

PORÓWNANIE STĘŻEŃ SF₆ OBLICZONYCH GAUSSOWSKIM MODELEM SMUGOWYM STAREJ GENERACJI Z WARTOŚCIAMI UZYSKANymi W EKSPERYMENCIE POLOWYM

Jacek ŻELIŃSKI, Dorota KALETA, Jolanta TELENGA-KOPYCZYŃSKA
Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, 41-803 Zabrze, ul. Zamkowa 1
jtelenga@ichpw.zabrze.pl

STRESZCZENIE

Dokładność modelu rozprzestrzeniania zależy zarówno od precyzji opisu matematycznego mechanizmów składających się na zjawisko wymiany masy w atmosferze jak i jakości danych wejściowych do obliczeń parametryzujących te mechanizmy. Wśród nich najistotniejsze są dane opisujące warstwę graniczną atmosfery, w której rozpatrywane zjawiska zachodzą. Wykonano pomiary polowe rozprzestrzeniania znacznika SF₆ w powietrzu, otrzymane stężenia porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonych modelem obowiązującym w Polsce. Przeprowadzone pomiary potwierdzają decydujące znaczenie zachowania odpowiedniej precyzji określania parametrów meteorologicznych przyjmowanych do obliczeń i pokazują, że zwiększenie ich jakości mogłoby zaowocować większą dokładnością obliczeń rozprzestrzeniania.

1. Wstęp

Model rozprzestrzeniania stosowany rutynowo do obliczeń stanu czystości powietrza w Polsce [1] jest dość powszechnie krytykowany za małą dokładność wykonywanych nim obliczeń. Dokładność ta zależy od precyzji opisu matematycznego mechanizmów składających się na zjawisko wymiany masy w atmosferze jak i jakości danych wejściowych do obliczeń parametryzujących te mechanizmy. Wśród nich najistotniejsze są dane opisujące warstwę graniczną atmosfery, w której rozpatrywane zjawiska zachodzą. Ze względu na złożoność schematów wymiany masy w atmosferze ziemskiej, funkcjonuje wiele modeli uwzględniających różne scenariusze rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Stosując w obliczeniach konkretny model nie można abstrahować od jego przeznaczenia determinowanego warunkami, dla jakich został przygotowany i w jakich został przetestowany.

Model rozprzestrzeniania używany rutynowo w Polsce, przeznaczony standardowo do różnorodnych schematów obliczeniowych, wywodzi się z modelu Pasquilla mającego swój początek w eksperymencie przeprowadzonym na otwartym, płaskim, pozbawionym przeszkód terenowych obszarze. Taki charakter modelu wykazały także przykładowe pomiary polowe wykonane z użyciem znacznika SF₆. Potwierdziły one także decydujące znaczenie uzyskania odpowiedniej precyzji określania parametrów meteorologicznych przyjmowanych do obliczeń. Wyniki pomiarów pokazały, że zwiększenie ich jakości może zaowocować większą dokładnością obliczeń rozprzestrzeniania.

2. Opis eksperymentu

W dniu 3.11.2011 (pomiar 1) oraz dwukrotnie w dniu 11.04.2012 (pomiar 2 i 3) przeprowadzono eksperyment polowy polegający na kontrolowanym, jednopunktowym wprowadzaniu do powietrza znacznika SF₆ z równoczesnym poborem próbek powietrza

w kilku wybranych punktach pomiarowych i pomiarem podstawowych parametrów meteorologicznych.

2.1. Cel eksperymentu

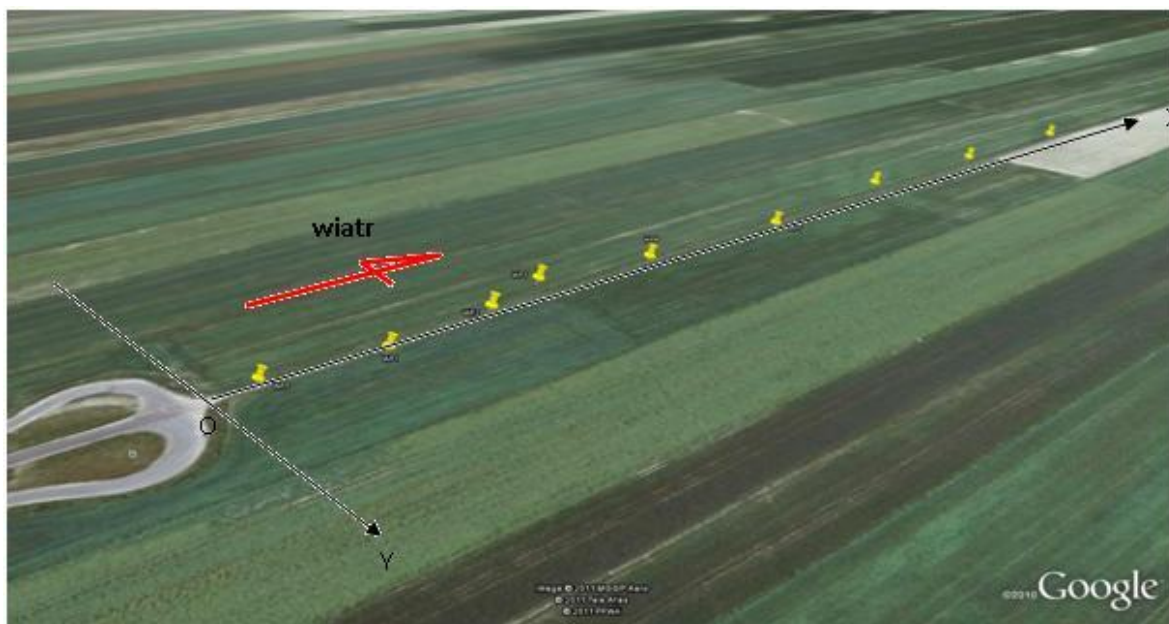
Celem eksperymentów była ocena rzeczywistych poziomów stężeń SF_6 , uzyskanych w wyniku wprowadzenia w sposób kontrolowany znacznika do powietrza, w porównaniu do ich wartości obliczonych z wykorzystaniem podstawowego modelu rozprzestrzeniania stosowanego w Polsce do rutynowych obliczeń – modelu Pasquill’a ze współczynnikami dyfuzji Nowickiego, a także ocena wpływu użytych w obliczeniach danych meteorologicznych na zgodność stężeń modelowanych i rzeczywistych.

2.2. Lokalizacja

Eksperyment wykonano na tzw. Wójtowskich Polach – otwartym, płaskim terenie o charakterze rolniczym, położonym w Gliwicach pomiędzy autostradą A4, a osiedlem Sikornik. Teren ten odzwierciedla w możliwie dokładny sposób warunki rozprzestrzeniania, dla jakich dedykowany jest zastosowany model. Znacznik SF_6 wprowadzano w punkcie o współrzędnych wg WGS84: $x = 331763\text{E}$; $y = 5570513\text{N}$; $z = 1,7\text{ m}$. Pobory próbek powietrza wykonano w 8 punktach recepcyjnych (tabela 1, rys. 1).

Tabela 1. Współrzędne punktów pomiarowych (wg WGS84)

Numer punktu	Współrzędne WGS84, m	
	Wschód	Północ
1	331768	5570541
2	331766	5570571
3	331760	5570590
4	331768	5570622
5	331773	5570669
6	331769	5570726
7	331773	5570778
8	331777	5570831



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na Wójtowskich Polach

2.3. Wykonanie eksperymentu

Podczas wykonywania eksperymentu do powietrza wprowadzano stały strumień znacznika SF_6 o wartościach odpowiednio 1,00; 0,966 oraz 0,923 g/s. Układ służący do uwalniania znacznika przedstawiono na rys. 2. Składa się on z:

- butli zawierającej SF_6 pod ciśnieniem około 20 atm. Pod takim ciśnieniem związek ten występuje w stanie ciekłym co sprawia, że ciśnienie wewnątrz butli jest stabilne, a w butli mieści się 10 kg znacznika,
- jednostopniowego reduktora, który umożliwia redukcję z 20 do wartości 1-4 atm na wyjściu, a także na całkowite odcięcie dopływu gazu,
- iglicowego zaworu regulującego wraz z rotametrem umożliwiającą bardzo dokładną regulację natężenia przepływu gazu,
- rotometru firmy „Rotametr” kalibrowanego na sześćfluorek siarki (klasa miernika 2,5),
- termometru rtęciowego do pomiaru temperatury gazu opuszczającego układ.

Po uwzględnieniu czasu niezbędnego do uzyskania stałego stężenia znacznika w powietrzu, dokonano poboru próbek powietrza w 8 punktach recepcyjnych z przeznaczeniem do analizy stężenia SF_6 w powietrzu. Pobór próbek powietrza trwał w każdym punkcie $\frac{1}{2}$ godziny i polegał na napełnianiu badanym powietrzem worków próbnikowych firmy SKC wykonanych z materiału FlexFoil o pojemności 10 dm^3 . Próbkę pobierano za pomocą aspiratorów AP firmy Two-Met. Bezstopniowa regulacja mocy aspiratorów pozwalała na płynną kontrolę stopnia wypełnienia worków. Zależnie od czasu próbkowania wydajność aspiratorów ustawiano tak, aby pobrać co najmniej 5 dm^3 powietrza, lecz nie więcej niż 9 dm^3 (rys. 3). Po wykonaniu poborów worki próbnikowe przewożono do laboratorium IChPW, gdzie analizowano stężenie SF_6 przy pomocy chromatografu gazowego TRACE-GC firmy Thermo-Scientific z detektorem ECD (detektor wychwyty elektronów). W idealnych warunkach pracy ECD umożliwia oznaczanie stężenia SF_6 w mieszaninach gazowych na poziomie 1 ppt [2], a w połączeniu z techniką chromatografii gazowej pozwala on na

oznaczanie stężenia tego związku w dowolnej mieszaninie gazowej.



Rys. 2. Układ dozowania SF₆ do powietrza i punkty recepcyjne



Rys. 3. Układ poboru SF₆

W trakcie poboru notowano następujące dane meteorologiczne, mierzone z wykorzystaniem przenośnej stacji meteorologicznej Oregon Scientific WMR928NX:

- ciśnienie atmosferyczne,
- prędkość wiatru na wysokości 1,9 m nad poziomem terenu,
- kierunek wiatru wysokości 1,9 m nad poziomem terenu,
- temperaturę powietrza,
- wilgotność powietrza.

Prędkość wiatru na wysokości 7 m nad poziomem terenu mierzono z wykorzystaniem anemometru HCA-1. Oceniano także stabilność atmosfery tradycyjną metodą Pasquilla, na podstawie stopnia zachmurzenia i prędkości wiatru [3], oraz metodą SRDT (Solar Radiation Delta T) [4], na podstawie prędkości wiatru i całkowitego promieniowania słonecznego. Było ono obliczane według metody Holtsłaga i van Uldena [5].

3. Wyniki eksperymentu

Dla każdego eksperymentu zrobiono porównawcze obliczenia stężeń znacznika w powietrzu w poszczególnych punktach pomiarowych, przy zastosowaniu podstawowego modelu rozprzestrzeniania. Wykonano je w 3 wariantach:

- I. uwzględnienie prędkości wiatru w postaci klasy prędkości wyrażonej całkowitym zaokrągleniem prędkości rzeczywistej i stabilności atmosfery określonej metodą Pasquilla, której przypisuje się standardową wartość wykładnika meteorologicznego m ,
- II. uwzględnienie rzeczywistej prędkości wiatru i stabilności atmosfery określonej metodą SRDT, której przypisuje się standardową wartość wykładnika meteorologicznego m ,
- III. uwzględnienie rzeczywistej prędkości wiatru i rzeczywistego wykładnika meteorologicznego m , uzyskanego na podstawie znajomości pionowego profilu prędkości wiatru (dotyczy pomiaru 2 i 3).

Wyniki pomiarów stężeń w opisanym eksperymencie i odpowiadające im wartości stężeń obliczonych w poszczególnych wariantach, przedstawiono w tabelach 2-4 oraz na rysunkach 4-6.

Tabela 2. Pomiar 1 z dnia 3.11.2011 – stężenia rzeczywiste i obliczone

Numer punktu	Stężenie rzeczywiste S_p , $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	Stężenie obliczone, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
		$S_{obl\ I}$	$S_{obl\ II}$	$S_{obl\ III}$
1	$1713,9 \pm 100$	1231	1733	-
2	$725,7 \pm 44$	301	577	-
3	$322,5 \pm 20$	165	351	-
4	$204,5 \pm 13$	78	187	-
5	$79,5 \pm 4,8$	36	96	-
6	$37,1 \pm 2,3$	18	56	-
7	$16,3 \pm 0,96$	11	37	-
8	$13,7 \pm 0,84$	8	27	-

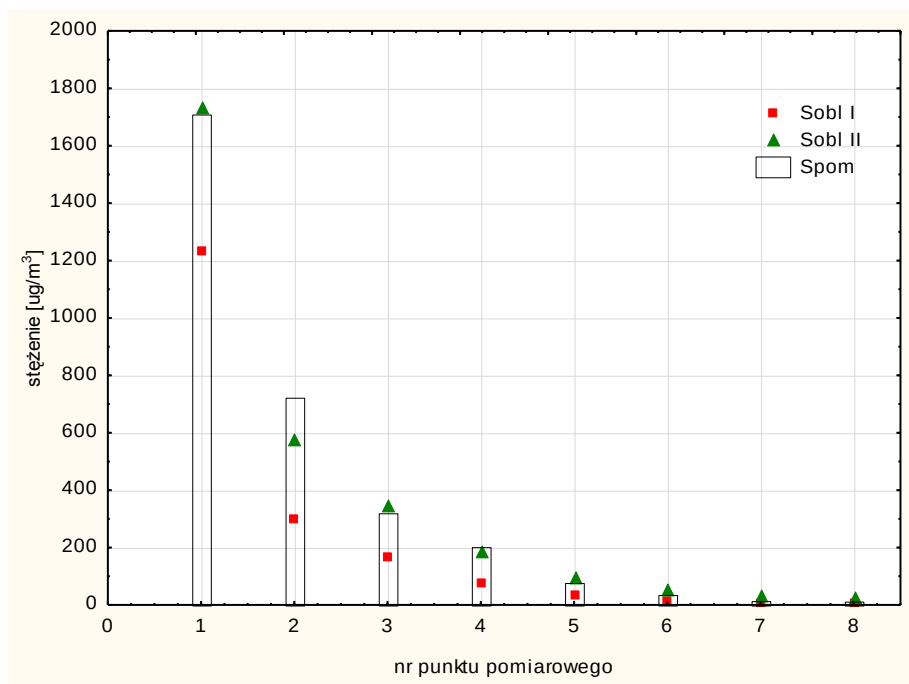
Tabela 3. Pomiar 2 z dnia 11.04.2012 – stężenia rzeczywiste i obliczone

Numer punktu	Stężenie rzeczywiste S_p , $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	Stężenie obliczone, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
		$S_{obl\ I}$	$S_{obl\ II}$	$S_{obl\ III}$
1	$1234,5 \pm 74$	1604	1725	1973
2	$442,4 \pm 27$	397	426	498
3	-	189	203	241
4	$125,3 \pm 7,6$	105	112	133
5	$70,3 \pm 4,3$	53	57	66
6	$37,9 \pm 2,3$	32	34	40
7	-	22	24	28
8	$22,1 \pm 1,4$	16	17	20

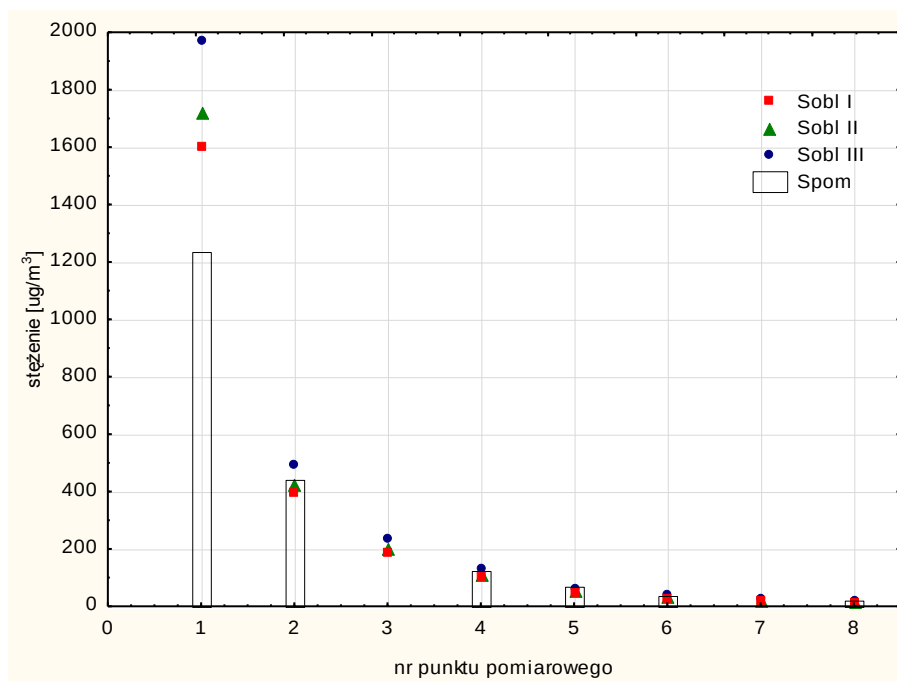
Tabela 4. Pomiar 3 z dnia 11.04.2012 – stężenia rzeczywiste i obliczone

Numer punktu	Stężenie rzeczywiste S_p , $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	Stężenie obliczone, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
		$S_{obl\ I}$	$S_{obl\ II}$	$S_{obl\ III}$
1	$1328,4 \pm 80$	1700	1190	1553
2	-	497	298	432
3	$240,7 \pm 15$	249	138	211
4	$152,5 \pm 9,2$	155	81	129
5	$75,3 \pm 4,6$	89	44	73
6	$38,3 \pm 2,3$	60	28	48
7	$33,0 \pm 2,0$	42	19	38
8	$18,9 \pm 1,2$	32	14	25

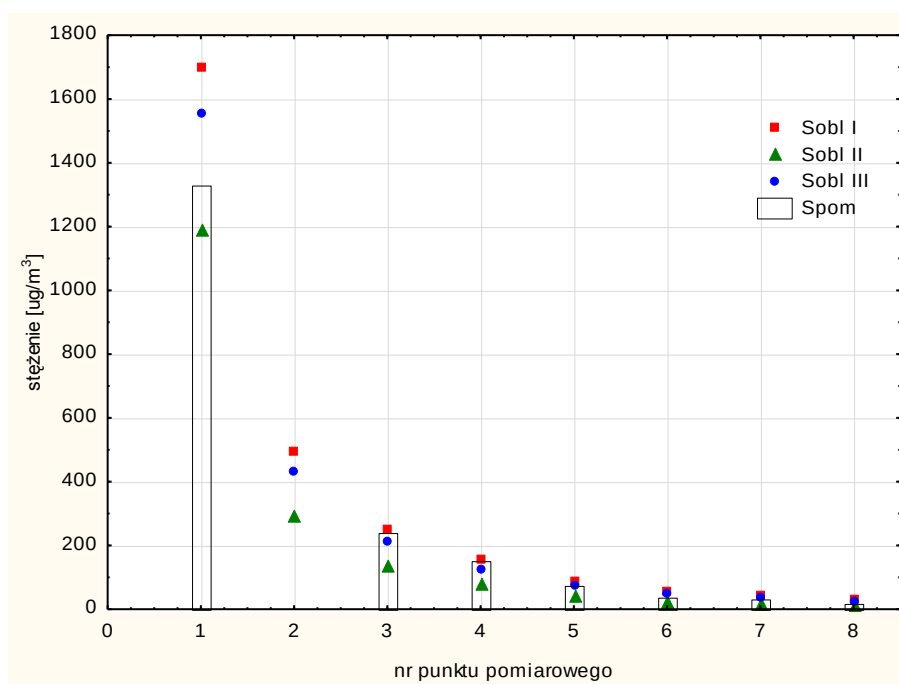
* - niepewności wykonanych pomiarów nie przekraczały 6,0 % mierzonej wartości.



Rys. 4. Pomiar 1 z dnia 3.11.2011 – rozkład stężeń rzeczywistych i obliczonych



Rys. 5. Pomiar 2 z dnia 11.04.2012 – rozkład stężeń rzeczywistych i obliczonych



Rys. 6. Pomiar 3 z dnia 11.04.2012 – rozkład stężeń rzeczywistych i obliczonych

4. Omówienie wyników

Zastosowanie znacznika SF_6 pozwala na wiarygodną ocenę dokładności modeli rozprzestrzeniania, ze względu na możliwość mierzenia bardzo niskich jego stężeń w powietrzu oraz minimalną ilość funkcjonujących źródeł tej substancji, co w praktyce oznacza zerowe tło. Mimo nieznacznej liczby dotychczas wykonanych w trakcie eksperymentu

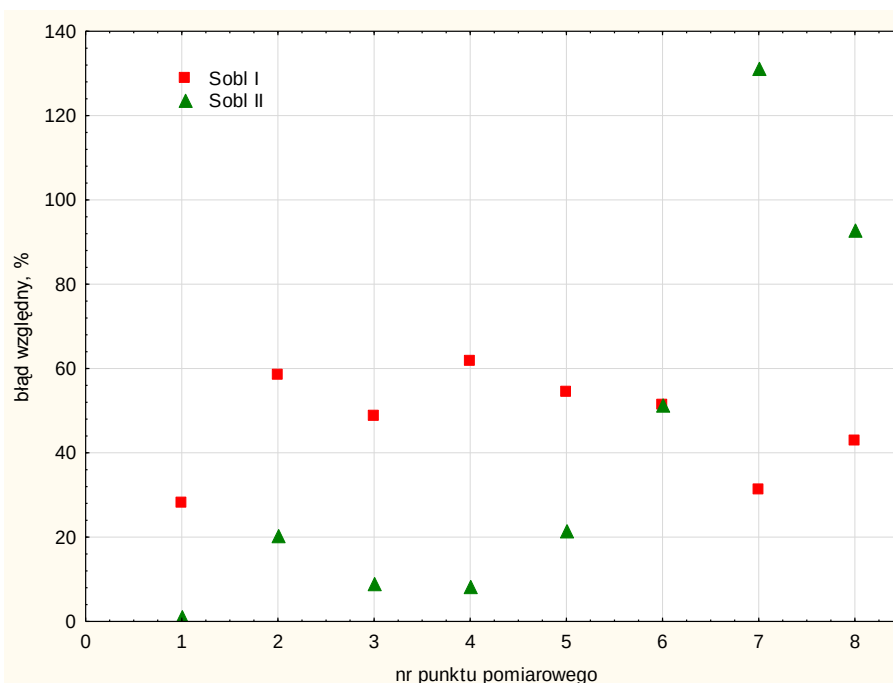
pomiarów można mówić o wyraźnych tendencjach opisywanych przez ich wyniki.

Dla opisanych rozkładów stężeń rzeczywistych i obliczonych policzono względny błąd procentowy, odzwierciedlający zgodność wyników mierzonych z obliczanymi. Tradycyjny model Pasquilla w warunkach rozprzestrzeniania na otwartej, płaskiej przestrzeni przy parametrach emisji jakie wystąpiły w eksperymencie (wariant I), charakteryzuje się stosunkowo niewielkim względnym błędem procentowym, nie przekraczającym wartości 60% w większości receptorów (rys. 7-9). Błąd względny procentowy σ obliczono jako:

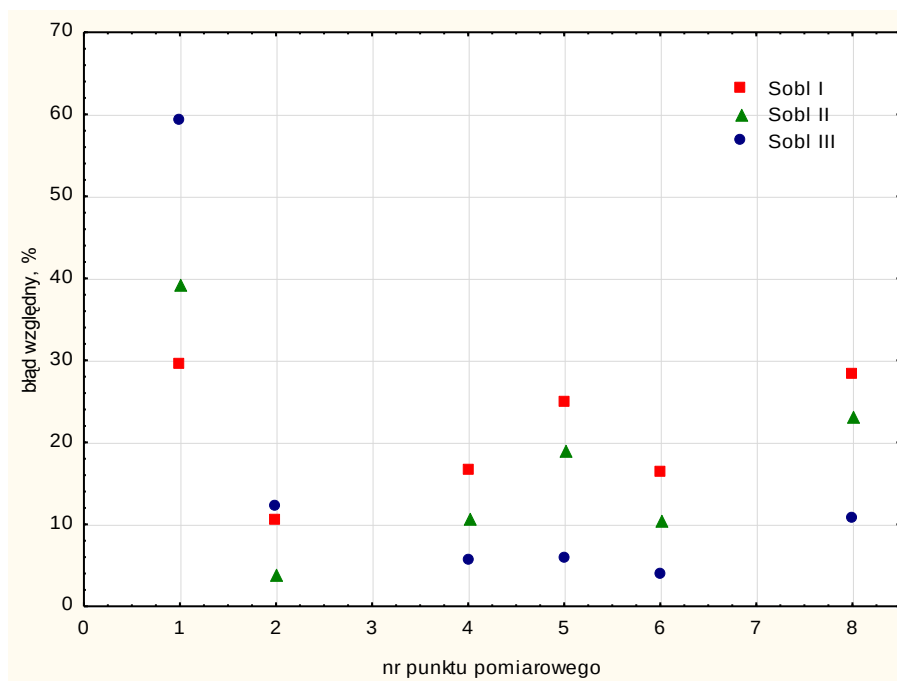
$$\sigma = \frac{|S_{obl} - S_p|}{S_p} \cdot 100\% \quad (1)$$

W przypadku użycia modelu Pasquilla w tradycyjnej formie, stwierdzono w poszczególnych pomiarach wartości średnie błędu procentowego na poziomie 21%, 29% i 47%.

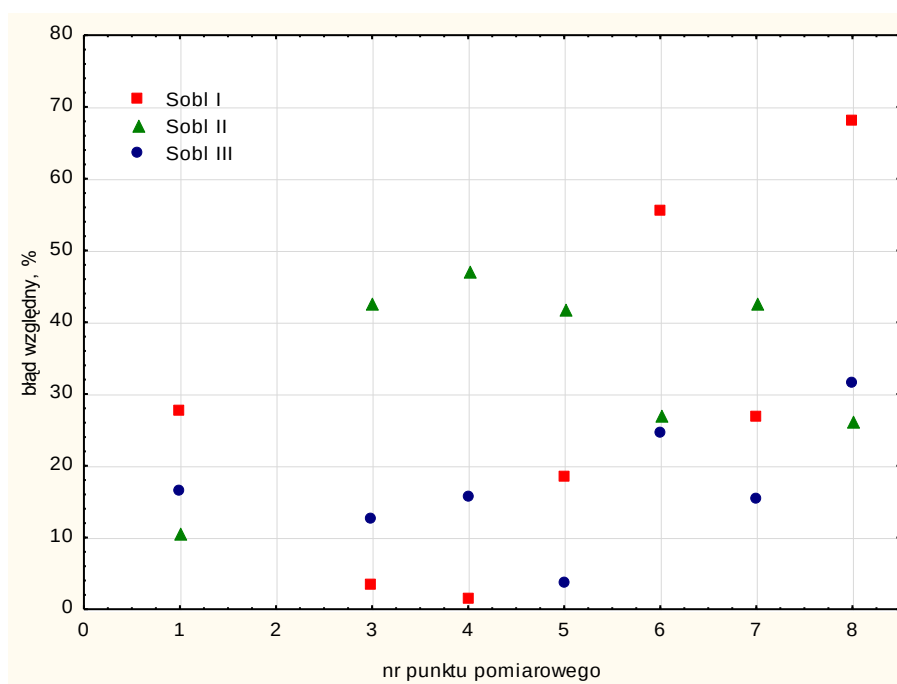
W każdym z przeprowadzonych pomiarów uzyskano największą zgodność stężeń obliczonych ze stężeniami rzeczywistymi po wprowadzeniu do modelu danych meteorologicznych w postaci rzeczywistej prędkości wiatru i wykładnika meteorologicznego wyznaczonego na podstawie pionowego profilu prędkości wiatru (wariant III). Średni błąd względny dla tego wariantu wynosi ok. 16%. Zastosowanie metody SRDT do oceny klasy stabilności atmosfery stosowanej w modelu, eliminując subiektywność tej oceny, pozwala na uniknięcie błędnej klasyfikacji stanu równowagi zapobiegając tym samym błędom grubym w obliczeniach. Wraz z zastosowaniem rzeczywistej prędkości wiatru (wariant II) przyczynia się to do poprawy jakości wykonywanych obliczeń. Znajduje to odzwierciedlenie w mniejszych wartościach średniego błędu względnego wynoszącego dla tego wariantu odpowiednio 16%, 34% i 42% dla pomiarów 1, 2 i 3.



Rys. 7. Pomiar 1 z dnia 03.11.2011 – błąd względny, %



Rys. 8. Pomiar 2 z dnia 11.04.2012 – błąd względny, %



Rys. 9. Pomiar 3 z dnia 11.04.2012 – błąd względny, %

5. Wnioski

Wprowadzenie parametrów meteorologicznych o większej dokładności i jakości do tradycyjnego modelu, np. szacowanie wykładnika meteorologicznego m z profilu prędkości wiatru i stosowanie rzeczywistej prędkości wiatru, skutkuje w większości przypadków lepszą zgodnością stężeń obliczanych tym modelem z stężeniami rzeczywistymi.

Biorąc pod uwagę fakt, że w przypadku źródeł uciążliwych, dla których podstawowym parametrem oceny ich oddziaływania na powietrze atmosferyczne jest częstość przekraczania dopuszczalnych poziomów stężeń 1-godzinnych, wprowadzenie pomiarowo uzyskiwanych: prędkości wiatru i wykładnika m w miejsce stosowanych obecnie klas wartości tych parametrów pozwalałoby na zwiększenie wiarygodności obliczanych częstości przekroczeń.

Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, Dz. U. nr 16 poz. 87 z dnia 26 stycznia 2010
2. Śliwka I.: Rozprawa habilitacyjna pt.: Detektor wychwyty elektronów – podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie, Raport Nr 1924/AP, Kraków
3. Pasquill, F.: The estimation of the dispersion of windborne material. Meteorol. Mag., 1961, Vol. 90, 33-49
4. Bowen, B.M., Dewart J.M., Chen A.I.: Stability Class Determination: A Comparison for one site. Proceedings Sixth Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, 211-214, Boston 1983
5. Holtslag A.A.M., Van Ulden A.P.: A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. Journal Clim. and Appl. Meteor., 1983, Vol. 22, 517-529

Praca wykonana w ramach projektu kluczowego nr POIG.01.01.02-24-017/08 "Inteligentna koksownia spełniająca wymagania najlepszej dostępnej techniki" dofinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

