

*Nikodem Szlązak\**, *Czesław Kubaczka\*\**

## OKRESOWE ZMIANY WYDZIELANIA METANU DO WYROBISKA ŚCIANOWEGO W CZASIE PROWADZENIA EKSPLOATACJI\*\*\*

---

### 1. Wstęp

Wzrost koncentracji wydobywania w polskich kopalniach węgla kamiennego przyczynia się do znaczącego wzrostu metanowości bezwzględnej rejonów eksploatacyjnych. Zaznacza się to wzmożonym wydzielaniem metanu w ścianach, w kopalniach uznawanych za słabo metanowe, nieprzygotowanych do prowadzenia skutecznej profilaktyki, w tym i prowadzenia odmetanowania.

Wydzielanie metanu podczas wybierania ściany następuje z różnych źródeł, których lokalizacja oraz wielkość dopływu decyduje o kształtowaniu się zagrożenia oraz doborze profilaktyki. Głównym źródłem metanu są pokłady węgla, gdyż jest on gazem związanym ściśle z procesami uwęglenia i powstawania złóż węgla. Stopień nasycenia pokładów węgla metanem zależy jednak od wielu czynników, przede wszystkim od obecności lub braku nieprzepuszczalnych, izolujących warstw skalnych w nadkładzie, niepozwalających lub pozwalających na odgazowanie się i swobodny odpływ metanu z pokładu węgla do skał otaczających. Stąd w górnictwie węgla spotykany jest bardzo zróżnicowany stopień nasycenia pokładów węgla: od niemietanowych pokładów węgla zawierających tylko śladowe jego ilości tam, gdzie brak jest nadkładu izolującego, do bardzo silnie metanowych pokładów występujących w otoczeniu nieprzepuszczalnych ilowców lub łupków ilastych.

Widać z tego, jak bardzo mogą być zróżnicowane warunki zagrożenia metanowego w kopalniach: od bardzo znikomego aż do takiego, w którym bez zastosowania specjalnych środków zwalczania (wentylacyjne, odmetanowanie) prowadzenie robót górniczych byłoby niemożliwe. Od właściwej oceny zagrożenia metanowego, opracowanych prognoz tego zagrożenia, prowadzonych obserwacji i kontroli zagrożenia oraz podjętych środków profilaktycznych zależy więc bezpieczeństwo kopalni prowadzących eksploatację w pokładach węgla nasyconych metanem.

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków

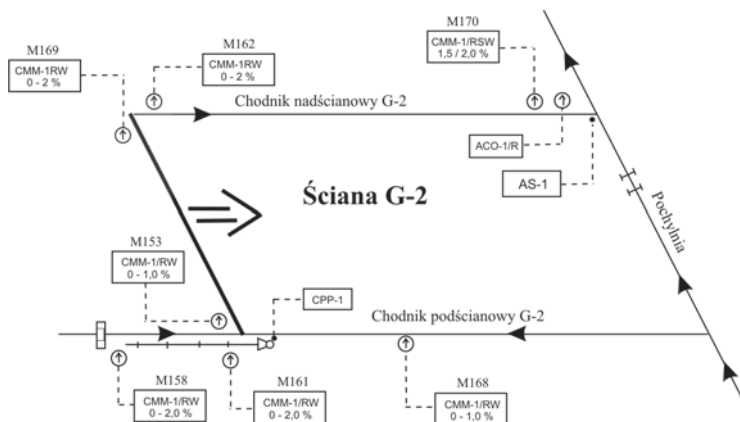
\*\* Jastrzębska Spółka Węglowa SA KWK Borynia-Zofiówka

\*\*\* Praca wykonana w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.371 finansowanej przez MNiSW

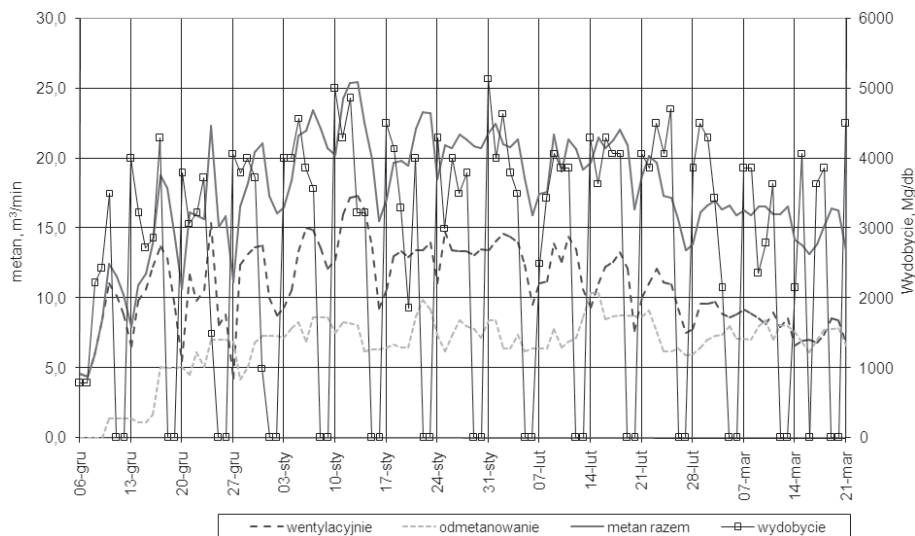
W okresach tygodniowych można zauważyć zmiany wydzielania metanu do wyrobiska ścianowego [4]. Zmiany te związane są bezpośrednio ze zmianą wielkości wydobywania. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony model zmian wydzielania metanu.

## 2. Zmiany wydzielania metanu w czasie eksploatacji

W celu zobrazowania zmian wydzielania metanu do wyrobiska ścianowego przeprowadzono pomiary zmian stężenia metanu w wyrobisku ścianowym. Na rysunku 1 pokazano schemat przestrzenny przewietrzania oraz lokalizację czujników w rejonie ściany G-2.



Rys. 1. Schemat przewietrzania ściany G-2 oraz rozmieszczenia czujników pomiarowych



Rys. 2. Zmiany wydzielania metanu w ścianie G-2

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany metanowości ściany G-2. Do szóstego tygodnia metanowość całkowita ściany wzrastała, osiągając  $25,5 \text{ m}^3/\text{min}$ . Po tym okresie w kolejnych pięciu tygodniach metanowość wynosiła około  $20 \text{ m}^3/\text{min}$ , by w ostatnim okresie eksploatacji ulec obniżeniu do  $15 \text{ m}^3/\text{min}$ . W tym czasie ściana była eksploatowana ze średnim postępowaniem ściany równym  $6,0 \text{ m}/\text{dobę}$ . Na rysunku 2 można zauważyć zmiany wydzielania metanu w okresach tygodniowych. W czasie sobotnio-niedzielnego postoju ściany obserwuje się zmniejszenie wydzielania metanu.

W celu zobrazowania tygodniowych zmian stężenia metanu na rysunku 3 (na wklejce) przedstawiono wykres stężenia metanu od poniedziałku 3 stycznia do niedzieli 9 stycznia. Na wykresie ramkowym (rys. 3) pokazano, w odniesieniu do danego dnia tygodnia, średnią wartość zaznaczoną w postaci punktu, 95-procentowy przedział ufności w postaci ramki oraz odchylenie standardowe w formie tzw. „wąsów”. Obserwując wykres, można zauważyć, że na wlocie do ściany po poniedziałkowym wdrożeniu utrzymuje się stałe stężenie metanu (rys. 3a). Na wylocie ze ściany po poniedziałkowym wdrożeniu utrzymuje się stężenie metanu pomiędzy  $0,8\%$  a  $0,9\%$ . Po zakończeniu eksploatacji w sobotę i niedzielę obserwuje się obniżenie stężenia metanu (rys. 3b). Natomiast na ostatnim wykresie (rys. 3c) obserwuje się systematyczny wzrost stężenia metanu od poniedziałku od wartości  $0,77\%$  do piątku do wartości  $1,20\%$ . Po zaprzestaniu eksploatacji (sobota i niedziela) stężenie metanu obniża się do wartości  $0,90\%$ . Cykl ten w okresach tygodniowych się powtarza.

### 3. Zależność opisująca zmianę wydzielania metanu w wyrobiskach ścianowych w cyklach tygodniowych

Przyjmując założenie, że zmiana prędkości wydzielania się metanu  $dq$  względem czasu  $dt$  proporcjonalna jest do ilości wydzielającego się metanu w danej chwili [5]  $q(t)$ , możemy napisać:

$$\frac{dq}{dt} = -\alpha \cdot q(t) \quad (1)$$

gdzie  $\alpha$  współczynnik proporcjonalności,  
a stąd:

$$q = A \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \quad (2)$$

gdzie  $A$  – stała zależna od nasycenia górotworu metanem i jego właściwości desorpcyjnych.

Rozpatrzmy przypadek, gdy wydobywanie ze ściany jest prowadzone ze stałym postępowaniem  $v = \text{const}$ . W związku z tym intensywność wydzielania metanu z pewnej objętości górotworu (rys. 4) będzie różna w zależności od współrzędnej bieżącej wybiegu ściany. Uwzględniając powyższe, czas  $t$  wypływu metanu z danej objętości, odległej od rozpatrywanej ściany o odległości  $x$  określa się wzorem:

$$t = t' - \frac{x}{v} \quad (3)$$

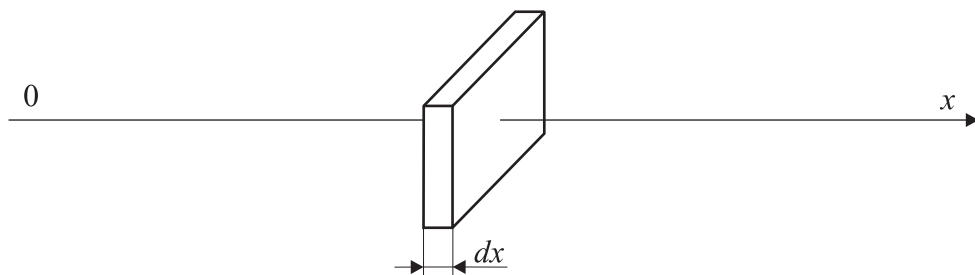
gdzie:

$t'$  — czas, jaki upłynął od rozpoczęcia eksploatacji ściany [doby],

$\frac{x}{v}$  — czas po jakim dana objętość górotworu uległa naruszeniu i rozpoczyna się wydzielanie metanu [doby],

$t' - \frac{x}{v}$  — czas naruszenia elementarnej objętości górotworu o współrzędnej  $x$ ,

$v$  — postęp frontu ściany [m/dobę].



Rys. 4. Schemat wydzielania metanu z elementarnej objętości

W dalszej kolejności następuje stabilizacja wydzielania metanu z objętości górotworu naruszonego wydobywaniem pokładu węgla. Ilość metanu wydzielającego się w danej chwili z elementarnej objętości odległej o  $x$  od rozpoczęcia ruchu ściany określa wzór:

$$dq = A_1 \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \left(t' - \frac{x}{v}\right)\right) dx \quad (4)$$

gdzie:

$$A_1 = LmA$$

$L$  — długość ściany [m],

$m$  — wysokość eksploatowanej ściany [m].

Mając powyższe na uwadze, ilość metanu wydzielającego się do wyrobiska ścianowego ze współrzędnej  $x$  określa zależność:

$$q = \int_0^x A_1 \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \left(t' - \frac{x}{v}\right)\right) dx \quad (5)$$

czyli

$$q = A_1 \cdot \frac{v}{\alpha} \left[ \exp\left(-\alpha \cdot \left(t' - \frac{x}{v}\right)\right) - \exp(-\alpha \cdot t') \right] \quad (6)$$

Jeżeli front ściany przemieszcza się ze stałą prędkością (eksploatacja jest prowadzona w sposób ciągły), wówczas  $t' = \frac{x}{v}$ , a ilość wydzielanego metanu określa wzór:

$$q = A_1 \cdot \frac{v}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha \cdot t')] \quad (7)$$

Jeżeli front ściany jest zatrzymany, wówczas  $t' \geq \frac{x}{v}$  i obowiązuje wzór (6). Zależność (6) można zapisać w następującej postaci:

$$q = A_1 \cdot \frac{v}{\alpha} \cdot \exp(-\alpha \cdot t') \cdot \left[ \exp\left(\alpha \cdot \frac{x}{v}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Jeżeli  $x = l$ , gdzie  $l$  – wybieg zatrzymanej ściany, to ilość metanu, która wydzieli się do zatrzymanego wyrobiska ścianowego, określa wzór:

$$q = A_1 \cdot \frac{v}{\alpha} \cdot \exp(-\alpha \cdot t') \cdot \left[ \exp\left(\alpha \cdot \frac{l}{v}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

który może być zapisany w postaci:

$$q = B_1 \cdot \exp(-\alpha \cdot t') \quad (10)$$

gdzie  $B_1$  – współczynnik zależny od postępu ściany do chwili jej zatrzymania, właściwości skał i ciśnienia gazu w górotworze. Wartość współczynnika  $B_1$  może być wyznaczana z pomiarów przy zatrzymanym biegu ściany.

W celu oszacowania współczynników  $A_1$  i  $\alpha$  w równaniu (7) i (10) skorzystano z modelu regresji, w którym określa się zależność pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną. Skorzystano z procedury zawartej w programie Statistica 8.0 [6], która wykorzystuje algorytm Levenberga–Marquardta (nieliniowa metoda najmniejszych kwadratów). Przy stosowaniu funkcji najmniejszych kwadratów w celu znalezienia ocen parametrów nie ma potrzeby obliczania (lub przybliżonego szacowania) pochodnych cząstkowych drugiego rzędu. Zamiast tego w każdym kroku algorytm rozwiązuje układ równań liniowych do obliczenia gradientu, co jest stosunkowo łatwe i szybkie (w porównaniu z innymi technikami optymalizacyjnymi). Metoda Levenberga–Marquardta (LM) stanowi rozszerzenie i modyfikację metody Gaussa–Newtona umożliwiającą otrzymywanie rozwiązań zagadnień nieliniowych najmniejszych kwadratów.

W tabeli 1 przedstawiono wyznaczone wartości współczynników na podstawie prowadzonych pomiarów w wyrobiskach ścianowych [4]. Mając wyznaczone wartości współczynników, można aproksymować zmianę wydzielania metanu ze ściany eksploatacyjnej. Aby obliczyć spadek wydzielania metanu podczas przerw w wydobywaniu, można korzystać z zależności:

$$q_{1,2,\dots,n} = B_1 \cdot \exp(-\alpha_{\text{średnie}} \cdot t_{1,2,\dots,n}) \quad (11)$$

Jak widać z powyższego, współczynnik  $B_1$  jest w tym przypadku każdorazowo ilością metanu wydzielającego się do zatrzymanego wyrobiska ścianowego. Po ponownym wznowieniu wydobywania krzywa wzrostu wydzielania metanu może być aproksymowana zależnością:

$$q = A_1 \cdot \frac{v}{\alpha_{\text{średnie}}} \cdot (1 - \exp(-\alpha_{\text{średnie}} \cdot t)) + q_o \quad (12)$$

gdzie  $q_o$  – ilość metanu w czasie jej postoju.

TABELA 1

Wartości współczynników  $A_1$  i  $\alpha$

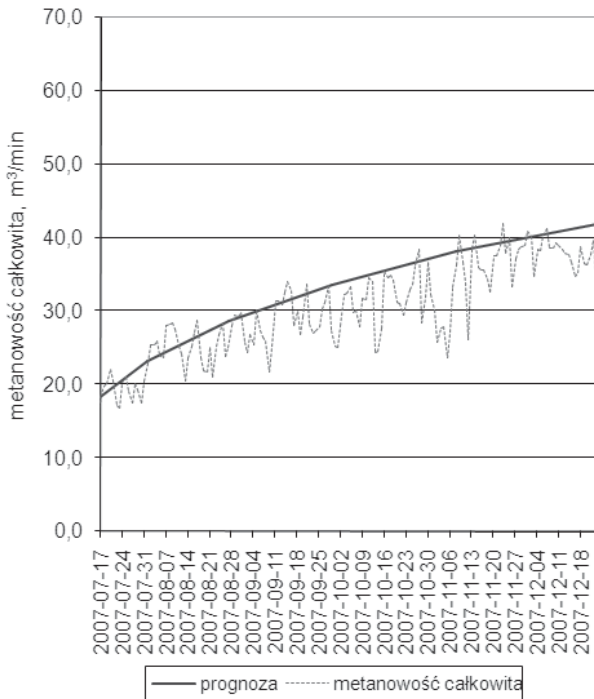
Ściana	Parametr	Wartość parametru	Błąd standardowy	Wartość $t$	Poziom prawdopodobieństwa	Dolna granica ufności	Górna granica ufności	Udział wyjaśnionej wariancji $R^2$	$r$
B-7	$A_1$	1,259	0,276	4,554	1,000	0,692	1,825	0,903	0,950
C-6		0,150	0,039	3,871	0,999	0,071	0,229	0,822	0,907
F-2		1,022	0,550	1,857	0,924	-0,116	2,159	0,462	0,679
F-27		0,609	0,149	4,096	1,000	0,308	0,910	0,773	0,879
G-6a		1,099	0,354	3,101	0,996	0,373	1,824	0,790	0,889
N-10		0,452	0,142	3,189	0,997	0,167	0,737	0,894	0,945
N-15		0,443	0,110	4,014	1,000	0,220	0,665	0,934	0,966
		średnia	0,719						

B-7	$\alpha$	0,242	0,088	7,764	0,959	0,061	0,423	0,916	0,957
C-6		0,256	0,099	14,199	0,930	0,054	0,458	0,874	0,935
F-2		0,269	0,218	9,706	0,815	-0,183	0,720	0,693	0,833
F-27		0,336	0,114	10,452	0,992	0,105	0,567	0,840	0,916
G-6a		0,145	0,008	17,658	1,000	0,128	0,162	0,866	0,931
N-10		0,351	0,149	8,218	0,976	0,050	0,651	0,896	0,947
N-15		0,176	0,091	11,047	0,902	-0,008	0,361	0,959	0,979
		średnia	0,254						

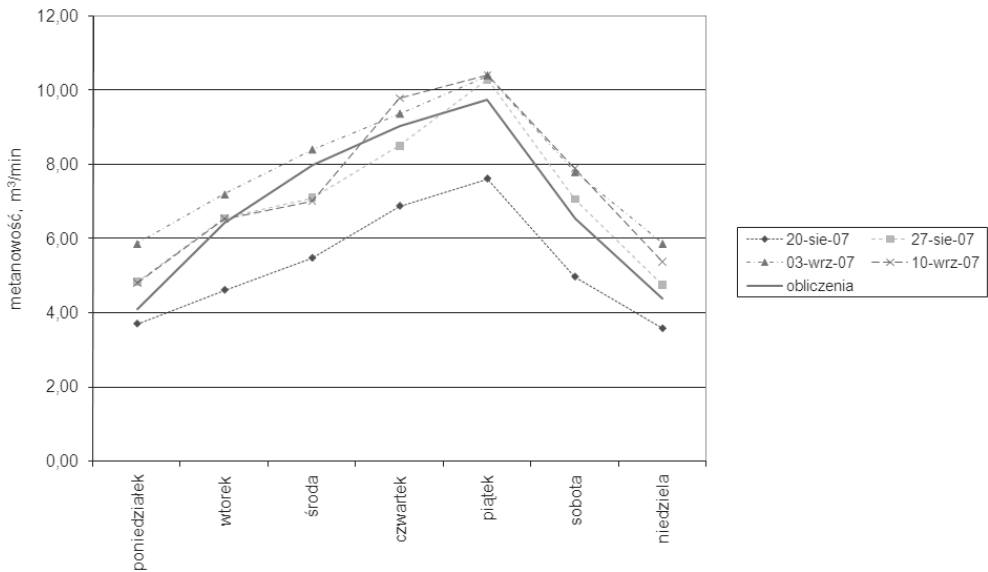
## 4. Porównanie wyników pomiarów wydzielania metanu do wyrobiska ścianowego z obliczeniami

Analizując wydzielanie metanu do wyrobisk ścianowych, można zauważyć wzrost wydzielania podczas prowadzenia eksploatacji oraz spadek wydzielania podczas przerw w wydobywaniu [4]. Typowy przebieg zmian wydzielania metanu ze ściany w czasie przedstawia rysunek 5. Na rysunkach 6–9 przedstawiono zmiany wydzielania metanu w okresach tygodniowych oraz aproksymację tych wyników zależnościami (11) i (12). W tych zależnościami wykorzystano średnie wartości współczynników zamieszczone w tabeli 1. Wyznaczone wartości współczynników mogą posłużyć do prognozowania wydzielania metanu przy okresowych przerwach w prowadzeniu wydobywania. Na rysunku 10 zamieszczono prognozowaną zmianę wydzielania metanu przy okresowych przerwach w wydobywaniu oraz porównano tę zmianę z wydzielaniem metanu przy ciągłym prowadzeniu wydobywania. Prowadzenie wydobywania w sposób ciągły charakteryzuje się równomiernym i ustabilizowanym wydzielaniem metanu.

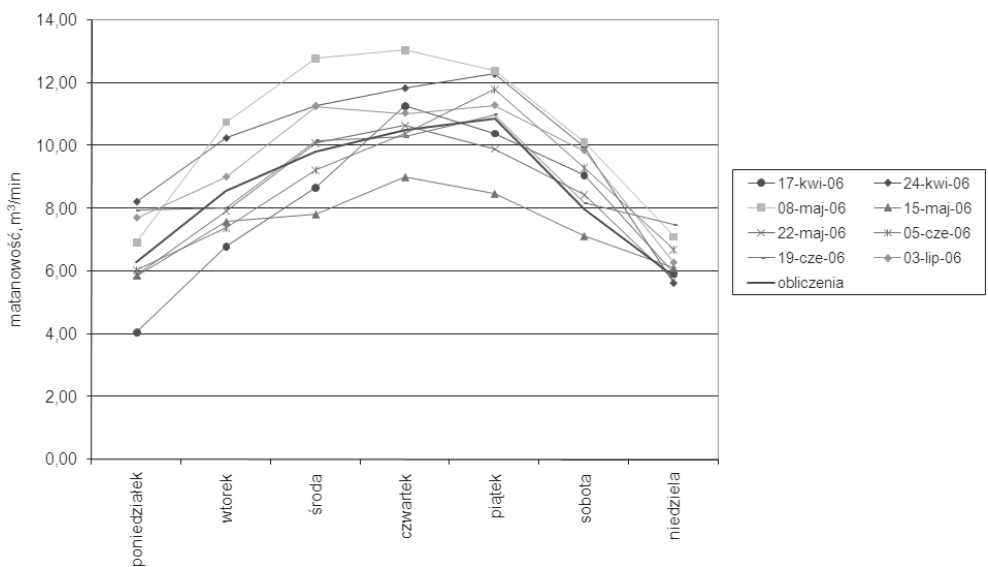
Podane zależności umożliwiają na bieżąco ocenę stanu zagrożenia metanowego w wyrobiskach ścianowych. Jednak do oceny tego stanu niezbędne jest posiadanie informacji dotyczących wcześniejszego wydzielania metanu w wyrobiskach eksploatacyjnych kopalni.



Rys. 5. Zmiany wydzielania metanu w czasie dla ściany N-15 w pokładzie 328/1

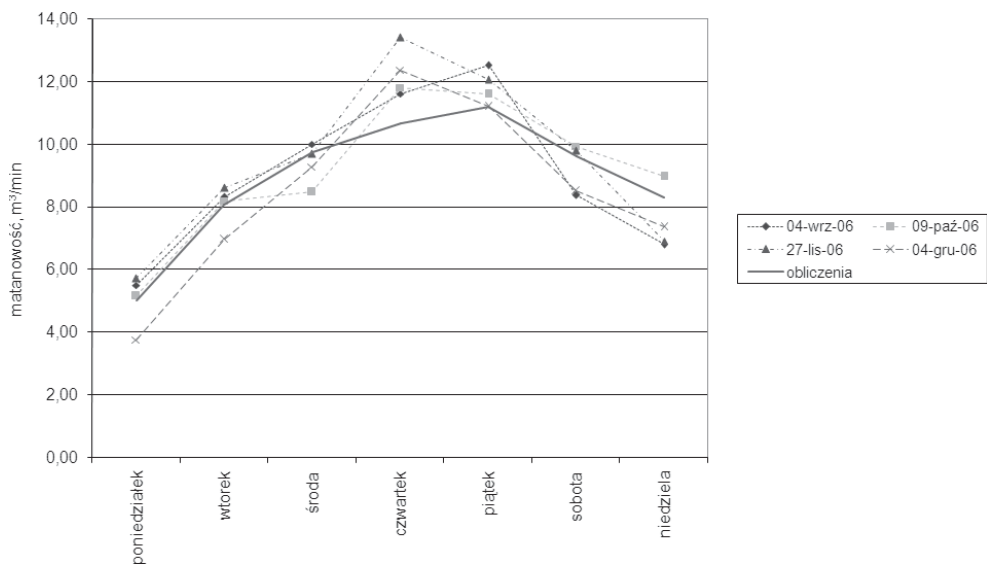


Rys. 6. Zmiana wydzielania metanu w ścianie G-6a w wybranych tygodniach

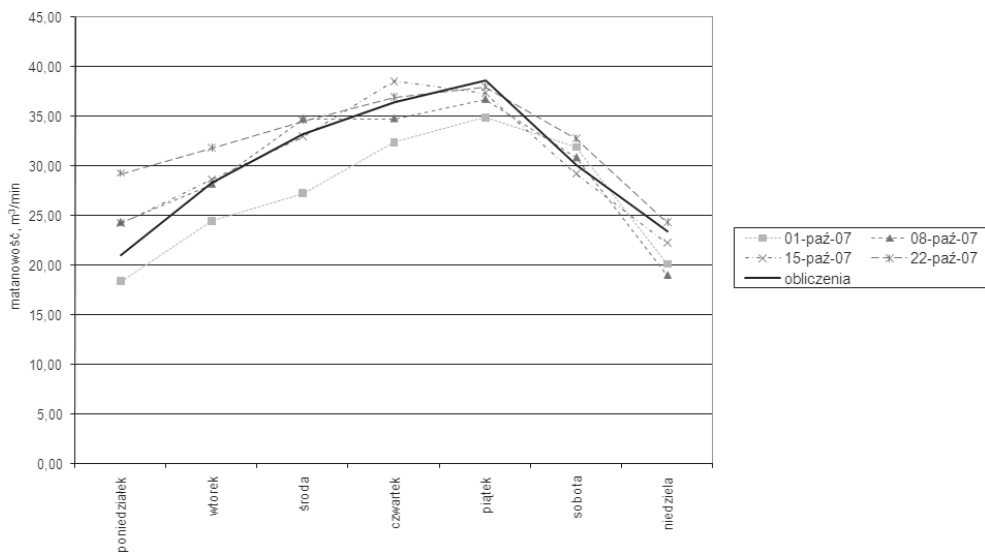


Rys. 7. Zmiana wydzielania metanu w ścianie F-27 w wybranych tygodniach

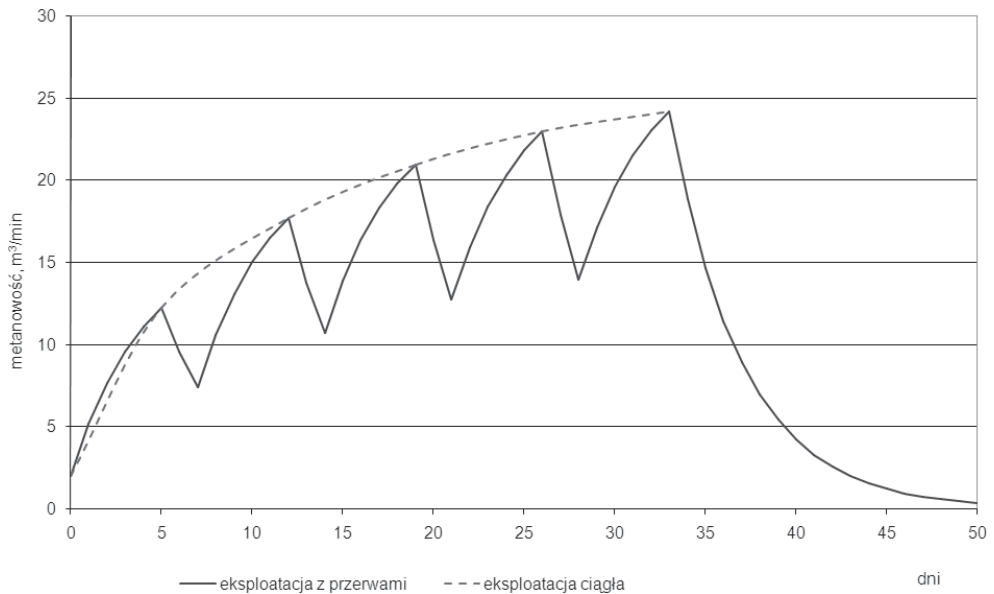




Rys. 8. Zmiana wydzielania metanu w ścianie F-2 w wybranych tygodniach



Rys. 9. Zmiana wydzielania metanu w ścianie B-7 w wybranych tygodniach



**Rys. 10.** Zmiana wydzielania metanu przy okresowych przerwach w wydobywaniu oraz ciągłym prowadzeniu wydobywania

## 5. Wnioski

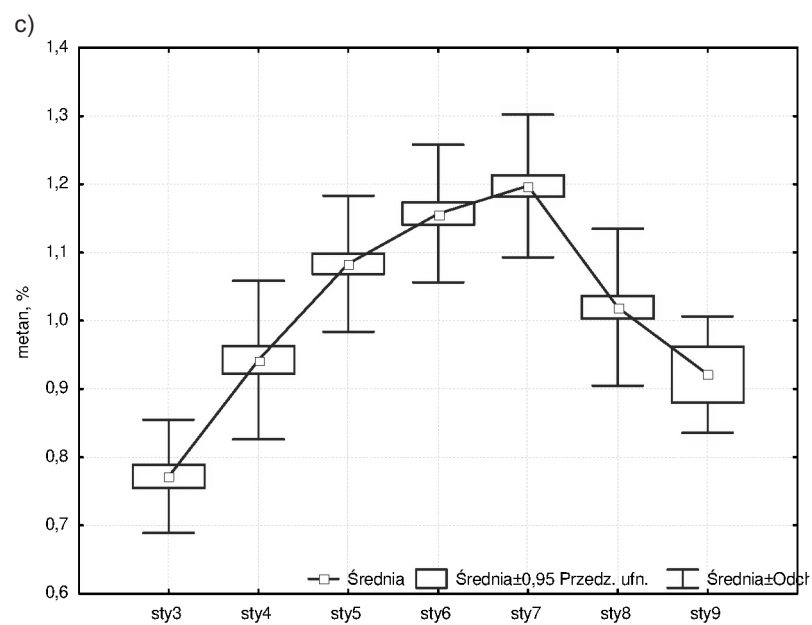
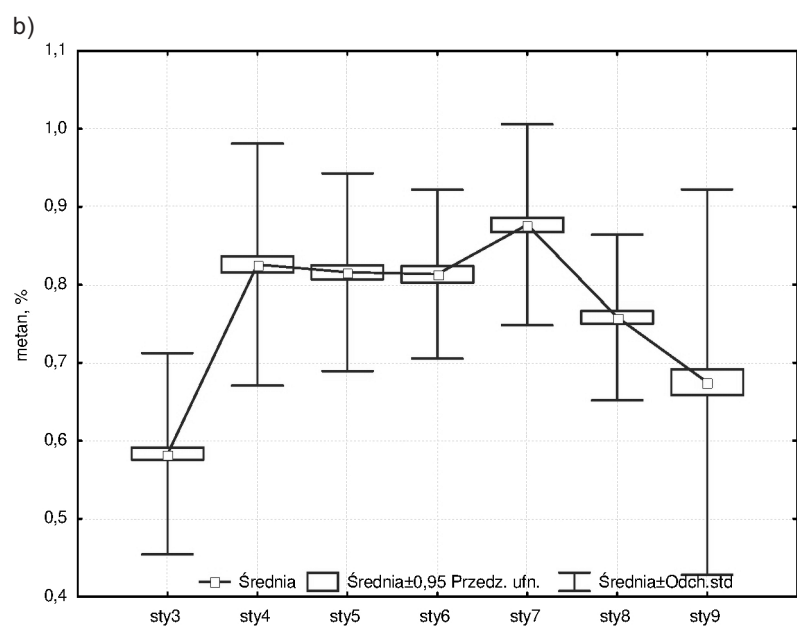
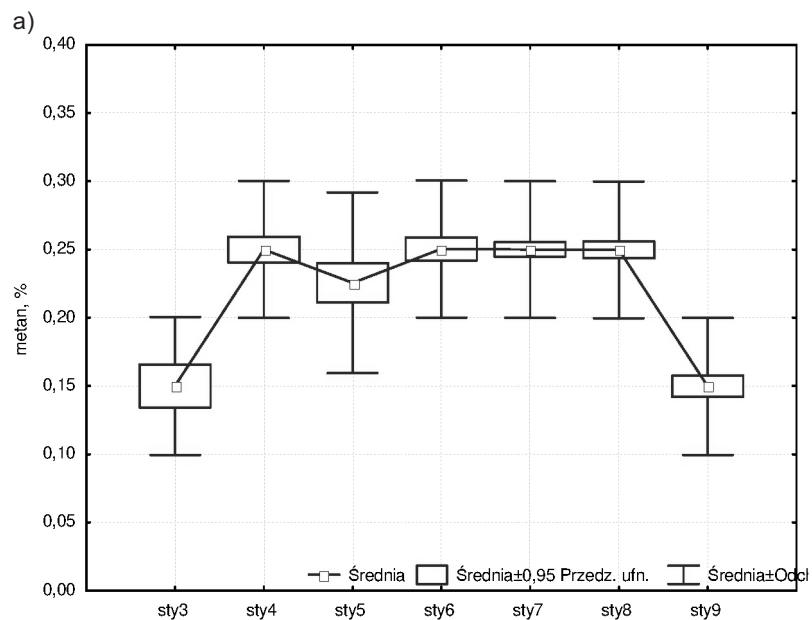
Wydzielanie metanu w okresach tygodniowych ulega zmianie i jest ściśle związane z prowadzeniem wydobywania. Na początku tygodnia następuje stały wzrost wydzielania metanu, który osiąga swoje maksimum w ostatnim dniu prowadzenia wydobywania. W okresie przerw w wydobywaniu wydzielanie metanu do wyrobiska ścianowego się obniża. Zmiany wydzielania metanu w cyklach tygodniowych mogą być opisane przedstawionymi w artykule zależnościami.

Opracowany model matematyczny wydzielania metanu w czasie prowadzenia eksploatacji ściany może być wykorzystany do bieżącej oceny stanu zagrożenia metanowego w wyrobiskach ścianowych oraz prognozowania zmian wydzielania metanu w projektowanych ścianach. Model ten pozwala na opisanie zjawiska zmienności wydzielania metanu w zależności od wielkości postępu ściany. Jednak do oceny tego stanu niezbędne jest posiadanie informacji dotyczących wcześniejszego wydzielania metanu w wyrobiskach eksploatacyjnych kopalni, co umożliwi wyznaczenie występujących we wzorach współczynników.

### LITERATURA

- [1] *Badura H.*: Zastosowanie teorii szeregów czasowych do prognozy krótkoterminowej metanowości. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo*, z. 250, 2001
- [2] *Borowski M., Szlązak N., Obracaj D.*: Wydzielanie metanu w wyrobisku ścianowym – Methane emission to a longwall. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, Research Reports. Mining & Environment / Główny Instytut Górnictwa, Katowice*, nr 2 wyd. spec., 2007, s. 218–230

- [3] *Krause E., Cybulski K., Lukowicz K.*: Wpływ koncentracji wydobywania na kształtowanie się zagrożenia metanowego w wyrobiskach środowiska ściany. Materiały 1. Szkoły Aerologii Górniczej, 1999
- [4] *Kubaczka C.*: Wpływ wielkości wydobywania na stan zagrożenia metanowego w rejonie ściany eksploatacyjnej. Praca doktorska AGH, Kraków, 2009
- [5] *Roszkowski J.*: Wydzielanie się metanu do kamiennych wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych. Zeszyty Problemowe Górnictwa, Komitet Górnictwa PAN, z. 1, tom 7, 1969
- [6] *Statistica 8.0* – Pakiet programów statistica, StatSoft Polska Sp. z o.o., 2007
- [7] *Szlązak J., Szlązak N.*: Zagrożenie metanowe w zrobach ścian zawałowych – Methane hazard in goaf of longwalls with caving. Przegląd Górniczy, t. 61, nr 10, 2005, s. 20–30
- [8] *Szlązak J., Szlązak N.*: Filtracja powietrza w zrobach ścian zawałowych, Górnictwo (kwartalnik AGH), r. 25 z. 4, 2001
- [9] *Szlązak J., Szlązak N.*: Numerical determination of methane concentration in goaf space, Archives of Mining Sciences, vol. 49, iss. 4, 2004



**Rys. 3.** Wykresy ramkowe tygodniowych zmian stężeń metanu w ścianie G-2 (3–9 stycznia): a) czujnik metanu na wlocie do ściany; b) czujnik metanu na wylocie ze ściany; c) czujnik na wylocie z chodnika nadścianowego