

Bożena KWAŚNICKA

Akademia Górniczo-Hutnicza  
Kraków

## POLE FALI POKŁADOWEJ TYPU LOVE'A W WARSTWACH WĘGLA ZABURZONYCH USKOKAMI

**Streszczenie.** Metodę skończonych różnic zastosowano do badania propagacji fal pokładowych typu Love'a w pokładach węgla z uskokami. Modelowano uskoki pionowy (pokład urwany), uskoki pionowy o zrzucie równym miąższości pokładu oraz uskoki o nachyleniu płaszczyzny uskokuwej  $50^\circ$  i zrzucie 0,5 miąższości pokładu. Przedstawiono pole przemieszczeń w wybranych momentach czasu i sejsmogramy teoretyczne. Na podstawie sejsmogramów teoretycznych obliczono widma amplitudowe i prędkości fal pokładowych typu Love'a.

### 1. WPROWADZENIE

Rozpoznanie budowy górotworu przed frontem robót górniczych jest konieczne w celu efektywnego i bezpiecznego prowadzenia eksploatacji. Wczesniejsze informacje o położeniu zaburzeń budowy złoża pozwalają na takie postępowanie, które ograniczy straty związane z koniecznością dostosowania robót górniczych do zmienionych warunków geologicznych.

Do podstawowych zaburzeń występujących w złożach węgla kamiennego należą uskoki. Przy ich lokalizacji szerokie zastosowanie znalazła metoda fal pokładowych zaproponowana przez Evisona w 1955 r. i praktycznie rozwinięta przez Kraya w 1963 r. [3, 4]. Metoda wykorzystuje szczególne własności fizyczne węgla; niską prędkość rozchodzenia się w nim fal P i S oraz jego małą gęstość w porównaniu ze skałami otaczającymi. Przy takim układzie parametrów sprężystych, gdy źródło drgań znajduje się w niskoprędkościowej warstwie węgla, w wyniku wielokrotnych odbić, jakim ulegają fale P i S na granicach węgla i skał, powstają fale interferencyjne.

W zależności od kierunku drgań, ze względu na podobieństwo podstawowych cech tych fal do fal powierzchniowych Love'a i Rayleigha, zostały one nazwane falami pokładowymi typu Love'a i typu Rayleigha. Fale obu tych typów charakteryzują się dyspersją prędkości, niską prędkością propagacji i wysoką częstotliwością. Ich energia koncentruje się wewnątrz pokładu węgla, amplitudy maleją eksponencjalnie z odległością od pokładu i zależnie od częstotliwości.

Przydatność fal pokładowych do badania mikrotektoniki pokładów węgla związana jest z dużym zasięgiem penetracji oraz bardziej efektywnym odbiciem od uskoków i nieciągłości niż w przypadku stosowania fal objętościowych. Zarówno praktyka, jak i badania teoretyczne wykazały, że fale pokładowe typu Love'a są szczególnie predysponowane do wykrywania wszelkiego rodzaju zaburzeń w pokładach węgla ze względu na łatwą rejestrację i cechy dynamiczne.

Złożony obraz falowy i specyfika metody powoduje, że trudnym problemem jest zarówno metodyka obserwacji, jak i interpretacja danych pomiarowych, konieczne jest więc wcześniejsze rozpoznanie własności fal pokładowych.

Teoretyczne krzywe dyspersji prędkości fal pokładowych typu Love'a obliczone są z uwzględnieniem parametrów ośrodka, w którym się rozprzestrzeniają [2, 5], dają ogólną informację o częstotliwości i prędkości tych fal, ale na ich podstawie nie można określić kształtu impulsu rozpatrywanej fali oraz wielkości przemieszczeń związanych z tą falą w dowolnym punkcie rozważanego obszaru, szczególnie gdy występują nieciągłości.

Uzyskanie rozwiązań analitycznych poprzez rozwiązanie równań różniczkowych ruchu opisujących propagację fal w ośrodkach sprężystych dla wielu sytuacji górniczych jest bardzo trudne, a czasem niemożliwe. Można wtedy korzystać z metod przybliżonych. Jedną z nich jest metoda skończonych różnic, która polega na zastąpieniu równań cząstkowych odpowiednimi równaniami różnic skończonych.

## 2. METODA SKOŃCZONYCH RÓŻNIC

Do modelowania pola fali pokładowej typu Love'a zastosowano różnicowy schemat explicite, który pozwala przewidzieć ruch cząstek ośrodka sprężystego w danym momencie czasu na podstawie ruchu znanego dla minionych momentów czasu.

Określenie przemieszczenia poziomo spolaryzowanej fali SH w każdym punkcie elastycznej izotropowej półprzestrzeni z zastosowaniem metody skończonych różnic wymaga:

- dyskretnej aproksymacji równania ruchu,
- utworzenia siatki punktów w odległościach  $\Delta x, \Delta z, \Delta t$  na obszarze  $x \geq 0, z \geq 0, t \geq 0,$
- dyskretnej aproksymacji warunków początkowych i granicznych.

Przemieszczenie  $v_{K,L}^{M+1}$  w punkcie P o współrzędnych K, L, M+1 można wyrazić wtedy wzorem [6]:

$$\begin{aligned}
 v_{K,L}^{M+1} = & 2 v_{K,L}^M - v_{K,L}^{M-1} + (\Delta t / \Delta x)^2 \left[ \mu_E v_{K+1,L}^M - (\mu_E + \mu_W) v_{K,L}^M + \right. \\
 & \left. + \mu_W v_{K-1,L}^M \right] (1/\rho_{K,L}) + (\Delta t / \Delta z)^2 \left[ \mu_S v_{K,L+1}^M - (\mu_S + \mu_N) v_{K,L}^M + \right. \\
 & \left. + \mu_N v_{K,L-1}^M \right] (1/\rho_{K,L}) + \Delta t^2 F_{K,L}^{M+1}
 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$F_{K,L}^M$  - jest aproksymacja siły objętościowej wyrażającej źródło.

$\mu_N, \mu_S, \mu_E, \mu_W$  - są efektywnymi sztywnościami w rozważanym punkcie siatki w wybranych kierunkach prostopadłych.

Posługując się powyższym wzorem, można obliczyć przemieszczenia we wszystkich punktach rozpatrywanego obszaru, nawet gdy występują nieciągłości. Uwzględnia się je przez efektywne sztywności i odpowiednią aproksymację gęstości.

### 3. MODEL ŌRÓDKA PRZYJĘTEGO DO OBLICZEŃ POLA FALI POKŁADOWEJ TYPU LOVE'A

Zadanie rozwiązano we współrzędnych kartezjańskich w ćwiartce płaszczyzny  $0 \leq x \leq x_{\max}$ ,  $0 \leq z \leq z_{\max}$ , w czasie  $0 \leq t \leq t_{\max}$ . Przyjęto następujące kroki siatki:

$\Delta x = 0,5$  m w kierunku zmiennej  $x$ ,

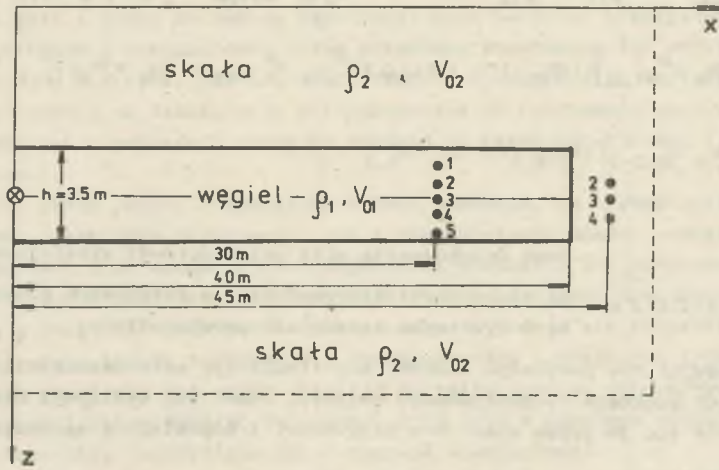
$\Delta z = 0,25$  m w kierunku zmiennej  $z$ .

Krok czasowy został wyznaczony w powiązaniu z krokami  $\Delta x, \Delta z$  z warunków stabilności [1] i wynosi:

$$\Delta t = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

W charakterze punkowego źródła drgań przyjęto impuls Berlage'a, którego parametry są tak dobrane, aby jego kształt początkowy zbliżony był do impulsu fali poprzecznej SH [2]. To teoretyczne źródło drgań, zgodnie z doświadczeniami teoretycznymi i praktycznymi, w modelowaniach umieszczano w środku rozpatrywanego pokładu węgla i na granicy rozważonego obszaru. Do cyfrowego modelowania pola przemieszczeń i sejsmogramów stosowano program "SEJS", którego podstawą jest schemat różnicowy (1). Wyniki obliczeń używano w postaci:

- przestrzennego rozkładu amplitud dla dowolnego momentu czasu  $t$ ,
- teoretycznych przebiegów czasowych (sejsmogramów) dla ustalonych punktów obserwacji  $P(x, z)$ .

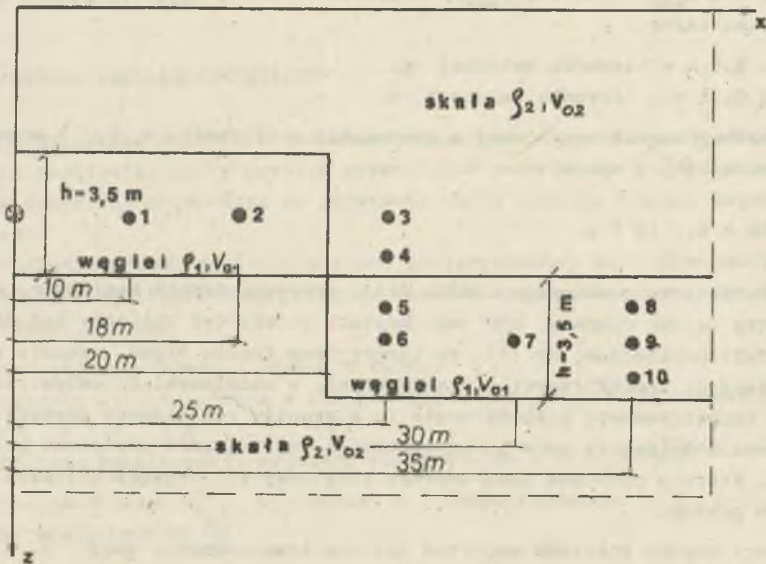


Rys. 1. Model I - Uskok I - pokład urwany

⊗ - źródło, ● - odbiorniki

Fig. 1. Model I - Vertical angle fault - seam end

⊗ - source, ● - receivers

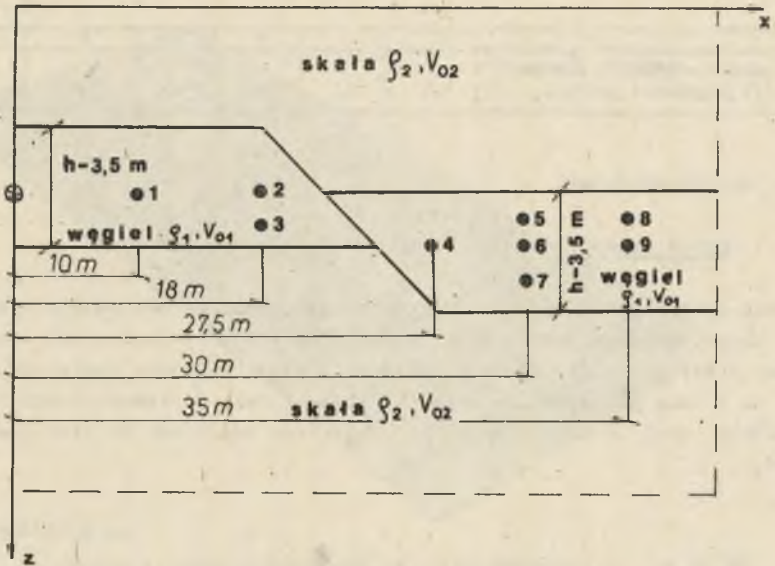


Rys. 2. Model II - Uskok pionowy o zrzucie równym miąższości pokładu

⊗ - źródło, ● - odbiorniki

Fig. 2. Model II - Vertical angle fault of throw 1 times seam thickness

⊗ - source, ● - receivers



Rys. 3. Model III - Uskok nachylony o zrzucie 1/2 miąższości pokładu

⊗- źródło, ●- odbiorniki

Fig. 3. Model III - Fault with a hade angle of throw 0,5 times seam thickness

⊗- source, ●- receivers

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wybrane wyniki modelowania dla warstw węgla zaburzonych uskokami:

- uskokiem pionowym o całkowitym zrzucie (pokład urwany), model I, rys. 1,
- uskokiem pionowym o zrzucie równym miąższości pokładu, model II, rys. 2,
- uskokiem nachylonym, o zrzucie 1/2 miąższości pokładu, model III, rys. 3.

Parametry modeli zawiera tabela 1.

Tabela 1

Parametry modeli

Model	$\rho_1$ (g/cm <sup>3</sup> ) węgiel	$\rho_2$ (g/cm <sup>3</sup> ) skała	$V_{01}$ (m/s) węgiel	$V_{02}$ (m/s) skała	$H_1$ [m] miąższość pokładu przed za- burzeniem	$H_2$ (m) miąższość pokładu po zaburzeniu
	2	3	4	5	6	7
I uskoki pionowy (pokład urwany)	1,1	2,5	1 000	2 600	3,5	-
II uskoki pionowy o zrzucie równym miąższości pokładu	1,1	2,5	1 000	2 600	3,5	3,5

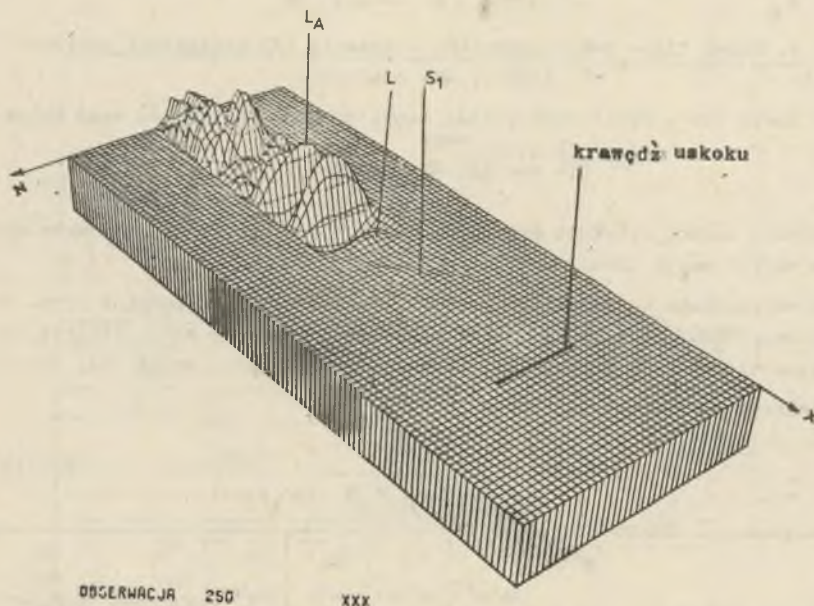
cd. tabeli 1

1	2	3	4	5	6	7
III uskok nachylony o zrzucie 1/2 miąższości pokładu	1,1	2,5	1 000	2 600	3,5	3,5

#### 4. WYNIKI MODELOWAŃ

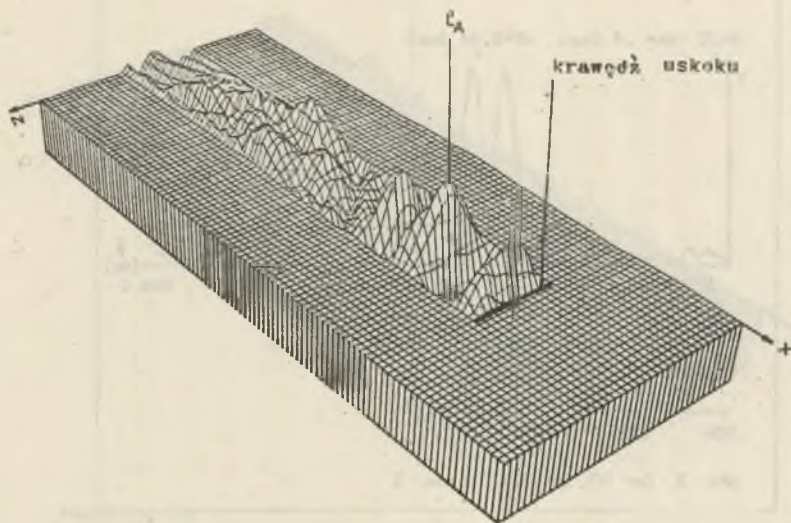
##### 4.1. Uskok pionowy

Pole przemieszczeń w wybranych momentach czasu przedstawiają rysunki 4 i 5. Falę pokładową typu Love'a, która powstaje i rozchodzi się w niezaburzonej części pokładu, można śledzić na rys. 4. Mniejsze amplitudy  $L$  związane są z falą pokładową, a maksymalne zaś z falą pokładową w maksimum energetycznym, czyli z falą Airego  $L_A$ . Najniższe amplitudy ma fala pierwotna SG ( $S_1$ ).



Rys. 4. Model I. Pole przemieszczeń. Czas obserwacji  $t = 25$  ms  
 Fig. 4. Model I. Field of displacements. Observation times  $t = 25$  ms

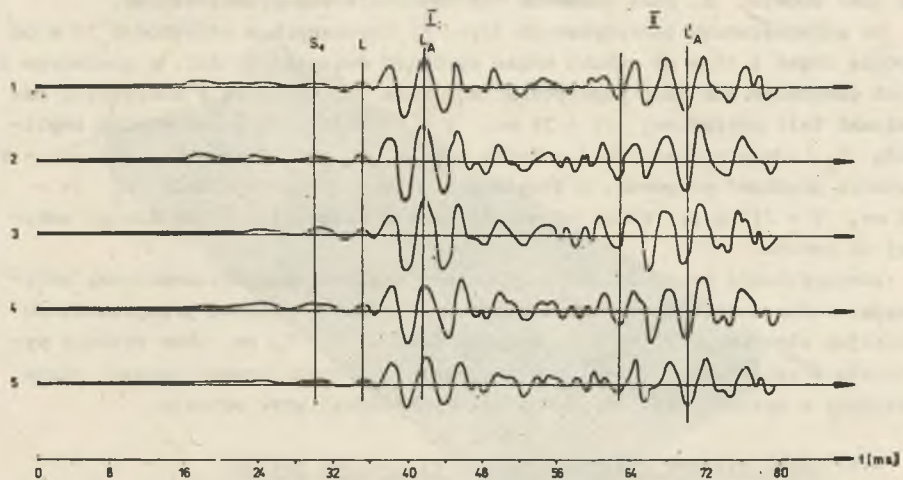
Dochodząc do pionowej granicy uskoku, fala pokładowa ulega odbiciu, co można obserwować na rys. 5 dla czasu  $t = 56,7$  ms, śledząc maksymalną amplitudę  $L_A$ , po odbiciu  $L'_A$ . Amplituda tej odbitej fali pokładowej  $L'_A$  jest



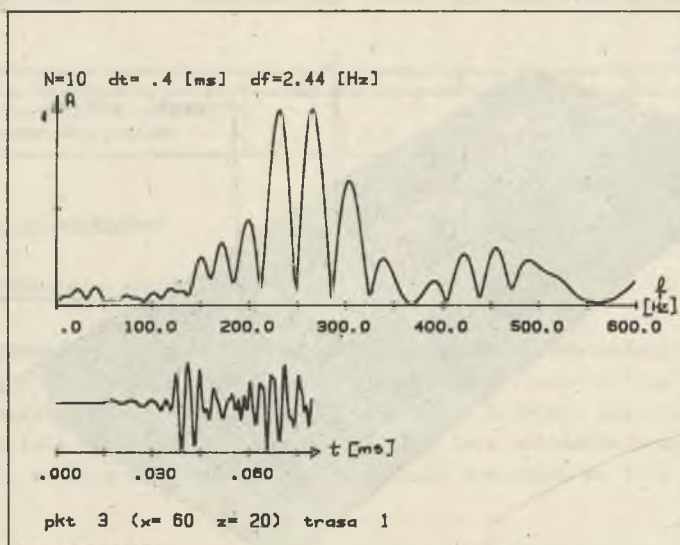
OBSERWACJA 650

XX

Rys. 5. Model I. Pole przemieszczeń. Czas obserwacji  $t = 65$  ms  
 Fig. 5. Model I. Field of displacements. Observation times  $t = 65$  ms



Rys. 6. Model I. Sejsmogramy teoretyczne  
 Fig. 6. Model I. Theoretical seismograms



Rys. 7. Model I. Widmo amplitudowe

Fig. 7. Amplitude spectrum

mniejsza od padającej i przemieszcza się w kierunku przeciwnym do przyjętego jako dodatni  $x$ . Poza uskokiem nie obserwuje się przemieszczeń.

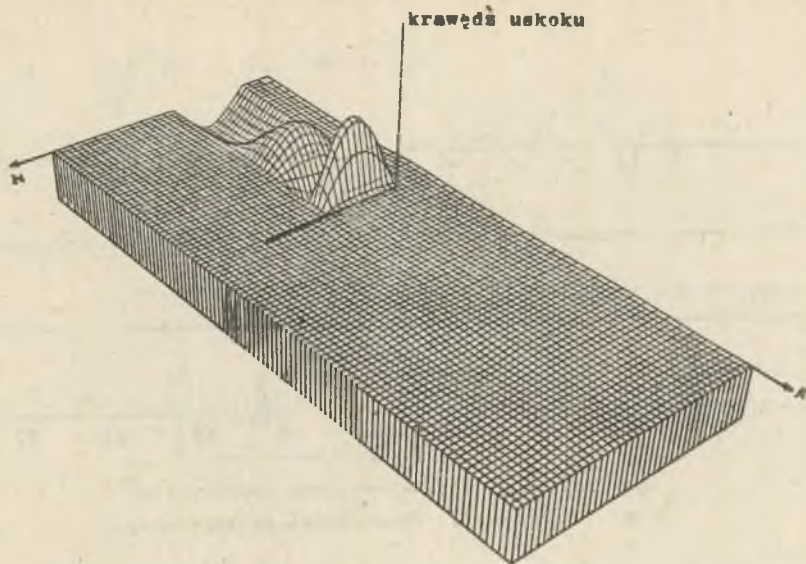
Na sejsmogramach teoretycznych (rys. 6) uzyskanych w odległości 30 m od źródła drgań i 10 m od uskoku można wyróżnić dwa pakiety fal. W pierwszym z nich obserwuje się falę poprzeczną  $S_1$ , falę  $L$  związaną z pierwszymi impulsami fali pokładowej ( $t = 34$  ms,  $V = 860$  m/s) oraz maksymalną amplitudą  $L_A$  odpowiadającą fali w fazie Airego ( $t = 41,6$  ms,  $V = 720$  m/s -  $V$  oznacza prędkość grupową). W drugim pakiecie wyróżnia się fala  $L'_A$  ( $t = 70$  ms,  $V = 710$  m/s), która odpowiada fali pokładowej w fazie Airego odbitej od uskoku.

Identyfikację prędkościową uzupełniono analizą częstotliwościową, obliczając widmo amplitudowe trasy 3 (rys. 7). Analizę widmową przeprowadzono stosując algorytm FFT, przy kroku próbkowania  $dt = 0,4$  ms, okno czasowe wybierano w zależności od analizowanego zapisu. Skomplikowany kształt widma świadczy o zmianie częstotliwości fali pokładowej przy odbiciu.

#### 4.2. Uskok pionowy o zrzucie równym miąższości pokładu

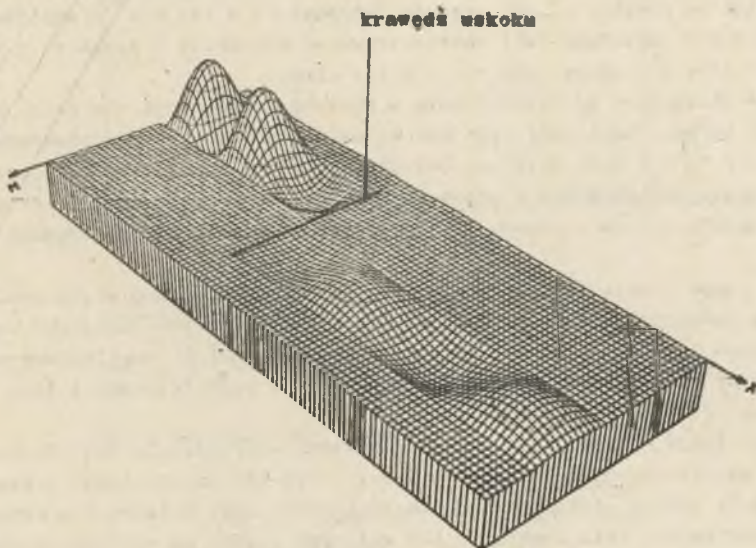
Fala pokładowa powstająca i rozchodząca się w niezaburzonej części pokładu odbija się od pionowej granicy uskoku, który przebiega w odległości 20 m od źródła, co obserwuje się na obrazach przemieszczeń (rys. 8 i 9) oraz sejsmogramach teoretycznych (rys. 10) uzyskanych w punktach obserwacji umieszczonych przed uskokiem.





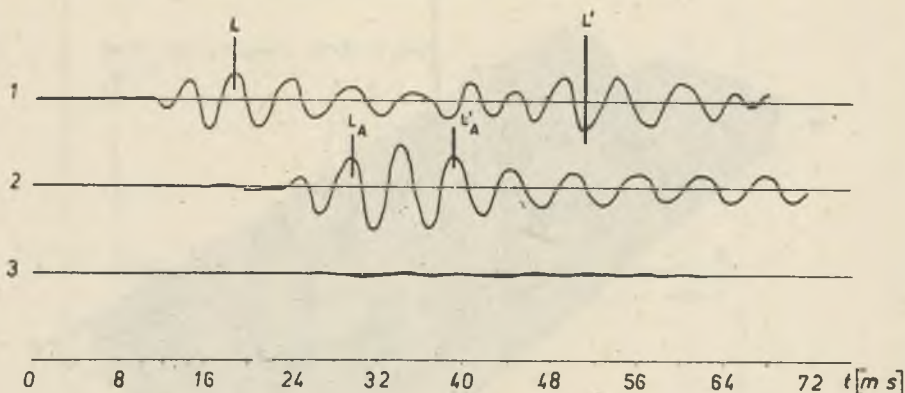
OBSERWACJA 150

Rys. 8. Model II. Pole przemieszczeń. Czas obserwacji  $t = 30$  ms  
Fig. 8. Model II. Field of displacements. Observation times  $t = 30$  ms



OBSERWACJA 270

Rys. 9. Model II. Pole przemieszczeń. Czas obserwacji  $t = 54$  ms  
Fig. 9. Model II. Field of displacements. Observation times  $t = 54$  ms



Rys. 10. Model II. Sejsmogramy teoretyczne

Fig. 10. Model II. Theoretical seismograms

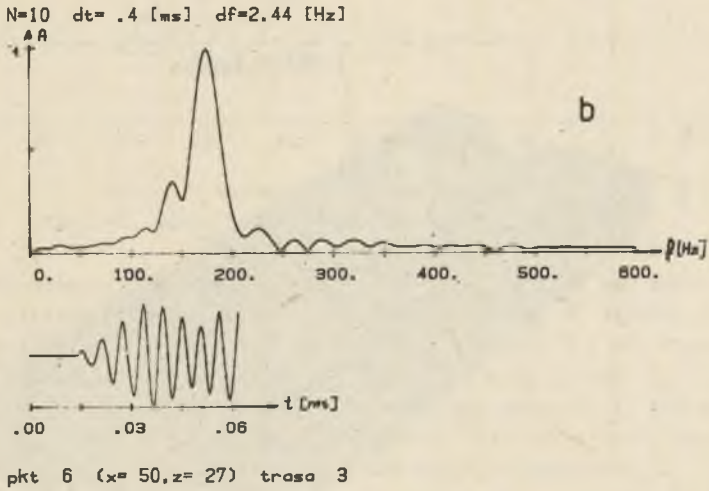
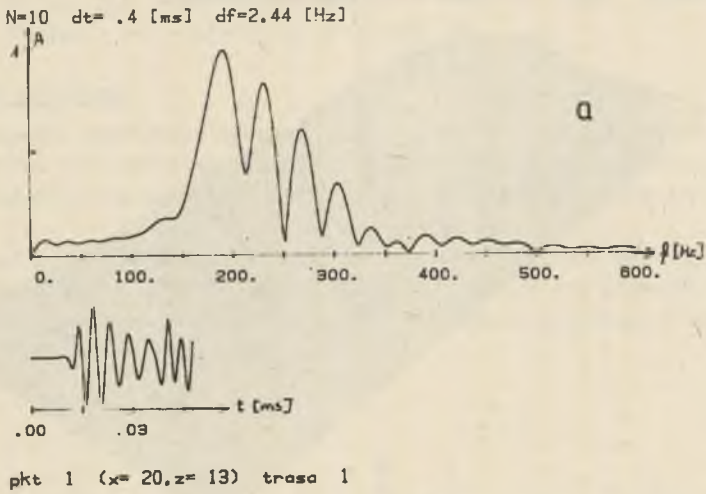
W pokładzie węgla poza uskokiem obserwuje się przemieszczenia o mniejszej amplitudzie. Są one wyraźnie widoczne na obrazach przestrzennych, ale na sejsmogramach uzyskanych w punktach obserwacji 6, 7 i 9 są trudne do identyfikacji. Na sejsmogramie teoretycznym (rys. 10) uzyskanym w punkcie obserwacji 1 wyróżnia się przechodzącą falę pokładową typu Love'a  $L'$  i falę odbitą od uskoku  $L$ . Jej prędkość grupowa  $V = 555$  m/s i amplitudy mniejsze niż amplitudy fali zarejestrowanej w punkcie 2 świadczą o tym, że jest to fala pokładowa, ale nie w fazie Airego.

Na sejsmogramie zarejestrowanym w punkcie 2 obserwuje się falę  $L_A$  i  $L'_A$  w fazie Airego. Amplitudy tych fal wzrosły w porównaniu z zaobserwowanymi w punkcie 1. Z powodu bliskiej odległości punktu obserwacji od płaszczyzny uskoku fale przechodząca i odbita przychodzą do odbiornika w bliskim czasie i na zapisie trudno wyznaczyć ich pierwsze wystąpienia i maksymalne amplitudy.

Dla uzupełnienia identyfikacji prędkościowej obliczono widma amplitudowe fal rozchodzących się w obu pokładach węgla dla zapisów czasowych uzyskanych w punktach 1, 2, 6 (rys. 11). W każdym przypadku widmo amplitudowe ma nieco inny obraz, co świadczy o złożonym charakterze pola falowego i jego zależności od odległości od uskoku.

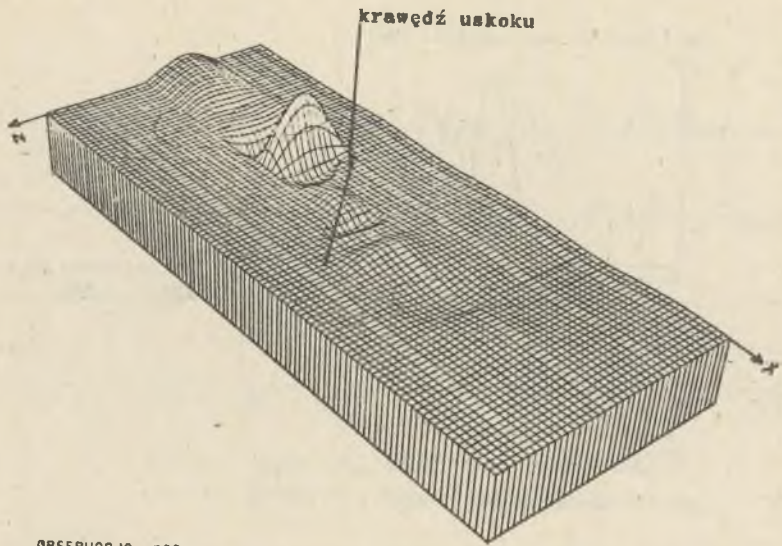
Widmo trasy 1 (rys. 11a) posiada maksimum w przedziale 150-200 Hz oraz wtórne maksima w przedziałach 200-250 Hz, 250-300 Hz. Ponieważ trasa 1 zawiera fale odbite, taki rozkład częstotliwości może świadczyć o konwersji mody podstawowej fali Love'a do mód wyższych rzędów po odbiciu od uskoku.

Maksymalna amplituda widma dla trasy 6 (rys. 11b) wynosi ok. 160 Hz i odpowiada częstotliwości fali pokładowej w fazie Airego wyznaczonej z krzywej dyspersji dla pokładu niezaburzonego o analogicznych parametrach. Świad-



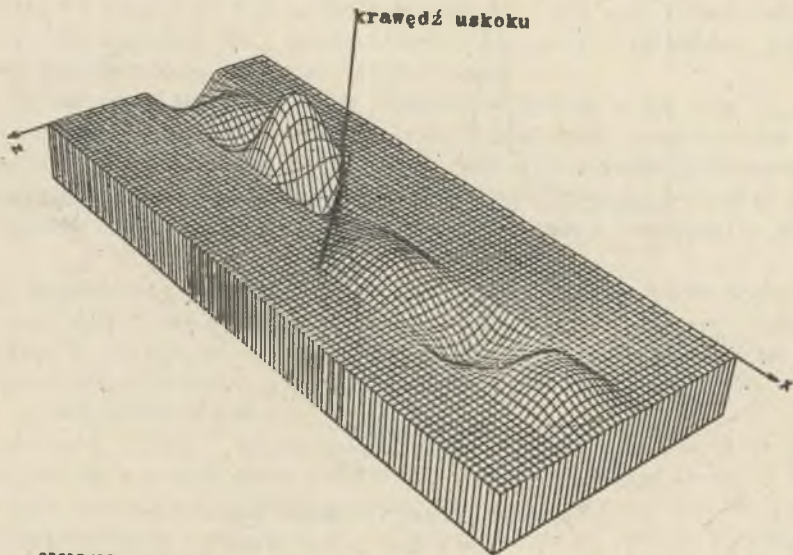
Rys. 11. Model II. Widmo amplitudowe  
a - trasa 1, b - trasa 3

Fig. 11. Model II. Amplitude spectrum  
a - trace 1, b - trace 3



OBSERWACJA 300

Rys. 12. Model III. Pole przemieszczeń. Czas obserwacji  $t = 40$  ms  
 Fig. 12. Model III. Field of displacements. Observation times  $t = 40$  ms



OBSERWACJA 450

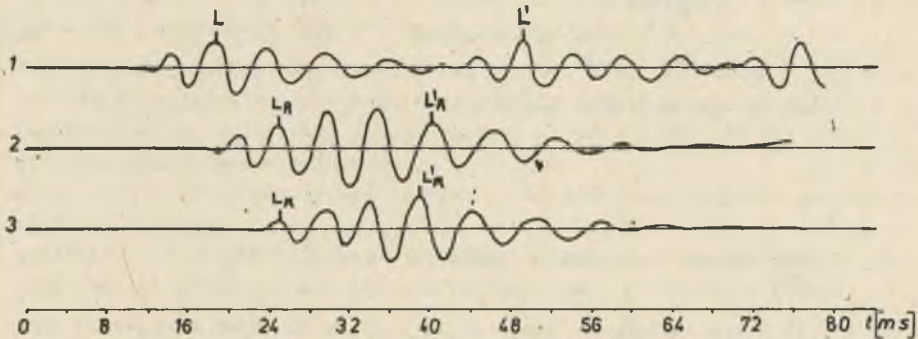
Rys. 13. Model III. Pole przemieszczeń. Czas obserwacji  $t = 90$  ms  
 Fig. 13. Model III. Field of displacements. Observation times  $t = 90$  ms

czy to o propagacji fali pokładowej w zrzuconej warstwie węgla, chociaż źródło drgań znajduje się w pierwszym pokładzie.

#### 4.3. Uskok nachylony

W tym przypadku modelowano uskok o nachyleniu płaszczyzny uskokowej  $50^\circ$  i zrzucie równym  $1/2$  miąższości pokładu. W obu pokładach węgla, za i przed uskokiem, obserwuje się przemieszczenia związane z falą pokładową (rys. 12 i 13).

W pierwszym pokładzie następuje odbicie fali na nachylonej płaszczyźnie uskokowej (rys. 12 -  $t = 40$  ms). Od tego czasu pojawiają się przemieszczenia w drugim pokładzie węgla. Ich amplitudy są znacznie mniejsze od amplitud obserwowanych przed uskokiem.

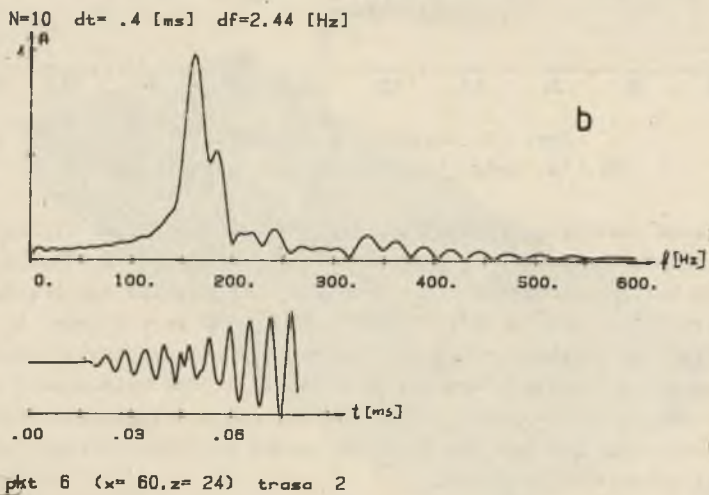
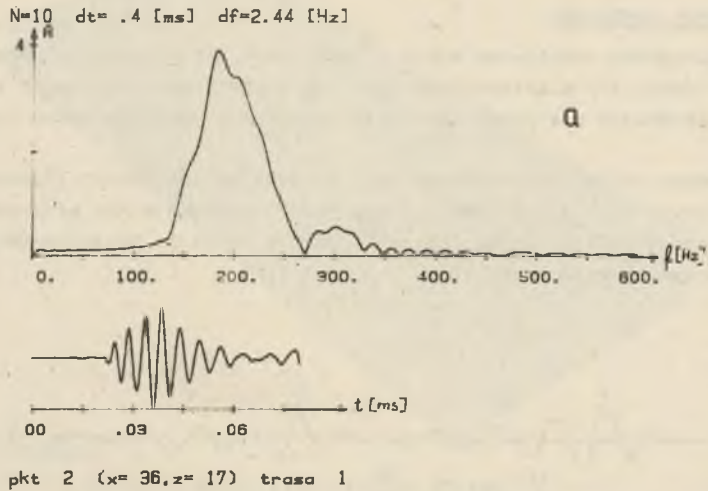


Rys. 14. Sejsmogramy teoretyczne

Fig. 14. Model III. Theoretical seismograms

Na zapisach czasowych uzyskanych w punktach 1, 2, 3 (rys. 14) można wydzielić falę pokładową Love'a, przechodzącą L i odbitą  $L'$  (trasa 1) oraz fazę Airego fali przechodzącej  $L_A$  i odbitej  $L'_A$  (trasa 2 i 3). Prędkość grupowa fali L wynosi 540 m/s, a prędkość grupowa fazy Airego  $L_A - U_0 = 700$  m/s (zgodnie z wyznaczoną z teoretycznej krzywej dyspersji). Należy zwrócić uwagę, że również w tym przypadku punkt 1 jest umieszczony w takiej odległości od źródła, w której rozpoczyna się dopiero formowanie fali pokładowej, odległość zaś punktów 2 i 3 od uskoku utrudnia dokładne wydzielenie fali przechodzącej i odbitej.

Potwierdzeniem identyfikacji prędkościowej są widma amplitudowe obliczone dla zapisów w punktach 2 (rys. 15a) i 6 (rys. 15b). Widmo trasy 2 zawiera częstotliwości wyższe od wyznaczonych z krzywej dyspersji, co można tłumaczyć podobnie jak w przypadku uskoku o nachyleniu pionowym. Zmiana kąta nachylenia wyraźnie wpływa na charakterystykę widmową.



Rys. 15. Widmo amplitudowe  
a - trasa 2, b - punkt 6

Fig. 15. Model III. Amplitude spectrum  
a - trace 2, b - point 6

## 5. WNIOSKI

Przedstawione wybrane wyniki modelowań pola fali pokładowej typu Love'a w warstwach węgla zaburzonych uskokiem metodą skończonych różnic pokazują ogromną przydatność prowadzenia badań teoretycznych przed przystąpieniem do pomiarów polowych.

Przestrzenne obrazy przemieszczeń pozwalają śledzić powstanie i rozchodzenie się fali pokładowej w dowolnym modelu rzeczywistej sytuacji geologiczno-górnictwej.

Śledzenie rozkładu amplitud fali pokładowej w modelu pozwala przewidzieć rzeczywisty rozkład amplitud, co ułatwia projektowanie prac i identyfikację fal przy badaniu mikrotektoniki pokładów węgla omawianą metodą.

Sejsmogramy teoretyczne umożliwiają ilościową ocenę prędkości i częstotliwości fali pokładowej w założonym modelu, co również przyczynia się do opracowania nowych kryteriów identyfikacji i interpretacji.

Szczegółowe wnioski odnośnie do wpływu zaburzeń omawianych typów na propagację fali pokładowej typu Love'a są następujące:

- fala pokładowa ulega odbiciu na przeszkodzie, jaką jest uskok i jej częstotliwość wzrasta w porównaniu z częstotliwością fali przechodzącej i częstotliwością wyznaczoną z teoretycznej krzywej dyspersji dla analogicznego modelu bez nieciągłości,
- amplitudy fal odbitych zależą od kąta nachylenia płaszczyzny uskokowej i wielkości zrzutu,
- amplitudy fal przechodzących, w warstwach węgla poza nieciągłościami zależą również od nachylenia płaszczyzny uskokowej i wielkości zrzutu.

Aby skutecznie wykrywać uskoki, przewidywać ich nachylenia i zrzuty, należy analizować amplitudy, prędkości i częstotliwość zarejestrowanej fali pokładowej.

## LITERATURA

- [1] Alterman Z., Loewenthal D.: Computer Generated Seismograms. Methods in Computational Physics. Academic Press, New York 1972.
- [2] Jakóbić-Kwaśnicka B.: Charakterystyka fal pokładowych i możliwości ich wykorzystania w sejsmice górniczej. Rozprawa doktorska. Biblioteka Główna AGH, 1983.
- [3] Krey Th.: Channel Waves as a Tool of Applied Geophysics in Coal Mining. Geophysics, vol. 28, 1963.
- [4] Krey Th.: In-Seam Seismic Exploration Techniques, International Coal Exploration Symposium, London 1976.
- [5] Kwaśnicka B., Ślusarczyk R.: Zależność dyspersji prędkości fal kanałowych od parametrów sprężystych ośrodka. Archiwum Górnictwa, t. 23 z. 4, 1978.

- [6] Zahradnik J.: On the Possibilities of Studying Impulsive Elastic Waves in an Inhomogeneous Medium by the Finite Difference Method. *Studia Geophysica et Geodaetica*, r. 18, No 4 1974.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Wacław Zuberek

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1988 r.

#### КАНАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ ТИПА ЛЯВА В МОДЕЛЯХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ СО СБРОСАМИ

##### Р е з ю м е

Метод разностных схем был применен к исследованию расхождения канальных волн типа Лява в моделях угольных пластов со сбросами. Моделировались пласты с вертикальным сбросом со смещением 1 толщи угольного пласта, со сбросом с углом наклона 50 градусов и со смещением 0,5 мощности угольного пласта, и пласт с вертикальным сбросом с большим смещением. Были представлены результаты расчетов волновой картины для избранных моментов времени и теоретические сейсмограммы, из которых вычислялись амплитудные спектры и скорости канальных волн типа Лява.

#### LOVE-TYPE SEAM-WAVES IN MODELS OF COAL SEAMS WITH FAULTS

##### S u m m a r y

A finite-difference method was used to study the propagation of Love-type seam-waves in models of faults in coal seams. A vertical angle fault (seam and), vertical angle fault of throw 1 times thickness and fault with a hade angle of 50° of throw 0,5 times seam thickness were examined. Pictures of the wave field at selected times and theoretical seismograms are presented. Finally amplitude spectra and velocities of Love-seam waves from the theoretical seismograms were calculated.