

## 26

# MODEL NUMERYCZNY EMISJI CO<sub>2</sub> Z NIECZYNNEGO SZYBU

### 26.1 WSTĘP

Problem emisji gazów kopalnianych ze zlikwidowanych szybów wystąpił praktycznie we wszystkich zagłębiach górniczych związanych z podziemną eksploatacją węgla kamiennego [9]. Istnieje także możliwość wypływu gazów z podziemnych instalacji np. podziemnego zgazowania węgla lub sekwestracji dwutlenku węgla [6, 7, 8]. Zatem znajomość zjawiska umożliwia prognozowanie zagrożenia gazowego na powierzchni i wypracowanie odpowiednich procedur bezpieczeństwa [10, 12, 13, 18].

W skład gazów kopalnianych wchodzi dwutlenek węgla i metan, które z jednej strony są gazami cieplarnianymi, a z drugiej tworzą zagrożenie gazowe w pobliżu szybu.

Od 2002 r. Instytut Eksploatacji Źróź Politechniki Śląskiej prowadzi badania nad wypływami CO<sub>2</sub> ze zlikwidowanych szybów w rejonie miast Gliwice, Zabrze, Ruda Śląska i Katowice. Jak wynika z przeprowadzonych badań [14, 15] emisja CO<sub>2</sub> z nieczynnego szybu może sięgać 162,3 kg/h. Podczas pomiarów nie stwierdzono obecności metanu w wypływających gazach kopalnianych.

Do pomiarów zasięgu obecności emitowanego CO<sub>2</sub> wokół szybu wybrano nieczynny szyb Gliwice II, który pozostał niezasypany z uwagi na wykorzystanie go do pompowania wód głębinowych. Wyniki pomiarów „in situ” wskazały, że CO<sub>2</sub> jest wykrywany w odległości nawet 43 m od szybu zgodnie z dominującym, południowym kierunkiem wiatru. Pomiary prowadzone były na poziomie gruntu [14, 15].

Zastosowanie modelu numerycznego do symulacji emisji zanieczyszczeń gazowych umożliwiło dokładniejsze sprawdzenie rozkładu stężenia emitowanego gazu na powierzchni w profilu pionowym, na wysokości 1,7 m odpowiadającej średniemu położeniu głowy człowieka, a ponadto zbadano zmianę stężenia wokół szybu w hipotetyczny dzień bezwietrzny.

### 26.2 MODEL NUMERYCZNY I JEGO ZAŁOŻENIA

Modelowanie numeryczne przepływów mieszanin gazowych w podziemnych wyrobiskach górniczych i emisji zanieczyszczeń gazowych jest prowadzone od dawna

[3, 4, 5, 11, 16, 17]. Głównie zastosowanie znajdują programy z grupy Computational Fluid Dynamics (CFD), których algorytmy obliczeniowe są oparte o rozwiązywanie równań Naviera-Stokesa.

### 26.2.1 Program zastosowany do symulacji

Do symulacji zastosowano program Fire Dynamics Simulator (FDS) wraz z graficznym modułem Pyrosim. Program jest dedykowany symulacjom przepływów powietrza i mieszanin gazowych z intensywną wymianą ciepła lub bez niej. Należy on do grupy programów CFD i jest także oparty o rozwiązanie równań Naviera-Stokesa w sposób numeryczny dla każdego z węzłów siatki oraz aproksymacji wyników pomiędzy punktami węzłowymi dla każdej iteracji. Równania te bazują na następujących prawach i zależnościach [1, 2]: zasada zachowania masy, zasada zachowania pędu (Drugie Prawo Newtona), zasada zachowania energii (Pierwsza Zasada Termodynamiki dla układów otwartych), równanie stanu gazu (Równanie Clapeyrona).

W modelu numerycznym stosowane są przybliżone postaci równań Naviera-Stokesa odpowiednie dla niskich liczb Macha.

Równania zastosowane w programie mogą być rozwiązane dwojako. Pierwsza metoda jest to rozwiązanie bezpośrednie równań, (Direct Numerical Simulation – DNS). Jest to metoda dokładna, jednak bardzo czasochłonna. Drugą metodą jest Large Eddy Simulation – LES. Ideą metody LES jest uśrednienie wpływu oddziaływań wirów małych (niezależnych od geometrii przepływu) i wyrażenie tych oddziaływań przez dodatkowe człony naprężeń, poszukując rozwiązań jedynie dla wirów dużych (zależnych od geometrii, warunków brzegowych itp.) [2].

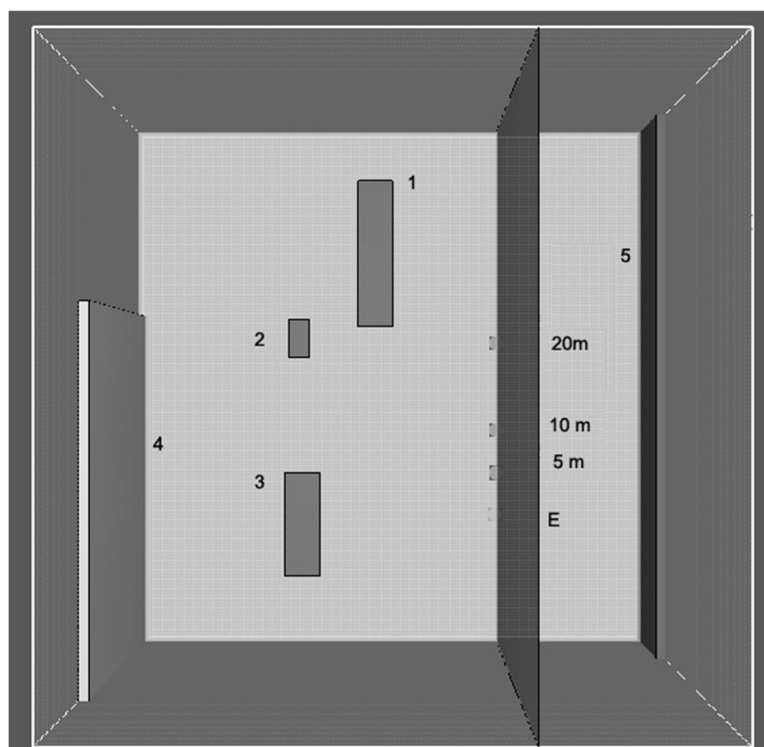
Rozmiar wirów, dla których wyniki są uśredniane, a nie wyliczane bezpośrednio określa współczynnik (filtr) Smagorinskiego.

W celu zmniejszenia czasu obliczeń, model matematyczny przeniesiony do oprogramowania FDS zakłada wiele uproszczeń. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: założenie przepływów relatywnie niewielkich prędkości oraz jedynie prostopadłościenną geometrię domeny obliczeniowej.

### 26.2.2 Założenia i walidacja przyjętego modelu numerycznego

#### a) Założenia

Założono siatkę pomiarową o bokach 60 m x 60 m przy wysokości 30 m (rys. 26.1). Zastosowano uporządkowany sposób rozkładu komórek. Rozmiar komórki wyniósł 0,38 m, co dało liczbę komórek w sieci równą 2048000. W siatce założono następujące obiekty: wylot szybu (E), budynek ochrony (1), skład materiałów (2), skład narzędzi (3), budynek byłej cechowni (4) oraz budynek firmy Future Processing (5). Parametry emisji mieszaniny gazów z szybu zostały założone na podstawie pomiarów in situ [14]. Średnią prędkość emisji założono jako 1 m/s przy temperaturze gazów wynoszącej 12°C. Stężenie masowe dwutlenku węgla w mieszaninie założono jako 0,053 kg/kg co odpowiada stężeniu 3,24% obj.



Rys. 26.1 Rzut modelu z góry

Parametry powietrza atmosferycznego oraz warunki brzegowe dla wlotów i wylotów powietrza przyjęto zgodnie z wartościami stwierdzonymi podczas pomiarów. Wloty i wyloty powietrza do założonego układu przyjęto jako powierzchnie OPEN (odpowiadające otwartemu układowi termodynamicznemu) przy ustawieniu ich temperatury na 20°C (odpowiednia dla średniej temperatury całej domeny obliczeniowej). W pierwszym wariantcie jeden z wlotów (od południa) założono jako INLET (wlot wiatru) i określono jego średnią prędkość na 1,0 m/s przy typowym, parabolicznym profilu wiatru. W drugim wariantcie zmieniono ten warunek brzegowy na OPEN (nieograniczona wymiana masy).

Metodę rozwiązania równań określono jako Large Eddy Simulation przy określeniu wartości filtra Smagorinskiego na 0,1. Założono także grawitację skierowaną w kierunku z (w dół), średnią temperaturę domeny na 20°C, przy założeniu gradientu temperatury 0,06°C/m. Wilgotność względna powietrza została określona na 40%. Czas symulacji wyznaczono na 120 sekund.

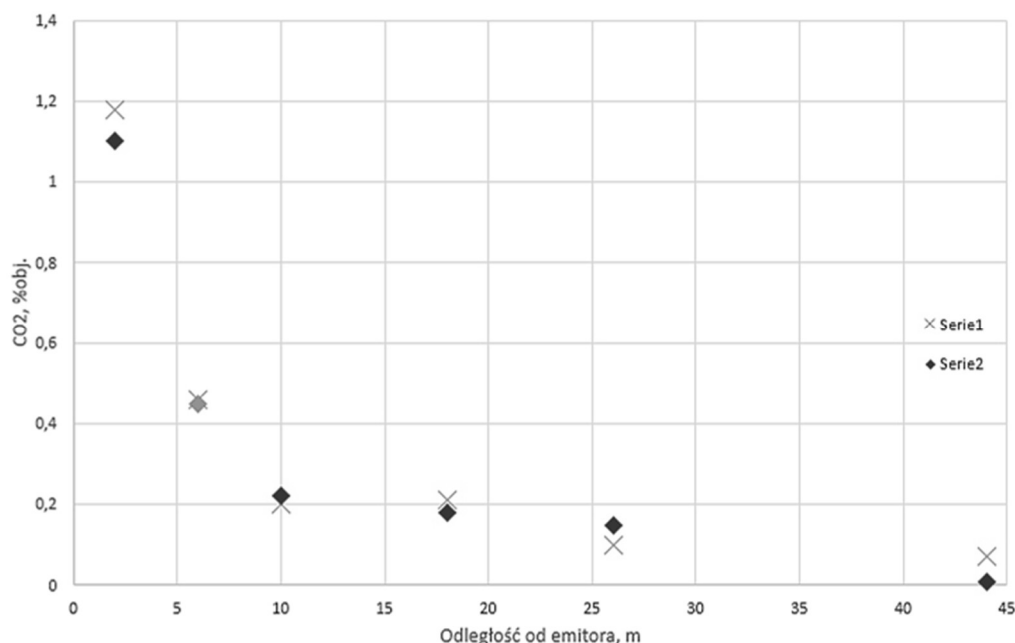
Do ułatwienia graficznej interpretacji wyników dodano emisję znaczników (particles) z interwałem wprowadzania 0,01 s oraz wprowadzono wirtualne czujniki stężenia CO<sub>2</sub> umieszczone w odległości 5 m, 10 m i 20 m od szybu na wysokości 1,7 m. Założono także początkowe stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu wynoszące 0,0%obj. Zatem uzyskane wyniki należy traktować jako relatywne do tła pomiarowego.

## b) Walidacja

Do walidacji modelu wykorzystano dane pomiarowe uzyskane w punktach pomiarowych założonych na linii S-N (zgodnie z rózgą wiatrów) przebiegającej przez

wylot z szybu [14]. Wyniki pomiarów pobierano metodą ciągłą przenośnym analizatorem gazów MultiRae IR Plus, w odległościach od emitora odpowiednio: 2 m, 6 m, 10 m, 18 m, 26 m i 44 m.

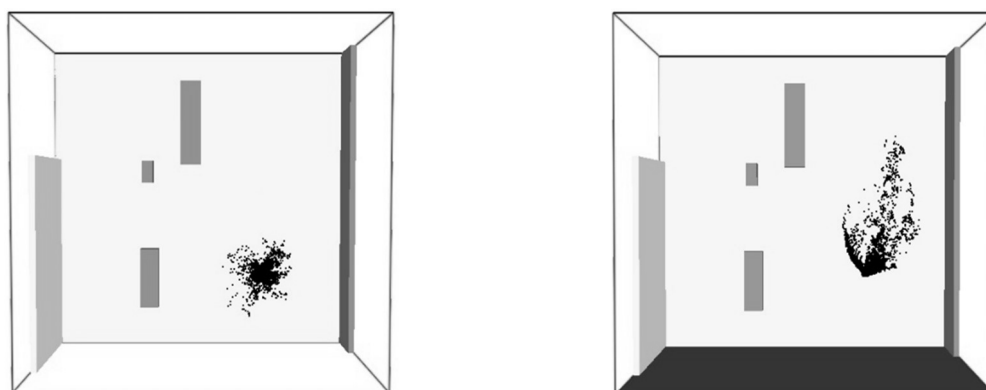
Na rysunku 26.2 przedstawiono porównanie danych pomiarowych z uzyskanymi podczas symulacji.



Rys. 26.2 Walidacja modelu – porównanie stężeń CO<sub>2</sub> wyznaczonych podczas pomiarów „in situ” z wynikami symulacji. Seria 1 – wyniki pomiarów, Seria 2 wyniki symulacji

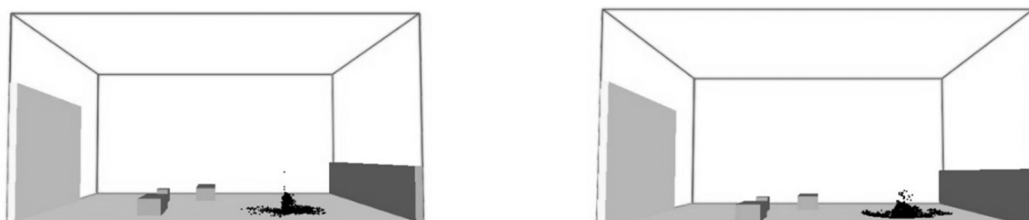
### 26.2.3 Wyniki wraz z analizą

Poniżej (rys. 26.3-26.5) przedstawiono graficzną interpretację emisji założonej mieszaniny gazowej z szybu dla obu wariantów poprzez wizualizację rozkładu emitowanych cząstek (particles) oraz wyniki uzyskane na czujnikach dwutlenku węgla rozmieszczonych na linii S-N w odległościach 5, 10 i 20 m od wylotu z szybu (rys. 26.6-26.8). Czujniki założono na wysokości 1,7 m nad poziomem gruntu, oddając średnie położenie głowy człowieka.

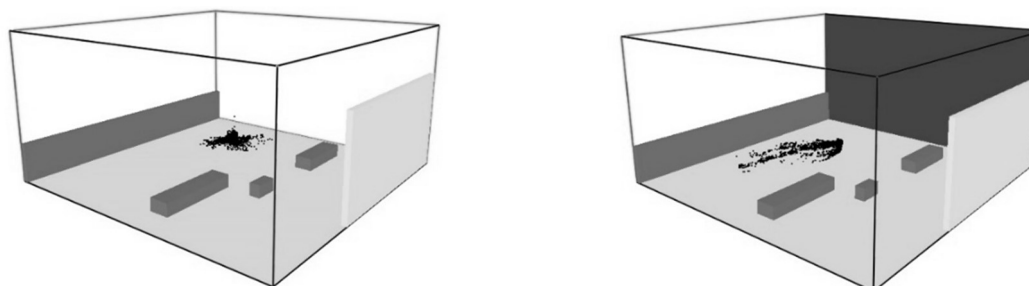


Rys. 26.3 Porównanie rozkładu cząstek w 120 sekundzie, widok z góry (lewo – bez wiatru, prawo – wiatr 1 m/s)

Na rysunkach 26.3-26.5 można zauważyć różnicę pomiędzy otrzymanym zasięgiem emitowanej strugi mieszaniny gazowej. Przy założonej prędkości wiatru (1 m/s) struga zostaje kierowana wzdłuż linii S-N, natomiast w dzień bezwietrzny dwutlenek węgla gromadzi się koncentrycznie wokół wylotu z szybu. Znajduje to odzwierciedlenie w wynikach odczytanych z wirtualnych czujników CO<sub>2</sub>. Wartości zbliżone do zera podano w jednostce mol/mol.

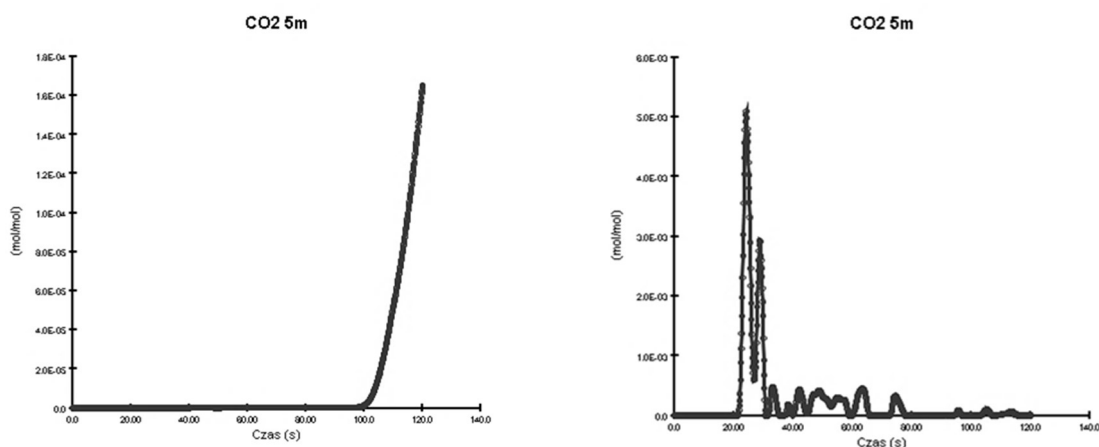


Rys. 26.4 Porównanie rozkładu cząstek w 120 sekundzie, widok od strony południowej (lewo - bez wiatru, prawo - wiatr 1 m/s)



Rys. 26.5 Porównanie rozkładu cząstek w 120 sekundzie, widok perspektywiczny o d północno - zachodniej (lewo - bez wiatru, prawo - wiatr 1 m/s)

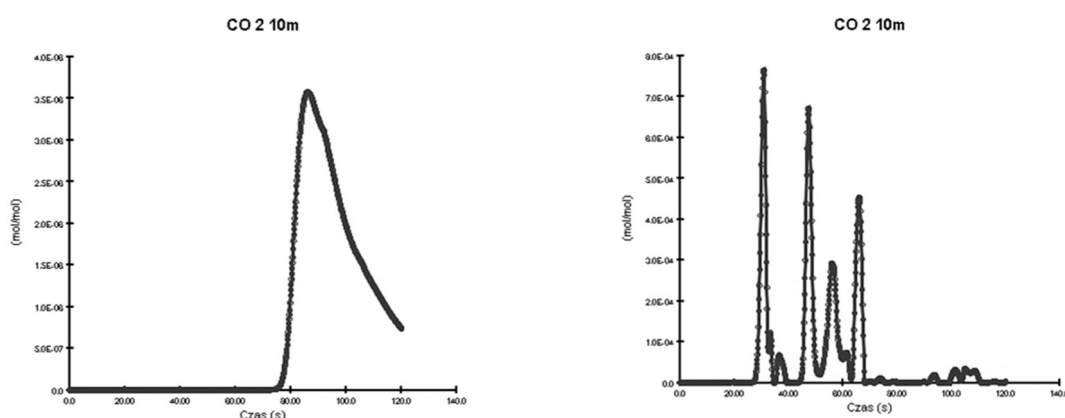
Na czujniku zlokalizowanym 5 m od wylotu szybu na wysokości 1,7 m nad poziomem gruntu przy wariancie bez występującej prędkości wiatru stwierdzono przyrost stężenia CO<sub>2</sub> od 100 sekundy do wartości 0,016% obj. w 120 sekundzie symulacji (rys. 26.6).



Rys. 26.6 Porównanie stężenia CO<sub>2</sub> odczytanego z czujnika ulokowanego 5m od emitora na wysokości 1,7 m nad gruntem (lewo - bez wiatru, prawo - wiatr 1 m/s)

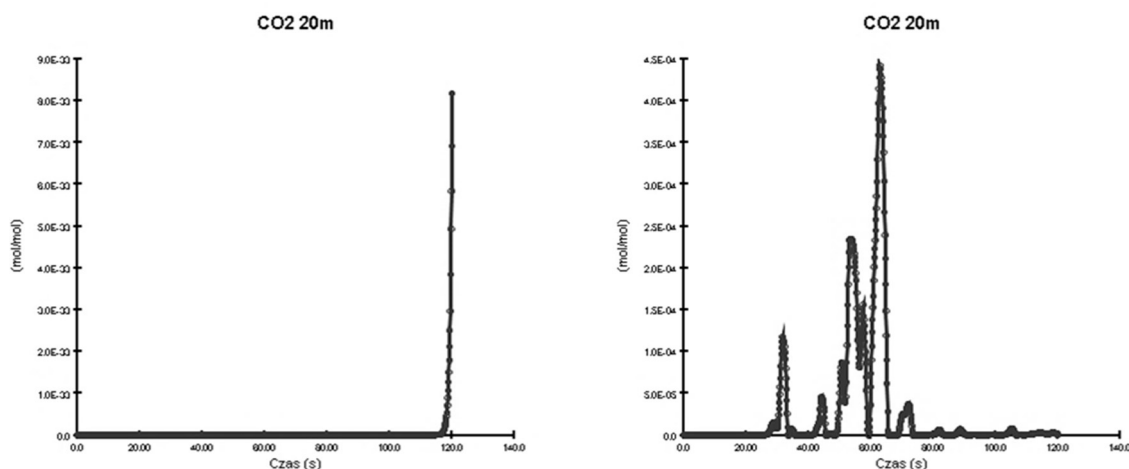
Natomiast przy uwzględnieniu prędkości wiatru stężenie CO<sub>2</sub> osiągnęło maksymalną wartości 0,51 %obj. pomiędzy 20 a 30 sekundą symulacji, a następnie spadło i utrzymywało się na poziomie nieprzekraczającym 0,05%obj.

Na czujniku zlokalizowanym 10 m od wylotu szybu na wysokości 1,7 m nad poziomem gruntu przy wariacie bez występującej prędkości wiatru stwierdzono wzrost stężenia CO<sub>2</sub> od około 75 sekundy, aż do maksymalnego stężenie sięgającego  $3,5 \times 10^{-8}$  mol/mol w 90 sekundzie symulacji (rys. 26.7). Wartość ta nie została odnotowana na rysunku 6 z uwagi na inny zakres osi stężenia CO<sub>2</sub>. Natomiast przy uwzględnieniu prędkości wiatru stężenie CO<sub>2</sub> wahało się aż do maksymalnej wartości  $7,9 \times 10^{-4}$  mol/mol w 30 sekundzie symulacji. Następnie stężenie CO<sub>2</sub> wahało się znacząco, nie przekraczając wartości  $7 \times 10^{-4}$  mol/mol.



Rys. 26.7 Porównanie stężenia CO<sub>2</sub> odczytanego z czujnika ulokowanego 10m od emitora na wysokości 1,7 m nad gruntem (lewo - bez wiatru, prawo - wiatr 1 m/s)

Na czujniku zlokalizowanym 20 m od wylotu szybu na wysokości 1,7 m nad poziomem gruntu przy wariacie bez występującej prędkości wiatru stwierdzono maksymalne stężenie dwutlenku węgla zbliżone do zera  $8 \times 10^{-33}$  mol/mol (rys. 26.8).



Rys. 26.8 Porównanie stężenia CO<sub>2</sub> odczytanego z czujnika ulokowanego 20m od emitora na wysokości 1,7 m nad gruntem (lewo - bez wiatru, prawo - wiatr 1 m/s)

Natomiast przy uwzględnieniu prędkości wiatru stężenie CO<sub>2</sub> wahało się aż do maksymalnej wartości  $4,5 \cdot 10^{-4}$  mol/mol w 65 sekundzie symulacji. Następnie stężenie CO<sub>2</sub> spadło i nie przekroczyło wartości  $5 \cdot 10^{-5}$  mol/mol.

### 26.3 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone symulacje wskazują, że rozkład stężenia dwutlenku węgla wokół nieczynnego szybu jest uzależniony od kierunku i prędkości wiatru. Wykazano, że w hipotetyczny dzień bezwietrzny, po 120 sekundach emisji w odległości 20 metrów od szybu stężenie dwutlenku węgla na wysokości 1,7 m jest zbliżone do zera ( $8 \cdot 10^{-33}$  mol/mol), natomiast przy założonej prędkości wiatru 1 m/s było znacząco wyższe lecz nie przekroczyło  $4,5 \cdot 10^{-4}$  mol/mol.

Rozpatrując wyniki porównawcze otrzymane podczas pomiarów „insitu” jak i podczas symulacji dla wysokości 0m (poziom gruntu) i prędkości wiatru 1 m/s (rys. 26.2) można zauważyć wyższe wartości stężenia CO<sub>2</sub> w odległościach 5, 10 i 20 m od szybu, wynoszące odpowiednio 0,5% obj., 0,22% obj. oraz 0,18% obj (na wysokości 1,7 m wyniosły one odpowiednio maksymalnie: 0,51% obj.; 0,079% obj. oraz 0,045% obj.).

Z przeprowadzonych symulacji i ich porównania względem wyników pomiarów insitu wynikają następujące wnioski i obserwacje:

1. Istnieje możliwość zbudowania modelu numerycznego w programie FDS z interfejsem graficznym Pyrosim, który służyłby do oceny możliwego stężenia dwutlenku węgla wokół nieczynnego szybu podziemnej kopalni węgla kamiennego. Model może w przyszłości służyć do symulacji emisji zróżnicowanych mieszanin gazowych (np. zawierających metan) z innych szybów lub wycieków z instalacji podziemnego składowania dwutlenku węgla tudzież podziemnego zgazowania węgla.
2. Wykazano, że na poziomie gruntu maksymalne stężenie CO<sub>2</sub> osiągnęło wartość 0,5% obj. w odległości 5 m od szybu wg wirtualnego czujnika gazu zlokalizowanej na linii zgodnej z kierunkiem wiatru 3. Na wysokości odpowiadającej położeniu głowy człowieka (1,7 m) w tej samej odległości od szybu stwierdzono najwyższe stężenie wynoszące 0,51% obj. przy wariacie z założoną prędkością wiatru wynoszącą 1 m/s.
3. Stwierdzono różnicę pomiędzy wynikami uzyskanymi przy wariacie z założoną prędkością wiatru równą 1,0 m/s i w dzień bezwietrzny na wysokości 1,7 m. W odległości 5 m od szybu wartości te wyniosły 0,51% obj. w wariacie z prędkością wiatru i 0,016% obj. w wariacie bez prędkości wiatru. W odległości 20 m od szybu na wysokości 1,7 m nad poziomem gruntu przy wariacie bez występującej prędkości wiatru stwierdzono maksymalne stężenie dwutlenku węgla zbliżone do zera ( $8 \cdot 10^{-33}$  mol/mol), natomiast w wariacie z prędkością wiatru stężenie CO<sub>2</sub> wahało się aż do maksymalnej wartości 0,045% obj.

## LITERATURA

1. D.A. Anderson, J.C. Tannehill, R.H. Pletcher. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Philadelphia: Hemisphere Publishing Corporation, 1997.
2. K. McGrattan et al. „Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model.” NIST Special Publication 1018-5. Washington: NIST Special Publication, 2010. Internet: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFDSVTRG4/fire-dynamics-simulator/fire-dynamics-simulator> [02.2017]
3. M. Branny. „Numerical simulation of airflow in blind headings ventilated with jet fans.” *Archives of Mining Sciences*, no. 48, pp. 425-443, 2003.
4. M. Branny. „Computer Simulation of flow of air and methane mixture in the longwall – return crossing zone.” *Archives of Mining Sciences*, vol. 51, issue 1, pp. 133-145, 2006.
5. M. Branny, M. Karch, W. Wodziak, M. Jaszczur, R. Nowak, J. Szmyd. „Eksperymentalna weryfikacja modeli CFD stosowanych w wentylacji kopalń.” *Przegląd Górniczy*, nr 5, pp. 73-82, 2013.
6. P. Bujok, M. Klempa, K. Labus, K. Suchodolska, R. Rado. „Możliwości sekwestracji dwutlenku węgla w głębokich formacjach geologicznych na terenie Czech i Polski.” *Wiadomości Górnicze*, 63 nr 12, pp. 698-703, 2012.
7. M. Lutyński. „Impact of preparation and storage of activated carbon on the high pressure sorption of CO<sub>2</sub>.” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, vol. 62, no. 1, pp. 113-119, 2014.
8. R. Pawar, J. Theresa, L. Watson, C.W. Gablea. „Numerical Simulation of CO<sub>2</sub> Leakage through Abandoned Wells: Model for an Abandoned Site with Observed Gas Migration in Alberta, Canada.” *Energy Procedia*, 1, pp. 3625-3632, 2009.
9. J. Sułkowski, P. Wrona. „Mathematical Model Of Gas Out Flow From Abandoned Coal Mine Through Untight Shaft Under The Influence Of Atmospheric Pressure Changes.” *Archives of Mining Sciences*, vol. 51, issue 1, pp.97-107, 2006.
10. P. Wrona. „The method of estimation of gas hazard near abandoned coal mine shaft.” *Wiadomości Górnicze*, nr 5, pp. 287-293, 2010.
11. P. Wrona. „Wpływ prędkości powietrza na rozwój pożaru egzogenicznego w wyrobisku górniczym – symulacja w programie Fire Dynamics Simulator (FDS) – Pyrosim.” *Przegląd Górniczy*, nr 7, pp. 117-124, 2013.
12. P. Wrona, D. Małek. „Zlikwidowany szyb górniczy – propozycja procedur bezpieczeństwa, monitoringu gazowego i raportowania w zakresie możliwych wpływów gazów.” *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, nr 11(243), pp. 28-31, 2014.
13. P. Wrona. „Propozycja nowej metody klasyfikacji zagrożenia gazowego na terenach pogórnich kopalń węgla kamiennego.” *Wiadomości Górnicze*, nr 11, pp. 584-593, 2015.
14. P. Wrona, Z. Różański, G. Pach, T. Suponik, M. Popczyk. „Closed coal mine shaft as a source of carbon dioxide emissions.” *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, pp. 1-12, 2016.
15. P. Wrona, J. Sułkowski, Z. Różański, G. Pach. „The problem of carbon dioxide emissions from closed coal mine shafts - the overview and the case study.” *Archives of Mining Sciences*, vol. 61, issue 3, pp. 587-600, 2016.
16. P. Wrona Z. Różański, G. Pach, L. Domagała. „The application of a jet fan for the control of air and methane streams mixing at the excavations cross - the results



- of numerical simulation." *Management Systems in Production Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 156-162, 2016.
17. P. Wrona, Z. Róźański, G. Pach. „Carbon Monoxide Emission from Diesel Engine in Blind Excavation – FDS Simulation,” *Proceedings of the 13th International Congress on Energy and Mineral Resources (CIERM 2013)*, Cantabria, Spain, 2013, pp. 12-21.
  18. P. Wrona, Z. Róźański, G. Pach, T. Suponik, T. Mzyk. „Zlikwidowany szyb górnicy w rewitalizowanym terenie. Studium przypadków oceny emisji zanieczyszczeń gazowych,” *Innowacyjne rozwiązania rewitalizacji terenów zdegradowanych*, IX Międzynarodowa Konferencja, Chorzów-Zabrze, 2015, pp. 209-213.

*Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016*

*Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017*

**dr inż. Paweł Wrona**

Politechnika Ślaska,

Wydział Górnictwa i Geologii

Instytut Eksploatacji Źróź

ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: pawel.wrona@polsl.pl

## MODEL NUMERYCZNY EMISJI CO<sub>2</sub> Z NIECZYNNEGO SZYBU

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych emisji dwutlenku węgla z nieczynnego szybu podziemnej kopalni węgla kamiennego. Do obliczeń zastosowano program FDS wraz z graficznym modułem Pyrosim. Program należy do grupy programów CFD (Computational Fluid Dynamics) służących do symulacji przepływów mieszanin gazowych. Walidację stworzonego modelu przeprowadzono w oparciu o dane eksperymentalne otrzymane podczas pomiarów „insitu” nad nieczynnym szybem Gliwice II. W programie FDS przeprowadzono symulacje emisji mieszaniny gazowej z szybu z założonym, stężeniem objętościowym CO<sub>2</sub> wynoszącym 3,24% (wartość maksymalna stwierdzona podczas pomiarów) dla dwóch wariantów prędkości wiatru. W pierwszym wariantcie założono prędkość wiatru 1 m/s z kierunku południowego (warunek odpowiadający przeprowadzonym pomiarom). W drugim wariantcie założono prędkość wiatru 0 m/s (dzień bezwietrzny) i porównano otrzymane wyniki. Wykazano, że istnieje różnica w rozplywie strugi mieszaniny gazowej wokół szybu dla obu wariantów. W dni bezwietrzne gazy wypływające z górotworu przez szyb mogą tworzyć lokalnie wokół szybu bardziej niebezpieczne nagromadzenia niż podczas dni wietrznych. Ma to znaczenie przy opracowaniu procedur bezpieczeństwa dla terenów pogórnich. Zbudowany model numeryczny może być zmodyfikowany w dowolny sposób i być stosowany w przyszłości w ocenie bezpieczeństwa gazowego na powierzchni przy wielu zagadnieniach związanych z możliwym przepływem gazów pomiędzy atmosferą, a górotworem, np. przy likwidacji kopalń, technologiach CCS (Carbon Capture Storage) lub UCG (Underground Coal Gasification).

**Słowa kluczowe:** CFD, emisja gazów, dwutlenek węgla, likwidacja kopalń

## NUMERICAL MODEL OF CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM A CLOSED SHAFT

**Abstract:** The results of numerical simulations into carbon dioxide emissions from a closed shaft are presented in the article. FDS programme including Pyrosim mode was applied to computing. The programme belongs CFD (Computational Fluid Dynamics) group which are designed for simulations of fluid flow. Validation was based on experimental data obtained during „insitu” measurements above closed Gliwice II shaft. The concentration of CO<sub>2</sub> in assumed mixture was 3,24%vol. (maximal detected value) and two wind variants were set up. The first was for wind velocity 1,0m/s from the south (according to measurements conditions). The second variant was for wind velocity 0,0m/s. Then the results were compared. Comparing the variants, the difference in gas stream distribution in vicinity of the shaft was observed. In contrary to assumed wind velocity as 1,0m/s, under „no wind” conditions gas flowing out of the shaft can create local hazardous accumulation. It is crucial when safety procedures for post – mining areas are elaborated. Created model can be easily modified and applied in the future for many aspects of possible gas flow from an underground to the surface, eg. during mine closure, CCS (Carbon Capture Storage) or UCG (Underground Coal Gasification).

**Key words:** CFD, gas emissions, carbon dioxide, mine closure