

Józef DUBIŃSKI

Janusz DWORAK

Grzegorz MUTKE

Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

ZALEŻNOŚĆ DYNAMICZNYCH PARAMETRÓW DRGAŃ GRUNTU  
ZWIĄZANYCH Z WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI OD WŁASNOŚCI  
PRZYPOWIERZCHNIOWYCH UTWORÓW GEOLOGICZNYCH

**Streszczenie.** Wykazano, że wartości dynamicznych parametrów drgań na powierzchni ziemi wyraźnie zależą od lokalnych warunków sejsmologicznych zdeterminowanych w głównym stopniu przez parametry przypowierzchniowej warstwy utworów geologicznych.

Przedstawiono analityczny sposób określenia współczynnika 'amplifikacji' drgań dla warstwowego modelu nadkładu uwzględniając typowe przekroje sejsmologiczne utworów czwartorzędowych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.

Zastosowano wyniki szczegółowej analizy w warunkach kopalni węgla kamiennego Niwka-Modrzejów sporządzając mapę współczynnika amplifikacji drgań dla całego obszaru kopalń i uwzględniając jego rozkład w prognozie ryzyka sejsmicznego.

## 1. WPROWADZENIE

Rejon Górnośląskiego Zagłębia Węglowego należy do obszarów charakteryzujących się wysokim poziomem sejsmiczności indukowanej działalnością górnictw kopalń węgla kamiennego [1].

Przejawem tego jest zarówno ilość zagrożonych kopalń (ponad 50%), jak i ilość występujących silnych zjawisk sejsmicznych oraz tępań. Poziom intensywności zjawisk sejsmicznych jest w tym przypadku wyrażony umownie poprzez wartość energii sejsmicznej określanej na podstawie sejsmogramów rejestrowanych przez sieci sejsmologiczne.

Dla przedziału czasowego 1977-1986 obejmującego okres 10-letni charakterystyka energetyczno-ilościowa sejsmiczności GZW jest następująca:

Tablica 1

Charakterystyka energetyczno-ilościowa sejsmiczności GZW  
dla okresu 1977-1986

Przedział energii E (J)	Zakres magnitud	Ilość zjawisk	Średnio rocznie
$10^5-10^6$	1,5-2,0	19862	1986
$10^6-10^7$	2,0-2,5	2886	288
$10^7-10^8$	2,5-3,0	295	29
$10^8-10^9$	3,0-3,5	28	2-3
$> 10^9$	$\geq 3,5$	7	0-1

Powyższa sejsmiczność jest źródłem zarówno zagrożenia tąpniętami i podziemnym środowisku pracy, jak i zagrożenia sejsmicznego dla środowiska naturalnego na powierzchni ziemi.

Doświadczenia praktyczne wskazują [2], że zjawiska sejsmiczne o energiach wymienionych w tablicy 1 są w większości odczuwane na powierzchni w formie od bardzo słabych, ledwo zauważalnych drgań do bardzo silnych wstrząsów powodujących uszkodzenia najczęściej w obiektach budowlanych.

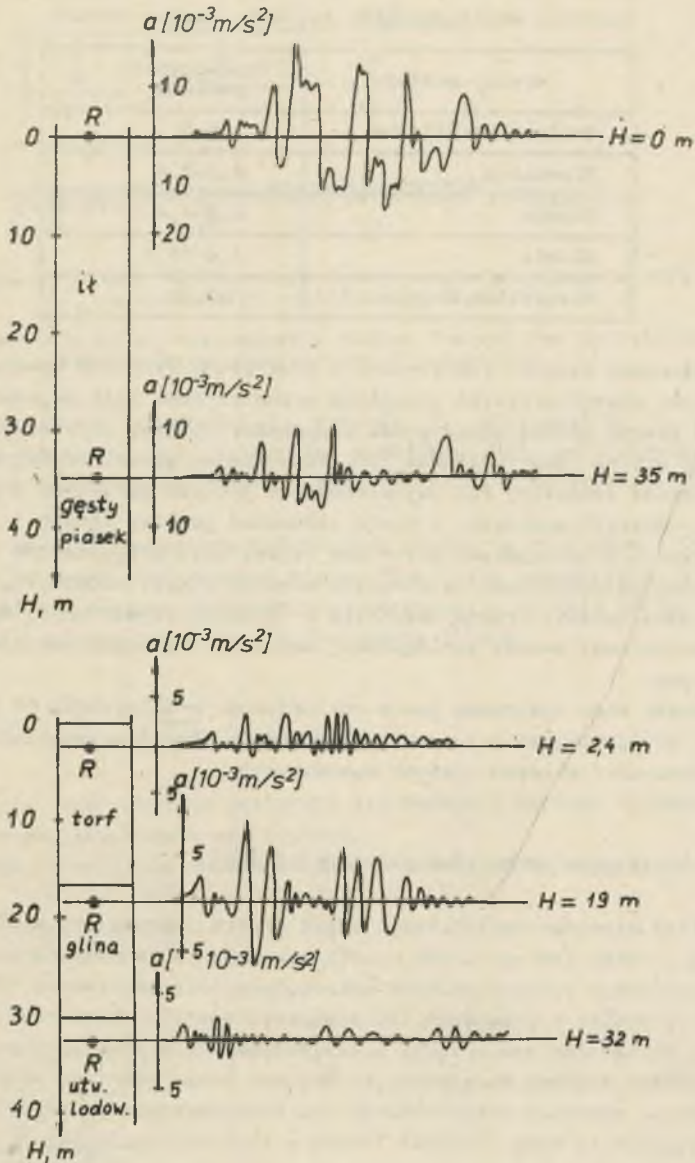
Powstaje zatem problem obiektywnej oceny efektów dynamicznych związanych z wstrząsami górotworu. Wymaga on dysponowania nie tylko metodami bezpośrednich pomiarów sejsmometrycznych, ale również metodami pośrednimi z uwagi na liczebność punktów, w których przedmiotowej oceny należy dokonać [3, 8].

W grupie metod pośrednich niezwykle istotnym czynnikiem, decydującym często o wyniku oceny, jest charakterystyka przypowierzchniowej warstwy utworów geologicznych (najczęściej czwartorzędowych) - uwzględniająca ich litologię i miąższości.

Przedmiotem niniejszej pracy jest przedstawienie zależności dynamicznych parametrów drgań gruntu związanych z wstrząsami górniczymi od powyższej charakterystyki oraz ocena zjawiska na podstawie danych kopalnianych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ZAGADNIENIA

Wpływ lokalnej budowy przypowierzchniowych utworów geologicznych na drgania gruntu dochodzące do powierzchni jest finalnym efektem całego szeregu zjawisk związanych z procesem, w którym mechanizm źródła i charakterystyki przejścia fali sejsmicznej przez ośrodek odgrywają decydującą rolę. Przy stabilnych warunkach w podłożu wpływ ten przejawia się w postaci tzw. dynamicznego wzmocnienia (amplifikacji) drgań. Zjawisko to zaobserwował już w 1906 r. Reid [4] podczas trzęsienia ziemi w San Francisco. Powstało wówczas pojęcie współczynnika podłoża.



Rys. 1. Przykłady rejestracji przyspieszenia drgań wywołanych wstrząsami górotworu na różnych głębokościach od powierzchni

Fig. 1. Examples of Acceleration Records of Vibrations Caused by Mining Tremors at Various Depths below Surface

Tablica 2

Wartości współczynników podłoża (według Reida).

Rodzaj podłoża	Współczynnik podłoża
Skały krystaliczne	1,0
Piaskowce	1,0-2,4
Piasek	2,4-4,4
Aluwia	4,4-11,4
Niewielkie bagna	12,0

Współczesne badania teoretyczne i obserwacje terenowe wskazują, że wspomniane charakterystyki przejścia przez ośrodek fali sejsmicznej są w dużej mierze kształtowane przez przypowierzchniową warstwę gruntu, najczęściej utwory czwartorzędowe [5]. Filtracyjne własności tej warstwy mogą wzmacniać amplitudy fal sejsmicznych w jednych warunkach i przy określonych częstotliwościach, a także redukować je przy innych.

Na rys. 1 przedstawiono przykłady rejestracji przyspieszeń wykonanych na różnych głębokościach warstwowych utworów czwartorzędowych. Ilustrują one wyraźne zmiany, przede wszystkim w dynamice rejestracji, wywołane wpływem lokalnej budowy geologicznej nadkładu w miejscu instalacji odbiornika drgań.

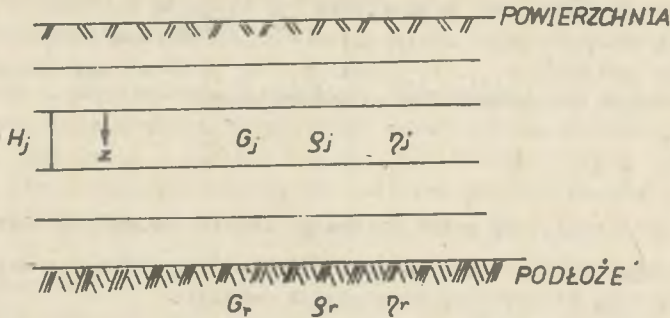
Zjawisko może wykazywać pewną nieliniowość w zależności od mechanizmu źródła, przejawiającą się pewną odmiennością charakterystyk wzmocnień dla słabych i silnych zjawisk dynamicznych.

### 3. ANALITYCZNY MODEL ZJAWISKA AMPLIFIKACJI

Analiza zjawiska amplifikacji drgań gruntu poprzez przypowierzchniową warstwę utworów geologicznych oparta może być na jednowymiarowym modelu uwzględniającym jedynie pionowo propagującą falę poprzeczną "S". Założenie takie wynika z przyjęcia, że większość energii sejsmicznej przenoszona jest w kierunku powierzchni ziemi poprzez fale objętościowe typu S.

W osadach poziomo warstwowanych drgania powierzchniowe wywołane falą padającą są wynikiem interferencji fal zmierzających do góry i w dół, posiadających tę samą prędkość fazową w kierunku poziomym. Nieregularności powierzchni granicznych będą powodować wzrost fal rozproszonych o poziomych prędkościach fazowych różniących się od prędkości fazowych fal padających, co powoduje wzmocnienie efektu interferencyjnego.

Przyjęto do rozwiązania zagadnienia model ośrodka lepkosprężystego (rys. 2), w którym założono jednorodność każdej warstwy opisywanej przez



Rys. 2. Model warstwowy ośrodka lepkosprężystego przyjęty do obliczeń współczynnika amplifikacji drgań

Fig. 2. Layered Model of Viscoelastic Medium Assumed for Computation of Amplification Coefficient of Vibrations

miąższość  $H_j$ , moduł sztywności  $G_j$ , gęstość  $\rho_j$  oraz lepkość  $\eta_j$  (bądź współczynnik tłumienia  $D_j$ ). Zalegające w podłożu skały aproksymowane są modelem jednorodnej lepkosprężystej półprzestrzeni o parametrach  $G_r, \rho_r, \eta_r$  [6, 7].

Zagadnienie przy powyższych założeniach polega na rozwiązaniu odpowiednich równań falowych. Dla pionowo propagującej fali poprzecznej, w której występuje jedynie pozioma składowa przemieszczeń, w obrębie każdej warstwy, musi być spełnione następujące równanie falowe:

$$\rho_j'' u = G_j \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta_j \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

Rozwiązania tego równania poszukuje się zwykle w postaci równania przemieszczeń na powierzchniach granicznych.

Zakładając harmoniczny charakter drgań, rozwiązanie to ma postać:

$$U = U_j(z) \cdot \exp(i\omega t) \quad (2)$$

gdzie:

$$U_j(z) = E_j \exp(ip_j z) + F_j \exp(-ip_j z) \quad (3)$$

$$p_j = \frac{\omega^2 \cdot \rho_j^2}{(G_j + i\omega\eta_j)} \quad (4)$$

Pierwszy człon rozwiązania opisuje falę poprzeczną propagującą w kierunku "-z" z amplitudą zespoloną  $E_j$ , natomiast drugi człon określa falę

propagującą w kierunku "+" z amplitudą  $F_j$ . Ciągłość naprężeń i odkształceń na powierzchniach granicznych pozwala określić rekurencyjne formuły wyznaczające amplitudy  $E_{j+1}$ ,  $F_{j+1}$  oraz  $E_j$ ,  $F_j$  w dwóch sąsiednich warstwach. Natomiast na powierzchni swobodnej mamy:

$$E_1 = F_1 = 1/2 \cdot A_0 \quad (5)$$

gdzie  $A_0$  jest amplitudą przemieszczenia rejestrowanego na powierzchni.

Wykorzystując rekurencyjne formuły (3) i (4) i zaczynając obliczanie od górnej warstwy otrzymujemy następujące relacje:

$$E_r = e_r(\omega) \cdot E_1 \quad (6)$$

$$F_r = f_r(\omega) \cdot E_1 \quad (7)$$

wyznaczające amplitudy fal w skałach podłoża, gdzie funkcje  $e_r(\omega)$  i  $f_r(\omega)$  określane są przez założenie  $E_1 = F_1 = 1$ .

Dzięki temu możliwe jest określenie dwu różnych funkcji przejścia dla nakładu.

Pierwsza z nich opisuje amplitudę na powierzchni w stosunku do amplitudy w podłożu:

$$H_1(\omega) = \frac{2E_1}{E_r + F_r} = \frac{1}{e_r(\omega) + f_r(\omega)} \quad (8)$$

Drugą funkcją wiąże amplitudy powierzchniowe z amplitudami, jakie wystąpiłyby w przypadku zalegania skał twardych na powierzchni:

$$H_2(\omega) = \frac{2E_1}{2E_r} = \frac{1}{e_r(\omega)} \quad (9)$$

Obu funkcji  $H_1$  i  $H_2$  określają współczynniki amplifikacji systemu warstw. Funkcja  $H_1(\omega)$  jest niezależna od wartości sprężystych skał, natomiast parametry te determinują funkcję  $H_2(\omega)$ .

W rozważanym modelu wystąpić może również zjawisko tłumienia fal sprężystych w nakładzie. Jeśli przyjmiemy model tłumienia lepkiego pociągający za sobą stałość współczynnika lepkości  $\eta_j$ , to prowadzi on do silnego zredukowania amplitudy drgań.

Mniejsze i bardziej realne zmiany otrzymuje się zakładając, że  $\eta_j$  jest odwrotnie proporcjonalne do częstotliwości (tłumienia z histerezą). W tym przypadku współczynnik tłumienia jest równy:

$$D_j = \frac{\eta_j \cdot \omega}{2G_j} \quad (10)$$

jest stały w całym przekroju.

#### 4. OBLICZENIE FUNKCJI AMPLIFIKACJI DLA TYPOWYCH MODELI SEJSMOGEOLOGICZNYCH GZV

W celu przetestowania użyteczności przedstawionego powyżej analitycznego modelu amplifikacji drgań przez warstwę przypowierzchniową przeprowadzono obliczenia i analizę funkcji amplifikacji  $H_1$  i  $H_2$  dla kilku rodzajów modeli sejsmogeologicznych, najczęściej spotykanych w praktyce w kopalniach GZV.

##### Model I

Nakład czwartorzędowy zbudowany jest z suchych utworów piaszczysto-ilestych o przewodze frakcji piaszczystej. Wartości współczynnika amplifikacji (funkcja  $H_1$ ) w zależności od miąższości nakładu i częstotliwości fali podają tablice 3, 4 i 5.

Tablica 3

Wartości współczynnika amplifikacji dla modelu I

Miąższość warstw, m	Częstotliwość f, Hz		
	2,5	5,0	7,5
1	1,000	1,003	1,014
3	1,002	1,026	1,145
5	1,005	1,075	1,510
7	1,009	1,157	2,606
9	1,015	1,284	5,456
11	1,023	1,479	2,415
15	1,043	2,314	1,011
19	1,070	4,918	0,824
25	1,127	2,316	1,210
30	1,192	1,288	0,914
40	1,389	0,838	0,520
50	1,738	0,938	0,378
60	2,413	1,301	0,271
70	3,884	0,786	0,178
80	5,432	0,540	0,133
90	3,4459	0,520	0,088
100	2,154	0,541	0,065
150	0,864	0,213	0,011

Analiza tego modelu wskazuje na występowanie pewnych przedziałów miąższości nadkładu, przy których występuje wyraźne wzmocnienie amplitudy drgań. Zależy ono również od częstotliwości fali. Dla większych miąższości nadkładu i częstotliwości 5,0 i 7,5 Hz ma miejsce silne tłumienie drgań przez ośrodek.

#### Model II

Nadkład czwartorzędowych zbudowany jest z piaszczysto-ilastych utworów z przewagą frakcji ilastej. Odpowiednie wartości współczynnika amplifikacji podaje tablica 4.

Tablica 4

Wartości współczynnika amplifikacji drgań dla modelu II

Miąższość warstwy, m	Częstotliwość f, Hz		
	2,5	5,0	7,5
1	1,000	1,000	1,000
3	1,000	1,001	1,008
5	1,000	1,004	1,023
7	1,001	1,009	1,047
9	1,002	1,015	1,080
11	1,003	1,023	1,124
15	1,006	1,043	1,254
19	1,009	1,070	1,466
25	1,016	1,127	2,101
30	1,023	1,192	3,402
40	1,042	1,389	3,446
50	1,068	1,738	1,455
60	1,100	2,412	0,982
70	1,140	3,884	0,837
80	1,190	5,432	0,845
90	1,250	3,446	0,993
100	1,320	2,154	1,254
150	2,084	0,865	0,512

Występują również wyraźne zmiany współczynnika amplifikacji drgań szczególnie dla wyższych częstotliwości.



Model III

Nadkład czwartorzędowy reprezentują zwarte utwory ilaste. Wartości współczynnika amplifikacji przedstawia tablica 5.

Tablica 5

Wartości współczynnika amplifikacji drgań dla modelu III

Miąższość warstwy, m	Częstotliwość f, Hz		
	2,5	5,0	7,5
1	1,0000	1,0000	1,0000
3	1,0000	1,0000	1,0003
5	1,0000	1,0001	1,0008
7	1,0000	1,0003	1,0015
9	1,0000	1,0005	1,0026
11	1,0000	1,0008	1,0039
15	1,0000	1,0014	1,0073
19	1,0001	1,0023	1,0117
25	1,0002	1,0040	1,0205
30	1,0003	1,0057	1,0297
40	1,0006	1,0103	1,0539
50	1,0009	1,0161	1,0865
60	1,0014	1,0234	1,1287
70	1,0019	1,0320	1,1821
80	1,0025	1,0422	1,2494
90	1,0032	1,0539	1,3337
100	1,0040	1,0673	1,4400
150	1,0090	1,1629	2,7137

W modelu tym wartości współczynnika amplifikacji są w dużym zakresie zarówno miąższości, jak i częstotliwości drgań zbliżone do 1,0. Dopiero od miąższości 60 m przy częstotliwości 7,5 Hz zaczyna się mierzalny, przekraczający 10% wartości wzrost współczynnika amplifikacji.

Z analizy uzyskanych danych wynika, że im bardziej luźna jest struktura przypowierzchniowej warstwy nadkładu, tym przy mniejszej jej miąższości występuje maksimum współczynnika amplifikacji drgań. Wzrost częstotliwości drgań powoduje także występowanie powyższego maksimum przy mniejszych miąższościach warstwy przypowierzchniowej.

Zakres wartości współczynnika amplifikacji, który określono dla typowych modeli sejsmogeologicznych GZW w przedziale od 0 do 150 m, jest dość szeroki: od wartości 1,0 do 5,45 w kierunku wzmocnienia i od 1,0 do 0,011 w kierunku osłabienia amplitudy drgań. Są to wartości, które mogą w sposób znaczny zmienić wielkość amplitudy drgań, a tym samym wpłynąć na ocenę stopnia ich szkodliwości.

#### 5. OKREŚLENIE FUNKCJI AMPLIFIKACJI DLA WYTYPOWANEJ KOPALNI

Opierając się na przedstawionych w poprzednim rozdziale tablicach służących do wyznaczania wartości współczynnika amplifikacji drgań przypowierzchniowej warstwy utworów czwartorzędowych określono jego wartości posługując się mapą utworów czwartorzędowych rozpoznaną wierceniami i innymi robotami górniczymi z powierzchni. Wykreślona została następnie mapa współczynnika amplifikacji, na której wydzielono następujące strefy anormalne (rys. 3):

- obszary, gdzie współczynnik amplifikacji jest większy niż 2,0,
- obszary, gdzie współczynnik amplifikacji jest mniejszy od 1,0.

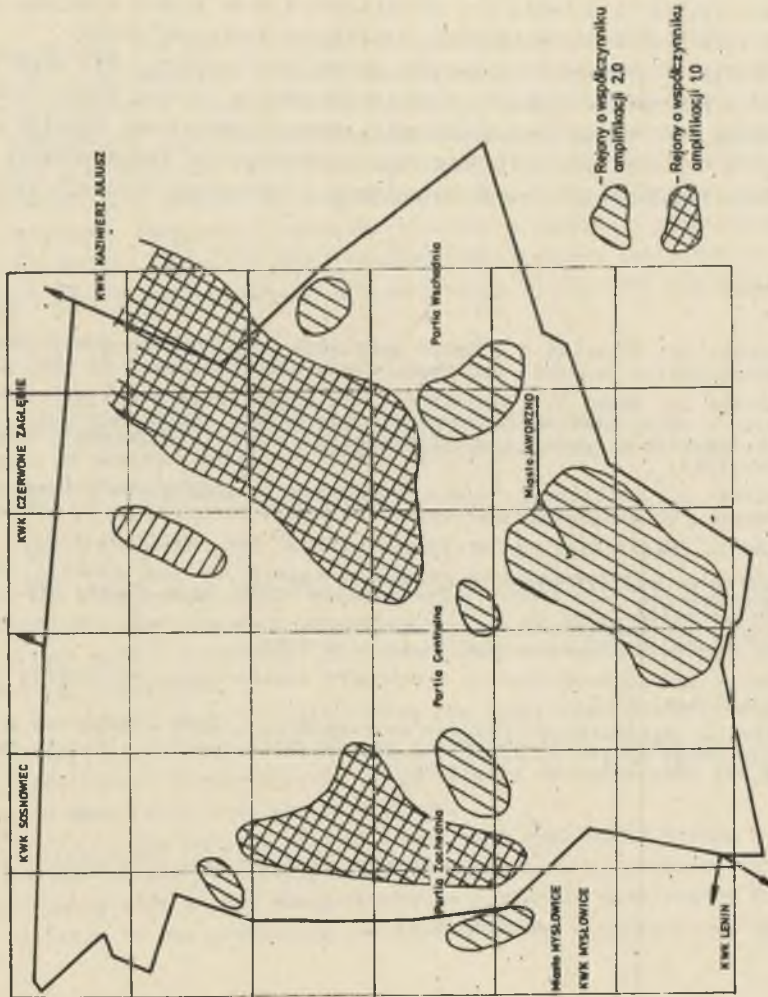
Na pozostałym obszarze współczynnik ten jest zawarty w przedziale 1,0-2,0. W pierwszym obszarze dochodzić będzie do wyraźnego zwiększenia amplitudy drgań gruntu, w drugim natomiast drgania będą ulegać osłabieniu.

Przedstawiony na rys. 3 rozkład izolinii współczynnika amplifikacji wskazuje, że znaczna część obszaru górniczego kopalni objęta jest zasięgiem powyższych stref anormalnych. Obrazuje to znaczenie zaprezentowanego zagadnienia - nieuwzględnianie czynnika amplifikacji drgań przez utwory przypowierzchniowe w prognozie ryzyka sejsmicznego może prowadzić do błędnych wyników. Fakt ten podkreśla znaczenie praktyczne zaprezentowanego zagadnienia w prawidłowej ocenie wpływów dynamicznych pochodzących od wstrząsów górotworu pochodzenia górniczego.

#### 6. WNIOSKI

1. Prawidłowa ocena wpływów dynamicznych drgań związanych z wstrząsami górotworu indukowanymi przez działalność górniczą kopalń GZW wymaga uwzględnienia parametru amplifikacji drgań przez przypowierzchniową warstwę utworów geologicznych. Dotyczy to szczególnie przypadków stosowania pośrednich metod oceny opartych na empirycznych związkach energii wstrząsu i położenia jego ogniska z przyspieszeniem i intensywnością drgań.

2. Opracowany sposób określania funkcji amplifikacji drgań na podstawie analitycznego modelu zjawiska pozwala wyznaczać wartości współczynnika amplifikacji dla różnych typów sejsmogeologicznych nadkładu czwarto-



Rys. 3. Rozkład współczynnika amplifikacji drgań na powierzchni obszaru górniczego kopalni Niwka-Modrzejów  
 Fig. 4. Distribution of Amplification Coefficient of Vibrations at the Surface of the Niwka-Modrzejów Coal-Mine

rzędowego GZW, w zależności od miąższości warstwy nakładu oraz częstotliwości drgań.

3. W przedstawionych trzech typach nakładu czwartorzędowego współczynnik amplifikacji w przedziale miąższości od 0-150 m i przy częstotliwościach od 2,5-7,5 Hz zmienia się od wartości 1,0 do 5,45 w kierunku wzmocnienia i od 1,0 do 0,011 w kierunku osłabienia amplitudy drgań.

4. Praktyczne zastosowanie sposobu określania współczynnika amplifikacji drgań przez utwory nakładu czwartorzędowego w kopalni Niwka-Modrzejów wskazuje, że na znacznej powierzchni obszaru górniczego kopalni występują strefy o anomalnym rozkładzie tego współczynnika. Uwzględnienie ich w prognozie ryzyka sejsmicznego zwiększa jej dokładność oraz wiarygodność.

#### LITERATURA

- [1] Dubiński J., Kowalska E.: Wpływ wstrząsów górotworu na powierzchnię w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Prace GIG. Komunikat nr 650, 1975.
- [2] Dubiński J., Nowak J.: Charakterystyka drgań powierzchni Ziemi związanych z górnictwem i wstrząsami górotworu. Mat. Konferencji nt. "Eksploracja surowców z uwzględnieniem ochrony środowiska". Częstochowa 1984.
- [3] Dubiński J., Gerlach Z.: Ocena oddziaływania górniczych wstrząsów górotworu na środowisko naturalne. Przegląd Górniczy nr 3, 1983.
- [4] Stenz E., Mackiewicz M.: Geofizyka ogólna. PWN, Warszawa 1964.
- [5] Dworak J.: Oddziaływanie wstrząsów górniczych na powierzchnię. Problemy Ochrony Środowiska. Sesja naukowa PTNoZ, Ruda Śląska 1984.
- [6] Facioli E., Resendiz D.: Soil dynamics in seismic risk and engineering decision. Elsevier SPC, Amsterdam 1976.
- [7] Okamoto S.: Introduction to earthquake engineering. University of Tokyo Press, 1973.
- [8] Mutke G.: Parametry dynamiczne wstrząsów górotworu w aspekcie ich szkodliwego wpływu na budowle i środowisko naturalne, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Górnictwo z. 149, 1986.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Wacław Zuberek

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1988 r.

ЗАВИСИМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМЛИ  
СВЯЗАННЫХ С ГОРНЫМИ УДАРАМИ ОТ ОКОЛОПОВЕРХНОСТНЫХ  
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

Р е з ю м е

Определено, что значения динамических параметров колебаний на поверхности земли в значительной степени зависят от местных сейсмологических условий задетерминированных в основном через параметры околоповерхностных геологических образований. Представлен аналитический способ определения коэффициента усиления колебаний для слоевой модели вскрыши, принимая во внимание типичные сейсмологические сечения четверичных образований района Верхисилезского угольного бассейна. Применено результаты детального анализа в условиях шахты "Нивка Моджзев" составляя карту коэффициента усиления колебаний для всего горного района шахты, учитывая его расписание по прогнозу сейсмического риска.

DEPENDENCE OF DYNAMIC PARAMETERS OF GROUND VIBRATIONS  
RELATED TO MINING TREMORS ON PROPERTIES OF SUBSURFACE  
GEOLOGICAL FORMATIONS

S u m m a r y

It has been proved that the values of dynamic parameters of vibrations at the surface of the earth depend radically on local seismogeological conditions mainly determined by the parameters of a subsurface layer of geological formations.

An analytical means of determining the amplification coefficient of vibrations for a layer model of the overburden with regard to typical seismogeological cross-sections of quaternary formations in the Upper Silesian Coal Field area has been shown.

Results of the subject analysis have been applied to laying out a map of the coefficient of amplification of vibrations for conditions of the whole mining area of the Niwka-Modrzejów coal-mine with regard to its distribution in the prediction of seismic risk.