

Krzysztof TOMICZEK

Politechnika Śląska, Gliwice

Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni

KRÓTKA NUMERYCZNA ANALIZA PODBIERANIA POKŁADU Z ZAWAŁEM STROPU

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i *in situ* prowadzonych przez polskich badaczy w latach 1966 – 1975 nad zagadnieniem podbierania pokładów z zawałem stropu. Wyniki tych badań porównano z wynikami symulacji komputerowej podbierania pokładu, przeprowadzonej za pomocą programu FLAC2D na uproszczonym modelu numerycznym.

SIMPLE NUMERICAL ANALYSIS ON THE PROBLEM OF UNDERMINING SEAMS WITH CAVING

Summary. In the context of Staron et al. (1966 – 1975) research a results are presented of investigations conducted to discover the effect of mining with caving a seam underlying another seam, on the later extraction of the higher lying seam. The empirical research was compared with results of simple numerical analysis conducted on the basis of two-dimensional FLAC2D model.

1. Wstęp

Eksploatacja pokładów węgla wymaga rozwiązania wielu problemów związanych z wymogami technologicznymi, ekonomicznymi oraz bezpieczeństwa w kopalniach węgla kamiennego. Jednym z takich problemów jest zagadnienie podbierania pokładów.

Generalnie w górnictwie węgla kamiennego przyjęto zasadę, że pokład wyżej leżący powinien być eksploatowany wcześniej od pokładu zalegającego niżej. Taka kolejność wybierania ma zapobiec zniszczeniu pokładu wyżej położonego, jednak w niektórych warunkach taki sposób prowadzenia eksploatacji jest niemożliwy, np. w przypadku zagrożenia tapaniami, konieczności odgazowania lub odwodnienia pokładów.

2. Przegląd badań nad zagadnieniem podbierania pokładów

Zagadnienie określania zasięgu i wielkości wpływów przy podbieraniu pokładów węgla znajdowało się w polu zainteresowania badaczy i inżynierów od wielu lat. Złożoność zjawiska deformowania się górotworu w bezpośrednim sąsiedztwie eksploatacji powodowała, że przyjęte rozwiązania opierano przede wszystkim na obserwacjach prowadzonych w kopalniach węgla i wiązano je z wielkościami geometrycznymi, np. grubością pokładu podbierającego, odległością między pokładami podbierającym i podbieranym oraz z własnościami wytrzymałościowymi skał zalegających między pokładami i głębokością zalegania pokładów.

Najczęściej były/są to rozwiązania matematyczne proponowane przez różnych badaczy, które uzależniają wielkość wpływu oddziaływania gruzowiska zawałowego na pokład podebrany od stosunku M/g , gdzie g to grubość pokładu podbieranego, a M to (minimalna) odległość pokładów. Wśród tych rozwiązań można wyróżnić cztery zasadnicze grupy: pierwsza, obejmująca wzory na wymaganą odległość między pokładami podbierającym i podbieranym, w funkcji grubości pokładu podbierającego; druga, w funkcji grubości pokładu podbierającego i współczynnika rozluźnienia skał; trzecia, w funkcji grubości pokładu podbierającego, głębokości zalegania i wytrzymałości skał oraz czwarta, w funkcji prawdopodobieństwa występowania wpływów podbierania pokładu.

Grupa I

W. Czechowicz – wymagana bezpieczna odległość między pokładem podbierającym a podbieranym:

$$M = 12g, \quad (1)$$

gdzie g – grubość pokładu podbierającego, m.

W. T. Dawidanc:

$$M = 20g. \quad (2)$$

K. Dziunikowski, L. Rzempiel, I. Mirowski, W. Jaskóła i M. Mazurkiewicz:

$$M = 8g \quad \text{dla } r = 0,144, \quad (3)$$

$$M = 12g \quad \text{dla } r = 0,229, \quad (4)$$

gdzie r – współczynnik regresji.

A. P. Kilaczkow:

$$M = 12 g + 3,5 g^2. \quad (5)$$

B. Krupiński, M. Czechowicz, W. Mrozek i W. Pirszla:

$$M = 12 g \quad \text{dla } g \leq 1,5 \text{ m}, \quad (6)$$

$$M = 8 g \quad \text{dla } g > 1,5 \text{ m}. \quad (7)$$

Grupa II

M. Chudek, W. Olaszowski i A. Pacha:

$$M = \frac{g}{k_r - 1} \cdot \frac{1}{1 - \eta_1}, \quad (8)$$

gdzie: $\eta_1 = \frac{k_r - k'_r}{k_r - 1}$,

k_r – współczynnik rozluźnienia skał,

k'_r – współczynnik rozluźnienia skał po sprasowaniu zawalu.

Po uwzględnieniu konwergencji $\eta^n g \leq z$, (gdzie: z – współrzędna pionowa dowolnego punktu górotworu nad wybieranym pokładem względem przyjętego układu współrzędnych); $n = 5$:

$$M = \frac{g}{k_r - 1} \sum_{i=0}^{i=n} \eta_1^i. \quad (9)$$

Makijewski Instytut Naukowo-Badawczy:

$$M = \frac{3g^2}{k_r - 1}. \quad (10)$$

G. N. Kuzniecowa:

$$M = \frac{(3 + 1,5g)g}{k_r - 1}. \quad (11)$$

T. Staroń:

$$M = g \left[2 + \frac{4}{\pi(k_r - 1)} \right]. \quad (12)$$

Grupa III

M. Chudek:

$$M = 3,5g \sqrt{\frac{p_z}{R_{rs}}}, \quad (13)$$

gdzie: p_z – składowa pionowa naprężenia pierwotnego,

R_{rs} – średnia wytrzymałość graniczna na rozciąganie warstw zalegających pomiędzy pokładami podbierającym i podbieranym.

Grupa IVW. Budryk i W. Bes – prawdopodobieństwo P wystąpienia wpływów silnych:

$$P = 100 \exp(-0,092 \frac{M}{g}), \quad \% \quad (14)$$

prawdopodobieństwo P wystąpienia wpływów średnich i silnych:

$$P = 100 \exp(-0,046 \frac{M}{g}), \quad \% \quad (15)$$

T. Staroń – prawdopodobieństwo zruszenia pokładu podebranego P (wpływy silne i średnie):

$$P = 100 \exp(-0,065 \frac{M}{g}), \quad \% \quad (16)$$

Przeprowadzone obserwacje eksploatacji pokładów podebranych pozwalają na stwierdzenie, że:

- wielkość wpływu oddziaływania gruzowiska zawałowego na pokład podebrany uzależniona jest od stosunku M/g ,
- silne wpływy występują przy braku skał zwięzłych w warstwach oddzielających pokłady,
- wpływy mniejsze pojawiają się w przypadku zalegania skał zwięzłych pomiędzy pokładami,
- czynnik czasu ma stosunkowo niewielki wpływ na wybieranie pokładu wyżej zalegającego,
- wielkość wpływu nie zależy od liczby wybranych niżej pokładów,

- w przypadku takiego samego stosunku M/g większe trudności powodować będzie wybranie pokładów w warstwach siodłowych niż rudzkich i pozostałych,
- wielkość wpływu nie zależy od systemu eksploatacji,
- dla określonego stosunku M/g wpływ grubości pokładu podbieranego na wielkość wpływu podebrania jest niewielki, jednak duża liczba rozwiązań sprawia, że wybór jednego z nich w celu zastosowania w określonym przypadku jest niezwykle trudny.

Na podstawie obserwacji prowadzonych w polskich kopalniach można stwierdzić, że wzory omawianej grupy dają w przeważającej większości przypadków wyniki przewyższone, badania dowodzą bowiem, że w przypadku gdy odległość pomiędzy pokładami podbierającym i podbieranym jest większa od 7-krotnej grubości pokładu podbierającego, to w pokładach podbieranych nie stwierdza się zazwyczaj wyraźnych wpływów podbierania, a w przypadku gdy odległość między pokładami podbierającym i podbieranym była mniejsza od 5-krotnej grubości eksploatowanego pokładu, to w pokładzie podbieranym obserwowano wpływy silne. Natomiast w przypadku gdy odległość między pokładami podbierającym i podbieranym znajdowała się w przedziale między 5-krotną, a 7-krotną grubością pokładu podbierającego, to w pokładach podbieranych obserwowano wpływy średnie lub brak wpływów, a w przypadku gdy odległość między pokładami podbierającym i podbieranym była większa od 7-krotnej grubości eksploatowanego pokładu, to w pokładzie podbieranym nie obserwowano szkodliwych wpływów.

3. Numeryczne modelowanie górotworu

Program komputerowy FLAC2D v. 4.00 jest programem różnic skończonych. Umożliwia budowę numerycznych modeli górotworu i symulację zachowania się ośrodków gruntowych i skalnych zarówno po osiągnięciu punktu plastyczności (plastyczne płynięcie), jak i granicy wytrzymałości (kruche pękanie). Dzięki swoim właściwościom FLAC2D umożliwia rozwiązywanie zagadnień inżynierii skalnej, analizy i projektowania wyrobisk oraz ich obudowy, budowli podziemnych i nadziemnych. FLAC2D jest oparty na schemacie obliczeniowym Lagrange'a. Oznacza to, że przyrostowe przemieszczenia dodawane są do współrzędnych i siatka porusza się oraz odkształca wraz z materiałem, w którym została założona. Dlatego jest szczególnie przydatny do rozwiązywania zadań inżynierii skalnej nierozzerwalnie związanych z dużymi deformacjami i zniszczeniem materiału skalnego.

Pozwala także na modelowanie nieciągłości w ośrodkach skalnych obudów osłonowych, podporowych i kotwowych.

Wśród modeli konstytutywnych, właściwych dla różnych odmian geomateriałów, w programie zawarte są: modele (sprężysty izotropowy, sprężysty transversalnie izotropowy, sprężysto-idealnie plastyczny (Coulomba), sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem, sprężysto-kruchy z osłabieniem, „podwójnie” plastyczny (plastyczność postaciowa i objętościowa), hiperboliczny Duncana i Changa), warunki stanu granicznego (Coulomba-Mohra i Hoeka i Browna), prawo płynięcia (stowarzyszone i niestowarzyszone), płaszczyzny osłabienia (model materiału Coulomba-Mohra, przejawiający wyrazistą anizotropię wytrzymałości), powierzchnie rozdziału (sztywność normalna, sztywność ścinania, warunek wytrzymałości granicznej na ścinanie Coulomba, wytrzymałość na rozciąganie), trzy modele pełzania (Maxwella, pełzanie zależne od temperatury i dwuczłonowe potęgowe prawo pełzania).

Program FLAC umożliwia badanie nie tylko zmian pola przemieszczeń i naprężeń mechanicznych, symulację różnych procesów fizykalnych zachodzących w ośrodkach skalnych i gruntowych, ale również badanie lepkiego przepływu płynów w odkształcalnych ośrodkach porowatych i procesu wymiany ciepła.

Obliczenia stanu naprężenia, przemieszczenia, przepływu płynów, wymiany ciepła itd., mogą odbywać się indywidualnie, oddzielnie i równocześnie, łącznie jako zadania sprzężone. Program może symulować także losowy rozkład wartości stałych materiałowych oraz uzależnienie tych stałych od stanu naprężenia lub odkształcenia.

W skład pakietu wchodzi także język programowania FISH (FLACish), umożliwiający samodzielne definiowanie nowych zmiennych i funkcji.

4. Model górotworu i zmiany w górotworze po wybraniu pokładu

W celu przeprowadzenia analizy wpływu podbierania pokładu, zbudowano uproszczony płaski, numeryczny, strukturalny i fizykalny model górotworu o długości 2000 m i miąższości 800 m.

Przyjmując założenie, że skały budujące poszczególne warstwy są w stanie przedkrytycznym materiałami sprężystymi izotropowymi, skorzystano z rozwiązania podanego przez Wardle'a i Gerrarda, a określając wartości stałych sprężystości zespołu kilku

cienkich warstw skalnych składających się na jedną warstwę modelowaną, traktowano jedną warstwę jako ekwiwalentny ośrodek monotropowy. Takie założenie pozwoliło na uproszczenie rozwiązania i zamodelowanie jedynie czterech warstw ekwiwalentnych oraz dwóch pokładów węgla.

Przeanalizowano trzy różne przypadki (minimalnej) odległości M pomiędzy pokładami podbierającym i podbieranym: $M = 5$ g, $M = 10$ g i $M = 15$ g (zob. tab. 1).

Tabela 1

Głębokości zalegania warstw dla trzech różnych wariantów modelu

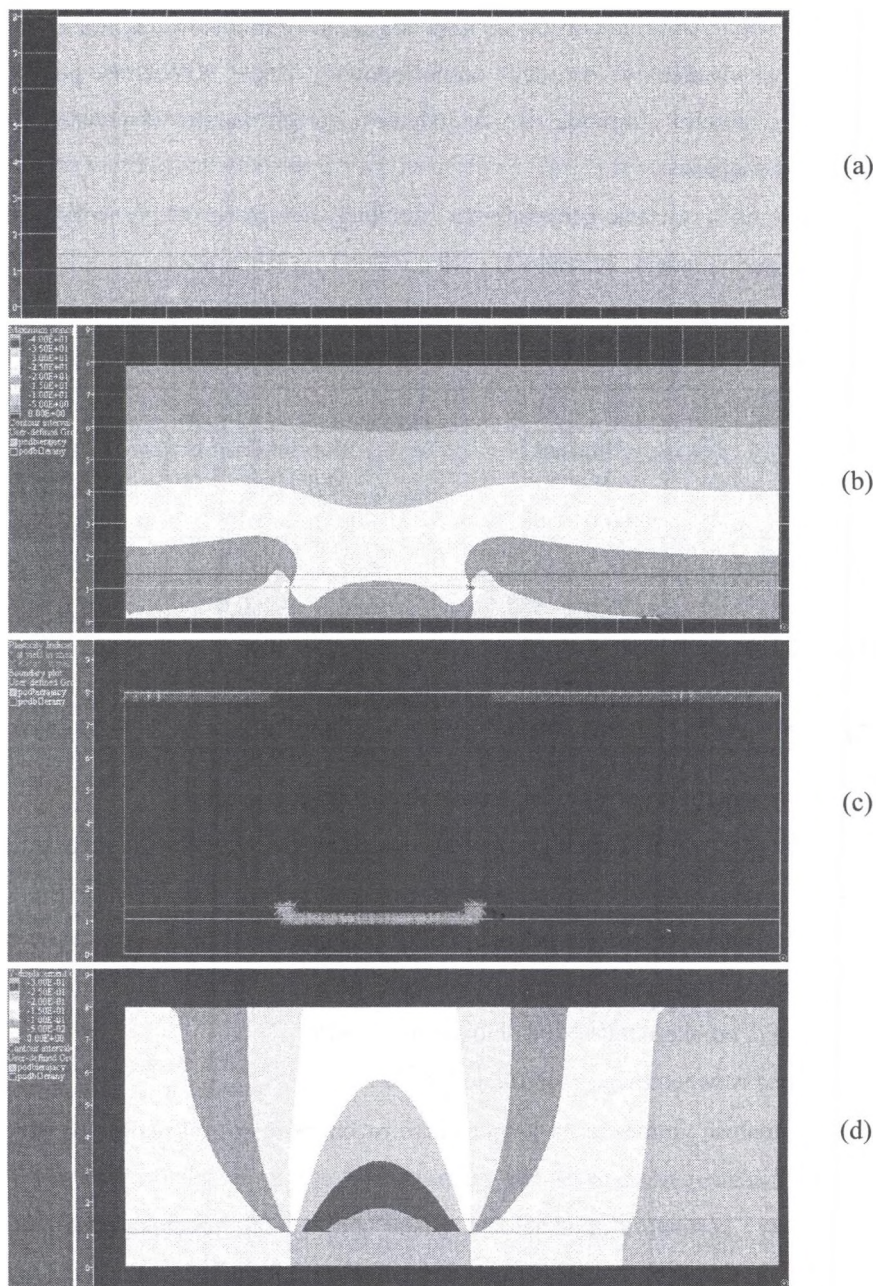
Warstwa	Głębokość zalegania, m		
	Wariant I $M = 5$ g	Wariant II $M = 10$ g	Wariant III $M = 15$ g
I	-800,0 ÷ -687,5	-800,0 ÷ -687,5	-800,0 ÷ -687,5
Pokład podbierający	-687,5 ÷ -685,0	-687,5 ÷ -685,0	-687,5 ÷ -685,0
II	-685,0 ÷ -687,5	-685,0 ÷ -660,0	-685,0 ÷ -647,5
Pokład podbierany	-687,5 ÷ -685,0	-660,0 ÷ -657,5	-647,5 ÷ -645,0
III	-685,0 ÷ -20,0	-657,5 ÷ -20,0	-645,0 ÷ -20,0
„Grunty”	-20,0 ÷ 0,0	-20,0 ÷ 0,0	-20,0 ÷ 0,0

Skałom przyporządkowano warunek Coulomba-Mohra z odcięciem.

Wartości stałych materiałowych górotworu, określone z uwzględnieniem efektu skali, są następujące:

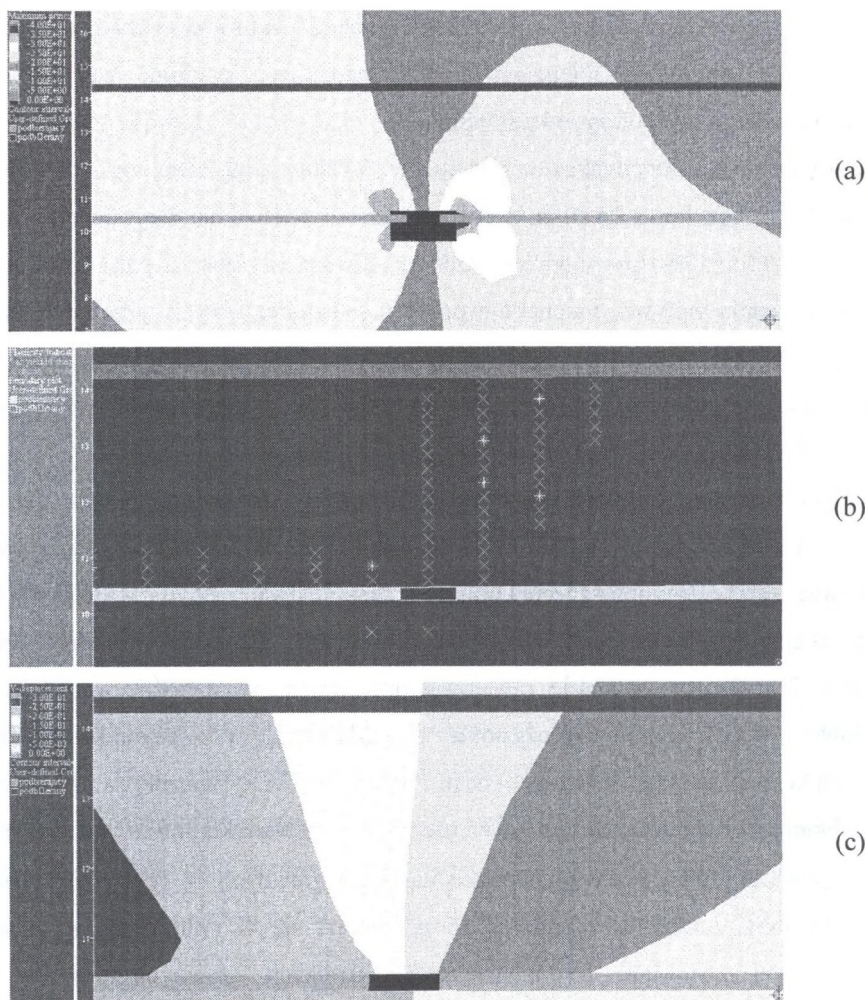
- współczynnik sprężystości postaciowej G : od około 40 MPa do około 5600 MPa,
- współczynnik sprężystości objętościowej K : od około 80 MPa do około 4200 MPa,
- kohezja c : od około 0,01 MPa do około 6,00 MPa,
- kąt tarcia wewnętrznego f : od około 20° do 60°,
- wytrzymałość graniczna na jednoosiowe rozciąganie σ_T : od około 1,0 MPa do 6,0 MPa.

Model tarczy górotworu podzielony został na 16000 prostokątnych elementów 200 (L) x 80 (H) o długości i wysokości równej od około 2,5 m do 15 m, tworzących siatkę różnic skończonych o 16281 węzłach (por. rys. 1a).



Rys. 1. Model górotworu z zaznaczonymi pokładami podbieranym i podbierającym – strefa zawалу (kolor seledynowy) (a), rozkład największych naprężeń głównych (b), strefy zniszczenia (c) i rozkład przemieszczeń pionowych (d) w górotworze po zakończeniu eksploatacji (liniami czerwonymi zaznaczono pokłady podbierany i podbierający; wariant III)

Fig. 1. Model of strata in the area of mining field (a), distribution of principal stress (b), failure zones (c) and distribution of vertical displacements (d) due to the extraction of the seam (underlying another seam; red line)



Rys. 2. Rozkład największych naprężeń głównych (a), strefy zniszczenia (b) i rozkład przemieszczeń pionowych (c) w sąsiedztwie pokładów podbieranego i podbierającego po zakończeniu eksploatacji (liniami czerwonymi zaznaczono pokłady podbierany i podbierający; wariant III)

Fig. 2. Local view of distribution of principal stress (a), failure zones (b) and distribution of vertical displacements (c) due to the extraction of the seam (underlying another seam; red line)

Węzły, które znajdują się na bocznych krawędziach tarczy, miały swobodę przemieszczania się w kierunku pionowym, jednak nie mogły się przemieszczać w kierunku poziomym. Węzły znajdujące się na dolnej poziomej krawędzi tarczy mogły przemieszczać się jedynie w kierunku poziomym. Węzły znajdujące się wewnątrz tarczy miały możliwość przemieszczania się zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym.

Naprężenie pionowe pierwotne w górotworze pochodzi od sił masowych – ciężaru skał zdeterminowanego gęstością objętościową skał, naprężenie poziome zaś jest funkcją naprężenia pionowego i współczynnika Poissona.

Obudowę ścianową zamodelowano za pomocą 16-członowego elementu strukturalnego o szerokości 10 m i wysokości 2,5 m, o współczynniku sztywności osiowej równym 35 MN/m i podporności 1,0 MN. Obudowa podpira strop na odcinku o długości 7,0 m.

W celu zbadania wpływu podbierania pokładu położonego wyżej przez pokład leżący niżej, zasymulowano wybieranie pokładu na odcinku 560 m. Eksploatację rozpoczęto w punkcie odległym o 500 m od lewej krawędzi tarczy górotworu, a zakończono w punkcie odległym o 940 m od prawej krawędzi tarczy górotworu.

Pokład podbierający eksploatowany był z zawałem warstw stropowych, dlatego też konieczne było uwzględnienie efektu konsolidowania się strefy zawału wraz z postępem frontu eksploatacji. W celu uproszczenia obliczeń, zamodelowano jedynie dwie strefy zawału. Pierwszą, obejmującą wyeksploatowany pokład, i drugą, leżącą bezpośrednio nad nim, o miąższości 2 g. Skałom w strefie zawałowej przyporządkowano różne wartości gęstości objętościowej, współczynnika sprężystości objętościowej, współczynnika sprężystości postaciowej, kohezji, kąta tarcia wewnętrznego i wytrzymałości granicznej na rozciąganie.

Po wybraniu pokładu leżącego na głębokości 700 m na odcinku 560 m w całym obszarze górotworu powstała strefa silnie obniżonych naprężeń głównych σ_1 (rys. 1b).¹ Generalnie pokład podbierany, leżący w odległości 15 g, znalazł się w polu naprężeń o wartości nieprzekraczającej 15 MPa. Strefa większych naprężeń głównych uformowała się w środkowej części nad wybranym pokładem. Naprężenia w tej strefie sięgały 20 MPa i objęły swoim zasięgiem strefę zawału do wysokości około 22 m od spagu pokładu podbierającego. Objęłyby zatem pokład podbierany, leżący w odległości 5g (wariant I).

Lokalnie strefy koncentracji naprężeń głównych σ_1 pojawiły się jedynie w sąsiedztwie rejonów otwarcia i zakończenia eksploatacji. Ich wartość sięgała 35 MPa (rys. 2a).

Wybranie pokładu spowodowało spękanie obszaru górotworu obejmującego strefę zawału nad wybranym pokładem (rys. 1c i 2b). Strefy zniszczenia pojawiły się w rejonach otwarcia i zakończenia eksploatacji. Strefy te objęły swoim zasięgiem pokład podbierany, położony w odległości 15 g, i sięgały około 65 m powyżej spagu pokładu podbierającego. Strefy

¹ Ze względów edytorskich w artykule omówione zostały jedynie wyniki symulacji prowadzonej dla przypadku, w którym odległość pomiędzy pokładami podbierającym i podbieranym jest równa 15 g.

zniszczenia pojawiły się również w spągu pokładu podbierającego. W przypadku pokładu podbieranego, leżącego w odległości 5 g, strefy spekań wywołane eksploatacją pokładu położonego niżej mogłyby sięgać spągu pokładu podbieranego.

Nad wybraną częścią pokładu podbierającego wystąpiły wyraźne przemieszczenia pionowe. Ich wartość na powierzchni sięgała 0,2 m. Tak niewielkie wartości osiadań spowodowane były zatrzymaniem cyklu obliczeń zaraz po zakończeniu eksploatacji. Maksymalne obniżenia wystąpiły, jak należało się spodziewać, bezpośrednio w i nad strefą zawału.

5. Podsumowanie i wnioski

Proces deformowania się górotworu w bezpośrednim sąsiedztwie eksploatacji jest niezwykle złożony. Proponowane i stosowane przez badaczy rozwiązania oparte są na obserwacjach i pomiarach prowadzonych w kopalniach węgla kamiennego. Najczęściej związane są z wielkościami geometrycznymi, tzn. grubością pokładu podbierającego, głębokością zalegania pokładów oraz odległością między pokładami podbierającym i podbieranym i/lub z własnościami wytrzymałościowymi skał zalegających między pokładami. Przeprowadzone przez polskich badaczy analizy dowiodły, że generalnie w przypadku gdy odległość pomiędzy pokładami podbierającym i podbieranym jest większa od 7-krotnej grubości pokładu podbierającego, to w pokładach podbieranych nie stwierdza się zazwyczaj wyraźnych wpływów podbierania.

Podobne wnioski nasuwają się po przeprowadzeniu, za pomocą programu metody różnic skończonych FLAC2D v. 4.00, na uproszczonym modelu numerycznym komputerowej symulacji eksploatacji pokładu węgla. Po jej przeprowadzeniu uzyskano poprawny jakościowy obraz zachowania się górotworu w rejonie sąsiadujących pokładów podbieranego i podbierającego. Generalnie można stwierdzić, że w przypadku gdy odległość pomiędzy obydwooma pokładami jest większa od 8 g, to w pokładzie leżącym wyżej nie powinny pojawić się wpływy podbierania. Równocześnie jednak strefy zniszczenia (uplastycznienia) o dużym zasięgu, przekraczającym wysokość 15 g, pojawiają się w rejonie otwarcia i zakończenia eksploatacji. Strefy o większym zasięgu będą się prawdopodobnie również pojawiały w przypadku eksploatacji prowadzonej niejednostajnie, z różnymi prędkościami i przestojami.

Przeprowadzone symulacje pozwalają jedynie na jakościową analizę zachowania się górotworu. W celu przeprowadzenia analizy ilościowej dla konkretnych warunków górniczo-geologicznych konieczne byłoby porównanie i zweryfikowanie ich z wynikami pomiarów *in situ*.

BIBLIOGRAFIA

1. Chudek M., Pach A. i Ołaszowski W.: Wpływ ściśliwości zawału na warunki eksploatacji w pokładach podebranych. Przegląd Górniczy, nr 12, 1969.
2. FLAC User's Manual. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis 1992 – 2005.
3. Kwaśniewski M. i Wang J.-A.: Symulacja komputerowa eksploatacji pokładu węgla systemem ścianowym z zawałem stropu. Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 221, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994.
4. Staroń T.: Studium nad zagadnieniem podbierania pokładów z zawałem stropu w świetle badań podziemnych i rozważań teoretycznych. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 646, Katowice 1975.
5. Tomiczek K.: Modelowanie numeryczne i badanie wpływu prędkości eksploatacji na deformacje górotworu i powierzchni terenu. Praca magisterska, Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław CHUDEK

Abstract

The simple computer analysis of the effect of mining with caving a seam underlying another seam has been conducted on the basis of two-dimensional FLAC v. 4.00 model. This analysis provides a basis for discussion about the establishing the minimum distance between mined and undermined seam. The results of numerical simulation were compared with experimental studies of Polish researches.