

Aneta Duda*

ZASTOSOWANIE MODELU NUMERYCZNEGO DO ANALIZY ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ W LUBLINIE

WSTĘP

Zanieczyszczenie powietrza w dużych miastach uwarunkowane jest emisją z zakładów przemysłowych, sektora bytowo-gospodarczego. Wzrasta także udział emisji niskiej tj. zanieczyszczenie powietrza pochodzące ze spalin pojazdów silnikowych oraz kotłowni i palenisk domowych. Od wielu lat prowadzone są na szeroką skalę badania, których celem jest poznanie mechanizmów przebiegu reakcji fotochemicznych w troposferze, prowadzących do powstawania zanieczyszczeń wtórnych. Efektem tych badań jest opracowanie matematycznych modeli zjawisk fizykochemicznych, które w sposób jakościowy i ilościowy opisują przebieg głównych chemicznych reakcji w atmosferze. Wykorzystuje się je do komputerowego symulowania przebiegu procesów fizykochemicznych, mających miejsce w niskiej troposferze [1].

STRUKTURA PROGRAMU

Do realizacji modelu numerycznego zastosowano środowisko programistyczne C++ Builder [2, 3]. Program został napisany w oparciu o metody obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza dla źródeł istniejących i projektowanych. Program wykonuje obliczenia dla zadanych parametrów emitora i otoczenia. Najpierw wyliczane jest stężenie 30-minutowe według formuły Pasquilla (opartej na rozkładzie Gaussa) dla 36 sytuacji atmosferycznych (zgodnie z tokiem obliczeniowym opisanym w załączniku do Rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 3 września 1998 r. w sprawie metod obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza dla źródeł istniejących i projektowanych) [4]. Stężenie to liczone w odległości do 100m w każdą stronę zapisywane jest do 36 plików. Następnie wybierana jest sytuacja, w której wystąpi stężenie maksymalne. Na podstawie tych stężeń oraz róży wiatrów obliczane jest stężenie średnioroczne. Po prostu liczba występowania danej sytuacji atmosferycznej dla danego kierunku podzielona przez liczbę wszystkich zaobserwowanych sytuacji mnożona jest przez dane stężenie w danym punkcie. W ten sposób z 36 robi się jedna tablica, która następnie jest transformowana.

* Aneta DUDA – Katedra Podstaw Techniki, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

Z uwagi na uzyskanie wymaganej dokładności obliczeń transformacja tablicy dokonywana jest co 1° .

Zasadniczym problemem pracy było przystosowanie programu do możliwości symulacji transportu substancji zanieczyszczających dla źródła liniowego. Metoda zastępowania źródła liniowego zespołem źródeł punktowych dotyczy źródeł odcinków prostoliniowych o określonej długości, stałej emisji z jednostki długości i stałej efektywnej wysokości emitora. W programie zastosowano metodę podziału źródła liniowego o danej długości D na odcinki długości $d_k < 10$ m, przy czym źródło punktowe usytuowane jest w środku odcinka d_k . Emisja zanieczyszczeń z takiego źródła liniowego obliczana jest za pomocą wzoru [4] :

$$e_k = E \cdot \frac{d_k}{D}$$

gdzie:

- e_k – emisja substancji zanieczyszczających z jednego ze źródeł punktowych zastępujących źródło powierzchniowe lub liniowe [g/s],
- d_k – długość boku kwadratowego źródła powierzchniowego lub długość odcinka źródła liniowego, powstałych z podziału źródła powierzchniowego lub liniowego [m],
- D – długość boku kwadratowego źródła powierzchniowego lub długość źródła liniowego [m].

Kolejnym etapem obliczeń jest wykonanie obliczeń na podstawie wprowadzonych danych parametrów technicznych emitora, danych meteorologicznych i charakterystycznych wielkości wpływających w sposób istotny na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń:

– graniczna prędkość gazów na wylocie emitora (V_{gr}) [4]

$$V_{gr} = 0,5 \cdot h^{0,6}$$

gdzie:

h – geometryczna wysokość emitora liczona od poziomu terenu [m]

– emisja ciepła z emitora (Q) [4]

$$Q = \frac{\Pi d^2}{4} \cdot v \cdot C_p \cdot \frac{273,16}{T} \cdot \frac{p_s}{1013,25} \cdot (T - T_0)$$

gdzie:

- d – średnica wewnętrzna wylotu emitora [m],
- v – prędkość gazów odlotowych na wylocie emitora [m/s],
- C_p – ciepło właściwe gazów odlotowych przy stałym ciśnieniu w warunkach normalnych [kJ/(m³ x K)],

- T – temperatura gazów odlotowych na wylocie emitora [K],
 p_s – ciśnienie gazów odlotowych na wylocie emitora [kPa],
 T_0 – średnia temperatura powietrza dla okresu obliczeniowego (sezonu lub roku) [K].

W przypadku braku informacji o ciśnieniu gazów na wylocie emitora przyjmuje się $p_s = 101,3$ kPa.

Parametr charakterystyczny emitora K obliczany jest według formuły Hollanda lub Concave:

– parametr emitora według formuły Hollanda [4]

$$K = 1,5 \cdot v \cdot d + 0,00974 \cdot Q$$

– parametr emitora według formuły Concave [4]

$$K = 1,126 \cdot Q^{0,58}$$

W tabeli 1 przedstawiono zasady wyznaczenia parametru emitora K [4].

Tabela 1. Zasady wyznaczenia parametru emitora K [4]

Typ emitora	Warunki dotyczące		
	prędkości gazów odlotowych na wylocie emitora v [m/s]	emisji ciepła z emitora Q [kJ/s]	parametru emitora K
Wyrzutnia zadaszona	dowolne	dowolne	$K = 0$
Wyrzutnia pozioma	$v \leq v_{gr}$	dowolne	$K = 0$
Wyrzutnia pionowa	$v > v_{gr}$	$Q \leq 2 \times 10^4$	formuła Hollanda
		$Q > 2 \times 10^4$	formuła Concave

Obliczenia stanu zanieczyszczenia powietrza obejmują następujące parametry meteorologiczne:

– prędkość wiatru na wysokości wylotu emitora (u_h) [4]

$$u_h = u_a \cdot \left(\frac{h}{14} \right)^m$$

gdzie:

u_a – prędkość wiatru na wysokości anemometru [m/s],

- średnia prędkość wiatru w warstwie od poziomu terenu do pozornego punktu emisji \bar{u} [4]

$$\bar{u} = \frac{u_a}{m+1} \cdot \left(\frac{H}{14} \right)^m$$

gdzie:

m – stan równowagi atmosfery

H – wysokość pozornego punktu emisji lub efektywna wysokość źródła powierzchniowego lub liniowego [m]

14 – wysokość anemometru.

- współczynnik poziomej dyfuzji atmosferycznej (σ_y) [4]

$$\sigma_y = A \cdot x^a$$

gdzie:

A – współczynnik we wzorze na obliczanie współczynników dyfuzji atmosferycznej,

x^a – składowa odległości emitora od punktu, dla którego dokonuje się obliczeń, równoległa do kierunku wiatru (wartość a podana w tabeli 2),

- współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej (σ_z) [4]

$$\sigma_z = B \cdot x^b$$

gdzie:

B – współczynnik we wzorze na obliczanie współczynników dyfuzji atmosferycznej,

x^b – składowa odległości emitora od punktu, dla którego dokonuje się obliczeń, równoległa do kierunku wiatru (wartość b podana w tabeli 2),

- współczynniki A i B oblicza się według wzorów [4]:

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

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

gdzie:

z_0 – średnia wartość współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu w sektorze róży wiatrów lub na obszarze objętym obliczeniami [m].

Występujące we wzorach wartości stałych zależnych od stanu równowagi atmosfery – m , a , b przedstawione są w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości a, b i m zależne od stanu równowagi atmosfery [4]

Stała	Stan równowagi atmosfery					
	1	2	3	4	5	6
a	0,080	0,143	0,196	0,270	0,363	0,440
b	0,888	0,865	0,845	0,818	0,784	0,756
m	1,284	1,108	0,978	0,822	0,660	0,551

Wysokość pozornego punktu emisji oblicza się w zależności od parametru K, wysokości emitora h oraz prędkości wiatru u_h w następujący sposób:

– dla $K=0$ [4]

$$H = h$$

– gdy parametr K jest obliczany według formuły Hollanda, wówczas [4]:

$$H = h + \frac{K}{u_h}$$

gdzie:

u_h – prędkość wiatru na wysokości wylotu emitora [m/s]

– gdy parametr K jest obliczany według formuły Concawe, wówczas [4]:

$$H = h + \frac{K}{u_h^{0,7}}$$

Następny krok programu stanowi wyznaczenie stężeń gazowych substancji zanieczyszczających, jakie wystąpią w określonej sytuacji meteorologicznej. Należy przy tym przyjąć następujące założenia: źródło znajduje się w punkcie o współrzędnych $X_e = Y_e = 0$, $Z_e = H$ oraz że oś X pokrywa się z kierunkiem wiatru, a oś Y jest prostopadła do osi X. Dla tak przyjętych warunków początkowych stężenie substancji gazowej w powietrzu odniesione do 30 minut oblicza się według wzoru [4]:

$$S_{xyz} = \frac{E_g}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(-\frac{y}{2\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{2\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

gdzie:

E_g – maksymalna emisja substancji gazowej [mg/s],

y – składowa odległości emitora od punktu, dla którego dokonuje się obliczeń, prostopadła do kierunku wiatru [m],

z – wysokość, dla której oblicza się stężenie substancji zanieczyszczającej w powietrzu [m].

STANOWISKA BADAWCZE

Kryteria doboru lokalizacji punktów pomiarowych do oceny stężeń zanieczyszczeń przyjęto zgodnie z wytycznymi Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz. U. z 2002 r. nr 87 poz. 798) [5].

Analizę wyników pomiarów imisji zanieczyszczeń: tlenków azotu (NO_x), ditlenku siarki (SO_2), tlenku węgla (CO), pyłu zawieszonego (PM_{10}) wykonaną mobilnym laboratorium w następujących punktach pomiarowych w Lublinie:

1. ul. Fabryczna – Al. Unii Lubelskiej,
2. ul. Filaretów – Al. Jana Pawła II,
3. ul. Lipowa – Al. Raclawickie,
4. ul. Niepodległości.

METODYKA BADAŃ

Aparatura zastosowana do pomiarów imisji zanieczyszczeń powietrza, jest aparaturą spełniającą kryteria Państwowego Monitoringu Środowiska. Próbkę zanieczyszczeń powietrza były pobierane w sposób ciągły (w systemie ośmiogodzinnym) na wysokości 3,5 m od podłoża, przy użyciu następującej analizatorów:

Analizator ditlenku siarki f-my Horiba

Analizator działa w oparciu o zasadę detekcji fluorescencji w zakresie ultrafioletu. Próbkę analizowanego powietrza (wolna od węglowodorów) przesyłana jest do celi pomiarowej, gdzie oświetlona jest promieniowaniem UV. Fluorescencja badanej próbki jest wykrywana i mierzona przy pomocy fotopowielacza.

Zakres pomiarowy: 1 ppb – 1 ppm.

Analizator tlenku węgla f-my Horiba

Przyrząd wykorzystuje technikę modulacji sygnału w wyniku przepływu krzyżowego (CFM) gazu pomiarowego i gazu odniesienia.

Zakres pomiarowy: 0,1 – 100 ppm.

Analizator tlenku azotu i ditlenku azotu f-my Horiba

Stężenie analizowanych gazów określane jest w oparciu o zasadę chemoluminescencji tlenku azotu (NO) w obecności silnie utleniających cząsteczek ozonu. Analizator wyposażony jest w konwerter NO_2 _NO pozwalający na analizę tlenków NO_x

Zakres pomiarowy: 1 ppb – 1 ppm.

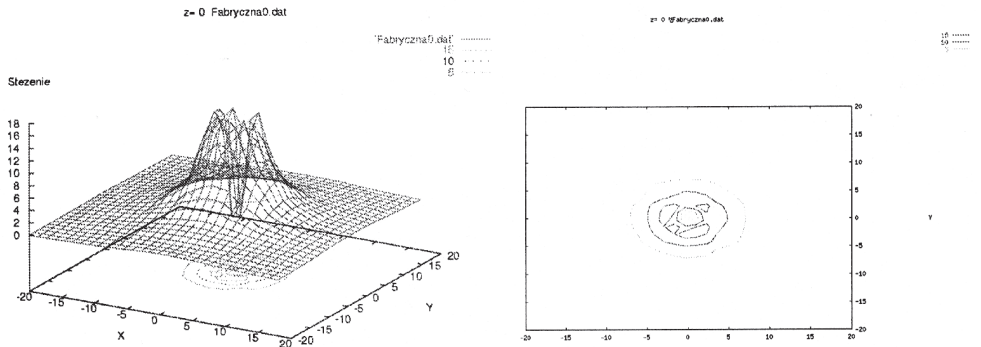
Analizator pyłu zawieszonego f-my FAG

Pobór pyłu zawieszonego odbywał się za pomocą urządzenia STAPLEX. Stężenia pyłu w powietrzu o średnicy cząsteczek mniejszych niż 10 μm , mierzone były w oparciu o masę pyłu zebranego na taśmie filtracyjnej. Masa osadzonego pyłu wyznaczana była przez pomiar osłabienia promieniowania β pochodzącego od źródła promieniowania.

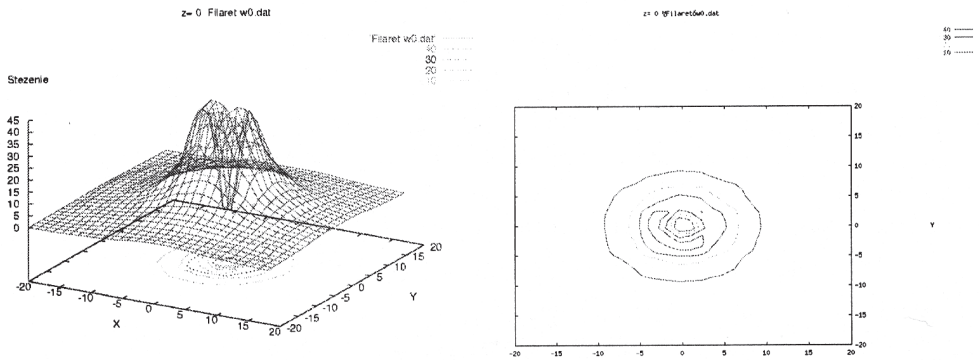
Zakres pomiarowy: od 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

WYNIKI POMIARÓW

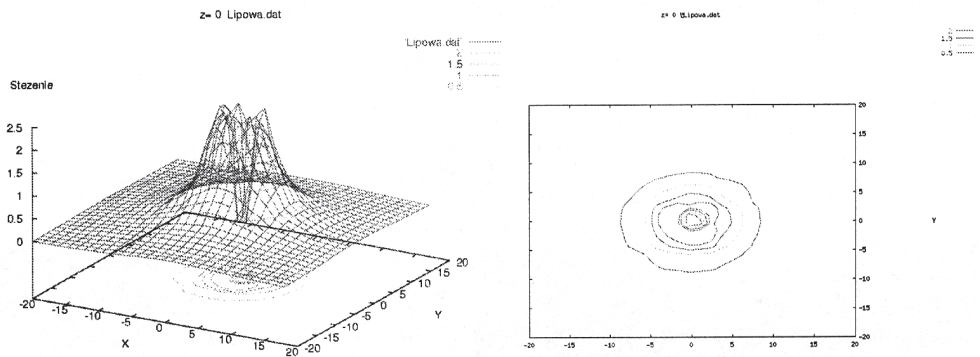
Ul. Fabryczna – Al. Unii Lubelskiej.



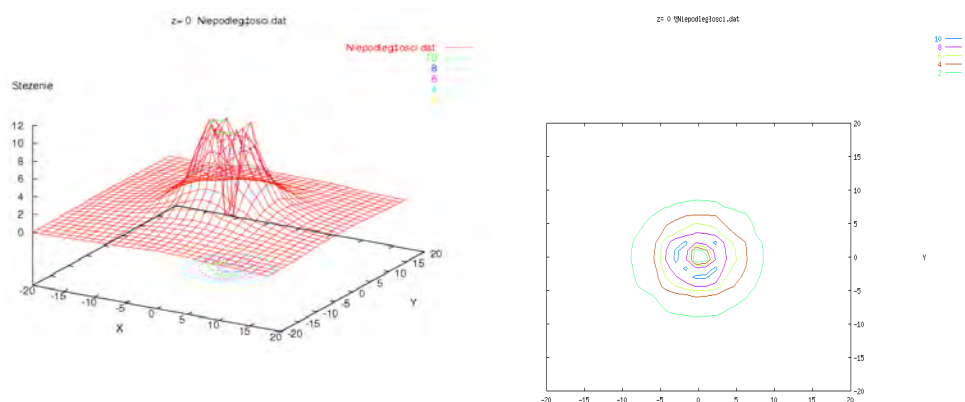
Ul. Filaretów – Al. Jana Pawła II.



Ul. Lipowa – Al. Raclawickie.



Ul. Niepodległości.



WNIOSKI

1. Obciążenie atmosfery zanieczyszczeniami pochodzącymi ze spalania w silnikach samochodowych produktów rafineryjnych dochodzi w Polsce do ponad 30%. W większości są to następujące substancje: tlenek i ditlenek węgla, tlenki azotu, związki ołowiu i kadmu, węglowodory (WWA i HC), tlenek siarki.
2. Rozkłady stężeń dla poszczególnych zanieczyszczeń na kolejnych skrzyżowaniach mają bardzo podobny charakter. Następuje szybki spadek stężenia wraz z oddalaniem się od osi ulicy. Inny charakter ma jedynie rozkład stężeń NO_x, w przypadku którego wysokie stężenia utrzymują się również w znacznej odległości od źródła emisji. Jest to wynikiem uwzględnienia w modelu fotochemicznych przemian, podczas których tworzony jest NO₂.
3. Jedynie brak precyzyjnego wskazania miejsca poboru prób może spowodować, że wartości obliczeniowe różnią się od faktycznie zmierzonych.
4. W odróżnieniu od większości źródeł stacjonarnych, w których mamy do czynienia z powtarzalnymi i często precyzyjnie zaprojektowanymi procesami technologicznymi, określenie emisji ze strumienia poruszających się samochodów jest znacznie bardziej skomplikowane.
5. Należy przypuszczać, że pomiar obejmuje nie tylko zanieczyszczenia komunikacyjne ale i pochodzące od innych źródeł i tak CO, NO_x mogą pochodzić również z emisji przemysłowych oraz z emisji z tzw. komunalnych źródeł spalania np. sposób ogrzewania budynków mieszkalnych.

LITERATURA

1. Degórska A., (2006): Zmiany zanieczyszczenia atmosfery związkami siarki i azotu na polskich stacjach sieci EMEP w sezonie ciepłym i chłodnym, *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze, 53–65.
2. Dorobek M.,: *C++ Builder podręcznik* Wydawnictwo Mikom Warszawa 2002.
3. Daniluk A., : *C++ Builder. Kompendium programisty*, Wydawnictwo Helion Warszawa 2003.
4. Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 3 września 1998 r. w sprawie metod obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza dla źródeł istniejących i projektowanych. (Dz. U. z 1998 r. nr 122 poz. 805).
5. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2002 r. w sprawie oceny poziomów substancji w powietrzu. (Dz. U. z 2002 r. nr 87 poz. 798).

Streszczenie

W pracy przedstawiono adaptację równania Pasquila do symulowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych w powietrzu atmosferycznym oraz porównano wyniki symulacji z wynikami pomiarów. Zaprezentowany model daje również możliwość prognozowania rozprzestrzeniania się stężeń zanieczyszczeń w odniesieniu do warunków rzeczywistych.

APPLICATION OF NUMERICAL MODEL FOR ANALYSIS THE SPREADING OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTANION IN THE LUBLIN CITY

Summary

The study presents the adaptation of Pasquill equation for simulation of dissemination gas pollution in atmospheric air and comparison results of simulation with results of measurements. The described model gives the opportunity to forecot dissemination gas pollution in atmospheric air in real weather conditions.