ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: GÓRNICTWO z. 261 Nr kol. 1650

Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

WSKAZANIA ANALITYCZNYCH METOD PROGNOSTYCZNYCH A OCENA POTENCJALNEGO STANU ZAGROŻENIA TĄPANIAMI

Streszczenie. W artykule omówiono wskaźniki stanów deformacyjno-naprężeniowych i energetycznych górotworu wykorzystywane do oceny stanu potencjalnego zagrożenia tąpaniami. Na przykładzie wyników obliczeń dla przykładowego projektu eksploatacji przedstawiono problemy wykorzystania wybranych wskaźników do oznaczania stanów potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk.

THE RESULTS OF ANALYTICAL PREDICTIONS AND DETERMINATION OF POTENTIAL LEVEL OF ROCKBURST HAZARD

Summary. The paper presents the indicators of the strain, stress and energy state of rockmass used for the determination of potential level of rockburst hazard. Making use of the results of prediction for an example of mining project the article presented difficulties with apply the indicators to determine the state of potential rockburst hazard.

1. Wprowadzenie

W polskich kopalniach węgla kamiennego w pierwszym przybliżeniu stan zagrożenia tąpaniami robót górniczych określa się zgodnie z przepisami tak zwaną metodą rozeznania warunków górniczo-geologicznych [6]. Poszczególnym czynnikom charakteryzującym te warunki, w zależności od ich istotności w danym rejonie, przypisuje się określone wagi.

W metodzie tej duży wpływ na ocenę końcową mają czynniki górnicze, charakteryzujące stan wybrania złoża i układ zaszłości eksploatacyjnych, które decydują o obserwowanym poziomie zagrożenia wstrząsami i tąpaniami. Czynniki te decydują bowiem o stanie naprężeniowo-deformacyjnym górotworu, w tym o występowaniu w sąsiedztwie wyrobisk potencjalnie niebezpiecznych obszarów koncentracji naprężeń i energii sprężystej.

Metody analityczne umożliwiają (z dokładnością wynikającą z przyjętego modelu) ilościowy opis zmian deformacji i naprężeń wywoływanych działalnością górniczą oraz szacowanie stanów energetycznych naruszanych warstw skalnych. Wykorzystanie wyników prognoz analitycznych do oceny potencjalnego zagrożenia tąpaniami metodą rozeznania warunków geologiczno-górniczych wymaga określenia wartości kryterialnych rozpatrywanych wskaźników. Z uwagi na znaczne zróżnicowanie warunków prowadzenia robót górniczych problem zarówno wyboru wskaźników, jak i ich wartości kryterialnych można uznać za nadal otwarty.

2. Wskaźniki wykorzystywane w analitycznej metodzie oceny potencjalnego stanu zagrożenia tąpaniami

W trakcie stosowania metod analitycznych do oceny potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk wykorzystywanych jest szereg wskaźników charakteryzujących stan naprężeń, deformacji i energii w pokładzie i skałach otaczających. Najczęściej stan zagrożenia wyrobiska związany jest z wielkością składowej pionowej naprężenia (σ_z). Wykorzystywany jest także wskaźnik wytężenia skał (W) rozumiany jako stosunek zaistniałego naprężenia zastępczego do wytrzymałości skały. Dla $W \geq 1$ można mówić o zniszczeniu struktury skał. Dodatkowo często stosowane są parametry energetyczne - współczynnik koncentracji energii odkształcenia sprężystego (β) w danym punkcie górotworu i wskaźnik energetyczny tąpnięcia (T_e); [7].

Przedstawione wskaźniki wyznaczane są różną metodyką, opracowaną i rozwijaną w Politechnice Śląskiej, AGH w Krakowie i GIG w Katowicach [3,4]. Stosowane są algorytmy prognostyczne bazujące na rozwiązaniach mechaniki ośrodków ciągłych oraz metoda elementów skończonych.

Proponowane [7] wartości kryterialne powyższych wskaźników oceny podaje tabl. 1.

Jak wspomniano, podstawowe parametry oceny to wartość składowej pionowej przestrzennego stanu naprężenia (σ_z) i stopień wytężenia (W), przy czym wartości kryterialne (tabl. 1) odnoszą się do pokładu, gdzie usytuowane są rozpatrywane roboty górnicze. Przyjęte wartości kryterialne składowej pionowej naprężenia w sposób zgeneralizowany różnicują pole naprężeń, co pozwala na wybiegach wyrobisk wydzielać charakterystyczne pod względem wielkości naprężeń i wskaźnika wytężenia strefy i różnicować stan zagrożenia tąpaniami - głównie typu pokładowego.

Tablica 1

Sposób określania stanu zagrożenia tąpaniami wyrobiska na podstawie wyników prognoz analitycznych

Stan Zagrożenia	**Podstawowe parametry oceny**		**Dodatkowe parametry oceny**	
	Wartość składowej pionowej naprężenia σ_z	Wytężenie, stan struktury ośrodka sk.	Współczynnik β	Wskaźnik T_e
a - brak	$\lvert\sigma_z\rvert < \gamma H$ Naprężenia pionowe są mniejsze od naprężenia pierwotnego $-\gamma H$, wynikającego z głębokości eksploatacji H.	Stan wytężenia nie ma znaczenia.	$\beta < 3{,}0$	$T_e < 0{,}5$
b - słaby	$\lvert\sigma_z\rvert \geq \gamma H$ Naprężenia pionowe są zbliżone (nieznacznie większe) do naprężenia pierwotnego $-\gamma H$, wynikającego z głębokości eksploatacji H.	$W \geq 1$ Struktura pokładu węgla naruszona (osłabienie calizny).	$3{,}0 \leq \beta \leq 5{,}0$	$0{,}5 \leq T_e \leq 1{,}0$
c - średni	$\lvert\sigma_z\rvert > \gamma H$ Podwyższone naprężenia pionowe przekraczają o co najmniej kilka MPa wartość naprężenia pierwotnego $-\gamma H$ wynikającego z głębokości eksploatacji H.	$W < 1$ Struktura pokładu węgla nienaruszona.	$5{,}0 < \beta \leq 7{,}0$	$1{,}0 < T_e \leq 2{,}0$
d - duży	$\lvert\sigma_z\rvert >> \gamma H$ Koncentracja naprężeń pionowych, występowanie naprężeń krytycznych, często o wartości powyżej - 30 MPa.	$W < 1$ Struktura pokładu węgla nienaruszona.	$\beta > 7{,}0$	$T_e > 2{,}0$

Zróżnicowanie warunków wybierania, a zwłaszcza własności wytrzymałościowych skał sprawia, że wyznaczane przy tak zgeneralizowanych kryteriach strefy nie zawsze odpowiadają wymiarowanym w specjalistycznych ekspertyzach. W takich dokładniejszych prognozach wartości kryterialne parametrów oceny są dostosowywane do lokalnych warunków i weryfikowane poprzez porównanie wyników prognozy z obserwacjami przejawów ciśnienia górotworu.

Wieloletnie doświadczenia wskazują, że przynajmniej w pierwszym przybliżeniu stan potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobiska można wprost wiązać z jego usytuowaniem w

stosunku do wymiarowanych analitycznie (po przyjęciu odpowiednich wartości kryterialnych - tablica 1) charakterystycznych stref [2]:

- Stref częściowo odprężonych - w których w następstwie oddziaływania zrobów eksploatacji dokonanej naprężenia pionowe są według prognozy mniejsze lub zbliżone do naprężeń pierwotnych, wynikających z głębokości zalegania. Wyrobiska w tych strefach można traktować jako potencjalnie słabo zagrożone tąpaniami.
- Stref wytężonych - w których w następstwie oddziaływania eksploatacji na skutek przekroczenia wytrzymałości skał na ściskanie i pod wpływem naprężeń rozciągających najprawdopodobniej doszło do takiego osłabienia calizny pokładu i rozproszenia zakumulowanej energii sprężystej, że nie powinna ona stanowić niebezpiecznego koncentratora naprężeń i energii. Wyrobiska w tych strefach można uznać za potencjalnie słabiej zagrożone tąpaniami. W strefach tych można się natomiast liczyć z trudnościami w prowadzeniu i utrzymywaniu wyrobisk, zwłaszcza chodnikowych.
- Stref podwyższonych naprężeń ściskających - w których prognozowane naprężenia ściskające przekraczają wartość naprężenia pionowego, wynikającą z głębokości zalegania. Wyrobiska w tych strefach należy uznać za potencjalnie zagrożone tąpaniami.
- Stref koncentracji naprężeń ściskających - w których prognozowane naprężenia ściskające mogą osiągnąć wartości krytyczne (najczęściej około 30MPa) z uwagi na stateczność ociosów węglowych. W strefach tych może dochodzić do akumulowania znaczących ilości energii sprężystej. Wyrobiska w tych strefach należy traktować jako potencjalnie silnie zagrożone tąpaniami. Tąpnięcia w tych strefach, zwłaszcza w chodnikach przed frontem ściany, mogą powodować nawet średnioenergetyczne wstrząsy o ogniskach dostatecznie bliskich ociosów wyrobiska.

Parametry energetyczne ujęte w tabl. 1 to:

-współczynnik koncentracji energii odkształcenia sprężystego β w danym punkcie górotworu wyznaczany z zależności (1):

$$\beta = \frac{V_c}{V_c^g}, \tag{1}$$

gdzie:

V_c - jednostkowa energia odkształcenia sprężystego w danym punkcie górotworu naruszonego eksploatacją [J/m^3],

V_c^g - jednostkowa energia odkształcenia sprężystego w danym punkcie górotworu nie naruszonego eksploatacją (pierwotna energia potencjalna) [J/m^3];

- wskaźnik energetyczny tąpnięcia T_e, wyznaczany z zależności (2):

$$T_e = \frac{E_k}{V_k^{min}} = \frac{\delta(E_n + E_d) - L_{zn}}{V_k^{min}}, \tag{2}$$

gdzie:

E_k - energia kinetyczna wyzwolona w górotworze [J],

V_k^{min} - minimalna energia kinetyczna konieczna do wystąpienia tąpnięcia [J],

$V_k^{min} = 1{,}25 \times 10^5$ J,

δ - współczynnik o wartości 0,8 do 0,9,

E_n - energia sprężysta zakumulowana w obszarze górotworu, który podczas tąpnięcia ulega zniszczeniu [J],

E_d - energia sejsmiczna wstrząsu [J],

L_{zn} - praca zniszczenia [J].

W złożonych warunkach wybierania przy ocenie potencjalnego stanu zagrożenia korzysta się często także z innych, nie ujętych w tabl. 1 parametrów (wskaźników). Niektóre z tych wskaźników, gdy są stosowane samodzielnie do oceny stanu zagrożenia tąpaniami, bywają mało informatywne, jednak w powiązaniu ze wskaźnikami podstawowymi pozwalają zwiększyć dokładność i wiarygodność oceny.

Najczęściej, do oceny stanu zagrożenia często wykorzystywany jest również współczynnik koncentracji naprężeń pionowych α wyznaczany z zależności (3):

$$\alpha = \frac{\sigma_z}{p_z}, \tag{3}$$

gdzie:

σ_z - prognozowana wartość składowej pionowej przestrzennego stanu naprężenia [MPa],

p_z - wartość naprężeń pierwotnych, wynikających z głębokości zalegania [MPa].

Dodatkową użyteczną informację można uzyskać obliczając także wskaźnik α^*, wyznaczany zgodnie z zależnością (4):

$$\alpha^* = \frac{\sigma_z}{p_{z0}}, \tag{4}$$

gdzie p_{z0} - wartość naprężeń pierwotnych, wynikających z głębokości zalegania, obliczona dla głębokości równej 400 metrów - w pewnym sensie kryterialnej, jeżeli brać pod uwagę występowanie tąpań i obowiązujące przepisy; [MPa].

W artykule [1] zaproponowano rozszerzenie metodyki określania stanu potencjalnego zagrożenia tąpaniami o parametr charakteryzujący zdeformowanie wytrzymałych warstw skalnych, niszczenie których może być przyczyną występujących zjawisk dynamicznych. Uwzględnienie procesów deformacyjnych wydaje się zasadne z uwagi na powszechny udział w rejestrowanych w ostatnich latach tąpnięciach tak zwanych tąpnięć stropowych, mających swoją bezpośrednią przyczynę w procesach zachodzących w wytrzymałych warstwach skalnych zalegających w pewnej odległości od eksploatowanego pokładu. Załamywanie się tych warstw może być również czynnikiem wyzwalającym tąpnięcia pokładowe - wywołane koncentracją naprężeń w eksploatowanym pokładzie. Przyjętym parametrem jest odkształcenie pionowe - ε_z. We wspomnianej pracy podano następujące wartości kryterialne odkształceń pionowych - tabl. 2.

Tablica 2

Wartości kryterialne odkształceń pionowych do oceny potencjalnego stanu zagrożenia tąpaniami

Stan zagrożenia	ε_z **[mm/m]**
a - brak	$\lvert\varepsilon_z\rvert \leq 0{,}5$
b - słaby	$\lvert\varepsilon_z\rvert \leq 1{,}0$
c - średni	$\lvert\varepsilon_z\rvert \leq 2{,}0$
d - duży	$\lvert\varepsilon_z\rvert > 2{,}0$

Pochodną zmian w stanie naprężeń i odkształceń zachodzących w deformowanym eksploatacją górotworze są zmiany potencjalnej energii sprężystej (Φ). W procesie niszczenia ośrodka skalnego ta potencjalna energia sprężysta przechodzi w inne, praktycznie niewyznaczalne ilościowo rodzaje energii, w tym w kinetyczną energię fal sprężystych, utożsamianą z energią sejsmiczną rejestrowanych wstrząsów. Sposób prognozowania zmian (przyrostów, spadków) właściwej energii odkształcenia sprężystego [J/m^3] na poziomach deformowanych eksploatacją mocnych warstw skalnych podaje praca [5].

Wskaźnik charakteryzujący zmiany energetyczne zachodzące w podbieranych rozpatrywaną eksploatacją piaskowcach można wyrazić w następujący sposób (5):

$$\varphi = \frac{\Phi_{\max \Delta T} \times \Delta\Phi_{\max \Delta T}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_{\max \Delta T} \times \left(\Phi_{\max \Delta T} - \Phi_{poc}\right)}{\Phi_0}, \tag{5}$$

gdzie:

$\Phi_{\max \Delta T}$ - maksymalna wartość energii w rozpatrywanym przedziale czasu ΔT,

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

Φ_{poc} - wartość początkowa energii sprężystej przed przeprowadzeniem rozpatrywanego zakresu eksploatacji w czasookresie ΔT,

Φ_0 - wartość początkowa energii sprężystej przed przeprowadzeniem eksploatacji, wynikająca z głębokości zalegania.

3. Wskazania analitycznych metod prognostycznych a ocena potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk

Wyrażanie wyników prognoz analitycznych poprzez wskaźniki (podające wprost odchyłki prognozowanych wielkości od przyjętego ich poziomu odniesienia) ułatwia przeprowadzanie klasyfikacji stanów potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk z uwagi na typowo porównawczy charakter oceny. Nie zawsze jednak tak wyrażane zmiany w stanie naprężeniowo-deformacyjnym i energetycznym górotworu są dostatecznie informatywne i mogą prowadzić do błędnych oszacowań poziomu potencjalnego zagrożenia wstrząsami i tąpaniami wyrobisk górniczych.

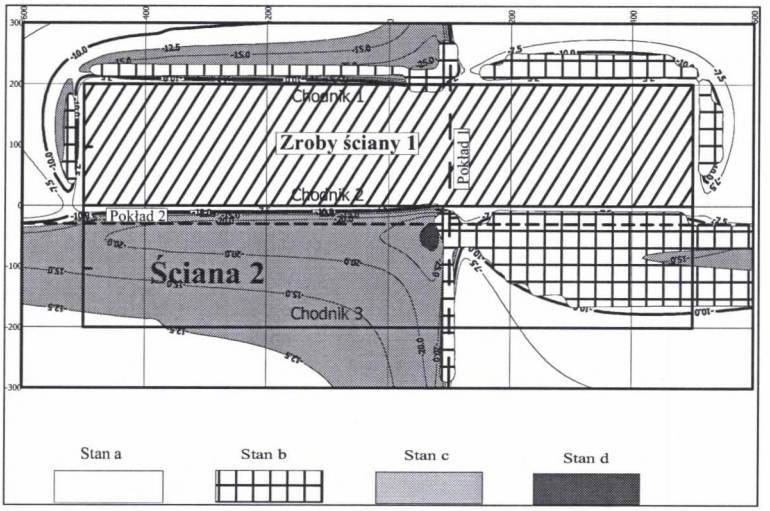
Rozpatrzmy przykładową, stosunkowo typową, sytuację górniczą (rys.1 i 2) w rejonie pola ściany 2 projektowanej przy zrobach wybranej już ściany 1. Na wybiegu ściany 2 występują krawędzie zrobów eksploatacji przeprowadzonej w sąsiednich pokładach: krawędź w pokładzie 1 zalegającym 20m poniżej oraz krawędź w pokładzie 2, zalegającym 50m powyżej aktualnie eksploatowanego pokładu.

Tablica 3

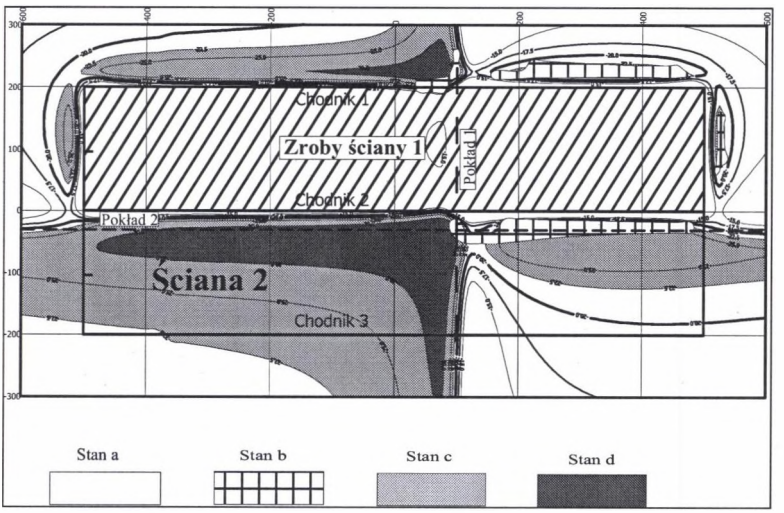
Wartości analizowanych wskaźników obliczonych dla sytuacji górniczej na rys.1 i 2 w polu ściany 2

Głębokość eksploat. pokładu	σ_z [MPa]	W	α	α^*	β	ε_z [mm/m]	φ [J/m^3]
400 m	-30 ÷ -2	Pon.1 ÷ 5,0	0,2 ÷ 3,0	0,2 ÷ 3,0	0,6 ÷ 57,6	0 ÷ 1,6	0,4 ÷ 43
800 m	-40 ÷ -12	Pon.1 ÷ 3,0	0,6 ÷ 2,0	1,2 ÷ 4,0	0,6 ÷ 8,1	0 ÷ 1,6	0,1 ÷ 14

Na rysunkach 1 i 2 pokazano prognozowane analitycznie [2] rozkłady składowej pionowej przestrzennego stanu naprężenia (σ_z; MPa) w stropie projektowanego do wybierania pokładu przy jego zaleganiu na głębokościach odpowiednio 400m i 800m. Na przedstawionym tle wskazań prognozy naprężeniowej (przy uwzględnieniu wytężenia określonego według kryterium Coulomba-Mohra) zwymiarowano zgodnie z przyjmowanymi dla tych wskazań wartościami kryterialnymi (tabl. 1) obszary potencjalnych stanów a, b, c i d zagrożenia tąpaniami robót górniczych.



Rys. 1. Potencjalny stan zagrożenia tąpaniami projektowanych robót górniczych - H=400m
Fig. 1. Potential rockburst hazard in the area of the planned works - H=400m



Rys. 2. Potencjalny stan zagrożenia tąpaniami projektowanych robót górniczych - H=800m
Fig. 2. Potential rockburst hazard in the area of the planned works - H=800m

Prognozy na rys. 1 i 2 pokazują przy tym samym przestrzennym układzie zaszłości eksploatacyjnych (warunkach górniczych) istotne zróżnicowanie naprężeniowych warunków wybierania, co przekłada się na wyniki oceny potencjalnego stanu zagrożenia tąpaniami - zasięg występowania stanów a, b, c i d. W analizowanej sytuacji górniczej wskutek wzrostu głębokości prowadzenia robót pogorszeniu ulegną warunki prowadzenia i utrzymywania chodnika 3, którego odcinek znajdzie się w najwyższym potencjalnym stanie zagrożenia tąpaniami - stan d. Gdyby na przykład rozpatrywać tylko rozkłady wartości wskaźnika koncentracji naprężeń α (α^*), to na wybiegu chodnika 3, przy jego prowadzeniu na głębokości 400m, wskaźnik α byłby równy α^* i wahałby się w granicach 0,5 do 2,0 , a przy prowadzeniu robót na głębokości 800m wartości te wynosiłyby: α=0,5 do 1,5 i α^* =1,0 do 3,0. Tak więc przy pobieżnej interpretacji rozkładu wartości tego wskaźnika (i pomijając stan wytężenia calizny) wprost nasuwałby się fałszywy wniosek przeciwny wynikającemu z interpretacji prognoz na rys.1 i 2. Podobne problemy dotyczą informatywności i poprawnej interpretacji wyników prognoz (tabl.3) rozkładów wartości wskaźników charakteryzujących zmiany deformacyjne i energetyczne zachodzące w górotworze, których pochodną jest poziom sejsmiczności indukowanej.

4. Podsumowanie

W artykule omówiono najczęściej stosowane w trakcie oceny potencjalnego stanu zagrożenia tąpaniami wskaźniki oparte na wynikach analitycznych prognoz stanów deformacyjno-naprężeniowych i energetycznych górotworu. Przedstawianie wyników prognoz analitycznych poprzez wskaźniki ułatwia przeprowadzanie klasyfikacji stanów potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk - porównawczą ocenę warunków wybierania. Wskazano, że z uwagi na duże zróżnicowanie warunków prowadzenia robót górniczych problem zarówno wyboru wskaźników, jak i ich wartości kryterialnych można uznać za nadal otwarty. Nie zawsze wyrażane poprzez wskaźniki zmiany w stanie deformacyjno-naprężeniowym i energetycznym górotworu są dostatecznie informatywne i mogą prowadzić do błędnych oszacowań stanu potencjalnego zagrożenia tąpaniami wyrobisk górniczych.

LITERATURA

1. Bańka P., Jaworski A.: Ocena potencjalnego stanu zagrożenia tąpaniami wyrobisk w oparciu o wyniki obliczeń rozkładów naprężeń i deformacji. Z.N. Pol.Śl.s.Górnictwo z.258, Gliwice 2003, str.21-32,
2. Białek J., Bańka P., Jaworski A.: Wykorzystanie analitycznych prognoz naprężeniowo-deformacyjnych warunków wybierania do projektowania eksploatacji w rejonach zagrożonych tąpaniami. Prace GIG seria Konferencje nr 26, Katowice 1998, s.15-24.
3. Dymek F.: Przemieszczeniowe zadanie brzegowe przestrzennej teorii sprężystości i jego zastosowanie do zagadnień mechaniki górotworu. Arch.Górn., 14, 3 1968.
4. Gil H. : The Theory of Strata Mechanics. PWN - Polish Scientific Publishers, 1991.
5. Jaworski A., Bańka P.: Wykorzystanie wyników analitycznych prognoz zmian w stanie naprężeniowo-deformacyjnym i energetycznym górotworu do oceny potencjalnego zagrożenia wstrząsami i tąpaniami wyrobisk. Mat. X Międzynarodowej Konf. Naukowo-Technicznej „Tąpania 2003" „Problemy koncentracji eksploatacji w warunkach zagrożenia tąpaniami i metanem". Ustroń-Katowice, XI2003, Wyd. GIG Katowice, str. 57÷70.
6. Praca zbiorowa: Zasady i zakres stosowania kompleksowej metody oceny stanu zagrożenia tąpaniami w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Prace GIG Seria Instrukcje nr 1, Katowice 1996.
7. Praca zbiorowa : Instrukcja korzystania z wyników metody analitycznej w kompleksowej metodzie oceny stanu zagrożenia tąpaniami - projekt GIG, Katowice.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Konopko

Abstract

The estimation of potential rockburst hazard states is performed using the method of mining prospecting [6]. This method is applied at the planning stage of mining works, for the selection of long-term methods for elimination or reduction of hazard state. The potential rockburst hazard state defined in such a way is also taken into consideration when estimating the real state of hazard. In the method of mining prospecting we allow for the influence of various mining-geological factors on the formation of the level of the potential rockburst hazard with respect to planned mining works. The application of the analytical prediction method of strain, stress and energy distribution allows us to provide more precise estimation involving the influence of some factors (change of depth, distance of extracted parts of beds, residues, etc.) on the state of stresses and potential rockburst hazard than in the case of mining prospecting [1,7]. The predictions can be applied long time period before the planned project

wherby it affords time for their optimization in terms of minimizing the level of potential rockburst hazard. We should emphasize that they can be used in areas in which, due to the lack of headings, it is not possible to apply other geophysical methods for the estimation of stress state (for examle seismic or microgravimetric). The paper presents the indicators of the strain, stress and energy state of rockmass used for the determination of potential level of rockburst hazard. Making use of the results of prediction for an example of mining project (fig.1, 2, table 3) the article presented difficulties with apply the indicators to determine the state of potential rockburst hazard.