

Model emisji metanu pochodzącego z urobku w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego

MIROSLAW WIERZBICKI, NORBERT SKOCZYLAS, MATEUSZ KUDASIK, TOMASZ MURZYN

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

Streszczenie

Na bazie modelu uniporowego opracowany został algorytm symulujący emisję metanu z urobku w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego. Opracowany model opiera się na wielu założeniach, z których jednym z najważniejszych jest opis uwalniania metanu z węgla równaniem nawiązującym do drugiego prawa Ficka. Ponadto zbudowany model uwzględnia krzywą składu ziarnowego urobku ze ściany. Do przeprowadzania symulacji emisji metanu z urobku węglowego w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego zbudowane zostało oprogramowanie „Ściana – CH₄”, umożliwiające zmianę wszystkich parametrów modelu oraz kalkulację na bazie zdefiniowanych równań i założeń modelu.

Słowa kluczowe: emisja metanu, prognoza metanowa, zagrożenie metanowe, metanonośność

1. Wprowadzenie

Zgodnie z corocznym raportem o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego wydawanym przez GIG [GIG, 2015] wydobywanie węgla kamiennego w Polsce w roku 2014 wynosiło 72 514 tys. Mg a metanowość bezwzględna kopalń węgla kamiennego wynosiła 891.1mln m³CH₄/rok. Dane pozwalają na wyznaczenie metanowości względnej kopalń, która wynosiła 12.3m³ CH₄/Mg. W latach 2009-2014 miało miejsce 18 zdarzeń związanych z zapaleniem lub wybuchem metanu, w wyniku których zginęło 25 górników, 40 doznało ciężkich, a 31 lekkich obrażeń ciała. Zapalenie metanu wymienione zostało jako pierwsza, wśród głównych przyczyn wypadków śmiertelnych i ciężkich w 2014 r. w górnictwie. W 2014 r. w kopalniach węgla kamiennego zaistniały 4 zdarzenia związane z zapaleniami metanu w wyrobiskach górniczych. W wyniku zapalenia metanu w KWK „Mysłowice-Wesoła” Ruch Wesoła 5 pracowników uległo wypadkom śmiertelnym, 15 ciężkim, a 10 lekkim. Pozostałe zdarzenia nie spowodowały żadnych wypadków.

Jedną z podstawowych metod oceny potencjalnego zagrożenia metanowego w wyrobiskach ścianowych jest rzetelna prognoza metanowa, oparta na wiedzy i doświadczeniu. Pozwala ona na dobranie aktywnej i pasywnej profilaktyki metanowej [Skoczylas i Wierzbicki, 2014; Skoczylas, 2014]. Na sumę metanu dopływającego do wyrobiska eksploatacyjnych składa się metan pochodzący z calizny węglowej, pokładów niżej i wyżej leżących, ze zrobów oraz z urobku znajdującego się w ścianie. Udział poszczególnych składników sumy metanu dopływającego do wyrobiska eksploatacyjnego jest zależny od wielu czynników, takich jak:

- geometria ściany,
- metanonośność pokładu,
- sposób wentylacji,
- budowa skał otaczających eksploatowany pokład ze szczególnym uwzględnieniem pokładów sąsiednich,
- własności układu węgiel-metan,
- parametrów wytrzymałościowych węgla,

- sposób urabiania,
- prowadzone odmetanowanie pokładu i inne.

W niniejszym opracowaniu zajmujemy się wyłącznie metanem dopływającym do wyrobiska ścianowego z urobku powstałego w procesie urabiania. Urabianie węgla polega na niszczeniu jego struktury i rozdrobnieniu na mniejsze fragmenty celem jego wytransportowania na powierzchnię. W wyniku urabiania otrzymujemy w ścianie urobek o określonej granulacji. Granulacja ta jest niezwykle ważna gdyż Ilość metanu uwolnionego w określonym przedziale czasowym z ziarn węgla zależna jest od kwadratu rozmiaru promieni zastępczych ziarn reprezentujących poszczególne klasy ziarnowe [Skoczylas, 2015a]. Znajac model opisujący kinetykę uwalniania metanu z węgla, metanonośność pokładu, pojemność sorpcyjną węgla, współczynnik dyfuzji węgla oraz krzywą składu ziarnowego urobku, obliczyć można objętość metanu jaka zostanie uwolniona z urobku w funkcji czasu. Zdanie to można potraktować jako tezę przedstawionej pracy.

W analizie ilości metanu uwolnionego z urobku, na potrzeby niniejszej pracy przyjęto następujące założenia:

- kombajn ścianowy oraz przenośnik ścianowy przemieszczają się w wyrobisku ścianowym ze stałymi, znanymi zwrotami oraz prędkościami posuwu,
- w momencie „urobienia” fragmentu ściany następuje skokowa zmiana ciśnienia metanu ze złożowego ciśnienia równowagowego w pokładzie do ciśnienia atmosfery kopalnianej,
- ziarna węgla utworzone w wyniku urabiania pokładu mają kształt kulisty,
- granulometria urobku na całej długości ściany jest znana i stała,
- uwalnianie metanu z węgla opisane może być równaniem będącym rozwiązaniem drugiego prawa modelu uniporowego,
- znane są własności sorpcyjne węgla w temperaturze złożowej, takie jak:
- metanonośność,
- pojemność sorpcyjna przy ciśnieniu barycznym,
- izoterma sorpcji metanu na węglu,
- współczynnik dyfuzji
- własności sorpcyjne są niezmiennie w analizowanym cyklu produkcyjnym,
- wszystkie procesy mają charakter izotermiczny.

Doświadczenia IMG PAN w badaniu zjawisk zachodzących w układzie węgiel-metan, pozwalają na określenie wpływu takich czynników jak temperatura złożowa pokładu, skład macerałowy, wilgotność węgla, na jego pojemność sorpcyjną oraz własności kinetyczne przebiegu akumulacji oraz emisji metanu z węgla [Wierzbicki, 2013a].

Kwestia oceny ilości metanu pojawia się w pracy Klebanowa [1974]. Szerszą analizę podejmuje Koptoń (2009), stosuje jednak dwa istotne uproszczenia modelu emisji metanu Cranka – zaniedbuje wyższe wyrazy rozwinięcia w szereg będącego analitycznym rozwiązaniem drugiego prawa Ficka z czynnikiem sorpcji oraz przyjmuje tylko jeden promień zastępczy reprezentujący cały urobek. Dziurzyński i inni (2001) w szerszym opracowaniu uwzględniającym wszystkie drogi dopływu metanu do wyrobiska, uwzględniają czynnik pochodzący z urobku stosując rozwiązanie Tarasowa i Kołmakowa [1978].

2. Podstawy fizyczne modelu emisji metanu z urobku w trakcie wybierania ściany

W pracy opracowano emisję metanu z urabianego węgla w trakcie prowadzenia eksploatacji ściany. Przyjęto, że podobnie jak w przypadku dyfuzji ditlenku węgla, jedynym mechanizmem emisji metanu jest dyfuzja z urabianych fragmentów węgla [Gawor i Skoczylas, 2014]. Wykorzystano uniporowy model dyfuzji, który wywodzi się z II prawa Ficka:

$$\frac{\partial c(r,t)}{\partial t} = \frac{D}{1+H} \nabla^2 c(r,t) = D_e \nabla^2 c(r,t) \quad (1)$$

gdzie:

- c [mol/m³] – stężenie substancji,
- t [s] – czas,

- D [m²/s] – współczynnik dyfuzji,
- D_e [cm²/s] – efektywny współczynnik dyfuzji $D_e = \frac{D}{1+H}$,
- H [mol/g·bar] – współczynnik nachylenia w izotermie sorpcji Henry’ego (2.3),
- r [cm] – odległość od środka ziarna.

Uwzględniając szereg założeń, dotyczących między innymi: kulistością ziarn, liniowości izoterm sorpcji oraz skokowej zmiany ciśnienia, traktowanej jako czynnik rozpoczynający proces, przepływ gazu odbywa się promieniście, Crank podał rozwiązanie analityczne równania (1) [Wierzbicki, Skoczylas, 2010] w postaci rozwinięcia w szereg:

$$m(t) = \frac{6M}{\pi^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_e t}{R^2}\right) \right) \tag{2}$$

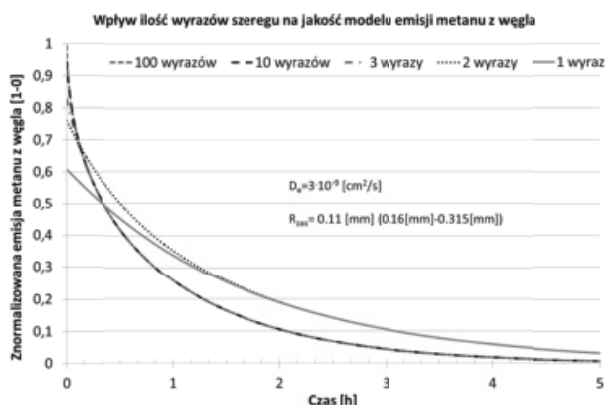
gdzie:

- M [g] – jest całkowitą masą zdeponowanego gazu w ziarnach,
- $m(t)$ [g] – jest masą gazu zdeponowanego w danej chwili t ,
- R [cm] – jest zastępczym promieniem ziarna – dla próbki o rozpatrywanej klasie ziarnowej wyznaczany z zależności:

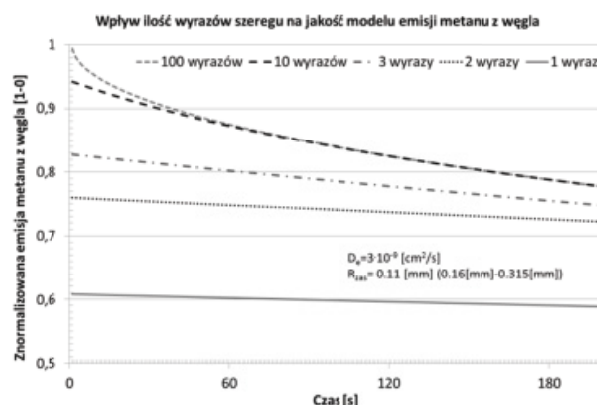
$$R = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{2 \cdot d_1^2 \cdot d_2^2}{d_1 + d_2}} \tag{3}$$

gdzie: d_1 i d_2 to średnice ziarn badanej klasy ziarnowej.

Badania modelowe wykazują, iż wykorzystanie pojedynczej funkcji eksponencjalnej daje satysfakcjonujące odwzorowanie rzeczywistych przebiegów emisji metanu tylko w jego końcowym fragmencie. Biorąc pod uwagę najczęstsze rozmiary wyrobisk ścianowych oraz prędkości kombajnu i przenośnika, urobiony węgiel pozostaje w obszarze ściany maksymalnie kilka minut. Dla typowych wartości efektywnego współczynnika dyfuzji metanu w węgla dla GZW, będziemy mieli do czynienia z analizą początkowej fazy emisji metanu, której właściwe opisanie wymaga uwzględnienia minimalnie kilkunastu wyrazów szeregu (1) (Rys. 1), a w przypadku gdy interesują nas także pierwsze sekundy emisji, wyrazów powinno być kilkadziesiąt (Rys. 2).

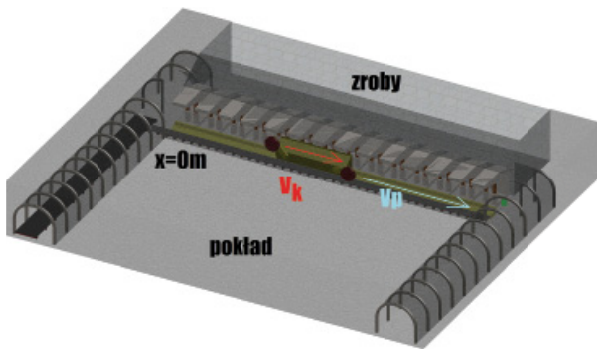


Rys. 1. Wpływ ilości wyrazów szeregu będącego rozwiązaniem modelu uniporowego na jakość modelu emisji metanu z węgla

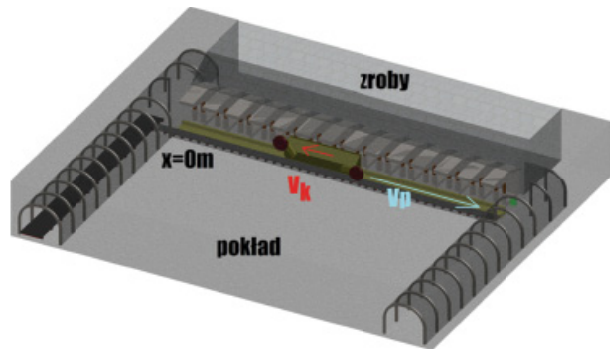


Rys. 2. Pierwsze 200 sekund przebiegu emisji metanu z węgla opisane modelem uniporowym przy różnej ilości wyrazów szeregu

Symulacja emisji zakłada analizę pojedynczego przejazdu kombajnu ścianowego. W chwili $t_0 = 0$ s przenośnik pozostaje pusty, a kombajn wyrusza z położenia $x_0 = 0$ m. Koniec symulacji odpowiada chwili czasu, gdy kombajn pokonał całą długość ściany, a cały urobek na przenośniku opuścił obszar ściany. Możliwa jest analiza przypadku, gdy kombajn porusza się w kierunku zgodnym z przenośnikiem (Rys. 3), bądź do niego przeciwnym (Rys. 4), zmieniając położenie od ostatniego metra ściany do $x_0 = 0$ m.



Rys. 3. Zgodny zwrot wektora prędkości kombajnu i przenośnika



Rys. 4. Przeciwny zwrot wektora prędkości kombajnu i przenośnika

Dyskretyzacja przestrzenna zakłada rozdzielczość 1 m, natomiast czasowa 1 s. Chwilowa pozycja kombajnu wyliczana jest na bazie równania ruchu jednostajnego, jako iloczyn prędkości kombajnu i czasu. Co sekundę algorytm dodaje nowy fragment urobku w pozycji startowej, odpowiadającej bieżącej pozycji kombajnu, który będzie przemieszczał się na przenośniku ścianowym. Każdy taki fragment emituje metan zgodnie z rozwiązaniem modelu uniporowego (2), przy czym czas początku dyfuzji określa moment jego odspojenia od górotworu, natomiast pozycja jest sumą pozycji kombajnu w momencie odspojenia oraz iloczynu prędkości przenośnika i czasu liczonego od odspojenia. Co sekundę w wyliczonych pozycjach od każdego odspojonego kawałka dodawana jest porcja metanu wyznaczona na bazie modelu.

Model umożliwia prowadzenie symulacji emisji metanu z n klas ziarnowych węgla, przy czym emisja metanu wyliczana jest z równania:

$$m(t) = M \sum_{i=1}^n [u_i m(t, R_i)] \quad (4)$$

gdzie:

- $m(t)$ [m^3CH_4] – to całkowita emisja metanu w chwili t ,
- R_i [cm] – to zastępcze promienie ziarn (3), reprezentujące poszczególne klasy ziarnowe,
- u_i – to udziały procentowe poszczególnych klas ziarnowych.

Dużą złożoność obliczeniową algorytmu o charakterze iteracyjnym determinują wielokrotnie zagnieżdżone pętle liczące rozwiązanie modelu uniporowego (wartość emisji w danym czasie) jako sumę szeregu (2) o 100 wyrazach, przy 10 klasach ziarnowych z udziałem ważonym. Dla typowych geometrii ściany oraz prędkości kombajnu i przenośnika czas dyskretyzowany jest na kilka tysięcy sekund.

3. Opis programu „Ściana – CH4”

Do przeprowadzania symulacji emisji metanu z urobku węglowego w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego zbudowane zostało oprogramowanie „Ściana – CH4”, umożliwiające zmianę wszystkich parametrów modelu oraz kalkulację na bazie zdefiniowanych równań i założeń modelu. Program komputerowy „Ściana – CH4” powstał w narzędziu programistycznym Codegear C++ Builder 2009. Codegear C++ Builder to narzędzie programistyczne typu RAD (ang. *Rapid Application Development*) do tworzenia aplikacji w języku C++, umożliwiające budowanie, między innymi, okienkowych programów działających w różnych systemach operacyjnych (między innymi Windows, Linux, itp.) Zbudowane oprogramowanie „Ściana – CH4” dedykowane jest do pracy w środowisku Windows.

Okno główne programu „Ściana – CH4” podzielone zostało na trzy panele operacyjne (Rys. 5):

- Panel definiowania parametrów wejściowych do modelu – za pomocą którego możliwe jest zdefiniowanie takich wielkości jak:
 - długość ściany – w zakresie 100-300 m,
 - miąższość – w zakresie 1-4 m,
 - zabiór – w zakresie 0.5-1.5 m,
 - prędkość kombajnu – w zakresie 0.02-0.24 m/s,

- prędkość przenośnika – w zakresie 0.5-4.0 m/s,
- kierunek urabiania – jako „zgodny z przenośnikiem” lub „przeciwny do przenośnika”;
- metanonośność – w zakresie 1.0-16.0 m³/Mg,
- pojemność sorpcyjna – w zakresie 0.2-4.0 cm³/g,
- efektywny współczynnik dyfuzji – w zakresie 0.1-10·10⁻⁹ cm²/s,
- ilość klas ziarnowych – w zakresie 1-10,
- wielkość i udział poszczególnych klas ziarnowych.

Po zdefiniowaniu powyższych parametrów i kliknięciu przycisku „Oblicz emisję CH₄” program rozpocznie kalkulację, co w zależności od mocy obliczeniowej komputera może potrwać do kilkunastu sekund.

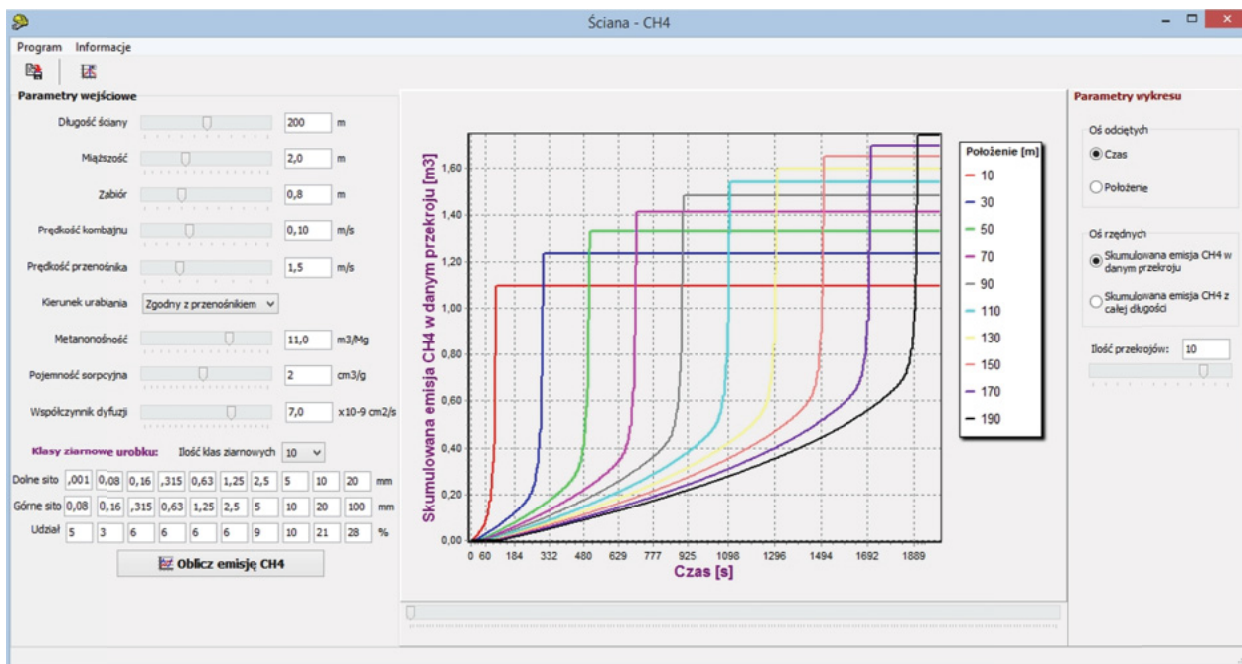
- Panel wykresu – w którym prezentowane są wyniki obliczeń emisji CH₄ dla zdefiniowanych parametrów wejściowych.
- Panel zmian parametrów osi wykresów – umożliwia zmianę prezentacji wyników na wykresie. Możliwa jest zmiana parametrów na osiach:
 - odciętych – czas lub położenie,
 - rzędnych – skumulowana emisja CH₄ z urobku w danym przekroju lub skumulowana emisja CH₄ z urobku z całej długości ściany.

W panelu zmian parametrów osi możliwe jest również określenie ilości przekrojów danych (od 1 do 12) prezentowanych na wykresie emisji CH₄ w funkcji czasu lub położenia. W przypadku wyboru kilku przekrojów, program automatycznie ustali ich równomierne rozmieszczenie. W przypadku wyboru jednego przekroju można określić dowolne jego położenia, co umożliwia „suwak” znajdujący się pod wykresem.

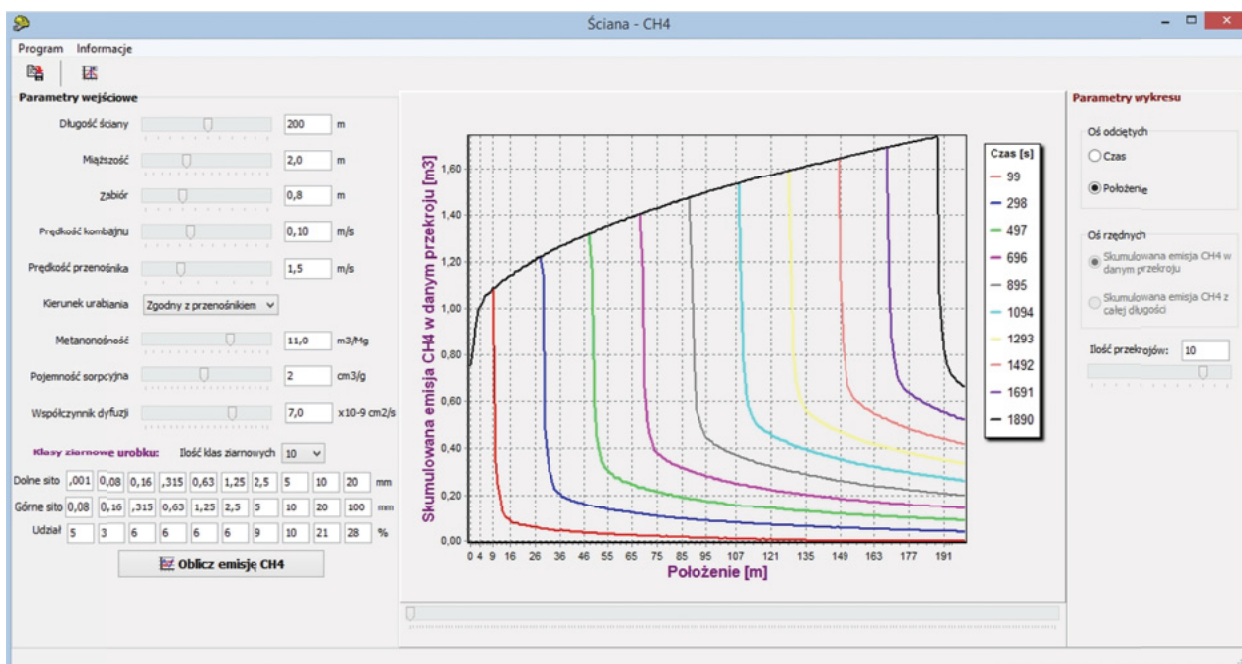
Przykład analizy emisji CH₄ z urobku węglowego ze ściany przeprowadzony za pomocą zbudowanego oprogramowania został przedstawiony na rys. 6-8. Przedstawione wyniki dotyczą kalkulacji emisji metanu ze ściany na podstawie zbudowanego modelu i zostały one wygenerowane dla tych samych parametrów wejściowych. Wykresy prezentują skumulowaną emisję CH₄ w funkcji czasu i w funkcji położenia w 10 różnych przekrojach oraz skumulowaną emisję CH₄ w funkcji czasu wykalkulowaną dla całej długości ściany.



Rys. 5. Okno główne programu „Ściana – CH₄” z zaznaczonymi panelami operacyjnymi użytkownika

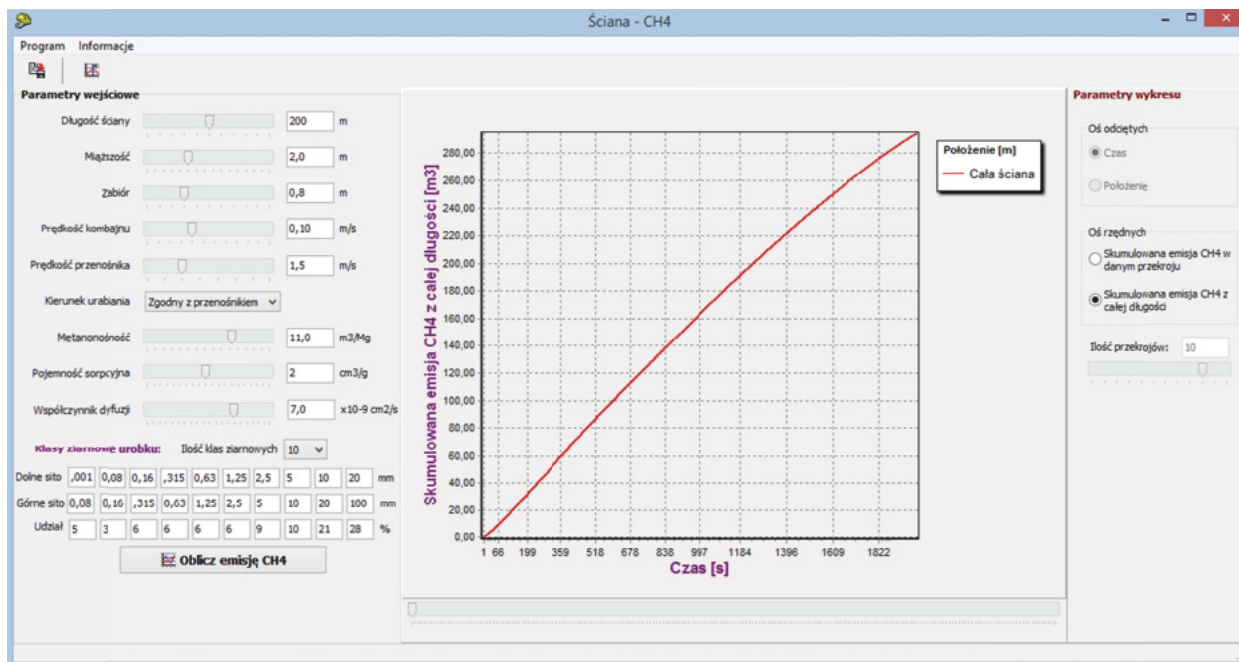


Rys. 6. Przykładowe wyniki analizy emisji CH₄ z urobku w funkcji czasu



Rys. 7. Przykładowe wyniki analizy emisji CH₄ z urobku w funkcji

Oprócz możliwości zmiany wielu parametrów kalkulacji emisji CH₄ ze ściany oraz możliwości zautomatyzowanej prezentacji na wykresie danych modelowych, program umożliwia również zapis wyników do pliku tekstowego.



Rys. 8. Przykładowe wyniki analizy emisji CH₄ z urobku dla całej ściany w funkcji czasu

4. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano model emisji metanu z urobku węglowego w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego. Opracowany model opiera się na wielu założeniach, z których jednym z najistotniejszych jest opis uwalniania metanu z węgla równaniem nawiązującym do drugiego prawa Ficka. Ponadto zbudowany model uwzględnia krzywą składu ziarnowego urobku ze ściany. Do przeprowadzania symulacji emisji metanu z urobku węglowego w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego zbudowane zostało oprogramowanie „Ściana – CH₄”, umożliwiające zmianę wszystkich parametrów modelu oraz kalkulację na bazie zdefiniowanych równań i założeń modelu.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., 2001: *Prognozowanie rozkładu stężenia metanu w sieci wentylacyjnej z uwzględnieniem systemu monitoringu*. Prace IMG PAN, T. 3, Nr 2, s. 163-182.
- Gawor M., Skoczylas N., 2014: *Sorption Rate of Carbon Dioxide on Coal*. Transport in Porous Media, Vol. 101, Issue 2, p. 269-279.
- GIG, 2015: *Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego 2014*. Katowice.
- Koptoń H., 2009: *Metoda prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drążonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego*, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, 3/2009.
- Koptoń H., 2011: *Model matematyczny prognozy wydzielania się metanu do przekopu przecinającego pokład węgla*. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, 4/2011.
- Skoczylas N., 2014: *Estimating gas and rock outburst risk on the basis of knowledge and experience - the expert system based on fuzzy logic*. Arch. Min. Sci., Vol. 59, No 1, p. 41-52.
- Skoczylas N., 2015a: *Analyzing the parameters of the coal-gas system by means of a low-cost device based on a flow meter*. Adsorption Science & Technology, Issue 9.
- Skoczylas N., Wierzbicki M., 2014: *Evaluation and Management of the Gas and Rock Outburst Hazard in the Light of International Legal Regulations*. Arch. Min. Sci., Vol. 59, No 4, p. 1119-1129.

- Skoczylas N., Wierzbicki M., 2015: *Uwalnianie metanu z prób węglowych – fizyka zjawiska i metoda pomiarowa*. Prace IMG PAN, Tom 17, nr 1-2, s. 81-86.
- Tarasow B.G., Kołmakow B.A., 1978: *Gazowyj barier ugołnych szacht*. Izdatielstwo „Niedra”, Moskwa.
- Wierzbicki M., 2013a: *Changes in the sorption/diffusion kinetics of a coal-methane system caused by different temperatures and pressures*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 29, Zeszyt 4.
- Wierzbicki M., 2013b: *The effect of temperature on the sorption properties of coal from Upper Silesian coal basin, Poland*. Arch. Min. Sci., Vol. 58, No 4, p. 1163-1176.
- Wierzbicki M., Skoczylas N., 2010: *Wybrane sposoby określania efektywnego współczynnika dyfuzji na podstawie przebiegów kinetyki nasycania/uwalniania gazu z próbki węglowej*. Prace IMG PAN, Tom 12, Nr 1-4, s. 43-50.

Methane emission model derived from hard coal during longwall excavation

Abstract

Based on the unipore model the algorithm simulating methane emissions released from hard coal during the longwall excavation has been developed. The model is based on numerous assumptions, of which the most important is the Fick's second law description of methane released from coal. In addition, the created model takes into account the curve of particle-size distribution from the longwall excavation. For the simulation of methane emissions from the coal output during the longwall excavation the software "Longwall - CH₄" has been developed. The software enables the users to change all the parameters of the model and to make calculations based on the defined equations and assumptions of the model.

Keywords: methane emissions, methane hazard, methane content