IOŚ w Warszawie. Wartości tych parametrów podano w tabelicy C.1.

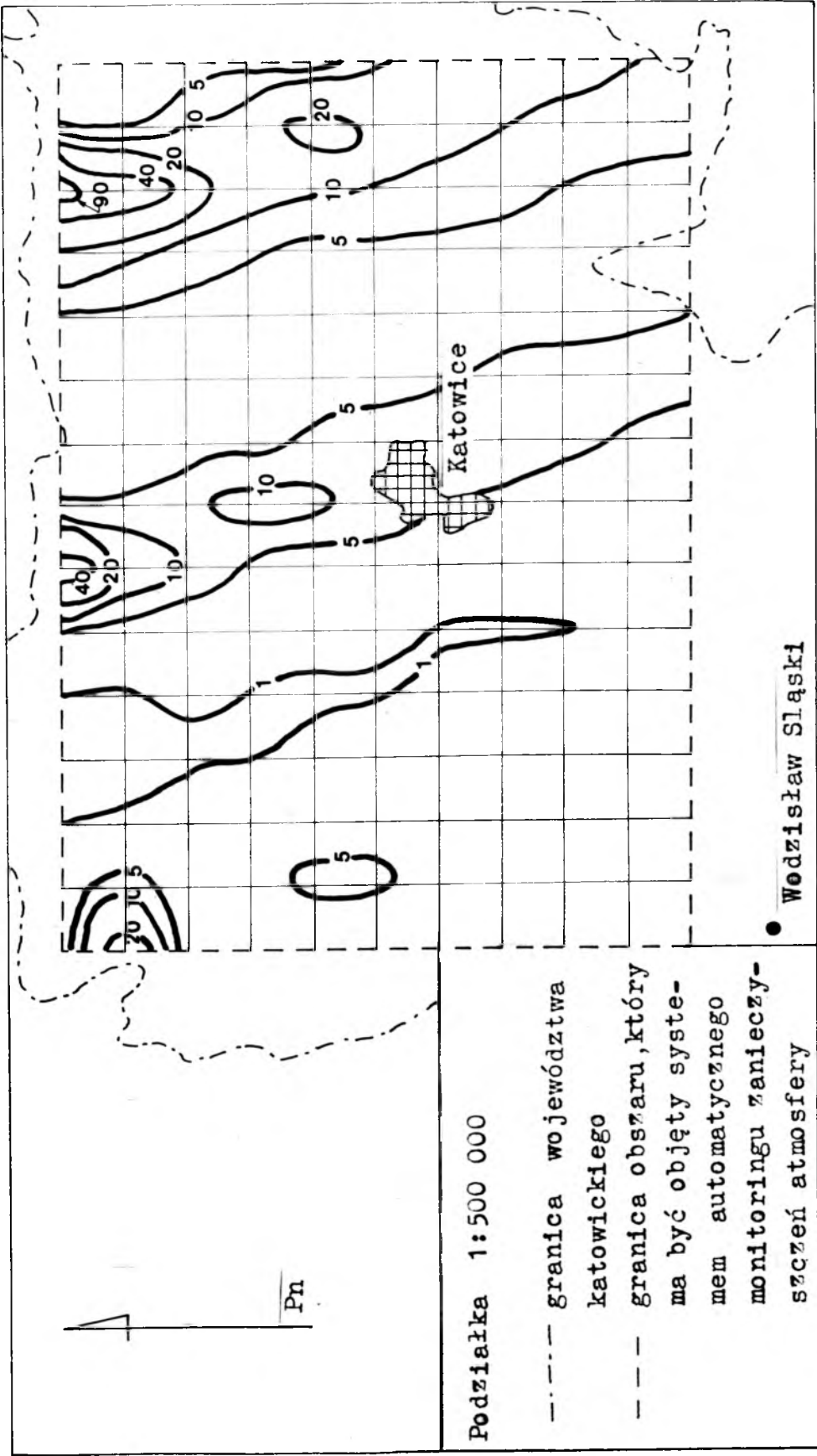
Tabulogramy danych wejściowych i wyników obliczeń są dostępne w Zakładzie Ochrony Atmosfery Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

Wyniki obliczeń napływu dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego w postaci izolinii stężeń SO_2 na analizowanym obszarze przedstawiono na rysunkach 3,4,5.

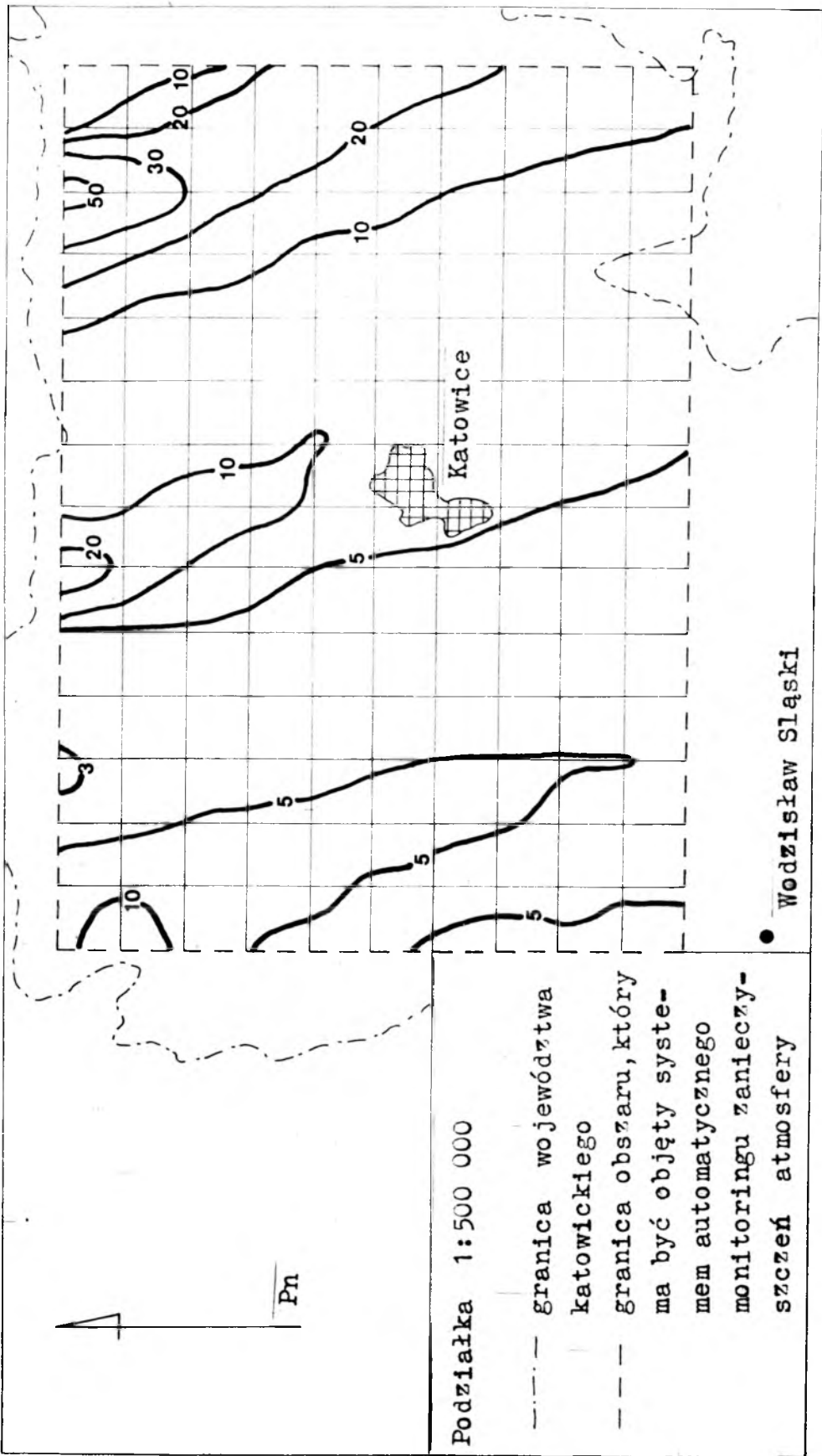
Wartości średnich stężeń SO_2 obliczone modelem SPM wahają się dla godz. 6⁰⁰-7⁰⁰ od 0,6 do 98,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ /rys. 3/. Dla godz. 8⁰⁰-9⁰⁰ /rys. 4/ i godz. 10⁰⁰-11⁰⁰ /rys. 5/ wartości obliczonych stężeń zawierają się odpowiednio w przedziałach: od 2,8 do 57,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i od 2,9 do 43,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tab. C.1. Parametry meteorologiczne dla wybranych terminów obliczeniowych oraz epizodów je poprzedzających uwzględnianych w obliczeniach /wg danych uzyskanych z Instytutu Ochrony Środowiska w Warszawie/

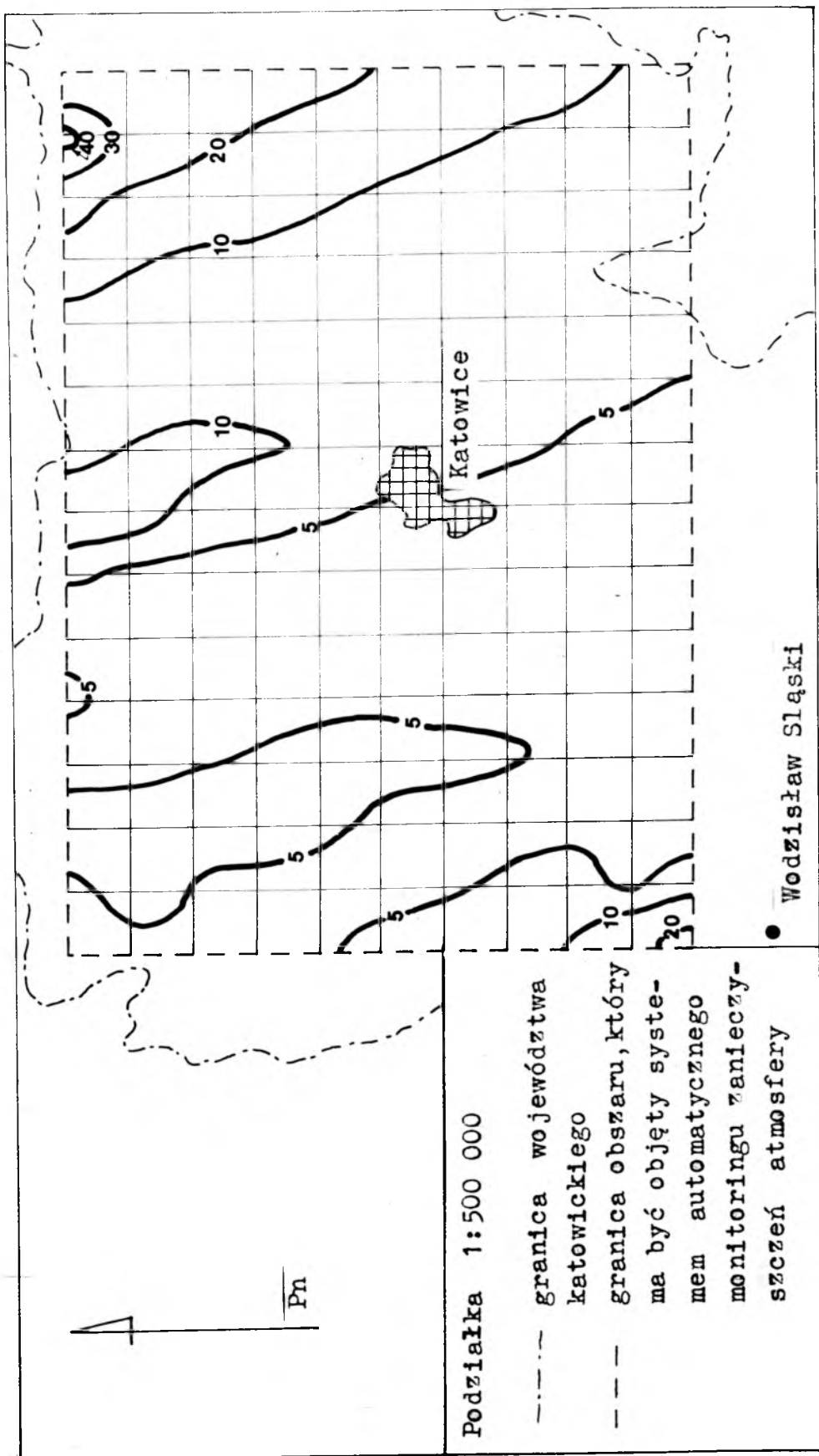
| Data | Godz. | Stan równowagi atmosfery | Wysokość warstwy mieszanina | Prędkość i kierunek wiatru | | Temperatura otoczenia |
|----------|-------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------|-----------------------|
| | | | | m/s | stopnie | |
| - | - | - | m | | | °C |
| 9.03.88 | 13-14 | 4 | 1016 | 4,5 | 360 | -0,3 |
| 9.03.88 | 14-15 | 4 | 1016 | 4,0 | 350 | -0,3 |
| 9.03.88 | 15-16 | 4 | 1016 | 4,5 | 340 | -0,3 |
| 9.03.88 | 16-17 | 4 | 1016 | 4,5 | 340 | -0,5 |
| 9.03.88 | 17-18 | 4 | 1016 | 4,5 | 340 | -0,6 |
| 9.03.88 | 18-19 | 4 | 1016 | 4,0 | 340 | -1,0 |
| 9.03.88 | 19-20 | 4 | 1016 | 3,0 | 340 | -1,0 |
| 9.03.88 | 20-21 | 4 | 1016 | 3,0 | 340 | -1,0 |
| 9.03.88 | 21-22 | 4 | 1016 | 4,0 | 340 | -1,0 |
| 9.03.88 | 22-23 | 4 | 1016 | 3,5 | 350 | -1,0 |
| 9.03.88 | 23-24 | 4 | 1016 | 3,5 | 350 | -1,0 |
| 9.03.88 | 24- 1 | 4 | 1016 | 3,0 | 340 | -1,2 |
| 10.03.88 | 1- 2 | 4 | 1016 | 4,0 | 350 | -1,3 |
| 10.03.88 | 2- 3 | 4 | 1016 | 3,0 | 340 | -1,5 |
| 10.03.88 | 3- 4 | 4 | 1016 | 2,5 | 340 | -1,5 |
| 10.03.88 | 4- 5 | 4 | 1016 | 3,0 | 340 | -2,0 |
| 10.03.88 | 5- 6 | 4 | 1016 | 2,0 | 340 | -2,0 |
| 10.03.88 | 6- 7 | 4 | 1016 | 2,5 | 350 | -2,0 |
| 10.03.88 | 7- 8 | 3 | 1137 | 3,0 | 330 | -2,0 |
| 10.03.88 | 8- 9 | 3 | 1137 | 2,5 | 350 | -1,5 |
| 10.03.88 | 9-10 | 3 | 1137 | 2,5 | 340 | -1,0 |
| 10.03.88 | 10-11 | 3 | 1137 | 2,5 | 320 | -1,0 |



Rys.3. Napływ dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego w dniu 10.03.1988 roku, godz. 6⁰⁰-7⁰⁰ wg modelu SIM. Wartości stężeń w $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys.4. Napływ dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego w dniu 10.03.1988 roku, godz. 8⁰⁰-9⁰⁰ wg modelu SPM. Wartości stężeń w $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys.5. Napływ dwutlenku siarki na teren województwa katowickiego w dniu 10.07.1988 roku, godz. 10⁰⁰-11⁰⁰ wg modelu SPM. Wartości stężeń w $\mu\text{g}/\text{m}^3$.





B.
21343

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

B.021343/01



Wypożyczalnia
dla Pracowników