

Stanisław MNICH

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

PRZEMIESZCZENIA I DEFORMACJE GÓROTWORU POD WPLYWEM EKSPLOATACJI
GÓRNICZEJ W ŚWIETLE BADAŃ NA NUMERYCZNYM MODELU BLOKOWYM

Streszczenie. Scharakteryzowano górotwór jako w przeważającej liczbie przypadków ośrodek nieciągły i mający strukturę blokową. Wskazano, że górotwór taki może być w sposób łatwy i praktycznie wystarczająco wierny odwzorowany na modelu numerycznym. Podano założenia i dane wejściowe do budowy modelu. Omówiono metodę badania na modelu przemieszczeń struktury blokowej pod wpływem samodelowanego wyrobiska eksploatacyjnego. Podano przykłady praktycznego zastosowania modelu i metody.

WPROWADZENIE

Górotwór w przeważającej liczbie przypadków jest ośrodkiem nieciągłym tak w sensie geometrycznym, jak i fizycznym. Geometrycznym, gdyż liczne spękania dzielą go na bryły odpowiednio ze sobą połączone. W sensie fizycznym, gdyż własności mechaniczne skał dość często zmieniają się skokowo.

Pod wpływem eksploatacji górniczej w górotworze następuje dalszy rozwój nieciągłości i w podebranych warstwach tworzy się struktura, w większości przypadków, blokowa, która w sposób względnie łatwy a zarazem praktycznie wystarczająco wierny może być zamodelowana numerycznie.

Przyjęcie takiego modelu dla górotworu jest uzasadnione również z punktu widzenia metodologii badań, gdzie w ostatnim okresie czasu nawet w dziedzinach już tradycyjnie bazujących na ośrodkach ciągłych (np. hydrodynamika, dynamika konstrukcji) coraz częściej stosuje się ośrodki dyskretne w postaci zbiorów tzw. "dużych cząstek" lub "sztywnych elementów blokowych" [2, 3, 6]. Przyjmuje się przy tym, że sama "duża cząstka" lub "element" mogą mieć bardzo różnorodny kształt geometryczny np. dysku, pasa, pierścienia płytki czy bloku.

Na podstawie powyższych stwierdzeń przyjmuje się do dalszych rozważań model sztywnych elementów blokowych (MSEB), na którym metodą symulacji komputerowej bada się przemieszczenia i odkształcenia podebranych, eksploatacją górniczą warstw górotworu.

1. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA DO MODELOWANIA GÓROTWORU

Górotwór warstwowy podbierany eksploatacją górniczą może być praktycznie wystarczająco wiernie, a w wielu przypadkach wierniej niż innymi znanymi metodami, odwzorowany na modelu numerycznym za pomocą bloków prostopadłościennych. To podstawowe założenie odwzorowania górotworu na modelu wymaga określenia dalszych założeń szczegółowych pogrupowanych jako założenia geometryczne, fizyczne i analityczne [5].

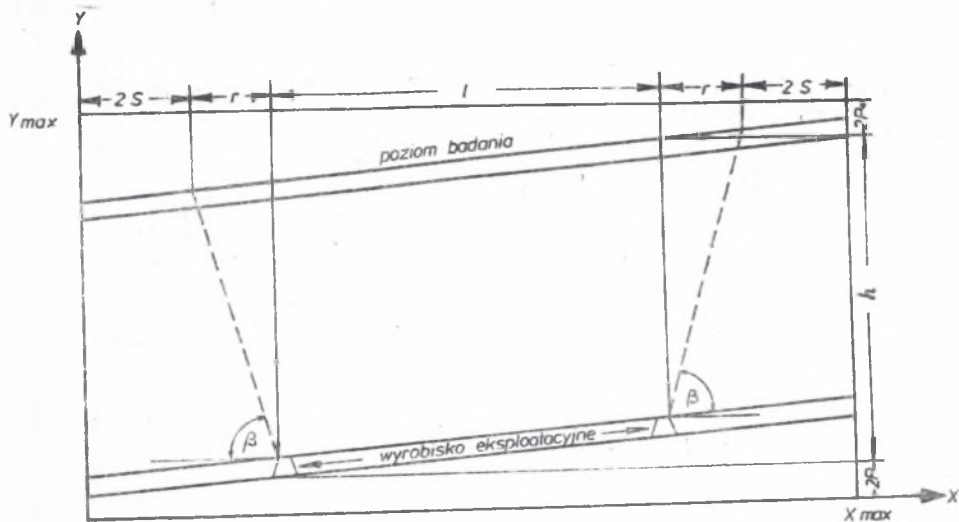
1.1. Założenia geometryczne

Numeryczny model blokowy górotworu usytuowany jest w I ćwiartce płaskiego układu współrzędnych prostokątnych, którego oś X zajmuje położenie poziome, a Y pionowe. Obszar modelowania wynika z sytuacji i warunków geologiczno-górniczych oraz celu badań (rys. 1). Przeważnie jest to obszar usytuowany pomiędzy pokładem o projektowanej eksploatacji, poziomem badania i bocznymi płaszczyznami zasięgu wpływów. Położenie bloków w modelu określają współrzędne (X , Y) ich środków ciężkości i kąty nachylenia (α). Związek geometryczny pomiędzy blokami w modelu kształtuje się na podstawie kontaktów narożników danego bloku ze ścianami bloków przyległych.

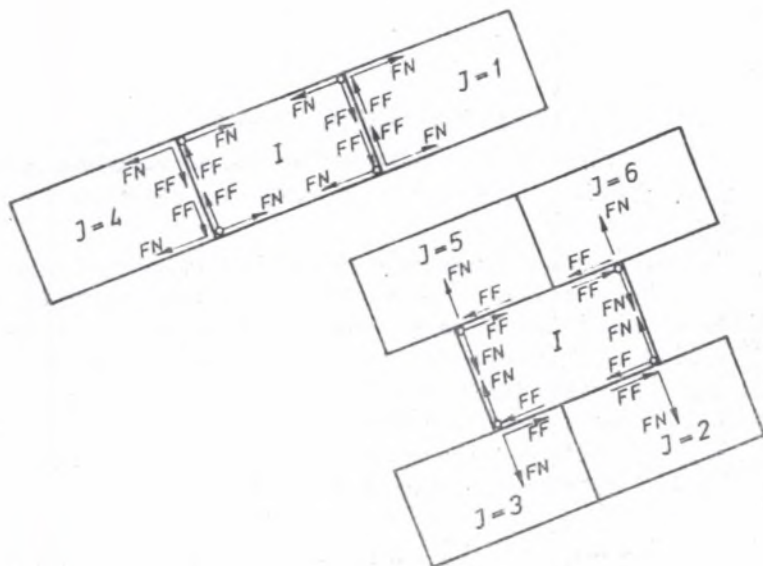
1.2. Założenia fizyczne

Zakłada się, że własności mechaniczne skał w zasadniczy sposób wpływają na tworzenie się struktury blokowej w podebranych warstwach górotworu i mają w niej swoje odzwierciedlenie. W blokowej strukturze górotworu istotną rolę odgrywa również charakterystyka kontaktów między blokami, czyli spękań górotworu. Dotyczy to głównie sztywności spękań i kątów tarcia. W strukturze blokowej górotworu tworzą się odpowiednie związki siłowe wynikające z reakcji kontaktowych między blokami w polu grawitacyjnym. Siły reakcji kontaktowych zlokalizowane są w narożnikach bloków i występują w postaci składowych działających w płaszczyznach spękań (rys. 2).

Obciążenia nadległych warstw górotworu, nie odwzorowanych na modelu przy dużych głębokościach zalegania eksploatowanego pokładu, uwzględnia się za pomocą przyłożenia dodatkowej siły ciężkości do górnych bloków. Przemieszczenia bloków w modelu wynikają z realizacji prawa ruchu: przyspieszenie = siła/masę. W procesie przemieszczeń bloki wykonują ruch postępowo-obrotowy. Do rozproszenia energii drgań bloków w modelu stosuje się tłumienie metodą hysteretyczną lub lepkościową.



Rys. 1. Wymiary modelu
Fig. 1. Model dimensions



Rys. 2. Rozkład sił na kontaktach bloków (I - blok rozpatrywany, J - bloki sąsiednie, FN - siły normalne, FF - siły styczne)

Fig. 2. Distribution of forces on block contact face (I - block being examined, J - surrounding blocks, FN - normal forces, FF - shear forces)

1.3. Założenia analityczne

W modelu zakłada się stałe położenie dla bloków wyznaczających obramowanie modelu od strony spągu i bocznych krawędzi, a przy warstwach nachylonych tylko dla jednej krawędzi od strony upadu warstw. Wymiary modelu powinny być takie, aby stałe bloki odpowiadały stałym elementom górotworu znajdującym się poza zasięgiem wpływów eksploatacji. Stałe położenie bloków określa się za pomocą przyjęcia stałych wartości X , Y i α dla ustalonych bloków i wprowadzenia ich do programu symulacyjnego. Warunek stałości może być nałożony niekiedy tylko na jedną lub dwie z tych wartości, np. gdy blok nie powinien opadać, to $Y = \text{constans}$. W tym przypadku blok może przemieszczać się równoległe do osi X i zmieniać nachylenie α .

Wyrobisko górnicze modeluje się za pomocą usunięcia z modelu określonej liczby bloków odpowiadających wymiarom i położeniu wyrobiska eksploatacyjnego w górotworze.

Odstęp czasowy (Δt) pomiędzy iteracjami ustala się na podstawie testowania modelu i obserwacji przemieszczeń bloków lub analitycznie na podstawie wzoru [1]:

$$\Delta t < 2\sqrt{\frac{m}{s}}$$

gdzie: m - masa bloku,

s - równoważna sztywność otoczenia bloku.

Proces iteracyjny na modelu ma przebieg modulacyjny, pozwalający na zmianę wartości parametrów w danych wejściowych podczas symulacji przemieszczeń.

Rozpad bloków warstwy stropu bezpośredniego na bryły i wzrost ich objętości, a następnie zmniejszenie w wyniku sprasowania gruzu zawałowego imitowane są za pomocą zmian położenia granicy osiadania tych bloków. W podobny sposób może być uwzględniona ewentualna podsadzka wyrobiska eksploatacyjnego. Zakończenie procesu iteracyjnego i symulacji przemieszczeń bloków następuje na podstawie osiągnięcia określonych granicznych wartości przemieszczeń lub ich zaniku poniżej zadanej wartości w czasie pomiędzy iteracjami.

1.4. Dane wejściowe do modelowania

Model górotworu o strukturze blokowej buduje się numerycznie na podstawie następujących danych wejściowych:

- wymiarów obszaru modelowania,
- wymiarów bloków i ich rozmieszczenia w modelu,
- kąta nachylenia warstw górotworu (modelu).

Obszar modelowania określa się na podstawie rozmieszczenia podstawowych elementów systemu, tj. położenia eksploatacji i obiektu badań w górotworze. Elementy te wyznaczają zasadniczo obszar modelowania wzdłuż pionowej osi Y granicę dolną i górną modelu. W kierunku prostopadłym, tj. wzdłuż osi X obszar modelowania, określają linie wyznaczone kątami zasięgu wpływów. Do tak wyznaczonego obszaru powierzchni "roboczej" modelu należy dodać z każdej ze stron po dwie warstwy lub dwa bloki w warstwie (rys. 1), a otrzymane wartości przyjąć za wymiary modelu.

Wymiary bloków w modelu określa się na podstawie:

- bezpośrednich obserwacji kopalnianych,
- profilów otworów wiertniczych lub przekrojów geologicznych,
- pomiarów rozwarstwień podebranego górotworu,
- badania charakterystyki wytrzymałościowej, przewidzianych do podbierania warstw i ustalenia położenia powierzchni osłabionej spójności międzywarstwowej,
- pomiarów spękań górotworu metodą geofizyczną lub aerometryczną,
- modelowania górotworu metodami fizycznymi,
- obliczeń analitycznych.

Na podstawie doświadczeń ustalono, że najkorzystniejszymi metodami określania struktury blokowej są badania "in situ" za pomocą penetrometru otworowego (określenie wysokości bloków) i obliczenia analityczne (określenia długości bloków).

Należy zwrócić uwagę na występowanie w górotworze tzw. warstw wiodących w procesie przemieszczeń i deformacji, np. grubych ławic piaskowcowych wyznaczających deformacje górotworu. W przypadku znacznego zróżnicowania wytrzymałości skał w warstwach, strukturę blokową należy określać dla warstw wiodących i przyjmować ją dla analizowanego przedziału górotworu.

Dla górotworu mało zróżnicowanego strukturę blokową należy wyznaczać dla warstwy średniej i przyjmować ją za jednakową dla całego analizowanego przedziału górotworu. Wysokość takiego przedziału nie może przekraczać 100 m. Przy wyższych przedziałach bloki należy różnicować, tzn. zmieniać ich wymiary w zależności od grubości warstw i ich zalegania.

Długości bloków (S) najkorzystniej jest obliczać wg empirycznego wzoru [4; 5] :

$$S = 0,51\sqrt{RP} ,$$

gdzie: R - minimalny promień krzywizny warstwy w procesie odkształcania górotworu (wg teorii prognozowania lub pomiarów kopalnianych),

P - grubość warstwy.

Kąt nachylenia warstw w modelu przyjmuje się wg danych kopalnianych.

Po zbudowaniu modelu otrzymuje się jego matematyczne wyrażenie, które dla wygody dalszych operacji korzystnie jest otrzymać w postaci danych wyjściowych jako tabelaryczne zestawienia liczbowe i wykresy stanu początkowego modelu.

2. METODA BADAŃ NA MODELU I DANE WEJŚCIOWE DO SYMULACJI PRZEMIESZCZEŃ

Badania na modelu numerycznym najkorzystniej jest prowadzić metodą symulacji komputerowej przemieszczeń bloków pod wpływem oddziaływania zamodelowanych wyrobisk eksploatacyjnych. Symulacja dostarcza w postaci tabelarycznej i graficznej wyników charakteryzujących stan przemieszczeń i deformacji górotworu w poszczególnych fazach dynamicznych i w końcowym stadium statycznym badań. Wyniki badań mogą być przeznaczone dla potrzeb ruchowych kopalń lub celów poznawczych zaplecza naukowo-badawczego.

Dane wejściowe do realizacji metody.

Do symulacji przemieszczeń bloków na modelu należy wprowadzić następujące dane wejściowe:

- masy i momenty bezwładności bloków względem ich osi,
- ciężar objętościowy skał i siły ciężkości bloków,
- odstęp czasowy pomiędzy iteracjami,
- współczynniki sztywności normalnej i stycznej kontaktów między blokami (spękań górotworu),
- kąty tarcia na powierzchniach kontaktów między blokami,
- dekrement tłumienia drgań przemieszczających się bloków,
- liczbę iteracji,
- dane wyjściowe, po których iteracjach i jakie (liczbowe, wykresy),
- dane o modulacji danych wejściowych (po których iteracjach i jakie przyjmują wartości),
- liczbę i numery bloków ustalonych poziomo, pionowo i obrotowo,
- liczbę i numery bloków przewidzianych do usunięcia z modelu w celu zamodelowania wyrobiska,

- liczbę i numery bloków tworzących strop bezpośredni wyrobiska i współczynnik ich rozluźnienia w czasie osiadania (zawału),
- położenie granicy osiadania warstw stropowych i jej zmiana po sprasowaniu gruzu zawałowego,
- liczbę i numery górnych bloków modelu obciążonych warstwami nadległymi, nie odwzorowanymi na modelu oraz wartość obciążenia,
- numer bloku, którego ustalone położenie lub znikome zmiany poniżej zadanej wartości świadczą o zakończeniu procesu przemieszczeń i celowości zakończenia procesu iteracyjnego oraz wydania danych wyjściowych.

3. PRZEMIESZCZENIA I ODKSZTAŁCENIA GÓROTWORU POD WPLYWEM EKSPLOATACJI GÓRNICZEJ

Po wprowadzeniu danych wejściowych do symulacji i zamodelowaniu wyrobiska górniczego, które narusza stan równowagi w pierwszym rzędzie w warstwie stropu bezpośredniego, gdzie brak reakcji kontaktowych wybranego pokładu powoduje powstawanie siły i momentów wypadkowych wywołujących ruch obrotowo-postępowy bloków. Proces ten stopniowo narasta i w kolejnych iteracjach przenosi się do warstw coraz wyżej zalegających, aby następnie zacząć zanikać po wypełnieniu wyrobiska eksploatacyjnego i zmniejszaniu się odległości między blokami i wzrastaniu reakcji kontaktowych. Bieżące położenie bloku w danej iteracji jest określone jako wartość położenia początkowego z dodaną algebraicznie wartością przyrostu drogi i nachylenia tego bloku w procesie symulacji przemieszczeń. Matematycznie jest to wartość bieżących współrzędnych środków ciężkości bloków i kątów ich nachylenia, które mają następujące wyrażenia:

$$DU(I) = DU'(I) + U(I) * TDEL$$

$$DV(I) = DV'(I) + V(I) * TDEL$$

$$ALF(I) = ALF'(I) + W(I) * TDEL$$

gdzie:

$DU(I)$, $DV(I)$ - współrzędne prostokątne środka ciężkości bloku I-tego w danej iteracji,

$DU'(I)$, $DV'(I)$ - jw. dla poprzedniej iteracji,

$ALF(I)$, $ALF'(I)$ - kąt nachylenia bloku I-tego w danej i poprzedniej iteracji,

$U(I)$, $V(I)$, $W(I)$ - prędkości składowe - pozioma, pionowa i obrotowa - bloku I-tego w danej iteracji,

$TDEL$ - odstęp czasowy między iteracjami.

Prędkości składowe obliczane są w procesie iteracji wg następujących zależności:

$$U(I) = U'(I) + XSUM(I) * TDEL / AMAS(I)$$

$$V(I) = V'(I) + YSUM(I) * TDEL / AMAS(I)$$

$$W(I) = W'(I) + SUMM(I) * TDEL / AMOI(I)$$

gdzie:

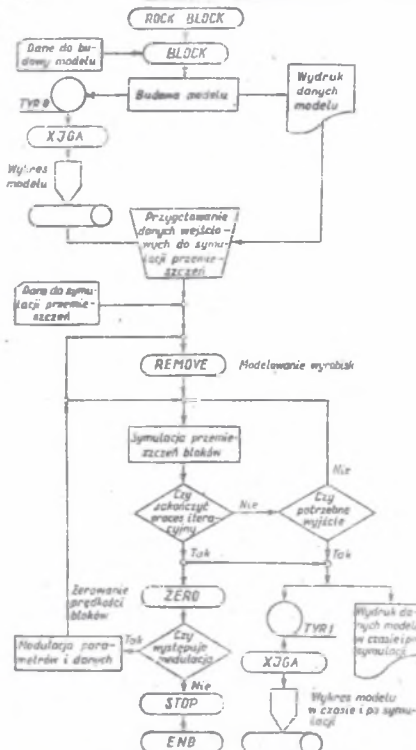
$U'(I), V'(I), W'(I)$ - prędkości składowe - pozioma, pionowa i obrotowa - bloku I-tego w poprzedniej iteracji,

$XSUM(I), YSUM(I)$ - składowe - pozioma i pionowa - siły wypadkowej działającej na blok I-ty w danej iteracji,

$SUMM(I)$ - moment wypadkowy działający na blok I-ty w danej iteracji,

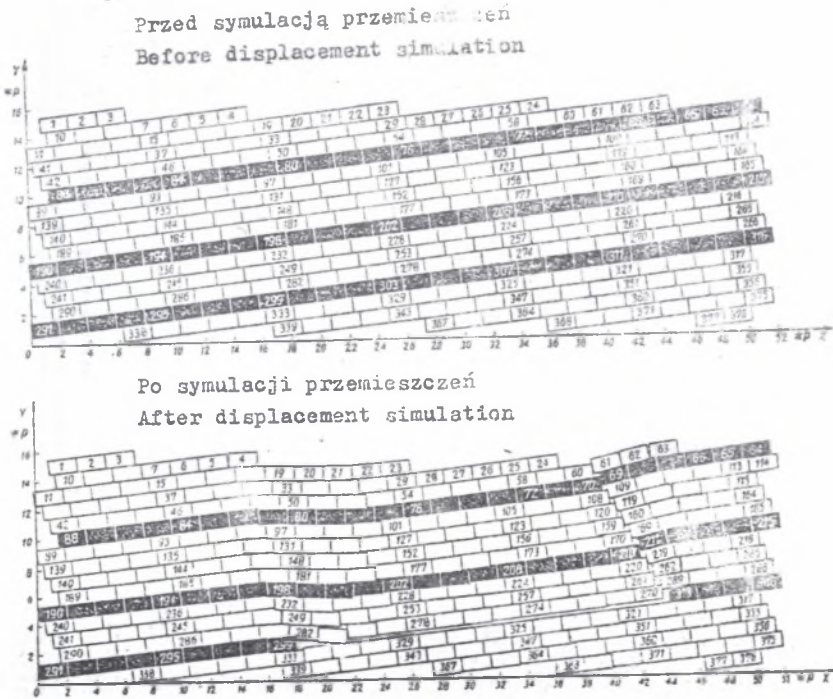
$AMAS(I), AMOI(I)$ - masa i moment bezwładności bloku I-tego,

$*$ - znaki mnożenia i dzielenia.



rys. 3. Schemat blokowy programu budowy modelu i symulacji przeszerzeń
 Fig. 3. Block diagram of a modelling programme and displacement simulation

Schemat blokowy przebiegu podstawowych części programu modelowania i symulacji przemieszczeń przedstawiono na rys. 3, a otrzymane wyniki graficzne, tylko przykładowo, na rys. 4.

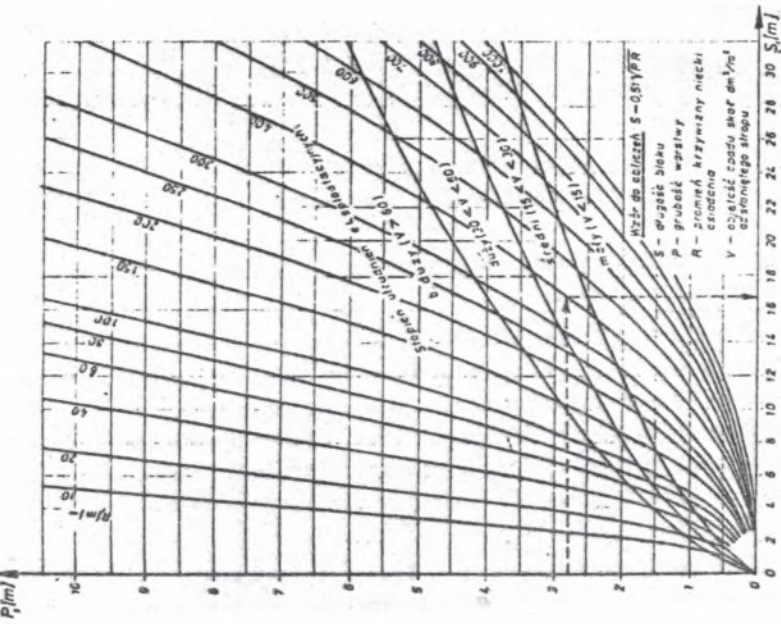


Rys. 4. Model blokowy górotworu
Fig. 4. Block model of a rock mass

4. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIA MODELOWANIA I SYMULACJI PRZEMIESZCZEŃ BLOKÓW

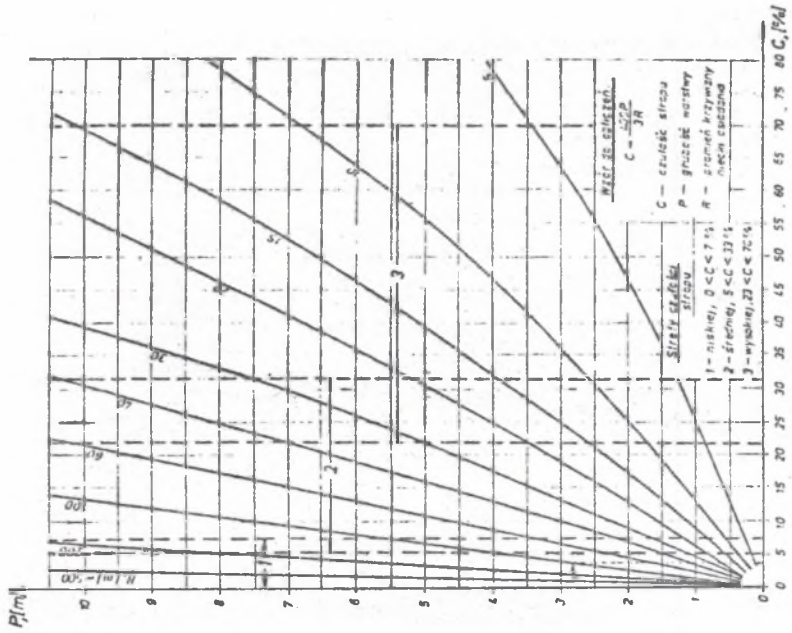
Przedstawiony model i metoda badania na nim przemieszczeń i deformacji podebranych warstw górotworu mogą być zastosowane do rozwiązywania różnorodnych zagadnień dla potrzeb ochrony złoża, wyrobisk górniczych i powierzchni oraz do programowania rozwoju eksploatacji górniczej i prognozowania utrudnień technologicznych w prowadzeniu robót górniczych w warstwach podebranych.

Wyniki badań modelowych, łącznie z danymi wejściowymi, dają możliwość określania stopnia uszkodzenia podebranych warstw górotworu na podstawie:



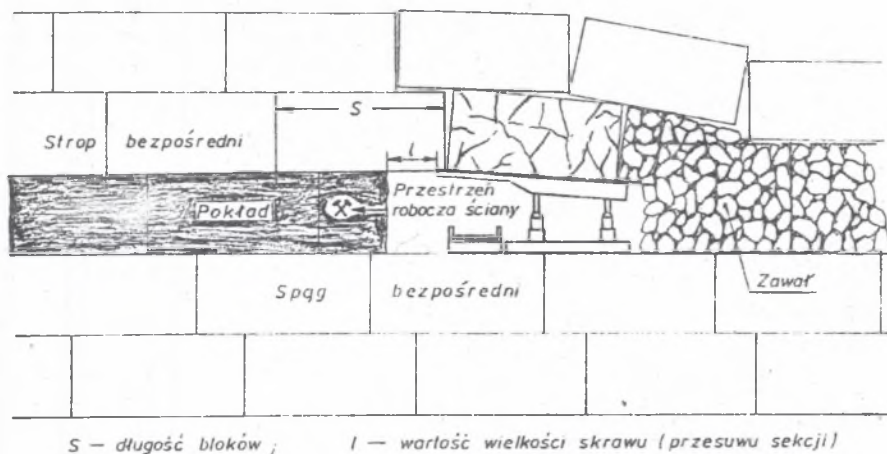
Rys. 5 Nomogram do określania długości bloków i stopnia utrudnień w eksploatacji pokładów podebranych

Fig. 5 Nomogram for determination the length of blocks and a state of diffcultion in mining due to undermining seams



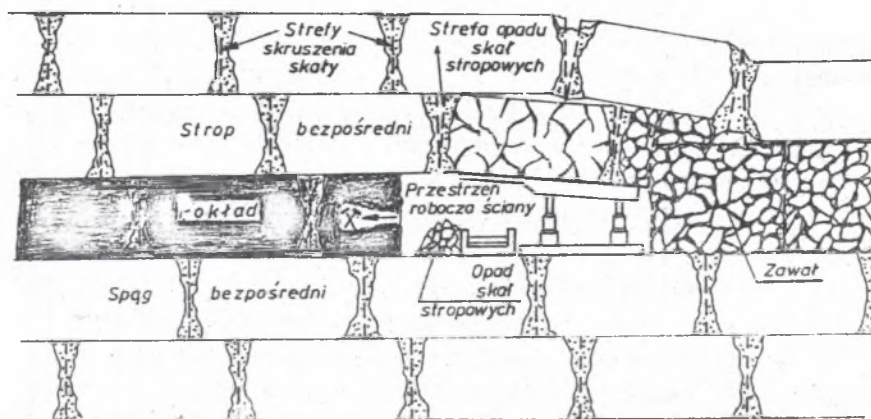
Rys. 6 Nomogram do określania czułości stropu wynikającej z podebrania warstw

Fig. 6 Nomogram for determination of rock falls stability from roof due to undermining of strata



Rys. 7 Wpływ długości bloków S na warunki utrzymania stropu w przestrzeni roboczej ściany pokładu podebranego

Fig. 7 Influence of block length S on roof condition of a longwall in a seam being undermined



Rys. 8 Strefy opadu skał stropowych jako element utrudnień eksploatacyjnych w pokładach podebranych

Fig. 8 Disturbances in mining due to rock falls from roof in the longwall in seams being undermined

- parametrów struktury blokowej,
- przesunięć względnych bloków wzdłuż spękań wtórnych,
- zmian nachylenia bloków przyległych w warstwie,
- stref zniszczenia skał na styku bloków i przewidywanej objętości opadu skał stropowych po ich odsłonięciu,
- utworzenia się pustek w górotworze.

Na podstawie analizy stopnia uszkodzenia podebranych warstw górotworu może być przeprowadzona ocena skutków podbierania dla celów ochrony obiektów i rozwoju eksploatacji w danym rejonie.

Ocena taka zawiera wskaźniki i określenia:

- stateczności warstw stropowych,
- czułości stropu,
- utrudnień technologicznych dla prowadzenia robót górniczych w rejonach podebranych,
- zmian rozkładu naprężeń w górotworze i ich wpływu na zagrożenia zjawiskami dynamicznymi i wzmożonymi przejawami ciśnienia górotworu,
- wpływu eksploatacji na górotwór i powierzchnię oraz na ich obiekty budowlane.

Określenie stopnia uszkodzenia warstw podbieranych oraz ocenę skutków podbierania przeprowadza się na podstawie wyników modelowania i obliczeń uzupełniających, które przykładowo podaje się na rysunkach 5 i 6. Poglądowy stan górotworu podebranego i jego wpływ na technologię robót górniczych (również tylko przykładowo) przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

W pracy [5] podano dla potrzeb omawianej metody charakterystykę jakościową i ilościową klasyfikacji utrudnień technologicznych w eksploatacji pokładów podebranych oraz usytuowanie w przekroju pionowym górotworu pokładów o określonym stopniu utrudnień.

5. ZAKOŃCZENIE

Przedstawiona tematyka podaje tylko wybrane elementy wyników poszukiwanych i otrzymanych, nowych rozwiązań do badania złożonych problemów wpływu eksploatacji górniczej na górotwór. Przeprowadzone badania i praktyczne w kilku przypadkach zastosowania metody modelowania i symulacji przemieszczeń bloków dają podstawę do stwierdzenia, że metoda ta daje odchyłki w stosunku do porównywalnych wyników otrzymanych z badań kopalnianych, w granicach $5 \pm 8\%$. Wskaźniki natomiast charakterystyk górotworu podebranego mieszczą się w przedziałach klasyfikacyjnych. Metoda modelowania górotworu i symulacji przemieszczeń bloków na modelu pozwala

w sposób bardziej kompleksowy i ekonomiczny, niż innymi znanymi metodami, prowadzić badania, dostarczając przy tym niezbędnych i wystarczających informacji.

LITERATURA

- [1] Cundall P.A.: A computer model for simulating progressive large - scale movements in blocky rock systems. Symposium of the Int. Soc. for Rock Mechanics. Nancy 1971.
- [2] Kisiel I. i in.: Mechanika Techniczna: Mechanika skał i gruntów. PWN, Warszawa 1982.
- [3] Kruszewski J., Gawroński W., Wittbradt E., Najber F., Grabowski S.: Metoda sztywnych elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1975.
- [4] Mnich S.: Matematyczne modele i symulacje górnego masywa o dyskretno-blocznej strukturze. V Int. Symp. for. Mine Serveying. Varna 1982, Vol. 5.
- [5] Mnich S.: Analiza deformacji i ocena uszkodzenia podebranego górotworu za pomocą numerycznej symulacji przemieszczeń ośrodków blokowych. Praca doktorska. Maszynopis. GIG, Katowice 1983.
- [6] Wedaszkina K.A. i in.: Reszenije zadacz metodom "krupnych czastic. Tr. Vys. Centra An SSSR. Moskwa 1970.

Recenzent: Dr inż. Tadeusz Pytlarz

СДВИЖЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ ГОРНОГО МАССИВА ПОД ВЛИЯНИЕМ ГОРНЫХ РАБОТ
В СВЕТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЧИСЛОВОЙ БЛОЧНОЙ МОДЕЛИ

Р е з ю м е

В докладе обговорено структуру горного массива и указано, что в большинстве случаев является она дискретно-блочной. Подано метод математического моделирования такой структуры горного массива и основные положения до строения модели.

Представлено данные входа до компьютерной модели и метод имитационно-динамического исследования смещений шарнирно-блочной структуры горного массива. Приведено примеры практического применения предлагаемого метода для изучения и оценки деформации подрабатываемых : горных пород, угольных пластов и горных выработок.

DISLOCATIONS AND DEFORMATIONS OF ROCK MASS UNDER THE INFLUENCE OF MINING
EXCAVATION IN THE LIGHT OF RESEARCHES ON NUMERICAL UNIT MODEL

S u m m a r y

The paper presents a rock mass which in most cases is a discontinuous body and as such can be effectively represented by a blocky model. Described is a method for a computer modelling of the strata of blocky structure as well as the method investigating the influence of a mine working on the rock mass and subsequently on the overlying coal strata and mine roadways.

Given are examples of practical applications of this method for the determination of the mine working influence on the overlying rock mass.