

Joanna KURZEJA, Jerzy KORNOWSKI

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Energia emisji, strumień energii i energia umowna w sejsmoakustyce górnictwej

Słowa kluczowe

Energia sejsmiczna, sejsmoakustyka

Streszczenie

W pracy przedstawiono najpierw szczegółowy opis związków tak zwanej energii umownej (EU) – odczytywanej z komputerowego wyjścia systemów sejsmoakustyki górniczej – ze strumieniem (e^*) energii pola falowego w otoczeniu geofonu. Następnie analizowano warunkowe – zależne od modelu – związki strumienia e^* z ważną w zastosowaniach, energią (E) emisji AE z pola źródłowego. Szczegółowo przedstawiono względnie prosty estymator energii emitowanej w określonym przedziale czasu z frontu eksploatowanej ściany, na podstawie obserwowanych wartości EU , bez lokalizacji źródeł AE.

Przyjęty model i metoda umożliwiły zbudowanie programu, który rozwiązuje zarówno „proste (symulacyjne) zadanie sejsmoakustyki” (tzn. oblicza wartości EU gdy dana jest energia E oraz współczynnik γ absorpcji energii w pokładzie), jak i „odwrotne zadanie sejsmoakustyki” (tzn. oblicza energię E emitowaną z pola emisji oraz współczynnik γ absorpcji w pokładzie gdy dane są wartości EU).

To właśnie niewymagający lokalizacji sposób oszacowania energii AE na podstawie rutynowych obserwacji standardową aparaturą – sposób, który ponadto umożliwia oszacowanie wartości γ jako dodatkowego wskaźnika stopnia spękania (a pośrednio i naprężenia) górotworu – czyni przedstawioną metodę niezwykle wygodną i taną.

W końcowej części pracy przedstawiono przykładowe wyniki estymacji na podstawie obserwacji AE z kopalni.

1. Wprowadzenie

Przedmiotem zainteresowania tej pracy jest estymacja – czyli oszacowanie metodami statystyki – energii emisji sejsmoakustycznej, i związane z nią pojęcia, które będą się wielokrotnie pojawiały, stąd dla zwięzłości dalej stosowane są skróty: AE – (wszystkie tryby i odmiany słowa) sejsmoakustyka, EU – energia umowna, E – energia (dla zaznaczenia kontrastu czasem zwana „fizyczną”), e^* - strumień energii. Inne skróty i symbole objaśniono w miejscu występowania.

Sejsmoakustyka jest jedną z metod stosowanych w polskim górnictwie do oceny i prognozy indukowanego eksploatacją zagrożenia sejsmicznego, które kojarzone jest zazwyczaj z zagrożeniem tąpnięciami – choć nie jest z nim tożsame. Zasadniczą zaletą stosowania pojęcia, oraz oceniania i prognozowania zagrożenia sejsmicznego – zamiast zagrożenia tąpnięciami – jest

istnienie ścisłej, ilościowej i konstruktywnej (tzn. umożliwiającej obliczanie i prognozowanie) definicji tej wielkości, o postaci:

Zagrożenie sejsmiczne, Z^s lub – w sposób jawny wprowadzając czas i obszar – $Z^s[(t,t+\Delta t),S]$, jest to prawdopodobieństwo $Z^s = P\{E^C(t,t+\Delta t),S \geq E_g\}$, że całkowita energia sejsmiczna (E^C) wyemitowana w okresie $(t,t+\Delta t)$ z obszaru S , przekroczy wartość graniczną E_g zwaną „progiem bezpieczeństwa” lub „elementarną energią tąpnięcia” (Konopko 1994).

Gdy $S \rightarrow 0$ oraz $\Delta t \rightarrow 0$ to tak zdefiniowane zagrożenie Z^s staje się zagrożeniem („punktowym”) wystąpienia zdarzenia $E > E_g$ w chwili t w punkcie S . Jak argumentują J. Kornowski i J. Kurzeja (2008), przejście graniczne ($S \rightarrow 0$, $\Delta t \rightarrow 0$) jest narzędziem teoretycznym, którego nie polecamy w zastosowaniach, ograniczając prognozy do obszaru ściany i okresu godziny lub skrawu lub zmiany.

W definicji tej występuje pojęcie energii (E^C) całkowitej emisji sejsmicznej z ustalonego obszaru (np. ściany, S) w ustalonym okresie (np. od t do $t+\Delta t$). Ponieważ energią całkowitą, E^C , oblicza się jako sumę energii wstrząsów (E^w) i energii zdarzeń sejsmoakustycznych (E^{AE}) to podstawowym warunkiem obliczalności E^C jest addytywność E^w i E^{AE} , co oznacza, że muszą to być identyczne wielkości fizyczne (tzn. energia) i muszą być wyrażone w tych samych jednostkach. Tymczasem przyjmuje się powszechnie, że (E^w) energia wstrząsów jest energią wyrażoną w dżulach, podczas gdy systemy obserwacyjne AE (np. ARES) informują użytkownika o wartości (EU) tak zwanej energii umownej, która nie jest energią i nie jest względem energii addytywna tak, że dodawanie ($E^w + EU$) – jeśli nie jest niefortunnym „skrótom myślowym” – jest zwykłym nieporozumieniem.

Aby ułatwić dalszy rozwój AE, a także w związku z próbami zastosowania do oceny zagrożenia sejsmicznego nowych i nowoczesnych, obiecujących metod ilościowych (np. Sikora, Wróbel 2009), które wymagają poprawnej estymacji E^C , energii całkowitej, w pracy tej przedstawiono szczegółowe uzasadnienie i wyprowadzenie estymatora (tzn. równania umożliwiającego racjonalne oszacowanie) fizycznej, wyrażonej w dżulach, energii E^{AE} zbiorów zdarzeń AE. Estymator ten umożliwia obliczenie E^{AE} na podstawie rutynowych, zgodnych z odpowiednią Instrukcją, obserwacji AE z pomocą aparatury ARES-5, zarówno dla źródeł zlokalizowanych (rozd. 2.2) jak i – co znacznie ważniejsze w zastosowaniach – bez lokalizacji źródeł, gdy energia umowna EU (z danej ściany) kumulowana jest w ustalonych (najlepiej zgodnych z czasem trwania skrawu) okresach czasu. W rozdz. 3 opisano metodę równoczesnej estymacji E^{AE} oraz γ , współczynnika absorpcji energii fal w pokładzie przed frontem ściany, co ma podstawowe znaczenie dla jakości wyników. Opisana metoda przystosowana jest do obserwacji za pomocą czujników (geofonów) jednoskładowych, lecz może być łatwo uogólniona w przypadku wprowadzenia czujników trójskładowych. By ograniczyć złożoność analiz, pominięto zagadnienie zależności (wielkości wpływających na obliczaną energię) od częstotliwości.

Należy zauważyć, że przedstawiony w rozdz. 2.2 i 3 estymator energii generuje jedną, jednoznacznie określoną ocenę energii emitowanej z tak zwanego pola emisji (Kornowski, Kurzeja 2008) – którym jest otoczenie frontu ścianowego – niezależnie od liczby geofonów ścianę tą obserwujących. Stanowi to (przybliżone oczywiście) rozwiązanie jednego z najpoważniejszych problemów sejsmoakustycznej oceny zagrożenia, powstającego zawsze, gdy z N geofonów otrzymuje się, w tym samym czasie, N sprzecznych ocen zagrożenia.

Ilekoć w pracy tej wspomniana jest Instrukcja, oznacza to instrukcję „Metoda sejsmoakustyczna oceny stanu zagrożenia tąpnięciami” stanowiącą załącznik nr 3 w Instrukcji (Barański i in. 2007).

2. Estymacja energii AE

2.1. Pojęcia, definicje i zależności podstawowe

Cechą specyficzną zagadnienia estymacji energii AE, odróżniającą ją od analogicznego zadania sejsmologii górniczej **jest brak lokalizacji źródeł („ognisk”) AE**. Wyklucza to możliwość bezpośredniego stosowania – do oceny energii AE – równań znanych z sejsmologii.

By nie wchodzić w zbędne detale założono, że w torze TSA sygnałem jest napięcie, że poprawnie działa detekcja zdarzeń i poprawnie dobrana jest aparatura – co oznacza, że zazwyczaj pracuje ona w „obszarze stałego wzmocnienia” (Kornowski 2002; Kornowski, Kurzeja 2008) gdzie charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa jest w przybliżeniu płaska, zatem wzmocnienie nie zależy od częstotliwości – a fala która niesie informację o energii AE jest tzw. bezpośrednią falą P.

Założenie to zasługuje na krótki komentarz: otóż na odległościach istotnych dla AE (40 m – 250 m), zazwyczaj nie obserwuje się rozdzielania fal P i S, drgania mogą więc obejmować obie te fale, w szczególności składową SH. Uważa się jednak, że nie dotyczy to fal od źródeł eksplozyjnych i można przypuszczać – ze względu na analogię początkowych pomieszczeń – że nie dotyczy też fal od „naturalnych” źródeł AE położonych w pobliżu frontu ścianowego, których mechanizm wiąże się ze skokowym wzrostem płaskich (prawie) pionowych szczelin, równoległych do czoła ściany. Te źródła generują przede wszystkim fale P i dlatego w rozważaniach ograniczono się do tego typu fali. Uruchomienie na szerszą skalę obserwacji za pomocą czujników trójskładowych może – w przyszłości – założenie to uczynić zbędnym.

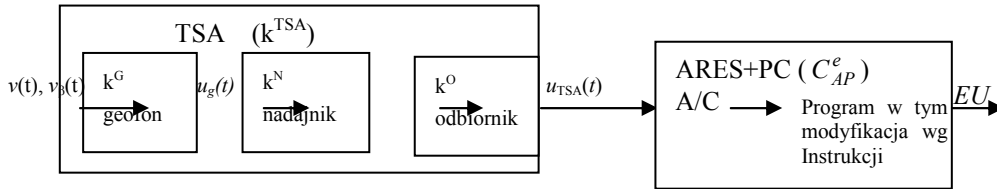
Dla sygnałów AE, których widmo i amplituda mieszczą się (lub mieszczą się w przybliżeniu) w obszarze stałego wzmocnienia aparatury **odpowiedź napięciowa, $u_G(t)$, jednoskładowego geofonu jest proporcjonalna do poosiowej składowej** (patrz rys. 2.1)

$v_\beta(t)$ – indeks „ β ” wskazuje, że to składowa poosiowa – prędkości $v(t)$ drgań cząstek ośrodka, z którym geofon ten ma sztywny kontakt

$$u_G(t) = k^G v_\beta(t) \quad [V] \quad (2.1a)$$

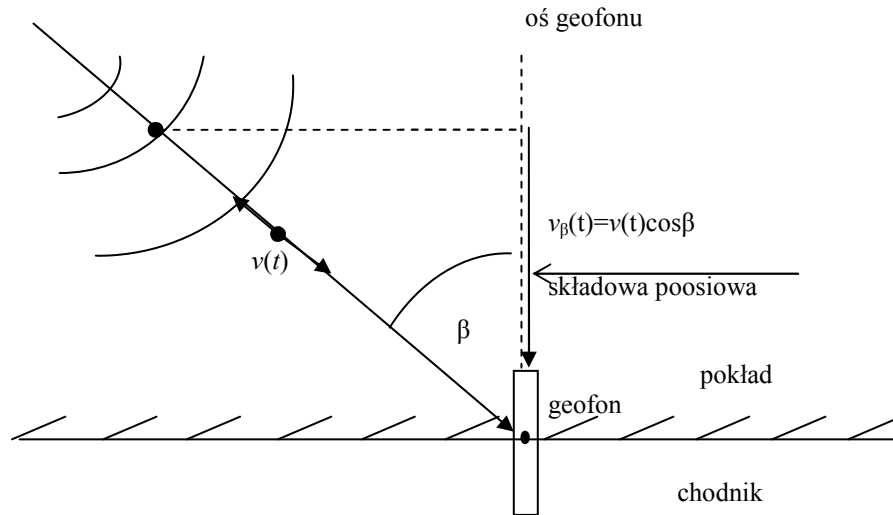
$$u_G(t) = k^G v(t) \cos \beta \quad [V] \quad (2.1b)$$

gdzie: $\cos \beta$ to teoretyczna „charakterystyka kierunkowa” geofonu (w praktyce stosujemy postać $0,9(0,111 + \cos \beta)$ lub $0,9(0,111 + x/r)$ – Kornowski 2002, r. 5.2.3 – i to samo dotyczy czujników piezoelektrycznych), natomiast k^G V·s/m to czułość (lub wzmocnienie) amplitudy sygnału wejściowego ($v_\beta(t)$) przez geofon.



Rys. 2.1a. Szkic ilustrujący przepływ sygnału w torze transmisyjno – pomiarowym aparatury sejsmoakustycznej

Fig. 2.1a. Diagram of a signal flow in a seismoacoustic measurement and transmission line



Rys. 2.1b. Szkic ułatwiający interpretację pojęcia „poosiowej składowej” (fali P). Konstrukcja geofonu umożliwia drgania uzwojenia tylko wzdłuż osi, stąd geofon reaguje tylko na składową poosiową drgań.

Fig. 2.1b. Sketch illustrating the notion of „axial component” (of P-wave). Geophone design allows only coaxial oscillations of the coil, so that it reacts only to the axial component of the wave.

Zatem

$$u_G^2(t) = [k^G \cdot v_\beta(t)]^2 \quad (2.1c)$$

i wiadomo, że energia całkowita (tzn. kinetyczna plus potencjalna, gdzie energia kinetyczna masy ρ to $\rho v^2/2$) to:

$$e^*(t) = V\rho v^2(t) \quad (2.2a)$$

$$e^0 * (t) = (V\rho)^{-1} e^*(t) \quad (2.2b)$$

$$e^0 * (t) = v^2(t) \quad (2.2c)$$

gdzie: $e^*(t)$ to chwilowa wartość strumienia energii (*) fal propagujących z prędkością V w ośrodku o gęstością ρ (uwaga, odróżniać należy V – prędkość propagacji i v – prędkość drgań cząstek ośrodka wokół położenia równowagi). Ponadto $e^{0*}(t)$ to chwilowa unormowana (tzn. określona dla $\rho=1\text{kg/m}^3$, $V=1\text{m/s}$) wartość strumienia energii. (**)

Wprowadzając jeszcze pojęcia **poosiowych składowych strumienia energii**

$$e_{\beta}^*(t) = e^*(t) \cos^2 \beta^2 \quad (2.2d)$$

$$e_{\beta}^{0*}(t) = (v_{\beta}(t))^2 \quad (2.2e)$$

$$e_{\beta}^{0*}(t) = e^{0*}(t) \cos^2 \beta \quad (2.2f)$$

Podnosząc (2.1b) do kwadratu i w miejsce $v_{\beta}^2(t)$, wstawiając $e^{0*}(t)$, otrzymuje się

$$u_G^2(t) = e_{\beta}^{0*}(t) \cdot (k^G)^2 \quad (2.3)$$

Równanie (2.3) ma podstawowe znaczenie w zadaniu pomiaru/oceny energii fal za pomocą aparatury AE: mówi ono, że u_G^2 , kwadrat napięcia na wyjściu geofonu, jest proporcjonalny – ze współczynnikiem proporcji $(k^G)^2$ – do poosiowej składowej unormowanego strumienia energii pola falowego w otoczeniu geofonu.

Wśród wielkości fizycznych związanych z energią sejsmiczną tylko ta wielkość, (e_{β}^{0*}) , jest bezpośrednio mierzalna za pomocą jednoskładowego geofonu. Wszystkie parametry określające źródło, w tym energia (E) źródłowa, mogą być tylko estymowane, a wyniki estymacji zależą od przyjętego modelu zjawiska i ośrodka.

Współczynnik k^G nazywamy wzmocnieniem amplitudowym geofonu a $(k^G)^2$ – „wzmocnieniem energetycznym” geofonu. Powtórzmy, że k^G jest wielkością stałą (tzn. niezależną od częstotliwości) tylko wówczas, gdy i widmo sygnału i jego amplituda mieszczą się w obszarze stałego wzmocnienia tego geofonu (co jest oczywistą idealizacją). Obszar ten jest, lub powinien być, określany w procesie kalibracji aparatury i aparaturę budować (a także kupować i eksploatować) należy tak, by jak największa część energii sygnałów AE mieściła się w obszarze (i częstotliwości i amplitudy) stałego wzmocnienia aparatury.

* Strumień (e^*) energii fal, w przedziale $(0, T)$ czasu propagujących z prędkością V_p przez 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku propagacji, w ośrodku o gęstości ρ , jest określony równaniem (2.4a) i ma wymiar $[\text{J}/\text{m}^2]$. Wartość chwilowa ($e^*(t)$) strumienia ma wymiar $[\text{J}/(\text{m}^2\text{s})]$.

** Zgodnie z (2.2b,c) uważać można, że chwilowa wartość $e^{0*}(t)$ jest to, po prostu chwilowa wartość $v^2(t)$, kwadratu prędkości drgań cząstek lub, że jest to skrócony zapis wyrażenia $(\rho V)^{-1} e^*(t)$. Zauważmy, że $e^{0*}(t)$ ma wymiar $[\text{m}^2/\text{s}^2]$.

Dla sygnałów AE o skończonym czasie trwania (zatem w praktyce zawsze), zapisy „chwilowe” zastąpić można scałkowanymi (od 0 do T) wartościami strumienia

$$e^* = \rho V \int_0^T v^2(t) dt; \text{ J/m}^2 \quad (2.4a)$$

$$e_\beta^* = \rho V \int_0^T [v(t) \cos \beta]^2 dt; \text{ J/m}^2 \quad (2.4b)$$

$$e^{0*} = (\rho V)^{-1} e^* \quad (2.4c)$$

$$e_\beta^{0*} = (\rho V)^{-1} e_\beta^* \quad (2.4d)$$

$$e_\beta^{0*} = (\rho V)^{-1} e^* \cos^2 \beta \quad (2.4e)$$

Zauważmy, że w odróżnieniu od $e^{0*}(t)$ wielkości e^{0*} i e_β^{0*} mają wymiar [m^2/s].

Jeżeli sygnał napięciowy $u_T(t)$ mierzony jest – nie na wyjściu geofonu lecz, jak sugeruje indeks „ T ” – na wyjściu toru TSA to, analogicznie do równania (2.3), lecz z indeksem „ T ” zamiast „ G ” i całkując od 0 do T , zapisać można

$$\int_0^T u_T^2(t) dt = (k^{TSA})^2 e_\beta^{0*} \quad (2.5)$$

(wielkość k^{TSA} występuje jako k'_{500} w Instrukcji metody sejsmoakustycznej) i k^{TSA} to wzmocnienie toru TSA, a $(k^{TSA})^2$ to „wzmocnienie energetyczne” tego toru. Ponieważ między wyjściem TSA a użytkownikiem jest komputer (z konwerterem A/C i program realizującym Instrukcję AE), pamiętać należy o „stałej aparaturowej” C_{AP}^e („energetycznej”, tzn. modyfikującej energię) – która dla ARES-5 wynosi średnio $C_{AP}^e = 850$ (*) – co przekształca (2.5) do postaci

$$\int_0^T u_s^2(t) dt = (k^{TSA})^2 C_{AP}^e e_\beta^{0*} \quad (2.6a)$$

gdzie $u_s(t) [= (C_{AP}^e)^{1/2} u_T(t)]$ to sygnał napięciowy w komputerze ARES odczytywany przez oprogramowanie (software, stąd indeks „ s ”) obliczające energię, lub równoważnie

$$C_{AP}^e \int_0^T u_T^2(t) dt = C_{AP}^e (k^{TSA})^2 e_\beta^{0*} \quad (2.6b)$$

gdzie $u_T(t)$ to sygnał na wyjściu TSA. Jeżeli obliczenia prowadzone są zgodnie z Instrukcją metody AE to pamiętać też należy (Instrukcja, p. 6.6:”... całkę z kwadratu impulsu ...

* Wielkość tę mierzy się podając na wejście (np.) konwertera A/C – lub odbiornika (lecz wówczas należy uwzględnić jego wzmocnienie, k^o) – pochodzący z laboratoryjnego generatora sygnał o znanej energii i odczytując wynik z komputera na wyjściu ARESa.

pomnożoną przez r i podzieloną $50 \cdot (k'_{500})^2 \dots$) o modyfikacji czynnikiem $d/[50 \cdot (k'')^2]$, przy czym w tej pracy zastosowano symbol k'' by zaznaczyć, że – nie jest to prawdziwe wzmocnienie toru, działające poza świadomością obsługi lecz – jest to (k'') liczba okresowo wprowadzana do systemu przez obsługę i niekoniecznie $k'' = k^{TSA} \equiv k'_{500}$. Na przykład w wielu Stacjach Tapań, gdy $k'_{500} \approx 2,5 \cdot 10^4$, to wprowadza się $k'' = 2,5$ (co uważamy za poprawną obsługę systemu), lecz możliwe są i inne niezgodności. Biorąc to pod uwagę możemy zapisać

$$\frac{d}{50(k'')^2} \int_0^T u_s^2(t) dt = \frac{d}{50(k'')^2} (k^{TSA})^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} \quad (2.7)$$

Lewą stronę tego równania oznaczamy symbolem EU i nazywamy ENERGIĄ UMOWNĄ odczytywaną z komputerowego wyjścia systemu ARES na odpowiednim kanale. Tak więc

$$EU = \frac{d}{50} C_{pb}^2 \cdot C_{AP}^e \cdot e_{\beta}^{0*}, \quad [m^2/s] \quad (2.8)$$

gdzie d - odległość geofonu od ściany, $C_{pb} = k^{TSA}/k''$ i zazwyczaj $C_{pb} = 10^4$ zatem EU ma wymiar e_{β}^{0*} , unormowanego strumienia energii, czyli $[m^2/s]$.

Zatem, na przykład dla aparatury ARES-5 i „poprawnie” (tzn. zgodnie ze zwyczajem) wprowadzanej wartości $k'' = k^{TSA} \cdot 10^{-4}$ (wówczas $C_{pb} = k^{TSA}/k'' = 10^4$), dla ustalonego okresu (0-T) obserwacji, zakładając typowe wartości (w pokładzie węgla i dla fal P na głębokości 600 – 900 m) $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$, $V = 1800 \text{ m/s}$ oraz dzieląc C_{pb}^2 przez ρV i mnożąc e_{β}^{0*} przez ρV co, zgodnie z (2.2b) daje e_{β}^* , otrzymuje się

$$EU = d \cdot 726,5 \cdot e_{\beta}^* \quad (2.9)$$

Równanie to określa związek między e_{β}^* , poosiową składową strumienia energii fal w otoczeniu czujnika – a wielkością EU , zwaną potocznie energią umowną, odczytywaną z komputerowego wyjścia aparatury sejsmoakustycznej w założonych (typowych) warunkach. Związek między EU a E , ważną w zastosowaniach energią „źródłową”, zależy od wielu czynników i będzie przedmiotem następnych rozdziałów. Powtórzmy więc, że to:

e_{β}^{0*} , poosiowa składowa strumienia energii w otoczeniu czujnika, jest wielkością mierzalną. Energia źródłowa E jest zazwyczaj niemierzalna, lecz może być estymowana gdy przyjęte zostaną odpowiednie założenia/modele, a jakość tej estymacji zawsze zależy od jakości tych założeń/modeli. Tak otrzymany wynik nazywamy warunkowym rozwiązaniem zagadnienia

Naiwnością jest więc pogląd, że rejestracja trójskładowa rozwiąże problemy estymacji parametrów źródła – na przykład energii źródłowej (E). Rejestracja trójskładowa umożliwi bezpośredni pomiar fal P i S w otoczeniu czujnika (a stąd e^{0*} , a nie tylko e_{β}^{0*}), lecz założenia

i modele dotyczące ośrodka i źródła nadal będą konieczne – nawet w najprostszym przypadku źródła „punktowego”.

Użyteczność obserwacji trójskładowych do oceny energii emisji formalnie przedstawić można tak:

Jeżeli trzy składowe $\{v_x(t), v_y(t), v_z(t)\}$ wektora prędkości drgań (zarówno fal P i S) mierzone są trzy przez związane ⁽²⁾ jednoskładowe geofony G_x, G_y, G_z o wzajemnie prostopadłych osiach ⁽³⁾ i odpowiedzi $u_x(t), u_y(t), u_z(t)$ tych trzech geofonów przesyłane są niezależnymi jednokanałowymi torami (TSA) o znanych wzmocnieniach $k_x^{TSA}, k_y^{TSA}, k_z^{TSA}$ aż do cyfrowej części aparatury ⁽⁴⁾ gdzie, niezależnie dla każdego toru liczone są ⁽⁵⁾ wartości strumienia e_x^*, e_y^*, e_z^* i następnie dodawane ($e^* = e_x^* + e_y^* + e_z^*$)

to aparatura ta umożliwi (co najmniej w teorii) poprawny pomiar $e_{P,S}^* = e^*$, całkowitego strumienia energii fal sejsmicznych w otoczeniu czujnika.

Komentarz: nie ulega wątpliwości, że tak mierzona energia (i AE i wstrząsów) będzie większa od energii z pomiarów jednoskładowych. Nie wszyscy użytkownicy są na to przygotowani.

2.2. Źródło punktowe w pokładzie i estymacja jego energii

W rozdziale tym analizowany jest najprostszy przypadek estymacji energii źródłowej, mianowicie źródło punktowe (oddzielone od innych źródeł i w przestrzeni i w czasie). Jeżeli źródło punktowe emitujące energię E (energję sejsmiczną, utożsamianą z energią dalekiego pola fal) wystąpi w pokładzie węgla o miąższości h w znanej odległości r od geofonu, to strumień e^* energii (w otoczeniu geofonu) określony jest równaniem

$$e^* = (\pi r h)^{-1} \exp(-\gamma r) E, \quad [\text{J/m}^2] \quad (2.10)$$

gdzie $\gamma = 2\alpha$ [m^{-1}] to współczynnik absorpcji energii fal przez górotwór (natomiast α to współczynnik tłumienia amplitudy fal) a energia E „rozkłada się” na powierzchni walca ($S = \pi r h$) którego środek jest źródłem (w pobliżu frontu ściany, stąd $\pi r h$, a nie $2 \pi r h$) tak, że w ośrodku zachowawczym (tzn. dla $\gamma = 0$), w sposób jawny spełniona jest zasada zachowania energii. Warunek propagacji w pokładzie ograniczonym idealnie odbijającymi płaszczyznami spągu i stropu nie jest – co najmniej w pierwszym przybliżeniu – istotny. Zakładając, że na każdym metrze drogi propagującej fali z pokładu „ucieka” stały ułamek (β) energii fali, dla $0 < \beta \ll 1$ wykazać można, że na drodze o długości r nastąpi zmiana energii E określona zależnością

$$E(r) = E(o) \exp(-r \cdot \beta) \quad (2.11)$$

² W chwili pisania tych słów, zagadnienie poprawnego montażu takiego „trójskładowego” czujnika na kotwi nie jest, zdaniem autorów, w pełni zrozumiane i rozwiązane

³ Każdy z geofonów powinien ponadto pracować w swym obszarze stałego wzmocnienia i obszar ten powinien być taki sam dla wszystkich trzech geofonów

⁴ Konwersja do postaci cyfrowej jest możliwa w dowolnym punkcie toru – istotne jest by dodawać energie a nie amplitudy

⁵ Tak jak w przypadku zwykłych obserwacji jednokanałowych, lecz pomijając charakterystyki kierunkowe geofonów (tzn. przyjmując $\beta_x = 0, \beta_y = 0, \beta_z = 0$)

i czynnik $\exp(-r\beta)$ zostanie „wchłonięty” przez czynnik $\exp(-\gamma r)$ w równaniu (2.10). Oczekiwać więc można, że w takim przypadku, zawsze zmierzona lub obliczona będzie (a co najmniej powinna być!) wartość $\gamma > 0$, którą należy interpretować jako łączną charakterystykę absorpcji energii w pokładzie i jej „ucieczki” poza pokład. Dokładniejsza analiza może wprawdzie wykazać, że ani γ ani β nie są ustalone, lecz wykracza to poza ramy tej pracy.

Wyznaczając e^* z (2.4e) i wstawiając do (2.10), otrzymuje się

$$\rho V (\cos \beta)^{-2} e_{\beta}^{0*} = (\pi r h)^{-1} \exp(-\gamma r) E \quad (2.12a)$$

$$e_{\beta}^{0*} = (\rho V)^{-1} (\pi r h)^{-1} \cos^2 \beta \exp(-\gamma r) E \quad (2.12b)$$

a mnożąc to obustronnie przez $d \cdot C_{pb}^2 \cdot C_{AP}^e / 50$ można zapisać

$$(d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} = (d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e (\rho V \pi r h)^{-1} \cos^2 \beta \cdot \exp(-\gamma r) E \quad (2.12c)$$

Ponieważ (zgodnie z (2.7b)) lewa strona (2.12c) to EU , energia umowna, zatem

$$EU = (d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e (\rho V \pi r h)^{-1} \cos^2 \beta \cdot \exp(-\gamma r) E \quad (2.13)$$

a jeżeli wyidealizowaną charakterystykę kierunkową ($f_k(\beta) = \cos \beta$) zastąpimy jej wersją realistyczną ($f_k(\beta) = 0,9(0,111 + \cos \beta)$) – Kornowski 2002, rozdz. 5.2.3 – to otrzymamy

$$EU = C_2 d (r h)^{-1} (0,111 + \cos \beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (2.14a)$$

$$C_2 = (C_{pb}^2 C_{AP}^e \cdot 0,81) / (50 \pi \rho V) \quad (2.14b)$$

i to jest równanie wiążące EU - energię umowną odczytywaną na wyjściu aparatury sejsmoakustycznej w Stacji Tapań - z E J, energią sejsmiczną punktowego źródła w pokładzie, w **znanej** odległości r od geofonu i dla znanej wartości współczynnika (γ) absorpcji energii w pokładzie.

Warunek znanej odległości (r) oznacza konieczność lokalizacji źródeł (ze wszystkimi problemami dotyczącymi czasów pierwszych wejść, itp.) – przed przystąpieniem do obliczania energii.

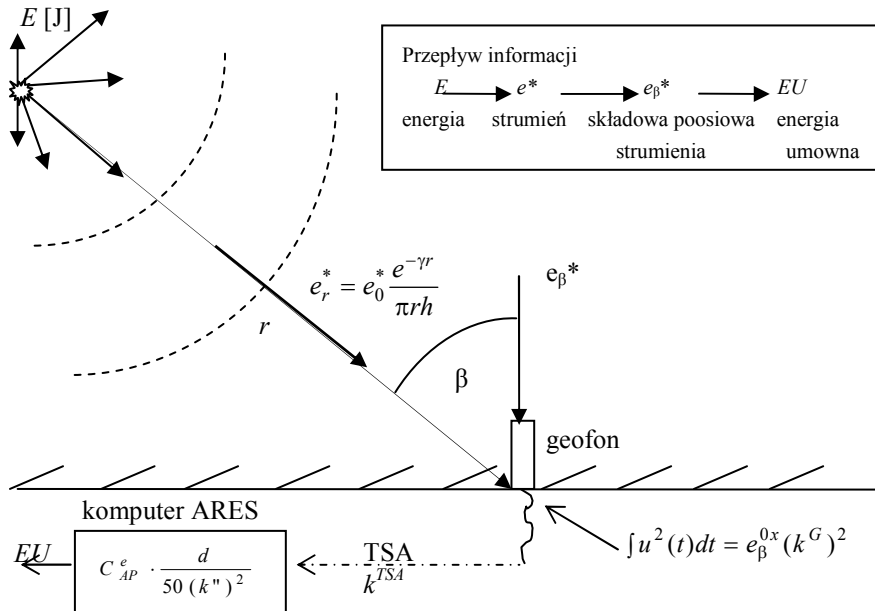
Wpływ uwzględnienia lub pominięcia charakterystyki kierunkowej (jednoskładowego) geofonu na wyniki może być bardzo znaczny prowadząc do błędów mierzonych w setkach procentów. Więcej o tym w p. 3.

Równanie (2.14a) umożliwia też obliczenie energii E gdy znana jest wartość EU i niepotrzebna jest żadna „redukcja” na kulę czy walec o promieniu 50 m: zasada zachowania energii (po skorygowaniu absorpcji) pozwala na całkowanie jej gęstości (lub strumienia) na otaczającej źródło powierzchni zamkniętej przez którą fala propaguje i nie występują tu żadne trudności. Rys. 2.2 ułatwia interpretację wielkości występujących w równaniach (2.14a,b). Pamiętać należy, że w przypadku „poprawnego” deklarowania (przez obsługę) wartości k , otrzymuje się $C_{pb} = k^{TSA}/k'' = 10^4$.

Ponieważ C_2 (w równaniu 2.14b) jest, dla danej aparatury i pokładu, wielkością stałą – zakładając jak poprzednio aparaturę ARES-5 (zatem $C_{AP}^e=850$), „poprawnie” deklarowaną wartość k'' (zatem $C_{pb}=10^4$) oraz typowe wartości $\rho=1300 \text{ kg/m}^3$ i $V=1800 \text{ m/s}$ otrzymuje się, dla punktowego źródła w pokładzie o miąższości h między odbijającymi płaszczyznami spągu i stropu $C_2=187,3131$ i stąd

$$EU = 187,3131 d(rh)^{-1} (0,111 + \cos\beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (2.15a)$$

W równaniu tym zgodnie z Instrukcją metody AE, d jest odległością geofonu od skrzyżowania, a zaproponowana została (ta odległość, d) jako zgrubne, lecz dość prawdopodobne, oszacowanie (bez lokalizacji) „prawdziwej” lecz nieznannej odległości (r) źródła od geofonu. Zauważyć należy, że przyjęcie $r=d$, oznacza założenie, że większość źródeł AE występuje w rejonie skrzyżowania (ściany z chodnikiem, w którego ociosie jest geofon).



Rys. 2.2. Szkic ilustrujący wielkości i pojęcia stosowane w przypadku estymacji energii E źródła punktowego. e_0 to strumień energii sejsmicznej w bezpośrednim otoczeniu źródła.
Fig. 2.2. Sketch illustrating the notions applied to estimate the energy (E) from a point source. e_0^* is the energy stream nearby the source.

Przyjmując (tylko chwilowo) to oszacowanie za dobrą monetę, zatem kładąc $d=r$, równanie (2.15a) zapisać można w nieco prostszej formie

$$EU = 187,3131 h^{-1} (0,111 + \cos\beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (2.15b)$$

(ponieważ C_e – zgodnie z (2.14b) – ma wymiar $\text{m}\cdot\text{s}/\text{kg}$, sprawdzić można, że EU ma wymiar m^2/s zgodnie z równaniem (2.8); trudno więc wielkość ta traktować jako energię).

Jeżeli ponadto pominiemy tłumienie (przyjmując $\gamma=0$) i kierunkowe właściwości geofonu, to w pokładzie o stałej miąższości h otrzymuje się oszacowanie – użyteczne, jak mieli nadzieję autorzy pierwszej wersji instrukcji metody AE – o postaci

$$EU = const \cdot E \quad (2.16)$$

gdzie wartość stałej ($const$) zależy od pokładu i aparatury, może więc być oszacowana w ustalonych warunkach, a ponadto – dla potrzeb oceny zmian zagrożenia – wartość ta, jeśli stała naprawdę, nie jest zbyt istotna. Taka była właśnie motywacja autorów pierwszej wersji Instrukcji metody AE i dlatego też (wzorem sejsmologii górniczej, gdzie „redukcja” na kulę o promieniu 50 m była wówczas stosowana) wprowadzono (Instrukcja p.6.6) czynnik $d/(k^2 \cdot 50)$.

Powtórzyć trzeba, że **równanie (2.16) dotyczy źródła punktowego o znanym, zawsze tym samym położeniu ($r=d$, brak zależności kierunkowej), obserwowanego właśnie jako pojedyncze zdarzenie, w ośrodku pozbawionym absorpcji ($\gamma=0$) i geofonem trójskładowym lub bez właściwości kierunkowych.**

Niestety, w zastosowaniach sejsmoakustyki źródła nie są lokalizowane, a górotwór niewątpliwie pochłania energię fal i tłumi ich amplitudę na drodze źródło-geofon (w stopniu m.in. zależnym od stopnia spękania ośrodka – zatem najmocniej na zakładanej/postulowanej drodze od skrzyżowania, wzdłuż ociosu, do geofonu). Ponadto pominięcie właściwości kierunkowych geofonu okazało się poważnym źródłem błędów, o czym więcej napisano w następnym rozdziale.

Zagadnienie estymacji energii źródła punktowego podsumować należy stwierdzając, że próby takiej estymacji źle rokują, dopóki nie zostanie rozwiązane – w mniej lub bardziej poprawny sposób zagadnienia lokalizacji źródeł. Opisany w Instrukcji sposób oceny energii stał się – wskutek wprowadzenia „energii umownej” (lub „zredukowanej gęstości energii” – patrz Instrukcja p. 6.6) – źródłem nieporozumień, powinien więc być zaniechany i zastąpiony nowym, logicznie spójnym i fizycznie poprawnym sposobem. Taki właśnie sposób estymacji energii – bez lokalizowania źródeł – jest przedmiotem następnego rozdziału.

2.3 Pole emisji i energia emisji

Przedstawione w rozdziale 2.2 równania umożliwiające estymację energii dotyczą przypadku źródeł punktowych, gdy fale pochodzące z każdego źródła AE są obserwowane – i odpowiednie informacje są analizowane – dla każdego zdarzenia (AE) osobno i niezależnie. Bez wątplenia jest to podstawowy model obserwacji sejsmologicznych (głębokich trzęsień Ziemi) z lokalizowanym źródłem – i z sejsmologii przyjęty został do sejsmoakustyki. Dzisiejszy stan metody sejsmoakustycznej (do oceny stanu zagrożenia sejsmicznego), gdy **zdarzenia AE nie są lokalizowane, a przedmiotem analiz jest (m.in.) energia** – nie pojedynczych zdarzeń, lecz – **skumulowana w kolejnych przedziałach (Δt) czasu**, skłania jednak do zbadania i zastosowania innego, znacznie bardziej (w przypadku AE) realistycznego modelu, który opisano poniżej. Załóżmy więc przede wszystkim, że

Z1: obserwowana jest $EU(\Delta T_i)$, energia umowna emisji, skumulowana w – być może nieidentycznych i nieciągłych – jednostkach ΔT_i czasu, zgodnych z czasem trwania i -tego skrawu w obserwowanej ścianie.

Gdy założenie to jest spełnione to kombajn, w każdej i -tej jednostce ΔT_i , „odwiedza” dokładnie raz, każdy „elementarny odcinek” ściany (dx na rys. 2.3) i żaden punkt ściany nie

jest przez kombajn wyróżniony. Jeżeli warunki geologiczne i naprężeniowe są, wzdłuż frontu ściany i w czasie danego skrawu, stałe lub losowo-zmienne oscylując wokół pewnej średniej, to wpływ pracy kombajnu na emisję może być pominięty. Sytuacja się nie zmieni, gdy model uogólnimy dopuszczając iż ΔT_i obejmuje zawsze kilka (np. M) pełnych skrawów – na przykład gdy ΔT_i to i -ta zmiana wydobywcza (o ile wykonano pełną liczbę skrawów).

Ponieważ metody (i Instrukcje) oceny stanu zagrożenia, których realizacji służy sejsmoakustyka, z reguły (za wyjątkiem wierceń małośrednicowych) traktują ścianę jako pewną całość, unikając ocen dotyczących punktów (x,y,z) , założyc też możemy, że

Z2: energia AE pochodzi z całego frontu („czoła”) ściany i e_0^* [J/m²], strumień lub „elementarna” energia emitowana z 1 m² w okresie ΔT_i jest – na całym froncie o długości L i o wysokości h – wielkością losową

$$e_{0i}^*(\Delta T_i, x, y, z) = \bar{e}_{0i}^* \zeta_i \quad (2.17a)$$

$$\text{gdzie} \quad \log \zeta_i \approx N(0, \sigma^2) \quad (2.17b)$$

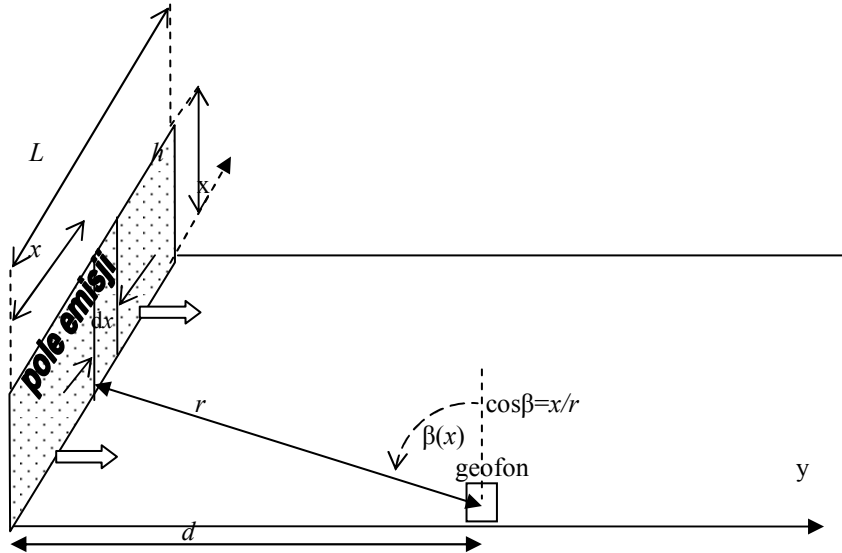
Założenie to zapewnia, że wielkość e_{0i}^* , choć losowa, jest zawsze nieujemna, że w okresie ΔT_i jej wartość średnia, \bar{e}_{0i}^* jest stała na całym froncie (zatem jest tylko jeden stan zagrożenia dla tej ściany) choć zmieniać się może wraz z „ i ”, czyli z postępowaniem ściany, oraz zapewnia, że w okresie ΔT_i

$$E_i = \bar{e}_{0i}^* Lh \quad (2.18)$$

W dalszym tekście indeks „ i ”, oznaczający numer jednostki czasu lub skrawu, będzie pomijany gdy nie powoduje to niejasności.

Wielkość e_0^* to strumień emitowanej (z frontu ścianowego, w okresie ΔT_i) energii, a \bar{e}_0^* to jego wartość średnia. Front ściany, z którego pochodzi e_0^* , nazywamy polem emisji. Równanie (17a) definiuje losowe („stochastyczne”) pole emisji o jednostajnym (na powierzchni frontu ściany, $S=L \cdot h$, patrz rys.2.3) rozkładzie strumienia emitowanej (w ΔT_i) energii, $\bar{e}_0^* = \text{const}$.

Wielkości występujące w opisie AE z pola emisji ilustruje rys. 2.3.



Rys. 2.3. Szkic ilustrujący sytuację pomiaru AE z pola emisji (którym jest front ściany), oraz pojęcia i symbole stosowane do opisu modelu.

Fig. 2.3. Emission field in a longwall and symbols applied in the model description.

Jeżeli wprowadzimy układ współrzędnych (x,y) jak na rys. 2.3, z osią x równoległą do frontu ścianowego, to dla każdego elementarnego odcinka ściany ($\Delta x \rightarrow dx$) o wysokości h , stosuje się równanie (2.14a,b) jak do źródła punktowego i dla całej ściany otrzymuje się

$$EU = h \cdot \int_0^L \bar{e}_0^* C_2 d \cdot (rh)^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (2.19)$$

lub równoważnie

$$EU = \bar{e}_0^* C_2 d \cdot I(L, d, \gamma) \quad (2.20a)$$

$$r = (x^2 + d^2)^{1/2} \quad (2.20b)$$

$$I(L, d, \gamma) = \int_0^L r^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (2.20c)$$

$$C_2 = C_{pb}^2 \cdot C_{AP}^e \cdot 0,81 / (50\pi\rho V) \quad (2.20d)$$

(gdzie $\cos\beta$ zapisano, na podstawie rys. 2.3, jako x/r , d to odległość geofonu od skrzyżowania i $C_{pb} = k^{TSA}/k''$). Z równania (2.20a) wyznaczyć można średni strumień emitowany w jednostce ΔT_i czasu

$$\bar{e}_0^* = EU \cdot (C_2 d \cdot I(L, d, \gamma))^{-1} \quad (2.21)$$

i mnożąc obie strony równania (2.21) przez $L \cdot h$ otrzymuje się

$$E = \frac{L \cdot h}{C_2 \cdot d \cdot I(L, d, \gamma)} EU \quad (2.22a)$$

$$EU = C_2 \frac{d \cdot I(L, d, \gamma)}{L \cdot h} E \quad (2.22b)$$

gdzie E J, to energia emitowana z frontu ściany w jednostce ΔT_i czasu, EU to energia umowna, w równaniu (2.22a) odczytywana z komputera na wyjściu systemu ARES w kopalnianej Stacji Tapań (a w równaniu (2.22b) estymowana znając model i wymuszenie E), C_2 to stała, zależna od aparatury i cech pokładu (typowo $C_2=187,3131$) a całka $I(L, d, \gamma)$ obliczana musi być numerycznie dla danych wartości (L, d, γ) .

Wpływ charakterystyki kierunkowej typowego (stosowanego w ARES-5) geofonu oraz wpływ absorpcji energii (przez górotwór) na wyniki estymacji energii ilustruje tabela 2.1. By ułatwić analizę tabeli 2.1, wprowadza się symbol $W^e(L, d, \gamma, chk)$ oznaczający uogólnione wzmocnienie uwzględniające charakterystykę kierunkową (stąd „chk”) i symbol $W^e(L, d, \gamma, 1)$ oznaczający uogólnione wzmocnienie bez uwzględnienia kierunkowych właściwości geofonu. Analizując tabelę 2.1 widzimy, że:

a) $W^e(L, d, \gamma, chk) < W^e(L, d, \gamma, 1)$, a ponieważ $E = EU/W^e$ to wynika stąd, że pominięcie charakterystyki kierunkowej zawsze zaniża (czasem nawet 3-krotnie) oszacowanie emitowanej energii E

b) $W^e(L, d, \gamma > 0, chk) < W^e(L, d, 0, chk)$, zatem pominięcie absorpcji energii przez górotwór zawsze zaniża (czasem nawet 15-krotnie) oszacowania emitowanej energii E

c) dla użytych tu, przykładowych lecz realistycznych danych - $W^e(200, 110, 0, 1) = 56,01276$ i $W^e(200, 110, 0, 02, chk) = 1,16539$ zatem pominięcie i charakterystyki kierunkowej i absorpcji powodować może nawet 50-krotne zniżenie oszacowania emitowanej energii.

Zatem pomijanie absorpcji i kierunkowych właściwości geofonu może być źródłem ogromnych błędów, wyrażanych tysiącami procentów.

Realistyczne zagadnienie, w którym zarówno energia E jak i współczynnik γ absorpcji (energii fal w pokładzie przed frontem ściany) są nieznanymi, jest przedmiotem rozdziału 3.

Dyskusję zagadnienia estymacji wielkości występujących w zastosowaniach sejsmologii (np. estymacji energii E i współczynnika absorpcji γ) ułatwia terminologia, przyjęta za teorią systemów w całej niemal naukowej literaturze, gdzie stosowane są (pokazane schematycznie na rys. 2.4) podstawowe pojęcia (*) wymuszenia, transmitancji i odpowiedzi systemu i przedmiotem estymacji są parametry (lub wartości) niektórych z tych wielkości.

Należy pamiętać, że uogólnione wzmocnienie (W^e , gdy sygnałem jest energia lub strumień energii) opisuje działanie systemu i zawsze przekształca sygnał wejściowy czyli wymuszenie (np. E) w sygnał wyjściowy czyli odpowiedź (np. EU).

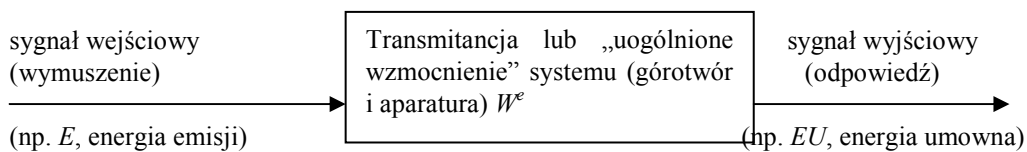
W szczególności zadanie obliczenia odpowiedzi, gdy znane jest wymuszenie i transmitancja/wzmocnienie systemu, nazywane jest „zadaniem prostym” a zadanie obliczenia transmitancji/wzmocnienia i (być może) wymuszenia nazywane jest „zadaniem odwrotnym”. Pokazany na rys. 2.4 kierunek przepływu sygnału (i informacji) uzasadnia to nazewnictwo.

* Przyjęte w rozdz. 2.1 założenie, iż sygnały mieszczą się w obszarze stałego wzmocnienia aparatury – czyli, że wzmocnienie nie zależy od częstotliwości – pozwala utożsamiać wzmocnienie z transmitancją.

Tabela 2.1. Przykładowe wartości funkcji $I(L,d,\gamma)$ oraz uogólnionego wzmocnienia $W^e=C_2 \cdot I(L,d,\gamma)/(L \cdot h)$ w przypadku rejestracji aparaturą ARES dla różnych wartości L, d, γ gdy $h=2,5$ m, $C_2=187,3131$ – ilustrujące skutki pominięcia charakterystyki kierunkowej (jednoskładowego) geofonu – prawa kolumna, oraz absorpcji energii przez górotwór – wiersze w których $\gamma=0$.

Table 2.1. Some values of the $I(L,d,\gamma)$ function and of the generalized amplification W^e , in case of observations with ARES apparatus – for a few values of L, d, γ parameters. The numbers illustrate the results of neglecting the directional characteristic of the geophone (on right) and energy absorption (the lines with $\gamma=0$).

L [m]	d [m]	γ [m ⁻¹]	I W^e	Funkcja $I(L,d,\gamma)$ i uogólnione wzmocnienie $W^e(L,d,\gamma,chk)$	Wartości funkcji $I(L,d,\gamma)$ i uogólnionego wzmocnienia $W^e(L,d,\gamma,1)$
150	40	0	I	1,39208	2,03222
			W^e	27,81385	40,60388
		0,01	I	0,59607	1,02015
			W^e	11,90972	20,22089
		0,02	I	0,27888	0,55365
			W^e	5,57204	11,06196
	110	0	I	0,44064	1,11666
			W^e	24,21104	61,35508
		0,01	I	0,10186	0,29839
			W^e	5,59672	16,39509
		0,02	I	0,02462	0,083107
			W^e	1,35275	4,56633
200	40	0	I	1,72200	2,31244
			W^e	25,80425	34,65202
		0,01	I	0,65195	1,06781
			W^e	9,76950	16,00118
		0,02	I	0,28852	0,56186
			W^e	4,31928	8,41950
	110	0	I	0,66182	1,35924
			W^e	27,27286	56,01276
		0,01	I	0,13008	0,32950
			W^e	5,36045	13,57833
		0,02	I	0,02828	0,08716
			W^e	1,16539	3,58827



Rys. 2.4. Szkic ilustrujący stosowane pojęcia
Fig. 2.4. Sketch illustrating some notions applied discussing information flow.

W zadaniu odwrotnym występuje tyle „niewiadomych” ile nieznanymi parametrów wykorzystuje (zastosowany przez nas) model do opisu wymuszenia i transmitancji systemu. Stąd, między innymi, zadania odwrotne są trudniejsze od zadań prostych.

Zadanie obliczenia EU (z równania (2.22b)), **gdy dana jest energia (E) emisji i współczynnik (γ) absorpcji nazywamy prostym zadaniem sejsmoakustyki.** Analogicznie,

zadanie obliczenia/estymacji energii (E) emisji i współczynnika (γ) absorpcji, gdy dane są wartości EU , nazywamy odwrotnym zadaniem sejsmoakustyki.

Przyjmując tę terminologię, równania (2.22a,b) zapisać można w postaci

$$E = (W^e)^{-1} EU \quad (2.23a)$$

$$EU = W^e E \quad (2.23b)$$

gdzie:
$$W^e = C_2 \frac{d \cdot I(L, d, \gamma)}{Lh} \quad (2.24)$$

i W^e jest uogólnionym wzmocnieniem (lub wektorem uogólnionych wzmocnień, w przypadku $N > 1$ geofonów) górotworu i aparatury sejsmoakustycznej, a z założenia o pracy aparatury w obszarze stałego wzmocnienia wynika, że wielkość ta nie zależy od częstotliwości.

Bardziej szczegółowy schemat przepływu sygnału (którym jest energia fal generowanych przez zdarzenia AE na froncie ściany) pokazano na rys. 2.5. Na rysunku tym uogólnione wzmocnienie W^e rozłożono – zgodnie z naturalną drogą sygnału – na dwa multiplikatywne czynniki: czynnik W_1 , obejmujący górotwór i charakterystykę kierunkową geofonu, oraz czynnik W_2 , obejmujący tor TSA (w tym geofon bez charakterystyki kierunkowej) i komputer ARES5 wraz z (działającą za pośrednictwem programu) modyfikacją – patrz Instrukcja metody AE, p. 6.6 – $d/(50 \cdot k^2)$

$$W^e = W_1 \cdot W_2 \quad (2.25a)$$

$$W_1 = \frac{0,81}{\pi} \frac{I(L, d, \gamma)}{Lh\rho V} \quad (2.25b)$$

$$W_2 = \frac{d}{50} C_{pb}^2 C_{AP}^e \quad (2.26)$$

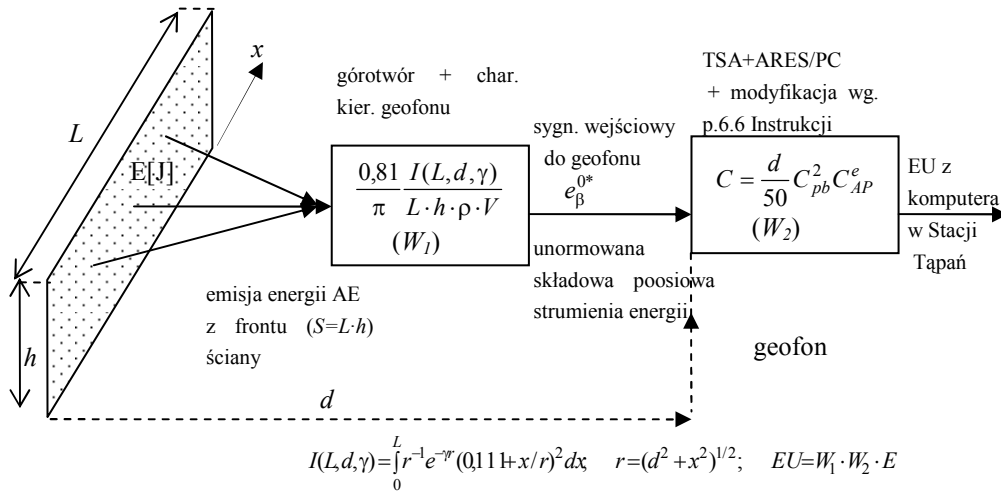
Dla czynnika (lub „podukładu”) W_1 sygnałem wejściowym jest energia emitowana (w jednostce czasu) z całego frontu ściany (czyli z pola emisji), natomiast odpowiedzią jest e_β^{0*} , unormowana, poosiowa składowa strumienia energii pola falowego w otoczeniu geofonu.

Równocześnie e_β^{0*} jest (energetycznym) sygnałem wejściowym do geofonu (patrz rys. 2.1 i równanie (2.2d)) – który jest początkowym elementem czynnika (lub „podukładu”) W_2 , przekształcającego e_β^{0*} w energię umowną EU odczytywaną na wyjściu systemu sejsmoakustycznego ARES-5 w Stacji Tapań. Czynnikiem ($d/50$), zachowany w równaniu (2.26) by sposób obserwacji pozostał zgodny z obecnie stosowaną Instrukcją, jest (w tym modelu) całkowicie zbędny.

Należy zauważyć, że przekształcenie strumienia e^* energii w jego składową poosiową, co potocznie (lecz niezbyt ściśle) przypisuje się charakterystyce kierunkowej geofonu, włączone zostało do bloku W_1 symbolizującego górotwór.

Przedstawiony tu model pola emisji i związany z nim estymator energii z pola tego emitowanej, pozwala zaniechać wreszcie stosowania niefizycznej energii umownej, zastępując EU energią E , wyrażoną w dżulach, obliczoną na podstawie rutynowych obserwacji AE z zastosowaniem standardowej aparatury (np. ARES), bez lokalizowania źródeł. Model ten – jak zobaczymy w p. 3 – umożliwi równoczesną estymację emitowanej energii oraz współczynnika (γ) absorpcji, co być może otwiera drogę „tomografii tłumieniowej” bez

żadnych dodatkowych kosztów. Umożliwia ponadto niemal dowolne – zależne tylko od liczby czynnych geofonów – uogólnienie przestrzennych rozkładów E i γ .



Rys. 2.5. Schemat przepływu „sygnału energii” z pola źródłowego (którym jest front ściany) przez górotwór i aparaturę TSA/ARES do wyjścia z komputera w Stacji Tapań.

Fig.2.5. Energy and information flow in a coal seam and in the data transmission line, from the emission field to the PC output.

3. Równoczesna estymacja energii (E) i współczynnika (γ) absorpcji, bez lokalizowania ognisk

W przypadku obserwacji AE za pomocą $N > 1$ geofonów równanie (2.22b) przekształca się w układ równań o postaci

$$EU(i) = C_2 \frac{d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)}{Lh} E, \quad i=1, \dots, N \quad (3.1)$$

który to układ – w bardzo realistycznym przypadku, gdy wartość γ nie jest znana – „rozwiązać” należy względem niewiadomych (E, γ) (znając wartości $EU(i), d(i), L, h, C_2$) za pomocą odpowiedniego programu komputerowego, znajdując takie wartości (E, γ) dla których suma błędów kwadratowych osiąga minimum.

Błędem nazywamy tu różnicę między obserwowaną a estymowaną wartością $EU(i)$, zatem między lewą i prawą stroną równania (3.1). Suma błędów kwadratowych jest zawsze nieujemna i osiąga wartość 0 tylko wtedy, gdy wartości estymowane są dokładnie zgodne z wartościami obserwowanymi. Gdy suma błędów kwadratowych nie jest zerem, jej wartość jest miarą jakości estymacji (im mniejsza, tym lepiej).

W języku matematycznym mówimy, że znaleźć należy wartości (E, γ) optymalizujące przyjętą miarę jakości

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \left\{ E \frac{C_2 \cdot d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)}{Lh} - EU(i) \right\}^2 \quad i=1, \dots, N \quad (3.2)$$

gdzie $I(L, d(i), \gamma)$ określone jest równaniem (2.20c). Powtórzyć trzeba, że $I(L, d, \gamma)$ jest „nieelementarna” całką, która obliczana musi być numerycznie i że jedna z niewiadomych (współczynnik absorpcji γ) występuje wewnątrz funkcji podcałkowej.

Danymi wejściowymi do programu liczącego E, γ są

- wartości $EU(i)$ energii umownej, odczytane z komputerowego wyjścia systemu ARES-5, z co najmniej dwóch kanałów obserwujących daną ścianę,
- aktualne odległości $d(i)$ tych geofonów od skrzyżowania,
- wartości L (długość ściany, m), h (wysokość ściany, m) oraz C_2 , która dla aparatury ARES-5/TSA i dla pokładu gdzie $\rho=1300 \text{ kg/m}^3$ i $V=1800 \text{ m/s}$ ma wartość $C_2 = 187,3131$. W przypadku ogólnym $C_{pb}=k^{TSA}/k''$ gdzie k^{TSA} to wzmocnienie toru TSA (w Instrukcji metody AE oznaczone k'_{500}) a k'' to wzmocnienie TSA deklarowane przez obsługę systemu. Zazwyczaj $k^{TSA}/k''=10^4$, $C_{AP}^e=850$ dla aparatury ARES-5, dla innych typów aparatury wartość tę należy zmierzyć (uśrednione wartości podano w książce (Kornowski, Kurzeja 2008)).

Zagadnienia obliczeniowe nie są przedmiotem tej pracy więc je pominięto. Aby zorientować Czytelnika w zakresie wartości energii (E^{AE} [J]) i współczynnika absorpcji ($\gamma=2\alpha$, [m^{-1}], gdzie α to współczynnik tłumienia amplitudy fal) które występują w praktyce, w tabeli 3.1 pokazano – dla szesnastu kolejnych godzin obserwacji jednej ze ścian w kopalni „Wesoła” z pomocą dwu geofonów – rejestrowane wartości energii umownej $\{EU_1(i), EU_2(i), i=1, \dots, 16\}$ i odpowiadające im estymowane opisaną poprzednio metodą (i filtrowane prostym filtrem dolnoprzepustowym) wartości $\{E(i), [J]$ oraz $\gamma(i) [\text{m}^{-1}], i=1, \dots, 16\}$.

O wynikach tych można powiedzieć, że są jednoznaczne, stabilne i realistyczne (tzn. wartości γ są typowe i zbliżone do wartości otrzymywanych w bezpośrednich pomiarach tłumienia) oraz demonstrują bezproblemowe działanie estymatora (3.2). Ponieważ w zagadnieniu występują dwie niewiadome (E oraz γ) a obserwacje prowadzono za pomocą dwu geofonów, żadna ocena błędu pomiaru nie jest możliwa.

Graficzny przykład dwutygodniowych (godzinowych) obserwacji $EU_1(i), EU_2(i), i=1, \dots, 336$ i odpowiadających im wyników estymacji $E(i), \gamma(i)$ – energii emitowanej z frontu ściany w godzinowych przedziałach czasu oraz efektywnego współczynnika absorpcji przed frontem ściany – pokazano na rys. 3.1 dla przypadku ściany 37 w kopani „Wesoła” obserwowanej (w tym czasie) za pomocą dwóch geofonów.

Wyniki obliczane były dwustopniowo, najpierw estymowano „surowe” wartości $E(i), \gamma(i)$, a potem – wychodzą z założenia, że fizyczna cecha pokładu, jaką jest wartość γ , nie może w rzeczywistości zmieniać się zbyt szybko (efektywna, uśredniona wartość γ zmienia się przede wszystkim wskutek zmian stopnia spękania pokładu) – wartości $\gamma(i)$ poddano filtracji dolnoprzepustowej estymując $\gamma_f(i)$, czyli wartości filtrowane („wygładzone”) i na ich podstawie ponownie obliczono wartości $E_f(i)$, zgodne z obserwacjami $EU_1(i), EU_2(i)$ dla wygładzonych wartości $\gamma_f(i)$. Te właśnie wartości $E_f(i)$ oraz $\gamma_f(i)$ pokazano na rys. 3.1.

Dla ułatwienia werbalnego opisu przyjęto, że rys. 3.1 składa się z czterech „linii”. Na osiach poziomych zawsze jest czas w godzinach, 336 godzin to dwa tygodnie. Dwie górne

linie pokazują wartość logarytmu energii umownej, w linii trzeciej przedstawiono logarytm energii emitowanej z frontu ściany, w linii czwartej pokazano wartość γ , współczynnika absorpcji energii ($\gamma=2\alpha$, gdzie α to współczynnik tłumienia amplitudy) w pokładzie, przed frontem ściany. Wartości energii emitowanej z frontu ściany oscylują w przedziale $1 \cdot 10^2$ J - $1 \cdot 10^3$ J, wartości współczynnika γ – w przedziale $0,01 \text{ m}^{-1}$ – $0,05 \text{ m}^{-1}$ przy czym tłumienie wydaje się (nie badano tego ilościowo) skorelowane z energią emisji, co wydaje się uzasadnione i oczekiwane (bo emisja wiąże się ze wzrostem szczelin zatem z wzrostem tłumienia).

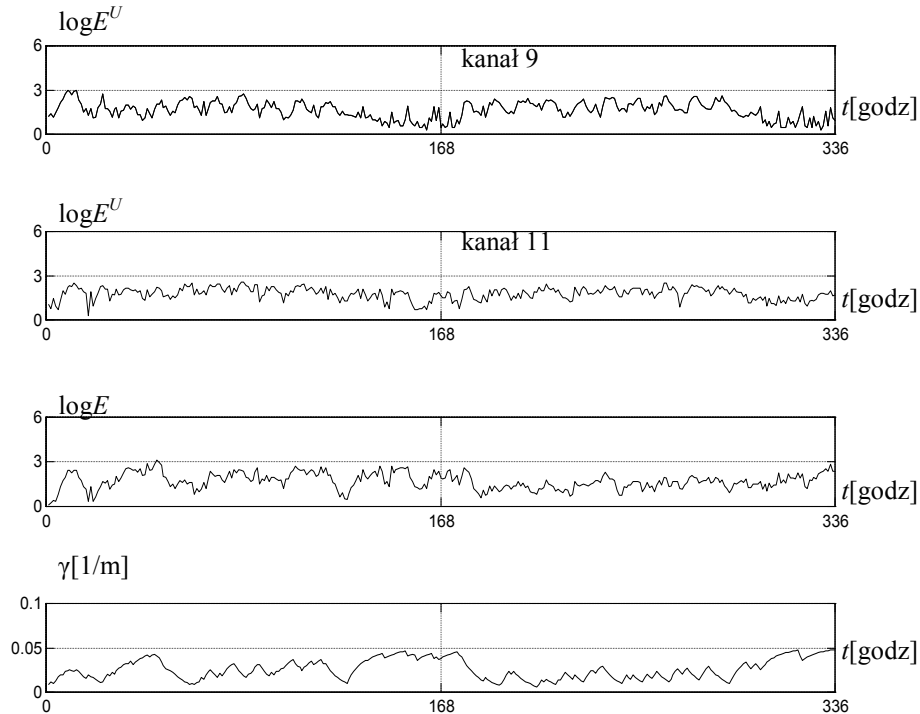
Dodać warto, że sekwencyjna, automatyczna estymacja współczynnika absorpcji przed frontem skrawanej ściany nazywana bywa – może nieco na wyrost – tomografią tłumieniową i stać się może kolejnym elementem nowej metody oceny zagrożenia sejsmicznego.

Rozdzielczość takiej tomografii w dziedzinie czasu jest nadzwyczajna (wynika z częstości obserwacji AE), rozdzielczość przestrzenna wynika z liczby parametrów występujących w modelu zatem z liczby geofonów stosowanych do sejsmoakustycznej obserwacji zagrożonej ściany. Odpowiednie badania zostały już podjęte.

Tabela 3.1. Przykładowe wartości energii umownej (EU) oraz odpowiadające im wartości E i współczynnika absorpcji γ , w przypadku obserwacji za pomocą dwu geofonów jednej ze ścian w kopalni „Wesoła”.

Table 3.1. Some examples of a „conventional energy” (EU) values calculated given values of emission energy (E) and absorption coefficient (γ) in case of two-geophone observation of a longwall.

i	EU1(i)	EU2(i)	E(i), [J]	γ (i) [m ⁻¹]
1	16	10	1,88	0,0108
2	23	5	2,45	0,0135
3	14	27	3,84	0,0118
4	29	7	3,41	0,0141
5	66	4	9,27	0,0186
6	137	22	29,91	0,0211
7	240	97	74,66	0,0209
8	514	52	136,30	0,0243
9	993	165	359,83	0,0259
10	791	211	244,20	0,0256
11	963	304	385,58	0,0250
12	791	199	127,28	0,0244
13	481	127	79,22	0,0214
14	809	149	27,99	0,0187
15	963	82	18,51	0,0164
16	225	61	3,02	0,0206



Rys. 3.1. Przykład dwutygodniowej obserwacji $EU_1(i)$, $EU_2(i)$ energii umownej i wyników estymacji emitowanej energii oraz współczynnika tłumienia. Wszystkie energie przedstawiono na skali logarytmicznej.

Fig. 3.1. Two-weeks of AE observation and processing: input data (two upper lines) and estimated values of emission energy (third line) and absorption coefficient (lowest line). Energies on log scale, horizontal axes scaled in hours.

4. Podsumowanie i wnioski

Prognozowanie zagrożenia sejsmicznego (Z^S) – w szczególności znaną metodą prognozy liniowej – (Kornowski 2003; Kurzeja 2005; Kornowski i Kurzeja 2008) wymaga obliczania energii całkowitej (E^C), która jest sumą energii (E^w) wstrząsów i energii (E^{AE}) AE, a warunkiem sumowania jest addytywność tych wielkości. Ponieważ przyjmuje się, że energia E^w jest energią wyrażoną w dżulach to – w celu obliczenia energii E^C (a następnie wyprognozowania Z^S) – konieczne jest liczenie („fizycznej” a nie „umownej”) energii (E^{AE}) AE (z tego samego okresu czasu i w przybliżeniu z tego samego obszaru co E^w), także wyrażonej w dżulach. Dzisiejszy stan sejsmoakustyki powoduje, że obliczenia te muszą być wykonywane na podstawie rutynowych rejestracji energii umownej (EU) i bez lokalizowania ognisk AE. Sposób rozwiązania tego zadania opisano w niniejszej pracy.

Najważniejsze wnioski wynikające z opisanych tu analiz można sformułować tak:

1. W zagadnieniu pomiaru amplitudy i/lub energii fal (sejsmicznych, w tym AE), wielkością rzeczywiście mierzalną jest:

- w przypadku czujników trójskładowych: unormowany strumień e^{0*} energii (pola falowego) w otoczeniu czujnika,
- w przypadku czujników jednoskładowych: unormowana składowa poosiowa e_{β}^{0*} strumienia energii (pola falowego) w otoczeniu czujnika,
- obliczenie nienormowanej wartości strumienia (e^* lub e_{β}^*) wymaga, by znane były wartości ρ i V w otoczeniu czujnika,
- zależności wiążące strumień (e^* lub e_{β}^*) z EU są proste tylko wówczas, gdy parametry fal mieszczą się w obszarze stałego wzmocnienia aparatury (toru TSA) gdyż tylko wówczas wzmocnienie nie zależy od częstotliwości a dekonwolucja staje się zwykłym dzieleniem.

2. Estymacja wielkości opisujących źródła lub parametrów emisji źródłowej (w tym energii E^{AE}), zawsze wymaga – prócz obserwacji EU – silnych założeń o modelu źródła lub pola źródłowego i ośrodka. **W tym sensie możliwa jest tylko warunkowa estymacja energii E^{AE} a jakość tej estymacji zawsze zależy od jakości modelu.**

3. Nawet w najprostszym przypadku źródła punktowego o znanej lokalizacji (x,y,z) , założenia dotyczące modelu są konieczne: sam punktowy charakter źródła jest jednym z takich założeń. Dla przypadku tego równania (2.14a,b) wiążą E z EU , a w przypadku obserwacji wieloczujnikowych układ równań typu (2.14a,b) umożliwia estymację wartości E oraz γ .

4. Równania (2.22a,b) wiążą obserwowane wartości EU z E^{AE} , energią emitowaną w ustalonej jednostce czasu z pola emisji na froncie eksploatowanej ściany, bez konieczności lokalizowania ognisk AE.

5. **Optymalizacja zadania (3.2) umożliwia** – na podstawie wartości EU z N czujników (w okresie Δt obserwujących obszar S ściany) – **estymację energii („fizycznej”) E^{AE} oraz współczynnika γ absorpcji bez lokalizowania ognisk AE, stanowi więc warunkowe rozwiązanie odwrotnego zadania sejsmoakustyki górniczej.**

6. Zwiększając liczbę geofonów stosowanych do obserwacji zagrożonej ściany, możemy albo zwiększyć wiarygodność (i zmniejszyć średni błąd) obliczonych wartości E , γ , albo, wprowadzając bardziej złożony model przestrzenny pola emisji, poprawić przestrzenną rozdzielczość metody, traktowanej jako prosta sekwencyjna „tomografia tłumieniowa”.

Podziękowanie: Praca ta była częściowo finansowana w ramach projektu (N MiSW) R09030030 pt. „Metoda oceny stanu zagrożenia tąpnięciami wyrobisk górniczych w zakładach wydobywających węgiel kamienny”.

Literatura

- [1] Barański A., Drzewiecki J., Kabiesz J., Konopko W., Kornowski J., Krzyżowski A., Mutke G. 2007: Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu u zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego, GIG Seria Instrukcje No 20, Katowice.
- [2] Kornowski J. 2002: Podstawy sejsmoakustycznej oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, GIG, Katowice.
- [3] Kornowski J. 2003: Linear Prediction of Aggregated Seismic and Seismoacoustic Energy Emitted from a Mining Longwall, Acta Montana, ser. A, No. 22 (129), 5-14.
- [4] Kornowski J., Kurzeja J. 2008: Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, Wyd. GIG, Katowice.
- [5] Kurzeja J. 2005: Sekwencyjna prognoza energii sejsmicznej generowanej eksploatacją pokładu węgla, No. 867, GIG, Katowice.

- [6] Kurzeja J. 2009: Energia emisji sejsmoakustycznej i seismologicznej jako podstawa liniowej prognozy zagrożenia sejsmicznego, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Katowice (w druku).
[7] Sikora M., Wróbel Ł. 2009: Wyniki zastosowania algorytmów indukcji reguł do klasyfikacji stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Katowice (w druku).

Emission energy, stream of energy and conventional energy in mining seismoacoustic

Key words

seismoacoustics, seismic energy

Summary

The paper presents a detailed description of relations between the so called conventional energy (EU) and stream (e^*) of wavefield energy in a geophone neighbourhood. Conditional – depended on emission model – relations between the e^* and, crucial in applications, emission energy (E) from an emission field, are analysed too. Relatively simple estimator of E , feasible without AE source location, is introduced.

Model and a numerical method make it possible to write down the computer program which solves both the appropriately defined simple and inverse problems of mining seismoacoustics.

As the method can – conditionally on the model – estimate emission energy and the absorption (in front of the longwall) coefficient (γ), applying only the results of the routine AE observations, it is cheap and handy in mining applications.

In the final part of the paper, some results of actual (E , γ) estimation with a coal mine data are shown.

Przekazano: 20 marca 2009 r.