

# Energia umowna i energia emisji sejsmoakustycznej w przypadku obserwacji za pomocą aparatury ARES-5

*W pracy tej przedstawiono szczegółowo równania umożliwiające oszacowanie wyrażonej w dżulach energii emisji sejsmoakustycznej – na podstawie wykonanych za pomocą aparatury ARES-5 (produkcji EMAG) rutynowych obserwacji, w których tak zwana energia umowna kumulowana jest w ustalonych okresach. Podkreślono, że w sejsmometrii, wśród wielkości fizycznych związanych z energią fal, tylko unormowany strumień energii (lub jego poosiowa składowa) może być mierzony bezpośrednio, a pomiar dotyczy otoczenia czujnika. Obliczenie dowolnych wielkości „źródłowych”, na przykład energii sejsmicznej emitowanej ze źródła, wymaga założenia lub postulowania modelu wiążącego odpowiedź systemu pomiarowego – czyli energię umowną – z wymuszeniem (którym jest np. energia emitowana ze źródła) i właściwościami ośrodka, w którym propaguje fala. W pracy zaproponowany został taki model i przedstawiono algorytm umożliwiający przybliżone obliczenie energii źródłowej (emitowanej z tzw. pola emisji, którym może być np. front ściany) i współczynnika absorpcji (energii fal sejsmicznych przed frontem ściany) na podstawie rutynowych obserwacji sejsmoakustycznych za pomocą aparatury ARES-5.*

## 1. WPROWADZENIE

---

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 ściślej, ilościowej i konstruktywnej (tzn. umożliwiającej obliczanie i prognozowanie) definicji tej wielkości. Ponieważ definicję tą zawiera – wraz z dyskusją i przykładami stosowania – aktualna publikacja w MiAG J. Kurzeji (2009), która to publikacja jest ściśle związana z niniejszą pracą, definicja zagrożenia sejsmicznego nie musi być tu analizowana, a jedynie dla kompletności pracy przytaczam ją w końcowym akapicie tego rozdziału. Zauważyć jednak trzeba, że definicja ta korzysta z pojęcia energii ( $E^C$ ) całkowitej emisji

sejsmicznej z ustalonego obszaru (np. ściany,  $S$ ) w ustalonym okresie (np. od  $t$  do  $t+\Delta t$ ). Ponieważ energię całkowitą,  $E^C$ , oblicza się jako sumę energii wstrząsów ( $E^w$ ) i energii zdarzeń sejsmoakustycznych ( $E^{AE}$ ) – wszystkie odmiany słowa „sejsmoakustyka” zastąpiono dalej skrótem 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 (fizyczną – określenie to jest używane dla przeciwstawienia tak zwanej energii umownej), 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 „skrótem myślowym” – jest zwykłym nieporozumieniem.

Aby ułatwić dalszy rozwój AE, a także w związku z próbami zastosowania do oceny zagrożenia sejs-

smicznego nowych i nowoczesnych, obiecujących metod ilościowych (np. Sikora i Wróbel, 2009), które wymagają poprawnej estymacji  $E^C$ , energii całkowitej, w pracy tej przedstawiono szczegółowe uzasadnienie i wyprowadzenie estymatora (tzn. równania umożliwiającego racjonalne oszacowanie) wyrażonej w dżulach [J], energii  $E^{AE}$  zbiorów zdarzeń AE. Oszacowanie to może być dokonane na podstawie rutynowych, zgodnych z odpowiednią Instrukcją, (Barański i inni 2007, Zał. 3) – **dalej zwanej Instrukcją** – obserwacji AE za 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 okresach czasu. W rozdz. 3 opisano metodę równoczesnej estymacji  $E^{AE}$  oraz  $\gamma$ , 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.

Przedstawiony w rozdz. 2.2 i 3 estymator energii generuje jedną, jednoznacznie określoną ocenę energii emitowanej z tak zwanego pola emisji (patrz Kornowski, Kurzeja 2008) – którym jest otoczenie frontu ścianowego – niezależnie od liczby geofonów ścianę tę 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.

Zgodnie z zapowiedzią, dla kompletności analiz, przypominam definicję zagrożenia sejsmicznego (Kornowski, Kurzeja 2008, Kurzeja 2009):

**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 wystąpieniem zdarzenia  $E > E_g$  w chwili  $t$  w punkcie  $S$ . Jak szeroko argumentują Kornowski, 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.

## 2. ESTYMACJA ENERGII AE

### 2.1 Pojęcia, definicje i zależności podstawowe

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

By nie wchodzić w zbędne detale zakłada się, że w torze TSA sygnałem jest napięcie [V], że poprawnie działa detekcja zdarzeń i poprawnie dobrana jest aparatura – co oznacza, że zazwyczaj pracuje ona w „obszarze stałego wzmocnienia” (Kornowski 2002, Kornowski i Kurzeja 2008) – a fala, która niesie informację o energii AE, jest tzw. bezpośrednią falą P. Symbolem  $E$  oznaczana jest dalej energia fal emitowanych ze źródeł, zarówno AE jak i innych.

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

$$u_G(t) = k^G v_\beta(t) \text{ [V]} \quad (1a)$$

$$u_G(t) = k^G v(t) \cos \beta \text{ [V]} \quad (1b)$$

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

Zatem

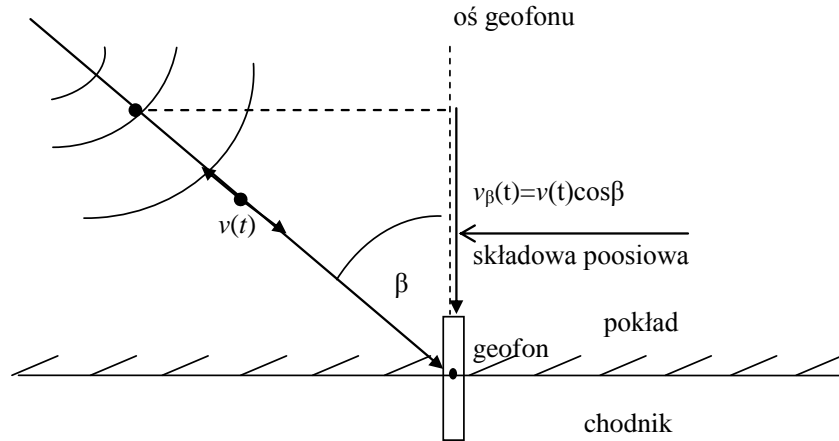
$$u_G^2(t) = [k^G \cdot v_\beta(t)]^2 \quad (1c)$$

a ze szkolnego wykładu fizyki (jak pamiętamy, energia kinetyczna masy  $m$  to  $mv^2/2$ ) wiemy, że energia całkowita (tzn. kinetyczna plus potencjalna) to

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

$$e^{0*}(t) = (V\rho)^{-1} e^*(t) \quad (2b)$$

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



Rys. 1. Szkic ułatwiający interpretację pojęcia „poosiowej składowej” (fali P). Konstrukcja geofonu umożliwia drgania uzwojenia tylko wzdłuż osi, stąd geofon reaguje tylko na składową poosiową drgań

gdzie  $e^*(t)$  to chwilowa wartość strumienia energii (\*) fal propagujących z prędkością  $V$  w ośrodku o gęstości  $\rho$  (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 (\*\*)**.

Wprowadzimy jeszcze pojęcia **poosiowych składowych strumienia energii**

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

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

Podnosząc (1b) do kwadratu i w miejsce  $v^2(t)$  wstawiając  $e^{0*}(t)$ , otrzymuje się

$$u_G^2(t) = e_{\beta}^{0*}(t) \cdot (k^G)^2 \quad (3)$$

**Równanie (3) ma podstawowe znaczenie w zadaniu pomiaru/oceny energii fal za pomocą aparatury AE: mówi ono nam, 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,  $(e_{\beta}^{0*})$ , jest bezpo-**

**średnio mierzalna w sejsmometrii. Wszystko inne, w tym energia ( $E$ ) źródłowa, może być tylko estymowane, a wyniki estymacji zależą od przyjętego modelu zjawiska i ośrodka.**

Wyrażenie  $(k^G)^2$  nazywamy „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, gdyż przyjęło się powszechnie, że wzmocnienie nazywamy stałym w przedziale, w którym oscylacje charakterystyki nie odchylają się więcej niż  $\pm 3\text{dB}$  od wartości średniej w tym przedziale.). 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.

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

$$e^* = \rho V \int_0^T v^2(t) dt; \quad e_{\beta}^* = \rho V \int_0^T [v(t) \cos \beta]^2 dt, \text{ J/m}^2 \quad (4a,b)$$

$$e^{0*} = (\rho V)^{-1} e^*; \quad e_{\beta}^{0*} = (\rho V)^{-1} e_{\beta}^* \quad (4c,d)$$

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

Jeżeli sygnał napięciowy  $u_T(t)$  mierzony jest – jak sugeruje indeks „ $T$ ” – na wyjściu toru TSA to, analogicznie do równania (3), lecz z indeksem „ $T$ ” zamiast „ $G$ ” i całkując od 0 do  $T$ , zapisać można

\* Strumień ( $e^*$ ) energii ( $\text{J/m}^2$ ) to energia (pola falowego) propagująca przez  $1\text{m}^2$  powierzchni prostopadłej do kierunku propagacji. W literaturze spotykana bywa definicja strumienia jako energii przepływającej przez  $1\text{m}^2$  w jednostce czasu, co – ze względu na „konflikt” z pojęciem mocy – prowadzi do zbędnych dyskusji i nie jest tu stosowane.

\*\* Zgodnie z (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  $[\text{m}^2/\text{s}^2]$ .

$$\int_0^T u_T^2(t)dt = (k^{TSA})^2 e_{\beta}^{0*} \quad (5)$$

(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 programem 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 (5) do postaci

$$\int_0^T u_s^2(t)dt = (k^{TSA})^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} \quad (6a)$$

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”) obliczającą energię. Równoważnie

$$C_{AP}^e \int_0^T u_T^2(t)dt = C_{AP}^e (k^{TSA})^2 e_{\beta}^{0*} \quad (6b)$$

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:”... całość z kwadratu impulsu ... pomnożoną przez  $r$  i podzieloną  $50 \cdot (k'_{500})^2 \dots$ ”) o modyfikacji czynnikiem  $d/[50 \cdot (k'')^2]$ , przy czym w tej pracy stosuję 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  $k'' = k'_{500}$ . Na przykład na 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

$$\frac{d}{50(k'')^2} \int_0^T u_s^2(t)dt = \frac{d}{50(k'')^2} (k^{TSA})^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} \quad (7a)$$

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

$$EU = \frac{d}{50} C_{pb}^2 \cdot C_{AP}^e \cdot e_{\beta}^{0*} \quad (7b)$$

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

Zatem 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, otrzymuje się

$$EU = d \cdot 17 \cdot 10^8 \cdot e_{\beta}^{0*} \quad (8)$$

(gdzie  $e_{\beta}^{0*}$  to poosiowa składowa unormowanego strumienia energii w otoczeniu geofonu). 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  $10^8$  przez  $\rho V$  i mnożąc  $e_{\beta}^{0*}$  przez  $\rho V$  otrzymuje się

$$EU = d \cdot 726,5 \cdot e_{\beta}^{0*} \quad (9)$$

Równania te określają związek między  $e_{\beta}^{0*}$ , poosiową składową strumienia energii fal w otoczeniu czujnika – a wielkością EU, zwaną potocznie energią umowną, odczytywaną z komputerowego wyjścia ARESA 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

**$e_{\beta}^{0*}$ , 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.**

Nie jest więc poprawny pogląd, że rejestracja trójskładowa rozwiąże problemy estymacji parametrów źródła – na przykład energii źródłowej (E). W najprostszym przypadku rejestracja trójskładowa umożliwi bezpośredni pomiar fal P i S w otoczeniu czujnika (a stąd  $e_{\beta}^{0*}$ , a nie tylko  $e_{\beta}^{0*}$ ), lecz założenia i modele dotyczące ośrodka i źródła nadal będą konieczne – nawet w najprostszym przypadku źródła „punktowego”. Tworząc oprogramowanie metody AE dla aparatury ARES pamiętać należy, że błąd EU, oraz błędy wielkości określonych na podstawie EU, zależą od kwadratu ( $C_{pb}^2$ ) ilorazu  $k^{TSA}/k''$ , zatem od kwadratu błędu deklarowanej wartości  $k''$ . Jeśli więc (np.) zamiast  $k'' = k^{TSA}$  zadeklarowano wartości dwukrotnie

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

mniejszą (lub większą) – a „błędy” takie są na porządku dziennym, szczególnie gdy wzmocnienia określone są w decybelach – to wyliczona wartość  $EU$  jest czterokrotnie mniejsza (lub większa) od wartości poprawnej. Oprogramowanie powinno więc zachęcać obsługę do systematycznego deklarowania aktualnej i poprawnej wartości  $k$ , która na skali liniowej jest iloczynem wzmocnień geofonu, nadajnika i odbiornika i/lub innych elementów TSA. Ponadto **jeśli aparatura (np. ARES) umożliwia inne sposoby zmieniania wzmocnienia, to zmiany te powinny – najlepiej automatycznie – być wprowadzane do algorytmu liczącego  $EU$** . Bez tego wnioskowanie o zmianach zagrożenia na podstawie zmian  $EU$  i emitowanej energii staje się fikcją.

## 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  $E$  (energiją sejsmiczną, utożsamianą z energiją 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

$$e^* = (\pi rh)^{-1} \exp(-\gamma r) E, [\text{J/m}^2] \quad (10)$$

gdzie  $\gamma = 2\alpha$  [ $\text{m}^{-1}$ ] to współczynnik absorpcji energii fal przez górotwór (natomiast  $\alpha$  to współczynnik tłumienia amplitudy fal), a energia  $E$  „rozkłada się” na powierzchni walca ( $S = \pi rh$ ), którego środek jest źródłem (w pobliżu frontu ściany, stąd  $\pi rh$ , a nie  $2 \pi rh$ ) tak, że w ośrodku zachowawczym (tzn. dla  $\gamma = 0$ ), w sposób jawny spełniona jest zasada zachowania energii. Wyznaczając  $e^*$  z (4c) i wstawiając do (10), otrzymuje się

$$e_{\beta}^{0*} = (\rho V)^{-1} (\pi rh)^{-1} \cos^2 \beta \exp(-\gamma r) E \quad (11)$$

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

$$(d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} = (d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e (\rho V \pi rh)^{-1} \cos^2 \beta \cdot \exp(-\gamma r) E \quad (12)$$

Ponieważ (zgodnie z (7b)) lewa strona (12) to  $EU$ , energia umowna, zatem

$$EU = (d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e (\rho V \pi rh)^{-1} \cos^2 \beta \cdot \exp(-\gamma r) E \quad (13)$$

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

$$EU = C_2 d (rh)^{-1} (0,111 + \cos \beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (14a)$$

$$C_2 = (C_{pb}^2 C_{AP}^e \cdot 0,81) / (50 \pi \rho V) \quad (14b)$$

i to jest „realistyczna postać” równania wiążącego  $EU$ , energiją umowną odczytywaną na wyjściu systemu ARES z  $E[J]$ , energiją sejsmiczną punktowego źródła w pokładzie, w znanej odległości  $r$  od geofonu. 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.

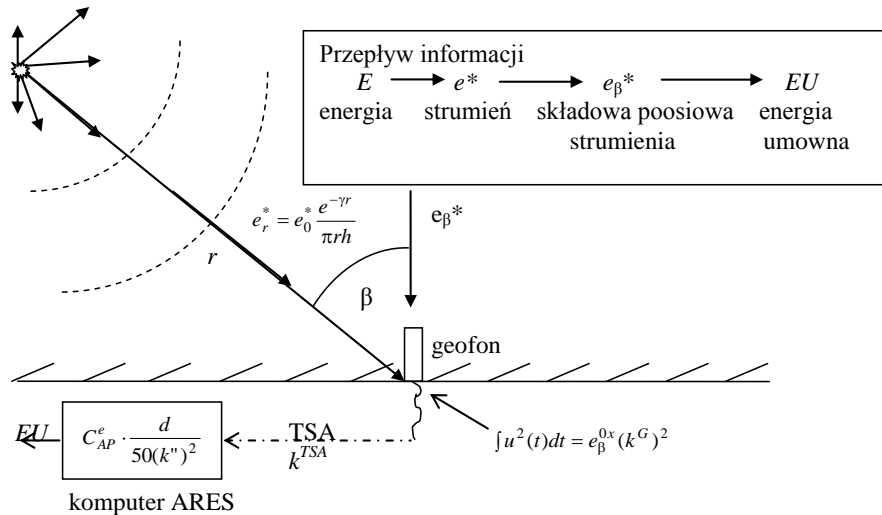
Równanie (14a) umożliwia też obliczenie energii  $E$ , gdy znana jest wartość  $EU$  i niepotrzebna jest żadna „redukcja” na kulę czy walec o promieniu 50 m: zasada zachowania energii (po skorygowaniu absorpcji) pozwala na całkowanie jej gęstości (lub strumienia) na otaczającej źródło powierzchni zamkniętej, przez którą fala propaguje i nie występują tu żadne trudności. Rys. 2 ułatwia interpretację wielkości występujących w równaniach (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 14b) jest, dla danej aparatury i pokładu, wielkością stałą to – 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

$$EU = 187,3131 d (rh)^{-1} (0,111 + \cos \beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (15a)$$

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). Przyjmując (tylko chwilowo) to oszacowanie za dobrą monetę, zatem zakładając  $d = r$ , równanie (15a) zapisać można w nieco prostszej formie

$$EU = 187,3131 h^{-1} (0,111 + \cos \beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (15b)$$



Rys. 2. Szkic ilustrujący wielkości i pojęcia stosowane w przypadku estymacji energii  $E$  źródła punktowego.  
 $e_0^*$  to strumień energii sejsmicznej w bezpośrednim otoczeniu źródła

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

$$EU = const \cdot E \quad (16)$$

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 wprowadzono (Instrukcja p.6.6) czynnik  $d/(k^2 \cdot 50)$ .

Powtórzyć trzeba, że **równanie (16) dotyczy źródła punktowego o znanym, zawsze tym samym położeniu ( $r=d$ , brak zależności kierunkowej), obserwowanego właśnie jako pojedyncze zdarzenie, w ośrodku pozbawionym absorpcji ( $\gamma=0$ ), geofonem bez właściwości kierunkowych.**

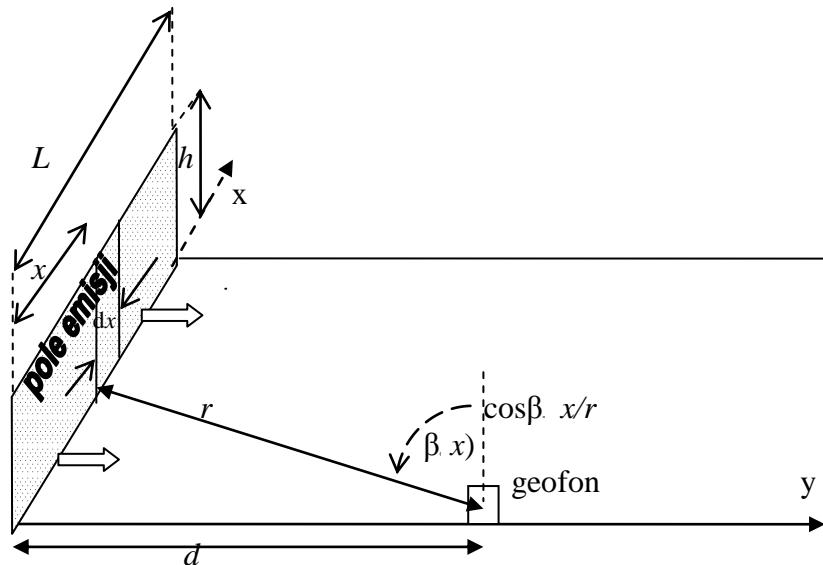
Niestety, w zastosowaniach sejsmoakustyki źródła nie są lokalizowane, a górotwór niewątpliwie pochłania energię fal i tłumi ich amplitudę na drodze źródło-geofon (w stopniu m.in. zależnym od stopnia spękania ośrodka – zatem najmocniej na zakładanej/postulowanej drodze od skrzyżowania, wzdłuż ociosu, do geofonu). Ponadto pominięcie właściwości kierunkowych geofonu okazało się poważnym źródłem błędów i uważam, że model, na którym oparte są opisane w Instrukcji (metody AE) sposoby oceny energii AE, powinien być zastąpiony innym, spójnym modelem.

### 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 ( $\Delta t$ ) 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  $\Delta T_i$  czasu, zgodnych z czasem trwania  $i$ -tego skrawu w obserwowanej ścianie.**

Gdy założenie to jest spełnione to kombajn, w każdej  $i$ -tej jednostce  $\Delta T_i$ , „odwiedza” dokładnie raz, każdy „elementarny odcinek” ściany ( $dx$  na rys. 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 zmienia, gdy model uogólnimy, dopuszczając iż  $\Delta T_i$  obejmuje zawsze kilka pełnych skrawów – na przykład gdy  $\Delta T_i$  to  $i$ -ta



Rys. 3. Szkic ilustrujący sytuację pomiaru AE z pola emisji oraz pojęcia i symbole stosowane do opisu modelu

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  $(x, y, z)$ , założyć też możemy, że

**Z2: energia AE pochodzi z całego frontu („czoła”) ściany i  $e_0^*$  [J/m<sup>2</sup>], strumień lub „elementarna” energia emitowana z 1m<sup>2</sup> w okresie  $\Delta T_i$  jest – na całym froncie o długości  $L$  i o wysokości  $h$  – wielkością losową**

$$e_{0i}^*(\Delta T_i, x, y, z) = \bar{e}_{0i} \zeta_i \quad (17a)$$

gdzie  $\log \zeta_i \approx N(0, \sigma^2)$  (17b)

Założenie to zapewnia, że wielkość  $e_{0i}^*$ , choć losowa, jest zawsze nieujemna, że w okresie  $\Delta T_i$  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 postępem ściany, oraz zapewnia, że w okresie  $\Delta T_i$

$$E_i = \bar{e}_{0i} Lh \quad (18)$$

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  $\Delta T_i$ ) 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. 3) rozkładzie strumienia emitowanej (w  $\Delta T_i$ ) energii,  $\bar{e}_0^* = \text{const}$ .

Wielkości występujące w opisie AE z pola emisji ilustruje rys. 3.

Jeżeli wprowadzimy układ współrzędnych  $(x, y)$  jak na rys. 3, z osią  $x$  równoległą do frontu ścianowego, to dla każdego elementarnego odcinka ściany ( $\Delta x \rightarrow dx$ ) o wysokości  $h$ , stosuje się równanie (14a,b) jak do źródła punktowego i dla całej ściany otrzymuje się

$$EU = h \cdot \int_0^L \bar{e}_0^* C_2 d \cdot (rh)^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (19)$$

lub równoważnie

$$EU = \bar{e}_0^* C_2 d \cdot I(L, d, \gamma) \quad (20a)$$

$$r = (x^2 + d^2)^{1/2} \quad (20b)$$

$$I(L, d, \gamma) = \int_0^L r^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (20c)$$

$$C_2 = C_{pb}^2 \cdot C_{AP}^e \cdot 0,81 / (50\pi\rho V) \quad (20d)$$

(gdzie  $\cos\beta$  zapisano, na podstawie rys. 3, jako  $x/r$ ,  $d$  to odległość geofonu od skrzyżowania i  $C_{pb} = k^{TSA}/k$ ). Z równania (20a) wyznaczyć można średni strumień emitowany w jednostce  $\Delta T_i$  czasu

$$\bar{e}_0^* = EU \cdot (C_2 d \cdot I(L, d, \gamma))^{-1} \quad (21)$$

i mnożąc obie strony równania (21) przez  $L \cdot h$  otrzymuje się

$$E = \frac{L \cdot h}{C_2 \cdot d \cdot I(L, d, \gamma)} EU \quad (22a)$$

$$EU = C_2 \frac{d \cdot I(L, d, \gamma)}{L \cdot h} E \quad (22b)$$

gdzie  $E, [J]$ , to energia emitowana z frontu ściany w jednostce  $\Delta T_i$  czasu,  $EU$  to energia umowna, w równaniu (22a) odczytywana z komputera na wyjściu systemu ARES w kopalnianej Stacji Tapań (a w równaniu (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  $(L, d, \gamma)$ .

Wpływ charakterystyki kierunkowej typowego (stosowanego w ARES-5) geofonu oraz wpływ absorpcji energii (przez górotwór) na wyniki estymacji

energii ilustruje tabela 1. By ułatwić analizę tabeli 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 1 widzimy, że

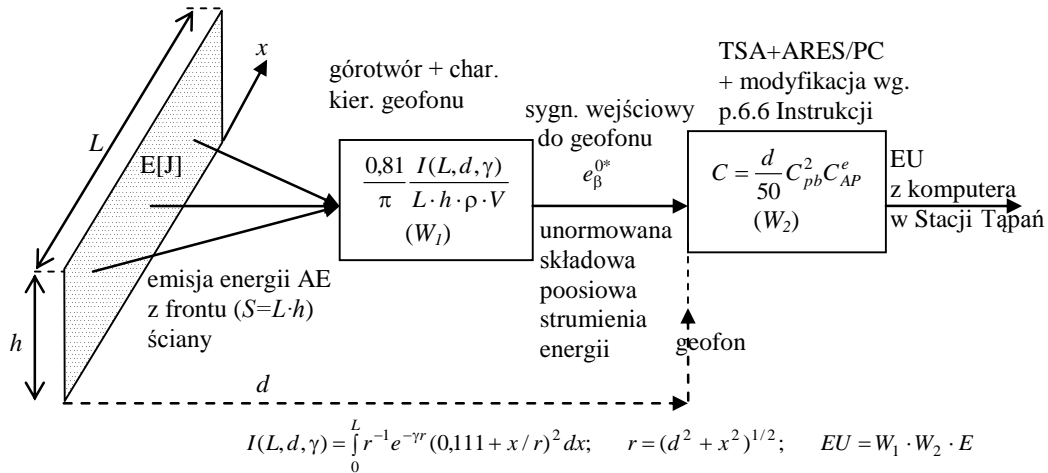
- a)  $W^e(L, d, \gamma, chk) < W^e(L, d, \gamma, 1)$ , a ponieważ  $E = EU / W^e$  to wynika stąd, że pominięcie charakterystyki kierunkowej zawsze zaniża (czasem nawet 3-krotnie) oszacowanie emitowanej energii  $E$
- b)  $W^e(L, d, \gamma > 0, chk) < W^e(L, d, 0, chk)$ , zatem pominięcie absorpcji energii przez górotwór zawsze zaniża (czasem nawet 15-krotnie) oszacowania emitowanej energii  $E$
- c) w tabeli 1 widzimy, że – 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 zaniżenie oszacowania emitowanej energii.

Tabela 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  $L, d, \gamma$ , 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  $\gamma = 0$**

$L[m]$	$d[m]$	$\gamma[m^{-1}]$	$\frac{I}{W^e}$	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. 4. Schemat przepływu „sygnału energii” z pola źródłowego (którym jest front ściany) przez górotwór ( $W_1$ ) i aparaturę TSA/ARES ( $W_2$ ) do wyjścia z komputera w Stacji Tępań

**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  $\gamma$  absorpcji (energii fal w pokładzie przed frontem ściany) są nieznane, jest przedmiotem rozdziału 3.

**Zadanie obliczenia  $EU$**  (z równania (22b)), **gdy dana jest energia ( $E$ ) emisji i współczynnik ( $\gamma$ ) absorpcji nazywamy prostym zadaniem sejsmoakustyki.** Analogicznie, **zadanie obliczenia/estymacji energii ( $E$ ) emisji i współczynnika ( $\gamma$ ) absorpcji, gdy dane są wartości  $EU$ , nazywamy odwrotnym zadaniem sejsmoakustyki.**

Przyjmując tę terminologię, równania (22a,b) zapisać można w postaci

$$E = (W^e)^{-1} EU \quad (23a)$$

$$EU = W^e E \quad (23b)$$

gdzie  $W^e = C_2 \frac{d \cdot I(L, d, \gamma)}{Lh}$ ,  $[s \cdot kg^{-1}]$  (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. 4. 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 –  $d/(50 \cdot k^2)$

$$W^e = W_1 \cdot W_2 \quad (25a)$$

$$W_1 = \frac{0,81}{\pi} \frac{I(L, d, \gamma)}{Lh\rho V}, \quad [s \cdot kg^{-1}] \quad (25b)$$

$$W_2 = \frac{d}{50} C_{pb}^2 C_{AP}^e \quad (26)$$

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  $e_{\beta}^{0*}$ , unormowana, poosiowa składowa strumienia energii pola falowego w otoczeniu geofonu. Równocześnie  $e_{\beta}^{0*}$  jest (energetycznym) sygnałem wejściowym do geofonu (patrz rys. 1 i równanie (2d)) – który jest początkowym elementem czynnika (lub „podukładu”)  $W_2$ , przekształcającego  $e_{\beta}^{0*}$  w energię umowną  $EU$  odczytywaną na wyjściu systemu sejsmoakustycznego ARES5 na Stacji Tępań.

Symbole  $W_1$  i  $W_2$  na rys. 4 określają zarówno „element drogi sygnału” ( $W_1$  – górotwór,  $W_2$  – aparaturę) jak i (przybliżone) wzmocnienie sygnału przez ten element. Warto zauważyć, że przekształcenie strumienia  $e^*$  energii w jego składową poosiową, co potocznie (lecz niezbyt ściśle) przypisujemy charakterystyce kierunkowej geofonu, włączone zostało do bloku  $W_1$  „symbolizującego” górotwór.

### 3. RÓWNOCZESNA ESTYMACJA ENERGII ( $E$ ) I WSPÓŁCZYNNIKA ( $\gamma$ ) ABSORPCJI BEZ LOKALIZOWANIA OGNISK

W przypadku obserwacji AE za pomocą  $N > 1$  geofonów równanie (22b) przekształca się w układ równań o postaci

$$EU(i) = C_2 \frac{d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)}{Lh} E, \quad i=1, \dots, N \quad (27)$$

który to układ – w bardzo realistycznym przypadku, gdy wartość  $\gamma$  nie jest znana – „rozwiązać” należy względem niewiadomych ( $E, \gamma$ ) (znając wartości  $EU(i), d(i), L, h, C_2$ ) za pomocą odpowiedniego programu komputerowego, znajdując takie wartości ( $E, \gamma$ ), 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 (27). 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 ( $E, \gamma$ ) optymalizujące przyjętą miarę jakości

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \left\{ E \frac{C_2 \cdot d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)}{Lh} - EU(i) \right\}^2 \quad (28)$$

gdzie  $I(L, d(i), \gamma)$  określone jest równaniem (20c). Powtórzyć trzeba, że  $I(L, d, \gamma)$  jest „nieelementarną” całką, która obliczana musi być numerycznie i że jedna z niewiadomych (współczynnik absorpcji  $\gamma$ ) występuje wewnątrz funkcji podcałkowej.

Danymi wejściowymi do programu liczącego  $E, \gamma$  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 deklaro-

wane przez obsługę systemu. Zazwyczaj  $k^{TSA}/k''=10^4$ ,  $C_{AP}=850$  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 ( $\gamma=2\alpha$ , [ $\text{m}^{-1}$ ], gdzie  $\alpha$  to współczynnik tłumienia amplitudy fal), które występują w praktyce, w tabeli 2 pokazano – dla szesnastu kolejnych godzin obserwacji jednej ze ścian w kopalni Wesoła za 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  $\gamma(i) [\text{m}^{-1}], i=1, \dots, 16\}$ .

**Tabela 2**

**Przykładowe wartości energii umownej ( $EU$ ) oraz odpowiadające im wartości  $E$  i współczynnika absorpcji  $\gamma$ , w przypadku obserwacji za pomocą dwu geofonów jednej ze ścian w kopalni Wesoła**

$I$	$EU_1(i)$	$EU_2(i)$	$E(i), [J]$	$\gamma(i) [\text{m}^{-1}]$
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

O wynikach tych można powiedzieć, że są jednoznaczne, stabilne i realistyczne (tzn. wartości  $\gamma$  są typowe i zbliżone do wartości otrzymywanych w bezpośrednich pomiarach tłumienia, np. Kornowski 2002 s. 118) oraz demonstrują bezproblemowe działanie estymatora (28). Ponieważ w zagadnieniu występują dwie niewiadome ( $E$  oraz  $\gamma$ ), a obserwacje prowadzono za pomocą dwu geofonów, żadna ocena błędu pomiaru nie jest możliwa.

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, wykorzystującej informację zawartą

w emisji sejsmoakustycznej, nie wymagając ani nakładów finansowych ani wzrostu pracochłonności.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Prognozowanie zagrożenia sejsmicznego ( $Z^S$ ) wymaga obliczania energii całkowitej ( $E^C$ ), która jest sumą energii ( $E^v$ ) wstrząsów i energii ( $E^{AE}$ ) AE, a warunkiem sumowania jest addytywność tych wielkości. Ponieważ przyjmuje się, że energii  $E^v$  jest energią wyrażoną w dżulach to – w celu obliczenia energii  $E^C$  (a następnie wyprognozowania zagrożenia  $Z^S$ ) – konieczne jest liczenie („fizycznej” a nie „umownej”) energii ( $E^{AE}$ ) AE (z tego samego okresu czasu i w przybliżeniu z tego samego obszaru co  $E^v$ ), 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  $e_{\beta}^{0*}$  strumienia energii (pola falowego) w otoczeniu czujnika,
  - obliczenie nienormowanej wartości strumienia ( $e^*$  lub  $e_{\beta}^*$ ) wymaga, by znane były wartości  $p$  i  $V$  w otoczeniu czujnika,
  - zależności wiążące strumień ( $e^*$  lub  $e_{\beta}^*$ ) z EU są proste tylko wówczas, gdy parametry fal mieszczą się w obszarze stałego wzmocnienia aparatury (toru TSA/ARES).
2. Estymacja wielkości opisujących źródła lub parametrów emisji źródłowej (w tym energii EAE), zawsze wymaga – prócz obserwacji EU – silnych założeń o modelu źródła lub pola źródłowego i ośrodka. W tym sensie możliwa jest tylko warunkowa estymacja energii EAE, 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 (14a,b) wiążą EAE

z EU, a w przypadku obserwacji wieloczuJNIKOWYCH układów równań typu (14a,b) umożliwia estymację wartości E oraz  $\gamma$ .

4. Równania (22a,b) wiążą obserwowane za pomocą aparatury ARES wartości EU z EAE, energią emitowaną w ustalonej jednostce czasu z pola emisji na froncie eksploatowanej ściany, bez konieczności lokalizowania ognisk AE.
5. Optymalizacja zadania (28) umożliwia – na podstawie wartości EU z N czujników (w okresie  $\Delta t$  obserwujących obszar S ściany) – estymację energii („fizycznej”) EAE oraz współczynnika  $\gamma$  absorpcji bez lokalizowania ognisk AE, stanowi więc warunkowe rozwiązanie „odwrotnego” zadania sejsmoakustyki górniczej.

#### Literatura

1. Barański A., Drzewiecki J., Kabiesz J., Konopko W., Kornowski J., Krzyżowski A., Mutke G.: Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego, Załącznik nr 3, GIG Seria Instrukcje No. 20, Katowice, 2007.
2. Kornowski J.: Podstawy sejsmoakustycznej oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, Wyd. GIG, Katowice, 2002.
3. Kornowski J., Kurzeja J.: Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, Wyd. GIG, Katowice, 2008.
4. Kurzeja J.: Energia emisji sejsmoakustycznej i sejsmologicznej jako podstawa liniowej prognozy zagrożenia sejsmicznego, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 2009, nr 6.
5. Sikora M., Wróbel Ł.: Wyniki zastosowania algorytmów indukcji reguł do klasyfikacji stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, w druku, 2009.

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

*Recenzent: dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. nadzw. AGH*