

Szymon Modrzejewski*

PRĘDKOŚĆ DRGAŃ JAKO WSKAŹNIK PROPAGACJI PARASEJSMICZNEJ

Artykuł do dyskusji**

1. Wprowadzenie

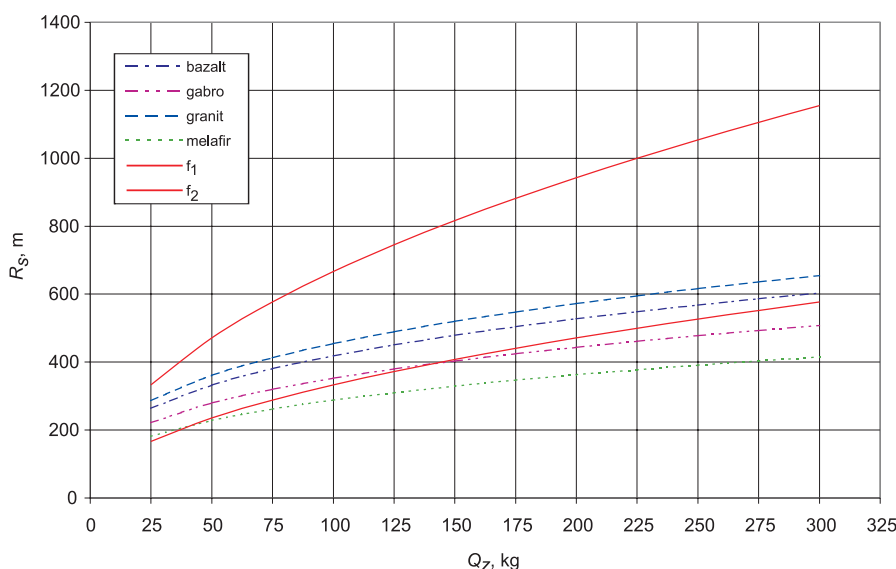
Stosowanie materiałów wybuchowych (MW) w procesach urabiania skał wymaga rozwiązania wielu problemów związanych z odspojeniem i rozdrobnieniem urobku, zapewnieniem wymaganego kształtu i wielkości usypu oraz ograniczeniem niekorzystnych skutków robót strzelniczych. W odkrywkowym górnictwie skalnym dominujące znaczenie ma ochrona środowiskowa otoczenia kopalń, a głównymi czynnikami niekorzystnych wpływów są: emisja drgań parasejsmicznych, rozrzut odłamków skalnych, powietrzna fala uderzeniowa oraz toksyczne produkty wybuchu. Sposób wyznaczania zasięgu tych zagrożeń, z wyjątkiem gazów postrzałowych, określony jest w rozporządzeniu wykonawczym Prawa geologicznego i górniczego [7]. Jednak podane zależności pozwalają na określanie stref w sposób ogólny, który należy traktować jako pierwszy stopień przybliżenia, uwzględniający maksymalny zasięg poszczególnych zagrożeń. Jest to jedna z przyczyn ograniczania wielkości odpalanych ładunków MW i częstych błędnych interpretacji. Przykład różnic pomiędzy teoretycznym a rzeczywistym zasięgiem zagrożeń przedstawiono na rysunku 1.

Powoduje to ograniczenia produkcyjne i zasięgu eksploatacji (tworzenie filarów) oraz wzrost kosztów. Wprowadzenie nowoczesnych materiałów wybuchowych i środków strzałowych oraz metod wyznaczania stref zagrożeń i warunków bezpieczeństwa środowiskowego pozwala na zmniejszenie zasięgu wpływów i poprawę efektywności wydobywania z eliminacją potencjalnych szkód. Dominujące znaczenie w tym przypadku ma emisja drgań parasejs-

* Instytut Górnictwa Odkrywkowego Poltegor-Institut, Wrocław

** Autor prezentuje w artykule w kilku kwestiach poglądy odmienne niż jeden z recenzentów. Po przeanalizowaniu dodatkowych wyjaśnień Autora, celem umożliwienia dyskusji na ten temat, materiał publikowany jest jako artykuł do dyskusji.

micznych, a istotną rolę odgrywa precyzyjne wyznaczenie istotnego wyróżnika porównawczego łączącego z jednej strony warunki urabialności calizny skalnej i emisji drgań, a z drugiej charakteryzującego propagację.



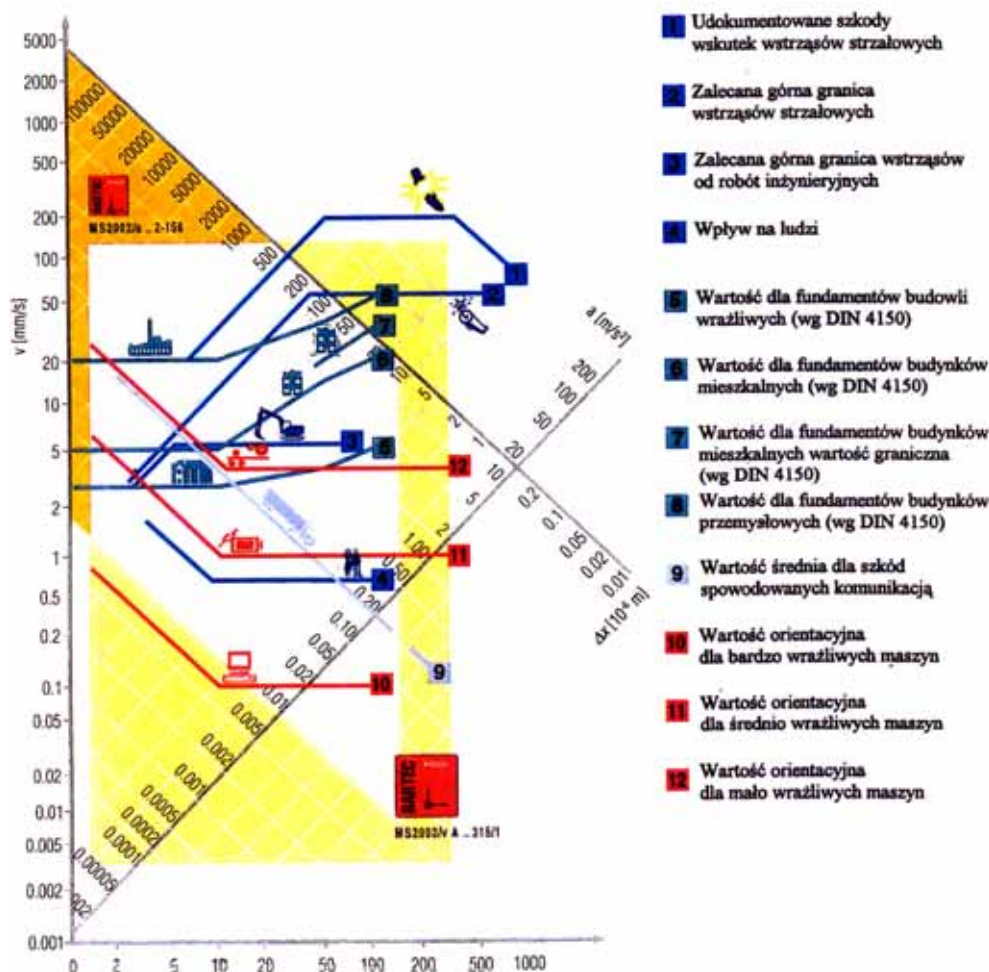
Rys. 1. Orientacyjny zasięg stref drgań sejsmicznych dla skał magmowych ($f_1 - f_2$ zasięg wg przepisów [7])

Podstawą interpretacji przedmiotowego zagadnienia jest identyfikacja procesów związanych z propagacją sejsmiczną. Procesy te można usystematyzować następująco [4]:

- sejsmika ziemi związana ze strukturalnymi ruchami skorupy ziemskiej i zjawiskami tektonicznymi;
- parasejsmika związana z eksploatacją podziemną złóż (tąpania, zawały, urabianie wybuchowe itp.);
- parasejsmika powierzchniowa towarzysząca robotom strzałowym w kopalniach odkrywkowych;
- parasejsmika powierzchniowa niskoenergetyczna (ruch środków transportowych, praca urządzeń — palowanie, wibromłoty itp.);
- sejsmika poszukiwawcza.

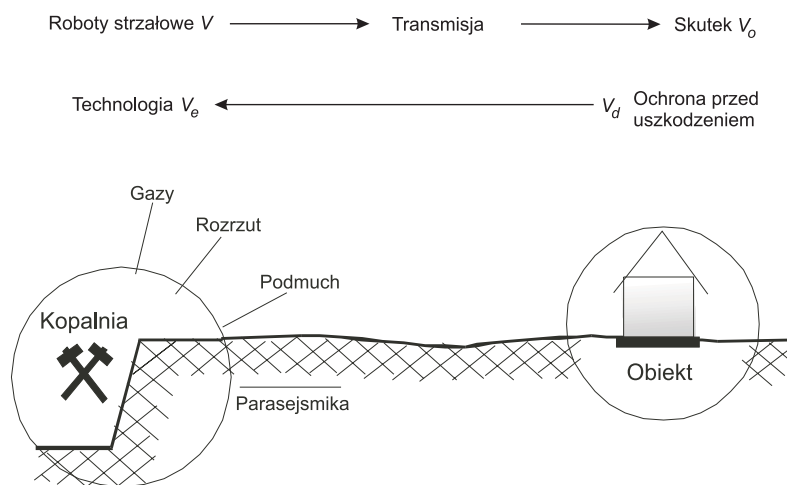
Każde z wymienionych oddziaływań, mimo wspólnych elementów podstawowych, ma swoją specyfikę. Stąd też nie można wzorów i uogólnień sprawdzonych w jednej grupie stosować bez odpowiedniego zaadaptowania i uwzględniania uwarunkowań w drugiej, ponieważ prowadzi to do wielu nieścisłości, a w konsekwencji do błędnej oceny skutków oddziaływań.

Różnice interpretacji ilustruje normatyw wg DIN 4150 Teil 2, 3 firmy BARTEC (rys. 2) [8], który podaje przykładowe kryteria szkodliwości drgań dla różnych emitorów w funkcji prędkości i częstotliwości. Prawidłowe rozwiązanie wpływu rozpatrywanych drgań na obiekty musi obejmować kompleksowo warunki emisji, propagacji i oddziaływań.



Rys. 2. Kryteria szkodliwości drgań

Schemat podstawowych czynników zasięgu oddziaływań parasejsmicznych zaprezentowano na rysunku 3. Z przedstawionego schematu wynika wpływ postępu frontu eksploatacyjnego na zmianę warunków propagacji. Częste pomijanie tego elementu propagacji drgań jest przyczyną licznych skarg mieszkańców i uszkodzeń obiektów.



Budowa geologiczno-tektoniczna i hydrogeologiczna

Czynniki wpływów parasejsmicznych		
Emisja	Propagacja	Oddziaływanie
— ilość wyzwolonej energii propagowanej MW, — naprężenia urabiające, — częstotliwość wzbudzanych drgań w funkcji parametrów strzelania, — czas emisji drgań	— dekrement tłumienia, — prędkość rozchodzenia się drgań, — częstotliwość drgań własnych górotworu, — rozproszenie energii, interferencja	— rodzaj podłoża i dekrement tłumienia podłoże-fundament, — prędkość oddziaływujących drgań i ich częstotliwość, — częstotliwość drgań własnych, — czas oddziaływania, — odporność na wstrząsy

Rys. 3. Warunki ochrony obiektów przed oddziaływaniem drgań parasejsmicznych emitowanych w kopalni odkrywkowej

2. Warunki emisji drgań

Główne czynniki technologiczne robót strzelniczych istotnie wpływających na emisję drgań to:

- wielkość maksymalnego ładunku MW przypadająca na jedno opóźnienie;
- czas opóźnienia milisekundowego w funkcji urabianej skały, schematu odpalania i parametrów siatki otworów;

- parametry geometryczne odstrzału — przewiert, przybitka, zabiór, odległość między otworami;
- rodzaj stosowanego MW skorelowanego z właściwościami urabianej calizny;
- sposób inicjacji MW w otworze;
- stan ociosów urabianej zabierki — spękania, progi przyspagowe, „przytrzymany ocios”.

Z dotychczasowych badań wynika, że prawidłowe uwzględnianie powyższych elementów pozwala na ograniczenie emisji drgań o 20 do 70%. Z przeglądu dotychczasowych metod modelowania procesów urabiania skał i propagacji drgań wynika, że ze względów praktycznych najdogodniejszym parametrem opisu większości zjawisk towarzyszących jest prędkość drgań, przy czym wyróżnić tu należy przede wszystkim prędkość rozchodzenia się drgań c i prędkość drgań górotworu w danym punkcie v .

3. Wskaźniki wpływów drgań na górotwór

W wielu kopalniach istotnym problemem jest określenie wpływów robót strzelniczych na górotwór poprzez oddziaływanie drgań parasejsmicznych. W przypadku rozchodzenia się fali sejsmicznej w ośrodku jednorodnym i izotropowym w kierunku x powstające naprężenia dynamiczne wyrażają zależności [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \rho \cdot c_p \cdot V_x \\ \sigma_{xy} &= \rho \cdot c_s \cdot V_y \\ \sigma_{xz} &= \rho \cdot c_s \cdot V_z \\ \sigma_y = \sigma_z &= \sigma_x \cdot \frac{v}{1-v}\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie:

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — naprężenia normalne,
- σ_{xy}, σ_{xz} — naprężenia ścinające,
- ρ — gęstość ośrodka,
- v — liczba Poissona,
- c_p, c_s — prędkość rozchodzenia się fali podłużnej P i poprzecznej S ,
- V_x, V_y, V_z — prędkości drgań w punkcie odpowiednio w kierunku x, y, z .

W literaturze zagranicznej znane są także empiryczne skale, które podają relacje pomiędzy wartościami prędkości drgań w punkcie z efektami ich oddziaływania na strukturę ośrodka skalnego.

Przykładem takiej skali może być skala Dowdinga i Rozena, mając następującą postać [2]:

- I stopień — brak zniszczeń — prędkości poniżej 200 mm/s;
- II stopień — słabe zniszczenia (odspojenia i małe szczeliny) — prędkość 200÷400 mm/s;
- III stopień — wyraźne zniszczenia (duże szczeliny) — prędkość ponad 400 mm/s.

Podstawowe parametry wytrzymałościowe i wskaźniki sprężystości urabianych skał mające istotne znaczenie w projektowaniu zakładów przeróbczych oraz charakteryzujące pośrednio jakość produktów finalnych można wyznaczyć również w oparciu o prędkości rozchodzenia się fal. Wskaźniki dynamiczne określają następujące formuły:

- moduł sprężystości E

$$E = \frac{\rho \cdot c_s^2 \cdot (3c_p^2 - 4c_s^2)}{c_p^2 - c_s^2} \quad (2)$$

- liczba Poissona ν

$$\nu = \frac{c_p^2 - 2c_s^2}{2(c_p^2 - c_s^2)} \quad (3)$$

- moduł sprężystości postaci (sztywności) G

$$G = \rho \cdot c_s^2 \quad (4)$$

- moduł sprężystości objętościowej K

$$K = \rho \cdot \left(c_p^2 - \frac{4}{3} c_s^2 \right) \quad (5)$$

- stała Lamego λ

$$\lambda = \rho \cdot (c_p^2 - 2c_s^2) \quad (6)$$

Przykładowe prędkości fal podłużnych dla poszczególnych rodzajów skał przedstawiono w tabeli 1. W warunkach polskich w skałach zwięzłych prędkość rozchodzenia się drgań poprzecznych jest około 1,73 raza mniejsza niż podłużnych. Rzeczywistą prędkość rozchodzenia się drgań należy określić na podstawie pomiarów.

TABELA 1

Wartości prędkości rozchodzenia się fal podłużnych c_p dla utworów skalnych [3]

Rodzaj skały	c_p , km/s
Skaly krystaliczne i metamorficzne	
Bazalt	4,5÷6,0
Granit	4,0÷5,7
Gabro	6,25
Dioryt	4,58
Perydoryt	7,00
Sjenit	4,95
Noryt	6,20
Diabaz	4,0÷5,0
Łupək krystaliczny	4,0÷6,8
Kwarcyt	6,1
Marmur	4,95
Skaly osadowe	
Gips	1,5÷4,5
Wapień dolomit	2,5÷6,0
Anhydryt, sól kuchenna	4,5÷6,5
Margiel	2,0÷3,5
Kreda	1,8÷3,5
Piaskowiec miękki	1,5÷2,5
Piaskowiec zbity	1,8÷4,0
Łupək gliniasty	2,7÷4,8
Glina	1,2÷2,5
Piasek zawodniony	0,2÷1,8
Piasek suchy	0,1÷0,6
Gleba	0,3÷0,9
Warstwa przypowierzchniowa — zwietrzelina	0,1÷0,6

W oparciu o przedstawione zależności i pomiary terenowe prędkości rozchodzenia się drgań i prędkości drgań w punkcie można określić parametry i wskaźniki wytrzymałości-

we urabianych skał. Na podstawie przedstawionych cech wiele czołowych firm światowych opracowało kryteria doboru i technologii pracy zarówno maszyn urabiających, jak i przeróbczych (Caterpillar, Atlas Copco, Komatsu itp.)

4. Oddziaływania parasejsmiczne na górotwór

W wyniku oddziaływania sejsmicznego na górotwór powstające naprężenia mogą powodować naruszenie ośrodka. Zmiany właściwości fizykomechanicznych gruntów przejawiają się zmianą kohezji, kąta tarcia wewnętrznego oraz zmianami strukturalnymi. Wieloletnie badania i obserwacje skutków oddziaływania sejsmicznego wykazały, że zasięg ten jest zróżnicowany, ale najczęściej zawiera się w granicach od kilku do kilkudziesięciu metrów. Reakcje górotworu na drgania cechuje znaczna różnorodność; zaobserwowano między innymi następujące przypadki:

- osiadanie podłoża w wyniku osuwisk i spełzania zboczy;
- wzajemne przesunięcia warstw skalnych lub ich rozwarstwienia;
- uaktywnienie uskoków tektonicznych;
- rozluźnienie skał zwięzłych (np. zawodnione piaski przy prędkości cząstek 6÷8 cm/s ulegają upłynnieniu);
- zagęszczenie nawodnionych stref gruntowych;
- zmianę hydrogeologicznych warunków wód podziemnych.

Z przedstawionych danych wynika, że roboty strzelnicze oprócz naruszenia struktury skał w bezpośrednim otoczeniu urabianej calizny mogą wywołać również niekorzystne i niebezpieczne zjawiska w przyległych utworach spoistych (gliny, iły), dlatego opisane problemy powinny być uwzględnione w fazie projektowania i prowadzenia eksploatacji z wykorzystaniem MW i prognozowaniu szkód górniczych, a podstawowym miernikiem tych zagrożeń powinna być prędkość rozchodzenia się drgań i prędkości drgań w punkcie.

5. Prędkość drgań propagacji parasejsmicznej

Propagacja parasejsmiczna może być sprowadzona do modelu funkcyjnego zawierającego trzy grupy elementów:

- 1) prędkość drgań w punkcie, charakteryzowanych przez spektrum amplitudowo-częstotliwościowe;
- 2) właściwości przewodnictwa sejsmicznego górotworu opisane współczynnikiem tłumienia drgań w funkcji odległości pomiędzy danym punktem, w którym występują drgania o określonej prędkości, a miejscem odstrzału;
- 3) sposób prowadzenia robót strzelniczych, tj. technologicznych warunków strzelania jako emitora drgań.

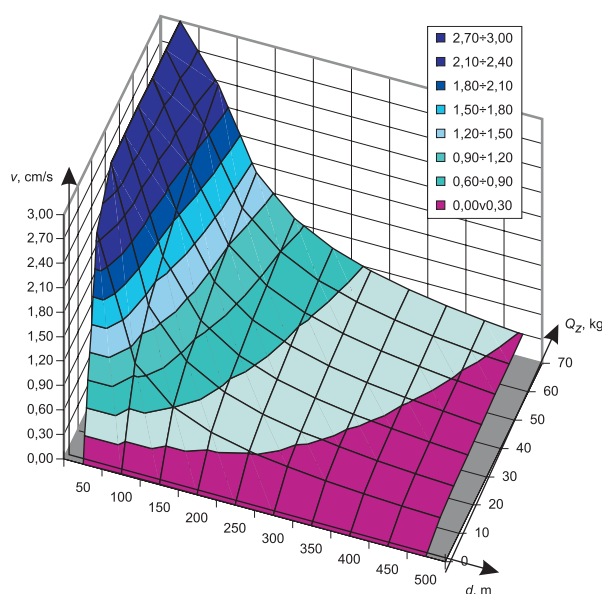
Jednym z podstawowych elementów modelowania propagacji parasejsmicznej jest prędkość drgań. Ogólnie wzajemną zależność prędkości drgań w funkcji pozostałych czynników można zapisać [5]

$$V = K_1 \cdot Q^\alpha \cdot r^{-\beta} \quad (7)$$

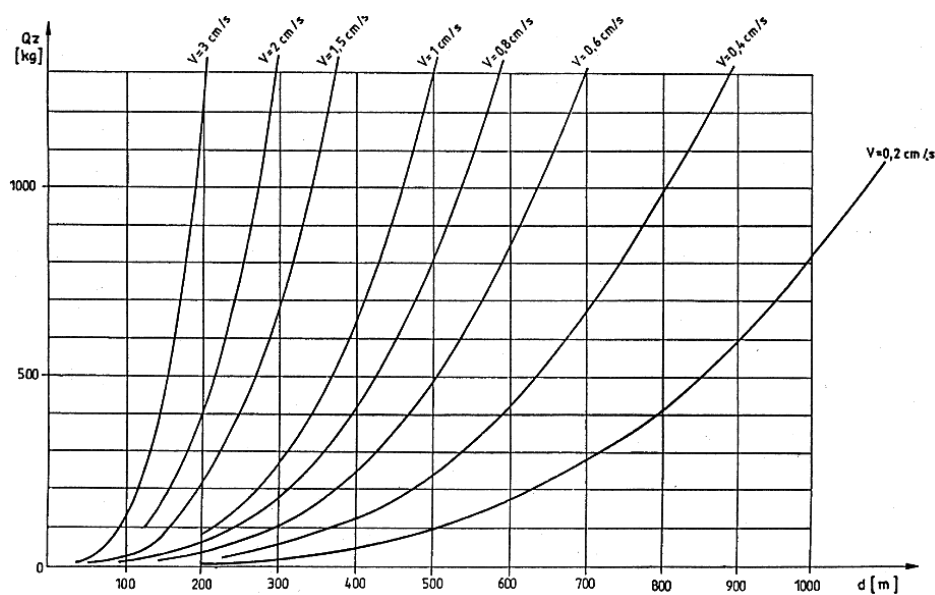
gdzie:

- V — prędkość drgań w punkcie,
- K_1, α, β — współczynniki określające sprężyste właściwości górotworu oraz warunki emisji drgań,
- Q — wielkość odpalanego ładunku MW,
- r — odległość między miejscem odpalenia ładunku Q a punktem, w którym występują drgania V .

Podana formuła po wycechowaniu (K_1, α, β) w oparciu o bezpośrednie pomiary terenowe, umożliwia prognozowanie propagacji drgań parasejsmicznych uwzględniających określanie następujących wielkości: $V = f_1(Q, r)$, $Q = f_2(V, r)$, $r = f_3(Q, V)$, i stanowi istotny element sterowania technologią robót strzelniczych. W przedstawionym przypadku skomplikowane zagadnienie propagacji drgań po zastosowaniu uproszczeń sprowadzone zostaje do rozwiązania przestrzennej, trójwymiarowej zależności (rys. 4). Graficzny obraz zależności (7) dla jednej z kopalń granitu przedstawiono na rysunku 5 [4, 5, 6].

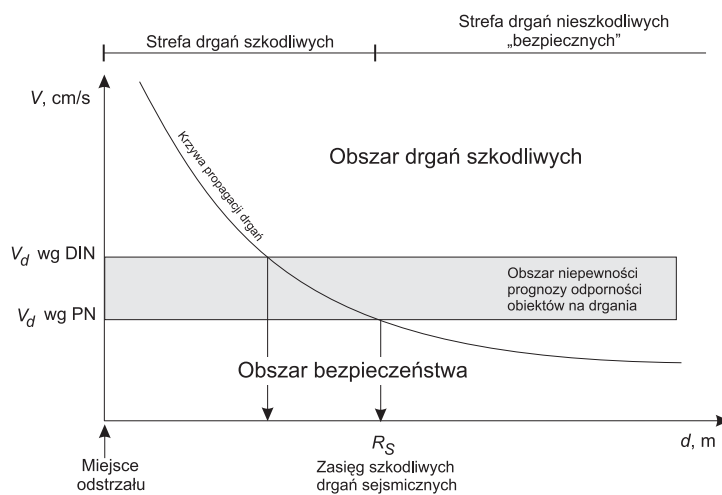


Rys. 4. Zależność między ładunkiem Q_z , odległością do miejsca strzelania d i prędkością drgań sejsmicznych v



Rys. 5. Zależność pomiędzy odległością a ładunkiem na zwłokę w funkcji prędkości drgań sejsmicznych

Jak widać, prędkość drgań w punkcie stanowi jedno z podstawowych kryteriów propagacji drgań. Jej wpływ na wielkość strefy szkodliwych drgań przedstawiono na rysunku 6. Dlatego w prognozowaniu zasięgu wpływów niezbędne jest precyzyjne wyznaczenie rzeczywistego kryterium odpornościowego obiektów.



Rys. 6. Wpływ progu odporności obiektów na zasięg strefy szkodliwych drgań sejsmicznych

W oparciu o zależność (7) i na podstawie pomiarów cechujących warunki propagacji drgań wzór na zasięg bezpiecznej strefy drgań przybiera postać [4]

$$R_s = \left(\frac{K_1}{V_d} \right)^a \cdot \sqrt{Q_z}, \text{ m} \quad (8)$$

gdzie:

- V_d — odporność sejsmiczna obiektu lub drgań na granicy strefy,
- Q_z — maksymalny ładunek MW przypadający na jeden stopień opóźnienia milisekundowego,
- K_1, a — współczynniki propagacyjne wyznaczone na podstawie bezpośrednich pomiarów.

Ochrona obiektów możliwa jest poprzez dostosowanie technologii prowadzenia robót strzelniczych do wymagań wynikających z odporności obiektów na drgania V_d oraz zastosowanie odpowiednich parametrów strzelania (schemat odpalania, czasy opóźnień milisekundowych, przewiert, przybitka, odległość między otworami, zabiór, rodzaj MW i sposób inicjacji) oraz wielkość odpalanego ładunku maksymalnego MW przypadającego na jedno opóźnienie milisekundowe. Jednym ze sposobów jest też izolacja obiektów lub grupy obiektów przed oddziaływaniem drgań [4].

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że wyznaczenie odporności obiektów na drgania i określenie ewentualnego związku przyczynowego uszkodzeń z działalnością górniczą powinno być określone na podstawie bezpośrednich pomiarów, a podstawą takiej oceny musi być prędkość oddziałujących drgań oraz odpowiadająca im częstotliwość. Zmienną niezależną jest dominująca częstotliwość pomierzonych drgań obiektów, stanowiąca ich odpowiedź na wymuszenie sejsmiczne uwarunkowane właściwościami podłoża, sposobem posadowienia, konstrukcją i stanem technicznym obiektów, a zmienną zależną — dopuszczalna wielkość amplitudy przemieszczeń poziomych stanowiących próg bezpieczeństwa. Pominięcie powyższego skutkuje błędną oceną zagrożenia.

Jako przykład można podać 15-letnie obserwacje stanu obiektów kubaturowych wsi przyległej do jednej z kopalń granitu. W przeszłości, przed 1985 roku, przy wyznaczaniu zasięgu strefy drgań sejsmicznych jako najmniejszą dopuszczalną prędkość drgań sejsmicznych przyjęto $V_d = 0,6 \text{ cm/s}$ i w oparciu o nią określono wielkości dopuszczalnych ładunków MW. Równocześnie w najbardziej zagrożonych obiektach w miejscach uszkodzeń założono plomby kontrolne. W ostatnim okresie przeprowadzono pomiary sprawdzające i powtórnie określono odporność sejsmiczną tych obiektów, która obecnie wynosi około $V_d = 0,20 \text{ cm/s}$. Wynikałoby z tego, że wszystkie poprzednio założone plomby powinny ulec zniszczeniu, jednak przeprowadzona inwentaryzacja ich stanu po 19 latach nie wykazała uszkodzeń. Po przeanalizowaniu oddziałujących drgań stwierdzono, że charakteryzują się one bardzo krótkim czasem działania, wynoszącym około $0,5 \div 0,8 \text{ s}$, i bardzo dużą częstotliwością drgań, około $40 \div 70 \text{ Hz}$. W wyniku tego na skutek bezwładności badanych obiektów oraz kilkakrotnego zróżnicowania dominujących częstotliwości drgań własnych obiektów (ok. $8 \div 15 \text{ Hz}$)

z dominującą częstotliwością drgań oddziałujących tylko niewielka (ok. 25÷50%) część energii przenoszonych drgań stanowiła czynnik niszczący, wpływający na te obiekty. Z tego wynika, że przy ocenie wpływów drgań na obiekty oprócz prędkości drgań wymuszonych należy uwzględniać również stosunek okresu drgań własnych i oddziałujących oraz prędkość rozchodzenia się podłużnej fali sejsmicznej.

6. Podsumowanie

Z przedstawionego przekroju problematyki emisji, propagacji i oddziaływania drgań wynika, że podstawowym parametrem pozwalającym na porównywalność jego poszczególnych faz jest prędkość drgań parasejsmicznych, obejmująca przede wszystkim prędkość rozchodzenia się drgań, prędkość drgań w punkcie i odpowiadający im okres drgań. Parametry te związane są z warunkami geologiczno-tektonicznymi podłoża, a w konsekwencji ze zmianą miejsca robót strzelniczych wynikających z postępu wydobywania. Wpływa to w znaczący sposób na warunki przewodnictwa sejsmicznego w obrębie eksploatacji. Dlatego w przypadku prowadzenia robót strzelniczych w pobliżu obiektów chronionych konieczne jest prowadzenie pomiarów kontrolnych warunków propagacji sejsmicznej opartych na prędkości drgań. W prognozowaniu zasięgu wpływów dynamicznych drgań parasejsmicznych niezbędne jest precyzyjne wyznaczenie rzeczywistego kryterium odpornościowego obiektów oraz dopuszczalnej wielkości drgań na granicy strefy. Uwzględnienie przedstawionych elementów w procesach odkrywkowego, wybuchowego urabiania skał jest istotnym czynnikiem poprawy efektywności wydobywania i bezpieczeństwa sejsmicznego przyległych obiektów.

LITERATURA

- [1] *Brady B.G., Brown E.T.*: Rock Mechanics for Underground Mining. U.K. George Allen and Unwin 1995
- [2] *Dowding C.*: Blast Vibration Monitoring for Rock Engineering Comprehensive Rock Engineering. Londyn, Pergamon Press England 1993
- [3] *Fajkiewicz Z. i in.*: Zarys geofizyki stosowanej. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1972
- [4] *Modrzejewski S.*: Prognozowanie wpływu robót strzelniczych prowadzonych w górnictwie odkrywkowym na środowisko. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004
- [5] *Onderka Z.*: Efekt sejsmiczny strzelania — uwagi i zalecenia, Konferencja pt. Technika Strzelnicza w górnictwie, ART-TEKST, Jaszowiec 2001
- [6] *Onderka Z., Sieradzki J., Winzer J.*: Technika strzelnicza. T. 2. Wpływ robót strzelniczych na otoczenie kopalń odkrywkowych. UWND AGH, Kraków 2003
- [7] Rozporządzenie MGPIPS z 1 kwietnia 2003 roku w sprawie przechowywania i używania środków strzałowych i sprzętu strzałowego w zakładach górniczych (Dz.U. Nr 72, poz. 655)
- [8] *Erschütterungsme systeme, Bartec GmbH Bad Mergentheim* 2004

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.