

Prezentacja wybranych trójwymiarowych modeli numerycznych migracji metanu w rejonie ściany przydatnych do weryfikacji programu VentZroby

JERZY KRAWCZYK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Rejon ściany wydobywczej wraz z przyległymi zrobami jest obiektem o bardzo złożonej strukturze. Złożoność ta sprawia, że do modelowania komputerowego przepływu powietrza kopalnianego i migracji metanu w tym obszarze są stosowane uproszczone modele. W wyrobiskach chodnikowych często korzysta się z przybliżenia jednowymiarowego przepływu. Dla obszaru zrobów podobny stopień uproszczeń zapewnia dwuwymiarowy opis. Ta metoda reprezentacji wyrobisk została z powodzeniem użyta w programie VentZroby. Niniejszy artykuł prezentuje wstępny etap prac nad weryfikacją i walidacją programu VentZroby poprzez porównanie z dokładniejszym, trójwymiarowym opisem. Dokonano w nim przeglądu metod dwu i trójwymiarowej reprezentacji wyrobisk chodnikowych i obszaru zrobów. Dwuwymiarowa symulacja metodą objętości skończonej może zostać wprost użyta do weryfikacji modelu zrobów, w którym obszar ten reprezentuje siatka bocznic. Dla trójwymiarowego opisu rozpatrywano dwa warianty, różniące się zakresem reprezentacji zrobów. W prostszym układ porowatych przegród i pomocniczych objętości miał służyć jedynie do zadania warunków brzegowych na dopływ metanu do wyrobisk chodnikowych. W pełniejszej wersji uwzględniono filtracyjny przepływ w prostopadłościennym obszarze o wymiarach odpowiadających rzeczywistym zrobom. Przedstawione obszary obliczeniowe mogą być wykorzystane do komputerowych symulacji przepływów powietrza kopalnianego i metanu w rejonie ściany.

Słowa kluczowe: migracja metanu, metoda objętości skończonej, trójwymiarowy opis, siatki obliczeniowe

1. Wprowadzenie

W większości polskich kopalń węgla występują zagrożenia pożarem podziemnym i emisją metanu. Częstym miejscem ich występowania są rejonu ścian wydobywczych. Większość ścian jest eksploatowana bez wypełniania (podsadzania) pustek pozostałych po wydobytych skałach. Działalność górnicza powoduje więc powstanie nie tylko wyrobisk chodnikowych, które mają dość regularne kształty ale i systemu pustek poeksploatacyjnych o złożonej, z reguły nieznannej strukturze.

Jednym z warunków bezpiecznej eksploatacji jest zapobieganie gromadzeniu się wybuchowych mieszanin powietrza i metanu w tam, gdzie może zostać zainicjowany wybuch. Kolejnym warunkiem jest niedopuszczenie do samozapłonu węgla w zrobach. Wśród metod prewencji istotną rolę odgrywają skuteczna wentylacja i odmetanowanie. Struktura wyrobisk podziemnych kopalń jest bardzo złożona. Procesy zachodzące w tej strukturze można badać stosując modelowanie komputerowe. Dla sieci wyrobisk chodnikowych od lat powszechnie korzysta się z oprogramowania bazującego na modelach jednowymiarowego, ustalonego przepływu. Oprogramowanie to służy do wspomaganie decyzji podejmowanych podczas całego cyklu istnienia systemów wentylacyjnych – od projektowania poprzez optymalizację użytkowania aż po likwidację. Podstawową funkcją jest przewidywanie ilości powietrza (wydatków objętościowych) w poszczególnych wyrobiskach. Opcjonalnie możliwe jest modelowanie parametrów klimatu i stężeń gazów.

Z reguły oprogramowanie to nie modeluje procesów niestacjonarnych. Jednym z wyjątków jest Moduł Pożar zawarty w pakiecie Programów Inżyniera Wentylacji Ventgraph. Model matematyczny łączy w sobie opisy przepływu powietrza kopalnianego, transportu gazów domieszkowych, ogniska pożaru oraz

wymiany ciepła z warstwą górotworu przyległą do wyrobisk. Opis przepływu wraz z warunkami brzegowymi tworzy układ równań nieliniowych równań algebraicznych. Do jego rozwiązywania stosuje się metodę H. Crossa. Dla każdej boczniczy sieci wentylacyjnej układ ten jest sprzężony z pozostałymi równaniami poprzez parametry (gęstość, stężenie i prędkość). Proces transportu gazów zachodzi dużo wolniej niż dv/dt co pozwala na rozdzielenie wejściowego układu równań. Polega to na tym, że obliczymy rozptył powietrza przy założeniu niezmiennego rozkładu temperatur i stężeń, tak jakby przepływ był ustalony. Następnie rozwiązujemy równania transportu i obliczamy nowy rozkład temperatur, stężeń i gęstości, odpowiednio zmieniają się opory i naturalna wentylacja. Dla tak zmodyfikowanych parametrów sieci w kolejnym kroku czasowym powtarzamy powyższą sekwencję obliczeń.

Na dalszym etapie rozwoju pakietu, dodawano modele zrobów i sieci odmetanowania tworząc kolejny moduł o nazwie VentZroby W rozbudowanym modelu przyjmuje się, że przepływ mieszaniny powietrza i gazów w sieci wyrobisk oraz sieci odmetanowania odwzorowuje zbiór jednowymiarowy bocznic, natomiast przepływ w zrobach odwzorowuje dwuwymiarowy obszar izotropowy, niejednorodny ośrodek porowaty. Na granicach pomiędzy sieciami wyrobisk, odmetanowania i zrobami zachodzi wymiana masy. Podstawą modelu matematycznego przepływu nieściśliwego w sieci wyrobisk jest układ równań: ciągłości, stanu i ruchu przy czym, analogicznie jak dla modułu Pożar, równanie ruchu rozważa się dla stanu ustalonego. Dla opisu przepływu w zrobach przyjęto układ równań: ciągłości, stanu, filtracji zgodnie z prawem Darcy'ego. Przestrzeń zrobów jest odwzorowana na siatkę bocznic, dzięki czemu można stosować te same metody numeryczne dla sieci wyrobisk i zrobów.

Częścią prac przy tworzeniu i wdrażaniu programów symulacyjnych jest ich weryfikacja, walidacja dopasowanie do obiektu. Weryfikacja rozumiana jest jako sprawdzenie poprawności modeli numerycznych. Celem walidacji jest określenie zakresu stosowalności symulatorów rozbieżności między zjawiskami i symulacją. Model jest dopasowywany do obiektu, takiego jak system wentylacyjny konkretnej kopalni na podstawie pomiarów *In situ* lub podobieństwa do zbadanych wcześniej obiektów.

Do weryfikacji i dopasowania modelu rejonu ściany używane są dane z specjalnie przeprowadzonych pomiarów a także dane z czujników systemu monitoringu. W obu przypadkach dotyczą one punktowych pomiarów zmiennych w czasie stężeń, ciśnień i prędkości. Dane te mogą być zbierane dla bardzo ograniczonej liczby punktów pomiarowych. Podczas kalibracji modelu i jego weryfikacji wyniki z punktowych pomiarów są odnoszone do wielkości średnich, właściwych dla stopnia uproszczenia modelu numerycznego używanego w programie Ventzroby.

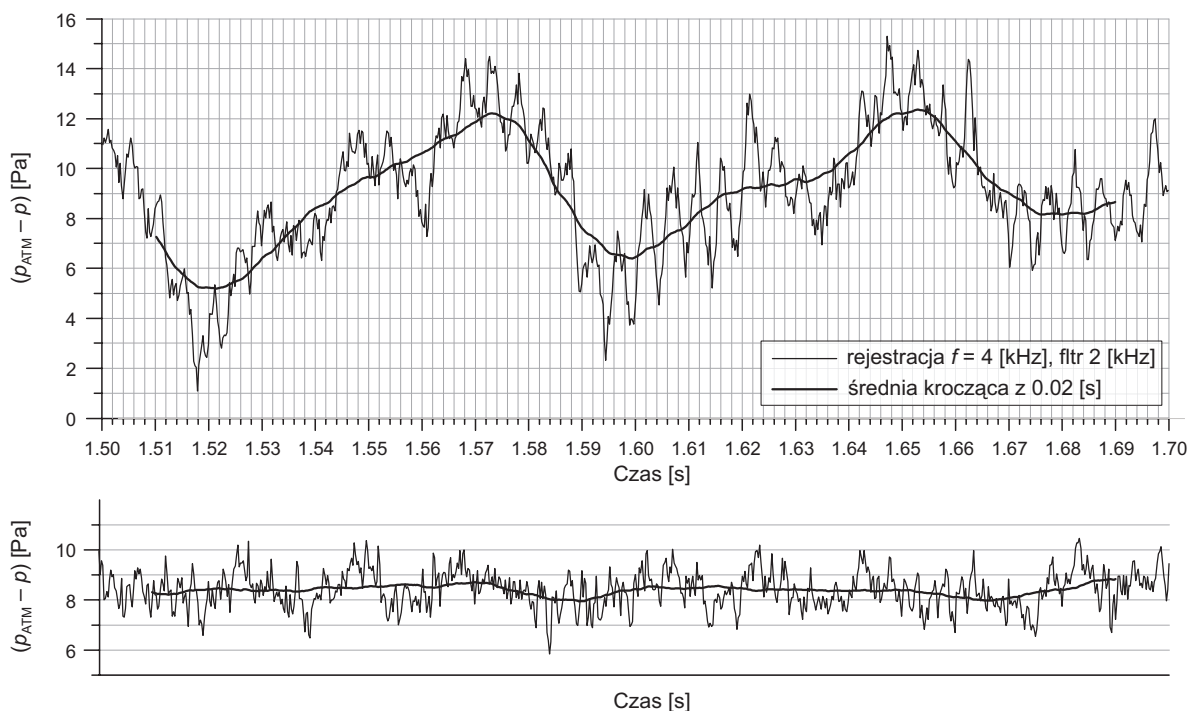
Kolejną metodą weryfikacji jest porównanie z innym, już zweryfikowanym oprogramowaniem. Jeśli to oprogramowanie było również zwalidowane, to porównania te mogą być częścią walidacji. Najlepiej gdy obliczenia porównawcze są uzupełnieniem danych eksperymentalnych.

Jednowymiarowe modele przepływu powietrza w chodnikach i dwuwymiarowa siatka obrazująca przepływ w zrobach odnoszą się pośrednich wielkości odpowiednio dla przekrojów poprzecznych wyrobiska i segmentów zrobów. Z tego względu nie są w stanie podać informacji o lokalnych nagromadzeniach metanu. Jedną z metod oceny zakresu przestrzennej zmienności tych parametrów może być trójwymiarowa symulacja metodą objętości skończonej. Ponadto przeprowadzenie obliczeń porównawczych dla rejonu ściany wraz z przyległym obszarem zrobów pozwoli na weryfikację procedur programu Ventzroby.

Wiedza o lokalnych rozkładach ciśnień, stężeń i prędkości jest pomocna w opracowaniu metodyki pomiarów *in situ*, koniecznych do prawidłowej identyfikacji parametrów modelu rejonu ściany, takich jak opory chodników ścianowych

Odpowiednio do przyjętego modelu przepływu (uwzględniający lepkość, ściśliwość, transport ciepła...), warunków brzegowych, kształtu, dyskretyzacji obszaru obliczeniowego (siatki) oraz dokładności (stopnia) schematów różnicowych, oprogramowanie tworzy układ równań algebraicznych, który jest rozwiązywany metodami iteracyjnymi.

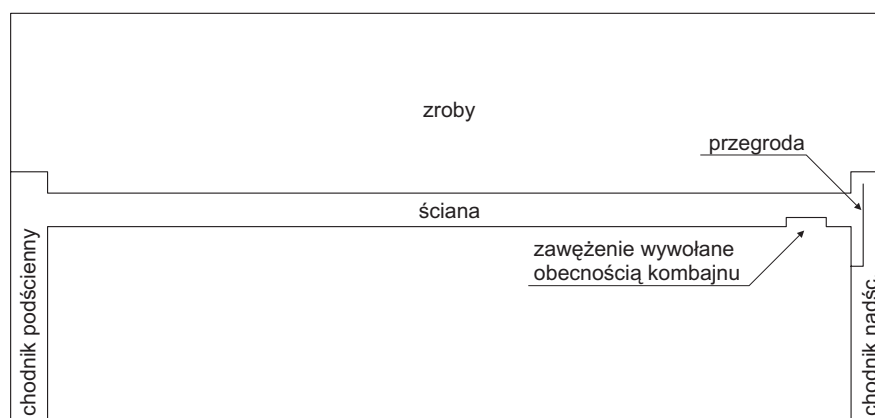
Postać równań przepływu zależy od tego czy dla rozpatrywanego zjawiska można stosować hipotezę Reynoldsa, zakładającą, że ruch płynu może być traktowany jako superpozycja ruchu średniego i fluktuacyjnego (Rys. 1). Dla procesów nieustalonych wymagane jest by proporcje skal czasowych stanów przejściowych i fluktuacji turbulentnych były takie, że odpowiednio stany przejściowe mógł reprezentować ruch średni a turbulencję fluktuacyjny. Hipoteza ta prowadzi do nieustalonych uśrednionych równań Naviera Stokes'a (ang. Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes, skrót URANS).



Rys. 1. Zapis fluktuacji ciśnienia podczas stanu przejściowego i po ustaleniu się turbulentnego przepływu powietrza w rurociągu oraz średnie kroczące – $dt = 0.02$ [s]

Jeśli to założenie nie jest spełnione, to bardziej odpowiednie są inne metody modelowania przepływu, takie jak:

- LES (od angielskiego Large Eddy Simulation), gdzie równania Naviera Stokes'a są filtrowane do postaci pozwalającej na dokładne rozwiązanie dla wirów o rozmiarze większym niż komórki siatki a pozostałe, mniejsze wiry, reprezentuje tak zwany model dla skali podsiatkowej (Subgrid Scale Model – skrótowo SGS).
- DES, (ang. Detached Large Eddy Simulation) będąca hybrydowym modelem korzystającym z metody LES dla turbulentnego rdzenia przepływu i RANS (konkretnie modelu turbulencji Spalart-Allmaras) w pobliżu ścian.
- DNS (ang. Direct Numerical Simulation) bezpośrednia symulacja numeryczna, gdzie wprost rozwiązuje się równania Naviera Stokes'a.



Rys. 2. Schemat uproszczonego modelu rejonu ściany i zrobów

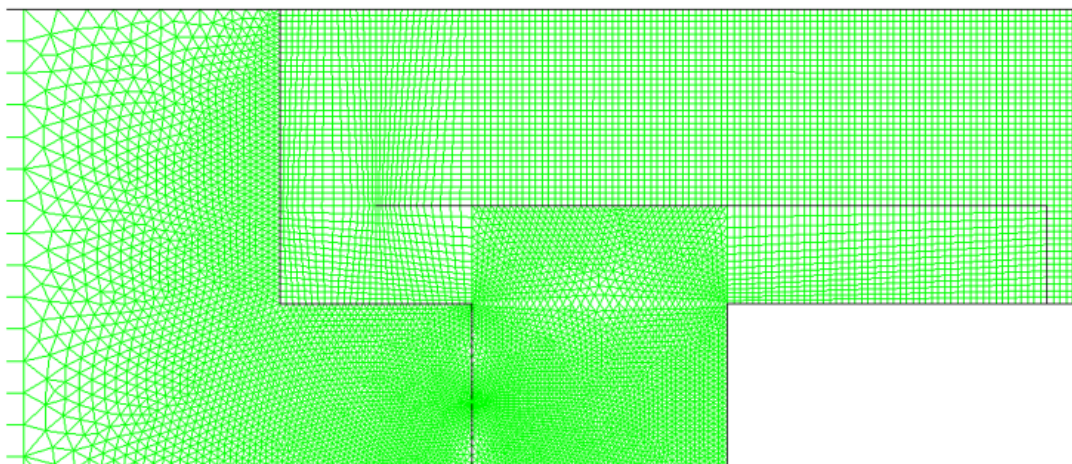
3. Dwuwymiarowy model rejonu ściany i zrobów

Stosując płaskie komórki możemy stworzyć dwuwymiarową reprezentację rejonu ściany wraz ze zrobami. Uzyskujemy informację o zakresie zmienności parametrów w płaszczyźnie, tracąc jednak informację o ich zmienności z wysokością. Pominięcie trzeciego wymiaru przyspiesza uzyskanie rozwiązania.

Obejmował on:

- odcinek **chodnika podścianowego** o długości 25 [m] i szerokości 4.6 [m] – na wlocie zadano równomierny profil prędkości,
- **dolne naroże** o długości 3 [m]; ocios przyległy do zrobów był materiałem porowatym,
- **ścianę** o szerokości 4 [m], długości około 100 [m], w której uwzględniono obecność sekcji o szerokości 1.5 [m]; wymiana powietrza ze zrobami następowała poprzez szczeliny o szerokości 0.05 [m],
- **kombajn**, reprezentowany przez obszar prostokątny o wymiarach 1 na 5 [m] przyległy do ociosu ściany,
- **górne naroże** o długości 3 [m]; ocios przyległy do zrobów był materiałem porowatym,
- odcinek **chodnika nadścianowego**, w którym mogła znajdować się przegroda, umieszczona w 1/3 szerokości chodnika i sięgająca 1.5 [m] w głąb naroża tak, że pozostawała otwarta przestrzeń o szerokości 1.5 [m],
- **zroby** – obszar prostokątny, bez przeszkód dla przepływu – opowiadało to skrajnej sytuacji, gdy nie nastąpił zawał stropu a penetracja przestrzeni zrobów jest ograniczana jedynie przez uszczelnienia ociosów chodników i płyty sekcji obudowy.

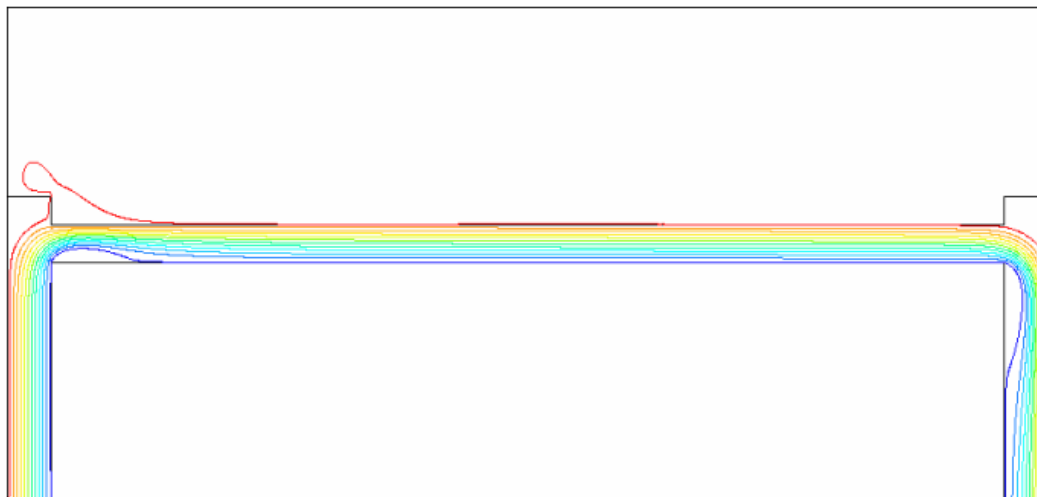
Zastosowano program Fluent w wersji dwuwymiarowej z standardowym modelem turbulencji ($k-\varepsilon$). Zróżnicowana skala obiektu wymagała zastosowania niejednorodnej i niestrukturalnej siatki obliczeniowej. Fragment obejmujący zroby, ścianę w odległości 2 sekcji od wylotu ściany oraz górne naroże z przegrodą pokazano na rysunku 3.



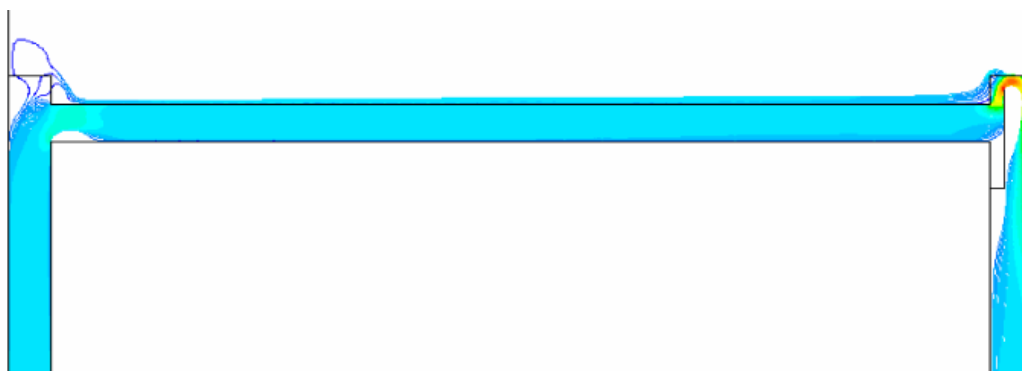
Rys. 3. Fragment siatki obliczeniowej w otoczeniu górnego naroża

Powyższy opis stanowi bardzo grube przybliżenie rzeczywistego obiektu, wynikające z możliwości obliczeniowych ograniczonych przez rozległość obiektu. Dla celów porównawczych pierwsze obliczenia przeprowadzono bez przegrody w górnym narożu. Trajektorie cząstek wypływających z przekroju wlotowego przedstawiono na rysunku 4. Powietrze dopływające chodnikiem podścianowym napotyka przeszkodę w postaci ślepego końca chodnika i zmienia kierunek w dolnym narożu. Siły bezwładności towarzyszącej tej zmianie sprzyjają penetracji zrobów przez powietrze wentylacyjne. Gdy nie ma przegrody w dolnym narożu, to wzdłuż ściany powietrze dopływa ze zrobów. Ślepy koniec chodnika nadścianowego nie jest bezpośrednio penetrowany przez powietrze wentylacyjne. Ewentualna wymiana może następować za pośrednictwem wirów generowanych w narożu.

Kolejny rysunek (Rys. 5) przedstawia analogiczne trajektorie cząstek gdy w górnym narożu znajduje się przegroda. Porównując obrazy trajektorii a także prędkości z jaką powietrze przepływa przez szczeliny



Rys. 4. Trajektorie cząstek wypływających z przekroju wlotowego – przykład bez przegrody



Rys. 5. Trajektorie cząstek wypływających z przekroju wlotowego – przykład z przegrodą.
Kolor trajektorii odpowiada wielkości prędkości przepływu

obudowy dla obu rozpatrywanych przypadków możemy stwierdzić, że obecność przegrody sprzyja migracji świeżego powietrza do zrobów. Dzieje się to na całej długości ściany. Powrót powietrza ze zrobów ma miejsce w górnym narożu.

Dwuwymiarową reprezentację można dalej komplikować przykładowo uwzględniając obecność przenośników, wsporników i kombajnu a także wprowadzając zmienną porowatość i przepuszczalność zrobów oraz wpływ nachylenia wyrobisk poprzez uwzględnienie pola sił masowych.

4. Trójwymiarowe modele rejonu ściany

Powszechnie stosowane oprogramowanie wykorzystujące metodę objętości skończonej umożliwia symulację trójwymiarowych przepływów zarówno w wyrobiskach chodnikowych jak i zrobach ściany. W porównaniu z dwuwymiarową reprezentacją liczba niewiadomych wzrasta proporcjonalnie do ilości węzłów wygenerowanych w obszarze obliczeniowym w kierunku trzeciej osi układu współrzędnych. Wzrost liczby niewiadomych istotnie wydłuża czas obliczeń i nakłada dodatkowe ograniczenia na wielkość obszaru, dokładność odwzorowania szczegółów i liczbę rozpatrywanych wariantów. Stworzenie takiego modelu i prowadzenie symulacji komputerowych wymaga sprzętu o odpowiednio dużej wydajności.

Ograniczenia wynikłe z rozmiaru modelu uzasadniają uproszczenia w reprezentacji obiektu badań. W pierwszym podrozdziale zostanie przedstawiony opis, w którym będzie uwzględniony tylko niewielki fragment zrobów, przyległy do ściany. Model obejmujący całą przestrzeń zrobów zostanie przedstawiony w drugim podrozdziale.

4.1. Trójwymiarowy model rejonu ściany z uproszczoną reprezentacją przyległych zrobów

Rozpatrzmy obszar rejonu ściany i przyległej przestrzeni zrobów, dla którego możemy zbudować model dający jakościowy obraz:

- warunków brzegowych dla wymiany mieszaniny powietrza i metanu przez powierzchnie rozgraniczające obszar zrobów i wyrobisk chodnikowych takie jak obudowa ściany, siatki lub ekrany z płótna wentylacyjnego względnie uszczelnienia obszarów zrobów;
- przepływu powietrza a następnie mieszaniny powietrza i metanu w wyrobiskach chodnikowych samej ściany dolnego i górnego skrzyżowania oraz przyległych fragmentów chodników ścianowych wraz z ewentualnymi przegrodami, modyfikującymi przepływ w narożach.

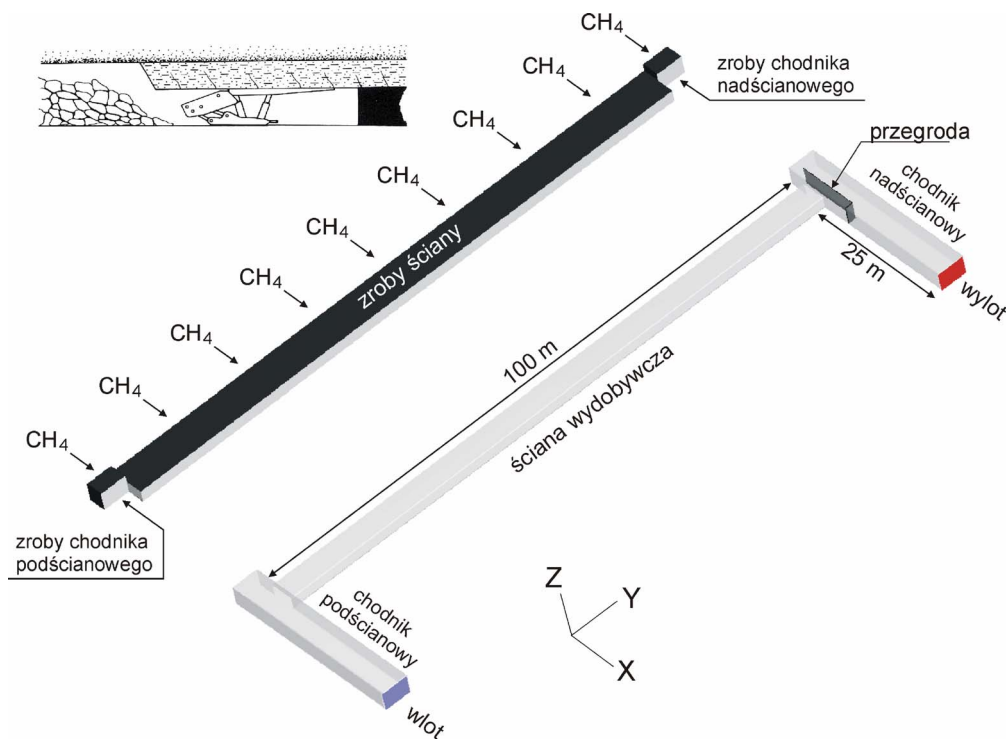
W tym celu stworzono uproszczony model przestrzeni zrobowej. W większości przypadków za obudową ściany pozostaje pusta przestrzeń o wysokości zbliżonej do wysokości wyrobisk. Istnienie takiej przestrzeni zależy od wytrzymałości skał otaczających wybierany pokład węgla i ciśnienia górotworu. Dalej w głąb zrobów, wskutek procesów destrukcji pierwotnej struktury nadległych warstw wysokość zrobów początkowo rośnie a następnie maleje. Przestrzeń zrobów jest coraz szczelniej wypełniona pokruszonymi skałami, tak że obszar ten można uważać za ośrodek porowaty.

Jeśli istnieje taka wolna przestrzeń, to jej rozmiary są porównywalne z rozmiarami kanału ściany. Podobnie jest ze skalą czasową zjawisk przepływowych. Dalej w głąb zrobów rosną opory ruchu, maleją prędkości i wydłuża się czas reakcji przepływu na zmiany warunków.

W prezentowanym modelu starano się możliwie w prosty sposób zadać warunki brzegowe na ociosie ściany i chodników ścianowych. Zrobę reprezentuje objętość porównywalna z objętością kanału ściany. W porównaniu z pełnowymiarowym modelem zrobów uproszczenie to zmniejsza istotnie ilość objętości skończonych, użytych do modelowania przepływu a tym samym skraca czas obliczeń. Najlepiej jest reprezentowana wolna przestrzeń zrobów. Do przestrzeni tej dopływa metan. Można spodziewać się, że natężenie tego dopływu nie jest równomiernie rozłożone na umownej powierzchni oddzielającej od pominiętej reszty zrobów. Dlatego pozostały, pominięty obszar obrazuje objętość o głębokości jednego metra. Z jednej strony do tej objętości dopływa metan, z drugiej jest ona oddzielona od wolnej przestrzeni porowatą przegrodą. Przegroda ma być najprostszym modelem ośrodka porowatego. W przeciwieństwie do warunku dopływu o zadanym, równomiernym natężeniu, lokalny dopływ metanu przez tę powierzchnię zależy od rozkładu ciśnień, które z kolei są kształtowane przez strugi powietrza wentylacyjnego w ścianie. Dla ustalonego przepływu, wydatek przepływu metanu przez przegrodę będzie równy wydajności źródła, choć jego gęstość będzie nierównomierna i możliwy będzie lokalny przepływ skierowany w głąb zrobów.

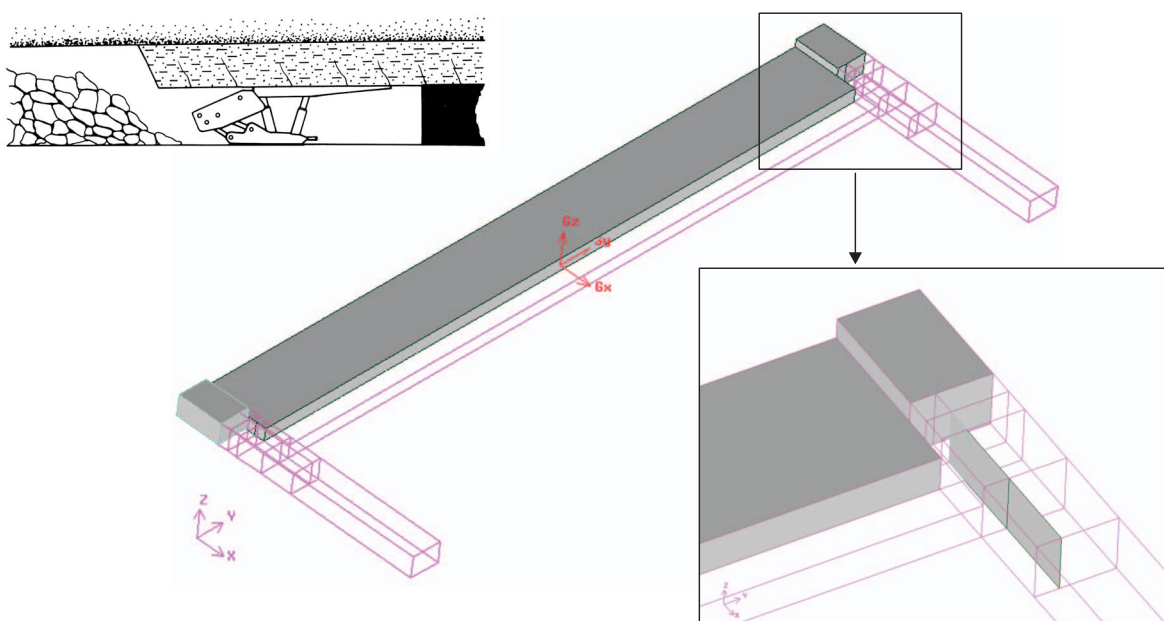
Realizują opisaną tu ideę przyjęto że :

- Ściana jest przewietrzana systemem U od granic – powietrze dopływa chodnikiem podścianowym do skrzyżowania ze ścianą i wnęką (Rys. 6).
- Drugi koniec ściany łączy się z chodnikiem nadścianowym w górnym skrzyżowaniu.
- Uwzględnia się przepływ w przyległej przestrzeni zrobów, w której nie nastąpił zawał ani obniżenie stropu.
- Migrację mieszaniny metanu i powietrza z pominiętego obszaru zrobów reprezentuje dopływ o równomiernym natężeniu masowym ze wszystkich pionowych, równoległych do osi Y powierzchni granicznych uwzględnionej przestrzeni zrobów, a modelowana pusta przestrzeń zrobów jest wystarczająca do wygenerowania realnego rozkładu prędkości i stężeń na granicy zrobów i chodników. Pełną kontrolę nad ilością dopływającego gazu zapewniono wyłączając transport dyfuzyjny na powierzchni dopływu. W odległości 1 [m] od dopływu przestrzeń zrobów podzielono porowatą przegrodą o równomiernym oporze. Wyodrębniona w ten sposób objętość nazywana będzie źródłem metanu.
- Wyrobisko ścianowe, chodniki i wnęki mają stały przekrój prostokątny.
- Szerokość chodników wynosiła 4.6 [m]; wysokość (3.2 [m]) dobrano tak, aby pole prostokątnego przekroju odpowiadało polu obudowy łukowej o tej rozpiętości.
- W przekroju wlotowym chodnika podścianowego zadano stałą wartość prędkości (płaski, równomierny profil).
- Odcinki chodników miały długość 25 [m], liczoną od calizny węglowej do odpowiednio wlotu lub wylotu. Uznano, że taka długość wystarczy do rozwinięcia się profilu prędkości na wlocie i ustalenia rozkładu stężeń w przekrojach wylotowych.
- Model ściany miał długość 100 [m], wysokość 2 [m] i szerokość 4 [m] natomiast przestrzeń zrobowa miała szerokość 5 [m] i tą samą długość i wysokość jak ściana.



Rys. 6. Widok modelu rejonu ściany, obszar zrobów zacieniowany

- Głębokość wnek naroży wynosiła 3 [m]. Obszar zrobów chodników miał przekrój taki jak chodniki i sięgał tak daleko, jak zrobysciany.
- Granicę między zrobami i chodnikami modelowano jako przegrodę porowatą charakteryzującą się kwadratową zależnością między różnicą ciśnień i natężeniem przecieków.
- Zastosowano siatkę sześcienną, strukturalną.
- Budując siatkę do obliczeń numerycznych przewidziano obecność przegród o szerokości 1.4 [m] (t.j. ok. 1/3 szerokości chodnika), sięgających 1.5 [m] w głąb wnęki i 5 [m] poza skrzyżowanie ze ścianą. Pozostawały one przeswit o szerokości 1.5 [m]. W pierwszych obliczeniach obecność przegród pominięto (Rys. 7).



Rys. 7. Widok górnego naroża i skrzyżowania, zacieniowana przegroda i obszar zrobów

- Zastosowano modele turbulencji $k-\varepsilon$ i $k-\omega SST$.
- Rozpatrywano nieustalony, izotermiczny przepływ mieszających się płynów nieściśliwych.

Warunki brzegowe dobierano tak aby:

- Średnia prędkość na wlocie do ściany wynosiła 2 [m/s], przy braku ucieczek do zrobów
- Wydatek masowy metanu dopływającego z powierzchni granicznej zrobów stanowił około 1.1% powietrza dopływającego chodnikiem podścianowym

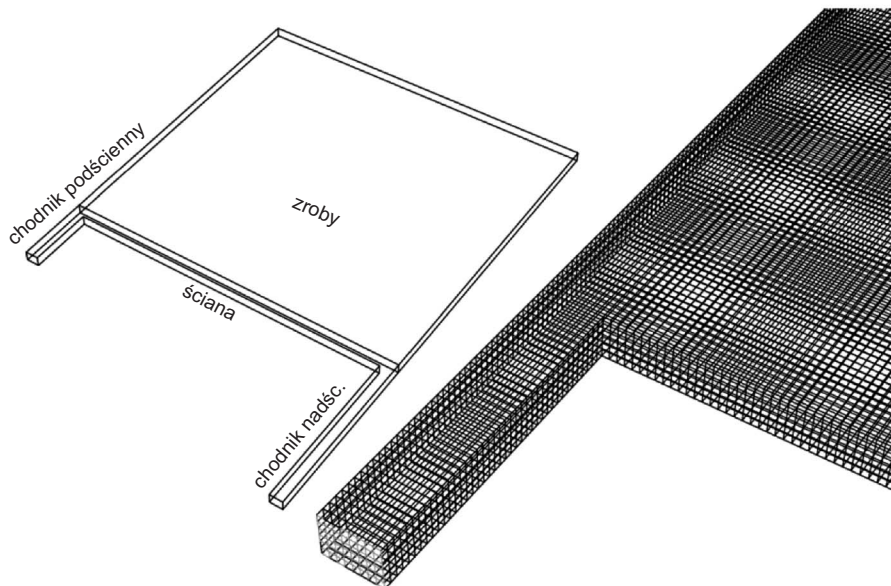
Modyfikacje podstawowego opisu.

Rozpatrywano również zmodyfikowane wersje modelu, opisanego w niniejszym rozdziale. Zmiany te dotyczyły:

- siatki o rozmiarze 0.1 [m], dla oceny wrażliwości rozwiązania na rozmiar siatki,
- siatki zagęszczonej przy ścianach, spełniającej warunek $Y^+ \leq 300$,
- chodników pod i nadścianowego o kształcie odpowiadającym obudowie łukowej – ich przekrój był kołowy o średnicy 5 [m], ścięty 1 [m] poniżej środka przekroju,
- kanału ściany w kształcie pięciokąta (dla zachowania pola powierzchni zwiększono wysokość do 2.1 [m]),
- chodnika nadścianowego wydłużonego do 100 [m], dla uzyskania równomiernego profilu prędkości.

4.2. Trójwymiarowy model rejonu ściany i zrobów

Metoda objętości skończonej pozwala na rozpatrywanie przepływu filtracyjnego całym obszarze zrobów. W pracy Skotnicznego (2008) użyto trójwymiarowej sześcienniej siatki zarówno dla wyrobisk chodnikowych jak i zrobów. Odpowiednio dla zrobów użyto modelu ośrodka porowatego, w którym następuje przepływ filtracyjny, zaś w wyrobiskach chodnikowych turbulentny (model $k-\omega SST$). Rozpatrywano zjawisko samozagrzewania się węgla a w szczególności nieizotermiczną migrację tlenu węgla. Pozytywne wyniki tych symulacji wskazują na możliwość wykorzystania podobnego modelu dla analizy migracji metanu



Rys. 8. Widok obszaru obliczeniowego i siatki

5. Podsumowanie

Przeprowadzenie symulacji migracji metanu dla dwu i trójwymiarowych modelach rejonu ściany i zrobów metodą objętości skończonej może stanowić istotny element weryfikacji i walidacji programu VentZroby. Porównanie z wynikami symulacji uzyskanymi dla modeli dwuwymiarowych będą przydatne szczególnie do weryfikacji modelu numerycznego programu. Trójwymiarowe symulacje są znacznie bardziej pracochłonne, jednak dają pełniejszy obraz procesu migracji metanu. Dla obu przybliżeń uzyskujemy dane niemożliwe do uzyskania przy pomocy pomiarów in situ. Wiedza o polach stężeń, ciśnień i prędkości może też być użyteczna dla interpretacji danych pomiarowych i planowania dalszych eksperymentów.

Realizacja porównań wymaga dopasowanie istniejących modeli względnie stworzenie nowej rodziny jedno, dwu i trójwymiarowych modeli w oparciu o dotychczasowe doświadczenia.

Praca została wykonana w roku 2009 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

6. Literatura

1. Balusu R., Humpries P., Harrington P., Wendt M., Xue S., 2002: *Optimum Inertisation Strategies*, Proceedings of Queensland Mining Industry Health & Safety Conference, Townsville, Australia 4-7 August 2002, pp. 133-144.
2. Balusu R., Chaudari S., Harvey T., Ren T., 2005: *An Investigation of Air and Dust Flow Patterns Around the Longwall Shearer*, Proceedings of the 8th International Mine Ventilation Congress, Brisbane Australia, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 135-142.
3. Branny M., 2006: *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.
4. Brady D., Harrison P., Bell, S. 2009: *20 Years of Onsite Gas Chromatographs at Queensland Underground Coal Mines*, Proceedings of the Ninth International Mine ventilation Congress, India, pp. 987-998.
5. Cimr A., Wasilewski S., Przystolik A., 2006: *Możliwości oceny stanu atmosfery w zrobach z wykorzystaniem metanometrii automatycznej*, Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej, Kraków, str. 509-518.
6. Cybulski K., Krause E., Wierzbiński K., 2008: *Modelling of methane concentration distribution in region of ventilation roadway crossing with longwall*, Proc. of the 21st World Mining Congress, Underground Mine Environment, pp. 29-40.
7. Dziurzyński W., Krach A., Krawczyk J., Pałka T., 2008: *The flow of humid air in the ventilation network of a mine with an underground fire*, Arch. Min. Sci., Monogr. No 4, pp. 112.
8. Dziurzyński W., Pałka T.: *Rozpływ powietrza, metanu i gazów pożarowych w rejonie ściany F-22 pokład 405/1 w KWK Borynia przed wybuchem metanu*, Materiały 5 Szkoły Aerologii Górniczej, Wrocław, s. 19-32.
9. Karacan C.Ö.: *Reservoir Engineering Considerations for Coal Seam Degasification and Methane Control in Underground Coal Mines*, Proceedings of the Ninth International Mine ventilation Congress, India, pp. 505-516.
10. Krawczyk J., Wasilewski S., 2009: *Migration of Methane into Longwall and Tailgate Crossing*, Proceedings of the Ninth International Mine ventilation Congress, India, pp. 483-493.
11. Skotniczny S., 2008: *Three-dimensional Distribution of Temperature and Gas Concentration in Longwall Drifts Accompanying the Phenomenon of Self-combustion of Coal Deposited in Longwall Goaf*, Archives of Mining Sciences, Vol. 53, Issue 2, pp. 235-255.
12. Szlajak J., Szlajak N., Obracaj D., Borowski M.: *Method of Determination of Methane Concentration in Goaf*, Proceedings of the Ninth International Mine ventilation Congress, India, pp. 533-544.
13. Tauzide C., Mouilleau Y., Bonet R., 1993: *Modelling of gas flows in the goaf of retreating faces*, 25th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, Pretoria, South Africa.

An overview of selected 2 and 3D numerical models of flow in the goaf regions

Abstract

The face area with the adjoining goafs displays a structural complexity and that is why computer modelling of air flow in the mine and methane migration in this area has to resort to simplified models. Road headings are frequently represented by simple 1D models, in the case of goaf a 2D model is typically chosen. Such representation is made use of in the software VentZroby. This study summarises the early stage of its verification and validation

efforts through the comparison with a more accurate 3D description. The study provides a summary of methods of 1D and 2D representation of road headings and goaf areas. 2D simulation by the finite volume method can be directly applied in verification of goaf models wherein this area is represented by the grid of 1D flow branches. Two variants of 3D representation are considered, differing in the complexity of the goaf model. In the simpler model, the system of porous partitions and equivalent volumes is used only for setting the boundary conditions during the methane inflow to the longwall and gates. In the fuller version, the seepage flow is considered in a cuboidal volume whose dimensions are identical with those of real goaf. Thus formulated domains might be used in computer simulations of mine air and methane flow in the longwall region.

Keywords: methane migration, finite volume method, 3D representation, computational grid