

Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk

nr 89, rok 2015

Zenon PILECKI*, Michał CHAMARCZUK**, Anna KUBAŃSKA***, Zbigniew ISAKOW****, Rafał CZARNY**, Krzysztof KRAWIEC**, Elżbieta PILECKA*****, Przemysław SIERODZKI*****

Porównanie parametrów częstotliwościowo-amplitudowych sejsmicznych źródeł mechanicznych

Streszczenie: Pomiary sejsmiczne w zastosowaniach do celów inżynierskich można prowadzić z wykorzystaniem różnych źródeł sejsmicznych. Wybór odpowiedniego źródła jest jednym z czynników przy projektowaniu pomiarów, który decyduje o zasięgu głębokościowym badań i rozdzielczości wynikowego obrazu sejsmicznego. Efektywność danego źródła sejsmicznego zależy nie tylko od parametrów technicznych samego źródła, ale także właściwości badanego ośrodka geologicznego, parametrów rejestracji oraz sposobu przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych.

W pracy przedstawiono wyniki badań sejsmicznych, mające na celu porównanie parametrów różnych źródeł sejsmicznych w identycznych warunkach pomiarowych na terenie Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG w Katowicach. Porównano dwa sejsmiczne źródła mechaniczne: młot o masie 4 kg oraz kafar zasilany elektrycznie o masie uderzającej 100 kg. Rejestracje wykonano z użyciem 3-składowych geofonów o częstotliwości własnej 4,5 Hz. W wyniku pomiarów uzyskano rejestracje składowych *Z*, *X* i Y prędkości drgań dla 1, 3 oraz sześciokrotnego składania udaru młotem i kafarem. Wykonano obliczenia parametrów amplitudowo-częstotliwościowych zastosowanych źródeł sejsmicznych takich jak: maksymalna amplituda składowych i wypadkowa maksymalnej amplitudy prędkości drgań, tłumienie amplitudy, energia sygnału, zakres częstotliwościowy głównej energii sejsmicznej, częstotliwości dominujące.

Obliczone parametry amplitudowo-częstotliwościowe wskazały na kafar jako źródło sejsmiczne pozwalające uzyskać korzystniejsze wyniki w związku z większym zasięgiem głębokościowym, łatwiejszym przetwarzaniem i interpretacją danych sejsmicznych oraz korzystniejszej rozdzielczości obrazów wynikowych. Natomiast podkreślono, że użycie młota w zadaniach niewymagających większego zasięgu głębokościowego jest jak najbardziej korzystne, gdyż efekt uzyskany przy kilkunastokrotnym składaniu sygnału jest zbliżony do użycia kafaru.

^{*} Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, ** Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków; e-mail: pilecki@min-pan.krakow.pl, michal.ch@min-pan.krakow.pl, czarny@min-pan.krakow.pl, k.krawiec@min-pan.krakow.pl.

^{***} Centrum Transferu Technologii EMAG, Katowice.

^{****} Dr inż., prof. Instytutu EMAG, ****** Mgr inż., Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice.

^{*****} Dr hab. inż. prof. PK, Politechnika Krakowska, Kraków.

Słowa kluczowe: inżynierskie badania sejsmiczne, mechaniczne źródło sejsmiczne, amplituda prędkości drgań, energia sejsmiczna, częstotliwości dominujące, współczynnik tłumienia, zasięg głębokościowy, młot sejsmiczny, kafar sejsmiczny

Comparison of frequency-amplitude parameters of mechanical seismic sources

Abstract: A variety of seismic sources has been developed for use in seismic method for engineering purposes. The choice of an appropriate energy source is one of the parameters used in designing the seismic acquisition survey, that choice determines the maximum depth range and seismic resolution. The effectivity of the seismic source depends not only on the source parameters itself, but also upon the environmental conditions, recording parameters and the interpretation of the seismic data. These factors affect the amplitude and spectral content of the seismic wave propagating in subsurface.

This paper presents the results of the seismic survey comparing different sources parameters under identical survey conditions at a single site in Institute of Innovative Technologies EMAG, Katowice. We compared two mechanical seismic sources: 4-kg sledgehammer and an electrically operated weight-drop of impact mass 100 kg. The survey was conducted with 3-component geophones of a natural frequency of 4.5 Hz. As a result of the survey, we acquired Z, X and Y component vibration velocity records for 1, 3 and 6 stacking numbers for both the sledgehammer and weight-drop. The following amplitude-frequency parameters were calculated: maximum amplitude for 3 components and net velocity value, amplitude damping, signal energy, main seismic energy frequency range and dominant frequencies.

The calculated parameters showed that weight drop is the source capable of generating records of better quality due to the larger depth range, easier processing and interpretation of seismic records and a higher resolution of the output results. However, it was pointed out that use of the sledgehammer in surveys with no need of a larger bigger depth range, is by far more profitable, as the outcome of multifold stacking number with sledgehammer is similar to that of the weight-drop.

Key words: near-surface seismic survey, seismic mechanical source, velocity vibration amplitude, seismic energy, dominant frequencies, damping coefficient, depth-range, sledgehammer, weight-drop

Wprowadzenie

W różnych sejsmicznych schematach pomiarowych źródło sejsmiczne służy do generowania fal sejsmicznych w ośrodku geologicznym, które są rejestrowane przez zestaw czujników. W sejsmicznych badaniach inżynierskich wykorzystuje się wiele różnych źródeł sejsmicznych (Miller i in. 1986; Pilecki i in. 2014). Problem doboru źródła sejsmicznego ma istotne znaczenie dla wyników badań (Karasthatis i Louis 2002), gdyż dotyczy zasięgu głębokościowego i rozdzielczości wynikowego obrazu sejsmicznego.

Źródłem sejsmicznym najczęściej stosowanym w sejsmicznych pomiarach inżynierskich jest masa opadająca z zadanym przyspieszeniem na płytkę przekazującą drgania do podłoża. Parametry źródła wraz ze sposobem przekazania drgań do podłoża decydują o amplitudzie, energii oraz składzie częstotliwościowym wzbudzanego sygnału sejsmicznego (Keiswetter 1992).

Dotychczas prowadzone testy laboratoryjne (Mereu i in. 1963) oraz terenowe (Jeong i Kim 2012; Karasthatis i Louis 2002; Keiswetter 1992; Keiswetter i Steeples 1994, 1995) wpływu czynników takich jak: masa uderzająca, masa płytki, pole powierzchni płytki, materiał oraz kształt wykonania płytki na generowany sygnał sejsmiczny wykazały, że:

 Zwiększanie masy uderzającej oraz masy płytki uderzeniowej powoduje zwiększanie amplitudy i zmianę kształtu wyjściowego sygnału sejsmicznego (Mereu i in. 1963).

- Zwiększanie pola powierzchni płytki uderzeniowej powoduje zwiększanie generowanej energii sejsmicznej, ale jest odwrotnie proporcjonalne do wzrostu amplitudy sygnału przy składaniu wielokrotnym (Keiswetter i Steeples 1994, 1995).
- W pomiarach sejsmicznych prowadzonych na nieskonsolidowanym gruncie, pole powierzchni płytki może wpływać na dominującą częstotliwość generowanego sygnału sejsmicznego (Keiswetter i Steeples 1995).
- Płytki wykonane z metalu pozwalają wygenerować fale sejsmiczne o większych amplitudach niż płytki wykonane z plastiku lub gumy (Karasthatis i Louis 2002).
- Zastosowanie płytek o prostokątnym kształcie wpływa na uzyskanie sygnału sejsmicznego o większej energii i szerszym zakresie częstotliwościowym niż przy użyciu płytek okrągłych lub kwadratowych (Jeong i Kim 2012).

W pierwszej części pracy scharakteryzowano parametry techniczne porównywanych źródeł sejsmicznych. Opisano warunki pomiarowe oraz metodykę przeprowadzonego testu. W zasadniczej części pracy omówiono wyniki obliczeń wartości parametrów częstotliwościowo-amplitudowych sygnałów wygenerowanych przez oba źródła. W podsumowaniu dokonano porównania oraz podkreślono wady i zalety użycia obu źródeł sejsmicznych.

1. Parametry techniczne porównywanych źródeł sejsmicznych

1.1. Młot

W badaniach użyto czterokilogramowego młota (rys. 1) produkcji Fiskars (Finlandia). Młot składa się z główki i rękojeści, do której przymocowany jest elektryczno-mechaniczny wyzwalacz sygnału. Ma on za zadanie, w momencie uderzenia młotem, przekazać impuls

b)







Rys. 1. Przykład młota o masie 4 kg stosowanego w badaniach sejsmicznych (a); wyzwolenie energii sejsmicznej za pomocą udaru młotem (b)

Fig. 1. An example of a 4-kg sledgehammer used in seismic surveys (a); release of seismic energy using a sledgehammer (b)

elektryczny do jednostki sterującej, tzw. czas zerowy. Wzbudzenie fali sejsmicznej następuje wskutek udaru młotem w metalową płytkę o wymiarach 15x15 cm umieszczoną na powierzchni terenu. Zasięg głębokościowy zależy od wielkości zadanego obciążenia dynamicznego. Według Reynoldsa (2011) zasięg głębokościowy sygnału sejsmicznego wygenerowanego młotem może wynieść 30 m lub więcej w zależności od warunków geologicznych.

1.2. Kafar ESS200T

Kafar ESS200T produkcji GISCO (USA) jest urządzeniem zamontowanym na specjalnej przyczepie (rys. 2). Kafar składa się z bijaka i wysięgnika, na który naciągana jest taśma elastomerowa, zestawu zasilająco-sterującego oraz metalowej płytki przekazującej drgania do podłoża. Działanie kafaru polega na gwałtownym opuszczeniu bijaka o masie 100 kg z przyśpieszeniem wywołanym naciągniętą taśmą z elastomeru, na metalową płytkę o wymiarach 51x51 cm z wysokości 2 m. Bijak podnoszony jest za pomocą silnika elektrycznego. Bardziej szczegółową specyfikację parametrów technicznych kafaru ESS200T podano w tabeli 1.







- Rys. 2. Kafar na platformie jezdnej typu ESS200T produkcji Gisco z bijakiem o masie 100 kg (a); kafar ESS200T przygotowany do pomiarów sejsmicznych
- Fig. 2. ESSS200T of Gisco weight-drop with a 100 kg impact mass (a); ESS200T weight-drop prepared for seismic survey (b)

TABELA 1.	Specyfikacja	techniczna	kafara	ESS200
-----------	--------------	------------	--------	--------

TABLE 1.	ESS200	weight-drop	specification
----------	--------	-------------	---------------

Nazv	a Wymiary	Waga	Masa	Zasilanie	Typ	Przyśpieszanie	Natężenie
źród	a źródła	całkowita	uderzeniowa		generatora	masy	prądu
ESS2	$\begin{array}{c} 183 \times 205 \times 203 \\ cm \end{array}$	890 kg	100 kg	bateria 12 V oraz generator	Silnik spalinowy o mocy 500 W	pas elastomerowy o wymiarach 244 × 12,7 × 1,3 cm	30–100 A

1.3. Energia jednostkowa udaru młotem i kafarem w warunkach swobodnego spadku bijaka

W celu obliczenia jednostkowej energii udaru młotem i kafarem w warunkach swobodnego spadku bijaka przyjęto następujące założenia:

jednostkową energię potencjalną przyjęto ze wzoru:

$$E_p = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} \tag{1}$$

gdzie:

- m masa uderzająca [kg],
- g przyśpieszenie ziemskie [9,81 m/s²],
- h wysokość początkowa masy uderzającej [m],
- s pole powierzchni płytki przekazującej drgania [m²].

— wymiary płytki przekazującej drgania do podłoża dla młota: 15×15 cm,

- wymiary płytki przekazującej drgania do podłoża dla kafaru: 51×51 cm,
- wysokość spadku bijaka: 2 m.

Z obliczeń wynika, że stosunek jednostkowej energii udaru kafarem E_p^k do energii udaru młotem E_p^m wynosi 2,16.

1.4. Energia udaru młotem i kafarem w warunkach wymuszonego spadku bijaka

W praktyce oba bijaki – młota i kafara – są przyspieszane. W przypadku młota, bijak jest przyspieszany siłą mięśni operatora, a w przypadku kafara naciągniętą taśmą elastomerową. Dla porównania energii przekazywanej do podłoża przez oba źródła w warunkach wymuszonego spadku bijaka, obliczono wartość energii sejsmicznej zarejestrowanej na geofonie o częstotliwości własnej 4,5 Hz w odległości 6 m od punktu wzbudzania. Energię sejsmiczną jako miarę energii w źródle obliczono z sumy kwadratów amplitudy dla wartości przekraczających poziom szumu. W obu przypadkach poziom szumu był identyczny.

Z obliczeń wynika, że stosunek energii sejsmicznej pojedynczego udaru kafarem E_{sp}^{k} do energii sejsmicznej pojedynczego udaru młotem E_{sp}^{m} wynosi ok. 168.

2. Warunki pomiarowe

Badania przeprowadzono na terenie Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG w Katowicach. Profil pomiarowy zlokalizowany był na trawniku w sąsiedztwie parkingu wewnętrznego (rys. 3). W trakcie pomiarów zachmurzenie było częściowe, a temperatura powietrza wynosiła około 15° C.

W bezpośrednim podłożu w rejonie badań występują grunty nasypowe w postaci piasków wymieszanych z gliną występujące do głębokości 3 m, poniżej zalega warstwa gliny.



Rys. 3. Schemat pomiarowy testowania sejsmicznych źródeł mechanicznych

Fig. 3. Survey layout of mechanical seismic sources testing

3. Metodyka badań

3.1. Metodyka pomiarowa

Badania wykonano wzdłuż profilu pomiarowego 1–1' o długości 27 m (rys. 3). Do rejestracji użyto ośmiu geofonów 3-składowych *Z*, *X* i *Y* o częstotliwości własnej 4,5 Hz firmy Geospace. Odstęp między geofonami wynosił 3 m. Czas rejestracji wynosił 1 sekundę, a częstotliwość próbkowania 4 kHz. Przy wzbudzaniu fali zastosowano trzy różne składania o krotności 1, 3 oraz 6 uderzeń w obu przypadkach młota i kafara.

3.2. Metodyka przetwarzania i interpretacji danych

Przetwarzanie danych sejsmicznych polegało na:

- porządkowaniu, segregacji i archiwizacji danych polowych,
- wczytaniu plików SEG-2 do programu Matlab,
- sprawdzeniu danych pod kątem występowania zakłóceń.

Interpretacja danych sejsmicznych obejmowała:

 obliczenie średnich amplitud maksymalnych poszczególnych składowych prędkości drgań wg wzoru (rys. 4):

$$A_{SR_MAX} = \frac{|a_{i-1}| + |a_i| + |a_{i+1}|}{3}$$
(2)

gdzie:

- *a* wartość próbki sygnału,
- i numer próbki sygnału z wartością maksymalną.



Rys. 4. Sposób obliczania średniej amplitudy maksymalnej

Fig. 4. Maximum average amplitude calculating scheme

- obliczenie energii sejsmicznej dla każdej składowej według wzoru:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt$$
 (3)

gdzie:

$$x(t)$$
 – sygnał zmienny w czasie,

 t_1 – początek fragmentu sygnału zawierającego energię użyteczną,

 t_2 – koniec fragmentu sygnału zawierającego energię użyteczną.

— obliczenie stosunków średnich amplitud maksymalnych udaru kafarem A_{MAX}^K do średniej amplitudy maksymalnej udaru młotem A_{MAX}^M :

$$A_{w} = \frac{A_{MAX}^{K}}{A_{MAX}^{M}} \tag{4}$$

— obliczenie stosunków sejsmicznej energii maksymalnej udaru kafarem E_{MAX}^K do _{sej-}smicznej energii maksymalnej udaru młotem E_{MAX}^K :

$$E_W = \frac{E_{MAX}^K}{E_{MAX}^M} \tag{5}$$

39

— obliczenie stosunku energii sygnału użytecznego wygenerowanego kafarem E_U^K do energii sygnału użytecznego wygenerowanego młotkiem E_U^M :

$$E_W = \frac{E_U^K}{E_U^M} \tag{6}$$

— obliczenie wypadkowych średnich amplitud maksymalnych A_{WYP} według wzoru:

$$A_{WYP} = \sqrt{\left(A_{\hat{S}R}^Z MAX\right)^2 + \left(A_{\hat{S}R}^X MAX\right)^2 + \left(A_{\hat{S}R}^Y MAX\right)^2} + \left(A_{\hat{S}R}^Y MAX\right)^2}$$
(7)

gdzie:

 $A_{SR_MAX}^Z$ – maksymalna amplituda średnia dla składowej Z, $A_{SR_MAX}^X$ – maksymalna amplituda średnia dla składowej X, $A_{SR_MAX}^Y$ – maksymalna amplituda średnia dla składowej Y.

— obliczenie wypadkowych energii sygnałów użytecznych $E_{U WYP}$ według wzoru:

$$E_{U_{WYP}} = \sqrt{\left(E_{U}^{Z}\right)^{2} + \left(E_{U}^{X}\right)^{2} + \left(E_{U}^{Y}\right)^{2}} \tag{8}$$

gdzie:

 E_U^Z – energia sygnału użytecznego dla składowej Z,

 E_U^X – energia sygnału użytecznego dla składowej X,

 E_U^Y – energia sygnału użytecznego dla składowej Y.

 obliczenie stosunków wypadkowej maksymalnej amplitudy średniej sygnału użytecznego według wzoru:

$$A_{W_WYP} = \frac{A_{W_WYP}^{K}}{A_{W_WYP}^{M}} \tag{9}$$

gdzie:

 $A_{W_{WYP}}^{K}$ – wypadkowa maksymalna amplituda średnia dla udaru kafarem, $A_{W_{WYP}}^{M}$ – wypadkowa maksymalna amplituda średnia dla udaru młotem.

- obliczenie stosunków wypadkowej energii sygnału użytecznego według wzoru:

$$E_{W_WYP} = \frac{E_{U_WYP}^{K}}{E_{U_WYP}^{M}}$$
(10)

40

gdzie:

- $E_{U_{-WYP}}^{K}$ wypadkowa energia sygnału użytecznego dla udaru kafarem,
- $E_U^{X^-}_{WYP}$ wypadkowa energia sygnału użytecznego dla udaru młotem.
- obliczenie widm amplitudowych dla każdej składowej oraz wyznaczenie częstotliwości dominującej oraz zakresu częstotliwościowego głównej energii sygnałów.

4. Wyniki badań i ich analiza

Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunkach od 5 do 8, a bardziej szczegółowe wyniki zestawiono w tabelach od 4 do 7.

Przykład rejestracji składowej pionowej prędkości drgań wzbudzonego młotkiem oraz kafarem dla 3 krotnego składania w odległości 9 m od źródła przedstawiono na rysunku 5. Zestawiając ze sobą sygnały widać, że amplitudy składowej Z wzbudzone kafarem są zdecydowanie większe. Stosunek obu maksymalnych amplitud średnich (kafaru do młota) jest największy dla składowej *Y*, prostopadłej do linii profilu, i zmienia się w granicach od 20 do 240, dla składowej Z zmienia się od 25 do 220, a dla składowej *X* jest najmniejszy i zmienia się od 10 do 75 (tab. od 4 do 6). Wypadkowe maksymalne amplitudy średnie dla kafaru są od 18 do 162 razy większe niż dla młota (tab. 7). Znaczący rozrzut wartości pomiarowych jest związany głównie ze zróżnicowanym polem falowym w warunkach prze-prowadzonego testu.

Na rysunku 6 przedstawiono widma amplitudowe rejestracji z rysunku 5. Zakres częstotliwościowy głównej energii sejsmicznej mieści się w przedziale od 4,5 (częstotliwość własna geofonu) do ok. 80 Hz dla młota oraz do ok. 120 Hz dla kafaru w warunkach przeprowadzonego testu. Dominująca częstotliwość wynosi ok. 41 Hz dla młota oraz ok. 25 Hz dla kafara i przypuszczalnie jest ona związana z wymiarami płytki. Wartości dominujących częstotliwości są stałe dla wszystkich trzech składowych *Z*, *X* i *Y*.

W celu sprawdzenia wpływu wymiarów płyty na widmo częstotliwościowe fali w ośrodku geologicznym przeprowadzono symulację numeryczną w płaskim stanie odkształcenia przy przyjęciu trzeciej składowej $\sigma_y = \sigma_x$, w warunkach sprężystego zachowania się ośrodka. Symulację przeprowadzono w dwóch wariantach:

- Wariant pierwszy polegał na jednakowym obciążeniu dynamicznym 3 modeli stalowej płytki leżącej na powierzchni terenu różniących się wymiarami – 16×4 cm, 56×4 cm i 100×4 cm.
- Wariant drugi polegał na zróżnicowanym obciążeniu dynamicznym jednego modelu stalowej płytki o wymiarach 56×4 cm.

Obciążenie dynamiczne zostało przyłożone w punkcie w postaci impulsu w kształcie "szpilki" o wartościach pionowej prędkości 0,1, 1 i 10 m/s. Wyniki symulacji w obu wariantach rejestrowano w postaci pionowej prędkości drgań w punkcie na głębokości 5 m pod powierzchnią terenu, w osi płyty. Zauważono, że w wariancie pierwszym, częstotliwości dominujące są różne w zależności od wymiarów płyty (rys. 7). Natomiast w warunkach testu dla wariantu drugiego zauważono jednakową wartość częstotliwości dominującej dla zróżnicowanego obciążenia dynamicznego (rys. 8).



Rys. 5. Rejestracje składowej Z prędkości drgań wzbudzonych młotkiem (a, b, c) oraz kafarem (d, e, f) dla składania: 1-krotnego (a, d); 3-krotnego (b, e); 6-krotnego (c, f) zarejestrowane w odległości 9 m od źródła

Fig. 5. Records of Z component of velocity vibration induced with the sledgehammer (a , b, c) and weight-drop (d, e, f) for stacking number: 1 (a, d), 3 (b, e) and 6 (c, f) recorded at a 9 m distance from the source



Rys. 6. Znormalizowane widma amplitudowe składowej Z prędkości drgań wzbudzonych młotkiem (a, b, c) oraz kafarem (d, e, f) dla składania: 1-krotnego (a, d); 3-krotnego (b, e); 6-krotnego (c, f) zarejestrowane w odległości 9 m. Linią ciągłą oznaczono częstotliwość dominującą *fmax*, linią przerywaną oznaczono zakres częstotliwościowy głównej energii sejsmicznej f_Z

Fig. 6. Normalized amplitude spectra of Z component velocity vibration induced with a sledgehammer (a, b, c) and weight-drop (d, e, f) for stack number: 1(a, d), 3 (b, e) and 6 (c, f) recorded at a 9 m distance from the source. The continuous line denotes a dominant frequency *finax*, the dashed line denotes main seismic energy frequency range f_Z



- Rys. 7. Znormalizowane widma amplitudowe składowej pionowej prędkości drgań ośrodka rejestrowanej na głębokości 5 m poniżej powierzchni terenu dla zróżnicowanych rozmiarów stalowej płyty i jednakowej wartości przyłożonego obciążenia 10 m/s
- Fig. 7. Normalized amplitude spectra of vertical component of ground velocity vibration recorded 5 meters below the terrain surface for different plate size and constant value of applied loading of 10 m/s



- Rys. 8. Znormalizowane widma amplitudowe składowej pionowej prędkości drgań ośrodka rejestrowanej na głębokości 5 m poniżej powierzchni terenu dla różnych wartości przyłożonego obciążenia i jednakowej płyty o wymiarach 56×56 cm
- Fig. 8. Normalized amplitude spectra of vertical component of ground velocity vibration recorded 5 meters below the surface terrain for different value of applied loading and constant plate size (56×56 cm)



Rysunek 9 przedstawia wykresy zmian energii sejsmicznej z odległością od źródła dla młota i kafaru dla wszystkich składowych Z, X i Y. W każdym przypadku składowej energia

Rys. 9. Zmiana energii sejsmicznej wzbudzonej młotem oraz kafarem wraz z odległością od źródła dla: składowej Z (a); składowej X (b); składowej Y (c) prędkości drgań

Fig. 9. Energy induced by a sledgehammer and weight-drop vs. distance from the source for: *Z*-component (a), *X*-component (b) and *Y*-component (c) of velocity vibration



Rys. 10. Zmiana energii sejsmicznej wzbudzonej młotem oraz kafarem wraz z krotnością składania dla: składowej Z (a); składowej X (b); składowej Y (c) prędkości drgań

Fig. 10. Energy induced by a sledgehammer and weight-drop vs. stacking number for seismic wave field: Z-component (a), X-component (b) and Y-component (c) of velocity vibration

sejsmiczna kafaru jest od 2 do 704 razy większa od energii sejsmicznej młota (tab. od 4 do 7). Największe różnice występują dla składowej Z. W przypadku wartości wypadkowych energii sygnałów użytecznych dla udaru kafarem są od 9 do 799 razy większe, niż wypadkowe energii sygnałów użytecznych dla udaru młotem (tab. 7). Natomiast tłumienie energii sejsmicznej ze wzrostem od źródła jest niemal identyczne dla obu urządzeń. Współczynniki tłumienia wynoszą ok. 4-5% na wszystkich składowych.

Na rysunku 10 przedstawiono wykresy zmian energii sejsmicznej ze wzrostem krotności składania uderzeń młota i kafaru rejestrowanej w odległości 9 m dla trzech składowych prędkości drgań Z, X i Y. Wzrost liczby uderzeń zmniejsza różnicę między energią sejsmiczną wzbudzoną młotem a energią sejsmiczną wzbudzoną kafarem. Wykresy dostarczają interesującego spostrzeżenia, że w przypadku składowej Z, dla składania 9 uderzeń wzbudzone energie sejsmiczne są jednakowe. W przypadku składowej X jest to 15 uderzeń, a dla składowej Y jest to 12 uderzeń.

TABELA 4. Średnie wartości maksymalne amplitud oraz energie sygnałów użytecznych dla składowej Z prędkości drgań

Lp. d ⁱ	d ⁽¹⁾	$A_{MAX}^{(2)}$ [j.u ·10 ⁸]		$E_U^{(3)}$ [j.u ·10 ¹⁷]		$A_W^{(4)}$	$E_{W}^{(5)}$	$f_Z^{(6)}$ [Hz]		f _{max} [Hz] ⁽⁷⁾	
	[III]	М	K	М	K			М	K	М	K
1	6	3,50	510,00	736,00	124000,00	145,71	168,48	4,5 - 80	4,5 - 120	41	25
2	9	2,70	87,00	258,00	32,900,00	32,22	127,52	4,5 - 75	4,5 - 120	40	25
3	12	1,60	42,00	6,39	4 160,00	26,25	651,02	4,5 - 82	4,5 - 130	40	25
4	15	0,14	23,00	2,13	329,00	164,29	154,46	4,5 - 85	4,5 - 115	41	25
5	18	0,10	22,00	0,86	79,30	220,00	92,21	4,5 - 75	4,5 - 120	43	24
6	21	0,12	17,00	0,07	49,30	141,67	704,29	4,5 - 85	4,5 - 125	41	21
7	24	0,10	2,50	0,05	34,00	25,00	680,00	4,5 - 81	4,5 - 120	42	25
8	27	0,01	0,72	0,003	0,23	72,00	76,67	4,5 - 82	4,5 - 110	40	25

TABLE 4. Maximum average amplitude values and energy for the Z-component of velocity vibration

(1) – odległość od źródła,

(2) - maksymalna amplituda średnia obliczona wg wzoru 2,

(3) - energia sejsmiczna sygnału użytecznego,

 $(4) - A_W = \frac{A_{MAX}^K}{A_{MAX}^M}$ stosunek maksymalnej amplitudy średniej udaru kafarem do maksymalnej amplitudy średniej udaru młotem, $(5) - E_W = \frac{E_U^K}{E_U^M}$ stosunek energii sygnału użytecznego udaru kafarem do energii maksymalnej udaru młotem

(6) - zakres częstotliwości zapisu sejsmicznego,

(7) - częstotliwość dominująca zapisu sejsmicznego.

Lp. $d^{(1)}$		$A_{MAX}^{(2)}$ [j.u ·10 ⁸]		$E_U^{(3)}$ [j.u ·10 ¹⁷]		$A_W^{(4)}$	$E_{W}^{(5)}$	$f_Z^{(6)}$ [Hz]		$f_{max} [\text{Hz}]^{(7)}$	
-	[m]	М	K	М	K		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	М	K	М	K
1	6	36,00	370,00	13500	31500,00	10,28	2,33	4,5 - 85	4,5 - 125	40	23
2	9	2,70	35,00	14,7	365,00	12,96	24,83	4,5 - 80	4,5 - 115	41	25
3	12	1,60	25,00	5,05	186,00	15,63	36,83	4,5 - 85	4,5 - 120	41	25
4	15	0,64	23,00	0,36	177,00	35,94	491,67	4,5 - 75	4,5 - 120	42	24
5	18	0,16	12,00	0,09	45,70	75,00	507,78	4,5 - 80	4,5 - 120	42	24
6	21	0,14	2,00	0,05	7,87	14,29	157,40	4,5 - 85	4,5 - 120	41	21
7	24	0,12	1,80	0,03	6,24	15,00	208,00	4,5 - 80	4,5 - 115	41	25
8	27	0,06	1,02	0,01	0,87	17,00	87,00	4,5 - 77	4,5 - 120	40	25

TABELA 5. Średnie wartości maksymalne amplitud oraz energii dla składowej X prędkości drgańTABLE 5. Maximum average amplitude values and energy for the X-component of velocity vibration

*Oznaczenia (1-7) jak dla tabeli 4

TABELA 6.	Średnie wartości maksymalne amplitud oraz energii dla składowej Y prędkości drgań
TABLE 6.	Maximum average amplitude values and energy for the Y-component of velocity vibration

Lp.	d ⁽¹⁾	$A_{MAX}^{(2)}$ [j.u ·10 ⁸]		$E_U^{(3)}$ [j.u ·10 ¹⁷]		Am ⁽⁴⁾	E ₁₁ (5)	$f_Z^{(6)}$ [Hz]		$f_{max} [\text{Hz}]^{(7)}$	
r.	[[m]	М	K	М	К	W	W	М	K	М	K
1	6	26	520	2630	3170	20,00	1,21	4,5 - 80	4,5 - 120	41	23
2	9	2,3	450	125	2930	195,65	23,44	4,5 - 80	4,5 - 125	41	25
3	12	1,23	310	12	1930	252,03	160,83	4,5 - 80	4,5 - 125	41	21
4	15	0,16	37	0,36	192	231,25	533,33	4,5 - 85	4,5 - 120	40	25
5	18	0,1	24	0,3	22,9	240,00	76,33	4,5 - 85	4,5 - 120	43	25
6	21	0,09	21	0,09	3,89	233,33	43,22	4,5 - 80	4,5 - 120	42	25
7	24	0,08	14	0,06	0,89	175,00	14,83	4,5 - 80	4,5 - 125	41	24
8	27	0,06	7	0,03	0,24	116,67	8,00	4,5 - 83	4,5 - 120	40	24

*Oznaczenia (1-7) jak dla tabeli 4

Lp.	d(1) [m]	$A_{MAX}^{(2)}$ [j.u · 10 ⁸]		E _U ⁽³⁾ [j.u ·10 ¹⁷]	$A_W^{(4)}_{WYP}$	$E_W^{(5)}_{WYP}$	
1		М	K M		К	<i>"_"</i> 11	<i>" _" 11</i>	
1	6	44,54	816,95	13773,47	127977,73	18,34	9,29	
2	9	4,46	459,67	287,06	33032,23	103,12	115,07	
3	12	2,27	313,83	14,50	4589,67	137,98	316,47	
4	15	0,67	49,26	0,53	420,04	73,52	799,39	
5	18	0,21	34,70	0,92	94,35	162,49	103,08	
6	21	0,21	27,09	0,12	50,08	132,04	402,22	
7	24	0,13	14,33	0,08	34,58	111,60	413,30	
8	27	0,09	7,04	0,03	0,93	82,36	29,32	

TABELA 7. Średnie wartości maksymalnej amplitudy oraz energii wypadkowej prędkości drgań TABLE 7. Average values of maximal amplitude and energy of resultant velocity vibration

*Oznaczenia (1-5) jak dla tabeli 4

Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki testu przeprowadzonego dla porównania parametrów amplitudowo-częstotliwościowych dwóch źródeł mechanicznych: młota i kafaru w jednakowych warunkach pomiarowych. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

Średnie amplitudy maksymalne konkretnych składowych prędkości, generowane przez kafar, sa wyraźnie większe niż generowane przez młot. W przypadku składowej Z amplitudy te są większe od 25 do 220 razy, składowej X od 10 do 75 razy, a składowej Y od 20 do 240 razy.

Średnie amplitudy maksymalne dla składowej wypadkowej wytwarzane przez kafar są od 18 do 162 razy większe niż wytwarzane przez młot.

Energia sygnału użytecznego generowanego udarem kafara jest wieksza od 9 do 799 razy od energii generowanej udarem młota, obliczonej dla wypadkowej amplitudy maksymalnej.

Tłumienie amplitudy wszystkich składowych prędkości drgań z odległością jest jednakowe dla sygnałów generowanych przez kafar i młot, a współczynnik tłumienia wynosi ok. 4–5% i jest niezależny od krotności składania.

Zakres częstotliwościowy głównej energii sejsmicznej mieści się w przedziale od 4,5 (częstotliwość własna geofonu) do ok. 80 Hz dla młota oraz do ok. 120 Hz dla kafaru w warunkach przeprowadzonego testu.

Dominująca częstotliwość wynosi ok. 41 Hz dla młota oraz ok. 25 Hz dla kafaru. Wartości dominujących częstotliwości są stałe dla wszystkich trzech składowych Z, X i Y i nie zależą od krotności składania. Wpływ na zróżnicowanie częstotliwości dominujących może mieć wymiar płytki przekazującej drgania do podłoża.

Zwiększanie krotności składania powoduje poprawę jakości zapisów uzyskanych udarem młota w stosunku do jakości zapisów udaru kafarem. Pozornie energie sejsmiczne generowane przez młot i kafar wyrównują się dla 9-krotności składania dla składowej *Z*, dla 15-krotnego składania dla składowej *X* i 12-krotnego składania dla składowej *Y*.

Reasumując, użycie kafaru jako źródła w inżynierskich pomiarach sejsmicznych jest bardziej korzystne ze względu na zasięg głębokościowy, łatwiejsze przetwarzanie i interpretację sejsmogramów oraz rozdzielczość sejsmicznych obrazów wynikowych. Ograniczeniami dla kafaru są jego większe rozmiary, dodatkowe koszty transportu, większa pracochłonność pomiarów oraz koszty własne urządzenia i jego serwisu. Natomiast użycie młota w zadaniach niewymagających większego zasięgu głębokościowego jest jak najbardziej korzystne, efekt uzyskany przy kilkunastokrotnym składaniu sygnału jest zbliżony do użycia kafaru.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE, uzyskanego w ramach przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Jeong, J.H. i Kim, J.H. 2012. Comparison of Signal Powers Generated with Different Shapes of Hammer Plates. Journal Korean Earth Science Society nr 5, s. 395–400.
- Karastathis, V. i Louis, I. 2002. Comparison test of seismic sources in shallow reflection seismics. Annales Geologiques des Payes Helleniques.
- Keiswetter, D. 1992. Significance of Sledgehammer Source Parameters: A High-Resolution Seismic Reflection Study. Praca magisterska, Uniwersytet Kansas, s. 68.
- Keiswetter, D. i Steeples, D. 1994. Practical modifications to improve sledgehammer seismic source. *Geophysical Research Letters* nr 10, s. 2203–2206.
- Keiswetter, D. i Steeples, D. 1995. A field investigation of source parameters for the sledgehammer. *Geophysics* nr 4, s. 1051–1057.
- Mereu i in. 1963 Mereu, R.F., Uffen, R.J. i Beck, A.E. 1963. The use of a coupler in the conversion of impact energy into seismic energy. *Geophysics* nr 4, s. 531–546.
- Miller i in. 1986 Miller, R.D., Pullan, E.S., Waldner, J.S. i Haeni, F.P. 1986. Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics* nr 11, s. 2067–2092.
- Pilecki i in. 2014 Pilecki, Z., Harba, P., Czarny, R., Cielesta, S. i Pszonka, J. 2014. Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. Przegląd Górniczy nr 7, s. 22–31.
- Reynolds, J. 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wyd. 2. Chichester, Wiley-Blackwell Publishing.