Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN
Tom 6, nr 3-4, (2004), s. 131-142

Weryfikacja modelu matematycznego wydzielania metanu w rejonie ściany z uwzględnieniem zmian ciśnienia atmosferycznego

Wacław Dziurzyński, Andrzej Krach, Jerzy Krawczyk, Teresa Pałka

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono model zrobów, umożliwiający modyfikację programu komputerowego VentZroby, opracowanego w IMG PAN i służącego do prognozowania rozpływu powietrza i rozkładu stężenia metanu w kopalnianej sieci wentylacyjnej ze zrobami tak, aby program ten uwzględniał w prognozie wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na stężenie metanu w sieci wentylacyjnej kopalni spowodowany zjawiskiem tzw. oddychania zrobów. W rozdziale 3 podano w skrócie opis modelu zastosowanego do wyznaczania przepływu mieszaniny gazów w zrobach w programie VentZroby. W rozdziale 4 przedstawiono podstawowe zależności dla zmodyfikowanego modelu zrobów, uwzględniającego zmiany ciśnienia barometrycznego i ich wpływ na gęstość mieszaniny metanu i powietrza w zrobach, traktowanej jako płyn ściśliwy. Algorytm obliczeń numerycznych dla tego modelu zamieszczono w rozdziale 5, a w rozdziale 6 przedstawiono weryfikację numeryczną tego algorytmu. Weryfikacja przedstawionego algorytmu wymagała opracowania testowego programu komputerowego dla sprawdzenia zbieżności procedury iteracyjnej wyznaczania rozkładu ciśnień w węzłach sieci bocznic modelującej zroby. Wykonana weryfikacja modelu matematycznego zrobów z uwzględnieniem zmian ciśnienia barometrycznego z zastosowaniem programu testowego „ZROBY" wykazała zbieżność procedury iteracyjnej, stosowanej w algorytmie obliczeniowym i potwierdziła celowość prowadzenia dalszych prac nad zastosowaniem tego modelu w programach numerycznego modelowania kopalnianych sieci wentylacyjnych ze zrobami.

Słowa kluczowe: wentylacja kopalń, stężenie metanu, zroby, ciśnienie barometryczne, sieć wentylacyjna

1. „Oddychanie" zrobów

W kopalniach metanowych obserwuje się zmiany stężenia metanu w wyrobiskach sąsiadujących ze zrobami, towarzyszące zmianom ciśnienia barometrycznego, spowodowanym zmianą lokalnych oporów w sieci wentylacyjnej lub zmianami ciśnienia atmosferycznego na powierzchni. Zjawisko to, znane również pod nazwą oddychania zrobów, ważne ze względu na zagrożenie metanowe kopalni, było i nadal jest przedmiotem licznych prac badawczych, zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych. Wymienić tu należy pracę W. Trutwina [1973], w której autor sformułował model zjawiska, opisując własności modelowanego obiektu za pomocą stałych skupionych i następnie zweryfikował ten model z St. Gumułą [1977] wykonując szereg pomiarów na modelu fizycznym. Pomiary na obiekcie rzeczywistym, w rejonie ściany przyległej do zrobów, wykonał S. Wasilewski [1998]. Dane pomiarowe posłużyły do określenia parametrów modelu i następnie do porównanie zmierzonych i obliczonych przebiegów stężenia metanu. Inne podejście do zagadnienia zaprezentowali w swojej pracy Z. Kajdasz, P. Markefka i T. Stefanowicz [2002], proponując likwidację zagrożenia metanowego w wyrobiskach sąsiadujących z otamowanymi zrobami i związanego ze zmianami ciśnienia barometrycznego, przez odpowiednio regulowane wtłaczanie gazu inertnego do otamowanej przestrzeni.

2. Modelowanie komputerowe wentylacji kopalń

Równolegle z pracami, dotyczącymi modelowania zjawiska oddychania zrobów, postępowały prace nad modelowaniem sieci wentylacyjnej kopalni i zastosowaniem tych modeli w obliczeniach komputerowych dla prognozowania rozpływu powietrza i gazów szkodliwych, emitowanych do sieci wentylacyjnej w wyniku pożaru lub wyrzutu. W tej dziedzinie należy wymienić prace W. Trutwina, W. Dziurzyńskiego i J. Tracza [1972, 1985, 1987]. W wyniku wymienionych prac w IMG PAN zrealizowany został użytkowy program komputerowy do prognozowania rozpływu gazów w kopalnianej sieci wentylacyjnej. W programie zastosowano iteracyjną metodę oczkową do obliczania rozpływu powietrza [Pawiński i in., 1995] i równania transportu masy dla obliczania propagacji stężenia gazów w sieci wentylacyjnej.

3. Przepływ przez zroby

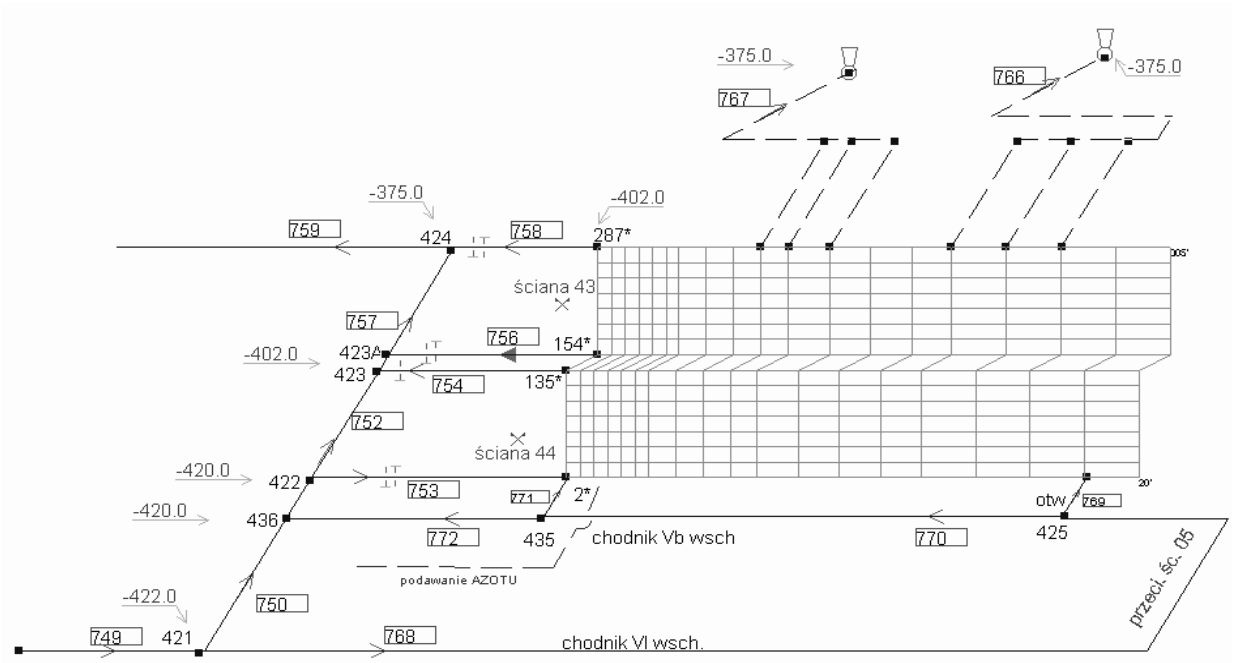
Model zrobów o stałych skupionych pozwalał uwzględnić zjawisko dopływu i wypływu ze zrobów przy zmianach ciśnienia barometrycznego lecz nie uwzględniał przepływu przez zroby. Przepływ powietrza i metanu w zrobach, traktowany jako filtracyjny, dwuwymiarowy przepływ płynu nieściśliwego z dopływem metanu do zrobów, był prezentowany w pracy W. Dziurzyńskiego [1998]. W pracy tej i w pracy St. Nawrata [1999] podany został model zrobów jako sieci wzajemnie prostopadłych bocznic o oporach R_z, zależnych od lokalnej przepuszczalności zrobów:

$$R_{zi} = \frac{\mu_i \Delta x_i}{h_i k_i \Delta y_i} \tag{1}$$

gdzie:

μ_l – lepkość dynamiczna gazu,
k_l – przepuszczalność elementu zrobów,
h_l – średnia wysokość elementu zrobów
$\Delta x_l, \Delta y_l$ – wymiary elementu zrobów,
l – numer bocznicy zrobów.

Przykład takiej sieci pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat przestrzenny rejonu ściany 43 i 44 wraz z zrobami

Program komputerowy VentZroby do prognozowania rozpływu gazów w kopalnianej sieci wentylacyjnej ze zrobami opierał się na założeniu, że zmiany prędkości powietrza w wyrobiskach zachodzą na tyle wolno, że można pominąć siły bezwładności i obliczać rozpływ powietrza w sieci wyrobisk rozwiązując układ równań opisujących przepływ powietrza w bocznicach sieci w stanie ustalonym z uwzględnieniem dopływów masy gazu domieszkowego (najczęściej metanu) do węzłów sieci oraz z uwzględnieniem liniowej zależności straty ciśnienia od strumienia masy Q dla bocznic zrobów:

$$R_{zi}Q_i = \Delta p_i - \rho_i g \Delta z_l \tag{2}$$

gdzie:

Δp_l – różnica ciśnień między końcem i początkiem l-tej bocznicy zrobów,
Δz_l – różnica wysokości początku i końca l-tej bocznicy,
ρ_l – średnia gęstość mieszaniny metanu i powietrza w l-tej bocznicy,
g – przyspieszenie ziemskie.

Obliczony wektor bocznicowych strumieni masy uczestniczył w iteracyjnym rozwiązaniu układu równań węzłowych bilansów strumieni masy dopływających do węzłów, skąd otrzymuje się stężenia gazu (np. metanu) w strumieniach wypływających z węzłów [Dziurzyński, 1998].

4. Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na zroby

Model zrobów umożliwiający dalszą modyfikację programu VentZroby, aby prognoza rozpływu powietrza i rozkładu stężenia metanu w sieci wentylacyjnej kopalni objęła również zjawiska, związane ze zmianami ciśnienia barometrycznego podał A. Krach [2004]. W modelu tym, oprócz niezależnych od ciśnienia dopływów masy metanu do węzłów sieci bocznic modelujących zroby i reprezentujących emisję metanu do zrobów z jego stropu i spągu, wprowadzono dodatkowe dopływy masy mieszaniny metanu i powietrza z elementarnych objętości zrobów do węzłów sieci, zależne od zmian w czasie ciśnienia barometrycznego w danym węźle i stężenia metanu w elementarnej objętości zrobów, przypisanej do węzła. Objętość zrobów V_i dzieli się na elementarne objętości dane wzorem:

$$V_i = m_i h_i \Delta x_i \Delta y_i \tag{3}$$

gdzie:

m_i – porowatość zrobów,
h_i – wysokość zrobów w i-tym elemencie objętości.

Wielkość masy gazu m, zawartej w elementarnej objętości zrobów V zależy od ciśnienia barometrycznego p, udziału masowego metanu C i temperatury absolutnej T w następujący sposób:

$$m = \frac{V\ p}{R_p(r_A C + 1)T} \tag{4}$$

gdzie:

$r_A = \frac{R_m}{R_p} - 1$,

R_m, R_p – stałe gazowe metanu i powietrza.

Różniczkując zależność (4) otrzymuje się strumień masy dopływający do objętości V przy zmianie ciśnienia gazu i stężenia metanu w tej objętości:

$$Q_d = \frac{V}{R_p(r_A C + 1)T}\left(\frac{dp}{dt} - \frac{r_A p}{r_A C + 1}\frac{dC}{dt}\right) \tag{5}$$

Z bilansu strumieni masy mieszaniny i strumieni masy metanu dopływających i wypływających z elementarnej objętości zrobów otrzymuje się równanie na zmianę udziału masowego metanu w tej objętości z uwzględnieniem wpływu ciśnienia i temperatury:

$$\frac{Vp}{R_p(r_A C+1)T}\frac{dC}{dt}=Q_{,m}+\sum_{i=1}^{I}C_iQ_i-(Q_m+\sum_{i=1}^{I}Q_i)C \tag{6}$$

Uwzględniając powyższy związek w zależności (5) otrzymuje się następujące wyrażenie na strumień masy wypływający z objętości V na skutek zmiany ciśnienia p:

$$Q_d=-\frac{1}{r_A C+1}\left\{\frac{V}{R_pT}\frac{dp}{dt}+r_A\left[\left(Q_m+\sum_{i=1}^{I}Q_i\right)C-\left(Q_m+\sum_{i=1}^{I}C_iQ_i\right)\right]\right\} \tag{7}$$

Dodatkowe strumienie masy, dopływające do węzłów sieci bocznic modelującej zroby uwzględnia się w obliczeniach rozpływu powietrza w sieci wentylacyjnej dodając je do strumieni masy metanu dopływającego do elementarnych objętości zrobów ze stropu i spągu. Po obliczeniu bocznicowych strumieni masy można wyznaczyć ciśnienia absolutne w węzłach sieci i następnie, z układu równań różniczkowych (6), obliczyć udziały masowe metanu w strumieniach masy wypływających z węzłów sieci.

5. Algorytm obliczeniowy

Algorytm obliczania stężeń metanu w sieci wentylacyjnej ze zrobami przy zmiennym ciśnieniu ma następującą postać:

1) Warunki początkowe:
   a) dany wektor strumieni masy dopływów metanu $\mathbf{Q_m}$ do węzłów sieci modelującej zroby,
   b) obliczony rozpływ powietrza w sieci wentylacyjnej (wektor bocznicowych strumieni masy **Q**) dla danego rozkładu dopływów metanu do węzłów sieci,
   c) obliczone ciśnienia absolutne **P** w węzłach sieci,
   d) obliczone stężenia metanu **C** w prądach powietrza wypływających z tych węzłów w stanie ustalonym,
2) Dla każdego kroku czasowego Δt wykonuje się następującą sekwencję działań:
   a) zapisanie wartości ciśnień absolutnych w węzłach sieci p_{t_i} i obliczenie ciśnień p_i w węzłach dla nowej wartości ciśnienia barometrycznego na powierzchni i aktualnych wartościach strumieni masy Q_j w bocznicach sieci,
   b) obliczenie ciśnień absolutnych w węzłach jako wielkości wejściowej do procedury iteracyjnej wyznaczania ciśnień węzłowych:

$$p_{p_i}=p_{t_i}+k\left(p_i-p_{t_i}\right) \tag{8}$$

   gdzie współczynnik k ma wartość początkową 1,
   c) wyznaczenie dodatkowych strumieni masy dopływających do węzłów sieci modelującej zroby na podstawie zależności (7), przekształconej dla obliczeń numerycznych do postaci:

$$Q_{d_i}=-\frac{1}{r_A C_i+1}\left\{AV_i\frac{p_{p_i}-p_{t_i}}{\Delta t}+r_A\left[\left(Q_{m_i}+\sum_{j=1}^{J}Q_{i,j}\right)C_i-\left(Q_{m_i}+\sum_{j=1}^{J}C_{i,j}Q_{i,j}\right)\right]\right. \tag{9}$$

   gdzie;

$$A=\frac{1}{R_pT},$$

   $Q_{i,j}$ – strumień masy w j-tej bocznicy dopływający do i-tego węzła,
   $C_{i,j}$ – udział masowy metanu w tym strumieniu,
   C_i – udział masowy metanu w elementarnej objętości zrobów, skojarzonej z i-tym węzłem i w strumieniach masy wypływających z tego węzła

   d) dodanie obliczonych dodatkowych strumieni masy Q_d do strumieni masy metanu Q_m dopływających do węzłów:

$$Q_{md_i}=Q_{m_i}+Q_{d_i} \tag{10}$$

e) obliczenie rozpływu powietrza w sieci dla nowych wartości strumieni masy Q_{md_i} dopływających do węzłów sieci modelującej zroby,
f) wyznaczenie ciśnień p_i w węzłach sieci modelującej zroby przy obliczonym rozpływie powietrza w sieci,
g) obliczenie odległości między wektorem ciśnień **P** i wektorem ciśnień $\mathbf{P_p}$ i sprawdzenie, czy ta odległość maleje z kolejnymi krokami iteracji:
   - jeżeli nie maleje to następuje podzielenie współczynnika k przez 2 i powrót do punktu b),
   - jeżeli maleje, to następuje sprawdzenie, czy ta odległość jest większa od założonej odległości, określającej dokładność wyznaczenia ciśnień w węzłach sieci:
     – jeżeli jest większa, to następuje powrót do punktu b) i wykonany jest kolejny krok iteracji,
     – jeżeli jest równa lub mniejsza, to następuje wyjście z pętli iteracyjnej,
h) po wyjściu z pętli iteracyjnej do obliczania ciśnień węzłowych wyznacza się stężenia metanu w elementarnych objętościach zrobów, przypisanych do węzłów sieci modelującej zroby rozwiązując numerycznie układ równań różniczkowych (6), dany w postaci:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{1}{AV_i\, p_i}\left(r_A C_i + 1\right)\left[\left(Q_{mi} + \sum_{j=1}^{J} C_{i,j} Q_{i,j}\right) - \left(Q_{mi} + \sum_{j=1}^{J} Q_{i,j}\right) C\right] \tag{11}$$

co sprowadza się do wyznaczenia wartości stężeń metanu $C_i(t + \Delta t) = C_i(t) + \Delta C_i$ jedną ze znanych metod numerycznego rozwiązywania układów równań różniczkowych pierwszego rzędu.

3) dla czasu powiększonego o Δt określa się kolejną wartość ciśnienia na zrębie szybu i powtarza się wyżej opisaną sekwencję działań w celu obliczenia nowych stężeń metanu w zrobach i w bocznicach sieci dla tej chwili czasu.

6. Weryfikacja numeryczna modelu zrobów

W celu sprawdzenia wyżej podanego algorytmu obliczeniowego został napisany program testowy „ZROBY" dla maksymalnie uproszczonej sieci wentylacyjnej, składającej się z szybu wentylacyjnego z wentylatorem, szybu wdechowego, ściany i przyległych do ściany zrobów. Zroby razem ze ścianą zamodelowano jako sieć wzajemnie prostopadłych 400-u bocznic (20×20). Jako węzeł odniesienia przyjęto węzeł związany z powierzchnią. Ilość węzłów niezależnych jest więc równa 441 (21×21). Pominięto wpływ sił grawitacyjnych, związanych ze zmienną gęstością mieszaniny metanu i powietrza w sieci. Opór bocznicy sieci poza zrobami zdefiniowano jako stosunek straty ciśnienia do kwadratu strumienia masy, natomiast opór bocznicy w sieci modelującej zroby zdefiniowano jako stosunek straty ciśnienia do strumienia masy. Dla porównania z oporem aerodynamicznym, definiowanymi w odniesieniu do strumienia objętości podano niżej zależności, wiążące oba rodzaje oporów:

– dla bocznic sieci wentylacyjnej $R_M = \dfrac{R_V}{\rho\rho_0}$

– dla bocznic zrobów $R_M = \dfrac{R_V}{\rho_0}$

gdzie:

ρ_0 – gęstość powietrza, dla której został wyznaczony opór R_V,
ρ – aktualna gęstość powietrza.

Przykład 1:

Przyjęto następujące parametry:
– stałe spiętrzenie wentylatora H_w = 5000 Pa,
– opór szybu wentylacyjnego i szybu wdechowego $R_w = R_t$ = 5 [Pa s^2 kg^{-2}],
– opór ściany R_{Sc} = 4 m^{-1} kg^{-1} (opór jednego odcinka ściany $R_{sc} = R_{Sc}/20$ = 0.2 [Pa s^2 kg^{-2}],),
– max opór elementu bocznicy zrobów R_z = 400 [Pa s kg^{-1}]
– objętość elementu zrobów V_z = 500 m^3,
– strumień masy metanu, dopływający do elementu zrobów Q_m = 5×10^{-4} kg/s,

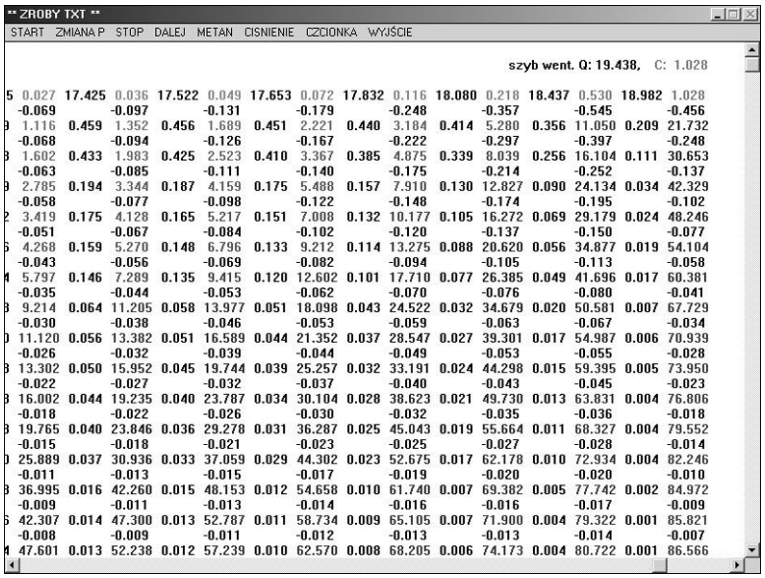
– udział masowy metanu na wlocie ściany $C_0 = 0$,
– początkowe ciśnienie barometryczne na powierzchni $p_0 = 1000$ hPa,
– eksponencjalna zmiana ciśnienia na powierzchni $\Delta p = -20$ hPa,
– stała czasowa zmiany ciśnienia $\tau = 3600$ s,
– krok czasowy obliczeń numerycznych $\Delta t = 60$ s.

Program posiada dwie opcje, wybierane na pasku menu: tryb graficzny i tryb tekstowy. W trybie graficznym pokazana jest schematycznie siatka bocznic zrobów. Stężenia metanu w tych bocznicach pokazane są za pomocą 25-o stopniowej skali barw.

W trybie tekstowym wyświetlane są wartości strumieni masy we wszystkich bocznicach zrobów, ściany i szybów oraz wartości stężenia metanu w węzłach lub wartości ciśnień względnych, odniesionych do ciśnienia w węźle na wlocie ściany.

Poniżej, na rys. 2 pokazany jest przykładowy ekran programu w trybie tekstowym z wybraną opcją wyświetlania udziałów masowych w węzłach. Liczby reprezentujące wartości strumieni masy w bocznicach zrobów rozmieszczone są na ekranie tak, aby odpowiadały położeniu bocznic poziomych i pionowych i wyświetlane są w kolorze czarnym. Na skrzyżowaniach siatki, utworzonej przez tak rozmieszczone liczby, wyświetlane są wartości, związane z węzłami siatki modelującej zroby. Są to stężenia metanu w elementarnych objętościach zrobów oraz ciśnienia w węzłach. Liczby, reprezentujące stężenia metanu wyświetlane są w kolorach 10-o stopniowej skali barwnej a liczby, reprezentujące ciśnienia wyświetlane są w kolorze niebieskim. Na rys. 2 na ekranie wyświetlane są w węzłach siatki wartości stężenia metanu w procentach.

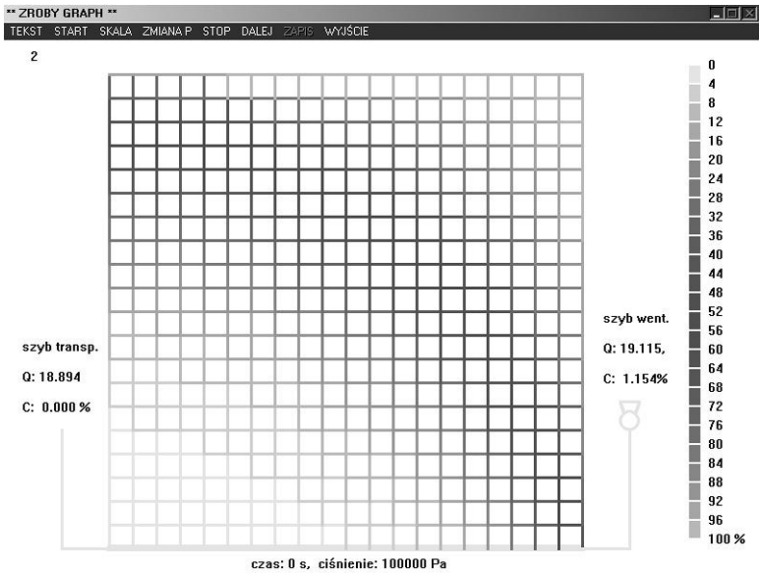
W obydwu trybach, graficznym i tekstowym wyświetlane są wartości strumieni masy i stężenia metanu w obydwu szybach a także czas i ciśnienie barometryczne na powierzchni. Ponadto, w trybie tekstowym wyświetlane są dodatkowe informacje dla celów testowania algorytmu obliczeniowego modelu zrobów. Są to: ilość iteracji w pętli obliczającej rozkład ciśnień w węzłach sieci oraz wielkość funkcji celu, czyli sumy kwadratów różnic ciśnień węzłowych z aktualnego i poprzedniego kroku iteracji.



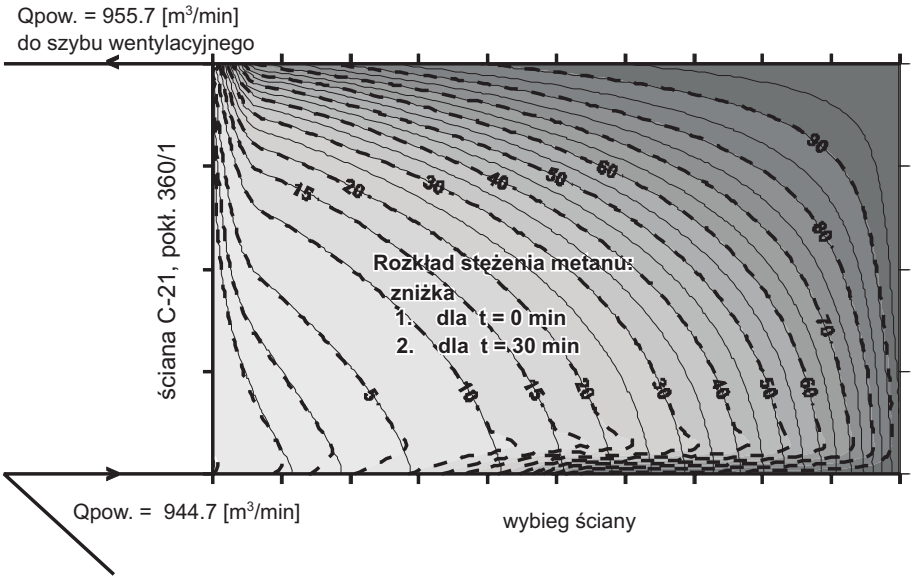
5	0.027	17.425	0.036	17.522	0.049	17.653	0.072	17.832	0.116	18.080	0.218	18.437	0.530	18.982	1.028
	-0.069		-0.097		-0.131		-0.179		-0.248		-0.357		-0.545		-0.456
9	1.116	0.459	1.352	0.456	1.689	0.451	2.221	0.440	3.184	0.414	5.280	0.356	11.050	0.209	21.732
	-0.068		-0.094		-0.126		-0.167		-0.222		-0.297		-0.397		-0.248
3	1.602	0.433	1.983	0.425	2.523	0.410	3.367	0.385	4.875	0.339	8.039	0.256	16.104	0.111	30.653
	-0.063		-0.085		-0.111		-0.140		-0.175		-0.214		-0.252		-0.137
9	2.785	0.194	3.344	0.187	4.159	0.175	5.488	0.157	7.910	0.130	12.827	0.090	24.134	0.034	42.329
	-0.058		-0.077		-0.098		-0.122		-0.148		-0.174		-0.195		-0.102
2	3.419	0.175	4.128	0.165	5.217	0.151	7.008	0.132	10.177	0.105	16.272	0.069	29.179	0.024	48.246
	-0.051		-0.067		-0.084		-0.102		-0.120		-0.137		-0.150		-0.077
5	4.268	0.159	5.270	0.148	6.796	0.133	9.212	0.114	13.275	0.088	20.620	0.056	34.877	0.019	54.104
	-0.043		-0.056		-0.069		-0.082		-0.094		-0.105		-0.113		-0.058
4	5.797	0.146	7.289	0.135	9.415	0.120	12.602	0.101	17.710	0.077	26.385	0.049	41.696	0.017	60.381
	-0.035		-0.044		-0.053		-0.062		-0.070		-0.076		-0.080		-0.041
3	9.214	0.064	11.205	0.058	13.977	0.051	18.098	0.043	24.522	0.032	34.679	0.020	50.581	0.007	67.729
	-0.030		-0.038		-0.046		-0.053		-0.059		-0.063		-0.067		-0.034
0	11.120	0.056	13.382	0.051	16.589	0.044	21.352	0.037	28.547	0.027	39.301	0.017	54.987	0.006	70.939
	-0.026		-0.032		-0.039		-0.044		-0.049		-0.053		-0.055		-0.028
3	13.302	0.050	15.952	0.045	19.744	0.039	25.257	0.032	33.191	0.024	44.298	0.015	59.395	0.005	73.950
	-0.022		-0.027		-0.032		-0.037		-0.040		-0.043		-0.045		-0.023
3	16.002	0.044	19.235	0.040	23.787	0.034	30.104	0.028	38.623	0.021	49.730	0.013	63.831	0.004	76.806
	-0.018		-0.022		-0.026		-0.030		-0.032		-0.035		-0.036		-0.018
3	19.765	0.040	23.846	0.036	29.278	0.031	36.287	0.025	45.043	0.019	55.664	0.011	68.327	0.004	79.552
	-0.015		-0.018		-0.021		-0.023		-0.025		-0.027		-0.028		-0.014
0	25.889	0.037	30.936	0.033	37.059	0.029	44.302	0.023	52.675	0.017	62.178	0.010	72.934	0.004	82.246
	-0.011		-0.013		-0.015		-0.017		-0.019		-0.020		-0.020		-0.010
3	36.995	0.016	42.260	0.015	48.153	0.012	54.658	0.010	61.740	0.007	69.382	0.005	77.742	0.002	84.972
	-0.009		-0.011		-0.013		-0.014		-0.016		-0.016		-0.017		-0.009
5	42.307	0.014	47.300	0.013	52.787	0.011	58.734	0.009	65.105	0.007	71.900	0.004	79.322	0.001	85.821
	-0.008		-0.009		-0.011		-0.012		-0.013		-0.013		-0.014		-0.007
4	47.601	0.013	52.238	0.012	57.239	0.010	62.570	0.008	68.205	0.006	74.173	0.004	80.722	0.001	86.566

Rys. 2. Widok ekranu programu testowego „ZROBY" w trybie tekstowym z opcją wyświetlania stężenia metanu w węzłach siatki zrobów

Ekran programu w trybie graficznym pokazano na rysunku 3. Pokazany jest tu w skali szarości (w programie zastosowano 25 kolorów) początkowy, ustalony rozkład stężenia metanu w zrobach. Na rys. 4 pokazany jest ten rozkład początkowy (linia ciagła) i po upływie 30 minut (linia przerywana) od rozpoczęcia zmiany ciśnienia barometrycznego na powierzchni. Ciśnienie barometryczne zmienia się eksponencjalnie od 1000 hPa do 980 hPa ze stałą czasową 1 h i po 30 minutach jest równe 992.13 hPa.



Rys. 3. Widok ekranu programu testowego „ZROBY" w trybie graficznym, początkowy, ustalony rozkład stężenia metanu w zrobach

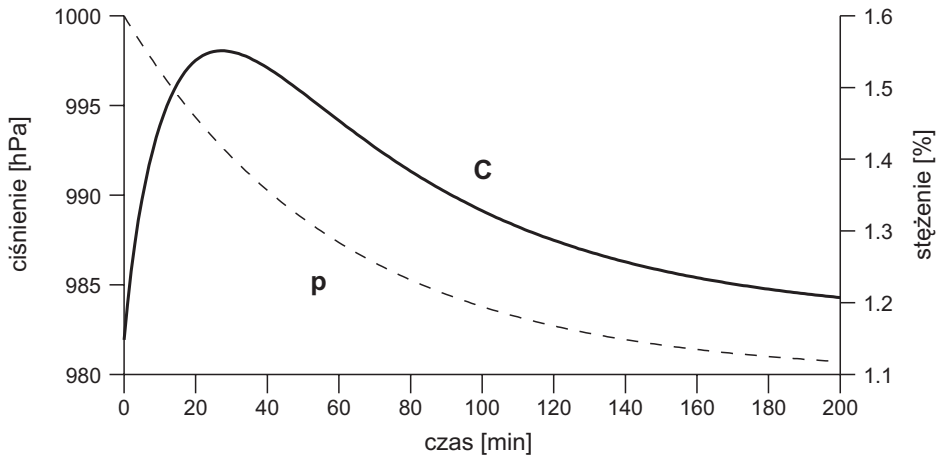


Rys. 4. Rozkład stężenia metanu w zrobach po upływie 30 minut od rozpoczęcia zmiany (zniżka) ciśnienia barometrycznego

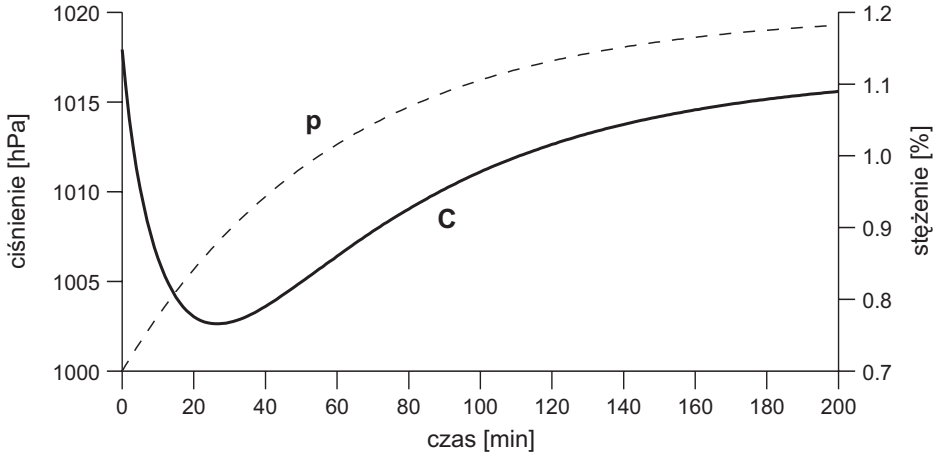
Charakterystyczny jest przebieg zmian stężenia metanu na wylocie ze ściany. Na rys. 5 pokazany jest taki przebieg wraz z przebiegiem zmian ciśnienia barometrycznego na powierzchni przy malejącym ciśnieniu barometrycznym, a na rys. 6 przy ciśnieniu rosnącym. W obydwu wypadkach, gdy ciśnienie barometryczne ustala się na nowym poziomie, stężenia metanu powraca do wartości początkowej.

Na kolejnych rysunkach pokazano rozkłady ciśnienia w zrobach dla stanu początkowego (rys. 7) oraz po upływie 30 minut (rys. 8). Przedstawione rysunki pokazują kształtowanie nowego po zmianie ciśnienia na powierzchni, rozkładu ciśnienia w zrobach. Widać odmienne rozkłady ciśnienia rys. 7 i rys. 8 odpowiadające zadanemu wymuszeniu.

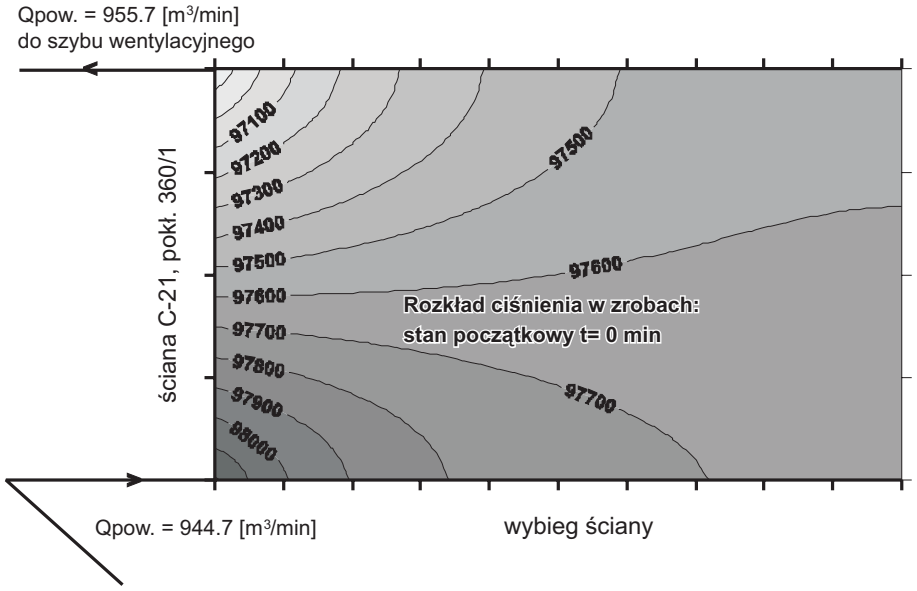
Przedstawiony powyżej przykład dotyczył sytuacji, gdzie opory zastępcze ściany są równomiernie rozłożone co odpowiada jednakowej przepuszczalności. Na etapie uruchamiania i testowania procedury ZROBY taki wybór danych był uzasadniony ze względu na badanie zbieżności nowych algorytmów i pro-



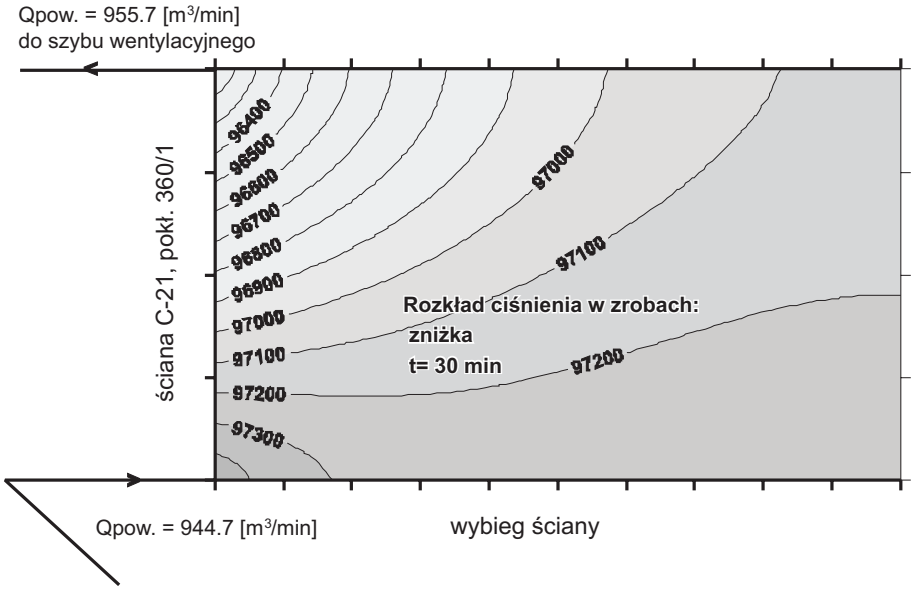
Rys. 5. Spadek ciśnienia barometrycznego na powierzchni i towarzysząca temu zmiana stężenia metanu na wylocie ze ściany z przyległymi zrobami



Rys. 6. Wzrost ciśnienia barometrycznego na powierzchni i towarzysząca temu zmiana stężenia metanu na wylocie ze ściany z przyległymi zrobami



Rys. 7. Początkowy rozkład ciśnienia w zrobach ściany C-21



Rys. 8. Rozkład ciśnienia w zrobach ściany C-21 po upływie 30 minut po wystąpieniu zniżki ciśnienia barometrycznego na powierzchni.

cedur programu. Po pomyślnym testowaniu do dalszych badań przyjęto dane charakteryzujące przepływ mieszaniny powietrza i metanu dla wyrobisk rejonu ściany C-21 pokł. 360, które uzyskano na podstawie rzeczywistych pomiarów dla rejonu sieci wyrobisk kopalni. W tym przypadku dla wyznaczenia danych charakteryzujących przepływ w zrobach. wykorzystano model teoretyczny rozkładu przepuszczalności i kształtowania się wysokości zrobów (Dziurzyński W. 1998) oraz informacje jakie niesie mapa pokładowa, profil geologiczny rejonu i projekt eksploatacji ściany (geometria, koty niwelacyjne, grubość pokładu eksploatowanego, rodzaj skał stropowych).

Przykład 2:

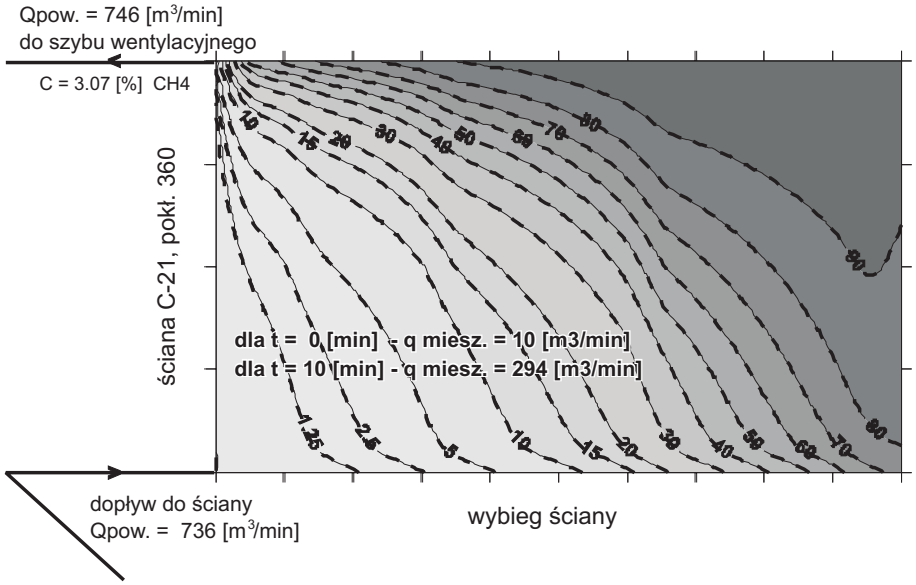
Przyjęto następujące parametry:

- stałe spiętrzenie wentylatora $H_w = 3000$ Pa,
- opór szybu wentylacyjnego i szybu wdechowego $R_w = R_t = 5$ [Pa s^2 kg^{-2}],
- opór ściany $R_{Sc} = 4$ m^{-1} kg^{-1} (opór jednego odcinka ściany $R_{sc} = R_{Sc}/20 = 0.2$ [Pa s^2 kg^{-2}],),
- max opór elementu bocznicy zrobów $R_z = 400$ [Pa s kg^{-1}]
- objętość elementu zrobów $V_z = 1500$ m^3,
- strumień masy metanu, dopływający do elementu zrobów $Q_m = 5\times10^{-4}$ kg/s,
- udział masowy metanu na wlocie ściany $C_0 = 0$,
- początkowe ciśnienie barometryczne na powierzchni $p_0 = 1000$ hPa,
- eksponencjalna zmiana ciśnienia na powierzchni $\Delta p = -20$ hPa,
- stała czasowa zmiany ciśnienia $\tau = 600$ s,
- krok czasowy obliczeń numerycznych $\Delta t = 30$ s.

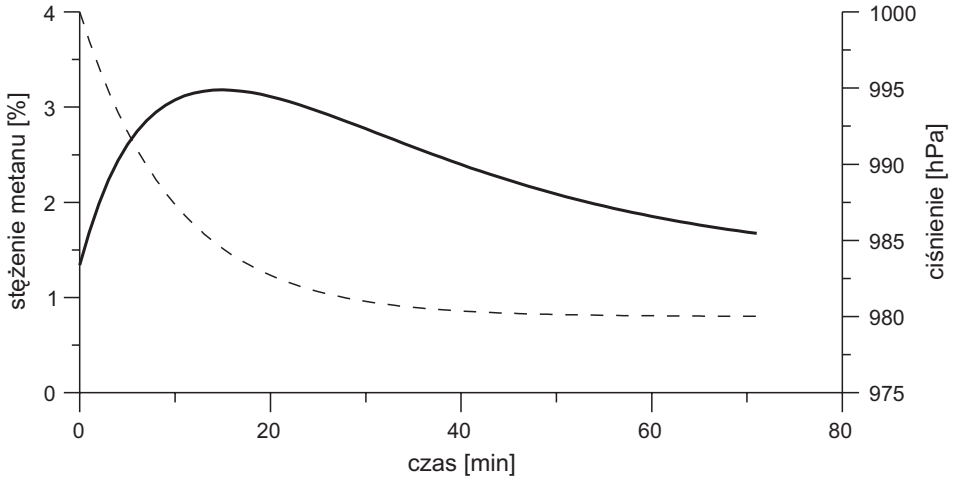
Uzyskane wyniki symulacji pokazano w postaci graficznej na kolejnych rysunkach. Na rys. 8 pokazany jest rozkład początkowy stężenia metanu i po upływie 10 minut od rozpoczęcia zmiany ciśnienia barometrycznego na powierzchni. Ciśnienie barometryczne zmienia się eksponencjalnie od 1000 hPa do 980 hPa ze stałą czasową 10 min i po 10 minutach jest równe 987.35 hPa.

W tym przykładzie pokazano, że zmiany stężenia metanu ma wylocie z rejonu ściany są dwukrotnie większe (rys. 10) niż w przykładzie 1. Spowodowane to jest poprzez dobór danych odpowiadających rzeczywistym warunkom z uwzględnieniem uszczelnienia zawału od strony kanału ściany poprzez zastosowanie obudowy zmechanizowanej oraz ekranu wykonanego pianami chemicznymi. Zastosowanie środków uszczelniających jest jednym z elementów profilaktyki przeciwpożarowej.

Na rysunku 11 pokazano zmiany strumienia masy mieszaniny powietrza i gazów spowodowane dodatkowym dopływem metanu z objętości zrobów. Można obliczyć, że w 10 minucie zniżki barometrycznej



Rys. 9. Początkowy rozkład stężenia metanu w zrobach i po upływie 10 minut od rozpoczęcia zmiany (zniżka) ciśnienia barometrycznego



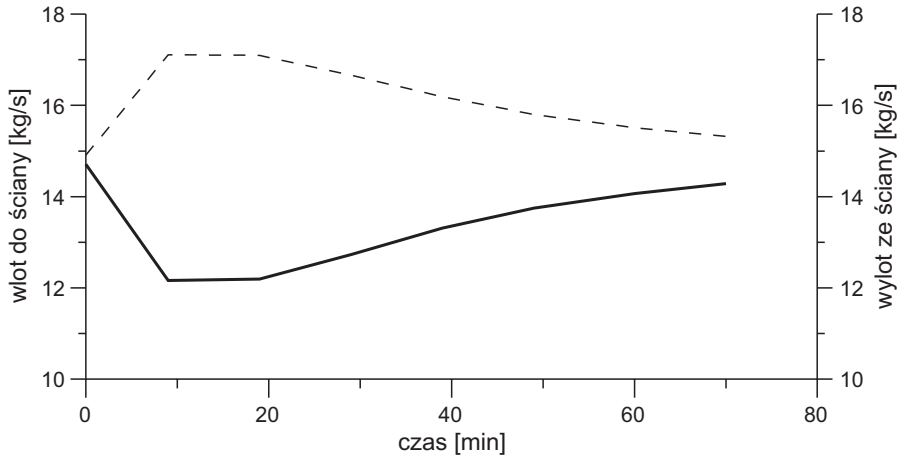
Rys. 10. Spadek ciśnienia barometrycznego na powierzchni i towarzysząca temu zmiana stężenia metanu na wylocie ze ściany z przyległymi zrobami

ze zrobów dopływa do górnego naroża ściany 294 [m^3/min] mieszaniny powietrza i metanu. Ten zwiększony dopływ powoduje znaczne przekroczenie stężenia metanu (do 3% CH_4 na wylocie ze ściany. Pokazany na rysunku 8 początkowy rozkład stężenia metanu w zrobach od rozpoczęcia zniżki ciśnienia barometrycznego niewiele się różni od rozkładu po upływie 10 minut. Można sądzić, iż z powodu porównywalnych zmian strumienia masy mieszaniny przez zroby w stosunku do dodatkowego dopływu metanu z objętości zrobów przedstawione rozkłady są podobne.

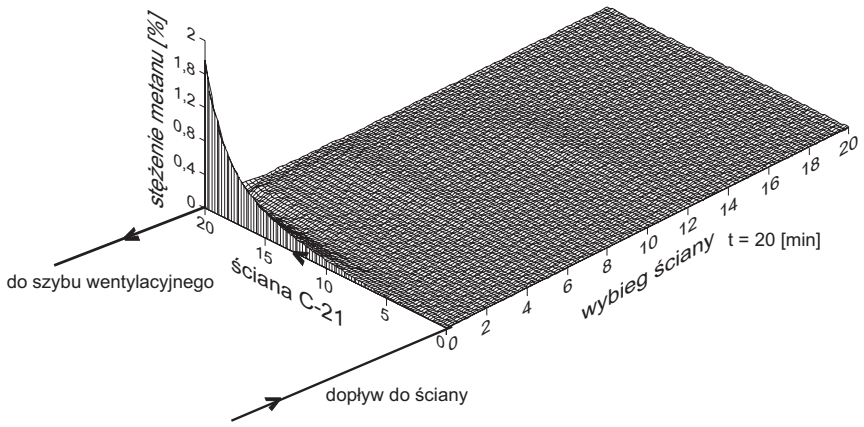
Sytuację tę można zaobserwować na dwu kolejnych rysunkach. Na rysunku 12 przedstawiono przestrzenny rozkład stężenia metanu będący różnicą między rozkładem początkowym a rozkładem po upływie 10 minut, a na rysunku 13, po upływie 70 minut.

Przedstawione na wykresach (rys. 12 i 13) rozkłady stężenia metanu w zrobach pokazują charakter tych zmian. Dla początkowego okresu (10 min) zmiany zachodzą tylko w pobliżu ściany a amplituda tych zmian jest znaczna (np. 2%). Dla okresu późniejszego (70 min) po ustaleniu się ciśnienia zmiany, zachodzą na znacznie większym obszarze zrobów ale z dużo mniejszą amplitudą (np. 0.3%).

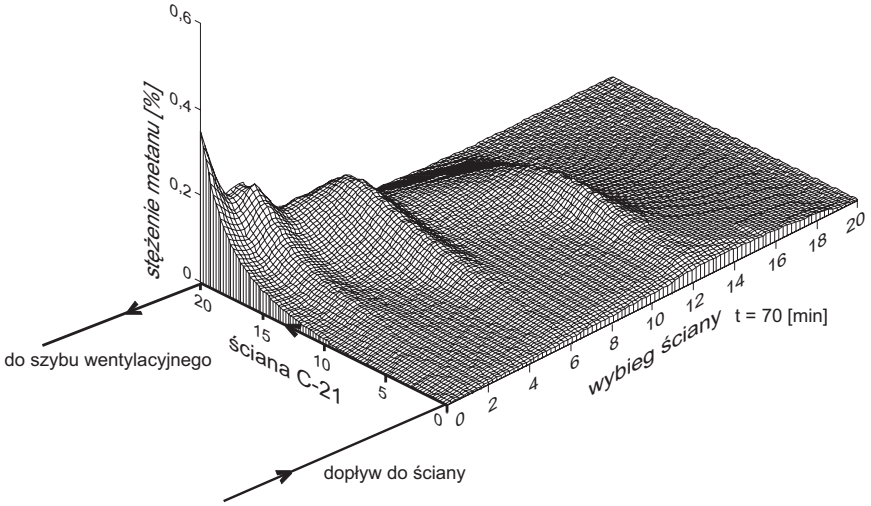
W obu przedstawionych przykładach 1 i 2 nie stwierdzono występowania obszarów zrobów, w których zachodzą kilkunasto procentowe zmiany stężenia metanu.



Rys. 11. Zmiany strumienia masy na wlocie i wylocie ze ściany



Rys. 12. Różnica w rozkładzie stężenia metanu w zrobach po upływie 20 minut od rozpoczęcia zmiany (zniżka) ciśnienia barometrycznego



Rys. 13. Różnica w rozkładzie stężenia metanu w zrobach po upływie 70 minut od rozpoczęcia zmiany (zniżka) ciśnienia barometrycznego

7. Podsumowanie

Weryfikacja modelu matematycznego zrobów z uwzględnieniem zmian ciśnienia barometrycznego z zastosowaniem programu testowego „ZROBY" wykazała zbieżność procedury iteracyjnej, stosowanej w algorytmie obliczeniowym i potwierdziła celowość prowadzenia dalszych prac nad zastosowaniem tego modelu w programach numerycznego modelowania kopalnianych sieci wentylacyjnych ze zrobami.

Przeprowadzone rozważania miały na celu opracowanie procedury, dla programu symulacji VentZroby, pozwalającej uwzględnić zmiany ciśnienia barometrycznego w rejonie ściany. Uzyskane wyniki są zachęcające do kontynuowania badań. Należy zaznaczyć, że dołączenie procedury „Zroby" do programu wymaga uogólnienia procedury tak, aby spełniała wymagania systemu programów VentZroby. Pozwoli to na uzyskania możliwości symulacji dla rzeczywistych sieci wyrobisk i zrobów kopalni. Spełnienie tych warunków umożliwi kontynuację rozwoju oprogramowania pracującego w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem czujników systemu monitoringu.

8. Literatura

Dziurzyński W., 1985. *Stany nieustalone w kopalnianej sieci wentylacyjnej wywołane pożarem egzogenicznym*. Praca doktorska, AGH, Kraków.

Dziurzyński W., 1998. *Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego*. Studia, Rozprawy, Monografie Nr 56, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Dziurzyński W., Tracz J., Trutwin W., 1987. *O modelu matematycznym przepływu powietrza i gazów powyrzutowych w kopalnianej sieci wentylacyjnej*, Archiwum Górnictwa t. 32, z. 1.

Dziurzyński W., Tracz J., Trutwin W., 1987. *Symulacja numeryczna przepływu powietrza i gazów powyrzutowych w kopalnianej sieci wentylacyjnej*, Archiwum Górnictwa t. 32, z. 1.

Gumuła S., Trutwin W., 1977. *Zmiany koncentracji metanu w wyrobiskach kopalnianych zawierających źródła metanu w świetle badań laboratoryjnych*, Archiwum Górnictwa t. XXII, z. 1.

Kajdasz Z., Markefka P., Stefanowicz T., 2002. *Zagrożenia aerologiczne wywołane w kopalniach głębinowych zmianami ciśnienia barometrycznego – Sposób eliminowania*, Ratownictwo Górnicze nr 2 (26), CSRG Bytom.

Krach A., 2004. *Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na stężenie metanu w prądzie powietrza wypływającym z rejonu ściany z przyległymi zrobami – model matematyczny i algorytm obliczeniowy*, Archives of Mining Sciences 49, 1, 43-53.

Nawrat S., 1999. *Eksperymentalne i modelowe badania procesu wypełniania metanem otamowanych wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego*, Prace naukowe, badawcze, wdrożeniowe EMAG Katowice, nr 1 (11).

Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J., 1995. *Przewietrzanie kopalń*, Śląskie Wydawnictwa Techniczne, Katowice.

Trutwin W., 1972. *Symulacja cyfrowa stanów nieustalonych procesu przewietrzania i regulacji kopalnianej sieci wentylacyjnej*, Zeszyty Problemowe Górnictwa t. 10, z. 2.

Trutwin W., 1973. *Wpływ warunków przewietrzania na stężenie metanu w wyrobiskach kopalnianych*, Górnictwo t. 11, z. 2.

Wasilewski S., 1998. *Stany nieustalone przepływu powietrza i stężenia metanu w wyrobiskach kopalnianych*, Prace naukowo badawcze-wdrożeniowe EMAG Katowice, nr 1/9.

Verification of a mathematical model of methane emission considering variations of atmospheric pressure

Abstract

Variations of atmospheric pressure contribute to exchange of gases between goaf and a network of intentionally maintained underground workings of a mine. Oxygen forced in may trigger a spontaneous combustion while a pressure fall may drag toxic or explosive gases out of a goaf. Paper presents a mathematical model of those phenomena. This model is an extension of joined description of typical ventilation network and goaf, in which the goaf is represented by a grid of airways of a Darcy's flow. Subsequent chapters describe the phenomena itself, relevant mathematical and numerical models, algorithm of solving the problem and results of first simulations which indicate correctness of presented approach.

Keywords: mine ventilation, methane concentration, goaf, barometric pressure, ventilation network

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Henryk Bystroń*, Główny Instytut Górnictwa