



Dr inż. Henryk Koptoń<sup>\*)</sup>

## Uwzględnienie własności sorpcyjnych węgla przy prognozowaniu metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych przy użyciu środków strzałowych

### Consideration of the sorption properties of coal when forecasting absolute methane bearing capacity of the roadway workings driven by using explosives

**Treść:** W artykule przedstawiono założenia metodologii prognozowania absolutnej emisji metanu do wyrobisk chodnikowych napełnianych za pomocą materiałów wybuchowych w kopalniach węgla kamiennego. Metodologia ta została opracowana w 2011 roku, przy wykorzystaniu wyników badań przeprowadzonych w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach (oraz w polskich kopalniach węgla kamiennego). Metoda ta, w porównaniu z dotychczas używaną, uwzględnia dodatkowo wpływ własności sorpcyjne węgla, kinetykę emisji metanu, jak również kształt i zasięg strefy desorpcji wokół wyrobisk korytarzowych. Prognoza metanowości stanowi zawsze podstawę do racjonalnego doboru środków prewencyjnych w przedmiotowym zakresie, więc w konsekwencji ma istotny wpływ na bezpieczeństwo robót górniczych.

**Abstract:** This paper presents the assumptions of forecasting the absolute methane bearing capacity methodology of the roadway workings driven by the use of explosives in the hard coal mines. This methodology was developed in 2011, using the results of investigations carried out in Central Mining Institute in Katowice (and Polish hard coal mines). This method comparing to the previously used ones, takes additionally into consideration the sorption properties influence, kinetics of methane emission as well as the shape and extend of the desorption zone around the roadway workings. The forecast of methane bearing capacity constitutes always the basis for rational selection of methane prophylaxis means, so consequently has a substantial impact on the mining works safety.

#### Słowa kluczowe:

bezpieczeństwo, górnictwo, zagrożenie metanowe, prognoza

#### Key words:

safety, mining, methane hazard, forecast

## 1. Wprowadzenie

Wydzielanie metanu przy prowadzeniu robót górniczych skutkujące niejednokrotnie zagrożeniem wybuchowym, nadal jest niebezpiecznym zjawiskiem występującym nie tylko w polskich kopalniach węgla kamiennego. Wzrost tego zagrożenia wynika zarówno z coraz większej głębokości prowadzonych robót, jak i ich intensyfikacji. Ilość wydzielającego się metanu, zwana metanowością bezwzględną i wyrażana w m<sup>3</sup>/min, wywiera bezpośredni wpływ na poziom bezpieczeństwa prowadzonych robót związanych z prowadzeniem eksploatacji, jak i drażeniem wyrobisk korytarzowych. W świetle powyższego bardzo istotne jest dokładne wyprzedzające oszacowanie prognozowanego wydzielania metanu do drażonych wyrobisk, aby można było *a priori* dobrać właściwe środki prewencyjne, które zabezpieczą przed jego zapłonem.

Technologia drażenia wyrobisk korytarzowych (węglowo-kamiennych i węglowych) przy użyciu materiałów wybuchowych (MW) jest obecnie rzadziej stosowana niż kilkadziesiąt lat temu z uwagi na mniejszy postęp dobowy, niż w przypadku zastosowania kombajnu. Dzisiaj, zastosowanie MW przy drażeniu wynika z wysokiego poziomu zagrożenia metanowego, zagrożenia wyrzutami gazów i skał, czy też

zagrożenia tąpnięciami. Dotychczas stosowana metodologia prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk drażonych z użyciem MW opiera się na badaniach prowadzonych ponad 30 lat temu. Stosowanie tzw. „starej” metodologii prognozowania powoduje zatem znaczną rozbieżność między prognozą a stanem rzeczywistym (Koptoń 2011).

W roku 2011, w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa została opracowana nowa metodyka prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk prowadzonych przy użyciu MW [5]. Opracowanie tej metodyki było celem naukowym prac związanych z działalnością statutową Głównego Instytutu Górnictwa. W metodzie tej wykorzystano między innymi założenia metody prognozowania metanowości wyrobisk drażonych kombajnami w kopalniach węgla opracowanej w 2009 roku w Głównym Instytucie Górnictwa [5].

## 2. Nowa metoda prognozy metanowości wyrobisk korytarzowych drażonych przy użyciu materiałów wybuchowych w kopalniach węgla

Celem prognozy zagrożenia metanowego jest w miarę dokładne oszacowanie maksymalnego poziomu wydzielania metanu do wyrobiska (w tym przypadku korytarzowego wy-

<sup>\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”

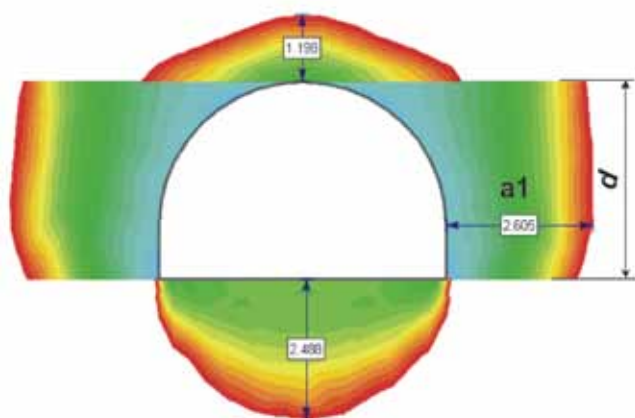
robiska, węglowego lub węglowo-kamiennego, drażonego z użyciem MW), dla którego dobierane będą odpowiednie środki prewencyjne. Dla opracowania prognozy metanowości konieczne jest zestawienie następujących materiałów wyjściowych:

- mapy z naniesionym wybiegiem projektowanego wyrobiska oraz wynikami badań metanonośności w rejonie, a także z naniesionymi krawędziami eksploatacji, uskokami, itp.,
- przekroje geologiczne otworów badawczych z naniesioną miąższością pokładu, w którym będzie prowadzone wyrobisko, jak i pokładów sąsiednich, kotami ich zalegania oraz, jeżeli to możliwe – wynikami badań metanonośności,
- dane dotyczące właściwości fizyko chemicznych węgla w pokładzie, jak: wilgoć całkowita, wytrzymałość węgla na ściskanie, zawartość popiołu, pojemność sorpcyjna względem metanu, wartość współczynnika dyfuzji,
- dane organizacyjno-techniczne projektowanego wyrobiska (rodzaj obudowy, wybieg, rodzaj i wydajność kombajnu, założony postęp dobowy, zabiór, ilość zmian roboczych itp.).

Należy przyjąć zasadę, że im bardziej szczegółowe i dokładne są materiały wyjściowe, tym prognoza metanowości może być sporządzona dokładniej.

## 2.1. Strefa desorpcji w otoczeniu wyrobiska korytarzowego

Wyrobisko prowadzone w złożu metanowym otoczone jest strefą odgazowania, tzw. strefą desorpcji [14, 15]. Założono, że kształt i zasięg tej strefy porównywalny jest z zasięgiem strefy spękań, czyli strefą zniszczenia górotworu w otoczeniu wyrobiska. Wtedy metan z węgla zalegającego w tej strefie, wydziela się do wyrobiska. W przypadku wyrobisk prowadzonego w pokładzie o grubości nie przekraczającej wysokości wyrobiska, istotny jest zasięg tej strefy w ociosach  $a_1$ . Natomiast podczas drażenia wyrobiska w pokładzie grubym, ważny jest także zasięg tej strefy w stropie  $b_1$  lub w spągu  $b_2$



Rys. 1. Wyrobisko w obudowie LP9 na poziomie 800 m, miąższość pokładu 3,5 m, wytrzymałość węgla na ściskanie  $R_c = 15$  MPa [12]

Fig. 1. Working with LP9 support on the 800 m level, seam thickness 3.5 m, coal compressive strength  $R_c = 5$  MPa [12]

$a_1$  – zasięg strefy zniszczenia pokładu w ociosach wyrobiska korytarzowego, m  
 $d$  – miąższość pokładu,  
 $a_1$  – range of the crack zone in the working's side walls, m  
 $d$  – seam thickness, m

w zależności od tego, czy wyrobisko jest drażone pod stropem, czy też po spągu pokładu.

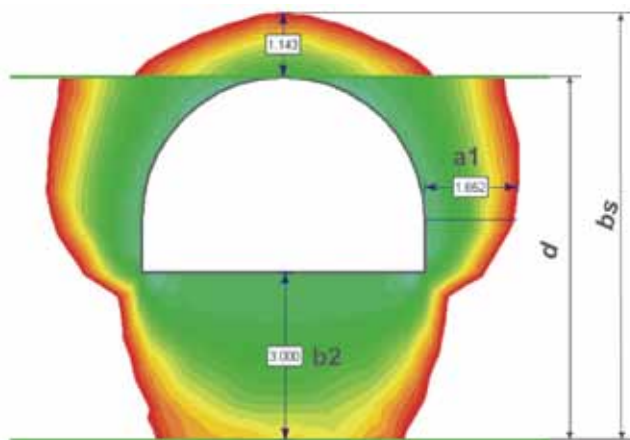
Przy opracowywaniu modelu matematycznego prognozy metanowości dla wyrobisk korytarzowych drażonych z użyciem MW uwzględniono wyniki badań ukierunkowanych na określenie zasięgu strefy zniszczenia górotworu w otoczeniu wyrobiska korytarzowego, które wykonali St. Prusek i A. Walentek [12]. Zasięg strefy, w której nastąpiło zniszczenie górotworu wokół wyrobiska, uzyskano w wyniku obliczeń wykorzystujących metodę elementów skończonych, z założeniem kryterium wytrzymałościowego Hoeka-Browna dla ośrodka sprężystego. Jako przykład, na rysunkach 1 i 2 przedstawiono mapy wyteżenia pokazujące wpływ odpowiednich czynników na zasięg tej strefy.

Uwzględniając wyniki symulacji na przyjętym modelu górotworu oraz empiryczne zależności między nimi, określono zasięg strefy zniszczenia w otoczeniu wyrobiska korytarzowego dla charakterystycznych wartości danych czynników. Przykładowe uwarunkowania zasięgu strefy zniszczenia górotworu w ociosach wyrobiska  $a_1$  z uwzględnieniem wytrzymałości węgla na ściskanie równej 15, 20 i 30 MPa, miąższości pokładu i głębokości zalegania przedstawiono w tablicy 1.

Opierając się na wynikach analizy wykonanych obliczeń numerycznych, opracowano wzory empiryczne określające zasięg strefy desorpcji dla prowadzonego wyrobiska korytarzowego ( $a_1$ ,  $b_1$  i  $b_2$ ), pole powierzchni  $F_d$  jej węglowej części w przekroju poprzecznym oraz objętość jej części węglowej  $Q_p$ , w zależności od występujących warunków. Dla przykładu na rysunku 3 przedstawiono przekrój podłużny przyjętego zasięgu strefy desorpcji dla wyrobisk prowadzonego pod stropem – w grubym pokładzie (przekrój poprzeczny rys. 2). Przyjęto, że zasięg strefy zniszczenia w stropie  $b_1$  oraz w spągu  $b_2$  w przypadku, gdy wyrobisko jest prowadzone w obudowie LP9 odpowiednio po spągu lub pod stropem pokładu, wynosi

$$b_1 = 1,18 \cdot a_1, \text{ m} \quad (1)$$

$$b_2 = 2,47 \cdot a_1, \text{ m} \quad (2)$$



Rys. 2. Wyrobisko w obudowie LP9 na poziomie 800m, prowadzone pod stropem pokładu o miąższości 6,5 m, wytrzymałość węgla na ściskanie  $R_c = 15$  MPa [12]

Fig. 2. Working with LP9 support on the 800m level, conducted under the roof of a seam 6.5 m in thickness, coal compressive strength  $R_c = 15$  MPa [12]

$b_2$  – zasięg strefy desorpcji w spągu, m  
 $b_1$  – wysokość strefy desorpcji, m  
 $b_2$  – zone range in the floor, m  
 $b_s$  – height of the desorption zone, m

**Tablica 1. Kształtowanie się zasięgu strefy zniszczenia górotworu w ociosie wyrobiska korytarzowego  $a_1$  (w metrach) przy wytrzymałości węgla w pokładzie na ściskanie węgla 5, 15 i 20 MPa, miąższości pokładu  $d$  i głębokości jego zalegania [4]**

**Table 1. Range of the rock mass destruction zone in side walls of the roadway working  $a_1$  (in metres) dependent on the compressive strength of coal in the seam 5, 15 and 20 MPa, its thickness  $d$  and occurrence depth [4]**

Obudowa ŁP9	$R_c = 5 \text{ MPa}$	Głębokość, m							
		500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$d =$	1,6 m	2,37	2,48	2,59	2,70	2,81	2,92	2,98	3,14
$d =$	2,5 m	2,32	2,43	2,54	2,65	2,76	2,87	2,94	3,09
$d =$	3,5 m	2,28	2,39	2,50	2,61	2,72	2,83		3,05
$d =$	6,5 m	2,22	2,33	2,44	2,55	2,66	2,77	2,88	2,99
$d_{pp} =$	6,5 m	2,30	2,41	2,52	2,63	2,74	2,85	2,96	3,07
Obudowa ŁP9	$R_c = 15 \text{ MPa}$	Głębokość, m							
		500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$d =$	1,6 m	1,61	1,72	1,83	1,94	2,05	2,16	2,27	2,38
$d =$	2,5 m	1,49	1,61	1,73	1,84	1,96	2,07	2,18	2,30
$d =$	3,5 m	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98	2,09	2,20
$d =$	6,5 m	1,32	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98	2,09
$d_{pp} =$	6,5 m	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98	2,09	2,20
Obudowa ŁP9	$R_c = 20 \text{ MPa}$	Głębokość, m							
		500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$d =$	1,6 m	1,29	1,4	1,51	1,62	1,73	1,84	1,95	2,06
$d =$	2,5 m	1,26	1,37	1,48	1,59	1,7	1,81	1,92	2,03
$d =$	3,5 m	1,19	1,31	1,43	1,55	1,67	1,79	1,91	2,03
$d =$	6,5 m	1,11	1,22	1,33	1,44	1,55	1,66	1,77	1,88
$d_{pp} =$	6,5 m	1,21	1,32	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98
Obudowa ŁP8	Wartości o ok. 4 % niższe od wartości dla obudowy ŁP9								
Obudowa ŁP10	Wartości o ok. 10 % wyższe od wartości dla obudowy ŁP9								
Obudowa ŁP11	Wartości o ok. 17 % wyższe od wartości dla obudowy ŁP9								
Obudowa ŁPrP 30	Wartości o ok. 5 % większe od wartości dla obudowy ŁP9								

W przypadku obudowy typu ŁPrP 30 można przyjąć, że

$$b_1 = 1,17 \cdot a_1, \text{ m} \quad (3)$$

$$b_2 = 1,8 \cdot a_1, \text{ m} \quad (4)$$

Uwzględniając zmiany grubości pokładu węgla oraz wymiary wyrobiska, przyjęto następujące przekroje poprzeczne części węglowej strefy desorpcji  $F_d$ :

–  $F_d = F_o$  dla wyrobisk korytarzowych drążonych w pokładach o miąższości  $d$  nie większej niż wysokość wyrobiska  $b$

$$F_o = 2 \cdot a_1 \cdot d, \text{ m}^2 \quad (5)$$

–  $F_d = F_p$  dla wyrobisk korytarzowych drążonych w obudowie ŁP w pokładach o miąższości większej od wysokości wyrobiska

$$\text{gdy } d \geq 0,8b_s \quad F = 0,8 \cdot (a + 2a_1) \cdot b_s - 0,8 \cdot a \cdot b, \text{ m}^2 \quad (6)$$

$$\text{gdy } d < 0,8b_s \quad F = 0,8 \cdot (a + 2 \cdot a_1) \cdot d - 0,8 \cdot a \cdot b, \text{ m}^2 \quad (7)$$

–  $F_d = F_{ps}$  dla wyrobisk korytarzowych drążonych w obudowie ŁPrP 30 w pokładach o miąższości większej od wysokości wyrobiska, przy założeniach jak wyżej z tym, że odejmujemy wartość  $0,9ab$

$$F_{ps} = 0,8 \cdot (a + 2 \cdot a_1) \cdot b_s - 0,9 \cdot a \cdot b, \text{ m}^2 \quad (8)$$

gdzie

$a$  – szerokość wyrobiska w wyłomie, m,  
 $b$  – wysokość wyrobiska w wyłomie, m,  
 $d$  – miąższość pokładu – suma grubości warstw węgla w strefie  $\sum d_w$ , m,

$a_1$  – zasięg strefy spękań w ociosach wyrobiska, m,

$b_s$  – wysokość strefy desorpcji, m,

w przypadku, gdy wyrobisko drążone jest pod stropem  $\rightarrow$

$$b_s = b + b_2$$

w przypadku, gdy wyrobisko drążone jest po spągu  $\rightarrow$

$$b_s = b + b_1$$

gdzie

$b_1$  – zasięg strefy w stropie, m,

$b_2$  – zasięg strefy w spągu, m.

Zakładając, że kształt strefy desorpcji przed frontem przodka odpowiada przedstawionemu na rysunku 3 (Koptoń 2009), objętość jej części węglowej  $Q_p$  w uproszczeniu możemy obliczyć ze wzorów

–  $Q_p = Q_{p1}$  dla wyrobisk korytarzowych drążonych w pokładach o miąższości nieprzekraczającej ich wysokości

$$Q_{p1} = (a_1 + a) \cdot d \cdot a_1, \text{ m}^3 \quad (9)$$

–  $Q_p = Q_{p2}$  dla wyrobisk korytarzowych drążonych w pokładach o miąższości większej od wysokości wyrobiska

$$\text{gdy } d \geq 0,8b_s \quad Q_{p2} = 0,56 \cdot (a + a_1) \cdot a_1 \cdot b_s, \text{ m}^3 \quad (10)$$

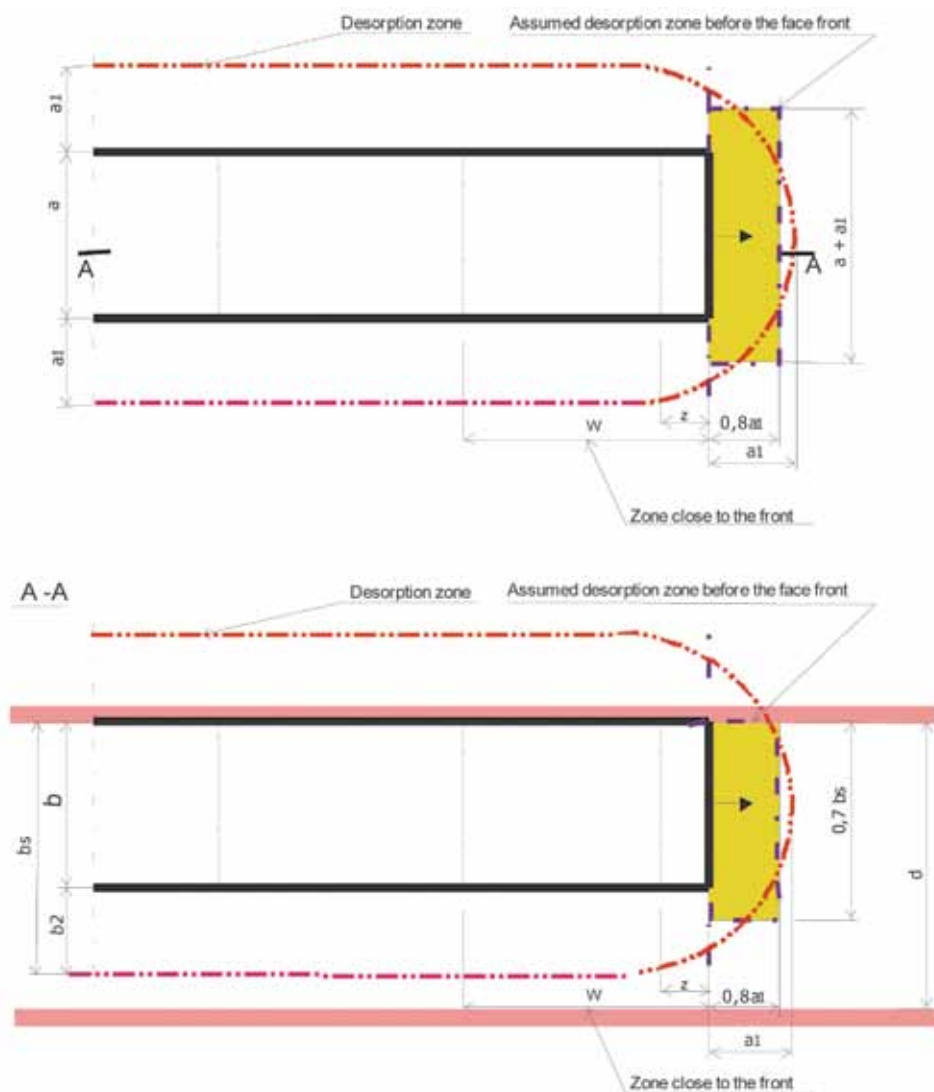
$$\text{gdy } d < 0,8b_s \quad Q_{p2} = 0,56 \cdot (a + a_1) \cdot a_1 \cdot d, \text{ m}^3 \quad (11)$$

(oznaczenia jak wyżej).

## 2.2. Model matematyczny prognozy metanowości wyrobisk (węglowych i węglowo-kamiennych) drążonych z wykorzystaniem MW

Do budowy modelu prognozy metanowości wyrobiska korytarzowego (węglowego lub węglowo-kamiennego) drążonego przy użyciu MW, podobnie jak przy drążeniu za pomocą kombajnu, przyjęto następujące założenia:

- uwzględnione jest wydzielanie się metanu do przestrzeni wyrobiska z pokładu w którym jest ono drążone, względnie węgla zalegającego w strefie desorpcji,
- pokład, w którym drążone jest wyrobisko, jest jednorodny pod względem właściwości fizykochemicznych na całej długości,



Rys. 3. Przyjęty zasięg strefy desorpcji dla przodków drażonych pod stropem w grubym pokładzie [4]

Fig. 3. Assumed range of desorption zone for a working driven under the roof in a thick seam [4]

- kształt i zasięg strefy desorpcji odpowiada zasięgowi strefy zniszczenia górotworu w otoczeniu wyrobiska określonej z wykorzystaniem kryterium Hoeka-Browna [1],
- wydzielanie metanu z węgla określają wzory wynikające z metody J.P. Seidla [9, 11], opartej na równaniu II prawa Ficka,
- model nie zakłada nagłych wpływów metanu do wyrobiska na skutek zaistnienia wstrząsu górotworu, wyrzutu, czy też tzw. fukaczy metanu,
- model nie uwzględnia dodatkowego dopływu metanu ze zrobów poeksploatacyjnych w przypadku, gdy wyrobisko będzie prowadzone w ich sąsiedztwie.

Roboty związane z drażeniem wyrobisk korytarzowych koncentrują się przede wszystkim w tzw. strefie przyprzodkowej. Dlatego też, poziom wydzielania się metanu, a zatem i jego prognozowanie w tej strefie mają decydujący wpływ na bezpieczeństwo prowadzenia robót. W związku z powyższym, w modelu matematycznym, ilość metanu wydzielającego się do drażonego wyrobiska  $\dot{V}_m$  (zgodnie z rysunkiem 4) możemy rozpatrywać jako sumę:

- ilości metanu wydzielającego się z urobku podczas wykonywania pojedynczego zabioru przy użyciu MW ( $\dot{V}_{mpuMW}$ ),

- ilości metanu wydzielającego się z węgla zalegającego w strefie desorpcji wokół wyrobiska w założonej strefie przyprzodkowej ( $\dot{V}_{m_{po}}$ ), czyli na długości równej dobowemu postępowi drażenia ( $w$ ),
- ilości metanu wydzielającego się z węgla zalegającego w strefie desorpcji na pozostałej długości części ślepej (poza strefą przyprzodkową) prowadzonego wyrobiska ( $\dot{V}_{m_o}$ ).

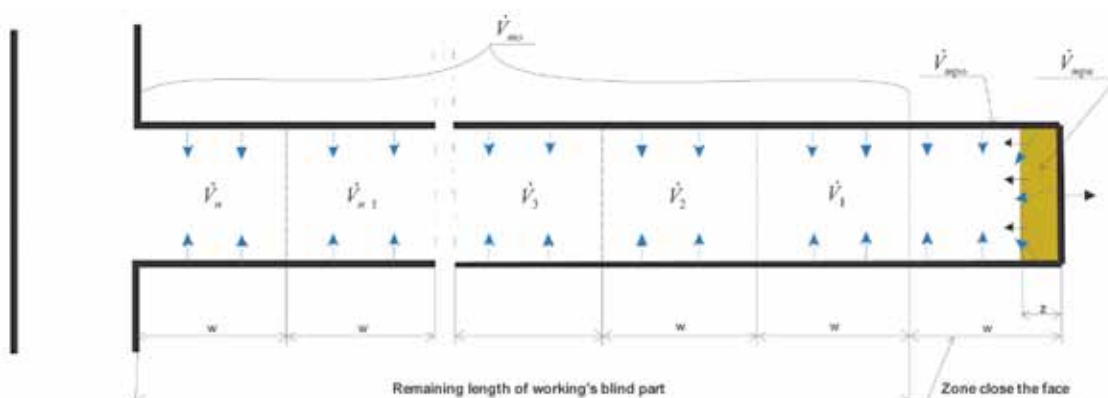
Całkowita ilość metanu wydzielającego się do drażonego przy użyciu MW wyrobiska korytarzowego będzie wynosić

$$\dot{V}_m = \dot{V}_{mpuMW} + \dot{V}_{m_{po}} + \dot{V}_{m_o}, \text{ m}^3/\text{min}. \quad (12)$$

Z powyższego wzoru można wydzielić całkowitą ilość metanu, jaką wydzieli się w strefie przyprzodkowej w czasie urabiania  $\dot{V}_{mp}$

$$\dot{V}_{mp} = \dot{V}_{mpuMW} + \dot{V}_{m_{po}}, \text{ m}^3/\text{min}. \quad (13)$$

**Wydzielanie metanu z węgla urobionego w przodku wyrobiska w czasie wykonywania pojedynczego zabioru**



Rys. 4. Założony w modelu schemat rozmieszczenia stref wydzielania się metanu do drażonych wyrobisk korytarzowych

Fig. 4. Scheme of zones of methane emissions into the driven roadway working assumed in the model

z użyciem MW umożliwiającą zabudowę kolejnych odrzwi obudowy  $\dot{V}_{mpuMW}$  możemy określić jako ilość metanu desorbującą z objętości urobionego węgla po odpaleniu MW i obliczyć ze wzoru

$$\dot{V}_{mpuMW} = \frac{6 \cdot 60 \cdot F_z \cdot z \cdot \gamma_w \cdot (M_o - q_d)}{\tau_{zMW}} \cdot \sqrt{\frac{D_e \cdot \tau_{zMW}}{\pi \cdot R_{zz}^2}}, \text{ m}^3/\text{min} \quad (14)$$

gdzie:

$\gamma_w$  – gęstość węgla, Mg/m<sup>3</sup>,

$q_d$  – pojemność sorpcyjna węgla względem metanu w warunkach dołowych przy ciśnieniu 1 bar, z uwzględnieniem zawartości wilgoci całkowitej, temperatury pierwotnej górotworu oraz popiołu w węglu, którą obliczamy wg wzoru:

$$q_d = \frac{q_s \cdot [-0,008(T_z - 25)]}{(1 + 0,3W) \cdot (1 - 0,01A^a)}, \text{ cm}^3/\text{g} \quad (15)$$

gdzie:

$q_s$  – pojemność sorpcyjna węgla w warunkach standardowych, cm<sup>3</sup>/g,

$T_z$  – temperatura pierwotna górotworu w miejscu prowadzonych robót, °C,

$W$  – wilgoć całkowita w węglu, %,

$A^a$  – zawartość popiołu w węglu, % (przy założeniu, że  $A^a < 100\%$ ),

$M_o$  – metanonośność złożowa pokładu, m<sup>3</sup>/Mgcsw,

$D_e$  – współczynnik dyfuzji metanu w węglu, cm<sup>2</sup>/s,

$z$  – zabiór (odległość między sąsiednimi odrzwiami obudowy), m,

$F_z$  – powierzchnia odsłoniętych warstw węgla w przodku, m<sup>2</sup>,

gdy  $d \leq b \rightarrow F_z = d \cdot a = a \cdot \sum d_w$

gdy  $d > b \rightarrow F_z = 0,8 \cdot a \cdot b = 0,8 \cdot a \cdot a \cdot \sum d_w$

gdzie:

$d$  – miąższość pokładu, m

$b$  – szerokość wyrobiska, m,

$a$  – szerokość wyrobiska, m,

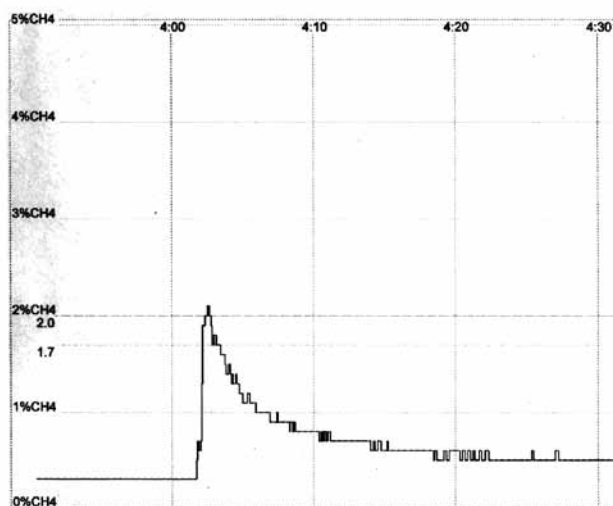
$d = \sum d_w$  – miąższość pokładu (suma grubości odsłoniętych warstw węgla w przodku wyrobiska), m,

$\tau_{zMW}$  – założony średni czas maksymalnej desorpcji metanu podczas wykonania pojedynczego zabioru przy użyciu MW, sek.

$R_{zz}$  – promień zastępczy ziaren węgla, cm.

Wyniki badań i analiz przeprowadzonych w Głównym Instytucie Górnictwa w latach 2008-2009 pokazały, że długość promienia zastępczego ziaren węgla dla warunków GZW wynosi ok.  $R_{zz} = 0,1340$  cm (Koptoń 2009).

W przypadku drażenia wyrobiska korytarzowego za pomocą kombajnu, czas trwania pojedynczego zabioru kształtuje się na poziomie kilkudziesięciu minut i można obliczyć go w oparciu o odpowiednie wzory empiryczne (Koptoń 2009). Natomiast w przypadku drażenia wyrobiska korytarzowego przy użyciu MW, pojedynczy zabiór wykonywany jest praktycznie natychmiast. Jednak dla celów prognozy jest istotny przebieg desorpcji metanu z urobku po odpaleniu MW ze wskazaniem wartości maksymalnych. W świetle wyników badań przebiegów zapisów urządzeń metanometrii automatycznej w czasie urabiania (po odpaleniu MW) w przodkach drażonych wyrobisk korytarzowych, przeprowadzonych w ramach realizacji niniejszego zadania oraz przy uwzględnieniu przebiegów desorpcji metanu z próbek węgla w warunkach laboratoryjnych [4], czas wzmożonej desorpcji metanu z urobku kształtuje się w przedziale do kilkudziesięciu sekund do kilku minut. Opierając się na doświadczeniach autora pracy w zakresie zagrożenia metanowego podczas wieloletniej pracy w kopalni metanowej, jak i to, że zgodnie wymogami obowiązujących przepisów (Rozporządzenie Ministra Gospodarki 2002) w polach metanowych stosuje się systemy



Rys. 5. Zapis zmian stężenia metanu po odpaleniu MW zarejestrowany przez czujnik metanometryczny w odległości do 10 m od czoła przodka

Fig. 5. Record of the changes in methane concentration after firing explosives registered by the methane sensor at a distance of 10 m from the face of working



metanometryczne, umożliwiające ciągły pomiar i rejestracje zawartości metanu oraz wyłączenie urządzeń elektrycznych w czasie nie dłuższym niż 15 sekund – w modelu matematycznym prognozy uwzględniono średni czas maksymalnej desorpcji metanu po wykonaniu pojedynczego zabioru przy użyciu MW,  $\tau_{zMW} = 15$  sek.

Dla przykładu, na rysunku 5 przedstawiono kształtowanie się stężenia metanu po odpaleniu MW zarejestrowane przez czujnik metanometryczny zabudowany w odległości do 10 m od czoła przodka.

**Wydzielanie metanu z węgla zalegającego w strefie przodkowej, w strefie desorpcji wokół wyrobiska  $\dot{V}_{mpo}$ ,** czyli z przodka i ociosów na długości odpowiadającej dziennemu postępowi ( $w$ ), możemy przedstawić jako ilość metanu wydzielającą się z części węglowej strefy desorpcji w przeliczeniu na całkowity czas trwania zmian roboczych i obliczyć ze wzoru

$$\dot{V}_{mpo} = \frac{(F_d \cdot w + Q_p) \cdot \gamma_w \cdot (M_o - q_d)}{720 \cdot c} \cdot \left[ 1 - \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{21600 \cdot \pi^2 \cdot c \cdot D_e}{R_{zz}^2}\right) \right], \text{ m}^3/\text{min} \quad (16)$$

gdzie:

$F_d$  – przekrój poprzeczny części węglowej strefy desorpcji wokół wyrobiska, uzależniony od miąższości pokładu, głębokości, wytrzymałości węgla na ściskanie i zastosowanej obudowy, obliczony odpowiednio wg wzoru 5, 6, 7 lub 8; wartości  $a$ ,  $b_1$  i  $b_2$  dobieramy w oparciu o dane z tablicy 1 oraz zależności 1 ÷ 4,

$Q_p$  – objętość części węglowej strefy desorpcji przed frontem przodka, zależna od miąższości pokładu, głębokości, wytrzymałości węgla na ściskanie i zastosowanej obudowy, obliczona odpowiednio wg wzoru 9, 10 lub 11; wartości  $a$ ,  $b_1$  i  $b_2$  dobieramy w oparciu o dane z tablicy 2 oraz zależności 1 ÷ 4,

$w$  – postęp dobowy wyrobiska, m/dobę,

$c$  – ilość sześciogodzinnych zmian, podczas których prowadzone jest drążenie wyrobiska (od 1 do 4),

$R_{zz}$  – średni promień ziarn węgla w strefie desorpcji, cm. (Pozostałe oznaczenia, jak wyżej.)

Do powyższego wzoru, z uwagi na rozkład ciśnienia w strefie desorpcji, od wartości odpowiadającej  $q_d$  do wartości odpowiadającej  $M_o$ , do równania desorpcji przyjmujemy wartość średnią  $(M_o - q_d)/2$ .

**Wydzielanie się metanu z węgla zalegającego w strefie desorpcji na pozostałej długości części ślepej prowadzonego wyrobiska  $\dot{V}_{mo}$ ,** można określić jako sumę wielkości metanu wydzielającego się w ciągu doby jednocześnie z  $n$  odcinków strefy o długościach  $w$  odpowiadających dobowemu postępowi drążenia (rys. 4) i można ją przedstawić kolejnymi wyrazami ciągu geometrycznego – zakładając, że wyrobisko jest drążone w sposób ciągły. Założenie to, przy dłuższych wybiegach, spowoduje nieco zawyżenie wyników, jednak nie wpłynie to niekorzystnie na bezpieczeństwo robót.

$$\dot{V}_{mo} = \frac{\gamma_w \cdot F_d \cdot w \cdot (M_o - q_d)}{480 \cdot \pi^2} \cdot \exp\left(\frac{-86400 \cdot \pi^2 \cdot D_e}{R_{zz}^2}\right) \cdot \left[ \frac{1 - [\exp(-86400 \cdot \pi^2 \cdot D_e / R_{zz}^2)]^L}{1 - \exp(-86400 \cdot \pi^2 \cdot D_e / R_{zz}^2)} \right]^{L-1}, \text{ m}^3/\text{min} \quad (17)$$

gdzie:  $L$  - wybieg, czyli długość części ślepej wyrobiska, m (w prognozie przyjmujemy docelową długość wyrobiska),

Pozostałe oznaczenia, jak wyżej. Z powyższych wzorów wynika, że ilość metanu wydzielająca się do prowadzonego wyrobiska  $\dot{V}_{mo}$  jest wprost proporcjonalna do wielkości różnicy pomiędzy wartością metanonośności złożowej  $M_o$  a wartością pojemności sorpcyjnej węgla względem metanu w warunkach dołowych (przy ciśnieniu  $10^5$  Pa), przy uwzględnieniu temperatury pierwotnej górotworu, zawartości popiołu w węglu oraz wilgoci całkowitej  $q_d$ . Powyższe wzory mają sens przy wartości  $M_o \geq q_d$ . W przypadku, gdy  $M_o \leq q_d$ , zgodnie z założeniami do niniejszego modelu matematycznego, wydzielanie metanu nie wystąpi.

### 3. Weryfikacja opracowanego modelu prognozy metanowości bezwzględnej na tle stosowanych metod prognozowania

Model matematyczny przedmiotowej metody prognozowania zweryfikowano w odniesieniu do faktycznego wydzielania metanu do drążonych w różnych warunkach gazowych, wytypowanych wyrobisk. Badania prowadzone były z wykorzystaniem bazy danych zawierającej zestawienie parametrów geologiczno-górnicyznych i techniczno-organizacyjnych 22 wyrobisk korytarzowych prowadzonych użyciem MW w pokładach zaliczonych do II, III i IV kategorii zagrożenia metanowego w latach 2006÷2011. Dane pochodziły z kopalń Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A., Kompanii Węglowej S.A., i Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. Weryfikacja opracowanego modelu matematycznego prognozy metanowości wyrobisk prowadzonych użyciem MW pokazała, że względny błąd prognoz *ex post* obliczonych dla danych dotyczących analizowanego zbioru wyrobisk korytarzowych, kształtował się na poziomie od -19,05 do +11,83 %, czyli w żadnym przypadku nie przekraczał błędu dopuszczalności prognozy, założonego na poziomie 25 %. Średni względny błąd prognoz *ex post* wyniósł 7,09 % i jest również był mniejszy od 25 %. Należy zaznaczyć, że średni względny błąd prognoz *ex post* obliczonych wcześniej stosowanymi metodami prognozowania znacznie przekracza założone 25 %. Przykładowo przy zastosowaniu metody MPM/3 (Metoda MPM/3 1986) wyniósł 53,8 % a przy zastosowaniu metody KD „Barbara” (2, 7, 8, 6) wyniósł 66,8 %.

### 4. Wnioski

1. Przeprowadzona weryfikacja stosowanej dotychczas w Polsce metody prognozowania metanowości wyrobisk drążonych przy użyciu MW, wykazała dużą rozbieżność między wartościami prognozowanymi a rzeczywistymi, nie mieszczącą się w granicach założonego błędu tolerowanego. Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że obecnie stosowane metody prognozowania wymagają ponownej weryfikacji w zakresie analizy własności geologicznych, parametrów technicznych oraz uwarunkowań górniczych pod kątem ich wpływu na wydzielanie metanu w obecnie występujących warunkach, przy jednoczesnym uwzględnieniu udziału nowych, nie branych dotąd pod uwagę czynników.
2. Z przeprowadzonej weryfikacji opracowanego modelu matematycznego prognozy metanowości bezwzględnej wyrobisk prowadzonych przy użyciu MW wynika, że względny błąd prognoz *ex post* obliczonych dla danych dotyczących analizowanego zbioru wyrobisk korytarzowych, kształtował się na poziomie od -19,05 do +11,83 %, czyli w żadnym przypadku nie przekraczał błędu dopuszczalności prognozy, założonego na poziomie 25 %.

Średni względny błąd prognoz ex post wyniósł 7,09 % i jest również był mniejszy od 25 %.

3. Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że opracowany model matematyczny prognozy metanowości, może być podstawą nowej metody prognozowania wydzielania się metanu do wyrobisk korytarzowych drążonych przy użyciu MW, której wyniki będą bardziej zbliżone do faktycznego poziomu wydzielania metanu. Wykorzystanie przedmiotowej metody w innych niż polskie warunkach geologicznych, wymagałoby przeprowadzenia odpowiednich badań i weryfikacji w zakresie określenia średniego zastępczego promienia ziaren węgla, jako elementu dostrajającego model.
4. Czynniki uwzględniane w opracowanej metodzie prognozowania wskazują, że znaczny wpływ na wydzielanie metanu do drążonych wyrobisk mają własności sorpcyjne węgla, które do tej pory były badane i określane w aspekcie zagrożenia wyrzutami gazów i skał.
5. Prognoza metanowości stanowi zawsze podstawę do właściwego doboru środków prewencji metanowej, a w szczególności do projektowania sposobu przewietrzania, czy nawet odmetanowania górotworu. Opracowana metoda umożliwiłaby bardziej precyzyjne określenie wielkości metanu, który wydzieli się w strefie przyprzodkowej w czasie drążenia przy użyciu MW. Roboty związane z drążeniem wyrobisk korytarzowych koncentrują się przede wszystkim w tej strefie, i w związku z tym prognoza wydzielania metanu do tej strefy ma duży wpływ na bezpieczeństwo prowadzenia robót.

## 5. Literatura

1. *Hoek E.* (1998): Practical Rock Engineering. Rocscience Inc., [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).
2. *Kalisz J., Kozłowski B., Sobala E.*: Porównanie metod prognozowania metanowości dla wyrobisk chodnikowych w górnictwie węglowym. *Przeгляд Górnicy* 4/78
3. *Koptoń H.*: Metoda prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drążonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego. *Prace Naukowe GIG, Kwartalnik Górnictwo i Środowisko* Nr 3/2009, Katowice 2009.
4. *Koptoń H.*: Określenie strefy desorpcji wokół wyrobiska korytarzowego. Konferencja Naukowo-Techniczna – IX Szkoła Geomechaniki. Beskid Śląski 10. 2009 r.
5. *Koptoń H.*: Analiza stosowanej metodyki prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drążonych przy użyciu MW w kopalniach węgla kamiennego i zgodności wyników prognoz ze stanem faktycznym. IV Konferencja Naukowo-Szkoleniowa – Problemy Współczesnego Górnictwa 2011. *Prace naukowe GIG, Kwartalnik Górnictwo i Środowisko* Nr 1/1/2011.
6. *Krause E., Krzystolik P., Łukowicz K.*: Rozpoznawanie, prognozowanie, kontrola i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Wydawnictwo GIG Katowice 2001.
7. *Kozłowski B., Grębski Z.*: Odmetanowanie górotworu w kopalniach. Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1982.
8. *Kozłowski B.*: Prognozowanie zagrożeń metanowych w kopalniach głębinowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej w Gliwicach 1986.
9. *Metcalfe R.S., Yee D., Seidle J.P., Puri R.*: Review of Research Efforts in Coalbed Methane Recovery. Workshop on the Recovery and End – Use of Coal – Bed Methane, Report no. A-10, Katowice 1992.
10. Metoda MPM/3 prognozowania metanowości chodników w zależności od sposobu urabiania (1986). Wydawnictwo GIG Katowice.
11. *Olajossy A.* (1993): Relacja: laboratorium – in situ w badaniach desorpcji metanu z pokładów węgla. *Zeszyty naukowe AGH, Kraków*.
12. *Prusek St., Walentek A.*: Wielkość strefy zniszczenia górotworu wokół wyrobiska korytarzowego w oparciu kryteriów Hoeka-Browna. *Prace Naukowe GIG* 2005, Seria Konferencje nr 49, 2005 s. 13-24
13. Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych z dnia 28 czerwca 2002 r. (Dz. U. Nr 139 poz. 1169) wraz z późniejszymi zmianami.
14. *Tarnowski J.*: Prognoza gazowości wyrobisk chodnikowych drążonych w pokładach małej i średniej miąższości. *Archiwum Górnictwa* 32, 2, Kraków 1987.
15. *Tarnowski J.*: Uproszczona metoda opracowania metody prognozy gazowości wyrobisk chodnikowych drążonych w gazonośnych pokładach węgla. *Materiały konferencyjne GIG. Konferencja N-T: Zagrożenia metanowe i pożarowe w górnictwie, wykorzystanie metanu z pokładów węgla.* Ustroń 1996.