

*Grzegorz Mutke**

**OCENA ZAGROŻENIA TĄPANIAMI
W KOPALNIACH PODZIEMNYCH
UWZGLĘDNIAJĄCA PARAMETRY DRGAŃ
BLISKO OGNISK WSTRZĄSÓW
— DOŚWIADCZENIA Z POLSKICH KOPALŃ**

1. Wprowadzenie

Jednym z najpoważniejszych zagrożeń naturalnych w polskich kopalniach węgla kamiennego są tąpnięcia inicjowane przez wstrząsy górotworu. Do wiarygodnej oceny zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami jest wymagana znajomość obciążeń statycznych oraz obciążeń dynamicznych w górotworze. O ile obciążenia statyczne są dość dobrze zbadane i istnieje możliwość ich wiarygodnych obliczeń, o tyle obciążenia dynamiczne wywołane wstrząsami górotworu, szczególnie w pobliżu ich źródła, są rozpoznane słabo. Analiza materiałów archiwalnych, dotyczących tąpnięć zaistniałych w kopalniach Górnego Śląska, wykazała, że przeważająca ich część była spowodowana wstrząsami o ogniskach znajdujących się do 100 m od miejsca skutków, jakie wystąpiły w wyrobiskach. Notowano również przypadki, gdy wstrząs w bliskiej odległości od wyrobiska nie powodował jego uszkodzenia, natomiast generował efekty dynamiczne zagrażające załodze górniczej. Jest tak dlatego, że amplituda prędkości drgań (i/lub przemieszczenia, przyspieszenia) tego samego wstrząsu różni się wielokrotnie w zapisach z pola dalekiego i bliskiego. W polu dalekim (daleko od ogniska wstrząsu) rejestruje się amplitudy prędkości drgań wyrażone w ułamkach milimetrów na sekundę, natomiast blisko źródła sejsmicznego wartości te mogą osiągać ponad 1 m/s. W związku z tym, że obciążenia dynamiczne są proporcjonalne do amplitudy prędkości drgań cząsteczek górotworu, to blisko źródła sejsmicznego będą one wielokrotnie większe. Chwilowe naprężenia dynamiczne wywołane wstrząsem z bliskiej odległości mogą przekraczać nawet 10 MPa i mogą mieć decydujący wpływ na wywołanie tąpnięcia. Wpływ wstrząsu na zniszczenie struktury górotworu lub stateczność wyrobiska

* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

podziemnego może być pomijalny w dużej odległości od ogniska (dalekie pole falowe), natomiast w małej odległości wpływ ten może być istotny. Przyspieszenie drgań w strefie znajdującej się blisko ogniska wstrząsu górniczego często przekracza wartość 5 g (g — przyspieszenie ziemskie). Przy odpowiednio dużej długości fali takie przyspieszenie występuje w dużej objętości górotworu i może wywołać olbrzymie siły dynamiczne, które mogą spowodować reakcję i przemieszczać nawet bardzo duże masy (także ludzi, urządzenia mechaniczne i inne przedmioty) [10]. Efekt ten ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo pracy załogi oraz na sam proces eksploatacji kopaliny i koszty jej wydobywania.

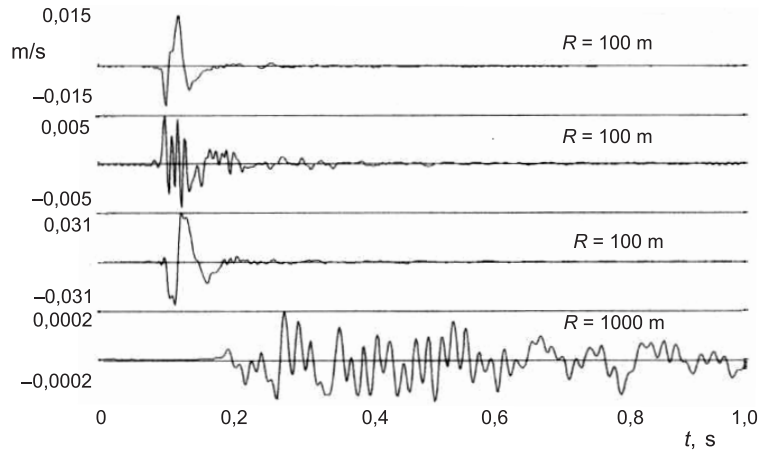
Wprowadzenie do praktyki górniczej metody ciągłej oceny amplitudy prędkości drgań cząsteczek górotworu (*PPV*) pozwoli na skuteczniejsze zwalczanie zagrożenia tąpnięciami. Dotychczasowe badania drgań w bliskim polu falowym przeprowadzone w GZW wykazały, że ich prognozowanie najlepiej oprzeć na parametrze skalarnego momentu sejsmicznego, będącego miarą siły wstrząsu lepszą niż energia sejsmiczna. Parametr *PPV* obliczany dla każdego wstrząsu (podobnie jak aktualnie wyznaczana w procedurze interpretacyjnej energia sejsmiczna wstrząsu i jego lokalizacja), wskazywałby w sposób bezpośredni na stopień potencjalnego zagrożenia tąpnięciem w rejonie prowadzonych robót górniczych. Proponowana metoda oceny jest lepsza od dotychczas stosowanej, ponieważ parametr *PPV* bezpośrednio i proporcjonalnie skorelowany jest z naprężeniem. Dlatego też w kopalniach Górnego Śląska prowadzono wieloletnie i żmudne pomiary drgań wywołane wstrząsami górotworu w obszarach zlokalizowanych blisko ich źródła. Wyniki tych badań stanowiły podstawę do opracowania zależności empirycznych do prognozowania parametru *PPV* i otworzyły nowe możliwości dla rozwoju metody sejsmologicznej w polskich kopalniach węgla kamiennego. W połączeniu z opracowanym geofizycznym kryterium potencjalnego zagrożenia tąpnięciem metoda jest przygotowana do wdrożenia w zakładach górniczych, w których występuje wysoka aktywność sejsmiczna.

2. Charakterystyka drgań w pobliżu ognisk wstrząsów

Amplitudy prędkości (przyspieszenia) drgań blisko źródła sejsmicznego wielokrotnie przewyższają te zarejestrowane w dalekim polu falowym.

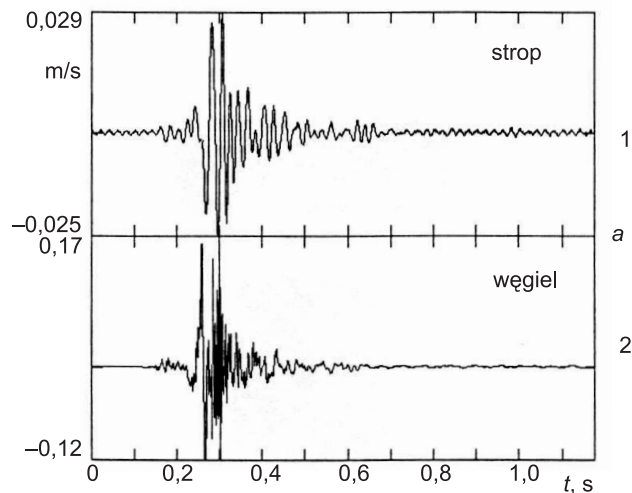
W celu zobrazowania różnicy wartości amplitudy prędkości drgań zarejestrowanych blisko źródła sejsmicznego oraz w dalekim polu falowym, na rysunku 1 przedstawiono sejsmogram wstrząsu, jaki wystąpił w Kopalni „Śląsk”. Impuls sejsmiczny, zarejestrowany w odległości 100 m od ogniska, charakteryzował się amplitudą prędkości drgań 0,03 m/s, czyli 150 razy większą od amplitudy prędkości drgań zarejestrowanej w odległości 1000 m od ogniska wstrząsu. Zatem na odległości dziesięciokrotnie większej amplituda prędkości zmniejszyła się aż 150 razy.

W latach 1988–2003 zainstalowano kilka poligonów pomiarowych do rejestracji drgań w odległościach bliskich od źródła sejsmicznego w następujących kopalniach węgla kamiennego: „Szombierki”, „Bobrek”, „Rozbark” w Bytomiu, „Nowy Wirek” i „Śląsk” w Rudzie Śląskiej oraz ZG „Jadwiga” w Zabrze.

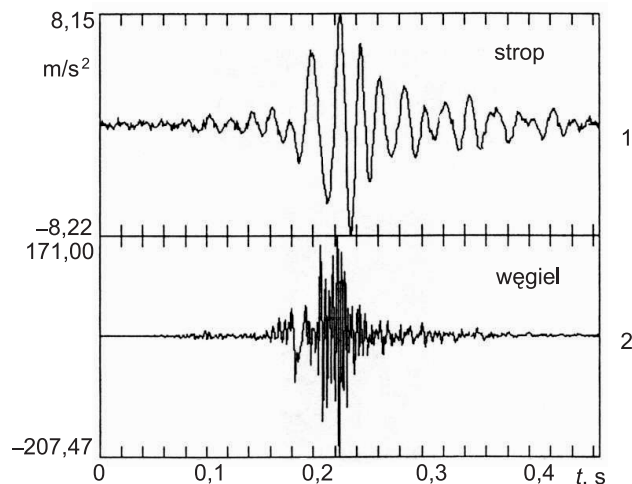


Rys. 1. Sejsmogram wstrząsu zarejestrowanego na stanowisku trójskładowym w odległości bliskiej ($R = 100$ m) oraz na stanowisku pionowym w odległości dalekiej ($R = 1000$ m) w Kopalni „Śląsk”

Na rysunku 2 przedstawiono przykładową rejestrację wstrząsu o energii sejsmicznej $3 \cdot 10^5$ J i w odległości hipocentralnej $R = 130$ m z poligonu pomiarowego zlokalizowanego w ZG „Jadwiga”. Amplituda prędkości drgań *PPV* zarejestrowana w węglu wyniosła dla tego wstrząsu 0,17 m/s. Na rysunku 3 przedstawiono wartość maksymalnej amplitudy przyspieszenia drgań *PPA*, obliczonej po zróżniczkowaniu numerycznym rejestracji prędkościowej z rysunku 2. Amplituda przyspieszenia drgań *PPA* w węglu wyniosła dla tego wstrząsu ponad 200 m/s² (ponad 20 g).



Rys. 2. Wstrząs o energii sejsmicznej $3 \cdot 10^5$ J, zarejestrowany w ZG „Jadwiga” w rejonie ściany 243b/620, w odległości $R = 130$ m od ogniska — sejsmogram prędkości drgań



Rys. 3. Wstrząs o energii sejsmicznej $3 \cdot 10^5$ J zarejestrowany w ZG „Jadwiga” w rejonie ściany 243b/620, w odległości $R = 130$ m od ogniska — akcelerogram (po różniczkowaniu sygnału prędkościowego)

W podsumowaniu wyników pomiarów dotyczących rejestracji wstrząsów górniczych w odległościach bliskich ogniska należy podkreślić, że wiele z nich to obserwacje pionierskie. Bardzo istotna informacja uzyskana w badaniach na poligonach kopalnianych dotyczy charakterystyki drgań rejestrowanych blisko ogniska wstrząsu. Drgania te mają najczęściej postać ukierunkowanego impulsu, szczególnie w przypadku wstrząsów wysokoenergetycznych. Taka postać drgań blisko ogniska wstrząsu oznacza, że obciążenia dynamiczne są silnie ukierunkowane i w odpowiednich warunkach mogą wywołać skutki w wyrobisku. Może wystąpić koncentracja strumienia energii przechodzącego przez rejon wyrobiska. Zauważono również wyraźną różnicę w amplitudach prędkości drgań rejestrowanych w pokładzie węgla w porównaniu z amplitudami rejestrowanymi w skałach otaczających. Amplitudy drgań *PPV* w pokładzie węglowym były z reguły znacznie większe niż w skałach stropowych lub spągowych.

Na poligonach badawczych w GZW zarejestrowano następujące parametry drgań wywołane wstrząsami górniczymi w odległościach bliskich od ich ogniska [29]:

- maksymalne amplitudy prędkości (*PPV*) do 0,38 m/s, dla fal o dominujących częstotliwościach powyżej 100 Hz;
- maksymalne amplitudy prędkości (*PPV*) do 0,18 m/s, dla fal o dominujących częstotliwościach poniżej 100 Hz;
- maksymalne amplitudy przyspieszenia drgań (*PPA*) do 20 g dla fal o dominujących częstotliwościach powyżej 100 Hz;
- maksymalne amplitudy przyspieszenia drgań (*PPA*) do 5 g dla fal o dominujących częstotliwościach poniżej 100 Hz;

- amplitudy przemieszczenia z reguły bardzo małe, nieprzekraczające 1 mm;
- maksymalne wzmocnienie amplitud *PPV* na granicy między spękany węgiel w strefie przyociosowej a twardą skałą (piaskowiec) było czterokrotne, a średnio statystycznie nieco ponad dwukrotne;
- w porównaniu z rejestracjami drgań *PPV* od tych samych wstrząsów przez sieci kopalniane w dalekim polu falowym, *PPV* rejestrowane w polu bliskim były od 10 do 1000 razy większe;
- czas trwania drgań w obszarze bliskim ogniska wstrząsu był bardzo krótki w porównaniu z czasem drgań rejestrowanym w polu dalekim i najczęściej wynosił od 0,05 do 0,25 s;
- w miarę oddalania się od ogniska wstrząsu na odległość do $R = 300$ m można było zaobserwować bardzo silne tłumienie amplitud z odległością R ; informacje o bardzo silnym tłumieniu drgań w polu falowym bliskim i pośrednim, wynikające z teorii pola falowego, zostały potwierdzone empirycznymi danymi.

3. Empiryczna prognoza maksymalnych amplitud prędkości drgań wywołanych wstrząsami w kopalniach węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

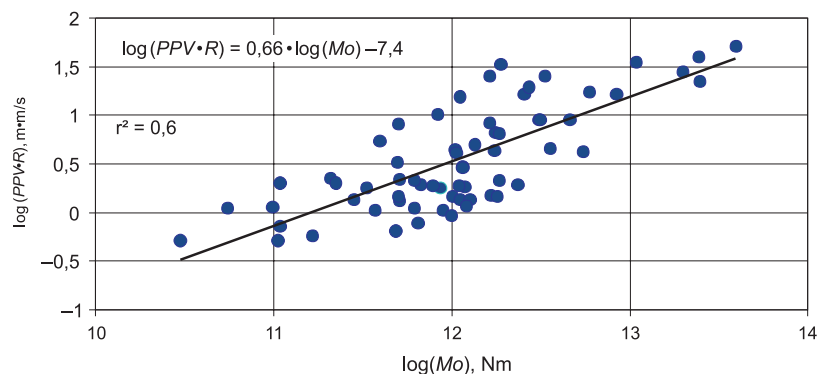
Wyniki pomiarów na poligonach badawczych wskazują, że korelacja parametru energii sejsmicznej i maksymalnej amplitudy prędkości drgań jest słaba. Wynika stąd konieczność poszukiwania lepszej korelacji drgań *PPV* z innymi parametrami źródła sejsmicznego. Lepszą miarą wyrażającą siłę wstrząsu w źródle od energii sejsmicznej jest skalarny moment sejsmiczny. Dla zbioru 65 wstrząsów, w przypadku których pomierzono wartości *PPV* blisko ogniska wstrząsu, wyznaczono moment sejsmiczny, wykorzystując rejestracje z dalekiego pola falowego.

Uzyskane parametry zostały wykorzystane do wyznaczenia zależności między parametrem $PPV \cdot R$ (amplituda skalowana ze wzrostem odległości hipocentralnej) oraz skalarnym momentem sejsmicznym M_0 . Zbiór danych obejmował wstrząsy o wartości momentu sejsmicznego od $M_0 = 3 \cdot 10^{10}$ N·m do $M_0 = 4 \cdot 10^{13}$ N·m. Dane te pozwoliły ustalić dobrą korelację parametrów $PPV \cdot R$ i M_0 . Korelacja ta jest przedstawiona na rysunku 4 i wyrażona równaniem empirycznym [29]:

$$\log(PPV \cdot R) = 0,66 \cdot \log(M_0) - 7,4 \quad (1)$$

gdzie *PPV* wyraża się w m/s, R w m, a M_0 w N·m.

Zależność (1) pozwala na prognozowanie drgań *PPV* w polu falowym bliskim i pośrednim, w odległości do 500 m od ogniska wstrząsu. Współczynnik korelacji r_k^2 wynosi w tym przypadku 0,6.



Rys. 4. Zależność skalowanej amplitudy prędkości i odległości hipocentralnej $PPV \cdot R$ w funkcji momentu sejsmicznego M_0

McGarr i inni [23] w swoich badaniach otrzymali zależność podobnego typu dla kopalń złota w RPA

$$\log(PPV \cdot R) = 0,49 \cdot \log(M_0) - 4,68 \quad (2)$$

gdzie PPV wyrażone w cm/s , R w cm , a M_0 w dynach razy centymetr.

Analiza tych dwóch zależności wskazuje, że dla wartości momentu sejsmicznego $1 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{14}$ $\text{N} \cdot \text{m}$ wartości skalowanej prędkości są podobne. W przypadku mniejszych wartości momentu sejsmicznego, stosując wzór (2) uzyskuje się nieco większe wartości skalowanej prędkości $PPV \cdot R$. Różnice te mogą wynikać z odmiennych właściwości skał budujących górotwór w kopalniach w RPA i GZW oraz z większej głębokości eksploatacji w kopalniach RPA, co wiąże się z większymi naprężeniami pierwotnymi.

Zależność (1) można wykorzystać również w sytuacji, gdy jest prognozowana energia sejsmiczna, a nie moment sejsmiczny. Należy wówczas zastosować relacje skalowania dla obszaru GZW między magnitudą a energią sejsmiczną [7] oraz między magnitudą a skalarnym momentem sejsmicznym [9]:

$$\log(M_0) = 1,009 \cdot M_L + 10,42 \quad (3)$$

$$\log E = 1,8 + 1,9 M_L \quad (4)$$

Na podstawie analizy geomechanicznej rejonu badań [1, 5, 31, 33, 35] oraz wykorzystując metodę tomografii pasywnej [6, 11–13, 18, 19, 26] można wyznaczyć zarówno potencjalną energię sejsmiczną, jak i miejsce wystąpienia potencjalnych ognisk wstrząsów. Znając odległość prognozowanych wstrząsów od wyrobiska górniczego można oszacować amplitudę drgań PPV przy wykorzystaniu wzorów (1), (3) i (4). Dla bieżących rejestracji wstrząsów wartość parametru PPV wyznacza się ze wzoru (1) po obliczeniu dla nich skalarnego momentu sejsmicznego.

4. Ocena zagrożenia tąpnięciem spowodowanym drganiami wywołanymi blisko zlokalizowanym wstrząsem

Jednym z mechanizmów powstawania tąpnięcia jest przyrost naprężeń spowodowanych drganiami wywołanymi przez wstrząs górotworu, które sumują się z istniejącymi naprężeniami statycznymi. Związek naprężeń dynamicznych z amplitudami prędkości drgań cząsteczek górotworu (PPV) opisany jest równaniami [3, 8, 9, 14]:

$$\Delta p_{dx} = \rho \alpha PPV_x \quad (5)$$

$$\Delta p_{dy} = \rho \beta PPV_y \quad (6)$$

$$\Delta p_{dy} = \Delta p_{dz} = \Delta p_{dx} [v / (1-v)] \quad (7)$$

gdzie:

- $\Delta p_{dx}, \Delta p_{dy}, \Delta p_{dz}$ — przyrost naprężeń normalnych,
- Δp_{dxy} — przyrost naprężeń ścinających,
- ρ — gęstość ośrodka,
- β — prędkość propagacji fali poprzecznej,
- α — prędkość propagacji fali podłużnej,
- PPV_x, PPV_y — amplitudy prędkości drgań cząstek górotworu w kierunku x i y ,
- v — moduł Poissona.

Powyższe wzory pozwalają na obliczenie naprężeń dynamicznych, pod warunkiem, że są znane maksymalne amplitudy prędkości drgań PPV . Przykładowo dla najwyższej zarejestrowanej na poligonach badawczych w GZW wartości $PPV = 0,4$ m/s chwilowy przyrost naprężenia dynamicznego w kierunku x (Δp_{dx}) wynosi około $4 \cdot 10^6$ Pa. Należy zauważyć, że zmiana naprężenia dynamicznego może działać jako przyrost obciążenia lub jego zmniejszenie. Podobnie będzie dla odkształcenia. Dla wartości $PPV = 1,0$ m/s, Δp_{dx} wynosi około $1 \cdot 10^7$ Pa, natomiast dla $PPV = 0,05$ m/s odpowiednia zmiana naprężenia w kierunku x wyniesie około $5 \cdot 10^5$ Pa. Przedstawione wartości zmiany naprężenia dynamicznego mogą być istotne z punktu widzenia stateczności podziemnych wyrobisk. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że strumień energii sejsmicznej w polu falowym blisko ogniska wstrząsu będzie dużo większy niż w dalekim polu falowym. Szczególnie dużych wartości strumienia można oczekiwać na konturze wyrobiska dla drgań w obszarze bliskiego pola falowego i przy niskiej częstotliwości narożnej (dużej długości fali).

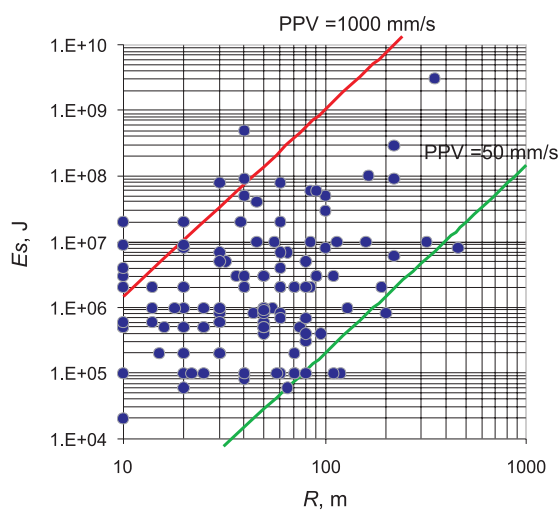
Ocena zagrożenia tąpnięciem dla modelu ze wstrząsem zaistniałym blisko wyrobiska może być przeprowadzona w oparciu o kryteria empiryczne, obliczenia analityczne oraz modelowanie numeryczne. W pierwszym przypadku można dokonać przybliżonej oceny zagrożenia tąpnięciem, wykorzystując wiedzę o prognozowanych wartościach PPV oraz kryterialne empiryczne wartości PPV , przy których obserwowano tąpnięcia w kopalniach

GZW. Można również wykorzystać liczne skale empiryczne oceny stateczności wyrobisk podziemnych. Obliczenia analityczne i modelowanie numeryczne z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych mogą być wykorzystane do oceny zagrożenia tąpnięciem oraz przy doborze optymalnej obudowy, w tym kotwowej, dla bezpiecznego prowadzenia eksploatacji [16, 17].

4.1. Geofizyczne empiryczne kryterium tąpnięcia wywołanego wstrząsem w warunkach GZW

Lokalne warunki górnictwa i geologiczne, tektonika obszaru, stosowane środki prewencyjne, stosowana w wyrobiskach górnictwa obudowa, zaszczości eksploatacyjne itp. wpływają w istotny sposób na zagrożenie tąpnięciami. Z tej przyczyny bardzo istotne jest opracowanie kryteriów empirycznych oceny potencjalnego zagrożenia tąpnięciem dla lokalnych warunków. Taka próbę autor podjął dla kopalń węgla kamiennego w GZW [29]. Została wykonana analiza tąpnięć, które wystąpiły w kopalniach GZW w latach 1988–2006 (zebrano 120 szczegółowych opisów tąpnięć).

Na rysunku 5 naniesiono tąpnięcia w układzie osi energia sejsmiczna — odległość ogniska wstrząsu do uszkodzonego wyrobiska. Wykres ten pokazuje, że prawie 90% wstrząsów skutkujących tąpnięciem zlokalizowanych było do 100 m od uszkodzonych wyrobisk.



Rys. 5. Diagram obrazujący tąpnięcia z lat 1988–2006 w układzie: odległość od uszkodzonego wyrobiska R — energia sejsmiczna E_s ; na wykresie zaznaczono linie stałych amplitud prędkości: $PPV = 50$ mm/s oraz $PPV = 1000$ mm/s, obliczone na podstawie wzorów (1), (3) i (4)

Na rysunku 5 zaznaczono również linie wyznaczające stałą wartość amplitud maksymalnych prędkości drgań, $PPV = 0,05$ m/s i $PPV = 1,0$ m/s, obliczonych według wzoru (1)

oraz wzorów (3) i (4). W efekcie uzyskano empiryczne geofizyczne kryterium uszkodzenia wyrobiska od obciążeń dynamicznych wywołanych wstrząsem górotworu w warunkach GZW. Z kryterium tego wynika, że uszkodzenia wyrobisk w GZW występowały w pojedynczych przypadkach już od wartości $PPV = 0,05$ m/s. W zakresie parametru maksymalnej amplitudy prędkości drgań PPV od 0,05 do 1,0 m/s wystąpiło 90% analizowanych tąpnięć zaistniałych w latach 1988–2006 w GZW.

Należy w tym miejscu podkreślić, że bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na wystąpienie tąpnięcia na skutek obciążeń dynamicznych wywołanych wstrząsem górniczym jest lokalny stan naprężeń statycznych. Budowa geologiczna, tektonika oraz przede wszystkim zaszczości eksploatacyjne powodują lokalnie zwiększenie naprężeń statycznych. Takie miejsca są bardziej podatne na wystąpienie tąpnięcia przy relatywnie mniejszych wartościach PPV . Wystąpienie kilku tąpnięć przy wartości parametru $PPV = 0,05$ m/s wynikało prawdopodobnie z lokalnie silnie podwyższonego stanu naprężeń statycznych w obszarze zaistniałych skutków.

Empiryczna geofizyczna ocena zagrożenia tąpnięciem może mieć bardzo duże znaczenie praktyczne. Zastosowanie zależności empirycznej (1) pozwala na wprowadzenie metody do praktyki. Podobny sposób oceny zagrożenia tąpnięciami jest opracowywany również w innych światowych ośrodkach badawczych. Można zauważyć, że kryterialne wartości PPV na wykresie ryzyka sejsmicznego są zbliżone do wartości przedstawionych dla obszaru GZW. Z badań [15] wynika, że ponad 95% badanych tąpnięć wystąpiło w zakresie parametru PPV od 0,1 do 1,0 m/s, a tylko pojedyncze poniżej 0,1 m/s lub powyżej 1,0 m/s. Wyniki te są więc podobne do uzyskanych przez autora.

Wykorzystanie opracowanego empirycznego kryterium oceny potencjalnego zagrożenia tąpnięciem w warunkach GZW może być szczególnie przydatne, gdy zostaną podjęte działania związane z rozwojem sejsmologii górniczej w kopalniach GZW w aspekcie aparaturowym i metodycznym.

Należy dążyć do wprowadzenia w bieżącej pracy kopalnianych stacji geofizyki następujących elementów:

- budowa sieci sejsmologicznej przestrzennej z uwzględnieniem stanowisk trójskładowych,
- oprogramowanie do lokalizacji 3D,
- wprowadzenie nowych programów parametrów źródła wstrząsu,
- przestrzenna edycja bazy danych.

Przedstawione w opracowaniu empiryczne geofizyczne kryterium oceny potencjalnego zagrożenia tąpnięciem na skutek wstrząsu górniczego jest bardziej odpowiednie do stosowania w warunkach GZW niż liczne skale empiryczne opracowane w innych światowych zagłębiach. Uwzględnia bowiem specyfikę wpływu lokalnych warunków górniczo-geologicznych oraz technicznych na możliwość wystąpienia tąpnięcia w wyniku drgań wywołanych blisko zlokalizowanym wstrząsem górotworu.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- 1) Emisja drgań generowanych przez wstrząsy pochodzenia górniczego zarówno w ujęciu teoretycznym, jak i na podstawie wyników dołowych pomiarów sejsmometrycznych wskazuje na występowanie co najmniej dwu różnych pól falowych, charakteryzujących się odmienną dynamiką drgań. Blisko ognisk wstrząsów dominują efekty bliskiego i pośredniego pola falowego, a dalej od ogniska wstrząsu efekty pola dalekiego. Kilkuletnie specjalistyczne pomiary sejsmometryczne na poligonach badawczych zainstalowanych w kopalniach GZW potwierdziły, że w odległości bliskiej ogniska wstrząsu maksymalne amplitudy prędkości drgań są wielokrotnie większe niż w polu dalekim. W polu bliskim zarejestrowano amplitudy prędkości drgań $PPV = 0,38$ m/s, a przyspieszenia osiągały nawet 20 g.
- 2) Wyznaczono zależności empiryczne do określania amplitud prędkości drgań PPV blisko ogniska wstrząsu na podstawie standardowych rejestracji fal w polu dalekim. Dobrą korelację obserwowano między skalarnym momentem sejsmicznym i wartością parametru $R \cdot PPV$. Z analizy tego wzoru wynika, że dla najsilniejszych wstrząsów w GZW wartości maksymalnej amplitudy prędkości drgań PPV mogą przekraczać nawet 1,0 m/s. Dla takich drgań można oczekiwać chwilowego przyrostu naprężeń nawet o ponad 10 MPa.
- 3) Kryteria oceny zagrożenia tąpnięciem spowodowanym bliskim wstrząsem górniczym muszą być opracowywane na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych obejmujących lokalny zbiór wstrząsów. W przypadku analizowanego zbioru wstrząsów zaistniałych w GZW geofizyczne empiryczne kryterium potencjalnego uszkodzenia wyrobisk górniczych pokazało, że 90% tąpnięć zaistniałych w latach 1988–2006 wystąpiło po wstrząsach, które spowodowały drgania o prędkości PPV od 0,05 do 1,0 m/s, a odległość od ogniska wstrząsu do uszkodzonego wyrobiska nie przekraczała 100 metrów. Wartości PPV określono z zależności empirycznych między parametrami źródła sejsmicznego. Jedynie w przypadku dziewięciu tąpnięć, spośród analizowanego zbioru 120 wartości, PPV było większe od 1,0 m/s.
- 4) Przedstawione badania mogą stanowić podstawę do czasoprzestrzennego projektowania eksploatacji prowadzonej w warunkach dużej sejsmiczności. Stosowanie opracowanego geofizycznego empirycznego kryterium potencjalnego uszkodzenia wyrobisk podziemnych oraz zależności empirycznych do prognozowania drgań prędkości PPV w polu falowym bliskim i pośrednim może być korzystne z uwagi na racjonalny dobór obudowy i działań profilaktycznych zabezpieczających funkcjonalność wyrobisk górniczych, a tym samym na poprawę bezpieczeństwa pracy.

LITERATURA

- [1] *Biliński A.*: Ocena zagrożenia tąpnięciem wyrobiska eksploatacyjnego. Komunikat GIG 1992
- [2] *Brune J.N.*: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* 75, 1970, 4997–5009 (Correction 1971, *J. Geophys. Res.* 76.: 5002)

- [3] *Brady B.G., Brown E.T.*: Rock Mechanics for Underground Mining. George Allen and Unwin 1985, 527
- [4] *Dowding C.H., Rozen A.*: Damage to rock tunnels from earthquake shaking. Int. J. Geotechn. Engng., Div., ASCE 104, GT2, 1978
- [5] *Drzewiecki J.*: Movement dynamics of detached roof strata ahead of the longwall coalface, Ref na Fifth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, „Dynamic rock mass response to mining”, 17–19 september 2001, RPA
- [6] *Dębski, W.*: Wstępne wyniki tomografii akustycznej próbki granitu pochodzącej z Underground Research Laboratory (Canada). In Publ. Inst.Geophys. Pol. Acad. Sc. M-22 (310), 1998, 331–337
- [7] *Dubiński J., Wierzchowska Z.*: Metody obliczeń wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. Komunikat GIG 591, 1973
- [8] *Dubiński J., Mutke G.*: Characteristics of Mining tremors within the near-wave field zone”, Pageoph., Val. 147, 2, 1996, 249–261
- [9] *Dubiński J., Mutke G.*: Characteristics of near-field peak velocity in the Upper Silesian Coal Mines. Rockbursts and Seismicity in Mines, Gibowicz & Lasocki (eds.), Rotterdam, Balkema 1997, 343–347
- [10] *Dubiński J., Lipowczan A.*: The man in the work environment exposed to tremors and rockbursts. Proc. Of 4-th Int. Symp. On Rockbursts and Seismicity in Mines, Rotterdam, Balkema 1997, 377–381
- [11] *Dubiński J., Lurka A., Mutke G.*: Zastosowanie metody tomografii pasywnej do oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach. Przegląd Górniczy, 3, 1998
- [12] *Dubiński J., Mutke G.*: Study of temporal changes of P-Wave velocity in Polish copper mines in high seismic activity zones. W: The 6th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, Australia — Perth 2005
- [13] *Gibowicz S.J., Kijko A.*: An Introduction to Mining Seismology. Academic Press 1994, 399
- [14] *John C.M.St., Zahrah T.F.*: Aseismic design of underground structures. Agbajian Associates, Rep.No. R-8411–56–16, 1985
- [15] *Kaiser P.K., Vasak P., Suorineni F.T.*: New dimensions in seismic data interpretation with 3-D virtual reality visualisation for burst-prone mines. In: Controlling Seismic Risk — Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings (Eds. Potvin Y. and Hudyma M.), Australian Centre for Geomechanics (ACG) 2005, 33–45
- [16] *Kidybiński A.*: Dynamiczne obciążenia obudowy chodnikowej w czasie tapani. Zeszyty Naukowe AGH, 1071, 1986
- [17] *Kidybiński A.*: Stability of coal-mine gateroads — A dynamic approach. Geomechanics 91, Rakowski (ed.), Balkema 1991, 9–16
- [18] *Lurka A.*: Seismic hazard assessment in the Bielszowice coal mine using the passive tomography. [w:] Seismogenic Process Monitoring (eds. H. Ogasawara, T. Yanagidani & M. Ando), A.A. Balkema Publishers 2002
- [19] *Lurka A.*: Zwiększanie informatywności technik tomograficznych w procesach eksploatacji złóż. Archiwum Górnictwa, PAN 2004, 495–509
- [20] *Madariaga R.*: Dynamics of an expanding of a circular fault. Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1976, 639–666
- [21] *Majcherczyk T., Tajduś A., Cala M.*: Wpływ uskoków na stan zagrożenia tapaniami pokładów węgla. Materiały Sympozjum N-T, Tapania’94, nt.: Rozwiązania inżynierskie w problematyce tapani, Katowice, GIG 1994
- [22] *Marcak H., Zuberek W.M.*: Geofizyka Górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne 1994
- [23] *Mc Garr A., Green R.W.E., Spottiswoode S.M.*: Strong ground motion of mine tremors: source implications for near-source ground motion parameters. Bull. Seismol. Soc. Am., 71, 1981, 295–319
- [24] *Mutke G., Stec K.*: Seismicity in the Upper Silesian Coal Basin. Poland: Strong regional seismic events. Proc. 4th Int. Symp.: Rockbursts and Seismicity in Mines, ed. S.J. Gibowicz, 1997, Rotterdam, A.A. Balkema 1997, 213–217
- [25] *Mutke G.*: Parametry wstrząsów górniczych w bliskim i dalekim polu falowym. W: Geomechaniczne i seismologiczne modele ognisk wstrząsów górniczych, AGH — Katedra Górnictwa Podziemnego. Katowice, GIG 1999, 37–52
- [26] *Mutke G., Lurka A., Mirek A., Bargiel K., Wróbel J.*: Temporal changes in seismicity and passive tomography images: a case study of Rudna copper ore mine — Poland. V Intern. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Wyd. The South African Institute of Mining and Metallurgy 2001, 237–330
- [27] *Mutke G.*: Ground motion associated with coal mine tremors close to the underground openings in Seismogenic Process Monitoring. Eds. H. Ogasawara, T. Yanagidani and M. Ando, A.A. Balkema Publishers 2002, 91–102

- [28] *Pilecki Z., Mutke G.*: Oddziaływanie wstrząsu górniczego w strefie bliskiego pola falowego na wyrobisko górnicze — analiza numeryczna. X międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna Tapania, 2003, Katowice, GIG 2003
- [29] *Mutke G.*: Charakterystyka drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w odległościach bliskich źródła sejsmicznego w aspekcie oceny zagrożenia tąpnięciem. Prace Naukowe GIG, 87, 2007, 145
- [30] *Ogasawara H.*: Review of controlled earthquake — generation experiments in South — African deep gold mines. Eds. H. Ogasawara, T. Yanagidani and M. Ando, A.A. Balkema Publishers 2002, 119–150
- [31] *Tajduś A.*: Utrzymanie wyrobisk korytarzowych w świetle wpływu czasu na naprężenia, odkształcenia i strefy zniszczeniowe w górotworze. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, 154, 1987
- [32] *Tajduś A.*: Utrzymanie wyrobisk korytarzowych w świetle wpływu czasu na naprężenia, odkształcenia i strefy zniszczeniowe w górotworze. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, 154, 1990
- [33] *Tajduś A., Flisiak J., Cala M.*: Wpływ pierwotnego stanu naprężenia w górotworze na zagrożenie tapaniami. Mat. XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: Tapania 2004. GIG, 2004, 325–356
- [34] *Walaszczyk J., Drzewiecki J., Mutke G.*: Model niszczenia skał stropowych górotworu będącego źródłem intensywnych zjawisk dynamicznych. Kraków, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria z Lampką Górnictw, 10, 2002, 99
- [35] *Zorychta A.*: Rock burst in the light of the catastrophe theory. Archiwum Górnictwa, 1, 2000