

Antoni Kidybiński*

ZMIANY GĘSTOŚCI WĘGLA PRZYPRZODKOWEJ STREFY POKŁADU – PRZED ORAZ PODCZAS WYRZUTU GAZU I SKAŁ

Streszczenie

W artykule, na podstawie modelowania w skali 1:1 metodą spoiстых modeli cząstkowych (BPM), omówiono zmiany makroporowości w kregach pomiarowych o średnicy 3,5 m, położonych kolejno od czoła przodka wyrobiska korytarzowego w czasie drażenia, o wysokości 3,5 m, do odległości 17 m od przodka w głąb calizny pokładu. Stwierdzono, że w strefie wglębnej (7–17 m od czoła przodka) następuje systematyczne zmniejszanie się makroporowości (wzrost gęstości) – do około 7% w stosunku do wartości pierwotnej w okresie bezpośrednio poprzedzającym dynamiczną część wyrzutu, po czym we wszystkich kregach badanego odcinka pokładu następuje w przybliżeniu jednakowy wzrost makroporowości (zmniejszenie się gęstości) związane ze stopniowym rozpadem calizny pod wpływem ciśnienia gazu wolnego oraz sił wynikających z szybkiej desorpcji metanu z węgla. Zjawisko przejściowego wzrostu gęstości węgla w strefie pozaprzedkowej jest tłumaczone przez autora – przedostawaniem się do tego rejonu pokładu silnie sprężonego gazu szczelinowego.

Changes in coal density of at-forehead seam zone before or during gas and rock outburst

Abstract

In this article, on the basis of modeling in the scale of 1:1, making use of the method of bonded particle models, changes in macro porosity in measurement circles of 3,5 m in diameter have been found. The circles have been situated in turn from the working face of the dog heading during its driving, the headroom of 3,5 m, up to the distance of 17 m from the working face deep inside the body of coal. It has been stated that in the inside-zone (7–17 m from the working face) the decrease in macro porosity appears (increase in density) – up to about 7% in relation to its initial value in the period of directly preceding the dynamic part of the outburst. After that in all circles of the tested seam part appears approximately similar increase in macro porosity (decrease in density) related to gradual decomposition of coal under the influence of free gas pressure and the strengths forces due to quick desorption of methane from coal. The phenomenon of temporary coal density increase in off-forehead zone is explained by the author as a result of strongly pressured slotted gas penetration to this part of the seam.

WPROWADZENIE

W miarę zwiększania się średniej głębokości eksploatacji pokładów węgla w Górnosląskim Zagłębiu Węglowym, maleje średnia wytrzymałość mechaniczna węgla – w związku z genetyczną stopniową zmianą typu węgla z energetycznego na koksowy, a także maleje jego pojemność sorpcyjna w stosunku do metanu, co przy większej metanonośności powoduje wzrost ciśnienia wolnego metanu w węglu eksploatowanych pokładów (Krause 2007). Czynniki te powodują wzrost zagrożenia nagłymi wyrzutami węgla i metanu, co uzewnętrznia się głównie w przodkach

* Główny Instytut Górnictwa.

drażonych wyrobisk korytarzowych (w nieodprężonej eksploatacją strefie danego pokładu) – służących do przygotowania nowych pól do eksploatacji węgla systemem ścianowym.

Zagrożenie to istnieje i nasila się w czasie nie tylko w polskich kopalniach, lecz także w Czechach, Ukrainie, Niemczech, Chinach i Australii – pomimo, że w ostatnim z wymienionych krajów opanowano w niektórych kopalniach technologię wstępnego (przed eksploatacją węgla) systemowego drenowania metanu z pokładów węgla i wykorzystania go w energetyce.

Pomimo wielu prac badawczych, zrealizowanych w kraju i za granicą, nie udało się dotychczas opracować niezawodnej metody oceny stopnia zagrożenia wyrzutem gazu i węgla w drażonym przodku wyrobiska korytarzowego. Dzieje się tak pomimo, że w wyniku tych badań określono metanonośność węgla i jego parametry sorpcyjne na znacznych obszarach udostępnionych pokładów węglowych. Przyczynę tego stanu rzeczy autor niniejszego artykułu upatruje częściowo w braku lub ograniczonym zakresie badań w skali 1:1 nad **mechanizmami powstawania** wyrzutów jako zjawiska ściśle łączącego parametry fizyczne pokładu węglowego, stan naprężeń w skałach w otoczeniu wyrobiska oraz parametry gazowe samego węgla. Niedoceniana wydaje się także rola gazu wolnego (przepływowego), który ma swoją genezę w pierwotnym gazie złożowym, a w strefie wstępnego odprężenia górotworu zbliżającymi się wyrobiskami – zmniejsza się jego pierwotne ciśnienie w wyniku wysokociśnieniowego przepływu szczelinowego w kierunku tych wyrobisk.

Nie opracowano jednak dotychczas metody ścisłej detekcji wypływu gazu z przodka węglowego w stanie spoczynku (bezpośrednio po urabianiu). Pomiar taki mógłby dać cenne informacje o zbliżającym się wyrzucie, trudno bowiem wyobrazić sobie zmianę ciśnieniowej charakterystyki rozkładu metanu przed czołem wyrobiska bez wypływu szczelinowego tego gazu na płaszczyźnie przodka.

W ostatnich latach podjęto próby modelowania prostych wyrzutów metanu i węgla (w skali 1:1) przy pomocy numerycznych spoistych modeli cząstkowych (Kidybiński 2007a, 2007b, 2007c), co między innymi umożliwiło fizyczne wyjaśnienie zasady, znanej z praktyki górniczej, że wyrzuty związane z sąsiedztwem uskoku, wykazują znacznie większą dynamikę od wyrzutów w pokładzie jednorodnym. Ponadto, udało się określić granice makroporowatości pokładu, przy której rozpoczyna się przepływ fluidalny brył i cząstek węgla w sprężonym metanie, a także – następującej po nim fazy lotności cząstek węglowych.

Wymienione prace pozwalają obecnie na podjęcie prób nad modelowaniem wspomnianej metodą – z wykorzystaniem nowo opracowanych programów numerycznych – zmian gęstościowych węgla w przylegającej do drażonego przodka partii pokładu. Można również mieć nadzieję, że zmiany te będą mogły być mierzone w kopalni za pomocą współczesnych metod geofizyki inżynierskiej.

W niniejszym artykule omówiono wyniki badań wykonanych na modelu wyrobiska korytarzowego długości 35 m (w tym 17 m w pokładzie węglowym).

1. METODA MODELOWANIA NUMERYCZNEGO BPM

Metoda spoiстых modeli cząstkowych (*Bonded-Particle Model*) rozwinęła się dzięki pracom badawczym i programistycznym dwóch badaczy amerykańskich, a mianowicie Cundalla i Potyondy'ego (Cundall 1971; Potyondy, Cundall 2004). Podstawą tej metody jest komponowanie – na podstawie specjalnie indywidualnie dla każdego zagadnienia opracowanych programów obliczeniowych – dowolnych układów ośrodków stałych składających się ze spojonych ze sobą cząstek (prostokątów – w kodzie UDEC lub 3DEC oraz dysków lub kulek – w kodzie PFC2D lub PFC3D).

Cechy elementów składowych modelu (cząstek) obejmują między innymi ich kształt i wielkość, masę właściwą (gęstość), moduły sztywności (w kierunkach normalnych i stycznych) oraz współczynnik tarcia. Charakterystyka więzów między cząstkami (stykowych oraz tzw. równoległych – np. pełnoprzekrojowych) obejmuje liczbową wielkość tych więzów (odpowiadających wytrzymałości modelowanego ośrodka) oraz sztywność więzów.

Początkową porowatość modelowanego ośrodka (np. skał) zapewnia się przez zróżnicowaną wielkość generowanych w granicach modelu cząstek, a także – przez wybraną odpowiednio liczbę cykli i współczynnik multiplikacji ich rozmiarów. Kształt modelu jest formowany przez liczbę i kształt jego ścian zewnętrznych i wewnętrznych, zaś cząstki modelu mogą tworzyć, określone współrzędnymi granic, obszary (*range*) o różnych cechach materiałowych, na przykład – warstwy skalne.

Obciążenia (siły), przemieszczenia lub ich prędkość albo rotacja – to najczęściej stosowane elementy wymuszenia mechanicznego, stosowane w modelach, a odnoszące się do poszczególnych cząstek lub zgrupowań (obszarów położenia) cząstek.

Precyzyjne wierne odtworzenie w modelu kształtu rzeczywistych fragmentów (np. łuków obudowy chodnikowej, miąższości poszczególnych warstw skalnych itp.) jest realizowane przez odpowiedni dobór wielkości i układu cząstek budujących dany fragment modelu (im bardziej jest złożony kształt budowanego fragmentu modelu tym mniejsze powinny być cząstki tworzące ten element). Wiele szczegółów budowanego modelu jest ściśle związanych z aktualnym stanem wiedzy na temat rzeczywistego górotworu, na przykład, jeśli istotną rolę w modelowanym procesie może odgrywać warstwowość lub szczelinowatość (lub kliważ) skał, a kierunki położenia i zagęszczenie powierzchni spękań są znane – można uwzględnić je przy budowie modelu BPM przez całkowitą likwidację więzi międzycząstkowych wzdłuż wyszczególnionych w programie płaszczyzn (szczeliny w modelu) bądź częściową likwidację więzi (cyklicznie odcinkowo) formułowaną w programie – wskutek czego otrzymuje się efekt kierunkowego i częściowego osłabienia skały.

Oprócz ośrodka stałego (złożonego z cząstek) w modelach można uwzględnić rolę płynów (opcja FLUID – dla cieczy lub gazu), których przepływ przez porowaty ośrodek stały odwzorowuje się najczęściej przez gradient ciśnienia na wlocie oraz na wylocie z obszaru modelu. Płyny w modelu są scharakteryzowane właściwymi im wartościami gęstości oraz lepkości – co automatycznie określa rodzaj płynu oraz prędkość i rozkład jego przepływu przez model. Ponadto, całość modelu może być objęta polem przyspieszenia prędkości ruchu (grawitacji) o założonej wielkości i kie-

runku działania (współrzędne x, y), możliwe jest także śledzenie temperatury poszczególnych cząstek lub partii modelu (opcja THERMAL).

Rejestracja przebiegu zmian wartości poszczególnych parametrów modelu lub jego części (w czasie postępu cyklicznych przeliczeń jego całości – charakteryzujących upływ czasu) odbywa się punktowo (dla określonej współrzędnymi położenia pojedynczej cząstki) lub strefowo – w specjalnie założonych w programie obliczeniowym kręgach pomiarowych. W ostatnim przypadku jest rejestrowana wielkość średnia dla wszystkich cząstek (lub ich kontaktów) położonych w obrębie danego kręgu pomiarowego.

Modele metody BPM są realizowane za pomocą komercyjnego kodu PFC (*Particle Flow Code*) firmy ITASCA (Itasca 2004). Do programowania stosuje się język wewnętrzny PFC, zaś do obliczania bądź rejestracji niektórych nietypowych parametrów (jak na przykład lokalne ciśnienie gazu w skałach) stosuje się odrębne wstawki do programu w skojarzonym z PFC języku programowania FISH.

2. MODEL ORAZ PROGRAM Z1_hoF

W celu prześledzenia zmian gęstości (lub makroporowatości) pokładu węgla w bezpośrednim sąsiedztwie czoła przodka wyrobiska korytarzowego w fazie drażenia – autor opracował (w Zakładzie Tępań i Mechaniki Górniczej Głównego Instytutu Górniczego) w kodzie PFC program obliczeniowy do generowania i przeliczania modelu wyrzutu węgla i metanu – w układzie geometrycznym i wytrzymałościowym zbliżonym do jednego z zaistniałych w ostatnich latach w kopalni wyrzutu rzeczywistego (Jakubów, Tor, Wierzbicki 2006). Model ten przedstawia pionowy osiowy przekrój podłużny przyczołowego odcinka wyrobiska korytarzowego w czasie drażenia i obejmuje 17 m długości wyrobiska z pokładem węglowym oraz przyległy odcinek 18 m długości wyrobiska pustego.

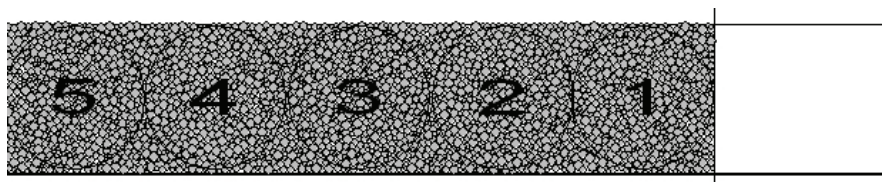
Według opisu wyrzutu rzeczywistego w modelu uwzględniono: całkowitą masę przemieszczonego węgla, układ geometryczny (w przekroju podłużnym) mas powyrzutowych oraz ich zasięg w wyrobisku, a także skalę czasową przebiegu wyrzutu – w stosunku do liczby cykli przeliczeniowych modeli i pierwotną wytrzymałość węgla na ściskanie.

Wymiary modelu wynosiły więc: $35 \times 3,5 \times 1,0$ m (odpowiednio: długość, wysokość, szerokość). Modelowy fragment pokładu węglowego zbudowano z około 3000 elementów w kształcie dysków o przekroju kołowym i promieniu 0,02–0,07 m, skonsolidowanych następnie więzami stykowymi oraz równoległymi, odpowiadającymi bardzo słabemu węglowi koksosemu (o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie ok. 3 MPa). Makroporowatość wstępną fragmentu pokładu węglowego ustalono na 7,5%, zaś ciśnienie metanu w części wewnętrznej (po lewej stronie modelu) ustalono na 5 MPa, natomiast na czole przodka – jako ciśnienie atmosferyczne – około 0,1 MPa.

Należy dodać, że makroporowatość pokładu węglowego w modelu jest ściśle związana z gęstością (masą właściwą węgla), którą przyjęto jako 1300 kg/m^3 .

Na rysunku 1 pokazano przekrój pionowy modelu, z widocznymi skonsolidowanymi cząstkami tworzącymi fragment pokładu węglowego w rejonie przodka wyrobiska, a także – kręgami pomiarowymi 1–5, w których rejestrowano następnie średnie

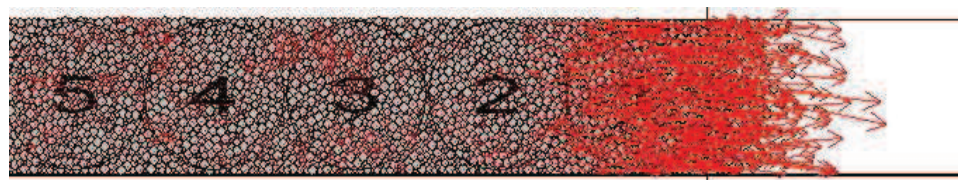
zmiany makroporowatości węgla bezpośrednio przed oraz w czasie rozwijającego się wyrzutu metanu i węgla w przodku.



Rys. 1. Pionowy przekrój podłużny modelu z zaznaczonymi kręgami pomiarowymi

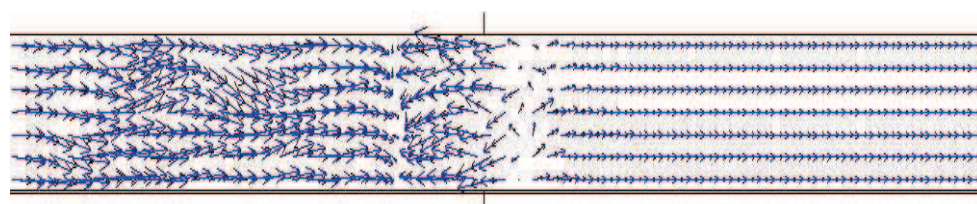
Fig. 1. Vertical section of length-wise model with measurement circles marked

Na rysunku 2 pokazano moment rozpoczynającego się wyrzutu w przodku wyrobiska, gdzie krótkimi odcinkami prostej pionowej linii poza obrysem wyrobiska oznaczono pierwotne położenie przodka, zaś wektory w kolorze czerwonym oznaczają chwilowy kierunek i prędkość ruchu cząstek węgla. Proces wyrzutowy w modelu był bezpośrednio spowodowany zarówno ciśnieniowym przepływem wolnego metanu (o wspomnianym wyżej gradiencie ciśnienia), jak i działaniem intensywnej desorpcji metanu, zamodelowanej skutkowo w postaci sił parcia poziomego w ośrodkach szybkiej desorpcji rozmieszczonych regularnie na długości modelowanego odcinka pokładu.



Rys. 2. Początkowa faza wyrzutu w modelu (czerwone strzałki oznaczają wektory kierunku i prędkości przemieszczania się cząstek węgla)

Fig. 2. Outburst's initial phase in the model (red arrows mean vectors of coal particles' velocity)



Rys. 3. Kierunek i prędkość przepływu metanu przez caliznę węglową i wyrobisko – w początkowej fazie wyrzutu

Fig. 3. Direction and methane flow velocity through the coal body and excavation in the initial phase of an outburst

Na rysunku 3 pokazano chwilowy obraz rozkładu kierunków przepływu oraz prędkości strumieni metanu – odpowiadający pod względem czasu początkowej fazy wyrzutu przedstawionej na rysunku 2. Najważniejsze spostrzeżenia wynikające z rysunku 3 można ująć następująco:

- uogólniając, prędkość przepływu metanu wolnego jest w obrębie pokładu znacznie większa niż w sąsiednim pustym odcinku wyrobiska – co jest związane z dostępnym dla gazu niewielkim przekrojem poprzecznym dróg przepływu (zaciśniętych szczelin) po lewej stronie modelu,
- na odcinku długości około 3 m chodnika (od pierwotnego położenia przodka w głąb pokładu) zaznacza się wyraźnie odwrócenie kierunku prądu metanu, co można tłumaczyć dynamicznym „wbijaniem się” rozluźnionego czoła przodka w atmosferę wyrobiska oraz większą swobodą ruchu gazu w tym obszarze, spowodowaną rozluźnieniem węgla w czole przodka (o zasięgu poziomym równym w przybliżeniu wysokości wyrobiska),
- bardzo charakterystyczna jest wąska pionowa strefa turbulencji przepływu około 3 m w głębi niszczonej calizny węglowej, która oznacza przemieszczający się w głąb pokładu front mechanicznego niszczenia calizny (rys. 2).

Można dodać, że występująca chwilowo – na odcinku do około 2 m przed pierwotnym położeniem przodka – strefa turbulencji i rozrzedzenia gazu obejmuje rejon między strefą „zassania” w pękającym przodku wyrobiska a obszarem jednorodnego odpływu gazu w wyrobisku.

Obserwacja na komputerowym obrazie modelu dynamiki **rozpadu calizny węglowej** w rejonie pierwotnego położenia przodka wyrobiska, pozwoliła na wyróżnienie trzech faz „przepływu” węgla w strumieniu sprężonego metanu, a mianowicie:

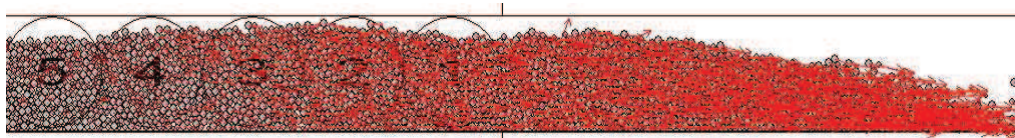
- 1) fazę szybkiego i wysokociśnieniowego, szczelinowego przepływu gazu (po lewej stronie modelu), powodującego **separację większych bloków** węgla,
- 2) fazę **fluidalnego przepływu** brył i cząstek węgla w sprężonym metanie (odpowiadającą w przybliżeniu strefie mechanicznego niszczenia pokładu),
- 3) fazę **lotności** i dynamicznego **rozdrabniania** węgla w strumieniu metanu o malejącym ciśnieniu.

Ostatnia faza trwa najdłużej i kończy się z chwilą całkowitego osadzenia mas powyrzutowych. Powoduje ona więc w przypadku słabych mechanicznie węgli całkowite rozdrobnienie mas – do wielkości milimetrowych pojedynczych cząstek. Ostatnie zjawisko – znane z praktyki górnictwa węglowego – nie jest jednak możliwe do zaobserwowania w omawianym modelu numerycznym – ze względu na zadaną pierwotnie wielkość elementarnych cząstek modelu (średnica $d = 0,04\text{--}0,14$ m).

Można dodać, że teoretycznie jest możliwe konstruowanie modeli BPM z bardzo małych cząstek (rzędu paru milimetrów), lecz trzeba byłoby wtedy liczyć się ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeniowego modelu – co w skrajnych przypadkach dużych modeli może prowadzić nawet do kilku tygodni ciągłych obliczeń jednego przebiegu modelowania. W tych warunkach wprowadzanie zmian i korekt do programu obliczeniowego staje się praktycznie niemożliwe z uwagi na czas.

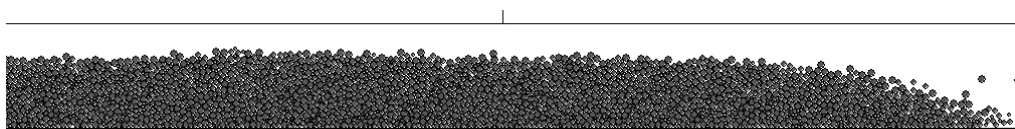
Na rysunku 4 przedstawiono widok modelu w czasie zanikania ruchów przemieszczenia poziomego, zaś na rysunku 5 – widok końcowy modelu po ustaniu osiadania mas powyrzutowych. Na wymienionych rysunkach można zauważyć, że ruch poziomy mas węglowych zanika stopniowo od lewej do prawej strony modelu, zaś proces końcowego osiadania mas powyrzutowych powoduje ich niewielką kompaktację

pionową – w granicach 10–20% wysokości wyrobiska. Po zaznaczeniu w programie instrukcji wydruku pozostałych po wyrzucie więzów międzycząstkowych można zauważyć, że większe bloki węgla lokują się w dolnej części mas powyrzutowych – co jest między innymi wynikiem działania zaprogramowanego w modelu pionowego przyspieszenia ziemskiego ($9,81 \text{ m/s}^2$). Dotyczy to jednak głównie modelowania pokładu węglowego o większej wytrzymałości na ściskanie (powyżej ok. 5 MPa). W pozostałych przypadkach (bardzo słabych węgli) masy powyrzutowe składają się prawie wyłącznie z pojedynczych cząstek – co oznacza, że nie zachowały się w nich żadne więzy międzycząstkowe.



Rys. 4. Końcowa faza wyrzutu w modelu

Fig. 4. Outburst final phase in the model



Rys. 5. Końcowy układ mas powyrzutowych węgla w modelu

Fig. 5. Final arrangement of after-outburst masses in the model

3. REJESTRACJA ZMIAN MAKROPOROWATOŚCI WĘGLA

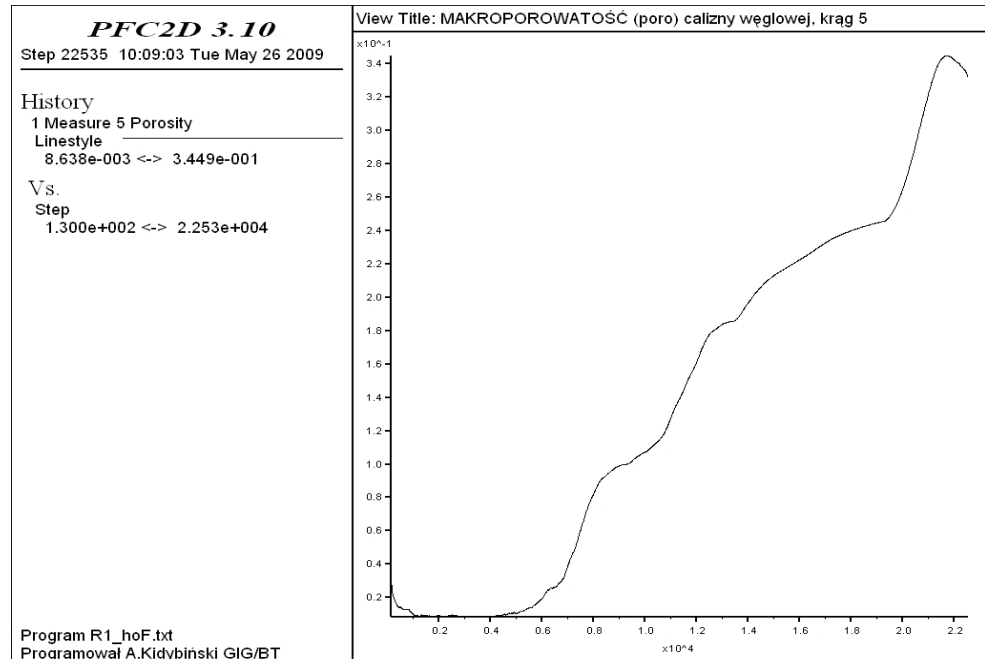
Badaniami laboratoryjnymi porowatości próbek polskich węgla kamiennych zajmowano się od dawna. Wykazały one, że porowatość węgla stwierdzona w laboratorium wynosi 3–17% (średnio 6,87%) i obejmuje przestrzeń porową (pory otwarte i zamknięte) oraz nieporową przestrzeń sorpcyjną (Ceglarska i in. 1995). Należy jednak pamiętać, że próbki laboratoryjne znajdują się w stanie odprężonym, ich porowatość nie może być przeto utożsamiana z tą dotyczącą fragmentów calizny węglowej znajdującej się pod działaniem lokalnego stanu naprężeń w górotworze. Nie obejmuje ona ponadto przestrzeni szczelinowej (w skali większej od próbki laboratoryjnej) oraz międzycząstkowej (w przypadku węgla nieciągniętego w masywie) – co jest przedmiotem niniejszego artykułu.

W metodzie spoistych modeli cząstkowych rozpatrywany masyw pokładu węglowego składa się z cząstek odkształcalnych lecz nieporowatych (o gęstości 1300 kg/m^3) oraz występujących między nimi przestrzeni wolnych, które w całości zaliczane są do porów otwartych (makroporów).

W warunkach kopalnianych do porów otwartych dopływa intensywnie gaz desorbowany z najbliższych cząstek węgla, a także przepływa przez nie gaz wolny. Przepływ ten w modelach BPM jest odwzorowany bezpośrednio – przez wymuszenie

gradientu ciśnienia metanu, zaś efekty desorpcji (niemożliwej do modelowania bezpośredniego) są odwzorowane w modelu w postaci sił przyłożonych do cząstek w przyjętych ośrodkach szybkiej desorpcji (OSD).

Jak wspomniano, w modelu założono programowo pięć dużych kręgów pomiarowych (k1–k5), w których rejestrowano zmieniającą się średnią makroporowatość modelowanego pokładu węglowego. Wskaźnik ten, początkowo wyrażony w ułamku jedności, przy budowie modelu wynosił 0,075 (czyli 7,5%) – co odpowiada nieco powiększonej wstępnymi ruchami górotworu pierwotnej porowatości węgla w pokładzie (ok. 5%).



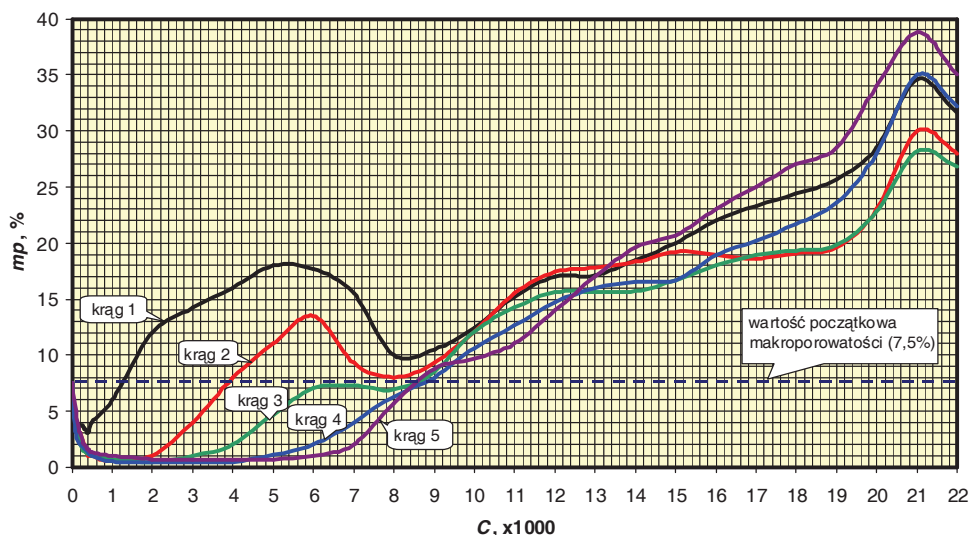
Rys. 6. Przykład arkusza oryginalnej rejestracji makroporowatości pokładu (krąg 5)

Fig. 6. The example of the sheet of original macro porosity registration of the seam (circle 5)

Na rysunku 6 pokazano przykład oryginalnej rejestracji zmian wielkości tego wskaźnika w kręgu nr 5 w czasie kolejnych cykli obliczeń całego modelu (1–22 000) – co odzwierciedla odpowiedni upływ czasu. Krąg 5, położony w odległości około 14–17 m od modelowego przodka wyrobiska, reprezentuje wglębną część pokładu węglowego podlegającą znacznemu ciśnieniu górotworu, nieodprężoną wskutek bezpośredniego sąsiedztwa wyrobiska. Znajduje to swój wyraz na wykresie (rys. 6) – gdzie początkowo nadana makroporowatość (7,5%) bardzo szybko zmniejsza się do około 3%, następnie przez dłuższy czas utrzymuje się poniżej 2%, po czym zaczyna (w przybliżeniu liniowo) wzrastać do około 35%. Ostatni wynik odpowiedni stanowi po wyrzuceniu, z zaliczeniem na poczet makroporowatości fragmentu pustki podstropowej mas powyrzutowych – przypadającej na obszar kręgu 5 (rys. 4). Rzeczywistą makroporowatość w zajętej przez cząstki węglowe partii kręgu 5 można oszacować na około 18–25% (0,18–0,25).

4. ZMIANY MAKROPOROWATOŚCI POKŁADU WĘGLA

Podobne (jak przedstawiona na rys. 6) rejestracje zrealizowano dla pozostałych czterech kręgów pomiarowych pokrywających swym zasięgiem (łącznie z kręgiem 5) w całości modelowany odcinek pokładu węglowego (od zera do 17 m od przodka). Łączne zestawienie wszystkich tych rejestracji przedstawiono na rysunku 7, gdzie, oprócz pięciu krzywych pochodzących bezpośrednio z rejestracji, zaznaczono również (linią przerywaną) początkową wartość makroporowatości badanego odcinka pokładu (7,5%).



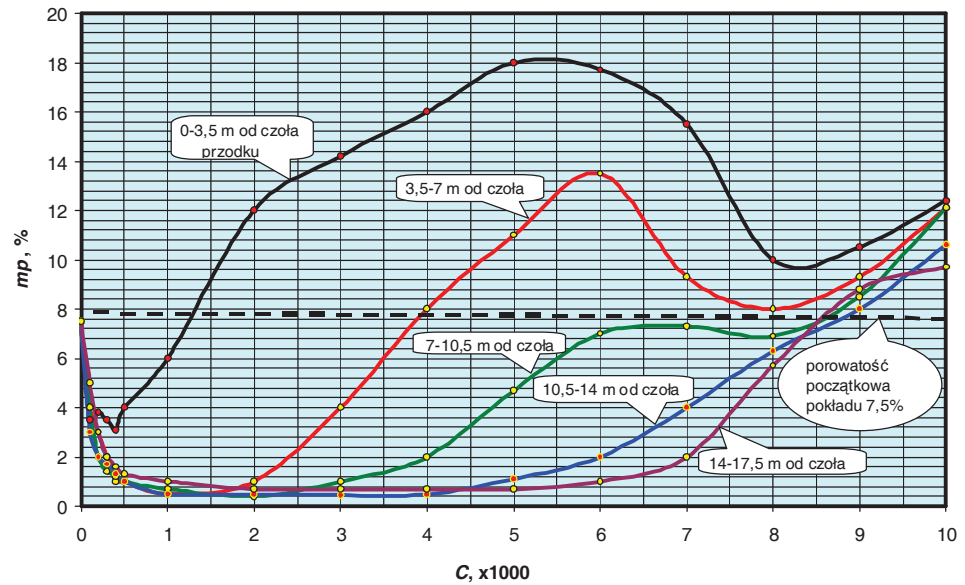
Rys. 7. Zmiany makroporowatości mp pokładu przed wyrzutem i w jego przebiegu (kręgi 1–5);
C – cykle obliczeniowe (czas)

Fig. 7. Changes in macro porosity mp of the seam before the outburst and during it (circles 1-5);
C – measurement cycles (time)

Przebieg krzywych na omawianym rysunku można ogólnie podzielić na dwa segmenty w poziomie, a mianowicie od zera do około 8 tys. cykli oraz 8–20 tys. cykli. W pierwszym segmencie (powiększonym na rys. 8), który może być uznany za segment przedwyrzutowy występują bardzo duże różnice w przebiegu poszczególnych krzywych reprezentujących poszczególne strefy odległości od czoła przodka. Makroporowatość pokładu węgla zmienia się następująco:

- krąg 1 (0–3,5 m od przodka): początkowo zmniejsza się z 7,5 do 3,0%, następnie wzrasta do 18%, po czym znów zmniejsza się do 10%,
- krąg 2 (3,5–7 m od przodka): szybko zmniejsza się z 7,5 do około 0,5%, po czym po średniej długości okresie bardzo małej makroporowatości (dużej gęstości) zwiększa się do 14% i dalej – po zmniejszeniu do około 8% – przebieg krzywej włącza się w ogólny nurt wzrostowy we wszystkich kręgach,
- kręgi 3, 4 oraz 5 (7–17 m od przodka): po szybkim zmniejszeniu się z 7,5 do 0,5–1,0% wystąpił długi okres małej makroporowatości (dużej gęstości) – do około

4–8 tys. cykli, po czym nastąpiło włączenie się krzywej w ogólny nurt wzrostowy w pozostałych kręgach.



Rys. 8. Początkowe zmiany makroporowatości mp pokładu (przed wyrzutem); C – cykle obliczeniowe (czas)

Fig. 8. Initial macro porosity changes mp of the seam (before the outburst); C – calculation cycles (time)

Obszar kręgów 3, 4 oraz 5 (ogólna odległość od przodka 7–17 m) przedstawia strefę pokładu, w której zachodzą duże i stosunkowo długotrwałe **przyrosty gęstości** (zmniejszenie makroporowatości) węgla w pokładzie.

W drugim segmencie obliczeniowo-czasowym (8–20 tys. cykli) – we wszystkich kręgach występuje w przybliżeniu jednorodny szybki wzrost makroporowatości, co oznacza intensywny przebieg wyrzutu na łącznej szerokości wszystkich kręgów. W końcowym odcinku obliczeniowo-czasowym modelowanego wyrzutu (20–22 tys. cykli) zaznacza się pewne zmniejszenie makroporowatości (o wysokiej jej wartości), co odzwierciedla efekt osiadania mas powyrzutowych pod wpływem grawitacji, czyli zakończenie fazy lotnej bądź przepływu fluidalnego cząstek węgla w rozprężającym się metanie.

Na podstawie obserwacji omawianego modelu można wydzielić następujące formy przemieszczania się mieszaniny węglowo-gazowej w zestawieniu z lokalną jej makroporowatością (mp):

- $mp = 0–5\%$ – stan sprężenia (dużej gęstości) węgla sygnalizujący jego **przygotowanie do wyrzutu**,
- $mp = 5–8\%$ – naturalny stan makroporowatości pokładu,
- $mp = 8–18\%$ – faza **generowania** wyrzutu węgla i gazu,
- $mp = 18–25\%$ – faza przepływu fluidalnego brył i cząstek węgla w sprężonym gazie,
- $mp = 25–40\%$ (i większa) – faza lotności cząstek i pyłu węglowego w rozprężającym się gazie.

Należy dodać, że stan sprężenia węgla przed wyrzutem ($mp = 0-5\%$) jest wywołany najpewniej pojawieniem się w szczelinach węglowych gazów o wysokim ciśnieniu, lecz nie znajdującego jeszcze dróg szybkiego odpływu, które powstają dopiero w wyniku przebicia pierwszych kanałów gazowo-węglowych w pokładzie. Gaz ten może pochodzić zarówno z dopływu gazów wolnego (złożowego) jak i pobliskich ognisk szybkiej desorpcji spowodowanej mechanicznym odprężeniem węgla przez pobliski przodek wyrobiska, lub wstrząsem górotworu.

Ponadto, układ wzajemny (sekwencja) krzywych przedstawionych na rysunku 8 wykazuje jednoznacznie, że w przypadku rejestracji w dalszych (wglębnych) partiach pokładu przed czołem przodka (wydłużenia modelu w części zajętej przez pokład węglowy) można się spodziewać równie dużego wzrostu gęstości pokładu węglowego, jednak występującego w dłuższym czasie.

Ostatnie stwierdzenie może mieć znaczenie dla możliwości praktycznej realizacji pomiarów zmian gęstości węgla w pokładzie – jako źródła możliwego sygnału o zbliżającym się wyrzucie węgla i gazów w rozpatrywanym przodku wyrobiska.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania na modelu numerycznym (o wymiarach $35 \times 3,5 \times 1,0$ m) – metodą spoiстых modeli cząstkowych (BPM) – odcinka wyrobiska korytarzowego w jego strefie przyprzodkowej, prowadzonego w pokładzie węglowym (przy ciśnieniowym przepływie wolnego metanu przez ten pokład) wykazały, że w zasięgu poziomym od czoła przodka stanowiącym 3–5-krotną wysokość wyrobiska, węgiel przed wyrzutem ulega znacznemu sprężeniu (zmniejszenie makroporowatości) do około 7% od wartości pierwotnej. Stwarza to podstawę do podjęcia badań (głównie z wykorzystaniem metod geofizyki inżynierskiej, a szczególnie metody sejsmicznej i geoelektrycznej) dotyczących wczesnego wykrywania stanów przedwyrzutowych w kopalni zagrożonej wyrzutami węgla i metanu. W czasie badań, opisanych w artykule, przy zastosowaniu zmiennego gradientu ciśnienia wolnego metanu przepływowego – stwierdzono również, że dynamika inicjacji wyrzutu jest uwarunkowana w decydującej mierze ciśnieniem wywieranym przez gaz świeżo zdesorbowany, zaś w mniejszym stopniu – przez gradient ciśnienia gazów wolnego (przeliczany w modelu na oddziaływanie mechaniczne za pomocą równań Naviera-Stokesa).

Ze względu na to, że czynnik czasu w modelach BPM jest wyrażony liczbą cykli przeliczeniowych całego modelu (a nie – upływem czasu rzeczywistego) – są wymagane ścisłe badania metodą wstecznej aproksymacji (*back analysis*) **zaistniałych w rzeczywistości kopalnianej** wyrzutów gazów i skał (modele retrostrukturalne) – z wykorzystaniem metody spoiстых modeli cząstkowych – w celu wyznaczenia rzeczywistej skali czasowej model/kopalnia. Pozwoliłoby to na określenie w przybliżeniu, w jakim czasie od chwili stwierdzenia anomalii gęstości węgla w strefie przyprzodkowej, można spodziewać się wystąpienia wyrzutu w przodku wyrobiska.

* * *

Powyżej opisana praca badawcza została zrealizowana przez autora artykułu w 2009 roku, w ramach działalności statutowej Głównego Instytutu Górnictwa.

Literatura

1. Ceglarska-Stefańska G. i inni (1995): Porowatość polskich węgla kamiennych. Archives of Mining Sciences Vol. 40, issue 3.
2. Cundall P.A. (1971): Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proc. Symp. ISRM, Vol. 1, Nancy.
3. ITASCA (2004): PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions, Theory and Background, Minneapolis.
4. Jakubów A., Tor A., Wierzbicki M. (2006): Własności strukturalne węgla w rejonie wyrzutu węgla i gazu w chodniku transportowym D-6 w pokładzie 409/4 KWK Zofiówka. XIII Międzyn. Konf. Górnicze Zagrożenia Naturalne 2006. Katowice, GIG.
5. Kidybiński A. (2007a): Model numeryczny wyrzutu węgla i gazu w pokładzie jednorodnym. Przegląd Górniczy nr 9.
6. Kidybiński A. (2007b): Dynamika wyrzutu węgla i gazu w przodku chodnika w pokładzie jednorodnym – wg badań modelu cząstkowego. Przegląd Górniczy nr 11.
7. Kidybiński A. (2007c): Wyrzut węgla i metanu w przodku chodnika w pokładzie z uskokiem wg badań modelu cząstkowego. Przegląd Górniczy nr 12.
8. Krause E. (2007) – Wpływ uwarunkowań geologicznych i gazowych na kształtowanie się zagrożenia wyrzutami gazów i skał w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 2.
9. Potyondy D.O., Cundall P.A. (2004): A bonded-particle model for rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Konopko