Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA ZAGROŻENIA SEJSMICZNEGO W OPARCIU O WSKAZANIA ANALITYCZNEJ PROGNOZY ZMIAN ENERGETYCZNYCH W GÓROTWORZE

Streszczenie. Pokazano możliwość wykorzystania wyników obliczeń metodą analityczną do szacowania zmian poziomu zagrożenia sejsmicznego na wybiegach projektowanych wyrobisk wybierkowych. Omówiono zaproponowany przez autorów wskaźnik charakteryzujący zmiany energii sprężystej we wstrząsogennych warstwach skalnych zachodzące wskutek oddziaływania dokonanej i prowadzonej eksploatacji górniczej. Na konkretnym przykładzie stwierdzono dużą zgodność rozkładu proponowanego wskaźnika z rzeczywistym rozkładem zarejestrowanej sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi.

ASSESSMENT OF SEISMIC HAZARD BASING ON RESULTS OF ANALYTICAL PREDICTIONS OF ENERGY CHANGES IN ROCKMASS

Summary. Possibility of use the results of analytical predictions to assessment of seismic hazard changes in the heading gangway of planned longwalls was presented. Suggested index characterizing changes of elastic energy of strong rockmass layers effected by the completed mining and the ongoing one has been discussed. Making use of a real example of mining works good agreement of predicted values of the suggested index with the observed seismicity induced by the ongoing mining has been presented.

1. Wprowadzenie

Wieloletnie doświadczenia uzyskane w trakcie stosowania analitycznych metod prognozowania rozkładów przestrzennego stanu naprężeń w górotworze pokazują, że stanowią one wartościowe narzędzie, pozwalające optymalizować projekt robót górniczych w aspekcie minimalizacji poziomu zagrożenia sejsmicznego (tąpaniami). W oparciu o wyniki obliczeń możliwe jest również projektowanie środków profilaktyki tąpaniowej, adekwatnych do prognozowanego poziomu zagrożenia. Analityczne symulacje zmian rozkładów przestrzennego stanu naprężeń w górotworze naruszonym wielopokładową eksploatacją górniczą autorzy przeprowadzaja zgodnie z najczęściej i od dawna [4] stosowanym podejściem prognostycznym. To typowo porównawcze podejście, choć oparte na stosunkowo prostych – silnie idealizujących górotwór rozwiązaniach, zapewnia wysoką efektywność numeryczną, a przede wszystkim porównywalność wskazań prognozy bieżącej z wynikami wcześniejszych obliczeń i obserwacji dołowych. Przy niezmiennym sposobie obliczeń (modelu górotworu) możliwe staje się wyznaczanie kryterialnych wartości obliczanych wielkości (wskaźników), a tym samym przekładanie wyników prognozy na stan potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk prowadzonych w złożonych i zmiennych warunkach górniczo-geologicznych. Algorytmy wykorzystywane do obliczeń rozkładów naprężeń bazują na znanym rozwiązaniu przemieszczeniowego zadania brzegowego przestrzennej teorii sprężystości podanym dla elementarnego wybrania przez H. Gila [6] oraz F. Dymka [5]. Przy przyjętych uproszczeniach oszacowania wymagają wartości tylko kilku stałych materiałowych. Wartości tych stałych, silnie zmienne w obszarze górotworu, są (z uwagi na zakres niezbędnych badań oraz dostępność do złoża) słabo rozeznane. Podkreślić należy, że do obliczeń prognostycznych nie wprowadza się rzeczywistych czy też uśrednionych (na podstawie danych z profilu lub badań geofizycznych) wartości takich stałych, jak G czy v, lecz tak zwane ich zastępcze wartości. Wartość zastępcza to taka, przy której wyniki prognozy porównawczej (testu) wykonanej dla przeprowadzonych już robót górniczych odpowiadają, mimo przyjętych założeń upraszczających, wynikom pomiarów (obserwacji). Obliczając, na przykład obciążenie przyociosowego pasa calizny i stosując konkretne kryterium wytrzymałościowe (wytężeniowe), można określić, przy jakich wartościach parametrów między obserwowanymi a prognozowanymi zasięgami stref zniszczenia calizny zachodzi dostateczna zgodność. Przy odpowiednim oszacowaniu parametrów metody wyniki prognozy są na ogół dostatecznie zgodne z później obserwowanymi przejawami ciśnienia górotworu oraz zagrożenia tąpaniami [1, 3].

2. Szacowanie zmian energetycznych we wstrząsogennych warstwach skalnych wywoływanych prowadzonymi robotami górniczymi

Zastosowanie rozwiązań przestrzennej teorii sprężystości [5, 6] pozwala efektywnie obliczać zmiany właściwej energii sprężystej Φ w rozległych obszarach górotworu obejmowanych wpływami wielopokładowej eksploatacji górniczej. Zmiany te są pochodną zmian w stanie naprężeń i odkształceń. Do wyznaczania energii sprężystości można wprost zastosować znany wzór Clapeyrona określający potencjał sprężystości w najogólniejszym przypadku stanu naprężenia i odkształcenia

$$\Phi = 0.5T_{\sigma} \cdot T_{\varepsilon} \tag{1}$$

gdzie:

Φ – energia właściwa odkształcenia sprężystego; [J/m³],

 T_{σ} – tensor stanu naprężenia,

 T_{ε} – tensor stanu odkształcenia.

Po rozpisaniu

$$\Phi = \frac{1}{2} \left(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx} \right)$$
(2)

Ilościowy analityczny opis zmian energetycznych dotyczy jedynie energii sprężystej akumulowanej w górotworze w następstwie naruszania go dowolnie wykształtowaną eksploatacją, nic nie mówi o jej dyssypacji i przemianach, a w konsekwencji nie określa ilości energii wyzwalanej w procesie niszczenia określonej objętości skał. W procesie niszczenia ośrodka skalnego ta potencjalna energia sprężysta przechodzi między innymi w kinetyczną energię fal sprężystych utożsamianą z energią sejsmiczną rejestrowanych wstrząsów. Tak więc, chociaż rozpatrujemy jedynie zależne od parametrów eksploatacji zmiany energii potencjalnej (energii odkształcenia sprężystego), to przekładają się one – choć w nieznanym nam ilościowym stopniu – na poziom zagrożenia sejsmicznego (tąpaniami).

Wyniki licznych testów [7, 8] pokazują dużą zmienność chwilowych wartości energii potencjalnej w czasokresie, gdy górotwór w sąsiedztwie rozpatrywanego punktu obejmowany jest wpływami postępującego frontu eksploatacyjnego (rys. 1). Stwierdzić można także zmienność chwilowych wartości energii w zależności od położenia zaszłości eksploatacyjnych.

Na rys. I zaprezentowano wyniki obliczeń zmian energetycznych w otoczeniu punktu P₀ położonego nad środkiem pola ścianowego poza zasięgiem wpływów zaszłości eksploatacyjnych. Poszczególne krzywe przedstawiają:

 $\Delta \Phi_i$ – przyrosty (spadki) właściwej energii sprężystej w jednostkowych przedziałach czasu Δt (krokach postępu frontu),

 Φ_i – chwilowe wartości energii dla kolejnych kroków postępu frontu, równe energii początkowej Φ_0 powiększonej (pomniejszonej) o pewną wartość w zależności od położenia punktu i parametrów ściany, $\Phi_{M \Delta T}$ – maksymalną wartość energii w rozpatrywanym przedziale czasu ΔT =n Δt , dla zakresu eksploatacji przeprowadzanej w przedziale czasu ΔT ,

 $\Delta \Phi_{M \Delta T}$ – maksymalny przyrost energii w przedziale czasu ΔT ,

 $\Sigma \Delta \Phi_i^+$ – sumę chwilowych przyrostów energii w przedziale czasu ΔT ,

 $\Sigma \Delta \Phi_i$ – sumę chwilowych spadków energii w przedziale czasu ΔT ,

 $\Phi_{K} = \Phi_{0} + \Phi_{Z}$ – wartość końcową energii sprężystej po przeprowadzeniu rozpatrywanego zakresu eksploatacji,

 $\Delta \Phi_0$ – energię początkową – w górotworze nienaruszonym = const, zależna od H,

 $\Delta \Phi_Z$ – energię generowaną wpływami zaszłości = const. w danym punkcie, jeśli pominąć relaksację.

 $P_{o}(x,y,z)$



Rys. 1. Zmiany właściwej energii sprężystej – punkt P0, położony w osi symetrii wyrobiska ścianowego – poza wpływami dokonanej eksploatacji górniczej

Fig. 1. Changes of specific elastic energy – point P0, placed on the line of symmetry of the longwall – beyond the influence of past mining works

Przy obliczaniu zmian energii (w tym przypadku potencjalnej), biorąc pod uwagę jej silną zmianność, wymogiem jest, oprócz korzystania z rozwiązań przestrzennych, analizowanie tych zmian w krótkich interwałach czasu. Zbyt duże kroki obliczeń symulujące czasoprzestrzenny przebieg eksploatacji, powodują pomijanie wartości ekstremalnych, zarówno po stronie wzrostów, jak i spadków energii. Poglądowo zilustrować to można, (rys. 2), pokazując zmiany energetyczne zachodzące w jednostce objętości górotworu – punktach obliczeniowych P_1 i P_2 – położonych na poziomie wstrząsogennej warstwy skalnej podbieranej eksploatacją przeprowadzaną w polu konkretnej [9] ściany – rys. 4. Pokazane na rys. 2 zmiany energetyczne obliczono, przyjmując dwa różne jednostkowe kroki postępu frontu ścianowego dt, wynoszące odpowiednio 7 i 30 dni. Jak widać, przyjęcie kroku dt=30 dni powoduje zaniżenie obliczanej, maksymalnej wartości energii.



Rys. 2. Zmiany energii właściwej w wybranych dwóch punktach obejmowanych wpływami eksploatacji górniczej obliczone przy przyjęciu różnych jednostkowych kroków postępu frontu

Fig. 2. Changes of specific elastic energy at two points over the longwall field when it is passing over the edges calculated for different unit steps of longwall front advance

W trakcie prowadzenia robót górniczych w górotworze naruszonym wieloletnią, wielopokładową eksploatacją górniczą obliczane zmiany energetyczne mogą mieć zdecydowanie bardziej skomplikowany przebieg. Na rys. 3 zaprezentowano poglądowo zmiany energetyczne w dwóch przykładowych punktach P₁ i P₂ w kolejnych czasokresach ΔT_1 , ΔT_2 (odcinkach) biegu ściany prowadzonej w zasięgu wpływów zaszłości eksploatacyjnych oraz wpływów dokonanej i aktualnie prowadzonej eksploatacji.



Rys. 3. Zmiany energetyczne zachodzące w punktach P_1 i P_2 w kolejnych czasookresach ΔT_1 , ΔT_2 Fig. 3. Changes of energy at the points P_1 and P_2 in the time intervals ΔT_1 , ΔT_2

Na rys. 3 oznaczono dodatkowo za pomocą indeksów numer punktu i czasookresu obliczeniowego, ponadto przyjęto następujące oznaczenia:

 $\Phi_{poc\Delta o;P_j}$ – wartość początkowa energii sprężystej w punkcie P_j przed przeprowadzeniem rozpatrywanego zakresu eksploatacji w czasookresie ΔT_i – poza wpływami eksploatacji $\Phi_p = \Phi_0$, natomiast w zasięgu wpływów zaszłości $\Phi_p \neq \Phi_0$.

W oparciu o wyniki testów numerycznych autorzy zaproponowali [8] szacowanie poziomu zagrożenia sejsmicznego za pomocą wskaźnika określającego zmiany w charakterze rozkładu właściwej energii sprężystej, zależnego nie tylko od jej wielkości przed czy po przeprowadzeniu określonej eksploatacji, lecz uwzględniającego także jej wartość maksymalną oraz maksymalny jej przyrost w danym czasookresie. Wskaźnik ten może być informatywnym parametrem przy ocenie potencjalnego zagrożenia tapaniami stropowymi.

Wskaźnik φ, charakteryzujący zmiany energetyczne zachodzące w naruszanych eksploatacją górniczą warstwach wstrząsogennych, zdefiniowano w następujący sposób

$$\varphi = \frac{\Phi_{M\Delta\Delta} \times \Delta \Phi_{M\Delta\Delta}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_{M\Delta\Delta} \times (\Phi_{M\Delta\Delta} - \Phi_{\text{poc}})}{\Phi_0}$$
(3)

gdzie:

 $\Phi_{\max\Delta T}$ – maksymalna wartość energii w danym punkcie w rozpatrywanym przedziale czasu ΔT .

 $\Delta \Phi_{max\Delta T}$ – maksymalny przyrost energii w danym punkcie w przedziale czasu ΔT ,

 Φ_{poc} – początkowa wartość energii w danym punkcie (stan na początku rozpatrywanego przedziału czasu ΔT),

 Φ_0 – wartość energii w danym punkcie, wynikająca z głębokości zalegania.

3. Ocena zagrożenia sejsmicznego w oparciu o analitycznie obliczane zmiany energetyczne

Wyniki przykładowych obliczeń analitycznych pokazano dla rejonu pola ściany 001 prowadzonej w latach 2004-2005 w pokładzie 504 w partii centralnej KWK Bielszowice. Ściana ta była prowadzona bezpośrednio pod zwięzłymi, wstrząsogennymi warstwami piaskowca. Robotom górniczym w jej polu towarzyszyło wysokie zagrożenie wstrząsami i tąpaniami.

Pokład 504 jest silnie zagrożony metanem, wykazuje dużą skłonność do pożarów endogenicznych, przy czym dominujące jest zagrożenie sejsmiczne i wynikające z niego zagrożenie tąpaniami – głównie typu stropowego. Jest on pokładem grubym, o zmiennej (3+6 m) miąższości, nieregularnie wykształtowanym i zalegającym na dużej (800+1000 m) głębokości. Eksploatacja prowadzona była na wysokość około 3,0 m w jego warstwie przystropowej. Na odcinkach początkowym i końcowym wybiegu ściany (rys. 4) występują krawędzie i resztki wytworzone w pokładach 506 i 507 zalegających w odległościach odpowiednio 35 i 55 metrów, istotnie wpływające na prognozowany i obserwowany poziom zagrożenia tąpaniami. Uwarunkowania geologiczno-górnicze sprawiają, że dominujące jest zagrożenie sejsmiczne wstrząsami generowanymi w budującym strop zasadniczy około 60 m kompleksie wytrzymałych warstw piaskowca i wynikające z niego zagrożenie tąpaniami typu stropowego-udarowego. Wstrząsy generowane eksploatacją prowadzoną w polu ściany 001 osiągały energie nieprzekraczające rzędu 10⁶J. Na blisko 4250 zarejestrowanych wstrząsów wystąpiły 304 wstrząsy o energii rzędu 10⁴J, 23 wstrząsy wysokoenergetyczne, w tym jeden o energii 10⁶J; ich ogniska pokazano na rys. 4.





Fig. 4. Mining in seam 504 with marked tremor focii and mining edges in the other seams

Wyniki obliczeń analitycznych [2, 9] pokazały, że rozkład zaproponowanego wskaźnika φ (3), charakteryzującego zmiany energetyczne w podbieranym piaskowcu, może informować o zmianach sejsmiczności indukowanej w trakcie biegu ściany. W obszarze obejmowanym wpływami frontu ściany 001 wskaźnik ten zmienia wartości głównie na kierunku prostopadłym do frontu ścianowego, stąd jego rozkład zaprognozowano wzdłuż pochylni przyścianowej zachodniej – rys. 5. Zmiany wartości wskaźnika φ na całym wybiegu ściany 001 są jakościowo zgodne z rozkładem wskaźnika intensywności sejsmicznej E/W. Prognoza (wskaźnik φ) oraz obserwacja (wskaźnik E/W) pokazują, że do wzrostów aktywności sejsmicznej dochodzi przy przechodzeniu ścianą nad krawędziami pokładów 506 i 507, a szczególnie nad resztkami w tych pokładach.



Rys. 5. Rozkład wskaźnika intensywności sejsmicznej E/W i wskaźnika energetycznego ϕ Fig. 5. Changes of seismic energy release rate E/W and the suggested energy index ϕ

4. Podsumowanie

Aktualny stan oprogramowania, a także możliwości obliczeniowe komputerów pozwalają na efektywne wykonywanie prognoz zmian potencjalnej energii sprężystej w deformowanych warstwach skalnych przy praktycznie dowolnym wykształtowaniu dokonanej, aktualnie prowadzonej i projektowanej eksploatacji górniczej.

Analiza wyników przeprowadzonych testów numerycznych pozwala stwierdzić, że analitycznie obliczane zmiany chwilowych wartości energii sprężystej (wskaźnik energetyczny φ) są silnie zależne od zmian sytuacji górniczej, w jakiej prowadzone są roboty górnicze. Obliczanie w małych krokach czasowych zmian energetycznych zachodzących w dużych obszarach górotworu naruszonego wielopokładową eksploatacją wymaga stosowania metod charakteryzujących się wysoką efektywnością numeryczną. W tym celu autorzy stosują podejście prognostyczne wymagające silnej idealizacji ośrodka skalnego (CHILE – ośrodek ciągły, jednorodny, izotropowy i liniowo sprężysty). Rezygnacja z przyjmowanych uproszczeń (np. próba opisu dla ośrodka nieciągłego, niejednorodnego – DIANE) wymagałaby budowy dużych, złożonych modeli numerycznych i znajomości własności skał budujących górotwór, również w często niedostępnych badawczo obszarach usytuowanych w znacznych odległościach od prowadzonych robót górniczych.

BIBLIOGRAFIA

- 1. Bańka P., Jaworski A.: Wskazania analitycznych metod prognostycznych a ocena potencjalnego stanu zagrożenia tąpaniami. ZN Pol.Śl., seria Górnictwo, z.261, Gliwice 2004.
- Bańka P., Jaworski A.: Analitycznie symulowane zmiany stanów naprężeniowoenergetycznych górotworu w kontekście potencjalnego zagrożenia tąpaniami robót górniczych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 9(440), Katowice 2007.
- Białek J., Bańka P., Jaworski A.: Wykorzystanie analitycznych prognoz naprężeniowodeformacyjnych warunków wybierania do projektowania eksploatacji w rejonach zagrożonych tapaniami. Prace GIG seria Konferencje nr 26, Katowice 1998, s. 15-24.
- Drzęźla B., Białek J., Jaworski A.: Metoda prognozowania rozkładów naprężeń w strefach oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych. Publ.Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. M-10 (213), 1988.
- Dymek F.: Przemieszczeniowe zadanie brzegowe przestrzennej teorii sprężystości i jego zastosowanie do zagadnień mechaniki górotworu. Archiwum Górnictwa, T. XIV, z.3, Warszawa 1969.
- 6. Gil H.: The Theory of Strata Mechanics. PWN, Warszawa 1991.
- 7. Jaworski A.: Description of induced seismicity level basing on analitycally calculated changes of elastic energy in rock layers subjected to deformation. Acta Geodyn. Geomater. Vol.1, No.1(133), Praga 2004.
- 8. Jaworski A., Bańka P.: Zmiany energii sprężystej w górotworze na wybiegach prowadzonych wyrobisk a poziom sejsmiczności indukowanej. Międzynarodowe sympozjum naukowo-techniczne Tąpania 2002. Stan badań i profilaktyki. GIG, Katowice 2002.
- Jaworski A., Bańka P.: Wskazania analitycznych prognoz stanów naprężeniowodeformacyjnych i energetycznych górotworu naruszonego wielopokładową eksploatacją górniczą. Prace Naukowe GIG Nr IV/2007. Górnicze Zagrożenia Naturalne 2007. GIG, Katowice 2007.