



Zastosowanie wyników modelowania numerycznego stref odprężenia eksploatacyjnego w prognozowaniu emisji metanu z warstw otaczających do ścian zawałowych

Application of the results of numerical modelling of destressing zones in prediction methane emissions from surrounding layers (seams) to longwalls

Dr inż. Krystian Wierziński*

Treść: Wielopoziomowy charakter eksploatacji pokładów węgla charakterystyczny dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego oraz zaleganie w strefie odprężenia eksploatacyjnego wielu pokładów metanowych skutkuje intensyfikacją zagrożenia metanowego w ścianach z tytułu dopływu metanu desorbującego z pokładów objętych strefą odprężenia eksploatacyjnego. Dla zminimalizowania błędów prognozy metanowości bezwzględnej kluczowego znaczenia nabiera trafne określenie zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego, uzależnionego od lokalnych warunków górniczo-geologicznych, a w szczególności od parametrów geomechanicznych warstw skalnych. Mając na uwadze fakt, że w aktualnie stosowanej metodzie prognozowania metanowości bezwzględnej ścian zasięg strefy odprężenia eksploatacyjnego nie uwzględnia właściwości warstw skalnych, w artykule w oparciu o Metodę Różnic Skończonych (MRS) - wyznaczone zostały strefy odprężenia eksploatacyjnego dla dwóch ścian o długości 186 m i 250 m. W przypadku zasięgu górnej strefy odprężenia eksploatacyjnego wyniki modelowania potwierdziły założenia przyjmowane do prognozy metanowości bezwzględnej ścian. Dla strefy odprężenia eksploatacyjnego obejmującej warstwy spągowe uzyskano jednak znaczne różnice między zasięgiem określanym metodą empiryczną a metodą modelowania MRS. Po zaimplementowaniu stref MRS do algorytmu prognozowania metanowości bezwzględnej, opracowano prognozy dopływu metanu do ścian z warstw znajdujących się w strefie odprężenia eksploatacyjnego. Przeprowadzenie badań dołowych emisji metanu pozwoliło zweryfikować trafność prognozy uwzględniającej parametry geomechaniczne górotworu.

Abstract: The multi-level character of coal seams exploitation characteristic for the Upper Silesian Coal Basin and the fact that many methane seams are deposited in the destressing zone results in the intensification of methane hazard in longwalls due to the inflow of desorbing methane from the seams covered by the destressing zone. For minimising the error of forecasting the methane emission, it is crucial to correctly determine the range of the destressing zone, which depends on the local mining and geological conditions, and in particular on the geomechanical parameters of rock layers. Considering the fact that the currently used methane emission forecasting method does not take into account the properties of rock layers, the destressing zones for two longwalls with a length of 186m and 250m were determined on the basis of the Finite Difference Method (FDM). For the upper destressing zone, the modelling results confirmed the assumptions applied to the prognosis of methane emissions to the longwalls. In case of the bottom layers, significant differences were obtained between the range of destressing zone determined by the empirical method and the FDM. After the implementation of FDM zones into the methane emission prediction algorithm, prognoses of methane inflow to longwalls from layers located in the destressing zone were performed. Underground tests of methane emission allowed to verify the accuracy of the prognosis based on geomechanical parameters of the rock mass.

Słowa kluczowe:

zagrożenie metanowe, prognoza metanowości, symulacje MRS, strefa odprężenia eksploatacyjnego (desorpcji)

Keywords:

methane hazard, methane emission rate prediction, FDM simulations, destressing (desorption) zone

1. Wprowadzenie

W celu określenia przewidywanego zagrożenia metanowego w rejonach eksploatacyjnych ścian stosowane są metody prognozowania metanowości bezwzględnej. W polskim górnictwie węgla kamiennego wykorzystywana jest prognoza

metanowości bezwzględnej oparta na algorytmie zawartym w Instrukcji nr 14 GIG pt. „Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian” (Instrukcja 2000). Jej wyniki na etapie projektowania eksploatacji odgrywają kluczowe znaczenie w aspekcie wstępnej oceny zagrożenia metanowego, doboru środków profilaktyki związanej z jego zwalczaniem, a w szczególności zastosowania odmetanowania. W konsekwencji trafność prognozy wpływa na zapewnienie zakła-

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

danych założeń dotyczących poziomu wydobycia oraz na zapewnienie bezpieczeństwa ruchu zakładu górniczego.

Metoda prognozowania metanowości bezwzględnej ścian (Instrukcja 2000) zakłada bezpośredni związek wielkości postępu frontu ściany z wielkością wydzielania się metanu do środowiska ściany. Wynika to z założenia, że przemieszczający się front ścianowy powoduje powstawanie strefy odprężenia eksploatacyjnego, której objętość wzrasta proporcjonalnie do prędkości frontu. Wielkość dopływu metanu do środowiska ścian z pokładów znajdujących się w strefie odprężenia ma kluczowe znaczenie dla trafności prognozy metanowości bezwzględnej, z uwagi na charakterystyczną dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wielopoziomą eksploatację pokładów węgla oraz zaleganie w strefie odprężenia eksploatacyjnego wielu pokładów metanowych. Udział pokładów metanowych zalegających w strefie odprężenia eksploatacyjnego w dopływie metanu do ścian jest wysoki i kształtuje się na poziomie od 70 do 80% (Wierziński 2016).

W prognozie metanowości bezwzględnej ścian (Instrukcja 2000) zasięg strefy odprężenia eksploatacyjnego określany jest empirycznie i nie został uzależniony od parametrów geomechanicznych warstw skalnych. To uproszczenie dotyczące wyznaczania strefy odprężenia może powodować istotne różnice między prognozowanymi wartościami metanowości a wartościami rzeczywistymi.

W artykule, w celu określenia wpływu stref odprężenia eksploatacyjnego na wynik końcowy prognozy oraz w celu dokonania oceny wpływu parametrów geomechanicznych górotworu na zwiększenie dokładności wartości prognozowanej – wyznaczone zostały prognozy dopływu metanu do ścian z warstw otaczających z uwzględnieniem oraz z pominięciem parametrów geomechanicznych górotworu. Ustalenie poziomu trafności wyników prognoz zweryfikowane zostało w oparciu o wyniki badań rzeczywistego wydzielania metanu z rejonów dwóch ścian.

2. Uzasadnianie wyboru obiektów badań - ścian

Zakresem badań objęto dwie ściany zawałowe o długości 186 m i 250 m prowadzone w warunkach wysokiego zagrożenia metanowego. Kryteriami uzasadniającymi wybór tych obiektów były:

- wysoka metanowość bezwzględna całkowita (powyżej 20 m³CH₄/min),
- prowadzenie odmetanowania eksploatacyjnego,
- przewietrzanie ściany w układzie Y,
- odległość frontu ścianowego od miejsca rozpoczęcia eksploatacji, co najmniej 200 m,
- niskie parametry geomechaniczne warstw skalnych w dużym stopniu odbiegające od wartości przeciętnych dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

Kryterium metanowości bezwzględnej całkowitej ścian powyżej 20 m³CH₄/min i przewietrzanie w układzie Y, umożliwiło sporządzenie bilansu wentylacyjnego-metanowego, w szczególności określenie składowych metanowości całkowitej ściany tj. poziomu emisji metanu z pokładu eksploatowanego oraz poziomu emisji metanu z warstw otaczających znajdujących się w strefie odprężenia eksploatacyjnego. Warunek odległości frontu ścianowego od miejsca rozpoczęcia eksploatacji (powyżej 200 m) gwarantował ustabilizowany zasięg strefy odprężenia eksploatacyjnego i wykluczał brak wzrostu zasięgu strefy podczas przemieszczania się frontu ścianowego.

Parametry eksploatacyjne badanych ścian łącznie z metanowością bezwzględną całkowitą oraz parametry dotyczące liczby pokładów stopowych i spągowych zalegających w strefie odprężenia eksploatacyjnego i ich odległości pionowej względem pokładu eksploatowanego przedstawione zostały w tabelach: 1-2.

Rozkład metanonośności pokładów węgla w profilu pionowym przedstawiony został na rysunku 1a-b. Zamieszczone na profilach rozkłady metanonośności wynikają z badań bezpośrednich otworowych (20-45%) oraz z interpolacji wartości w oparciu o gradient metanonośności. Rozkłady metanonośności

Tabela 1. Parametry eksploatacyjne oraz warunki metanowe badanych ścian

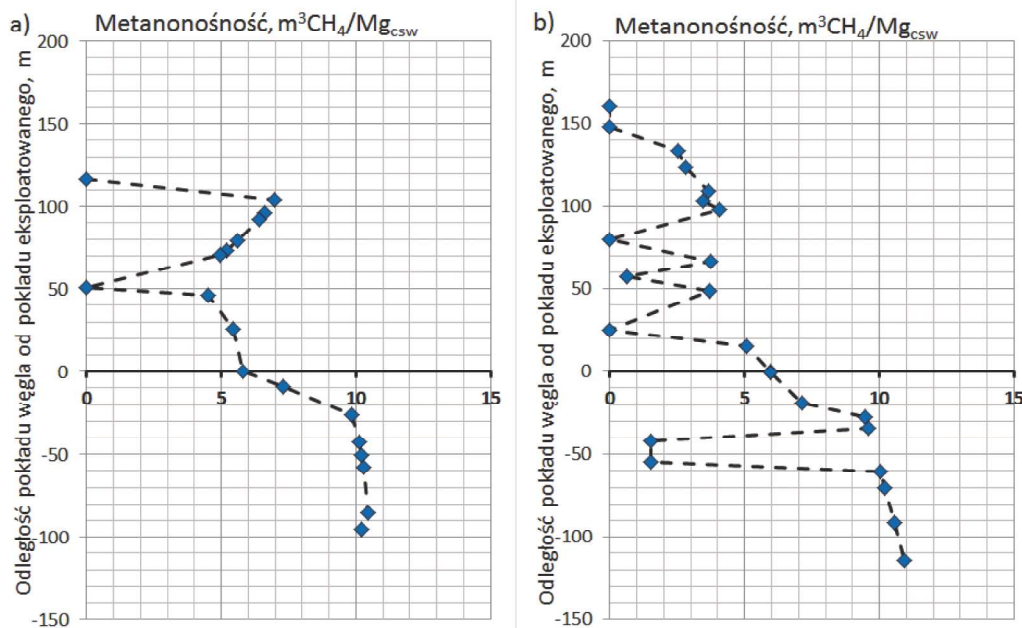
Table 1. Studied longwall parameters and total methane emission rate

Obiekt (ściana)	Wysokość	Wydobycie dobowe	Docelowy wybieg	Położenie frontu ścianowego	Długość	Metanowość bezwzględna całkowita
-	m	Mg/d	m	m	m	m ³ CH ₄ /min
B-2 Pokład 362	1,90	758-3204	605	265-605	250	17-25
A-2 Pokład 363	2,95	2710-3178	785	220-485	186	27-33

Tabela 2. Warunki stropowe i spągowe dot. warstw metanonośnych

Table 2. Roof and floor conditions for methane-bearing strata

L.p.	Parametr	Położenie względem pokładu eksploatowanego	Ściana B-2 pokład 362	Ściana A-2 pokład 363
1	Liczba warstw węgla	strop	10	9
2	Liczba piaskowców	strop	1	1
3	Liczba warstw węgla przebadanych	strop	2	3
4	Średnia miąższość warstw węgla, m	strop	1,06	1,47
5	Odległość warstw stropowych od pokładu eksploatowanego, m	strop	25,5-116,4	15,3-123,8
6	Liczba warstw węgla	spąg	7	6
7	Liczba piaskowców	spąg	2	1
8	Liczba warstw węgla przebadanych	spąg	2	2
9	Średnia miąższość warstwy węgla, m	spąg	1,54	1,09
10	Odległość warstw spągowych od pokładu eksploatowanego, m	spąg	9,0-95,5	0,0-70,5



Rys. 1. Rozkład metanoności pokładów węgla w profilu pionowym dla analizowanych 2 ścian

a) ściana B-2 w pokładzie 362, b) ściana A-2 w pokładzie 363

Fig. 1. Coal seam methane content distributions in vertical profiles for the two analysed longwalls:

a) longwall B-2, coal seam 362, b) longwall A-2, coal seam 362

uwzględniają również tzw. metanoność wtórną pokładów wynikającą z wpływu wcześniej dokonanej eksploatacji na obniżenie metanoności pierwotnej górotworu w zasięgu stref odprężenia eksploatacyjnego. W profilach geologicznych pokłady węgla zalegały przede wszystkim w otoczeniu warstw łupków ilastych oraz częściowo piaskowców.

3. Zastosowana metodyka badawcza

Zasadniczym celem zastosowanej metodyki badawczej było określenie:

- różnic dotyczących pionowego zasięgu stref odprężenia eksploatacyjnego (w tym - obszaru odgazowania pokładów węgla w otoczeniu ściany), wyznaczonych metodą empiryczną wg Instrukcji GIG nr 14 a metodą MRS uwzględniającą dodatkowo parametry geomechaniczne warstw skalnych,
- wpływu implementacji stref odprężenia eksploatacyjnego (wyznaczonych w oparciu o metodę MRS) do algorytmu prognozowania na błąd prognozy emisji metanu z pokładów węgla w strefie odprężenia eksploatacyjnego.

Dla zrealizowania zakładanych celów, zakres metodyki badawczej obejmował:

1. Określenie pionowego zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego, w tym - liczby pokładów metanowych znajdujących się w jej zasięgu oraz indywidualnych (odniesionych do pojedynczego pokładu) objętości stref ich odgazowania – w oparciu o dwie metody:

- metodę empiryczną wg Instrukcji nr 14 GIG,
- metodę numeryczną MRS z wykorzystaniem programu FLAC2D.

2. Wykonanie prognozy wydzielania się metanu z pokładów znajdujących się w strefie odprężenia eksploatacyjnego w oparciu o:

- wyniki obliczeń metodą empiryczną wg Instrukcji nr 14 GIG,

- wyniki obliczeń metodą numeryczną MRS.

3. Przeprowadzenie pomiarów rzeczywistej metanowości bezwzględnej oraz emisji metanu z warstw otaczających do środowiska ścian, w celu weryfikacji trafności wartości prognozowanych oraz oceny możliwości zastosowania metody MRS w prognozowaniu emisji metanu.

3.1. Metoda empiryczna określenia zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego wg Instrukcji nr 14 GIG

W polskim górnictwie węgla kamiennego stosowana jest prognoza metanowości bezwzględnej oparta na algorytmie zawartym w Instrukcji nr 14 GIG pt. „Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian” (Instrukcja 2000). W metodzie tej wykorzystane są zależności empiryczne umożliwiające określenie zasięgu odgazowania warstw skalnych zalegających nad i pod polem ściany w wyniku prowadzonej eksploatacji, niezależnie od ich parametrów geomechanicznych. Dla warstw skalnych zalegających nad polem ściany, tzw. warstw (pokładów) podbieranych określany jest zasięg górnej strefy desorpcji (h_g), natomiast dla warstw nadbieranych - zasięg dolnej strefy desorpcji (h_d).

Według metody empirycznej zasięg górnej i dolnej strefy odprężenia eksploatacyjnego (strefy desorpcji) uzależniony został od długości ściany (L_s) oraz nachylenia poprzecznego ściany (α). Zasięg ten opisywany jest zależnościami: (1) i (2):

- dla pokładów podbieranych:

$$h_g = \frac{L_s}{G_g}, \text{ m} \quad (1)$$

- dla pokładów nadbieranych:

$$h_d = \frac{L_s}{G_d}, \text{ m} \quad (2)$$

gdzie G_g i G_d są współczynnikami zależnymi od nachylenia poprzecznego ściany (Kozłowski, Grębski 1982, Instrukcja 2000). Dla ścian o małym nachyleniu poprzecznym ($\alpha < 5\text{deg}$) wartości współczynników wynoszą: $G_g = 1,45-1,46$; $G_d = 3,91-3,95$.

Szerokość obszaru odgazowania pokładu węgla znajdującego się w zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego (X_g , X_d) wyznaczana jest z zależności (3) i (4):

– dla pokładu podbieranego:

$$X_g = L_s - G_g \cdot a, \text{ m} \quad (3)$$

– dla pokładu nadbieranego:

$$X_d = L_s - G_d \cdot b, \text{ m} \quad (4)$$

gdzie: a , b są odległościami pokładu nabieranego (lub podbieranego) od pokładu eksploatowanego.

3.2. Metoda określenia zasięgu stref odprężenia eksploatacyjnego w oparciu o modelowanie numeryczne MRS

3.2.1. Wybór metody obliczeniowej

Do obliczeń numerycznych zasięgu odgazowania warstw stropowych i spągowych w rejonie prowadzonych ścian zawalowych wykorzystano program FLAC2D (Chinkulkijniwat i in. 2015, Karacan i in. 2005, Prassetyo, Gutierrez 2014). Program FLAC2D bazuje na metodzie różnic skończonych (MRS), której cechą charakterystyczną jest przypisanie pochodnych w układzie równań punktom dyskretnym w postaci zestawu zmiennych naprężeń lub odkształceń, przy niezdefiniowanych zmiennych w obszarze elementów.

W programach MRS po wykonaniu kroku obliczeniowego modyfikacji ulega układ równań różniczkowych, co w porównaniu z programami bazujących na Metodzie Elementów Skończonych - MES (tradycyjnie budujących globalną macierz sztywności z macierzy sztywności poszczególnych elementów), wydaje się bardziej efektywne. Wykorzystany program FLAC2D używa jawnej (explicit) metody kolejnych kroków dla rozwiązania układu równań różniczkowych, w przeciwieństwie do większości programów MES, które stosują niejawną metodę budowy globalnej macierzy sztywności

(implicit). Dodatkowym argumentem przemawiającym za wykorzystaniem metody MRS jest możliwość budowy układu równań różniczkowych dla dowolnego kształtu elementu.

Wykorzystany do obliczeń program FLAC2D rozwiązuje problem statyczny przy użyciu dynamicznych równań ruchu. Głównym powodem takiego sposobu podejścia do rozwiązania problemu jest konieczność zapewnienia zbieżności obliczeniowej systemu numerycznego, przy niestabilnym układzie fizycznym (możliwość zachwiania fizycznej równowagi, co skutkuje zmianą części energii odkształcenia na ulegającą dyssypacji energii kinetyczną). W uproszczeniu wykorzystany w FLAC2D cykl obliczeniowy przedstawia się następująco (Itasca, 2008):

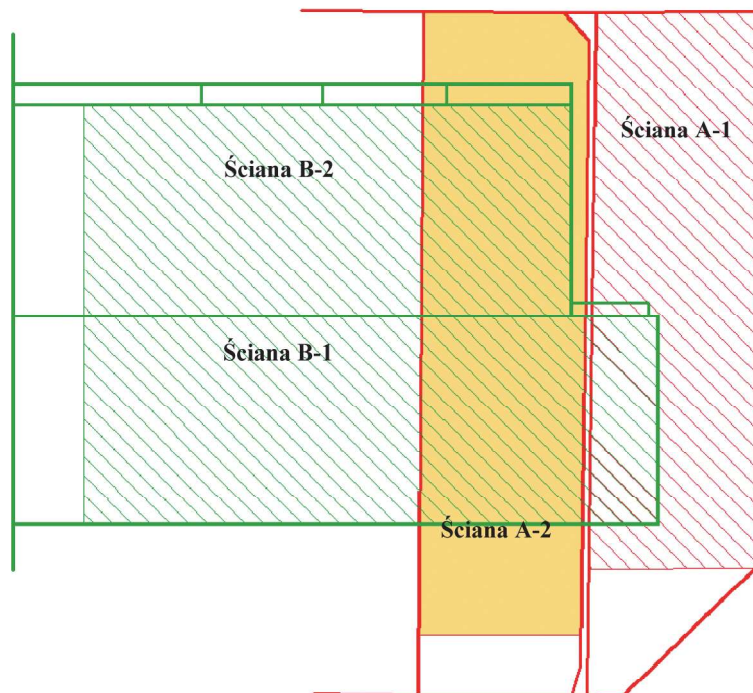
- budowa równań ruchu na podstawie wartości prędkości i przemieszczeń otrzymanych z wartości naprężeń i sił,
- obliczenia przyrostów odkształceń na podstawie prędkości, a następnie naprężeń na podstawie przyrostów odkształceń.

Najważniejszą zaletą takiego sposobu obliczeń jest pominięcie konieczności wykonywania iteracji naprężeń i odkształceń w obrębie każdego elementu.

3.2.2. Założenia do modelowania zasięgu odprężenia eksploatacyjnego

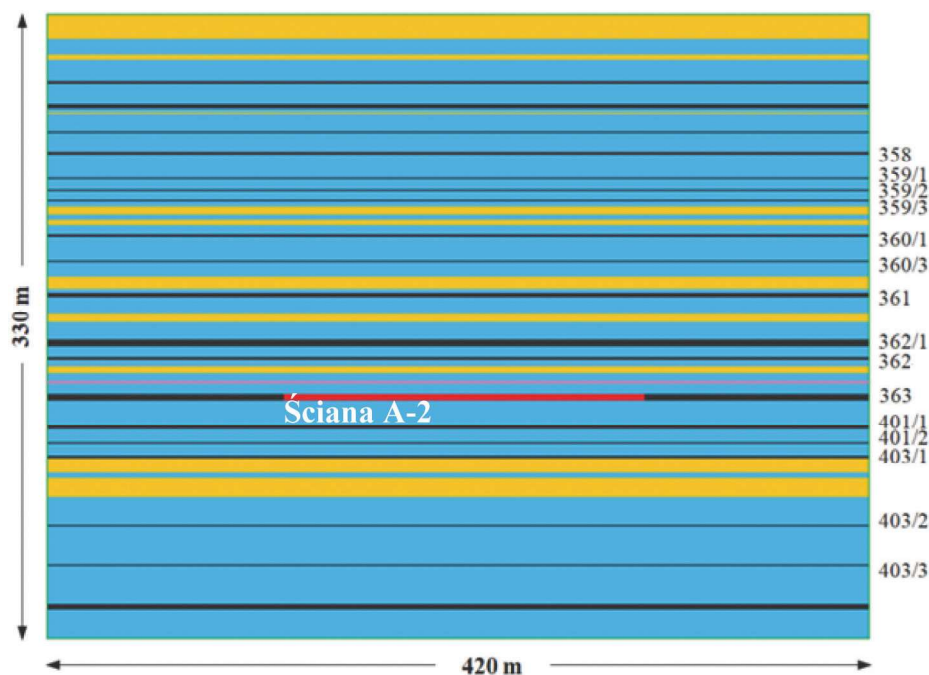
Mając na uwadze zakres analizy obejmującej ściany prowadzone w różnych warunkach górniczo-geologicznych tj. w dwóch różnych pokładach z kierowaniem stropu na zawał, w obliczeniach numerycznych konieczne było przyjęcie indywidualnych i niezależnych założeń dot. modelowania zasięgu odprężenia eksploatacyjnego.

Podstawę do konstrukcji modeli numerycznych górotworu w rejonie prowadzonej eksploatacji stanowiły mapy pokładowe oraz profil geologiczny skał stropowych i spągowych. Fragment profilu geologicznego skał stropowych i spągowych wraz ze schematem lokalizacji ścian B-1 i B-2 w pokładzie 362 i ścian A-1 i A-2 w pokładzie 363 przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat lokalizacji ścian B-1 i B-2 w pokładzie 362 i ścian A-1 i A-2 w pokładzie 363

Fig. 2. Diagram of longwall B-2 and A-2 locations in coal seams 362 and 363



Rys. 3. Model numeryczny górotworu wokół wybieranej ściany A-2 w pokładzie 363

Fig. 3. Numerical model of the rock mass surrounding the mined longwall A-2, coal seam 363

W oparciu o schematy ścian i profile geologiczne wykonano w programie FLAC2D modele numeryczne górotworu dla dwóch analizowanych eksploatacji ścianowych. Opracowane modele geometryczne stanowiły ograniczony obszar (tarczę) o następujących wymiarach:

- szerokość: 1050 m, wysokość: 350 m dla ścian w pokładzie 362 (rys. 3),
- szerokość: 420 m, wysokość: 330 m dla ścian w pokładzie 363.

Wielkość modeli, w szczególności ich szerokość, uzależniona została głównie od liczby eksplodowanych ścian w pokładzie. W pokładzie 362 model uwzględniał dwie ściany o długości 250 m każda, natomiast w pokładzie 363 jedną ścianę o długości 186 m.

Istotny element modelowania stanowił dobór parametrów geomechanicznych poszczególnych warstw skalnych oraz zastosowanie odpowiedniego kryterium zniszczeniowego. Dla potrzeb analiz zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego obliczenia numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem modelu sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra. W opracowanym modelu uwzględniona została plastyczność górotworu, tj. nieliniowość charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, polegająca na założeniu cech liniowo-sprężystych dla górotworu w wydzielonym obszarze modelu oraz dodatkowo cech plastycznych poza jego obszarem. Realizowano to przez rozdzielanie przyrostu odkształcenia na składową przyrostu odkształcenia sprężystego oraz składową przyrostu odkształcenia plastycznego. W procedurze nume-

rycznej jako pierwszy obliczany był przyrost odkształcenia wynikający z zastosowania prawa Hooke'a, a następnie na podstawie wartości odkształceń, określone były naprężenia. Przy otrzymaniu wartości naprężeń znajdujących się poza powierzchnią graniczną (definiującą przyjęte kryterium wytrzymałościowe) założono, że zachodzą plastyczne deformacje i wówczas wyłącznie odkształcenia sprężyste uczestniczyły w procedurze kolejnych obliczeń przyrostów naprężeń (Itasca 2008).

Założenia do obliczeń dotyczące podstawowych wartości parametrów warstw skalnych opisujące kryterium zniszczeniowe Coulomba-Mohra zestawiono w tabeli 3. Parametry te określono na podstawie przeprowadzonych w rejonie analizowanych ścian badań penetrometrycznych skał.

Dla potrzeb obliczeniowych na modelach przyjęto następujące założenia:

- brak możliwości przemieszczeń pionowych i poziomych na krawędziach granicznych (brzegowych) modelu,
- górotwór stanowi ośrodek sprężysto-plastyczny i izotropowy,
- naprężenia pierwotne wynikają z głębokości położenia ścian eksploatowanych i średniego ciężaru objętościowego nakładu:
 - 22,5 MPa dla ściany B-2 w pokładzie 362,
 - 24,1 MPa dla ściany A-2 w pokładzie 363,
- wyzerowanie wektorów przemieszczeń i prędkości w modelu numerycznym, po wstępnym kroku obliczeniowym pozwalającym na uzyskanie pierwotnego stanu naprężeń,

Tablica 3. Podstawowe parametry mechaniczne skał w rejonie analizowanych ścian przyjęte do obliczeń numerycznych
Table 3. Basic rock mechanical parameters in the area of the analysed longwalls adopted for numerical calculations

Parametry geomechaniczne	Rodzaj skały		
	węgiel	łupek ilasty	piaskowiec
Moduł Younga E , GPa	2,5	4,5	10,5
Współczynnik Poissona ν	0,25	0,25	0,25
Wytrzymałość na rozciąganie R_t , MPa	0,039	0,074	0,240
Kohezja c , MPa	0,54	0,75	1,90
Kąt tarcia wewnętrzny φ , °	24	27	33

- przypisanie modelu „null” strefom odpowiadającym obszarom ścian oraz ponowne przeliczenie modelu numerycznego realizowane w kolejnych krokach obliczeniowych.

Dla przedstawionych i przyjętych warunków brzegowych modeli numerycznych wykonano obliczenia zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego (strefy spekań górotworu) wokół wybieranych ścian zawałowych, co w dalszej kolejności stanowiło podstawę do określenia zasięgu odgazowania górotworu.

3.3. Algorytm prognozowania emisji metanu z warstw otaczających w oparciu o wyniki obliczeń metodą empiryczną oraz metodą numeryczną MRS

Przyjęty algorytm prognozowania emisji metanu z warstw otaczających do ścian w oparciu o wyniki obliczeń metodą numeryczną MRS zasadniczo nie odbiega od głównych założeń jakie zostały przyjęte w stosowanej metodzie empirycznej wg Instrukcji nr 14 GIG. Założono, że dopływ desorbowanych zasobów metanu z warstw stropowych i spągowych znajdujących się w strefie odprężenia eksploatacyjnego do środowiska ściany (Q_{DES}) można opisać zależnością (5):

$$Q_{DES} = \frac{c \cdot p}{1.44 \cdot 10^{-5}} \cdot [\sum_{i=1}^n (\gamma_{gi} \cdot m_{gi} \cdot X_{gi} \cdot W_{gi} \cdot \varphi_{gi}) + \sum_{i=1}^m (\gamma_{di} \cdot m_{di} \cdot X_{di} \cdot W_{di} \cdot \varphi_{di})], \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min} \quad (5)$$

gdzie:

c – bezwymiarowy współczynnik korekcyjny, określane z zależności $c = 1,24 \cdot p^{-0,32}$

p – postęp dobowy frontu ścianowego, m/d,

W_{gi} (W_{di}) – metanonośność wtórna i -tej warstwy podbieranej (nadbieranej), $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{\text{CSW}}$,

g_{gi} (g_{di}) – gęstość węgla lub warstwy metanonośnego piaskowca stanowiącego i -tą warstwę podbieraną (nadbieraną), Mg/m^3

m_{gi} (m_{di}) – miąższość i -tej warstwy podbieranej (nadbieranej), m

φ_{gi} – stopień odgazowania dla i -tej warstwy pobieranej, %, określane z zależności:

$$\varphi_{gi} = 67.71 \cdot e^{-0.04lu(gi)} \quad (6)$$

φ_{di} – stopień odgazowania dla i -tej warstwy nabieranej, %, określane z zależności:

$$\varphi_{di} = 54.14 \cdot e^{-0.037lu(di)} \quad (7)$$

$lu_{(di)}$ ($lu_{(gi)}$) – odległości umowne i -tej warstwy nabieranej lub podbieranej od pokładu eksploatowanego, m

$$lu = \frac{l}{m_e \cdot a} \quad (8)$$

l – rzeczywista odległość pionowa pokładu nabieranego lub podbieranego od pokładu eksploatowanego, m

m_e – wysokość ściany, tzw. furta eksploatacyjna, m

a – współczynnik zależny od sposobu kierowania stropem (dla zawału, $a = 1$).

Istotna różnica w algorytmie prognozowania dotyczyła ustalenia parametrów X_{gi} , X_{di} występujących w zależności (5) związanych z oszacowaniem wydzielania się metanu do środowiska ściany z warstw otaczających objętych strefą odprężenia eksploatacyjnego. Parametry te dotyczą odpowiednio szerokości obszaru odgazowania:

- i -tej warstwy podbieranej znajdującej się w zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego, X_{gi} , m,

- i -tej warstwy nadbieranej znajdującej się w zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego, X_{di} , m.

Wartości X_{gi} , X_{di} przyjęte zostały w zależności od metody prognozowania wydzielania metanu z warstw otaczających

do ściany. Zgodnie z Instrukcją nr 14 GIG zasięg strefy odprężenia eksploatacyjnego wyznaczony został w oparciu o zależności empiryczne (3–4). Natomiast w przypadku implementacji wyników modelowania numerycznego (MRS) zasięg ten określony został w oparciu o mapę wskaźnika plastyczności uzyskanego w programie FLAC2D. W tym przypadku zasięg strefy odprężenia eksploatacyjnego oznaczony został przez X_{giDES} , X_{diDES} .

Niezależnie od przyjętego algorytmu, w prognozach wystąpiła konieczność przyjęcia dla większości pokładów węgla (55–80%) metanonośności pierwotnej w oparciu o interpolacje wartości z gradientu metanonośności, z uwagi na brak przeprowadzonych badań bezpośrednich zawartości metanu w tych pokładach. Dla piaskowców o miąższości powyżej 5m zalegających w otoczeniu pokładów węgla o metanonośności powyżej $8 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{\text{CSW}}$ przyjęto zawartość metanu w zakresie od 0,5 do $1,5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}$.

3.2. Zastosowana metodyka badań dołowych wydzielania metanu w środowisku ścian

Bilans wydzielania metanu w rejonie badanych ścian przeprowadzony został w oparciu o badania dołowe rozplywu powietrza i stężeń metanu w wyrobiskach oraz w oparciu o dane z raportów ujęcia metanu do sieci odmetanowania.

W ramach badań dołowych określających wydatki powietrza w wyrobiskach przeprowadzone zostały pomiary geometryczne wyrobisk ścianowych i chodników oraz pomiary prędkości powietrza. Pomiar parametrów geometrycznych wyrobisk, tj. szerokości i wysokości określony został taśmą mierniczą z dokładnością do 5cm w nawiązaniu do wykładki wyrobiska. Badania prędkości powietrza wykonane zostały w przekroju poprzecznym w oparciu o dwie niezależne metody (trawersu i średniej z pomiarów punktowych). W wyrobiskach korytarzowych pomiary punktowe prędkości powietrza (składowej równoległej do osi wyrobiska) przeprowadzone zostały wg siatki pomiarowej o boku 0,4 m (Wierzbński 2016). Do pomiaru prędkości wykorzystano anemometry skrzydełkowe mAS-4 o obniżonym zakresie pomiarowym. Do pomiarów stężeń metanu wykorzystano przenośne mierniki typu X-am 5000 oraz pipietowe próby powietrza do laboratoryjnej analizy chromatograficznej.

W ramach badań wykonano 13 serii pomiarowych w miejscach sieci wentylacyjnej (pkt. 1-3), umożliwiających określenie takich wskaźników emisji metanu jak:

- metanowość wentylacyjna rejonu ściany,
- metanowość bezwzględna całkowita rejonu,
- dopływ metanu do rejonu ściany prądem powietrza świeżego,
- wydzielanie metanu z pokładów nadbieranych i podbieranych do środowiska ściany.

Obliczenia przeprowadzone zostały w oparciu o zależności (11–14), w których indeksy we wzorach dotyczą numeru miejsca pomiarowego (zgodnie z przykładowym schematem przewietrzania dotyczącym ściany B-2 w pokładzie 362, rys. 5).

Metanowość wentylacyjna rejonu ściany:

$$Q_{we} (rej) = [(Q_3 \cdot n_3) - (Q_1 \cdot n_1)] \cdot 0,01, \text{ m}^3/\text{min} \quad (11)$$

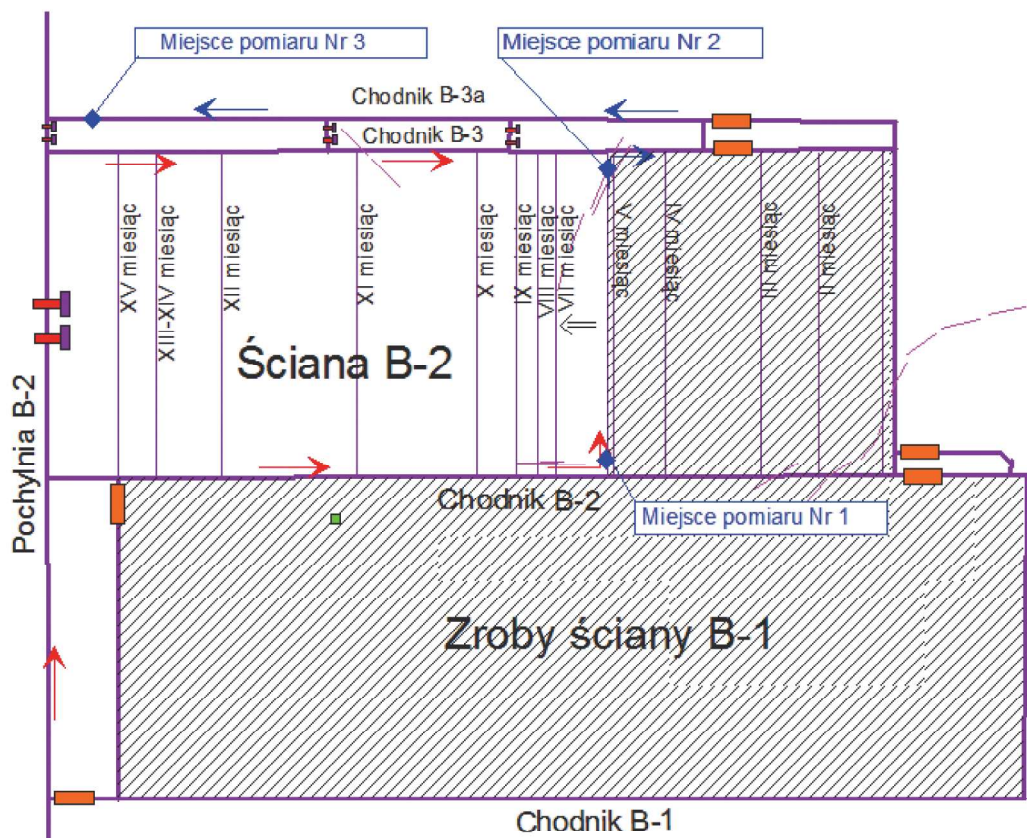
gdzie:

n_1 – uśredniona wartość koncentracji metanu w przekroju poprzecznym ściany (wlot do ściany), %

Q_1 – uśredniona wartość wydatku powietrza zmierzonego w ścianie, m^3/min

n_3 – uśredniona wartość koncentracji metanu w wyrobisku korytarzowym, %

Q_3 – uśredniony wydatek powietrza zmierzony w wyrobisku korytarzowym, m^3/min



Rys. 5. Schemat przewietrzania rejonu ściany B-2 pokł. 362 wraz z miejscami pomiarów wentylacyjnych

Fig. 5. Longwall B-2, coal seam 362 area ventilation diagram with ventilation measurement locations

Metanowość wentylacyjnej ściany:

$$Q_{we(sc)} = [(Q_1 \cdot n_2) - (Q_1 \cdot n_1)] \cdot 0,01 \quad , \text{m}^3/\text{min} \quad (12)$$

gdzie: n_2 – uśredniona wartość koncentracji metanu w ścianie na jej wylocie, %

Metanowość bezwzględna całkowita rejonu:

$$Q_{c(rej)} = Q_{we(rej)} + Q_o \quad (13)$$

gdzie: Q_o – ujęcie metanu z rejonu ściany, m^3/min

Wydzielanie metanu z pokładów nadbieranych i podbieranych do środowiska ściany:

$$Q_{DES} = Q_{we(rej)} - Q_{we(sc)} + Q_o, \text{m}^3/\text{min} \quad (14)$$

4. Wyniki obliczeń numerycznych MRS zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego

Do oceny strefy odprężenia w modelach numerycznych wykorzystany został wskaźnik plastyczności opisujący zniszczenie poszczególnych punktów masy skalnej w wyniku naprężeń rozciągających lub ścinających. Wyniki obliczeń numerycznych dla analizowanych dwóch ścian pokazane zostały na przekrojach pionowych (poprzecznych do wybiegów ścian) w formie map wskaźnika plastyczności (rys. 6-7). Dla rozróżnienia przyczyn powstania strefy zniszczenia, kolorem czerwonym zaznaczona została strefa powstała na skutek ścinania, a kolorem fioletowym w wyniku sił rozciągających. Ponadto na wykresie wskazano kolorem zielonym strefy zniszczenia powstałe na skutek wcześniejszej prowadzonej eksploatacji, lecz w obszarze której naprężenia nie przekroczyły granicy plastyczności. Na rysunkach tych wprowadzono również

linie graniczne, oddzielające strefy odprężenia eksploatacyjnego (kształt trapezu) od pozostałej części nienaruszonego górotworu oraz wprowadzono dopasowany do uzyskanych stref pionowy rozkład stopnia odgazowania górotworu w zależności od odległości względem pokładu eksploatacyjnego (Kozłowski, Grębski 1982). W tym celu wykorzystane zostały zależności 5-8.

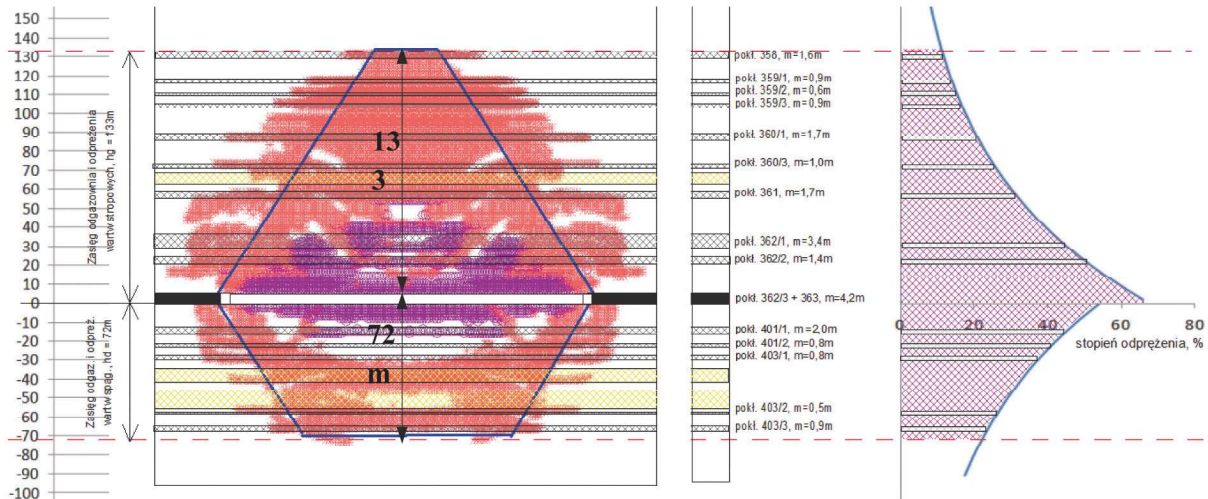
Wyniki obliczeń numerycznych metodą MRS strefy spękań górotworu wokół wyrobisk ścianowych pokazują, że zasięg strefy spękań skał dla skał stropowych (hg) jak i spagowych (hd) wynosił:

- $hg_{MRS} = 169$ m oraz $hd_{MRS} = 105$ m dla ściany B-2 w pokładzie 362 o długości 250 m,
- $hg_{MRS} = 133$ m oraz $hd_{MRS} = 72$ m dla A-2 w pokładzie 363 o długości 184 m.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń metodą MRS potwierdziły zatem spodziewany wzrost zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego w zależności od długości ściany, zarówno dla warstw stropowych, jak i warstw spagowych.

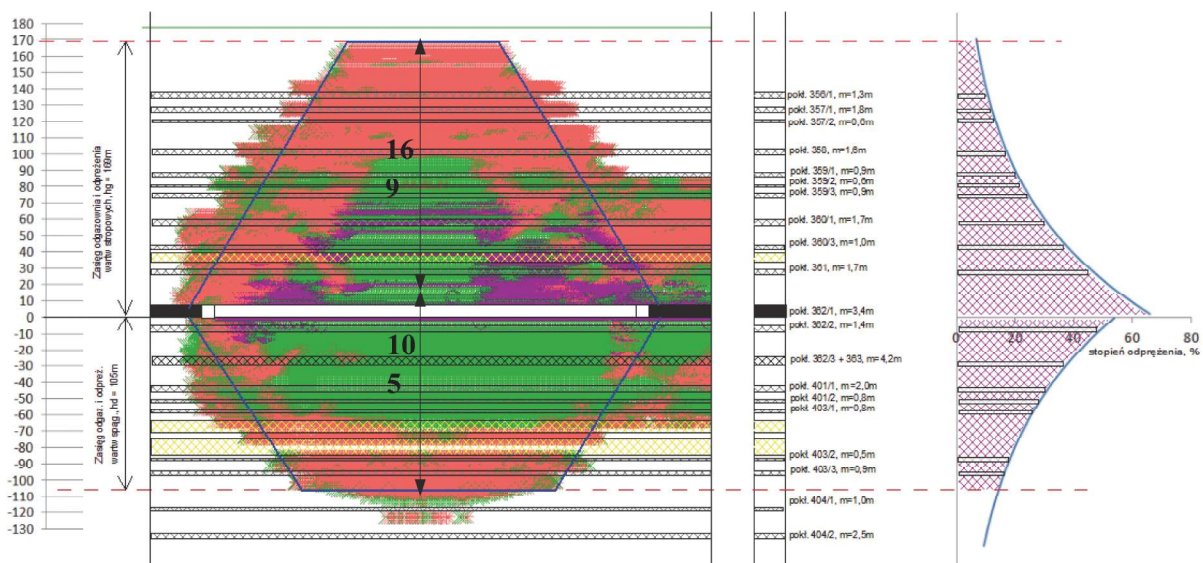
5. Wyniki pomiarów dołowych oraz weryfikacja trafności prognozy MRS i empirycznej

Wyniki przeprowadzonych badań stężeń metanu (n_1, n_2, n_3) oraz wydatków powietrza (Q_1, Q_2, Q_3) ujęcia metanu do sieci odmetanowania (Q_o) oraz wynikające z pomiarów wielkości wydzielania metanu z pokładów nadbieranych i podbieranych (Q_{DES}) zestawione zostały w tabeli 4.



Rys. 6. Wyniki obliczeń zasięgu odprężenia eksploatacyjnego warstw skalnych w otoczeniu ściany A-2 w pokładzie 363 z wykorzystaniem metody MRS (długość ściany, $L_s=186$ m), łącznie z implementacją rozkładu stopnia odgazowania górotworu

Fig. 6. Destressing zone range calculation results for rock strata adjacent to longwall A-2 in coal seam 363 using FDM method (longwall length, $L_s=186$ m), including the implementation of rock mass degasification level distribution



Rys. 7. Wyniki obliczeń zasięgu odprężenia eksploatacyjnego warstw skalnych w otoczeniu ściany B-2 w pokładzie 362 z wykorzystaniem metody MRS (długość ściany, $L_s=250$ m), łącznie z implementacją rozkładu stopnia odgazowania górotworu

Fig. 7. Destressing zone range calculation results for rock strata adjacent to longwall B-2 in coal seam 362 using FDM method (longwall length, $L_s=250$ m), including the implementation of rock mass degasification level distribution

Ocenę możliwości zastosowania numerycznych metod wyznaczania zasięgu odgazowania warstw skalnych w prognozowaniu emisji metanu w rejonach ścian przeprowadzono w oparciu o analizę porównawczą wyników prognozy wydzielania się desorbowanych zasobów metanu z warstw otaczających, znajdujących się w strefie odprężenia eksploatacyjnego, z wynikami pomiarów emisji metanu z warstw otaczających. W analizie uwzględnione zostały okresy eksploatacji ścian, w których wybieg przekraczał 200 m, zapewniając osiągnięcie pełnego pułapu strefy odprężenia

eksploatacyjnego. Odrzucono również okresy nieprodukcyjne np. brak wydobywania w ścianie B-2 p. 362 w okresie XVI miesiąca. Dla tej ściany odrzucono również miesiąc VI, gdzie przy małym postępie dobowym realizowano eksploatację pokładu w strefie zaburzeń geologicznych (uskoków), stanowiącą źródło dodatkowej lokalnej emisji metanu do ściany, którego nie uwzględnia się w prognozach. Wyniki porównawcze prognozy wg Instrukcji GIG 14 oraz metody MRS łącznie z wartościami błędów bezwzględnych oraz błędów względnych prognozy zestawione zostały w tabelach 5-6.

Tabela 4. Wyniki pomiarów parametrów wentylacyjno-metanowych oraz obliczone wielkości wydzielania metanu z pokładów nadbieranych i podbieranych (Q_{DES})

Table 4. Ventilation and methane parameter measurement results, calculated methane emission rates from overhand and underhand coal seams (Q_{DES})

Ściana	Data badania	Polożenie frontu ściany	Średnie wydobywanie dobowe, Wd	Wyniki pomiarów					Wyniki obliczeń	
				$Q_1 = Q_2$	Q_3	$n\pm$	n_2	n_3	Q_o	Q_{DES}
-	m-c	m	Mg/d	m ³ /min	m ³ /min	% CH ₄	% CH ₄	% CH ₄	m ³ CH ₄ /min	m ³ CH ₄ /min
A-2	III	220	3178	1370	2970	0,43	0,84	0,86	12,2	26,23
A-2	IV	325	3698	1370	2975	0,30	0,89	0,80	10,8	22,41
A-2	V	405	3009	1370	2985	0,22	0,59	0,68	11,7	23,92
A-2	VI	485	2710	1375	2990	0,27	0,61	0,68	10,6	22,54
A-2	VII	520	2371	1375	2985	0,21	0,69	0,92	8,3	26,27
B-2	VII	265	1391	1310	2335	0,00	0,80	0,99	7,5	20,14
B-2	VIII	280	923	1250	2200	0,00	0,42	0,83	6,7	19,71
B-2	IX	295	894	1020	1720	0,00	0,32	0,75	4,9	14,54
B-2	X	365	2753	1025	1735	0,00	0,49	0,72	5,1	12,57
B-2	XI	460	3204	1038	1743	0,00	0,75	0,74	6,3	11,41
B-2	XII	525	2881	1030	1735	0,00	0,57	0,63	9,5	14,56
B-2	XIII	575	1691	1037	1722	0,00	0,45	0,50	9,0	12,94
B-2	XV	605	758	825	1505	0,00	0,30	0,39	1,3	4,69

Tabela 5. Wyniki prognoz wydzielania się desorbowanych zasobów metanu z warstw otaczających do środowiska ściany wykonanych metodą empiryczną w porównaniu ze zmierzoną emisją metanu z warstw otaczających

Table 5. Prediction results for emitted methane volumes desorbed from adjacent strata to the longwall environment, obtained by means of the empirical method calculations compared to the measured methane emission rates from adjacent strata

Ściana	Nr miesiąca	Zmierzona $Q(des)$	Prognoza $Q(des)$	Błąd bezwzględny	Błąd względny
-	-	m ³ /min	m ³ /min	m ³ /min	%
A-2	III	26,23	14,40	-11,83	-0,45
A-2	IV	22,41	8,67	-13,74	-0,61
A-2	V	23,92	12,67	-11,25	-0,47
A-2	VI	22,54	9,96	-12,58	-0,56
A-2	VII	26,27	8,59	-17,68	-0,67
B-2	VII	20,14	9,63	-10,51	-0,52
B-2	VIII	19,71	7,23	-12,48	-0,63
B-2	IX	14,54	7,13	-7,41	-0,51
B-2	X	12,57	9,63	-2,94	-0,23
B-2	XI	11,41	10,71	-0,70	-0,06
B-2	XII	14,56	9,93	-4,63	-0,32
B-2	XIII	12,94	6,91	-6,03	-0,47
B-2	XV	4,69	0,83	-3,86	-0,82

Tabela 6. Wyniki prognoz wydzielania się desorbowanych zasobów metanu z warstw otaczających do środowiska ściany wykonanych metodą MRS w porównaniu ze zmierzoną emisją metanu z warstw otaczających

Table 6. Prediction results for emitted methane volumes desorbed from adjacent strata to the longwall environment, obtained by means of the FDM method calculations compared to the measured methane emission rates from adjacent strata

Ściana	Nr miesiąca	Zmierzona $Q(des)$	Prognoza $Q(des)$	Błąd bezwzględny	Błąd względny
-	-	m ³ /min	m ³ /min	m ³ /min	%
A-2	III	26,23	25,70	-0,53	-0,02
A-2	IV	22,41	20,23	-2,18	-0,10
A-2	V	23,92	23,56	-0,36	-0,01
A-2	VI	22,54	19,58	-2,96	-0,13
A-2	VII	26,27	17,52	-8,75	-0,33
B-2	VII	20,14	14,74	-5,40	-0,27
B-2	VIII	19,71	11,14	-8,57	-0,43
B-2	IX	14,54	10,91	-3,63	-0,25
B-2	X	12,57	16,42	3,85	0,31
B-2	XI	11,41	18,21	6,80	0,60
B-2	XII	14,56	16,94	2,38	0,16
B-2	XIII	12,94	11,79	-1,15	-0,09
B-2	XV	4,69	6,83	2,14	0,45

Tabela 7. Wyniki średnich błędów prognozy
Table 7. Average prediction error results

	Prognoza dopływu metanu z warstw otaczających	
	Metoda empiryczna	Metoda MRS
Średni błąd bezwzględny, $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{min}$	8,8 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{min}$	3,5 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{min}$
Średni błąd względny	0,49	0,22

Przedstawione w tabelach 5-6 rezultaty prognozy wydzielania metanu z warstw otaczających pokazują, że prognoza MRS w żadnym przypadku nie dała błędu bezwzględnego prognozy przekraczającego $10 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$. W metodzie empirycznej błąd ten występuje w ponad połowie przypadków. Analizując błąd względny na poziomie 50%, należy zauważyć, że prognoza MRS dała jeden wynik, natomiast metoda empiryczna pięć wyników, w tym jeden przekraczający poziom 80%.

Reasumując wyniki prognoz wydzielania się metanu z warstw otaczających - można stwierdzić, że większą trafnością charakteryzuje się metoda MRS, w stosunku do metody empirycznej. Do podobnych wniosków można dojść analizując uśrednione wartości błędów (tabela 7).

Mniejsza wartość średniego błędu bezwzględnego dla prognozy opartej na modelowaniu numerycznym MRS potwierdziła również, że wyniki uzyskane metodą MRS lepiej korespondują z wynikami rzeczywistymi. Można więc zakładać, że implementacja stref odprężenia eksploatacyjnego MRS do algorytmu prognozowania będzie poprawiała wiarygodność prognoz zarówno metanowości bezwzględnej całkowitej, jak i wydzielania się z warstw otaczających. Z przeprowadzonych analiz wynika również, że aktualne prognozy dotyczące ścian prowadzonych w warunkach niskich parametrów geomechanicznych górotworu będą niedoszacowane.

6. Analiza porównawcza stref odprężenia eksploatacyjnego oraz próba parametryzacji strefy odprężenia eksploatacyjnego uzyskanej metodą MRS

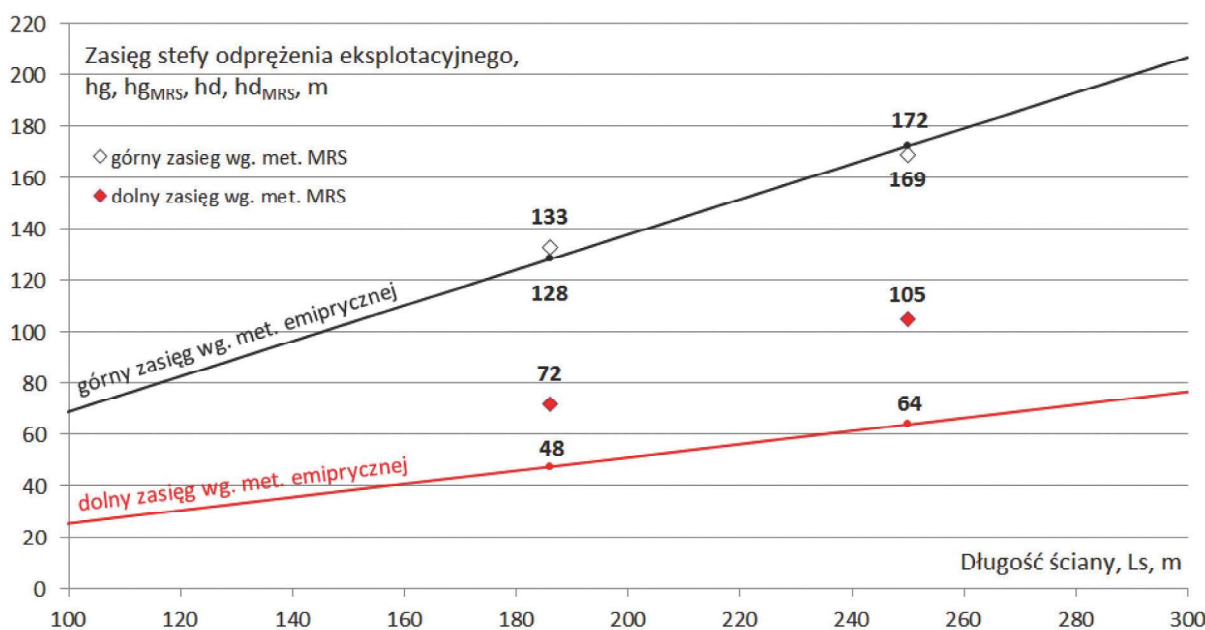
Wyniki porównawcze zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego obliczeń metodą MRS z wynikami obliczeń empirycznych (na bazie Instrukcji GIG nr 14) zestawiono na rys. 7.

Rezultaty obliczeń zasięgu górnej strefy odprężenia eksploatacyjnego potwierdzają dużą zbieżność wyników obliczeń MRS z metodą empiryczną. Różnica w zasięgu górnej strefy odprężenia nie przekracza 5 m. Wyniki obliczeń MRS potwierdzają również wyniki literaturowe (Whittles i in. 2006).

Istotne różnice między metodami obliczeniowymi związane są z zasięgiem dolnej strefy odprężenia eksploatacyjnego. Można również zauważyć, że rozbieżności te wzrastają wraz ze wzrostem rozpatrywanej długości ściany. Przykładowo, dla długości ściany wynoszącej 250 m dolny zasięg obliczony metodą RMS jest o 40 m większy.

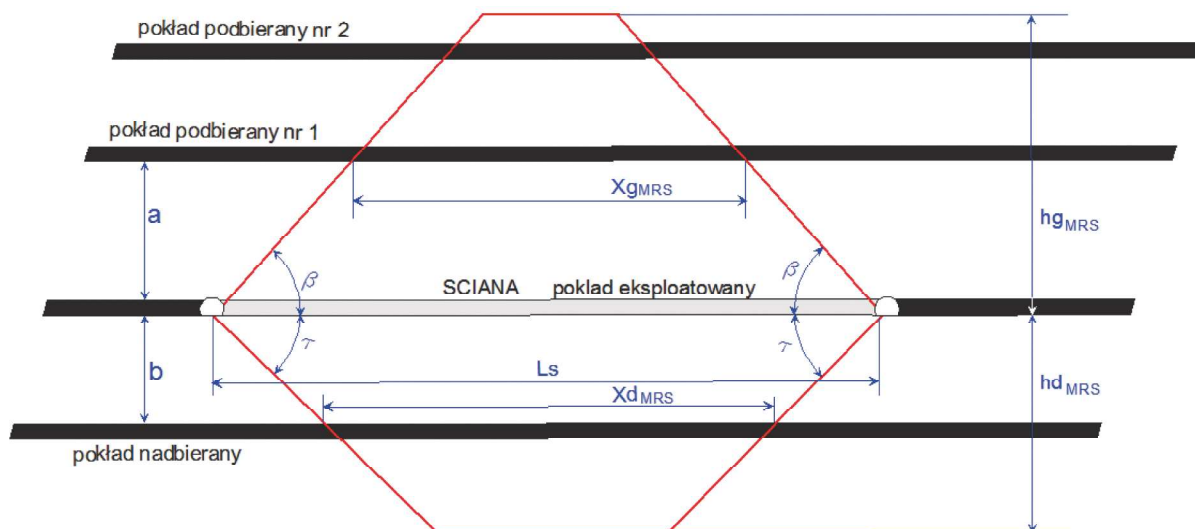
Prócz ww. rozbieżności, występują również istotne różnice w kształcie strefy odprężenia eksploatacyjnego uzyskane metodą MRS, co w konsekwencji wpływa na szerokość obszaru odgazowania pokładu węgla (parametry: X_g i X_d we wzorach: 3-4) i ostatecznie na objętość odprężanego złoża.

Dla oceny wyników obliczeń metodą MRS i parametryzacji uzyskanej strefy odprężenia eksploatacyjnego wprowadzono modyfikację modelu kształtu strefy (rys. 8) względem kształtu przyjmowanego w Instrukcji nr 14 GIG (Instrukcja 2000).



Rys. 7. Wyniki obliczeń zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego uzyskane metodą MRS oraz metodą empiryczną

Fig. 7. The results of calculations of the destressing zone range obtained by the FDM method and the empirical method



Rys. 8. Uproszczony kształt strefy odprężenia eksploatacyjnego w przekroju pionowym wzdłuż długości ściany - uzyskany w oparciu o wyniki modelowania MRS

Fig. 8. Simplified destressing zone range in a vertical section along the longwall length – obtained based on FDM modelling results

Przedstawione na zmodyfikowanym modelu strefy odprężenia eksploatacyjnego (rys. 8) parametry oznaczają:

- hg_{MRS} , hd_{MRS} – górny i dolny zasięg strefy odprężenia eksploatacyjnego, m
- a , b – odległość pokładów podbieranych i nadbieranych od pokładu eksploatowanego, m
- Xg_{MRS} , Xd_{MRS} – szerokość warstwy podbieranej (nadbieranej) w strefie odprężenia eksploatacyjnego (szerokość strefy odgazowania), m

Analogicznie jak we wzorach (1) i (2), do wyznaczenia parametrów modelu wprowadzono współczynniki (Gg_{MRS-1} , Gd_{MRS-1} , Gg_{MRS-2} , Gd_{MRS-2}) pomocnicze do określenia zarówno zasięgu stref odgazowania oraz szerokości warstw znajdujących się w tej strefie. Przez Gg_{MRS-1} , Gd_{MRS-1} oznaczone zostały współczynniki związane z zasięgiem strefy odgazowania (hg_{MRS} , hd_{MRS}), z kolei Gg_{MRS-2} , Gd_{MRS-2} - współczynniki dot. wyznaczenia szerokości warstw w strefie (Xg_{MRS} , Xd_{MRS}).

Wykorzystując ww. współczynniki, zasięg strefy odprężenia dla pokładów podbieranych oraz dla pokładów nadbieranych można wyznaczyć z zależności: (13) i (14).

$$hg_{MRS} = \frac{Ls}{Gg_{MRS-1}}, \text{ m} \tag{13}$$

$$hd_{MRS} = \frac{Ls}{Gd_{MRS-1}}, \text{ m} \tag{14}$$

W tabeli 8 zestawione zostały wartości współczynników Gg_{MRS-1} , Gd_{MRS-1} w oparciu o modelowanie MRS.

Przy założeniu spełnienia warunków zalegania pokładów w strefie odprężenia tj. $a < hg_{MRS}$ i $b < hd_{MRS}$, szerokość strefy odprężenia odniesionej do warstwy pokładu $_{MRS}$ węgla podbieranego można obliczyć ze wzoru (15) i analogicznie dla pokładu węgla nadbieranego ze wzoru (16).

$$Xg_{MRS} = Ls - Gg_{MRS-2} \cdot a, \text{ m} \tag{15}$$

$$Xd_{MRS} = Ls - Gd_{MRS-2} \cdot b, \text{ m} \tag{16}$$

W przypadku współczynników dot. szerokości strefy odprężenia (Gg_{MRS-2} , Gd_{MRS-2}) uzyskane zostały wartości znacznie różniące się w zależności od modelu ściany MRS, w tabeli 9 zestawione zostały ich wartości przypisane do konkretnej ściany. W tabeli 9 podano również kąty nachylenia bocznych linii granicznych (stopowych i spągowych) strefy odprężenia względem płaszczyzny poziomej.

Tabela 9. Wartości współczynników dot. szerokości strefy odprężenia eksploatacyjnego dla modelu MRS
Table 9. Values of coefficients regarding the destressing zone width for the FDM model

-	Wskaźniki/Parametry	Ściana A-2	Ściana B-2	Wartość średnia
Dla warstw stopowych	Gg_{MRS-2}	1,10	1,20	1,15
Dla warstw spągowych	Gd_{MRS-2}	1,10	1,40	1,25
Dla warstw stopowych	kąt β	61,2o	59,0o	60,1o
Dla warstw spągowych	kąt τ	61,2o	55,0o	58,1o

Tabela 8. Wartości współczynników dot. zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego dla modelu MRS
Table 8. Values of coefficients regarding the destressing zone range for the FDM model

-	Wskaźniki/Parametry	Ściana A-2	Ściana B-2	Wartość średnia
Dla warstw stopowych	Gg_{MRS-1}	1,40	1,48	1,44
Dla warstw spągowych	Gd_{MRS-1}	2,58	2,38	2,48

7. Wnioski końcowe

1. Z analizy porównawczej wyników prognoz emisji metanu z pokładów otaczających opartych na empirycznej metodzie określenia zasięgu strefy odprężenia eksploatacyjnego, tj. bez uwzględniania parametrów geomechanicznych górotworu (Instrukcja 2000), z wynikami zmierzonej emisji metanu w ścianach prowadzonych w górotworze charakteryzującym się niskimi parametrami wytrzymałościowymi wynika, że prognozy te są zaniżone o około 50%.
2. Wyniki analiz pokazują, że dla celów określenia strefy odprężenia eksploatacyjnego uwzględniającej parametry geomechaniczne górotworu, mogą być wykorzystywane efektywne obliczeniowo numeryczne metody MRS (różnic skończonych). Wyniki obliczeń zasięgu odprężenia eksploatacyjnego uzyskane w oparciu o metodę MRS wykazują, że dla warstw spągowych o niskich parametrach wytrzymałościowych zasięg strefy jest o 50-70 % większy w stosunku do założeń przyjmowanych w aktualnie stosowanej prognozie metanowości bezwzględnej ścian.
3. Analiza porównawcza wyników prognoz emisji metanu z warstw otaczających do środowiska ściany, wykazała, że wykorzystanie metody MRS uwzględniającej parametry geotechniczne pokładu eksploatawanego i warstw skalnych pozwala zwiększyć trafność prognozy, przez zmniejszenie liczby prognoz o błędnie względny przekraczającym próg 50%, a w efekcie przez obniżenie średniego błędu względnego prognozy z 49% do 22%.
4. W prognozach metanowości powinno uwzględniać się zasięg odprężenia eksploatacyjnego wynikający z parametrów geomechanicznych pokładu eksploatawanego oraz warstw skalnych zalegających w otoczeniu eksploatacji ścianowej. Dla potrzeb wyznaczenia strefy odprężenia eksploatacyjnego dla ścian o niewielkim nachyleniu poprzecznym (do 5°), prowadzonych w górotworze o niskich parametrach wytrzymałościowych wykorzystane mogą być zaproponowane w referacie wartości współczynników $Gg_{MRS-1} = 1,4$, $Gd_{MRS-1} = 2,5$, dotyczących wyznaczenia wysokości (zasięgu) strefy odprężenia eksploatacyjnego dla pokładów stopowych i spągowych.
5. Z uwagi na duży rozrzut wartości współczynników Gg_{MES-2} , Gd_{MES-2} dot. szerokości strefy odprężenia eksploatacyjnego

uzasadnione jest kontynuowanie badań, w celu ustalenia parametrów wpływających na ich wartość. Wskazane jest również prowadzenie badań w kierunku ustalenia wartości ww. współczynników dla większych nachyleń ścian.

Artykuł powstał w wyniku realizacji pracy statutowej pt. „Określenie zasięgu odgazowania warstw skalnych w otoczeniu ściany z wykorzystaniem modelowania numerycznego” sfinansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- CHINKULKIJNIWAT A., HORPIBULSUK S., SAMPRICH S. 2015 - Modeling of Coupled Mechanical-Hydrological Processes in Compressed-Air-Assisted Tunneling in Unconsolidated Sediments. MAY 2015 Transport in Porous Media 108(1), 105-129.
- Instrukcja GIG nr 14 2000** - Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian. Poradnik techniczny, Seria instrukcje, GIG, Katowice.
- Itasca**, 2008 - User's Guide FLAC2D. www.itasca.com
- KARACAN C., DIAMOND WP., ESTERHUIZEN GS., SCHATZEL S.J. 2005 - Numerical Analysis of the Impact of Longwall Panel Width on Methane Emissions and Performance of Gob Gas Ventsholes. Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium, May 18-19, 2005, Tuscaloosa, AL: University of Alabama, 1-28.
- KOZŁOWSKI B., GREBSKI Z. 1982 - Odmetanowanie górotworu w kopalniach. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- PRASSETYO S. H., GUTIERREZ M. 2014 - A modeling approach in FLAC to predict hydromechanical response of subsurface storage reservoirs due to CO₂ injection. Conference: 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2014 At: Minneapolis, Minnesota.
- WHITTLES D.N., LOWNDES I.S., KINGMAN S.W., YATES C., JOBLING S. 2006 - Influence of geotechnical factors on gas flow experienced in a UK longwall coal mine panel. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43, 369-387.
- WIERZBIŃSKI K. 2016 - Wykorzystanie metod CFD w prognozowaniu przestrzennym rozkładu koncentracji metanu w chodniku wentylacyjnym – opracowanie i walidacja modeli 3D. „Przeгляд Górnicy” nr 2, 44-55.

Artykuł wpłynął do redakcji –lipiec 2020

Artykuł akceptowano do druku – 18.08.2020