

Dobór metody odmetanowania pokładów węgla dla różnych warunków górniczo-geologicznych

Selection of methane drainage method to different geological and mining conditions



Prof. dr hab. inż. Nikodem Szlązak^{*)}



Dr hab. inż. Dariusz Obracaj^{*)}



Dr hab. Justyna Swolkién^{*)}

Treść: Zwalczanie zagrożenia metanowego musi być połączone z metodami zwalczania pozostałych zagrożeń naturalnych, tj. przede wszystkim zagrożenia pożarami endogenicznymi. Profilaktyka tych zagrożeń może być sprzeczna z zasadami zwalczania zagrożenia metanowego, dlatego powinna być ustalana wspólnie z profilaktyką innych zagrożeń. Wentylacja oraz dodatkowe środki wentylacyjne powinny być dostosowane do poziomów i innych zagrożeń naturalnych, zwłaszcza związanych z wentylacją. W artykule przedstawiono sposób postępowania przy projektowaniu eksploatacji w warunkach współwystępujących zagrożeń. Podano algorytm doboru systemu odmetanowania w toku realizacji projektu koncepcyjnego eksploatacji złoża węgla lub jego części, który powinien stanowić podstawę do wykonywania późniejszych projektów technicznych ścian eksploatacyjnych. W dalszej części artykułu przedstawiono rozwiązanie odmetanowania ścian eksploatacyjnych z wykorzystaniem długich, orurowanych otworów drenażowych. Zwrócono uwagę na czynniki wpływające na efektywność odmetanowania.

Abstract: Controlling the methane hazard in coal mines must be combined with methods to control other natural hazards, i.e. spontaneous fires hazard. Prevention of these other hazards may be contrary to the principles of preventing methane hazard. Therefore it should be determined together with the prevention of other hazards. Ventilation and additional ventilation measures should be tailored to levels other natural hazards, especially those associated with ventilation systems. The procedure for designing operation in the conditions of co-occurring hazards is presented in the article. An algorithm for the selection of a methane drainage system during the conceptual design of coal seam extraction has been given, which should be the basis for subsequent technical designs of mining longwalls. The solution for methane drainage in longwall panels using long, drainage boreholes equipped with performing pipes is presented in the next part of the article. The Attention was paid to factors affecting the methane drainage efficiency.

Słowa kluczowe:

zagrożenia naturalne, zagrożenie metanowe, wentylacja, odmetanowanie

Key words:

natural hazards, methane hazards, ventilation, methane drainage

1. Wprowadzenie

Rejony ścian zawałowych są miejscem najbardziej narażonym na powstanie pożaru endogenicznego i wydzielania dużych wydajności metanu z górotworu. Zapobieganie tym zagrożeniom powszechnie rozumiane jest jako profilaktyka pożarowa i metanowa. Najczęściej należą do niej takie elementy, jak dobór systemu przewietrzania, wyznaczenie odpowiedniego wydatku powietrza i sposobu monitorowania oraz określenie i realizowanie konkretnych prac profilaktycznych. W czasie prowadzenia ruchu ściany i w okresie jej likwidacji są to zwykle izolowanie, inertyzacja lub przemulanie zrobów.

Planowanie konkretnej eksploatacji w otoczeniu takich zagrożeń musi nosić cechy działań probezpiecznych i powinno być procesem wieloetapowym. Niezmiernie istotne jest aby zagrożenia metanowe oraz pożarami endogenicznymi stanowiły podstawę do opracowania koncepcji udostępnienia złoża w danej partii oraz stanowiły podstawę do założeń systemu eksploatacji i przewietrzania w trakcie wybierania złoża (Szlązak, Szlązak 2004). Należy przeprowadzić szczegółową analizę warunków górniczo-geologicznych oraz prognozowanego stanu zagrożeń naturalnych przed podjęciem decyzji o wyborze sposobu udostępnienia i rozcięcia złoża węgla kamiennego. Wybór metody odmetanowania na tym etapie jest uwarunkowany zakładanym systemem eksploatacji oraz przewietrzania wyrobisk eksploatacyjnych.

^{*)} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, od lat 60. XX wieku prowadzone są badania na temat zwalczania zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego, które koncentrowały się na prognozowaniu metanowości wyrobisk (Roszkowski 1961, Roszkowski 1969, Szlązak i in. 2011, Borowski 2012), opracowywaniu modeli ruchu metanu w górotworze naruszonym eksploatacją (Pawiński 1970, Roszkowski i in. 1997), migracji powietrza i gazów w zrobach ścian zawałowych (Szlązak, Szlązak 1987, Nowak i in. 1998, Szlązak 2000, Szlązak, Borowski 2004, Swolkień 2018), wydzielaniu metanu do wyrobisk (Szlązak, Tor 1998, Szlązak i in. 2001, Szlązak i in. 2007) i odmetanowaniu (Szlązak 1983, Pawiński i in. 1996, Nowak i in. 1997, Szlązak i in. 2014b, Szlązak i in. 2014c, Szlązak i in. 2015).

W ramach prowadzonych badań opracowano między innymi metodę oznaczania metanonośności pokładów węgla, która została zawarta w polskiej normie PN-G-44200 – Górnictwo – Oznaczanie metanonośności w pokładach węgla kamiennego – Metoda zwiercinowa. Metoda zawarta w normie została opracowana przez zespół autorski pod kierunkiem Nikodema Szlązaka w ramach projektu badawczego (Szlązak i in. 2011) i zasadniczo składa się z dwóch części. Pierwsza część dotyczy poboru próbek do badań w warunkach kopalniach. Druga to późniejsze badanie próbek węgla w warunkach laboratoryjnych. Zmierzona w laboratorium zawartość metanu w próbce węgla jest ostatecznie powiększana o wyznaczoną doświadczalnie stratę gazu i stanowi wynik oznaczonej metanonośności. Znajomość metanonośności jest niezbędna do oceny stopnia zagrożenia metanowego pokładów węgla i wyrobisk górniczych.

Metan występujący w pokładach węgla kamiennego stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa w podziemnych zakładach górniczych. Konieczne jest stosowanie właściwej profilaktyki. Profilaktyka metanowa obejmuje zarówno metody rozpoznawania i kontroli zagrożenia metanowego, jak i środki oraz sposoby zwalczania wybuchowych nagromadzeń metanu w wyrobiskach górniczych (Szlązak, Korzec 2010, Szlązak i in. 2013). W profilaktyce metanowej kopalń węgla kamiennego dominującą rolę odgrywają następujące sposoby:

- skuteczna wentylacja zapobiegająca tworzeniu się lontów metanowych lub lokalnych nagromadzeń metanu w wyrobiskach przewietrzanych przepływającymi prądami powietrza wytworzonymi przez wentylatory główne oraz w wyrobiskach przewietrzanych przy pomocy wentylacji odrębnej;
- kontrola metanometryczna zawartości metanu w powietrzu według określonych przepisami zasad lokalizowania czujników w poszczególnych rodzajach wyrobisk;
- pomocnicze urządzenia wentylacyjne stosowane w miejscach o zmniejszonej intensywności przewietrzania i tworzenia się lokalnych nagromadzeń metanu;
- odmetanowanie złóż węgla otworami drenażowymi odwierconymi z wyrobisk podziemnych lub z powierzchni do pokładów węgla.

O ile pierwsze trzy sposoby profilaktyki metanowej są skutecznie wykorzystywane, to odmetanowanie nie w każdym warunkach górniczych przynosi oczekiwany rezultat. Odmetanowanie górotworu powinno przede wszystkim skutecznie ograniczać wpływ metanu do przestrzeni roboczej oraz odsuwać najwyższe stężenia metanu w głąb przestrzeni zrobowej ścian eksploatacyjnych (Roszkowski, Szlązak 1999, Szlązak, Korzec, 2010, Szlązak, Kubaczka, 2012, Szlązak i in. 2012a, Szlązak i in. 2015). Skuteczne odmetanowanie węgla w podziemnych wyrobiskach górniczych nie tylko poprawia bezpieczeństwo, ale również zwiększa wydobyte z wyrobisk eksploatacyjnych (Szlązak, Korzec 2010, Szlązak, Kubaczka, 2012).

Obniżanie zagrożenia metanowego poprzez odmetanowanie pokładów przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa załóg górniczych oraz ciągłości pracy maszyn, zmniejszając liczbę postojów maszyn w wyniku wyłączeń energii elektrycznej po przekroczeniu wartości krytycznych stężenia metanu. Efektywne systemy odmetanowania to także możliwość pozyskiwania metanu jako naturalnego źródła energii, ale również ograniczanie ujemnych skutków na środowisko naturalne wynikających z odprowadzania metanu do atmosfery. W przypadku odmetanowywania pokładów sąsiednich niezbędne jest określenie strefy desorpcji wywołanej eksploatacją ściany. Otwory drenażowe powinny być zlokalizowane tak, aby znajdowały się w strefie odprężonej, natomiast nie przecinały strefy zawału bezpośredniego.

Przedstawiony w niniejszym artykule tok postępowania przy doborze systemu odmetanowania umożliwia wzrost efektywności odmetanowania i zwiększenie bezpieczeństwa pracy górników. W zależności od warunków geologicznych można dobrać najbardziej optymalny system odmetanowania.

2. Planowanie eksploatacji w warunkach zagrożenia metanowego

Planowanie konkretnej eksploatacji złoża musi spełniać cechy działań probezpiecznych i powinno być procesem wieloetapowym, realizowanym w odpowiedniej kolejności. Składają się na nie:

- wstępne rozpoznanie zagrożeń naturalnych – dokonane na podstawie oceny występujących warunków naturalnych oraz dotychczas wykonanych robót górniczych w danym rejonie (tzw. zasłóci eksploatacyjne),
- wykonanie projektu wstępnego eksploatacji – dobór systemu eksploatacji, wyposażenia technicznego, technologii robót i planu wydobycia,
- szczegółowe rozpoznanie zagrożeń naturalnych – to jest wykonanie prognoz kształtowania się zagrożeń, z uwzględnieniem wyników pierwszego etapu rozpoznawania i warunków projektu wstępnego oraz uwzględnieniem dostępnych środków profilaktycznych,
- wykonanie projektu skorygowanego – po weryfikacji założeń projektu wstępnego z wynikami prognoz zagrożeń naturalnych oraz po dokonaniu niezbędnych zmian,
- zaplanowanie prac profilaktycznych dla zwalczania poszczególnych zagrożeń – z uwzględnieniem założeń projektu skorygowanego oraz zagrożenia dominującego,
- wykonanie projektu ostatecznego – po weryfikacji założeń projektu skorygowanego z planami prac profilaktycznych i po dokonaniu niezbędnych zmian.

Taki tryb planowania powinien wyeliminować, a przynajmniej zdecydowanie ograniczyć czynnik nieprzewidywalności, którego skutkiem są zazwyczaj straty ekonomiczne lub nawet niebezpieczne (tragiczne) zdarzenia.

W przypadku zagrożenia metanowego dużą rolę w projektowaniu odgrywa możliwość odmetanowania projektowanej do eksploatacji parceli złoża węgla. Musi ono przy tym uwzględniać inne występujące zagrożenia, ogólne bezpieczeństwo prowadzenia robót oraz optymalizację kosztów. Analizę poprzedzającą projektowanie należy przeprowadzić pod kątem szeregu różnych zagadnień, takich jak:

- warunki naturalne związane z charakterystyką geologiczną złoża (np. stratygrafia, tektonika, typ i parametry pokładów węgla),
- prognozowanie kształtowania się poziomu rozpoznanych zagrożeń (metanowego, pożarowego) dla okresu planowanej eksploatacji,

- wpływ czynnika ludzkiego w prognozowaniu poziomu zagrożeń (np. na etapie rozpoznawania i prognozowania poziomu zagrożeń, projektowania eksploatacji i prac profilaktycznych),
- poziom techniczno-technologiczny prowadzenia robót (np. nowoczesność i jakość maszyn i urządzeń oraz obudowy wyrobisk, system eksploatacji),
- planowanie rozpoznawania aktywnego, rzeczywistego poziomu występujących zagrożeń w czasie prowadzenia ruchu ściany (np. sposób kontroli i systemowego monitorowania rejonu eksploatacji pod względem parametrów pracy urządzeń i parametrów niebezpiecznych czynników),
- przewidywalność niebezpiecznych zdarzeń (np. wstrząsu górotworu, tąpnięcia, samozapalenia, wybuchu).

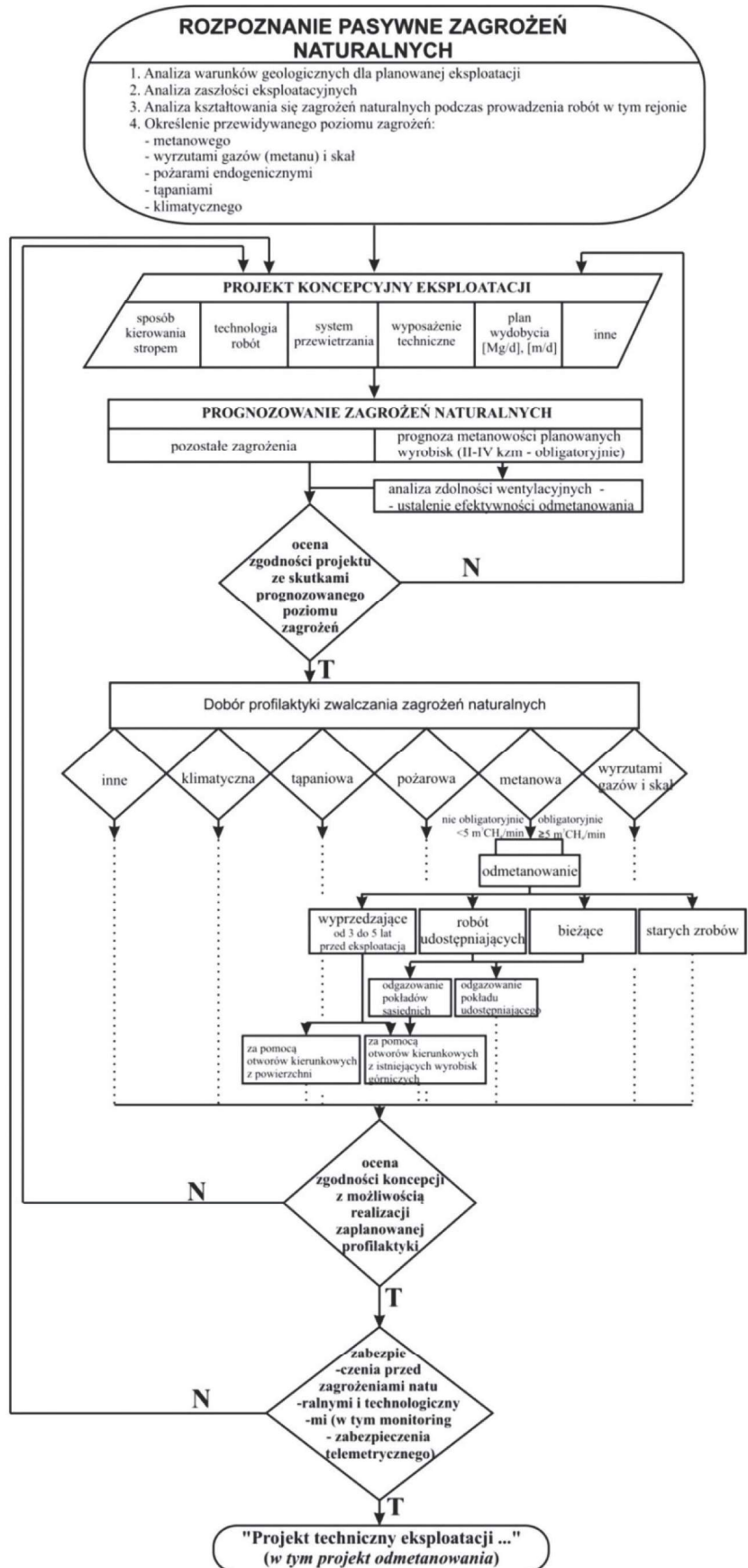
Sposób prowadzenia tej analizy można przedstawić w postaci algorytmów postępowania (rysunki 1 i 2).

W zdecydowanej większości przypadków wpływ na bezpieczeństwo załogi i ruchu zakładu górniczego ma zdolność decydentów (kierownictwa kopalni, dozoru górniczego itp.) do zachowania procedur postępowania dla stanów awaryjnych i stanów krytycznych (np. w przypadku wzrostu jednego lub kilku jednocześnie zagrożeń naturalnych lub technicznych).

Kolejnym, ważnym elementem próbek bezpiecznych działań jest profilaktyka, która powinna w pierwszym rzędzie zmierzać do całkowitego wyeliminowania zagrożeń.

Do elementów profilaktyki należą przede wszystkim:

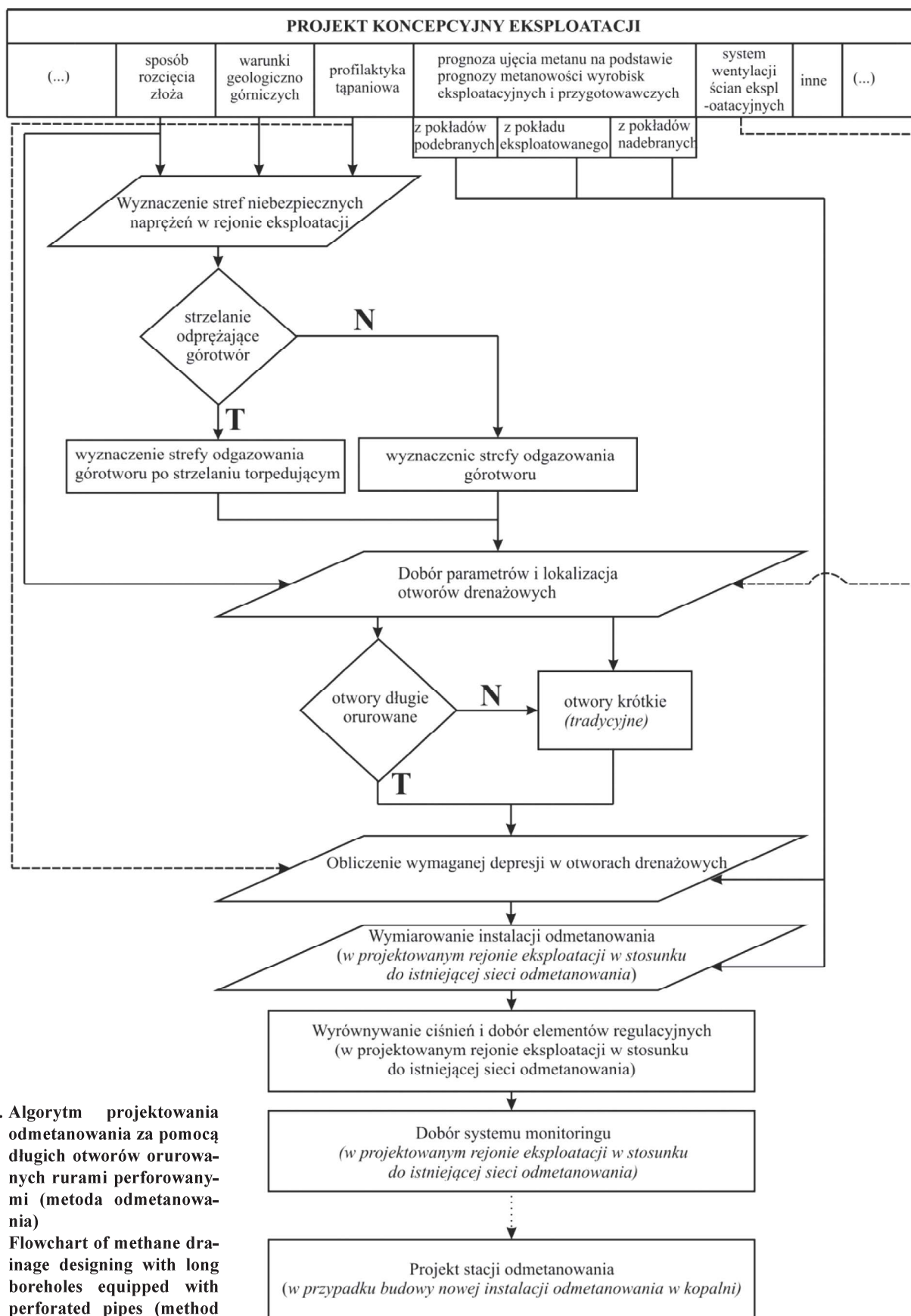
- dobór odpowiedniego systemu kierowania stropem i technologii eksploatacji, uwzględniających występujące uwarunkowania, w tym minimalizowanie możliwości przedostawania się węgla do zrobów ścian zawałowych,
- zaplanowanie długości ściany oraz jej wyposażenia, które pozwolą uzyskać taki postępu miesięczny, by strefa beztlenna w zrobach zdążyła objąć obszary z węglem przed upływem jego okresu inkubacji pożaru, czyli zadziałać wyprzedzająco;
- wybór systemu przewietrzania, dostosowanego do zagrożenia dominującego,
- zaprojektowanie optymalnych wydatków powietrza przepływającego przez rejon ściany, uwzględniając przy tym minimalizację migracji powietrza przez zrob,
- uszczelnianie zrobów poprzez cykliczne podawanie wody, lub mieszanin wodno-popiołowych, wodno-piaskowych itp.,
- regulacja wydatku objętościowego przepływu powietrza w ścianie połączona z bieżącą kontrolą stężeń gazów,
- wyrównywanie rozkładu potencjałów aerodynamicznych w rejonie ściany i jej istotnym sąsiedztwie – w celu ograniczenia migracji gazów w zrobach lub/i jej właściwemu ukierunkowaniu.



Rys. 1. Odmetanowanie w algorytmie projektowania eksploatacji
Fig. 1. Methane drainage in the flowchart of designing coal extraction

O możliwości zastosowania tych elementów profilaktyki decydują głównie warunki górnicze-geologiczne, w jakich prowadzona będzie eksploatacja. Warunki te mogą utrudniać, a często uniemożliwiać zastosowanie wszystkich tych elemen-

tów dla skutecznego ograniczenia zagrożenia metanowego i pożarami endogenicznymi. Należy je jednak na bieżąco dostosowywać do występującego poziomu danego zagrożenia.



Rys. 2. Algorytm projektowania odmetanowania za pomocą długich otworów orurowanych rurami perforowanymi (metoda odmetanowania)

Fig. 2. Flowchart of methane drainage designing with long boreholes equipped with perforated pipes (method drainage)

3. Wybór metody odmetanowania wyrobisk eksploatacyjnych

Analizując stosowane systemy odmetanowania wyrobisk eksploatacyjnych należy wyróżnić dwie metody odmetanowania sprawdzające się w warunkach polskich kopalń węgla kamiennego:

- I. otworami drenażowymi wierconymi z chodników wentylacyjnych do strefy odprężonej w stropie i/lub spągu pokładu eksploatacyjnego, metoda ta jest metodą zasadniczą, przy czym zarówno miejsce wykonywania otworów, jak również ich parametry uzależnione są od systemu eksploatacji i przewietrzania ściany (Szlązak, Kubaczka 2012, Szlązak i in. 2015, Szlązak i in. 2018). W metodzie tej można wyróżnić odmetanowanie przy systemach eksploatacji i przewietrzania:
 - ściany podłużne prowadzone od granic pola z systemem przewietrzania U,
 - ściany podłużne prowadzone od granic pola z systemem przewietrzania Y,
 - ściany podłużne prowadzone z równoległym chodnikiem wentylacyjnym;
- II. chodnikami drenażowymi wykonywanymi w pokładzie znajdującym się w strefie odprężonej nad pokładem eksploatacyjnym (tzw. metoda drenażu nadległego lub podległego) (Szlązak i in. 2014a, Szlązak i in. 2014b).

4. Wytyczne w zakresie postępowania projektowego

- a) Przed przystąpieniem do projektowania eksploatacji w nowej partii pokładów należy rozpoznać stan zagrożeń naturalnych, które stanowią podstawę do opracowania projektu koncepcyjnego eksploatacji złoża.
- b) Projekt koncepcyjny eksploatacji złoża, pokładu lub ich części zaliczonych do drugiej kategorii zagrożenia metanowego musi zawierać między innymi prognozę metanowości bezwzględnej wyrobisk, która warunkuje dobór systemu przewietrzania ścian eksploatacyjnych i opracowanie profilaktyki oraz zasad zwalczania zagrożenia metanowego. Ocena zagrożenia metanowego i dobór systemu odmetanowania mogą być prowadzone według algorytmu postępowania podanego na rysunku 1.
- c) W projekcie technicznym eksploatacji ścianowej należy ponownie wykonać szczegółową prognozę metanowości wyrobiska ścianowego wraz z określeniem możliwości wentylacyjnych zwalczania zagrożenia metanowego.
- d) Wskazane jest aby ściany eksploatacyjne, dla których prognoza metanowości bezwzględnej przekracza $10 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$ wyposażone były w instalacje do odmetanowania. W zależności od warunków górnico-geologicznych odmetanowanie ścian może być prowadzone również przy prognozowanej metanowości bezwzględnej poniżej $10 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$.
- e) Prowadzone badania efektywności odmetanowania (Szlązak i in. 2014a, Szlązak i in. 2015) dla różnych systemów wentylacji i odmetanowania wykazały, że średnia efektywność odmetanowania ścian eksploatacyjnych wynosi 55%. Najniższą efektywność odmetanowania (średnio ok. 40%) uzyskuje się w ścianach o najniższej metanowości całkowitej i przewietrzanych na „U” wzdłuż calizny węglowej. Natomiast najwyższą średnią efektywność odmetanowania, (średnio ok. 65%), osiąga się w ścianach przewietrzanych systemem z podwójnym chodnikiem wentylacyjnym oraz z chodnikiem drenażowym. W ścianach przewietrzanych systemem „Y” efektywność odmetanowania kształtuje się średnio na poziomie 50%.

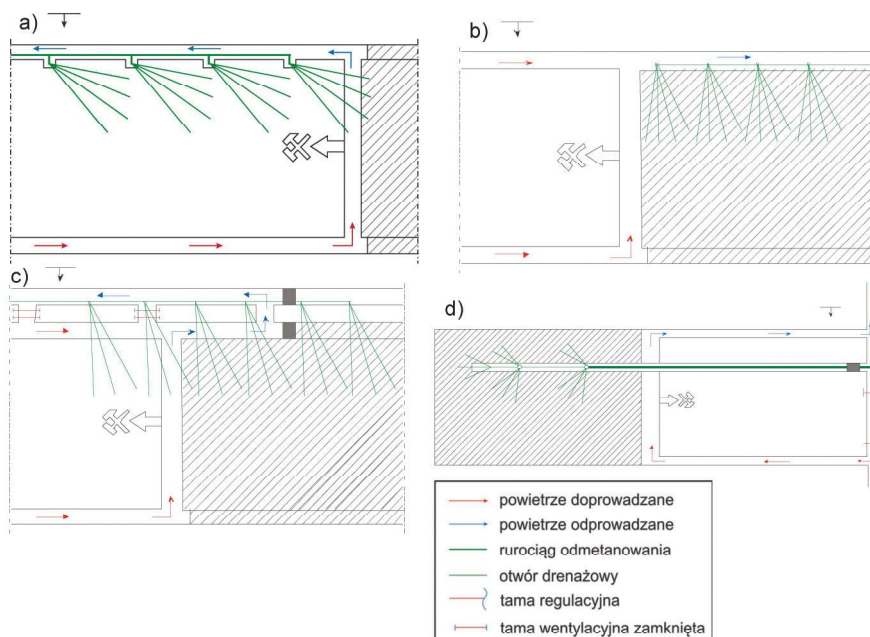
f) Dla skutecznego zwalczania zagrożenia metanowego i efektywnego odmetanowania można zastosować jeden z czterech zasadniczych systemów przewietrzania ścian eksploatacyjnych, które przedstawiono na rysunku 3 (Szlązak i in. 2016):

- ściany przewietrzane systemem U przy prognozowanej metanowości bezwzględnej do $25 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$,
 - ściany przewietrzane systemem Y przy prognozowanej metanowości bezwzględnej do $50 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$,
 - ściany przewietrzane systemem U z równoległym chodnikiem wentylacyjnym przy prognozowanej metanowości bezwzględnej przekraczającej $25 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$,
 - ściany przewietrzane systemem U z chodnikiem drenażowym przy prognozowanej metanowości bezwzględnej przekraczającej $25 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$.
- g) System odmetanowania z chodnikiem drenażowym można stosować jeżeli nad eksploatacyjnym pokładem zalega pokład pozabilansowy w odległości odpowiadającej 5-krotnej miąższości pokładu eksploatacyjnego (jednakże nie niżej niż 12 m nad pokładem eksploatacyjnym). W innych przypadkach stosowanie tego systemu nie jest ekonomicznie uzasadnione.
 - h) W przypadku braku możliwości przyjęcia innego systemu odmetanowania niż system U można, dla zwiększenia efektywności odmetanowania, stosować odmetanowanie z zastosowaniem zarówno otworów drenażowych w układzie wachlarzowym, jak i długich otworów orurowanych według opracowanej metody.
 - i) Dobór parametrów i lokalizacja otworów odmetanowania uzależniona powinna być od przyjętego systemu przewietrzania ściany, wyników prognozy metanowości bezwzględnej i wyznaczonej strefy desorpcji metanu (Szlązak i in. 2012b, Szlązak, Swolkień 2014, Szlązak i in. 2014a, Szlązak i in. 2015).
 - j) Projekt odmetanowania powinien zawierać:
 - obliczenia wymaganej depresji z otworach drenażowych,
 - wymiarowanie instalacji wraz z doбором elementów regulacyjnych,
 - dobór systemu monitoringu i sterowania rozplywem mieszaniny w sieci odmetanowania.
 - k) Każdorazowo po wyznaczeniu wymaganej wydajności ujmowanego metanu w nowym rejonie wentylacyjnym, kopalniana sieć rurociągów odmetanowania powinna być przeliczona w zakresie oporów przepływu i zapewnienia wymaganych depresji na wszystkich wiązkach otworów drenażowych.
 - l) Projektowanie odmetanowania można realizować w oparciu o algorytm postępowania podany na rysunku 2.

5. Nowa metoda odmetanowania

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, w polskich kopalniach wyraźnie widoczne jest (...) opóźnienie w zastosowaniu techniki wiertniczej dla odmetanowania pokładów węgla (na tle górnictwa światowego). Dlatego też nie są wykonywane wiercenia długimi otworami i wiercenia kierunkowe, mimo że takie otwory były wykonywane w historii polskiego górnictwa.

W nowej metodzie proponuje się wykonanie dwóch rodzajów otworów drenażowych (metanowych) z chodnika nadścianowego (wentylacyjnego). Poza tradycyjnymi wiązkami otworów drenażowych (wachlarzowych) należy wykonać przynajmniej po dwa otwory o długości około 200 m, skierowane w kierunku zrobów, pod kątem zapewniającym



Rys. 3. Przykłady rozmieszczenia otworów drenażowych przy różnych systemach przewietrzania ściany. a) przewietrzana systemem U, b) przewietrzana systemem Y, c) przewietrzana systemem U z równoległym chodnikiem wentylacyjnym, d) przewietrzana systemem U z nadległym chodnikiem drenażowym (Szlązak i in. 2015)

Fig. 3. Examples of localisation of methane drainage boreholes with different longwall ventilation systems a) 'U'-type ventilation system, b) 'Y'-type - return side ventilation system, c) 'U'-type ventilation system with parallel return roadway, d) 'U'-type ventilation system with overlying drainage heading (Szlązak i in. 2015)

położenie otworu w strefie desorpcji. Otwory te winny być wyposażone w rurę obsadową na długości około 30 m, a na całej długości zarurowane rurami perforowanymi, aby nie uległy zniszczeniu podczas wywołania zawału. Schemat rozmieszczenia tych otworów został przedstawiony na rysunku 4. Dokładna długość otworów i odległość ich wiercenia uzależniona jest od długości ściany, nachylenia pokładu i grubości warstwy eksploatowanej. Poniżej przedstawiono parametry otworów według proponowanej metody.

Otwory wachlarzowe - tradycyjne otwory drenażowe wiercone wachlarzowo do warstw stropowych w strefie desorpcji metanu. W przypadku znacznej wydajności gazu z pokładów nadebranych możliwe jest wykonanie podobnych otworów do warstw spągowych. Parametry otworów drenażowych wierconych wachlarzowo do warstw stropowych:

- liczba otworów w wiązce: 3 ÷ 5 szt.;
- odległość między wiązkami: 20 ÷ 30 m;
- długość otworów 60 ÷ 100 mb., w zależności od lokalizacji pokładów w strefie desorpcji;
- kąt pionowy: +35° ÷ +75°, w zależności od zalegania pokładów w warstwach stropowych;
- kąt kierunkowy: +25° ÷ +45° w lewo od osi chodnika wentylacyjnego;
- punkt zawiercenia: nad pokładem węgla;
- średnica i długość rury obsadowej: dla Ø 100 mm, długość min. 4,0 mb.;
- ciśnienie sprawdzające osadzenie rury obsadowej: zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Dla utrzymania prawidłowej ciągłości odmetanowania na wybiegu ściany, wiązki otworów o długości 60 m powinny być wykonywane we wzajemnej odległości nie większej niż 18 m. Odległość ta zapewnia optymalną pracę równocześnie

dwóch wiązek otworów przed frontem ściany. Dla otworów o długości 100 m, wykonywanych bezpośrednio z ociosu chodnika przyścianowego, maksymalna możliwa odległość pomiędzy wiązkami wynosi 35 m, a wykonywanych z wnętrza wiertniczej - 70 m. Przedstawione parametry otworów dotyczą typowych ścian eksploatacyjnych o długości od 200 do 250 m i nachyleniu poprzecznym oraz podłużnym od 0 do 15°. Szczegółowe parametry wierconych otworów drenażowych z wiązki należy jednak każdorazowo ustalić w projekcie odmetanowania w stosunku do budowy geologicznej złoża i wyznaczonej strefy desorpcji. Parametry otworów tego typu mogą być korygowane w trakcie prowadzenia ściany.

Długie otwory rurowane - orurowane długie otwory wykonywane nad linią ściany, które przy postępie ściany obejmą strefę zawału bezpośredniego (tzw. „zawał wysoki”). Orurowanie otworów ma na celu utrzymanie drożności otworu i przeciwdziałanie tzw. „amputacji otworu” nad frontem ściany. Sposób wykonywania otworów przedstawiono na rysunku 4.

Minimalny kąt pionowy otworu nr 1 (kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej) można wyznaczyć według zależności:

$$\tan \beta_{1min} = \frac{12h_s - \sqrt{0,25L^2(1 - \cos^2 \alpha_s) + B_0^2(1 - \cos^2 \alpha_{ch})}}{\sqrt{0,25L^2 \cdot \cos^2 \alpha_s + B_0^2 \cdot \cos^2 \alpha_{ch}}} \quad (1)$$

Analogicznie dla otworu 2:

$$\tan \beta_{2min} = \frac{12h_s - \sqrt{0,16L^2(1 - \cos^2 \alpha_s) + B_0^2(1 - \cos^2 \alpha_{ch})}}{\sqrt{0,16L^2 \cdot \cos^2 \alpha_s + B_0^2 \cdot \cos^2 \alpha_{ch}}} \quad (2)$$

Minimalny kąt odchylenia otworu nr 1 od osi chodnika nadścianowego w płaszczyźnie poziomej (kąt kierunkowy) można obliczyć według zależności:

$$\tan \alpha_{1\min} = \frac{0,5L \cdot \cos \alpha_s}{B_0 \cdot \cos \alpha_{ch}} \quad (3)$$

Minimalny kąt odchylenia otworu nr 2 od osi chodnika nadścianowego w płaszczyźnie poziomej (kąt kierunkowy) można obliczyć według zależności:

$$\tan \alpha_{2\min} = \frac{0,6L \cdot \cos \alpha_s}{B_0 \cdot \cos \alpha_{ch}} \quad (4)$$

Szczegółowe parametry długich otworów orurowanych:

- ilość otworów w wiązce: 2 szt.;
- odległość między wiązkami: 90 ÷ 100 m;
- długość otworów:
- otwór nr 1: $Lo_1=200$ mb. - zasięg otworu nr 1 do połowy długości ściany;
- otwór nr 2: $Lo_2=185-195$ mb. - zasięg otworu nr 2 wynika z przyjęcia takiej samej wysokości otworu nad linią ściany jak dla otworu 1 w odległości ok. 2/5 długości ściany, (rys. 4);
- średnica otworów: $\varnothing 143$ mm;
- rodzaj rur perforowanych: rura z żywic poliestrowych wzmocniana włóknem szklanym DN 110 PN 16, obustronnie antystatyzowana o długości 3 m, o dowolnym łączeniu;
- kąt pionowy otworów 1 i 2 (nachylenia do płaszczyzny poziomej): $b = -10^\circ \div +15^\circ$, w zależności od nachylenia ściany i kąta upadu pokładu, tak aby otwory kończyły się nad linią ściany w wysokości stanowiącej co najmniej dwunastokrotną wysokość ściany - wg wzorów (1) i (2);
- kąt kierunkowy otworu nr 1: $\alpha_1 = +30^\circ \div +40^\circ$ w lewo od osi chodnika w kierunku frontu ściany (rys. 5);
- kąt kierunkowy otworu nr 2: $\alpha_2 = +20^\circ \div +30^\circ$ w lewo od osi chodnika w kierunku frontu ściany (rys. 5);
- punkt zwiercenia: nad pokładem węgla;
- średnica i długość rury obsadowej: $\varnothing 150$ mm, długość ok. 30,0 mb, długości rur mogą być inne w zależności od warunków geologicznych i będą określane w projekcie technicznym;
- ciśnienie sprawdzające osadzenie rury obsadowej: zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Zgodnie z przedstawionymi parametrami projektowymi otwory długie najczęściej powinny być wykonywane co czwarta wiązka otworów wachlarzowych. Otwory długie będą odłączane od systemu odmetanowania, jeżeli front ściany dojdzie pod otwór, który zalegać będzie poniżej pięciokrotnej wysokości ściany (rys. 6). Odległość kolejnej wiązki długich otworów wynosi $B_i = 7/12 \times B_0$.

Można utrzymywać otwory krótsze w przypadku uzyskania wymaganych stężeń metanu w ujmowanej mieszaninie.

Otwory te są otworami rurowymi na całej długości. Wykorzystanie rur wykonanych z żywic poliestrowych wzmocnianych włóknem szklanym umożliwi ich urabialność. Otwory wykonywane są nad frontem ściany eksploatacyjnej. Celem orurowania otworów drenażowych rurami perforowanymi jest zapewnienie „żywołności” otworu nad frontem eksploatacyjnym i odgazowanie ze strefy drenażu nad zawalem bezpośrednim.

Alternatywą dla chodników drenażowych niezbędne może być wdrożenie technologii wiercenia kierunkowego. W tym przypadku otwory kierunkowe należy wykonywać w sposób zbliżony do pokazanego na rysunkach 4, 5 i 6. Zastosowanie tej technologii wymaga wprowadzenia nowego sprzętu wiertniczego przez spółki węglowe i wykształcenia załogi do wykonywania takich wierceń. Zastosowanie tej techniki

odmetanowania może przynieść efekt zbliżony do chodników drenażowych przy mniejszych nakładach finansowych.

6. Wytyczne dla bezpiecznego wykonywania otworów odmetanowania

W pokładach metanowych należy prowadzić odmetanowanie ze skutecznością ujmowania metanu na poziomie zapewniającym bezpieczne stężenia metanu w wyrobiskach rejonu eksploatacyjnego. Instalacja odmetanowania powinna umożliwiać regulację strumienia ujmowanej mieszaniny metanowo-powietrznej oraz depresji na otworach (wiązkach otworów) drenażowych. Głównym celem odmetanowania jest zapewnienie bezpiecznych warunków prowadzenia eksploatacji, dlatego odmetanowanie powinno być dostosowywane i regulowane zależnie od:

- kształtowania się poziomu zagrożenia pożarami endogenicznymi w zrobach ściany eksploatacyjnej,
- wpływu parametrów sieci wentylacyjnej (rozplywu powietrza i rozkładu potencjałów aerodynamicznych w rejonie eksploatacyjnym).

Zaleca się aby instalacja odmetanowania była wyposażona w automatyczny system regulacji wydajności i depresji w rejonie eksploatacyjnym.

W przypadku odmetanowania przy systemie przewietrzania ściany Y lub U z równoległym chodnikiem wentylacyjnym lub przy systemie przewietrzania U z zastosowaniem nadległego chodnika drenażowego należy liczyć się z możliwością wystąpienia samozagrzewania węgla w zrobach. Dla takich systemów przewietrzania i odmetanowania należy rozszerzyć metodę wczesnego wykrywania pożarów o kontrolę stężeń gazów (CO , CO_2 , O_2 , N_2) w rurociągu odmetanowania na wylocie z rejonu eksploatacyjnego.

W przypadku stwierdzenia tlenu węgla w rurociągu odmetanowania należy przeprowadzić kontrolę jego stężenia w mieszaninie ujmowanej z otworu drenażowego (wiązki otworów drenażowych). Fakt pojawienia się tlenu węgla w ujmowanej z otworu drenażowego mieszaninie gazowej może być pomocny przy ustaleniu strefy samozagrzewania węgla.

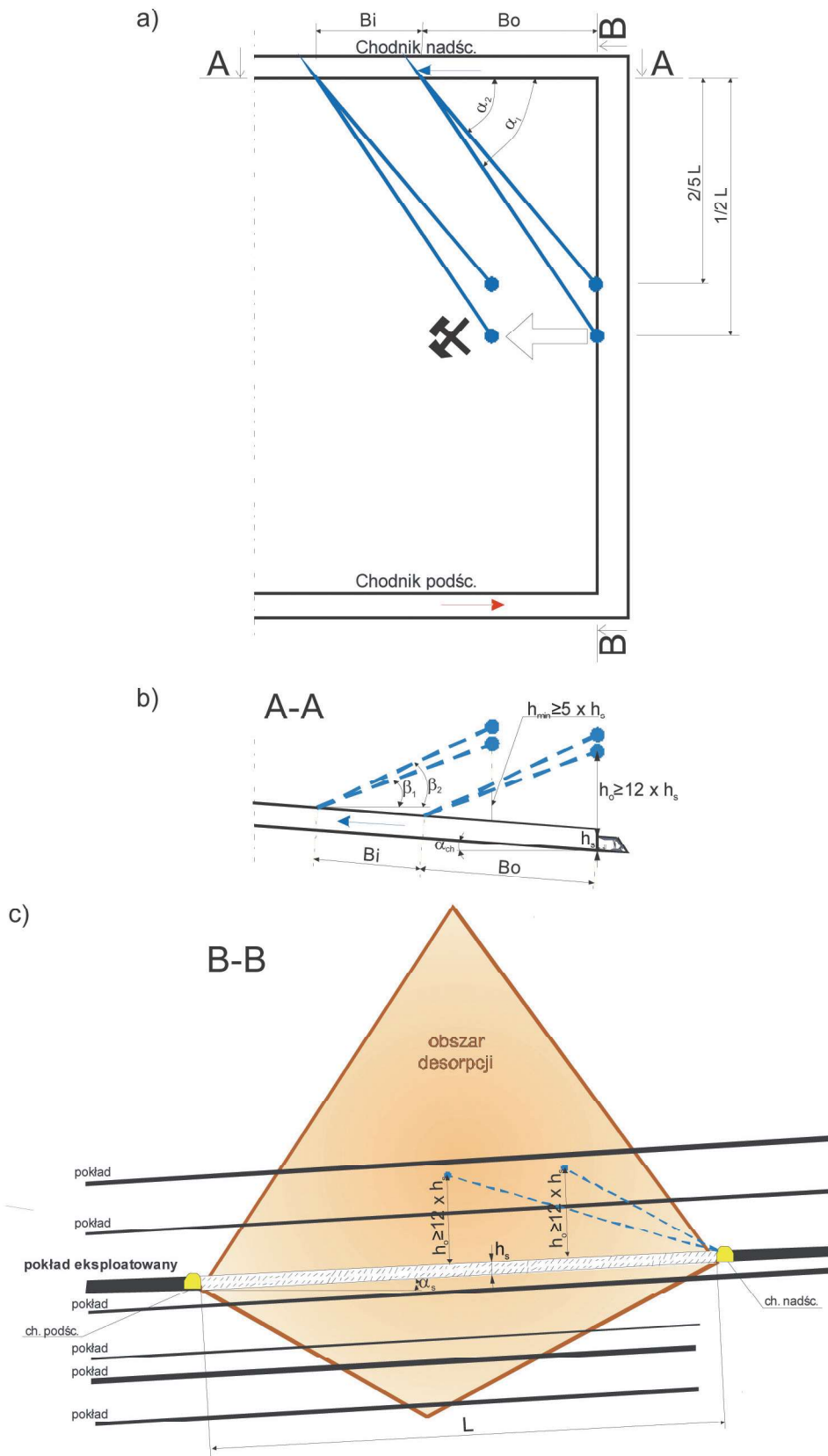
Z zagrożeniem pożarowym należy również liczyć się, gdy stężenie metanu w ujmowanej mieszaninie powietrzno-metanowej zmniejszy się poniżej 40% obj. (około 8% obj. O_2). Należy wtedy zwiększyć częstotliwość pobierania prób w metodyce wczesnego wykrywania pożarów w rejonie eksploatacyjnym.

Wyniki kontroli gazów w rurociągu odmetanowania i w otworach drenażowych (wiązki otworów) powinny być uwzględniane przy bieżącej ocenie zagrożeń pożarowego i metanowego oraz doborze środków obniżających te zagrożenia.

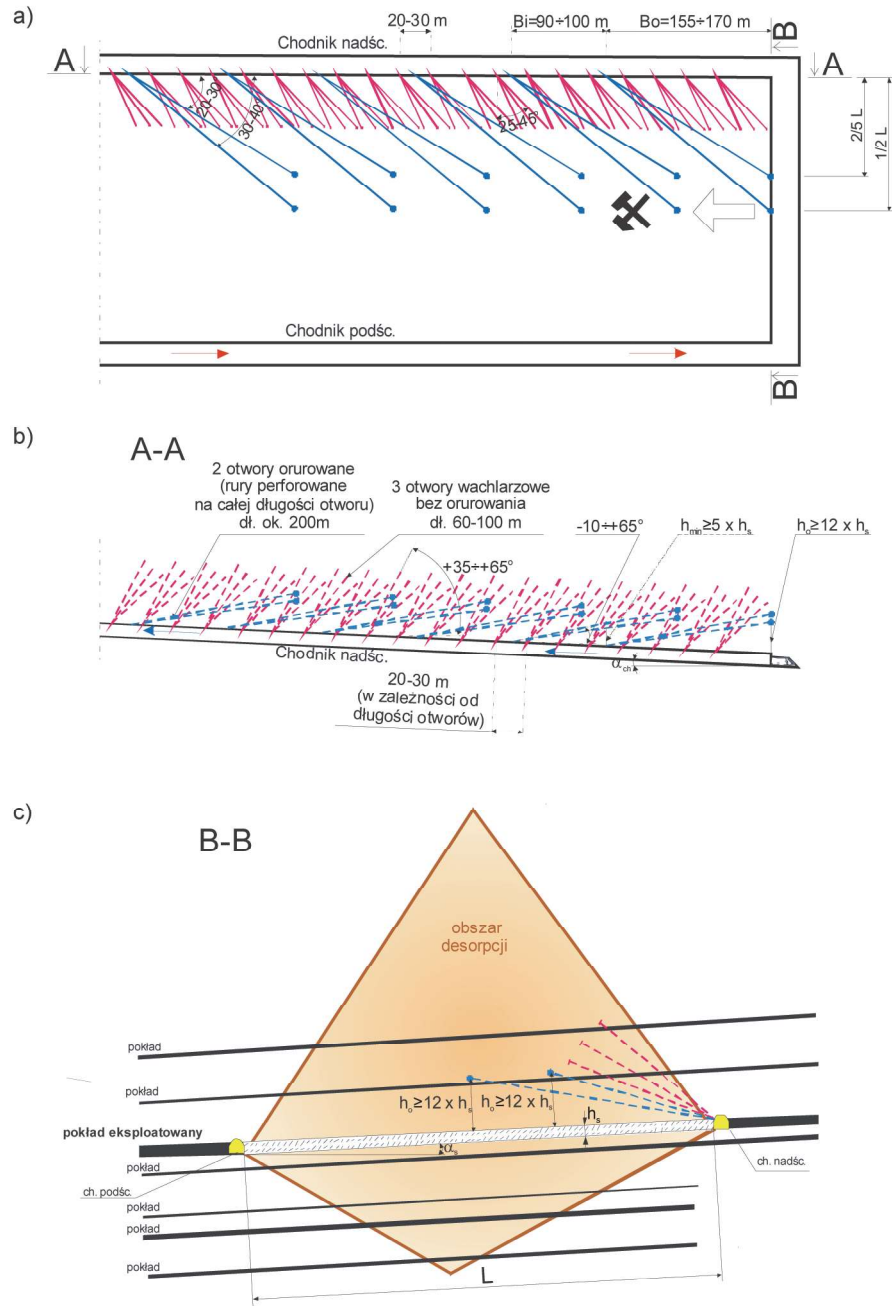
W przypadku stwierdzenia rozwoju pożaru endogenicznego w zrobach ścian zawalowych należy wyznaczyć strefę zagrożenia pożarowego w zrobach.

Przy doborze środków zwalczania zagrożenia pożarowego należy uwzględnić możliwość regulacji odmetanowania oraz kształtowania rozplywu powietrza i potencjałów aerodynamicznych powietrza w rejonie eksploatacyjnym. Działania te muszą być połączone z pozostałymi metodami zwalczania pożarów endogenicznych.

Do zwalczania zagrożenia pożarowego można wykorzystać inertyzację atmosfery w zrobach za pomocą naturalnego dopływu metanu poprzez regulację ujmowanej mieszaniny lub wyłączenie odmetanowania w tym rejonie. Decyzja powinna być podejmowana na podstawie przeprowadzonej analizy parametrów wentylacji (migracji powietrza przez zroby, rozkładu potencjałów aerodynamicznych) oraz wyni-

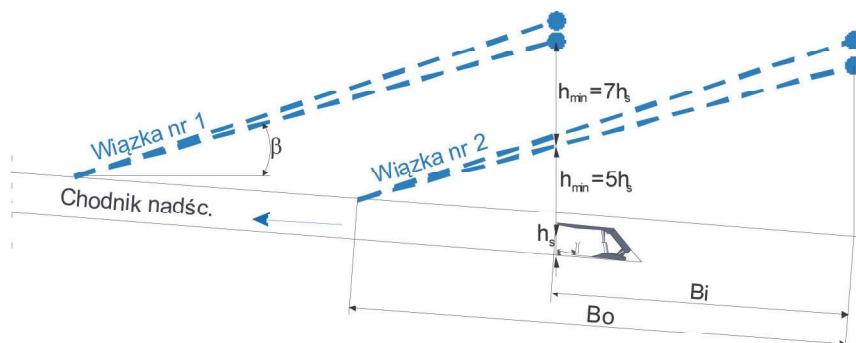


Rys. 4. Lokalizacja długich otworów orurowanych w ścianie przewietrzanej systemem U (opis w tekście) a) rzut poziomy, b) przekrój A-A, c) przekrój B-B
 Fig. 4. Location of long boreholes equipped with perforated pipes in the 'U'-type ventilated longwall (description in the text) a) horizontal projection, b) A-A cross section, c) B-B cross section



Rys. 5. Zakresy parametrów otworów odmetanowania w ścianie przewietrzanej systemem U wg opracowanej metody odmetanowania (opis w tekście,) a) rzut poziomy, b) przekrój A-A, c) przekrój B-B

Fig. 5. The ranges of parameters of the methane drainage boreholes in the 'U'-type ventilated longwall according to the developed methane drainage method (description in the text) a) horizontal projection, b) A-A cross section, c) B-B cross section



Rys. 6. Schemat zasięgu działania otworów drenażowych za frontem ściany

Fig. 6. Scheme showing the range of operation of drainage boreholes behind the longwall front

ków wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych, jak również parametrów odmetanowania (wydajności i stężenia ujmowanego metanu).

7. Ocena wpływu różnych czynników na efektywność odmetanowania

Na efektywność odmetanowania podczas eksploatacji złóż węgla kamiennego mają wpływ: zmiany ciśnienia barometrycznego, stosowana profilaktyka przy samozagrzewaniu węgla w zrobach ściany, uszczelnienie rury obsadowej otworów drenażowych, strzelania wstrząsowe w rejonie ściany oraz szybkość postępu ściany.

Zmiany ciśnienia barometrycznego w wyrobiskach rejonu ściany

Zmiany ciśnienia barometrycznego w wyrobiskach rejonu ściany (Szlązak, Kubaczka 2012, Swolkień 2018), w niektórych systemach odmetanowania mają wpływ na ujęcie metanu oraz stężenie metanu w mieszaninie transportowanej rurociągami.

Dla ściany przewietrzanej system U z podwójnym chodnikiem wentylacyjnym oraz dla ściany z nadległych chodnikiem drenażowym wydatek ujmowanego metanu jest zależny od zmian ciśnienia atmosferycznego w wyrobiskach rejonu ściany. Wraz ze wzrostem ciśnienia maleje wydajność ujmowanego metanu. W tych przypadkach system odmetanowania ściany jest ściśle związany ze zrobami eksploatowanej ściany. Widoczne jest połączenie zrobów z otworami drenażowymi oraz chodnikiem drenażowym poprzez układ szczelin i spękań. Dlatego zmiana ciśnienia odgrywa dużą rolę w ujęciu metanu w tych systemach. W obu systemach wzrost ciśnienia atmosferycznego powoduje również spadek stężenia metanu w pozyskiwanej mieszaninie.

W przypadku ściany przewietrzanej systemem U i wykonywaniu otworów drenażowych przed frontem ściany, zmiany ciśnienia atmosferycznego w wyrobiskach rejonu ściany nie wpływają na wydatki i stężenia ujmowanego metanu przez system odmetanowania. Ten system odmetanowania nie jest czuły na zmiany ciśnienia powietrza w wyrobiskach. Otwory drenażowe nie posiadają bezpośredniego połączenia ze strefą oddziaływania otworów.

Zagrożenie pożarami endogenicznymi w eksploatowanej ścianie

Powiązanie systemu odmetanowania ze zrobami eksploatowanej ściany może powodować samozagrzewanie się węgla przedostającego się do zrobów (Szlązak i in. 2011). Efektywność odmetanowania z nadległych zrobów ściany jest jednak wysoka. Dla bezpiecznej eksploatacji konieczne jest kontrolowanie stężeń gazów pożarowych (przede wszystkim CO) w rurociągach systemu odmetanowania i prowadzenie bieżącej regulacji wydajności odmetanowania z otworów.

Uszczelnienie rury obsadowej otworów drenażowych

Rura obsadowa i jej uszczelnienie wpływają na efektywność odmetanowania, jeżeli otwór znajduje się w strefie desorpcji (odprężonej). W przypadku wykonania otworu w nienaruszonej caliznie zwiększanie szczelności nie powoduje wzrostu ujęcia metanu. Długość rury obsadowej i jej uszczelnienie zależne muszą być od warunków geologicznych, od lokalizacji oraz średnicy i długości otworu (Szlązak 1983, Roszkowski i in., 1997, Szlązak i in. 2015). Im otwory są dłuższe i o większej średnicy tym długość rury obsadowej powinna być większa. Długość rury obsadowej powinna być dłuższa w otworach eksploatowanych za frontem ścia-

ny. Zwiększanie szczelności otworu, który nie znajduje się w strefie desorpcji (odprężonej), nie ma znaczenia przy odmetanowaniu bieżącym.

Strzelania wstrząsowe

Odpowiednio zlokalizowane strzelania za pomocą MW pozwalają na zwiększenie wydatku ujmowanego metanu, a co za tym idzie, uzyskiwanie większej efektywności odmetanowania. Wykonane strzelania przed frontem eksploatacyjnym ściany wykazały, że pod ich wpływem następuje wzrost wydzielania metanu do wyrobisk. Wzrost ten jest widoczny tylko w pierwszych dniach po strzeleniu, a później następuje spadek wydzielania do poziomu sprzed strzelania (Szlązak i in. 2012a). Strzelanie za pomocą MW nad frontem ściany w mniejszym stopniu wpływa na wydajność ujmowanego metanu przez system odmetanowania.

Strzelanie wstrząsowe powinno być wykonywane przed wierceniem otworów drenażowych.

Postęp ściany

W początkowym etapie biegu ściany zazwyczaj uzyskuje się niskie wydatki ujmowanego metanu z otworów drenażowych. W momencie uzyskania pełnego zawału, kiedy dochodzi do połączeń otworów drenażowych poprzez szczeliny i spękania ze strefą odprężoną, wydatki te wzrastają i utrzymują się na względnie stałym poziomie w czasie eksploatacji ściany (Szlązak, Kubaczka 2012).

W czasie biegu ścian, w okresach zmniejszonego wydobywania dochodzi do obniżenia wydzielania metanu do wyrobisk w rejonie ściany. Nie wpływa to jednak na znaczne zmniejszenie wydatku ujmowanego metanu.

W systemie przewietrzania U z nadległym chodnikiem drenażowym, podłączenie chodnika do sieci odmetanowania, na etapie rozruchu ściany nie zapewnia ujęcia metanu. Ujęcie metanu ma miejsce po utworzeniu się odpowiednio dużej strefy odprężonej u zwiększanej filtracji metanu. Chodnik drenażowy powinien być podłączony do systemu odmetanowania, kiedy dochodzi do jego połączeń ze strefą odprężoną (powstają szczeliny i spękania stanowiące drogi przepływu gazu). Wydajność odmetanowania uzyskuje się na względnie stałym poziomie w czasie eksploatacji ściany dopiero, kiedy chodnik zalega nad zrobami ściany.

8. Podsumowanie

Metanowość polskich kopalń wzrasta od kilku lat w związku z udziałem liczby pokładów metanowych w eksploatacji zasobów węgla. Należy spodziewać się utrzymania zagrożenia metanowego w kolejnych latach na podobnym poziomie. Spowoduje to, że zagrożenie metanowe będzie dominującym zagrożeniem w polskim górnictwie węgla kamiennego.

Przed przystąpieniem do projektowania eksploatacji w nowej partii pokładów należy rozpoznać stan zagrożeń naturalnych, które stanowią podstawę do opracowania projektu koncepcyjnego eksploatacji złoża. Projekt koncepcyjny eksploatacji złoża, pokładu lub ich części zaliczonych co najmniej do drugiej kategorii zagrożenia metanowego musi zawierać między innymi prognozę metanowości bezwzględnej wyrobisk, która warunkuje dobór systemu przewietrzania ścian eksploatacyjnych i opracowanie profilaktyki oraz zasad zwalczania zagrożenia metanowego.

W projekcie technicznym eksploatacji ścianowej należy ponownie wykonać szczegółową prognozę metanowości bezwzględnej wyrobiska ścianowego wraz z określeniem możliwości wentylacyjnych zwalczania zagrożenia metano-

wego. Proponuje się aby ściany eksploatacyjne, dla których prognoza metanowości bezwzględnej przekracza $10 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{min}$ wyposażone były w instalację do odmetanowania.

Dla poprawy efektywności odmetanowania w trakcie eksploatacji proponuje się zastosowanie odmetanowania długimi, orurowanymi otworami drenażowymi wierconymi z chodników wentylacyjnych do strefy odprężonej. Otwory takie muszą być orurowane rurami perforowanymi o długości około 200 m i wykonywane równolegle z tradycyjnymi otworami wachlarzowymi z chodników przyścianowych. Jednak zastosowanie tej metody wymaga wdrożenia nowych technik wiercenia otworów drenażowych wraz z techniką ich rurowania.

Przedstawione wytyczne projektowania odmetanowania pokładów węgla, bezpiecznego wykonywania otworów drenażowych oraz prowadzenia odmetanowania podczas eksploatacji ścianowej mogą być pomoce dla projektantów odmetanowania, ale przede wszystkim dla działów wentylacji oraz przygotowania produkcji w zakładach górniczych z zagrożeniem metanowym.

Artykuł zrealizowano w ramach subwencji nr 16.16.100.215.

Literatura

- BOROWSKI M. 2012 - Metoda prognozy wydzielania metanu do wyrobisk ścianowych w kopalniach węgla kamiennego. Wydawnictwa AGH, Rozprawy i Monografie, nr 254, Kraków.
- NOWAK B., ROSZKOWSKI J., SZLAŻAK N. 1998 - Przybliżona metoda dla określenia zasięgu strefy drenażu metanu otworami wiertniczymi. Archives of Mining Sciences, vol. 43, nr 2, s. 207–229.
- PAWIŃSKI J. 1970 - Filtracja gazu w pokładach węglowych jako przepływ z wymianą masy. Archives of Mining Sciences, vol. 15, nr 3.
- PAWIŃSKI J., ROSZKOWSKI J., SZLAŻAK N. 1996 - Determining the parameters impacting the intensity of the flow of methane in drainage boreholes). Archives of Mining Sciences, vol. 41, Issue 1.
- ROSZKOWSKI J. 1961 - Wydzielanie się metanu do kamiennych wyrobisk korytarzowych jako podstawa do projektowania przewietrzania. Zeszyty Naukowe AGH, „Górnictwo”. z.16.
- ROSZKOWSKI J. 1969 - Wydzielanie się metanu do kamiennych wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych. Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN. T. 7, z. 1.
- ROSZKOWSKI J., SZLAŻAK N. 1999 - Wybrane problemy odmetanowania kopalń węgla kamiennego. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- ROSZKOWSKI J., SZLAŻAK N., NOWAK B. 1997 - Filtracja metanu do otworów drenażowych po skokowej zmianie na nich depresji. Archives of Mining Sciences, vol. 42, iss. 2.
- ROSZKOWSKI J., SZLAŻAK N., SZLAŻAK J. 1997 - Odmetanowanie jako środek zwalczania zagrożenia wybuchami oraz sposób pozyskiwania i wykorzystania etanu w kopalniach węgla kamiennego. „Wiadomości Górnicze” nr 10.
- SWOLKIEŃ J. 2018 - Przepływ gazów w zrobach ścian zawałowych i ocena wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na wydzielanie metanu do wyrobisk, Wydawnictwa AGH, Rozprawy i Monografie, nr 333, Kraków.
- SZLAŻAK J. 2000 - Przepływy powietrza przez strefę zawału w świetle badań teoretycznych i eksperymentalnych. AGH, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- SZLAŻAK J., SZLAŻAK N. 1987 - Ucieczki powietrza przez zrobry zawałowe ścian przewietrzanych systemem C. „Archiwum Górnictwa” t. 32, z. 4
- SZLAŻAK N. 1983 - Wpływ parametrów odmetanowania na natężenie przepływu metanu w otworach drenażowych. Archives of Mining Sciences, t.28, nr 3, s. 433-450.
- SZLAŻAK N., SZLAŻAK J. 2004 - Zagrożenie metanowe w kopalniach węgla i jego wpływ na bezpieczeństwo w trakcie ich likwidacji. Mat. 3 Szkoły Aerologii Górniczej.
- SZLAŻAK N., KORZEC M. 2010 - Zagrożenie metanowe oraz jego profilaktyka w aspekcie wykorzystania metanu w polskich kopalniach węgla kamiennego. „Górnictwo i Geoinżynieria”. R. 34, z 3/1, 163–174.
- SZLAŻAK N., KUBACZKA C. 2012 - Impact of coal output concentration on methane emission to longwall faces. Archives of Mining Sciences, Vol. 57, No 1, 3-21.
- SZLAŻAK N., SWOLKIEŃ J. 2014 - The effectiveness of the methane drainage of rock-mass with a U ventilation system. Archivum of Mining Sciences. Vol. 61 (2016), No 3, 617–634.
- SZLAŻAK N., TOR A. 1998 - Mining research into the distribution of methane concentration in mining galleries ventilated by duct lines. Archives of Mining Sciences, vol. 43, issue 1, 1-18.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M. 2004 - Weryfikacja zmian stężenia metanu w zrobach ścian zawałowych w oparciu o pomiary wykonane w wyrobiskach przyzrobowych. Wyd. Materiały 3 Szkoły Aerologii Górniczej: Zakopane, 12–15 październik 2004, Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG, Katowice.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., ZASADNI W. 2001 - Estimation of methane emission during mining of a coal seam with burst hazard. Proceedings of 29th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Szczyrk 8-11 October 2001. Główny Instytut Górnictwa. CMI, Poland.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D. 2007 - Wydzielanie metanu do wyrobisk chodnikowych drażonych kombajnem w pokładach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG. „Górnictwo i Środowisko”.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J., KORZEC M. 2011 - Metoda oznaczania metanonośności w pokładach węgla kamiennego. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- SZLAŻAK N., BERGER J., BOROWSKI M., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J., KORZEC M. 2012a - Metody odmetanowania pokładów węgla. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., KORZEC M. 2012a - Effectiveness of Coal Mine Methane Drainage in Polish Mines. Twenty-ninth annual international Pittsburgh coal conference: coal – energy, environment and sustainable development: October 15–18, 2012, Pittsburgh, USA.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2013 - Ocena zagrożenia metanowego w rejonie ściany eksploatacyjnej przewietrzanej sposobem na U. „Górnictwo i Geologia” 8 (4), 115-128.
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J., KORZEC M. 2014a - Comparison of methane drainage methods used in Polish coal mines. Archives of Mining Sciences 59 (3), 655-675.
- SZLAŻAK N., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2014b - Methane drainage from roof strata using an overlying drainage gallery. International Journal of Coal Geology 136, 99-115.
- SZLAŻAK N., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2014c - Possibilities of increasing the effectiveness of mining methane drainage in conditions of low permeability of coal seams. Journal of Energy and Power Engineering 8 (7).
- SZLAŻAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J., KORZEC M. 2015 - Odmetanowanie górotworu w kopalniach węgla kamiennego Wydawnictwa AGH, Kraków.
- SZLAŻAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M., SWOLKIEŃ J., KORZEC M. 2016 - Methane in polish coal mines -methods of control and utilisation. Proceedings of the 24th World Mining Congress. Rio de Janeiro, October 18-21, Brasil.
- SZLAŻAK N., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2018 - Methods of methane control in polish coal mines. Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress, 292-307.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2019
Artykuł akceptowano do druku – 25.09.2019