

## Zmiany ciśnienia bezwzględne w rejonie ściany jako wskaźnik zagrożenia metanowego

WACŁAW TRUTWIN

ITI EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice  
Instytut Mechaniki Górniczej PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

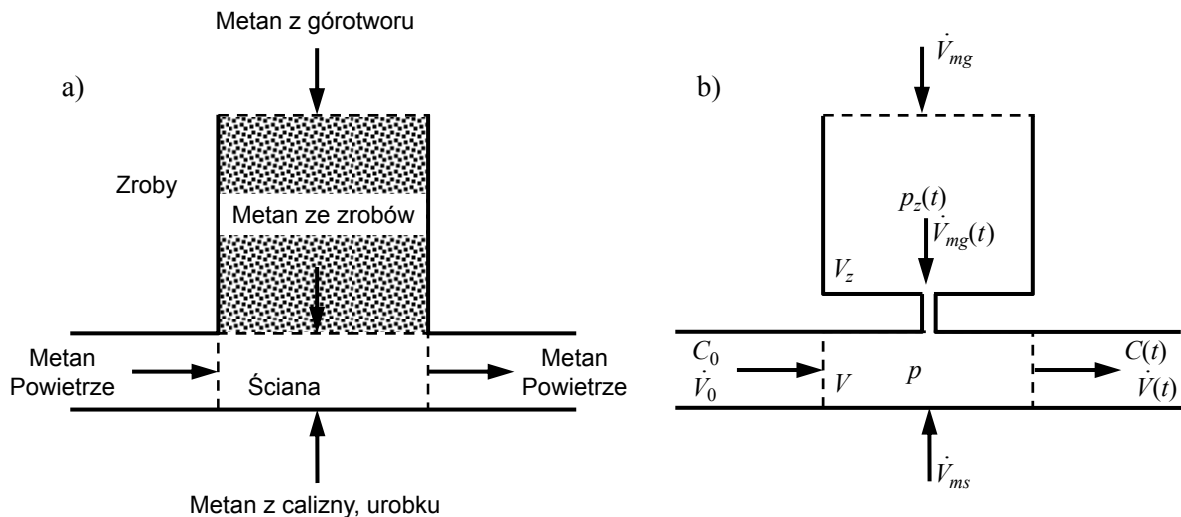
### Streszczenie

W pracy zwraca się uwagę na wpływ zmian ciśnienia absolutnego (barometryczne) na zmiany stężenie metanu w wyrobiskach kopalni metanowej. Metoda ostrzegania zagrożeniu metanowym na podstawie rejestrowanej niżki barometrycznej jest skuteczna jedynie przy powolnych zmianach tego ciśnienia. Poważne zakłócenia procesu wentylacji mają swoje źródło w procesie produkcyjnym, powodują dynamiczne zmiany strumieni powietrza i ciśnienia absolutnego, które prowadzą do znacznego wzrostu stężenia metanu w przodkach. Rozważania prowadzone w oparciu o wzór (7), który opisuje czasowy przebieg stężenia metanu w rejonie ściany jako wynik skokowych zmian strumienia powietrza obiegowego i ciśnienia absolutnego, pokazuje, że monitoring tego ciśnienia może służyć do wczesnego ostrzegania o zagrożeniu metanowym. Praca zawiera sugestie aby w stworzyć katalog typowych reakcji rozpatrywanego procesu wentylacji dla wczesnego i skutecznego rozpoznania zagrożenia metanowego

**Słowa kluczowe:** aerologia górnicza, zagrożenia metanowe, monitoring parametrów procesu wentylacji

Praca zawiera rozważania nad wpływem zmian ciśnienia absolutnego na stężenie metanu w wyrobiskach kopalni gazowych, zwłaszcza w rejonach ścian prowadzących wydobywanie z zawałem stropu. Powstałe w ten sposób zrobki, zawierają pustki ( $V_z$ ) w których gromadzi się, na ogół, znaczna objętość metanu, który dopływa z górotworu, starych zrobów i innych źródeł. Strumień objętości metanu ( $V_{mz}$ ), który wypływa ze zrobów do ściany (Rys. 1), zależy od różnicy ciśnienia absolutnego w ścianie i zrobach ( $p - p_z$ ). Każda zmiana ciśnienia absolutnego w ścianie ( $p$ ) powoduje zmianę strumienia metanu stosownie do ww. różnicy ciśnień. Wskutek tego po zmianie ciśnienia w ścianie strumień objętości metanu może wzrastać lub maleć (także do zera, po czym do zrobów będzie dopływać mieszanina powietrza i metanu ze ściany). Wskutek przepływu metanu między zrobami i ścianą następuje wyrównywanie różnicy ciśnień do stanu początkowego, przy którym strumień metanu do ściany równy jest strumieniowi dopływu metanu z górotworu do zrobów. Proces ten nazywany jest w gwarze górniczej jako „oddychanie zrobów”.

Rozwój wiedzy na temat niebezpieczeństw związanych z wydzielaniem się metanu w czasie robót górniczych w gazowych kopalniach węgla [1], przyczynił się do stosowania obserwacji niżek barometrycznych jako premonitora zwiększonego wydzielania się metanu do przodków wydobywczych. Można zatem twierdzić, że jest dotychczas jedyną powszechną metodą kontroli zagrożenia metanowego przy pomocy pomiaru ciśnienia bezwzględne w przodku. Podstawą tej metody jest przekonanie, że zmiany ciśnienia bezwzględne w przodku są synchroniczne ze zmianami ciśnienia barometrycznego na powierzchni kopalni. Wydaje się, że należałoby to przekonanie zweryfikować, biorąc pod uwagę że współczesna kopalnia może być rozpatrywana jako układ przepływowy powietrza i gazów złożony z zbiorników, które są połączone wyrobiskami między sobą oraz z atmosferą powierzchni. Synchronizacja zmian ciśnienia w kopalni i na powierzchni jest zdeterminowana przez szybkość wyrównywania ciśnienia, która z kolei zależy od objętości wszystkich zbiorników (rz.  $10^6 \text{ m}^3$ ) oraz strumienia przepływu przez szyby wentylacyjne i wyrobiska podziemne (rz.  $10^4 \text{ m}^3/\text{min}$ ). Oczywiście czas wyrównywania, rzędu  $10^2 \text{ min}$ , może nie mieć większego



Rys. 1. Modele rejonu ściany prowadzonej na zawał w kopalni gazowej, gdzie: *a* – uproszczony plan rejonu ściany przylegającej do zrobów, *b* – model procesu przepływu i mieszania powietrza z metanem w rejonie ściany o stałych skupionych (objaśnienia oznaczeń wielkości w tekście)

znaczenia wtedy gdy szybkość zmian ciśnienia barometrycznego na powierzchni jest mała. Zarejestrowany został w czasie burzy spadek ciśnienia barometrycznego dochodzący do 44 hPa w czasie 16 godzin tj. 2,75 hPa/godz., który jest znaczny.

Opisany wyżej sposób monitorowania zagrożenia metanowego jest prosty i skuteczny jedynie w przypadku zmian ciśnienia bezwzględnego w przodku spowodowanego zmianami ciśnienia barometrycznego na powierzchni kopalni i tylko w przypadku zmian powolnych. Stosowanie intensywnych metod eksploatacji powoduje to, że proces wentylacji w takich przodkach, rejonach ścian wydobywczych, narażony jest na zaburzenia, zarówno zamierzone, wynikające z przyczyn technologicznych, jak i przypadkowych. Na ogół zaburzenia dotyczą zmian oporów przepływu powietrza (tamy, obstrukcji przekrojów poprzecznych), krótkich spięć, zmian depresji wentylatorów głównych i pomocniczych itp. przyczyn. Zaburzenia powodują stany przejściowe procesu wentylacji, od skokowych do ciągłych o niewielkiej dynamice. Zaburzenia te objawiają się zmianami: ciśnienia bezwzględnego ( $p$ ), strumieni objętości powietrza ( $\dot{V}$ ) i metanu ( $\dot{V}_{mz}$ ) oraz stężenia metanu ( $C$ ) w powietrzu kopalni lub/i wybranego rejonu ściany. Mamy zatem trzy parametry, które determinują zagrożenie metanowe w wybranym rejonie kopalni. Zaburzenie kształtuje w wyrobiskach początkowy rozkład ciśnienia, który determinuje z kolei dynamikę zmian przepływu powietrza w wyrobisku i metanu w zrobach rozpatrywanego rejonu ściany. Na końcu stan przejściowy stężenia metanu na wylocie ze ściany jest efektem zmian przepływu powietrza i metanu oraz procesem mieszania się powietrza i metanu w wyrobisku ścianowym. Jak pokażą poniższe rozważania oparte na prostym modelu przepływowym przedmiotowego procesu gazodynamicznego w rejonie ściany, poszczególne stany przejściowe, począwszy od ciśnienia bezwzględnego a na stężeniu metanu w powietrzu wylotowym skończywszy, są coraz wolniejsze. Wniosek z tego rozumowania jest następujący: między istotnymi dla zagrożenia metanowego sygnałami ciśnienia bezwzględnego i stężeniem metanu na wylocie ze ściany jest przedział czasu, który może być wykorzystany do wczesnego ostrzegania przed zagrożeniem metanowym na podstawie monitoringu zmian ciśnienia bezwzględnego.

Systemy kontroli zagrożenia metanowego, które, dotychczas, korzystają z monitoringu: stężenia metanu, strumienia objętości powietrza na wlocie i wylocie ze ściany, należy uzupełnić o monitoring ciśnienia bezwzględnego w ścianie oraz ciśnienia barometrycznego na powierzchni.

Układ wentylacyjny przepływu powietrza, metanu oraz mieszaniny powietrza i metanu w rejonie ściany wydobywczej, w której stosuje się zawał stropu, jest stosunkowo prosty (Rys. 1a). Złożony jest z ciągu wyrobisk: chodnika podścianowego, wyrobiska ścianowego i chodnika nadścianowego, przez które płynie strumień powietrza kopalnianego spełniającego w ustalonych warunkach wszystkie wymagania odnośnie prawidłowej i bezpiecznej wentylacji tej przestrzeni roboczej. W tym także wymagania bezpiecznego transportu i usuwania metanu pochodzącego z różnych źródeł znajdujących się w rejonie ściany wydobywczej, w szczególności gromadzącego się w zrobach.

Uproszczony model przepływowy rozważanego układu wentylacyjnego pokazany jest na rys. 1b. Stanowi on podstawę sformułowania modelu matematycznego, w którym niestabilny proces przepływu i mieszania powietrza z metanem sprowadza się do zagadnienia przepływu jednowymiarowego w układzie o stałych skupionych.

Za [2] przyjmuje się następujące oznaczenia wielkości dla:

- zmiennych zależnych procesu:

$\dot{V}$  – strumień objętości powietrza na wylocie,

$C$  – średnie stężenia metanu na wylocie ze ściany,

$\dot{V}_{mz}$  – strumień objętości metanu ze zrobów do wyrobiska ścianowego,

$p_z$  – ciśnienie absolutne w zrobach,

- zmiennej niezależnej:

$t$  – czas

- zadanych funkcji czasu:

$p$  – ciśnienie absolutne w wyrobisku ścianowym

$C_o$  – średnie stężenia metanu na wlocie do ściany

$\dot{V}_o$  – strumień objętości powietrza na wlocie

$\dot{V}_{mg}$  – strumień objętości metanu z górotworu do zrobów

$\dot{V}_{ms}$  – strumień objętości metanu ze ściany i urobku do wyrobiska ścian.

- stałych:

$V$  – objętość ściany (przestrzeń mieszania)

$V_z$  – objętość pustek zrobów

$b$  – współczynnik przepuszczalności

Do założeń upraszczających model matematyczny, które przedstawiono wyżej, dodać należy założenie, że  $\dot{V}_o \gg \dot{V}_{ms}$  co oznacza, iż rozważania dotyczą niskich koncentracji. Ponadto przyjmuje się założenie o natychmiastowym mieszanii się powietrza i metanu wypływającego do wyrobiska ścianowego o objętości  $V$ . Przyjmuje się również izotermiczną przemianę w przepływach powietrza i metanu oraz, że rozpatrywany rejon ściany jest w pokładzie poziomym,

Model matematyczny budowany jest w oparciu o bilans strumieni objętości metanu wchodzących i wychodzących do przestrzeni ściany (Rys. 1b) dany równaniem różniczkowym w postaci

$$V \frac{dC(t)}{dt} = \dot{V}_{mz} + \dot{V}_o [C_o - C(t)] \quad (1)$$

ponadto, na bilansie strumieni masy dla obszaru zrobów (Rys. 1b), który po uwzględnieniu, że strumień objętości metanu ze zrobów do ściany określony jest wzorem wyrażającym liniową zależność między strumieniem objętości i różnicą ciśnienia

$$\dot{V}_{mz}(t) = -b[p - p_z(t)] \quad (2)$$

oraz zakładając także  $p_z/\rho_z = p_0/\rho_0$ , gdzie  $p_0 = \text{const.}$ , otrzymujemy równanie różniczkowe ciśnienie w zrobach

$$V_z \frac{dp_z}{dt} = p_0 \{V_{mg} + b[p - p_z(t)]\} \quad (3)$$

Ze skojarzenia powyższych równań otrzymuje się równanie różniczkowe rzędu pierwszego, niejednorodne na stężenie metanu na wylocie ze ściany [2]. Całka tego równania wyznaczona metodą uzmiennienia stałej dostarcza wzoru, na wyliczenie stanu przejściowego stężenia metanu na wylocie ze ściany jako odpowiedź na skokowe zakłócenia warunków przepływu, które przejawiają się skokowymi zmianami: stężenia metanu na wlocie do ściany, strumienia objętości metanu z górotworu do zrobów, strumienia powietrza na wlocie do ściany oraz ciśnienia bezwzględnego w ścianie:

$$C(t) = C_{02} + \frac{\dot{V}_{mg2}}{\dot{V}_2} + \left[ C_{01} - C_{02} + \left( \frac{\dot{V}_{mg1}}{\dot{V}_1} - \frac{\dot{V}_{mg2}}{\dot{V}_2} \right) \right] e^{-t/\tau_1} + \frac{[\dot{V}_{mg1} - \dot{V}_{mg2} - b(p_2 - p_1)]}{V} \frac{(e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1})}{1/\tau_2 - 1/\tau_1} \quad (4)$$

Indeksami 1 i 2 oznaczone są wielkości przed i po zmianie skokowej, i tak  $p_2 - p_1$  jest skokiem ciśnienia bezwzględnego w chwili początkowej,  $\dot{V}_2 - \dot{V}_1$  skokiem strumienia objętości powietrza w ścianie,  $C_{02} - C_{01}$  skokiem stężenia metanu w powietrzu na wlocie do ściany,  $\dot{V}_{mg2} - \dot{V}_{mg1}$  skokiem strumienia metanu z górotworu do zrobów. Występujące we wzorze (4) wielkości  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  są stałymi czasowymi, które charakteryzują dynamikę zmian stężenia metanu na wylocie ze ściany po skokowych zmianach wielkości wymuszających (zaburzeniach) procesu gazodynamicznego w rejonie ściany. Wielkości te zdefiniowane są następująco:

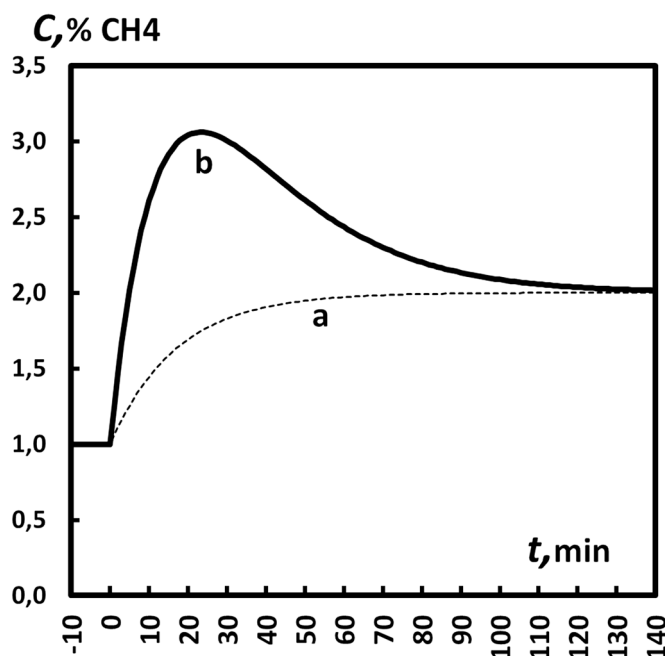
$$\tau_1 = V/\dot{V}_2 \quad (5)$$

$$\tau_2 = V_z/bp_o \quad (6)$$

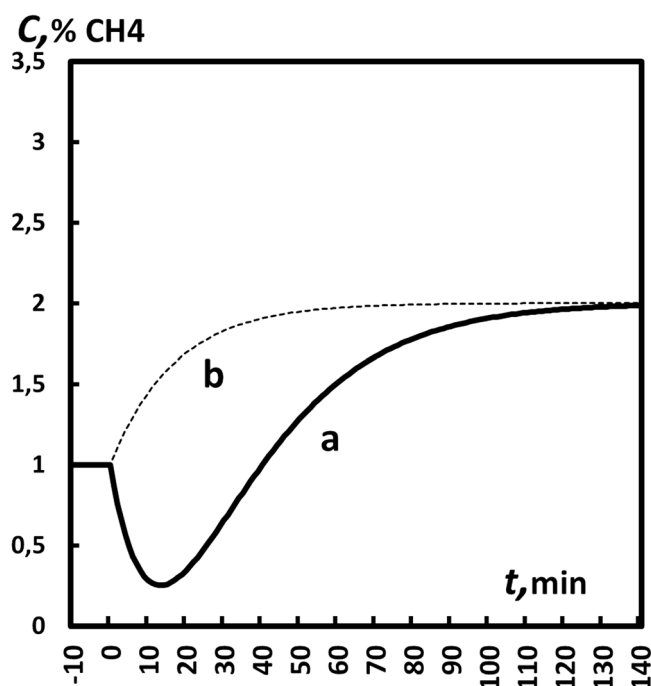
Dla skupienia uwagi na przedmiotowym zagadnieniu zakładamy, że  $C_{02} - C_{01}$ ,  $\dot{V}_{mg2} - \dot{V}_{mg1} = 0$ . Zatem zależność (4) ma następującą postać:

$$C(t) = \frac{\dot{V}_{mg}}{\dot{V}_2} + \left( \frac{\dot{V}_{mg}}{\dot{V}_1} - \frac{\dot{V}_{mg}}{\dot{V}_2} \right) e^{-t/\tau_1} + \frac{b(p_2 - p_1)}{V} \frac{(e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1})}{1/\tau_2 - 1/\tau_1} \quad (7)$$

W oparciu o zależność (7) w pracy przedstawione zostały dwa przykłady obliczeniowe a wyniki pokazane na rys. 2 i 3. Dane przyjęte do obliczeń stanów przejściowych, które wywołane zostały skokowymi zmianami strumienia powietrza obiegowego oraz ciśnienia bezwzględnego przedstawione zostały tab. 1.



Rys. 2. Stan przejściowy stężenia metanu (linia ciągła) w powietrzu na wylocie ze ściany przy zakłóceniu wywołanym w chwili  $t = 0$  skokowym **spadkiem** ciśnienia bezwzględnego i skokowym **spadkiem** strumienia objętości powietrza w ścianie do połowy, wyliczony na podstawie (5). Przyrost stężenia metanu wyznaczony linią przerywaną (a) powstaje wskutek spadku przepływu powietrza do połowy, natomiast przyrost metanu pokazany między linią ciągłą i linią przerywaną spowodowany jest przez równoczesny spadek ciśnienia. Dane przyjęte do obliczeń zawiera tab. 1.



Rys. 3 Stan przejściowy stężenia metanu (linia ciągła) w powietrzu na wylocie ze ściany przy zakłóceniu wywołanym w chwili  $t = 0$  skokowym **wzrostem** ciśnienia bezwzględnego i skokowym **spadkiem** strumienia objętości powietrza w ścianie do połowy, wyliczony na podstawie (5). Przyrost stężenia metanu wyznaczony linią przerywaną (a) powstaje wskutek spadku przepływu powietrza do połowy, natomiast spadek stężenia metanu pokazany między linią ciągłą i linią przerywaną spowodowany jest przez równoczesny spadek ciśnienia. Dane przyjęte do obliczeń zawiera tab. 1.

Tab. 1 Dane do obliczeń

Lp.	Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość liczbową
1	objętość ściany	$V$	$m^3$	$4 \times 10^3$
2	objętość pustek zrobów	$V_z$	$m^3$	$10^5$
3	strum.powiet. niezakłócony	$\dot{V}_1$	$m^3/min$	470
4	strum.powiet.po zakłóceniu	$\dot{V}_2$	$m^3/min$	235
5	strum. metanu z górotworu	$\dot{V}_{mg}$	$m^3/min$	4,7
6	stała czasowa, wz. (4)	$\tau_1$	min	17
7	stała czasowa, wz. (5)	$\tau_2$	min	20
8	skok ciśnienia	$p_2 - p_1$	Pa	$10^3$
9	ciśnienie odniesienia	$p_o$	Pa	$1,01 \times 10^5$
10	współ. przepuszczalności	$b$	$m^3/s.Pa$	$8 \times 10^{-3}$

Pracę kończą następujące uwagi:

1. Niniejsza praca jak również wiele innych [1-7] daje asumpt do stwierdzenia, że pomiar ciśnienia absolutnego w przodkach wydobywczych w kopalniach metanowych jest sposobem na wczesne ostrzeżenie o zagrożeniu metanowym spowodowanym przez dynamiczne zakłócenia procesu wentylacji.
2. System dyspozytorski kopalni, w oparciu o monitoring stężenia metanu, strumienia powietrza oraz ciśnienia absolutnego w przodkach wydobywczych, powinien rozpoznawać stany dynamiczne dla oceny zagrożenia metanowego.
3. W tym celu konieczny jest katalog typowych reakcji procesu gazodynamicznego na zaburzenia stanu wentylacji.
4. Można to osiągnąć stosując modele matematyczne, metody symulacji komputerowej oraz obserwacje (pomiarów parametrów) tego procesu.
5. Nawet proste modele matematyczne, przedstawione w niniejszej pracy, dają wystarczającą zgodność jakościową z rzeczywistymi reakcjami rozpatrywanego procesu gazodynamicznego w rejonie ściany prowadzonej na zawał.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

1. Myszor H., *Badanie wpływu powietrza w prądzie przewietrzającym ścianę na wydzielanie metanu*, (1973), Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN, T. 11, Z. 2, s. 65-101
2. Trutwin W., *Wpływ warunków przewietrzania na stężenie metanu w wyrobiskach kopalnianych*, (1973), Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN, T. 11, Z. 2, s. 3-30
3. Vandeloise R., *Anomalien des CH<sub>4</sub>-Gehaltes im Abwetterstrom der Abbaubetriebe*, (1971), Informationstagung Luxemburg, 24-25 luty 1971, Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl, s. 93-121, (wydanie niemieckie)
4. Dziurzyński W., Wasilewski S., Krach A., Pałka T., *Opracowanie narzędzi programowych dla celów odtworzenia zaistniałych zdarzeń i katastrof oraz ich weryfikacja na podstawie danych „post”*. (2011), Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 13, No. 1-4 (2011), s. 131-152
5. Wasilewski S., Łaskuda R., Wach M., *Obserwacja stężenia gazu w zrobach otamowanej ściany w systemie gazometrii automatycznej w czasie pożaru i jego aktywnego gaszenia przez podawanie mieszaniny wodno-pyłowej*, (2011), Mat. 6 Szkoły Aerologii Górniczej nt. Wybrane zagrożenia aerologiczne w kopalniach podziemnych i ich zwalczanie, pod red. N. Szlązaka, Wydawnictwa AGH, Kraków- 2011, s. 269-283
6. Trutwin W., *Monitorowanie ciśnienia atmosfery w rejonie ściany przy występowaniu zagrożeń skojarzonych*, (2009), Mat. Seminarium nt.: Działania prewencyjne w rejonach ścian, eksploatowanych przy występowaniu zagrożenia metanowego II-IV kategorii oraz zagrożenia pożarami endogenicznymi, WUG, Katowice, wrzesień 2009
7. Trenczek S., *Zasady stosowania czujników pomiarów ciśnienia bezwzględnego i różnicowego*, (2009), Mat. Seminarium nt.: Działania prewencyjne w rejonach ścian, eksploatowanych przy występowaniu zagrożenia metanowego II-IV kategorii oraz zagrożenia pożarami endogenicznymi, WUG, Katowice, wrzesień 2009

## Observations of Absolute Pressure Changes used as Early Warning of Methane Hazard in Longwalls

### Abstract

It is well known that changes of the atmospheric pressure on the surface are causing similar changes of the absolute pressure in the mine atmosphere. In gassy coal mines, the drop of the absolute pressure causes an increase of methane concentration in longwalls adjacent to waste gobs. This is due to methane accumulated in the gob. The increase of the absolute pressure will result in a decrease of methane concentration in the longwalls. Stagnation of the pressure brings the methane concentration to a level prior to the changes of the absolute pressure. The rate of change of the atmospheric pressure, understood as rate per time unit, is normally very small. Therefore the process of the release of additional methane from the gob into the longwall due to atmospheric pressure changes may be assumed as quasi-static.

Changes of the absolute pressure due to disturbances, occurring in a mine, are often very dynamic. This implies that the ventilation process in a gassy mine must be considered as no-steady, in order to interpret the relations between the changing parameters for the benefit of an effective monitoring of the methane hazard. The equation (7) derived from [2] shows that step like changes of airflow and/or absolute pressure in a gassy working (Fig. 1) may cause transient states of methane concentration at the face end. As it shown on fig. 2 the pressure change can be regarded as a premonitory signal of methane hazard in workings.

**Keywords:** mine ventilation, methane hazard, monitoring of absolute pressure