

Henryk Koptoń\*

## MODEL MATEMATYCZNY PROGNOZY WYDZIELANIA SIĘ METANU DO PRZEKOPU PRZECINAJĄCEGO POKŁAD WĘGLA

### Streszczenie

W artykule przedstawiono równania opisujące model matematyczny prognozy wydzielania się metanu do przekopu przecinającego pokład węgla w kopalniach węgla kamiennego, opracowany na podstawie wyników badań wykonanych w Głównym Instytucie Górnictwa. W prognozie uwzględniono zarówno mechanizm kinetyki wydzielania się metanu, jak i określenie kształtu i zasięgu tzw. strefy desorpcji dla drażonego przekopu. Prognoza taka umożliwi bardziej dokładne określanie ilości metanu wydzielającego się do drażonego przekopu (ze szczególnym uwzględnieniem strefy przyprzodkowej), co stanowi podstawę do właściwego doboru środków profilaktyki metanowej, a zatem ma znaczący wpływ na bezpieczeństwo prowadzenia robót.

### Mathematical model of prediction of methane emissions into a drift crossing a coal seam

### Abstract

The article presents equations describing the mathematical model of prediction of methane emissions into a drift crossing a coal seam in hard coal mines, developed on the basis of results of investigations performed at the Central Mining Institute. The prediction took into consideration the mechanism of methane emission kinetics, as well as determination of the shape and range of the so-called desorption zone for the driven drift. Such a prediction enables more accurate determination of the quantity of methane emitted into the driven drift (with particular regard to the face zone), what constitutes the basis for the appropriate selection of methane prevention agents, and thus has significant impact on the safety of work conducting.

## 1. WPROWADZENIE

Wydzielanie się metanu podczas prowadzenia robót górniczych jest nadal bardzo groźnym zjawiskiem występującym w kopalniach węgla kamiennego. Ilość wydzielającego się metanu, nazywana metanowością bezwzględną i wyrażana w metrach sześciennych na minutę, ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo drażenia wyrobisk korytarzowych oraz prowadzenia eksploatacji. Zwalczanie zagrożenia metanowego polega przede wszystkim na ograniczeniu możliwości powstawania niebezpiecznych nagromadzeń metanu, jak i na eliminacji źródeł zapłonu metanu przez stosowanie środków zapobiegających jego zapłonowi. Dlatego bardzo istotne jest dokładne wyprzedzające oszacowanie ilości wydzielającego się metanu do drażonych wyrobisk korytarzowych i do wyrobisk eksploatacyjnych, aby można było dobrać odpowiednie środki zabezpieczające przed jego zapłonem. Rozbieżność między wartościami prognozowanymi, obliczonymi na etapie projektowania a rzeczywistą objętością wydzie-

\* Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”

lającego się metanu podczas drażenia przekopów nie mieści się w granicach błędu tolerowalnego i w rezultacie nie pozwala na właściwy dobór środków profilaktyki metanowej (Koptoń 2010).

Z badań przeprowadzonych w GIG KD „Barbara” w latach 2006–2010 wynika, że decydujący wpływ na wydzielanie się metanu w czasie drażenia wyrobisk korytarzowych (i nie tylko) w złożu metanowym, mają właściwości sorpcyjne węgla.

Na podstawie tych badań została opracowana metoda prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego, z uwzględnieniem właściwości sorpcyjnych węgla (Koptoń 2009). Kontynuacja badań nad modelowaniem wydzielania się metanu z powierzchni węglowych czynnych wyrobisk górniczych w kopalniach pozwoliła na opracowanie matematycznego modelu wydzielania się metanu do przekopu przecinającego pokład węgla podczas drażenia kombajnem. Przedstawienie opracowanego modelu wymagało jednak wcześniejszego uwzględnienia założeń do modelu prognozy metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych (węglowych i węglowo-kamiennych) w kopalniach węgla kamiennego.

## **2. MATEMATYCZNY MODEL PROGNOZY METANOWOŚCI BEZWZGLĘDNEJ WYROBISK KORYTARZOWYCH DRAŻONYCH KOMBAJNAMI**

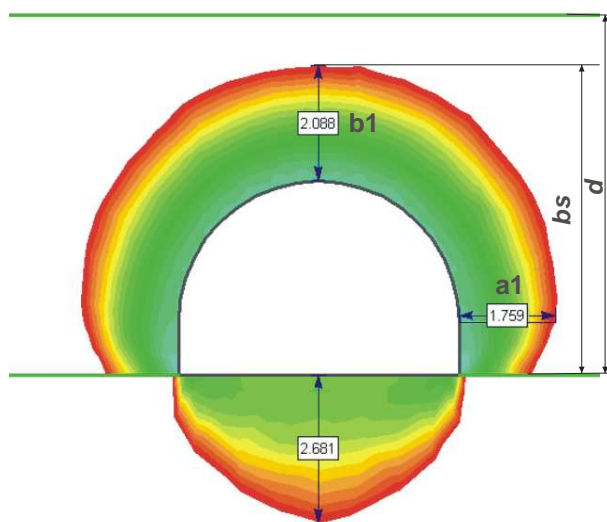
Do sporządzenia matematycznego modelu prognozy metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych (węglowych i węglowo-kamiennych) drażonych kombajnami (Koptoń 2009) zostały przyjęte następujące założenia:

- w prognozie uwzględniono wydzielanie się metanu do wyrobiska z pokładu, w którym jest ono drażone, względnie warstw węgla zalegających w zasięgu desorpcji,
- pokład, w którym jest drażone wyrobisko, jest jednorodny na całej długości wyrobiska pod względem właściwości fizykochemicznych,
- zasięg strefy desorpcji odpowiada zasięgowi strefy spękania górotworu wokół wyrobiska korytarzowego, określonej na podstawie kryterium Hoeka-Browna,
- wydzielanie się metanu z węgla określono z wykorzystaniem wzorów wynikających z metody J.P. Seidla (Metcalf i in. 1992; Olajossy 1993), w której zostało wykorzystane równanie II prawa Ficka dla izotropowej dyfuzji radialnej oraz przyjęto założenie o zastępczym promieniu dla ziaren węgla zalegającego w strefie desorpcji  $R_{zz} = 0,1340$  cm,
- w prognozie nie uwzględniono nagłych wpływów metanu do wyrobiska na skutek zaistnienia wstrząsu górotworu, wyrzutu, czy też występowania tzw. fukaczy metanu,
- w prognozie nie uwzględniono możliwości dodatkowego dopływu metanu ze zrobów poeksploatacyjnych w przypadku, gdy wyrobisko będzie drażone w ich sąsiedztwie.

Należy zaznaczyć, że omawiana metoda prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami z uwzględnieniem właściwości sorpcyjnych węgla, od wcześniejszej metody KD „Barbara” (Kalisz, Ko-

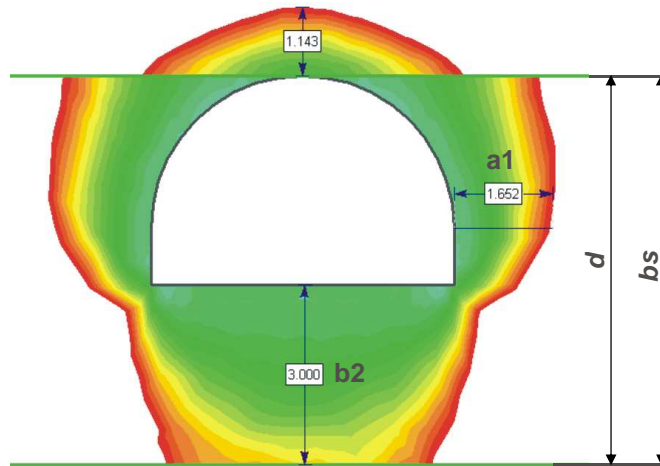
złowski, Sobala 1978; Kozłowski 1982, 1986; Krause, Krzystolik, Łukowicz 2001), różni się tylko modelem matematycznym prognozy i przyjętymi do jego sporządzenia założeniami z zakresu mechanizmu kinetyki wydzielania się metanu, jak i określenia tzw. strefy desorpcji dla wyrobiska korytarzowego.

Wyrobisko drażone w metanowym pokładzie węgla jest otoczone ze wszystkich stron strefą odgazowania, którą można nazwać strefą desorpcji (Tarnowski 1987, 1996). W prognozie założono, że zasięg i kształt tej strefy odpowiada strefie spękań, czyli strefie nieciągłości górotworu wokół wyrobiska. W przypadku wyrobisk drażonych w pokładach o miąższości nieprzekraczającej wysokości wyrobiska, istotny jest zasięg strefy w ociosach  $a_1$ . Przy drażeniu natomiast wyrobisk w pokładach grubych, istotny będzie również zasięg tej strefy w stropie  $b_1$  lub w spągu  $b_2$  w zależności od tego, czy wyrobisko jest drażone pod stropem czy też po spągu pokładu. Do sporządzenia modelu matematycznego prognozy metanowości bezwzględnej dla wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami wykorzystano wyniki badań nad określeniem wielkości strefy zniszczenia górotworu wokół wyrobiska korytarzowego, które wykonali Prusek i Walentek (2005). Wielkość stref, w których nastąpiło zniszczenie skał otaczających wyrobisko, uzyskano w wyniku obliczeń numerycznych, z wykorzystaniem metody elementów skończonych, przyjmując kryterium wytrzymałościowe Hokea-Browna dla ośrodka sprężystego. Dla przykładu, na rysunkach 1 i 2 przedstawiono zasięg wyteżenia obrazujący wpływ poszczególnych czynników na wielkość tej strefy, przy drażeniu wyrobiska odpowiednio po spągu i pod stropem w pokładzie grubym.



**Rys. 1.** Wyrobisko w obudowie ŁP9 na poziomie 800 m, prowadzone po spągu pokładu o miąższości 6,5 m, wytrzymałość węgla na ściskanie  $R_c = 15$  MPa:  $a$  – zasięg strefy w ociosach,  $b_1$  – zasięg strefy w stropie,  $b_s$  – wysokość węglowej części strefy desorpcji,  $d$  – miąższość pokładu

**Fig. 1.** Mine working with ŁP9 support on the 800 m level, driven on the floor of the seam with thickness 6.5 m, coal compressive strength  $R_c = 15$  MPa:  $a$  – range of the zone in side-walls,  $b_1$  – range of the zone in the roof,  $b_s$  – height of the coal part of the desorption zone,  $d$  – seam thickness



**Rys. 2.** Wyrobisko w obudowie ŁP9 na poziomie 800 m, prowadzone pod stropem pokładu o miąższości 6,5 m, wytrzymałość węgla na ściskanie  $R_c = 15$  MPa:  $b_2$  – zasięg strefy w spągu; pozostałe oznaczenia jak na rysunku 1

**Fig. 2.** Mine working with ŁP9 support on the 800 m level, driven under the roof of the seam with thickness 6.5 m, coal compressive strength  $R_c = 15$  MPa:  $b_2$  – range of the zone in the floor; the remaining markings as in Fig. 1

Do określenia wielkości i kształtu strefy zniszczenia wokół wyrobiska korytarzowego posłużono się programem Phase<sup>2</sup> (1998), bazującym na metodzie elementów skończonych. Program ten umożliwia zamodelowanie górotworu w postaci tarczy o jednostkowej grubości, znajdującej się w płaskim stanie odkształcenia. Metoda elementów skończonych polega na podziale pewnego, interesującego nas obszaru, na elementy o skończonych wymiarach. Podział ten pozwala na uzyskanie zależności między stanem naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia. W obliczeniach strefy zniszczenia wokół wyrobiska korytarzowego założono, że górotwór jest ośrodkiem izotropowym i sprężystym. Założono także, że skały stropowe oraz spągowe pokładu węgla o grubości 2,5 m, stanowią naprzemianległe warstwy łupku ilastego i piaszczystego różnej grubości o parametrach wytrzymałościowych uzyskanych w wyniku obliczeń za pomocą programu RockLab, będącego integralną częścią programu Phase<sup>2</sup>. Obliczenia numeryczne składały się z siedmiu etapów i na każdym z nich rozpatrywano wpływ różnych czynników na kształt i wielkość tej strefy zniszczenia wokół wyrobiska korytarzowego. Uwzględniono zmiany kształtu i wielkości przekroju poprzecznego odrzwi obudowy, głębokość prowadzenia robót, wytrzymałość pokładu węgla i skał stropowych na ściskanie, miąższość pokładu oraz sposób prowadzenia wyrobiska w pokładzie o grubości 6,5 m (pod stropem czy po spągu).

Zakres przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych na założonym modelu górotworu pozwolił na określenie wpływu poszczególnych czynników na zasięg strefy zniszczenia wokół wyrobiska, jednak w dalszym ciągu tylko dla konkretnych przypadków. W wyniku przeprowadzonej analizy wpływu trzech czynników (miąższości i wytrzymałości na ściskanie pokładu węgla oraz głębokości zalegania) stwierdzono, że:

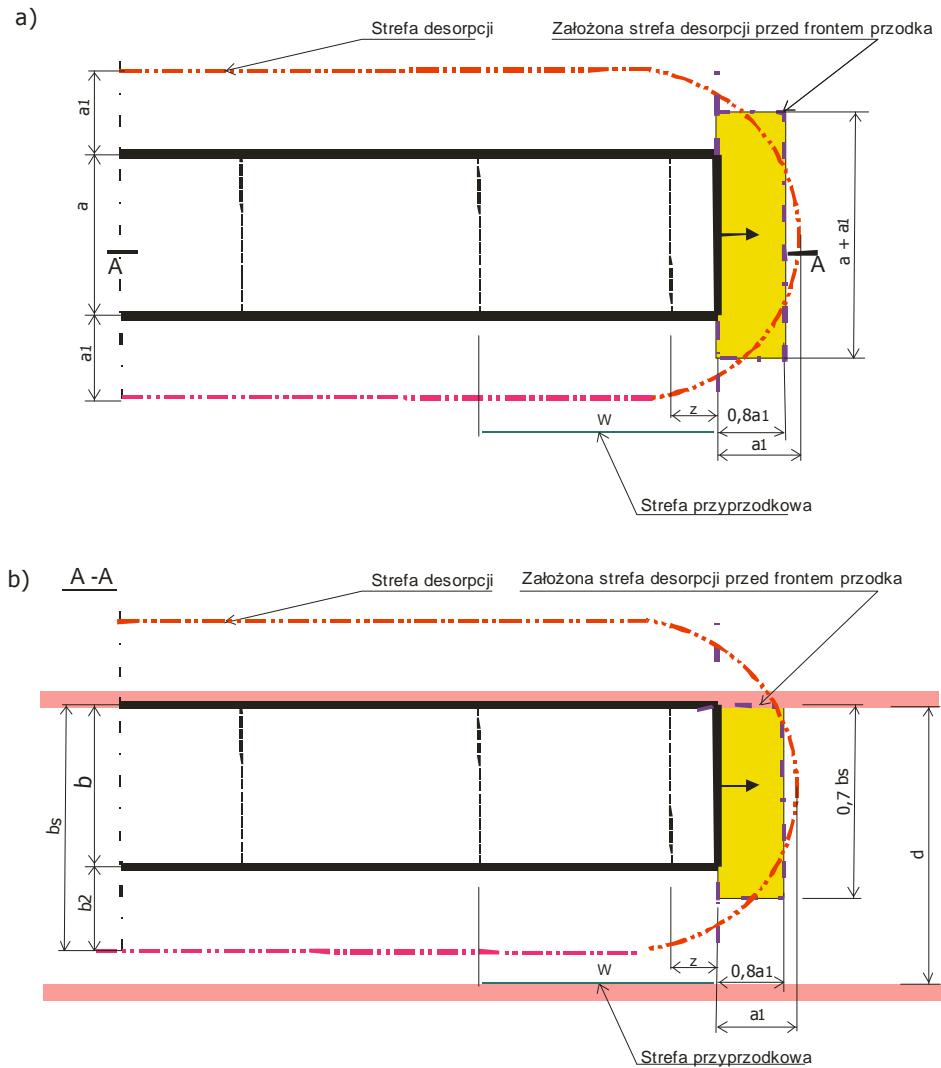
- zależność między miąższością pokładu a zasięgiem strefy zniszczenia oraz zależność między głębokością zalegania a zasięgiem strefy zniszczenia, przy stałej wytrzymałości na ściskanie, jest liniowa,
- zależność między wytrzymałością węgla na ściskanie a zasięgiem strefy zniszczenia, przy stałej głębokości i miąższości, można opisać funkcjami potęgowymi.

Wykorzystując wyniki obliczeń symulacyjnych na założonym modelu górotworu oraz wymienione zależności empiryczne między nimi, podjęto próbę określenia wielkości zasięgu strefy zniszczenia wokół wyrobiska korytarzowego dla charakterystycznych wartości poszczególnych czynników. Kształtowanie się zasięgu strefy zniszczenia górotworu w ociosach wyrobiska korytarzowego  $a_1$  w zależności od wytrzymałości na ściskanie węgla w pokładzie, jego miąższości i głębokości zalegania, przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Zasięg strefy zniszczenia górotworu w ociosach wyrobiska korytarzowego  $a_1$  w zależności od wytrzymałości na ściskanie węgla w pokładzie, jego miąższości  $d$  i głębokości zalegania

Wytrzymałość na ściskanie węgla $R_c$ , MPa	Obudowa ŁP9								
	miąższość węgla, m	głębokość zalegania, m							
		500	600	700	800	900	1000	1100	1200
5,0	$d = 1,6$ m	2,37	2,48	2,59	2,70	2,81	2,92	3,03	3,14
	$d = 2,5$ m	2,32	2,43	2,54	2,65	2,76	2,87	2,98	3,09
	$d = 3,5$ m	2,28	2,39	2,50	2,61	2,72	2,83	2,94	3,05
	$d_{pst} = 6,5$ m	2,22	2,33	2,44	2,55	2,66	2,77	2,88	2,99
	$d_{pSP} = 6,5$ m	2,30	2,41	2,52	2,63	2,74	2,85	2,96	3,07
10	$d = 1,6$ m	1,77	1,88	1,99	2,10	2,21	2,32	2,43	2,54
	$d = 2,5$ m	1,74	1,85	1,96	2,07	2,18	2,29	2,40	2,51
	$d = 3,5$ m	1,70	1,81	1,92	2,03	2,14	2,25	2,36	2,47
	$d_{pst} = 6,5$ m	1,59	1,70	1,81	1,92	2,03	2,14	2,25	2,36
	$d_{pSP} = 6,5$ m	1,69	1,80	1,91	2,02	2,13	2,24	2,35	2,46
15	$d = 1,6$ 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
	$d_{pst} = 6,5$ m	1,32	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98	2,09
	$d_{pSP} = 6,5$ m	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98	2,09	2,20
20	$d = 1,6$ 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
	$d_{pst} = 6,5$ m	1,11	1,22	1,33	1,44	1,55	1,66	1,77	1,88
	$d_{pSP} = 6,5$ m	1,21	1,32	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87	1,98
30	$d = 1,6$ m	1,22	1,33	1,44	1,55	1,66	1,77	1,88	1,99
	$d = 2,5$ m	1,08	1,19	1,3	1,41	1,52	1,63	1,74	1,85
	$d = 3,5$ m	0,96	1,07	1,18	1,29	1,4	1,51	1,62	1,73
	$d_{pst} = 6,5$ m	0,88	0,99	1,1	1,21	1,32	1,43	1,54	1,65
	$d_{pSP} = 6,5$ m	0,97	1,08	1,19	1,30	1,41	1,52	1,63	1,74
Obudowa ŁP8	Wartości o około 4% mniejsze od wartości dla obudowy ŁP9								
Obudowa ŁP10	Wartości o około 10% większe od wartości dla obudowy ŁP9								
Obudowa ŁP11	Wartości o około 17% większe od wartości dla obudowy ŁP9								

Na podstawie wyników analizy obliczeń numerycznych, opracowano wzory empiryczne opisujące zasięg strefy desorpcji dla drażonego wyrobiska korytarzowego ( $a_1$ ,  $b_1$  i  $b_2$ ), pole powierzchni  $F_d$  jej części węglowej w przekroju poprzecznym oraz objętość jej części węglowej  $Q_p$ , w zależności od występujących typowych warunków.



**Rys. 3.** Założony zasięg strefy desorpcji dla przodka drążonego pod stropem w pokładzie grubym; a – przekrój poziomy, b – przekrój pionowy, 1 – strefa desorpcji, 2 – założona strefa desorpcji przed frontem przodka, 3 – strefa przyprzodkowa

**Fig. 3.** Assumed desorption zone range for the face driven under the roof in a thick seam; a – horizontal cross-section, b – vertical cross-section, c – desorption zone, 2 – assumed desorption zone before the face front, 3 – zone adjacent to the face

Dla przykładu na rysunku 3 przedstawiono przekroje podłużne (poziomy i pionowy) założonego zasięgu strefy desorpcji dla przodka drążonego pod stropem w pokładzie grubym (przekrój poprzeczny – rys. 2). Wykorzystując wynikające z powyższych badań zależności empiryczne przyjęto, że zasięg strefy zniszczenia w stropie  $b_1$  oraz w spągu  $b_2$  w przypadku, gdy wyrobisko jest drążone w obudowie ŁP9 odpowiednio po spągu lub pod stropem pokładu, wynosi:

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

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

Uwzględniając zmiany miąższości pokładu węgla oraz gabaryty wyrobiska, założono 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  $b$

$$F_o = 2a_1d, \text{ m}^2 \quad (3)$$

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

- gdy  $d \geq 0,8b_s$

$$F_p = 0,8(a + 2a_1)b_s - 0,8ab, \text{ m}^2 \quad (4)$$

- gdy  $d < 0,8b_s$

$$F_p = 0,8(a + 2a_1)d - 0,8ab, \text{ m}^2 \quad (5)$$

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  $\rightarrow b_s = b + b_1$ , przy czym:  $b_1$  – zasięg strefy w stropie, m;  $b_2$  – zasięg strefy w spągu, m.

Przy założeniu, że kształt strefy desorpcji przed czołem przodka odpowiada przedstawionemu na rysunku 3, upraszczając, objętość jej części węglowej  $Q_p$  można obliczyć ze wzorów:

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

$$Q_{p1} = (a_1 + a)da_1, \text{ m}^3 \quad (6)$$

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

- gdy  $d \geq 0,8b_s$

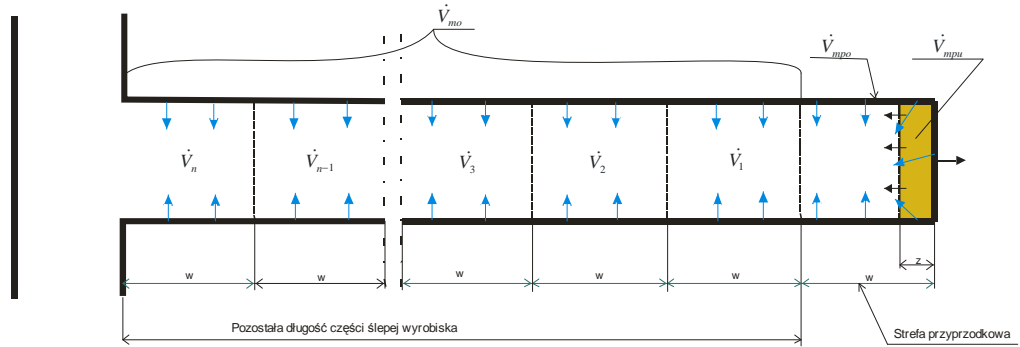
$$Q_{p2} = 0,56(a + a_1)a_1b_s, \text{ m}^3 \quad (7)$$

- gdy  $d < 0,8b_s$

$$Q_{p2} = 0,56(a + a_1)a_1d, \text{ m}^3 \quad (8)$$

(oznaczenia jak wyżej).

Roboty związane z drażeniem wyrobisk korytarzowych są skoncentrowane przede wszystkim w strefie przyprzodkowej. Dlatego też ilość wydzielającego się metanu, a zatem i jego prognoza w tej strefie mają znaczący wpływ na bezpieczeństwo prowadzenia robót.



**Rys. 4.** Schemat stref wydzielania się metanu do drażonego wyrobiska korytarzowego przyjęty w modelu; 1 – pozostała długość części ślepej wyrobiska, 2 – strefa przyprzodkowa

**Fig. 4.** Scheme of zone of methane emissions into the driven roadway working adopted in the model; 1 – remaining length of the blind part of the working, 2 – zone adjacent to the face

Mając powyższe na uwadze, ilość metanu wydzielającego się do drażonego wyrobiska korytarzowego  $\dot{V}_m$  (zgodnie z rys. 4) w modelu matematycznym, rozpatrzono jako sumę:

- ilości metanu wydzielającego się z urobku podczas wykonywania pojedynczego zabioru  $\dot{V}_{mpu}$ , czyli na długości równej odległości  $z$  między sąsiednimi odrzwiami obudowy chodnikowej,
- ilości metanu wydzielającego się z węgla zalegającego w strefie desorpcji wokół wyrobiska w założonej strefie przyprzodkowej  $\dot{V}_{mpo}$ , czyli na długości odpowiadającej dobowemu postępowi drażenia  $w$ ,
- ilości metanu wydzielającego się z węgla zalegającego w strefie desorpcji na pozostałej długości części ślepej (poza strefą przyprzodkową) drażonego wyrobiska korytarzowego ( $\dot{V}_{mo}$ ).

Zatem, ogólna ilość metanu wydzielającego się do drażonego kombajnem wyrobiska korytarzowego, wynosi

$$\dot{V}_m = \dot{V}_{mpu} + \dot{V}_{mpo} + \dot{V}_{mo}, \text{ m}^3/\text{min} \quad (9)$$

Z powyższego wzoru można wyodrębnić sumaryczną ilość metanu, jaka wydzielą się w strefie przyprzodkowej podczas urabiania  $\dot{V}_{mp}$

$$\dot{V}_{mp} = \dot{V}_{mpu} + \dot{V}_{mpo}, \text{ m}^3/\text{min} \quad (10)$$

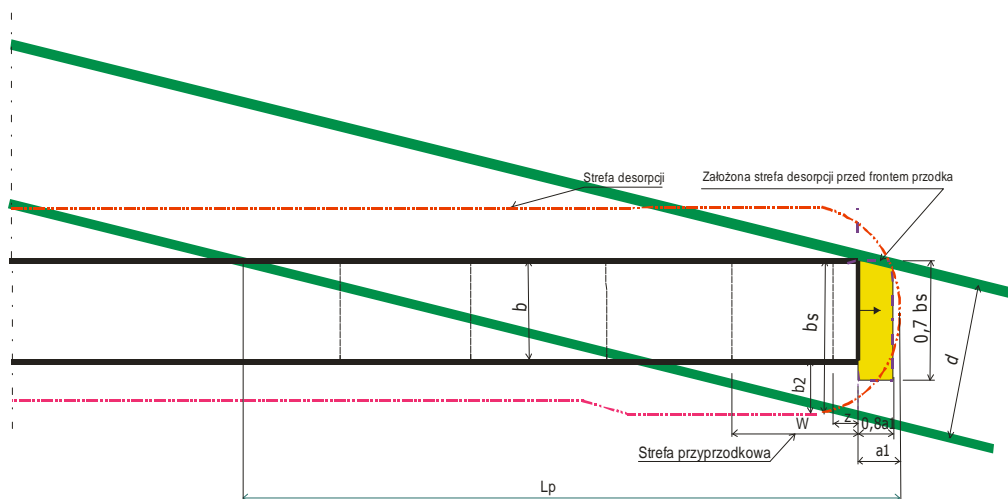


### 3. MODEL MATEMATYCZNY PROGNOZY WYDZIELANIA SIĘ METANU DO DRAŻONEGO KOMBAJNEM PRZEKOPU PRZECINAJĄCEGO POKŁAD WĘGLA

Wykorzystując model matematyczny prognozy metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego (Koptoń 2009), którego założenia i składowe przedstawiono w rozdziale 2, można opisać również wydzielanie się metanu do przekopu przecinającego pokład węgla. Podczas drażenia wyrobiska korytarzowego kamiЕННО-węglowego (przekopu) i przecinania pokładu węgla można wyróżnić następujące etapy:

- udostępnienie pokładu węgla od strony spągu czy stropu w zależności od kierunku upadu i kąta nachylenia pokładu w stosunku do osi drażonego wyrobiska,
- drażenie wyrobiska w węglu w czasie przecinania pokładu węgla,
- wyjście przekopu z przeciętego pokładu węgla.

Prawidłowy dobór środków profilaktyki metanowej podczas drażenia wyrobiska korytarzowego, a zatem także przy drażeniu przekopu przecinającego pokład węgla, wymaga znajomości prognozy maksymalnego wydzielania się metanu w danych warunkach geologiczno-górnictwowych i technicznych. Maksymalne wydzielanie się metanu do przekopu podczas przecinania pokładu węgla będzie występować przy maksymalnej grubości pokładu w przodku wyrobiska i jednocześnie największej (docelowej) długości części węglowej na obwodzie wyrobiska. Taką sytuację przy przecinaniu przekopem pokładu grubego od spągu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Założony zasięg strefy desorpcji dla przekopu przecinającego gruby pokład węgla

Fig. 5. Assumed range of the desorption zone for the drift crossing a thick coal seam

W modelu matematycznym, ilość metanu wydzielającego się do drażonego przekopu podczas przecinania pokładu węgla  $\dot{V}_m$  określono, tak jak w przypadku drażonego wyrobiska korytarzowego, jako sumę:

- ilości metanu wydzielającego się z urobku podczas wykonywania pojedynczego zabioru  $\dot{V}_{mpu}$ , czyli na długości równej odległości z między sąsiednimi odrzwiami obudowy,
- ilości metanu wydzielającego się z węgla zalegającego w strefie desorpcji wokół wyrobiska w założonej strefie przyprzodkowej  $\dot{V}_{mpo}$ , czyli na długości odpowiadającej dobowemu postępowi drażenia  $w$ ,
- ilości metanu wydzielającego się z węgla zalegającego w strefie desorpcji na pozostałej długości części węglowej drażonego wyrobiska przekopowego  $\dot{V}_{mo}$ .

Ogólną ilość metanu wydzielającego się z przecinanego pokładu węgla do drażonego kombajnem wyrobiska przekopowego można również opisać wzorami 9 i 10. Wydzielanie się metanu z węgla urobionego w przodku wyrobiska podczas wykonywania pojedynczego zabioru, czyli w czasie drażenia umożliwiającego zabudowę kolejnych odrzwi obudowy  $\dot{V}_{mpu}$ , można określić jako ilość metanu desorbującą z objętości urobionego węgla w czasie wykonywania zabioru, zgodnie ze wzorem

$$\dot{V}_{mpu} = \frac{F_z z \gamma_w (M_o - q_d)}{\tau_z} \left[ 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{60\pi^2 D_e \tau_z}{R_{zz}^2}\right) \right], \text{ m}^3/\text{min} \quad (11)$$

gdzie:

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

$q_d$  – pojemność sorpcyjna węgla względem metanu w warunkach dołowych przy ciśnieniu 10<sup>5</sup> Pa, z uwzględnieniem temperatury pierwotnej górotworu, zawartości wilgoci całkowitej oraz popiołu w węglu, obliczona według wzoru

$$q_d = \frac{q_s [1 - 0,008(T_z - 25)]}{(1 + 0,3W_t)(1 - 0,01A^a)}, \text{ cm}^3/\text{g}_{\text{csw}} \quad (12)$$

przy czym:  $q_s$  – pojemność sorpcyjna węgla w warunkach standardowych, cm<sup>3</sup>/g;  $T_z$  – temperatura pierwotna górotworu w miejscu prowadzonych robót, °C;  $W_t$  – wilgoć całkowita w węglu, %;  $A^a$  – zawartość popiołu w węglu (oczywiście przy założeniu, że  $A^a < 100\%$ );

$M_o$  – metanonośność złożowa pokładu, m<sup>3</sup>/Mg<sub>csw</sub>;

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

$z$  – głębokość zabioru (odległość między odrzwiami obudowy), m;

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

$$\text{gdy } d \leq b \rightarrow F_z = da = a \sum d_w,$$

$$\text{gdy } d > b \rightarrow F_z = 0,8ab = 0,8a \sum d_w,$$

gdzie:

$d$  – miąższość pokładu, m;

$b$  – wysokość wyrobiska, m;

$a$  – szerokość wyrobiska, m;

$d = \sum d_w$  – miąższość pokładu (suma grubości odsłoniętych warstw węgla w przodku wyrobiska), m;  
 $\tau_z$  – czas trwania jednego zabioru, min.

Czas trwania jednego zabioru  $\tau_z$  możemy obliczyć ze wzorów, jeżeli:

- miąższość pokładu  $d$  jest większa lub równa wysokości wyrobiska  $b$  ( $d \geq b$ )

$$\tau_z = \frac{\gamma_w F_w z}{G_k}, \text{ min} \quad (13)$$

- miąższość pokładu  $d$  jest mniejsza od wysokości wyrobiska  $b$  ( $d < b$ )

$$\tau_z = \frac{\gamma_w d z a + \gamma_s z (F_w - d a)}{G_k}, \text{ min} \quad (14)$$

gdzie:

- $F_w$  – powierzchnia przekroju poprzecznego wyrobiska (w wyłomie), m<sup>2</sup>;
- $\gamma_s$  – gęstość skały płonnej, Mg/m<sup>3</sup>;
- $G_k$  – wydajność kombajnu, Mg/min;
- $R_{zz}$  – promień zastępczy ziaren węgla,  $R_{zz} = 0,1340$  cm.

Wydzielanie się metanu z powierzchni węglowych wyrobiska w założonej strefie przyprzodkowej  $\dot{V}_{mpo}$ , czyli z czoła przodka i ociosów na długości odpowiadającej dobowemu postępowi drażenia  $w$ , określono jako ilość metanu wydzielającą się z objętości warstw węgla w strefie desorpcji oraz w przeliczeniu na sumaryczny czas trwania zmian roboczych, w których jest prowadzone drażenie, zgodnie ze wzorem:

$$\dot{V}_{mpo} = \frac{(F_d w + Q_p) \gamma_w (M_o - q_d)}{720 c} \cdot \left[ 1 - \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{21600 \pi^2 c D_e}{R_{zz}^2}\right) \right], \text{ m}^3/\text{min} \quad (15)$$

gdzie:

- $F_d$  – przekrój poprzeczny części węglowej strefy desorpcji wokół wyrobiska, zależy od miąższości pokładu, głębokości, wytrzymałości węgla na ściskanie i zastosowanej obudowy, obliczony odpowiednio według wzoru 3, 4 lub 5; wartości  $a_1$ ,  $b_1$  i  $b_2$  dobiera się na podstawie danych z tabeli 1 oraz wzorów (1) i (2),
  - $Q_p$  – objętość części węglowej strefy desorpcji przed frontem przodka, zależna od miąższości pokładu, głębokości, wytrzymałości węgla na ściskanie i zastosowanej obudowy, obliczona odpowiednio według wzorów (6), (7) lub (8); wartości  $a_1$ ,  $b_1$  i  $b_2$  dobiera się na podstawie danych z tabeli 1 oraz wzorów (1) i (2),
  - $w$  – postęp dobowy wyrobiska, m/dobę;
  - $c$  – liczba sześciogodzinnych zmian, podczas których jest prowadzone drażenie wyrobiska (od 1 do 4),
  - $R_{zz}$  – średni promień ziarn węgla w strefie desorpcji,  $R_{zz} = 0,1340$  cm.
- Pozostałe oznaczenia, jak wyżej.

W przypadku przecinania pokładu grubego, w zależności od tego, czy pokład węgla jest przecinany od strony spągu czy od strony stropu, wyrobisko traktuje się jako chodnik drażony odpowiednio pod stropem lub po spągu pokładu. Wydzielanie się metanu z węgla zalegającego w strefie desorpcji na pozostałej długości części węglowej drażonego wyrobiska przekopowego (poza strefą przyprzodkową), stanowi sumę ilości metanu wydzielającego się na dobę jednocześnie z  $n$  odcinków strefy o długościach  $w$  odpowiadających dobowemu postępowi drażenia wyrobiska, którą można obliczyć zgodnie ze wzorem

$$\dot{V}_{mo} = \frac{\gamma_w F_d w (M_o - q_d)}{480\pi^2} \exp\left(\frac{-86400\pi^2 D_e}{R_{zz}^2}\right) \cdot \frac{1 - \left[\exp(-86400\pi^2 D_e / R_{zz}^2)\right]^w}{1 - \exp(-86400\pi^2 D_e / R_{zz}^2)}, \quad \text{m}^3/\text{min} \quad (11)$$

gdzie  $L_p$  – długość części ślepej wyrobiska na odcinku przecinania pokładu węgla, m. Pozostałe oznaczenia, jak wyżej.

Zgodnie z opracowanym modelem, wielkości wydzielania się metanu z urobku i ze strefy desorpcji są wprost proporcjonalne do różnicy między wartością metanonośności złożowej  $M_0$  i wartością pojemności sorpcyjnej węgla względem metanu w warunkach dołowych (przy ciśnieniu  $10^5$  Pa), z uwzględnieniem temperatury pierwotnej górotworu, zawartości wilgoci całkowitej oraz popiołu w węglu  $q_d$ . W przypadku, gdy  $M_0 \leq q_d$ , zgodnie z założeniami do niniejszego modelu matematycznego, wydzielanie się metanu nie występuje.

#### 4. WERYFIKACJA OPRACOWANEGO MODELU PROGNOZY WYDZIELANIA SIĘ METANU DO DRAŻONEGO PRZEKOPU PRZECINAJĄCEGO POKŁAD WĘGLA

Zamierzona weryfikacja opracowanego modelu prognozy będzie polegała na porównaniu wielkości wydzielania się metanu z przecinanych drażonymi przekopami pokładów węgla z wartościami prognozowanymi, obliczonymi zgodnie z opracowanymi modelami dla zadanych warunków oraz oszacowaniu trafności prognoz. Wartości prognoz wydzielania się metanu, obliczone z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego, będą stanowić prognozy *ex post* wyznaczone dla tzw. prognoz wygasłych, czyli takich, dla których w momencie sporządzania są znane prawdziwe wartości zmiennej prognozowanej (Gajda 2001). Bazą danych do przeprowadzenia weryfikacji będzie materiał statystyczny z 10 przekopów drażonych kombajnami w warunkach IV kategorii zagrożenia metanowego wraz parametrami geologiczno-górnictwicznymi i organizacyjno-technicznymi oraz informacją dotyczącą prognozowanej i rzeczywistej metanowości bezwzględnej. Zestawienie zostało opracowane na podstawie danych pozyskanych z kopalń Kompanii Węglowej SA, Katowickiego Holdingu Węglowego SA i Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA. Ocena trafności prognoz zostanie przeprowadzona przez obliczenie względnego błędu prognoz *ex post* (Gajda 2001). Założono, że opracowaną prognozę uzna się za dopuszczalną, jeżeli względny

błąd *ex post*, czyli odchylenie między wartością prognozowaną a rzeczywistą, nie przekroczy 25%.

Z dokonanej weryfikacji wynika, że względny błąd prognozy *ex post* obliczony z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego dla danych dotyczących analizowanego zbioru drażonych przekopów, kształtował się w zakresie od -0,4 do +19,4%, czyli w żadnym przypadku nie przekraczał 25%. Średni względny błąd prognoz *ex post* wynosił 8,06% i był również mniejszy od wartości 25%. Wyniki analizy, obrazujące poprawność przyjętych założeń metody prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych (węglowych i węglowo-kamiennych) drażonych kombajnami, opracowanej w GIG 2009 r., wskazują na możliwość ich uwzględnienia przy opracowaniu bardziej dokładnej metody prognozowania wydzielania się metanu do projektowanych przekopów (kamienno-węglowych).

## 5. WNIOSKI

- 1) Model matematyczny wydzielania się metanu do drażonych wyrobisk korytarzowych (w tym przekopu przecinającego pokład węgla) został opracowany ze szczególnym uwzględnieniem wpływu właściwości sorpcyjnych węgla, co wskazuje na możliwość jego stosowania w praktyce, przy opracowywaniu prognoz wydzielania się metanu w czasie prowadzenia robót górniczych w kopalniach węgla kamiennego, których wyniki będą bardziej zbliżone do rzeczywistego wydzielania się metanu.
- 2) Model wydzielania się metanu do drażonego przekopu z przecinanego pokładu węgla może być podstawą do opracowania nowej metody prognozowania wydzielania się metanu do projektowanych przekopów (kamienno-węglowych).
- 3) Duży wpływ na wydzielanie się metanu do drażonych wyrobisk korytarzowych mają właściwości sorpcyjne węgla (pojemność sorpcyjna względem metanu i efektywny współczynnik dyfuzji metanu w węglu), które obecnie są określane jedynie w aspekcie zagrożenia wyrzutami metanu i skał. Rozpowszechnienie takich badań pozwoli zatem nie tylko na monitorowanie zagrożenia wyrzutowego, ale również na bardziej dokładne prognozowanie wydzielania się metanu, czyli na poprawę bezpieczeństwa prowadzonych robót.

## Literatura

1. Gajda J.B. (2001): Prognozowanie i symulacja a decyzje gospodarcze. Warszawa, Wydaw. Beck.
2. Hoek E. (1998): Practical Rock Engineering. Rocscience Inc. ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)).
3. Kalisz J., Kozłowski B., Sobala E. (1978): Porównanie metod prognozowania metanowości dla wyrobisk chodnikowych w górnictwie węglowym. Przegląd Górniczy nr 4.
4. Koptoń H. (2009): Metoda prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 3.
5. Koptoń H. (2010): Analiza stosowanej metody prognozowania metanowości przekopów przecinających pokłady węgla i zgodności jej wyników ze stanem faktycznym. III Konferencja Naukowo-Szkoleniowa: Problemy Współczesnego Górnictwa 2010. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko Nr 1/1/2010.

6. Kozłowski B., Grębski Z. (1982): Odmetanowanie górotworu w kopalniach. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
7. Kozłowski B. (1986): Prognozowanie zagrożeń metanowych w kopalniach głębinowych. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
8. Krause E., Krzystolik P., Łukowicz K. (2001): Rozpoznawanie, prognozowanie, kontrola i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
9. Metcalfe R.S., Yee D., Seidle J.P., Puri R. (1992): Review of Research Efforts in Coalbed Methane Recovery. Workshop on the Recovery and End – Use of Coal – Bed Methane, Report No. A-10. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
10. Olajossy A. (1993): Relacja: laboratorium – in situ w badaniach desorpcji metanu z pokładów węgla. Zeszyty Naukowe AGH.
11. Prusek S., Walentek A. (2005): Wielkość strefy zniszczenia górotworu wokół wyrobiska korytarzowego w oparciu o kryteria Hoeka-Browna. *Konf. nt. Aktualne zagadnienia w zakresie stosowania stalowych obudów chodnikowych. Prace Naukowe GIG. Seria Konferencje nr 49*, s. 13–24.
12. Tarnowski J. (1987): Prognoza gazowości wyrobisk chodnikowych drążonych w pokładach małej i średniej miąższości. *Archiwum Górnictwa T. 32, z. 2.*
13. Tarnowski J. (1996): Uproszczona metoda opracowania metody prognozy gazowości wyrobisk chodnikowych drążonych w gazonośnych pokładach węgla. *Konferencja nt. Zagrożenia metanowe i pożarowe w górnictwie, wykorzystanie metanu z pokładów węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG. Seria Konferencje nr 14.*

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński