

Joanna Kurzeja*, Jerzy Kornowski*

ESTYMACJA ENERGII SEJSMOAKUSTYCZNEJ I WSPÓŁCZYNNIKA JEJ ABSORPCJI W POKŁADZIE PRZED FRONTEM SKRAWANEJ ŚCIANY

Streszczenie

W artykule przedstawiono 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 zastosowaniu, 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 jest dana 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 tanią.

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

Estimation of the seismo-acoustic energy and the coefficient of its absorption in the seam ahead of the front of extracted longwall

Abstract

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 – depending 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.

WPROWADZENIE

W artykule omówiono zagadnienie estymacji energii emisji sejsmoakustycznej i współczynnika jej absorpcji w pokładzie węgla przed frontem skrawanej ściany.

* Główny Instytut Górnictwa.

Z uwagi na to, że niektóre związane z tematem pojęcia będą się wielokrotnie pojawiały, dla zwięzłości zastosowano 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 zagrożenia sejsmicznego indukowanego eksploatacją, które jest kojarzone 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 następującej postaci (Kornowski, Kurzeja 2008).

Zagrożenie sejsmiczne, Z^s lub $Z^s[(t, t + \Delta t), S]$, 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 wystąpienia zdarzenia $E > E_g$ w chwili t w punkcie S , lecz jak argumentują Kornowski i Kurzeja (2008), przejście graniczne ($S \rightarrow 0$, $\Delta t \rightarrow 0$) jest teoretyczne, którego nie poleca się stosować, 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 $t + \Delta t$). W związku z tym, że energię 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 i muszą być wyrażone w tych samych jednostkach. Tymczasem powszechnie przyjmuje się, że E^w energia wstrząsów jest energią wyrażoną w dżulach, podczas gdy obecnie działające systemy obserwacyjne AE informują użytkownika o wartości EU tak zwanej energii umownej, która nie ma wymiaru energii.

W niniejszym artykule przedstawiono uzasadnienie i wyprowadzenie estymatora energii fizycznej E^{AE} zbiorów zdarzeń AE wyrażonej w dżulach. Estymator ten umożliwia obliczanie E^{AE} na podstawie rutynowych obserwacji AE zarówno w przypadku źródeł zlokalizowanych (rozd. 1.2), jak i – co znacznie ważniejsze w stosowaniu – bez lokalizacji źródeł, gdy energia umowna EU (z danej ściany) jest kumulowana w ustalonych okresach. W rozdziale 2 opisano metodę równoczesnej estymacji E^{AE} oraz współczynnika absorpcji energii fal γ , w pokładzie przed frontem ściany, co ma podstawowe znaczenie dla jakości wyników. Aby ograniczyć złożoność analiz pominięto zagadnienie zależności badanych wielkości od częstotliwości.

Przedstawiony w rozdziałach 1.2 i 1.3 estymator energii generuje jedną, jednoznacznie określoną, ocenę energii emitowanej z tak zwanego pola emisji (Kornowski, Kurzeja 2008) – którym jest otoczenie frontu ścianowego – jeśli tylko liczba geofonów zastosowanych do obserwacji tej ściany jest większa od 1. Stanowi to (przybliżone oczywiście) rozwiązanie jednego z najpoważniejszych problemów sejsmoakus-

tycznej oceny zagrożenia, powstającego zawsze, gdy z N geofonów otrzymuje się, w tym samym czasie, N ocen zagrożenia i nie wszystkie są zgodne.

1. ESTYMACJA ENERGII AE

1.1. Pojęcia, definicje i zależności podstawowe

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

W celu uproszczenia założono, że aparatura pracuje w tzw. obszarze stałego wzmocnienia (Kornowski 2002; Kornowski, Kurzeja 2008), w którym charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa jest w przybliżeniu płaska, zatem wzmocnienie nie zależy od częstotliwości. W przypadku sygnałów AE, których widmo i amplituda mieszczą się w obszarze stałego wzmocnienia aparatury, **odpowieź napięciowa $u_G(t)$ jednoskładowego geofonu jest proporcjonalna do poosiowej składowej** (rys. 1c) $v_\beta(t)$ – **indeks β wskazuje, że to składowa poosiowa – prędkości $v(t)$ drgań cząstek ośrodka**, z którym geofon ten ma sztywny kontakt

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

gdzie: $v_\beta = v \cdot \cos\beta$, $\cos\beta$ to teoretyczna „charakterystyka kierunkowa” geofonu, natomiast k^G , V·s/m, to czułość geofonu (lub wzmocnienie amplitudy sygnału wejściowego $v_\beta(t)$ przez geofon).

Elementarne (i znane) równania określające strumień e^* energii i wiążące go z sygnałem wejściowym $v_\beta(t)$, zestawiono w tablicy 1.

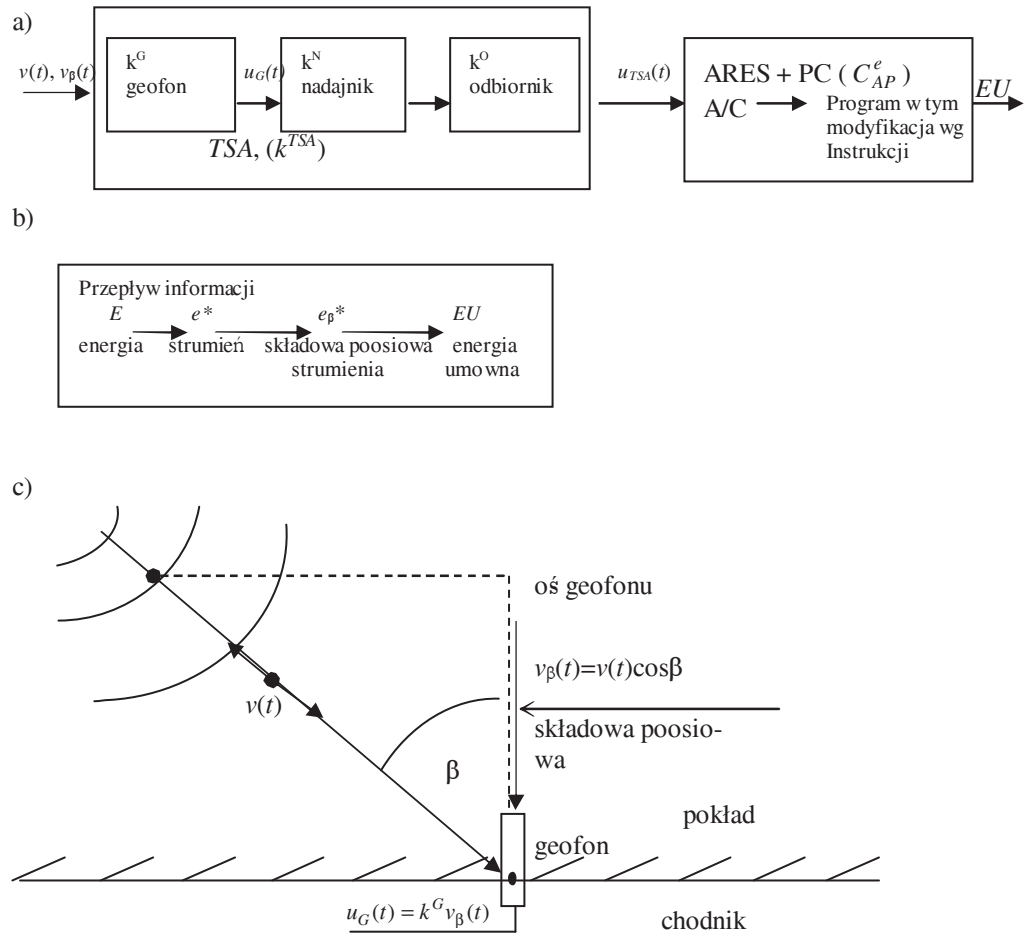
Podnosząc równanie (1) do kwadratu i w miejsce $v_\beta^2(t)$, wstawiając $e_\beta^{0*}(t)$, otrzymuje się

$$u_G^2(t) = e_\beta^{0*}(t)(k^G)^2 \quad (4)$$

Równanie (4) ma podstawowe znaczenie w zadaniu pomiaru/oceny energii fal za pomocą aparatury AE; zgodnie z nim kwadrat napięcia na wyjściu geofonu u_G^2 jest proporcjonalny – ze współczynnikiem proporcji $(k^G)^2$ – do e_β^{0*} , poosiowej składowej unormowanego strumienia energii pola falowego w otoczeniu geofonu.

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

Współczynnik $(k^G)^2$ jest nazywany „wzmocnieniem energetycznym” geofonu.



Rys. 1. Uproszczony schemat przepływu sygnału w czasie pomiaru AE (a), schemat przepływu informacji o energii (b) oraz szkic ilustrujący pojęcie „składowej poosiowej” (c); konstrukcja geofonu umożliwia drgania uzwojenia tylko wzdłuż osi geofonu, stąd reaguje on tylko na składową poosiową drgań

Fig. 1. Diagram of a signal flow in a seismoacoustic measurement and transmission line (a), diagram of information flow (b) and sketch illustrating the notion of „axial component” (of P-wave) (c); geophone design allows only coaxial oscillations of the coil, so that it reacts only to the axial component of the wave

Należy zauważyć, że w odróżnieniu od $e^{0*}(t)$ i $e_{\beta}^{0*}(t)$ wielkości e^{0*} i e_{β}^{0*} mają wymiar metra kwadratowego na sekundę.

Jeżeli sygnał napięciowy $u_{TSA}(t)$ jest mierzony na wyjściu toru TSA to, analogicznie do równania (4), lecz z indeksem TSA , zamiast G i całkując od 0 do T , można zapisać

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

Tablica 1. Równania określające strumień e^* energii i jego unormowaną ($e^{0*} = e^*/\rho V$) postać, w zależności od sygnału v_β na wejściu geofonu (wszystkie całki określone w przedziale od 0 do T , gdzie T jest czasem trwania sygnału)

Chwilowa wartość strumienia energii		Skumulowana wartość strumienia energii	
$e^*(t) = V\rho v^2(t)$	(2a)	$e^* = \rho V \int v^2(t) dt$	(3a)
$e^{0*}(t) = (V\rho)^{-1} e^*(t)$	(2b)	$e^{0*} = (\rho V)^{-1} e^*$	(3b)
$e^{0*}(t) = v^2(t)$	(2c)	$e^{0*} = \int v^2(t) dt$	(3c)
$e_\beta^*(t) = e^*(t) \cos^2 \beta^2$	(2d)	$e_\beta^* = \rho V \int [v(t) \cos \beta]^2 dt$	(3d)
$e_\beta^{0*}(t) = (v_\beta(t))^2$	(2e)	$e_\beta^{0*} = \int v_\beta^2(t) dt$	(3e)
$e_\beta^{0*}(t) = e^{0*}(t) \cos^2 \beta$	(2f)	$e_\beta^{0*} = \int v^2(t) \cos^2 \beta dt$	(3f)

gdzie $(k^{TSA})^2$ jest „wzmocnieniem energetycznym” toru (TSA). Z uwagi na to, że między wyjściem TSA a użytkownikiem jest komputer, należy pamiętać o „stałej aparaturowej” C_{AP}^e (modyfikującej energię), co powoduje przekształcenie (5) do postaci

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

gdzie $u_s(t)$ jest sygnałem w komputerze odczytywanym przez oprogramowanie.

Jeżeli obliczenia są prowadzone zgodnie z Instrukcją nr 20 (2007) metody AE, to należy pamiętać też o modyfikacji czynnikiem $d/[50 \cdot (k'')^2]$, przy czym w niniejszym artykule zastosowano symbol k'' , aby 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 Tępań, gdy $k'_{500} \approx 2,5 \cdot 10^4$, to wprowadza się $k'' = 2,5$ (co autorzy uważają za poprawną obsługę systemu), lecz są możliwe i inne niezgodności. Biorąc to pod uwagę można zapisać

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

Lewą stronę tego równania oznacza się symbolem EU i nazywa ENERGIĄ UMOWNĄ odczytywaną z komputerowego wyjścia systemu AE na odpowiednim kanale. Tak więc

$$EU = \frac{d}{50} C_{pb}^2 C_{AP}^e e_\beta^{0*}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (8)$$

gdzie d jest odległością geofonu od ściany, $C_{pb} = k^{TSA}/k''$ (i zazwyczaj $C_{pb} = 10^4$), zatem EU , tak jak e^{0*} , ma wymiar metra kwadratowego na sekundę.

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.

1.2. Źródło punktowe w pokładzie i estymacja jego energii

Najprostszym przypadkiem estymacji energii źródłowej jest źródło punktowe. Jeżeli źródło takie, emitujące energię E (energię 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) jest określony równaniem

$$e^* = (\pi rh)^{-1} \exp(-\gamma r) E, \text{ J/m}^2 \quad (9)$$

gdzie $\gamma = 2\alpha$ [m^{-1}] jest współczynnikiem absorpcji energii fal przez górotwór (natomiast α 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 πrh , a nie $2\pi rh$) tak, że dla $\gamma = 0$, w sposób jawny jest spełniona zasada zachowania energii. Wyznaczając e^* z (3b), wstawiając do (9) i mnożąc obustronnie przez $\cos^2\beta$, otrzymuje się

$$e_{\beta}^{0*} = (\rho V)^{-1} (\pi rh)^{-1} \cos^2\beta \exp(-\gamma r) E \quad (10)$$

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

$$(d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} = (d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e (\rho V \pi rh)^{-1} \cos^2\beta \cdot \exp(-\gamma r) E \quad (11)$$

Z uwagi na to, że [zgodnie z (8)] lewa strona (11) to energia umowna EU , to jeżeli wyidealizowaną charakterystykę kierunkową ($f_k(\beta) = \cos\beta$) zastąpi się jej wersją realistyczną ($f_k(\beta) = 0,9(0,111 + \cos\beta)$) (Kornowski 2002, rozdz. 5.2.3) – otrzyma się:

$$EU = C_2 d \cdot (rh)^{-1} (0,111 + \cos\beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (12)$$

$$C_2 = (C_{pb}^2 C_{AP}^e \cdot 0,81) / (50\pi\rho V) \quad (13)$$

i to jest równanie wiążące energię umowną EU – odczytywaną na wyjściu aparatury sejsmoakustycznej w Stacji Tapań – z energią sejsmiczną E [J] 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 czasu pierwszych wejść itp.) przed przystąpieniem do obliczania energii.

Jeżeli więc $r \approx d$ oraz pominie się tłumienie (przyjmując $\gamma = 0$) i kierunkowe właściwości geofonu, to w pokładzie o stałej miąższości h otrzymuje się oszacowanie

$$EU = \text{const} E \quad (14)$$

gdzie wartość stałej (const) zależy od pokładu i aparatury, może więc być oszacowana w ustalonych warunkach. Taka była właśnie motywacja autorów pierwszej wersji In-

strukcji metody AE (Cianciara i in. 1988) i dlatego (wzorem sejsmologii górniczej, gdzie „redukcja na kulę” o ustalonym promieniu była wówczas stosowana) wprowadzono czynnik $d/(k^2 \cdot 50)$.

Równanie (14) dotyczy źródła punktowego, o znanym, zawsze tym samym położeniu ($r = d$ – brak zależności kierunkowej), obserwowanego w ośrodku pozbawionym absorpcji ($\gamma = 0$), geofonem bez właściwości kierunkowych.

Niestety, w przypadku zastosowania sejsmoakustyki źródła nie są lokalizowane, energia EU jest kumulowana w dłuższych okresach czasu, górotwór niewątpliwie pochłania energię fal, a pominięcie właściwości kierunkowych geofonu okazało się poważnym źródłem błędów.

Podsumowując, można stwierdzić, że próby estymacji energii źródła punktowego źle rokują, dopóki nie zostanie rozwiązane, w mniej lub bardziej poprawny sposób, zagadnienie lokalizacji źródeł. Opisany sposób oceny energii stał się, wskutek wprowadzenia „energii umownej”, 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.

1.3. Pole emisji i energia emisji

Przedstawione w rozdziale 1.2 równania, umożliwiające estymację energii, dotyczą przypadku źródeł punktowych. Jest to podstawowy model obserwacji sejsmologicznych przyjęty z sejsmologii do sejsmoakustyki. Dzisiejszy stan metody sejsmoakustycznej (do oceny stanu zagrożenia sejsmicznego), gdy **zdarzenia AE nie są lokalizowane, a przedmiotem analiz jest między innymi 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. Założono więc przede wszystkim, że:

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

Gdy założenie to jest spełnione, to kombajn, w każdej i -tej jednostce czasu ΔT_i , „odwiedza” wyłącznie raz każdy „elementarny odcinek” ściany (dx na rys. 2) 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 AE może być pominięty. Sytuacja się nie zmieni, gdy model zostanie uogólniony, dopuszczając, że ΔT_i obejmuje zawsze kilka pełnych skrawów – na przykład gdy ΔT_i to i -ta zmiana wydobywcza (o ile wykonano pełną liczbę skrawów).

Z uwagi na to, że w metodach oceny stanu zagrożenia, realizacji których służy sejsmoakustyka, z reguły ściana jest traktowana jako pewna całość, można też założyć, że:

- 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 długości L i wysokości h – wielkością losową

$$e_{0i}^*(\Delta T_i, x, y, z) = \bar{e}_{0i}^* \zeta_i \quad (15)$$

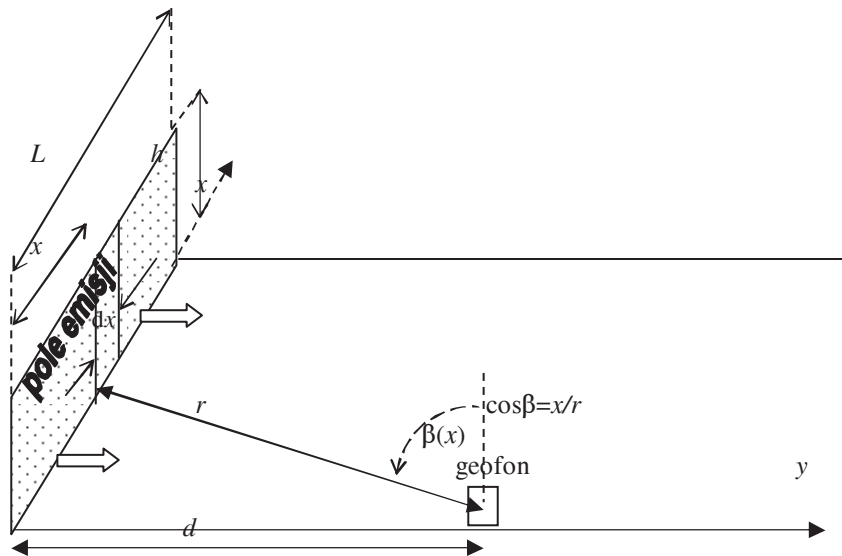
gdzie: $\log \zeta_i \approx N(0, \sigma^2)$ (16)

Założenie to zapewnia, że wielkość e_{0i}^* , choć losowa, jest zawsze nieujemna i, 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

$$E_i = \bar{e}_{0i}^* Lh \quad (17)$$

W dalszym tekście indeks i , oznaczający numer jednostki czasu lub skrawu, będzie pomijany.

Wielkość e_0^* to strumień emitowanej (z 1 m² frontu ścianowego, w okresie ΔT) energii, a \bar{e}_0^* to jego wartość średnia. Front ściany, z którego pochodzi e_0^* , jest nazywany **połem emisji**. Równania (15) i (16) definiują losowe („stochastyczne”) pole emisji o jednostajnym (na powierzchni frontu ściany $S = Lh$, rys. 2) rozkładzie strumienia emitowanej (w ΔT) energii, $\bar{e}_0^* = \text{const}$. Wielkości występujące w opisie AE z pola emisji podano na rysunku 2.



Rys. 2. Szkic ilustrujący sytuację podczas pomiaru AE z pola emisji (którym jest front ściany) oraz pojęcia i symbole stosowane do opisu modelu

Fig. 2. Emission field in a longwall and symbols applied in the model description

Jeżeli wprowadzi się układ współrzędnych (x, y) , jak na rysunku 2, z osią x równoległą do frontu ścianowego, to dla każdego elementarnego odcinka ściany $(\Delta x \rightarrow dx)$ wysokości h , stosuje się równania (12), (13) jak do źródła punkowego i dla całej ściany otrzymuje się energię umowną EU obserwowaną za pomocą geofonu (w odległości r) i pochodzącą z całej ściany

$$EU = h \int_0^L \bar{e}_0^* C_2 d (rh)^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (18)$$

lub równoważnie

$$EU = \bar{e}_0^* C_2 d \cdot I(L, d, \gamma) \quad (19a)$$

$$I(L, d, \gamma) = \int_0^L r^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (19b)$$

gdzie:

$$r^2 = x^2 + d^2,$$

C_2 jest określone równaniem (13),

$\cos\beta$ zapisano na podstawie rysunku 2, jako x/r ,

d – odległość geofonu od skrzyżowania,

$$C_{pb} = k^{ISA}/k'.$$

Z równania (19a) można wyznaczyć średni strumień emitowany w jednostce ΔT czasu

$$\bar{e}_0^* = EU (C_2 d \cdot I(L, d, \gamma))^{-1} \quad (20)$$

i mnożąc obie strony równania (20) przez Lh otrzymuje się równania podane w tabelicy 2, gdzie E [J], to energia emitowana z pola emisji (tzn. z frontu ściany) w jednostce ΔT czasu, EU to energia umowna, w równaniu (21a) odczytywana z komputera na wyjściu systemu (np.) ARES w kopalnianej Stacji Tapań (a w równaniu (21b) estymowana na podstawie modelu i wymuszenia E), C_2 to stała, zależna od aparatury i cech pokładu (typowo $C_2 = 187,3131$) a całka $I(L, d, \gamma)$, określona w (19b), musi być obliczana numerycznie dla danych wartości (L, d, γ) . Czynniki $(d/50)$, zachowany w równaniu (23), aby sposób obserwacji pozostał zgodny z obecnie stosowaną Instrukcją, jest (w tym modelu) całkowicie zbędny. W publikacji (Kurzeja, Kornowski 2009) wykazano na przykładach, że pominięcie charakterystyki kierunkowej i absorpcji (jak ma to miejsce obecnie, patrz p. 1.2) może powodować nawet 50-krotne zaniżenie oszacowania emitowanej energii AE.

Przedstawiony model pola emisji i związany z nim estymator energii emitowanej z tego pola, pozwala wreszcie na zaniechanie 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 podano w p. 2 – umożliwia równoczesną estymację emitowanej energii oraz współczynnika absorpcji γ , co ma w zastosowaniu zna-

czenie zasadnicze i co stanowi praktyczne rozwiązanie jednego z najpoważniejszych problemów sejsmoakustyki górniczej.

Tablica 2. Zestawienie równań wiążących energię umowną EU , rejestrowaną w jednostce czasu na wyjściu komputerowego systemu obserwacyjnego, z energią E emitowaną z frontu ściany

Odwrotna relacja tłumienia energii AE emitowanej z pola emisji	$E = \frac{Lh}{C_2 d \cdot I(L, d, \gamma)} EU$ (21a)	$E = (W^e)^{-1} EU$ (22a)
Prosta relacja tłumienia energii AE emitowanej z pola emisji	$EU = C_2 \frac{d \cdot I(L, d, \gamma)}{Lh} E$ (21b)	$EU = W^e EU$ (22b)
Uogólnione wzmocnienie energii AE	$W^e = \left[\frac{0,81}{\pi} \frac{I(L, d, \gamma)}{Lh\rho V} \right] \left[\frac{d}{50} C_{pb}^2 C_{AP}^e \right]$ (2.23)	

2. RÓWNOCZESNA ESTYMACJA ENERGII E I WSPÓŁCZYNNIKA ABSORPCJI γ , BEZ LOKALIZOWANIA OGNISK

W przypadku obserwacji AE za pomocą $N > 1$ geofonów, równanie (21b) przekształca się w układ równań o postaci

$$EU(i) = C_2 \frac{d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)}{Lh} E, \quad i = 1 \dots N \quad (24)$$

który – w bardzo realistycznym przypadku, gdy wartość γ nie jest znana – należy „rozwiązać”, 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.

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

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \left\{ E \frac{C_2 d(i) I(L, d(i), \gamma)}{Lh} - EU(i) \right\}^2 \quad i = 1 \dots N \quad (25)$$

gdzie $I(L, d(i), \gamma)$ jest określone równaniem (19c), a C_2 – równaniem (13). Należy powtórzyć, że $I(L, d, \gamma)$ jest „nieelementarną” całką, która musi być obliczana numerycznie i że jedna z niewiadomych (współczynnik absorpcji γ) występuje wewnątrz funkcji podcałkowej.

Danymi wejściowymi do programu liczącego E i γ są:

- wartości $EU(i)$ energii umownej, odczytane z komputerowego wyjścia systemu obserwacji AE, 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 (np.) dla aparatury ARES-5/TSA i dla pokładu, gdzie $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$ i $V = 1800 \text{ m/s}$, ma wartość 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 tego artykułu, więc je pominięto. Aby zorientować Czytelnika w zakresie wartości energii (E^{AE} [J]) i współczynnika absorpcji ($\gamma = 2\alpha$, [m^{-1}], gdzie α jest współczynnikiem tłumienia amplitudy fal), które występują w praktyce, w tablicy 3 pokazano – dla ośmiu kolejnych godzin obserwacji jednej ze ścian w kopalni „Wesoła” z pomocą dwu geofonów – rejestrowane wartości energii umownej $\{EU_1(i), EU_2(i), i = 1 \dots 8\}$ i odpowiadające im estymowane opisaną poprzednio metodą (i filtrowane prostym filtrem dolnoprzepustowym) wartości $\{E(i)$, [J] oraz $\gamma(i)$ [m^{-1}], $i = 1 \dots 8\}$.

Tablica 3. 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”

i	$EU_1(i)$	$EU_2(i)$	$E(i)$, J	$\gamma(i)$, 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

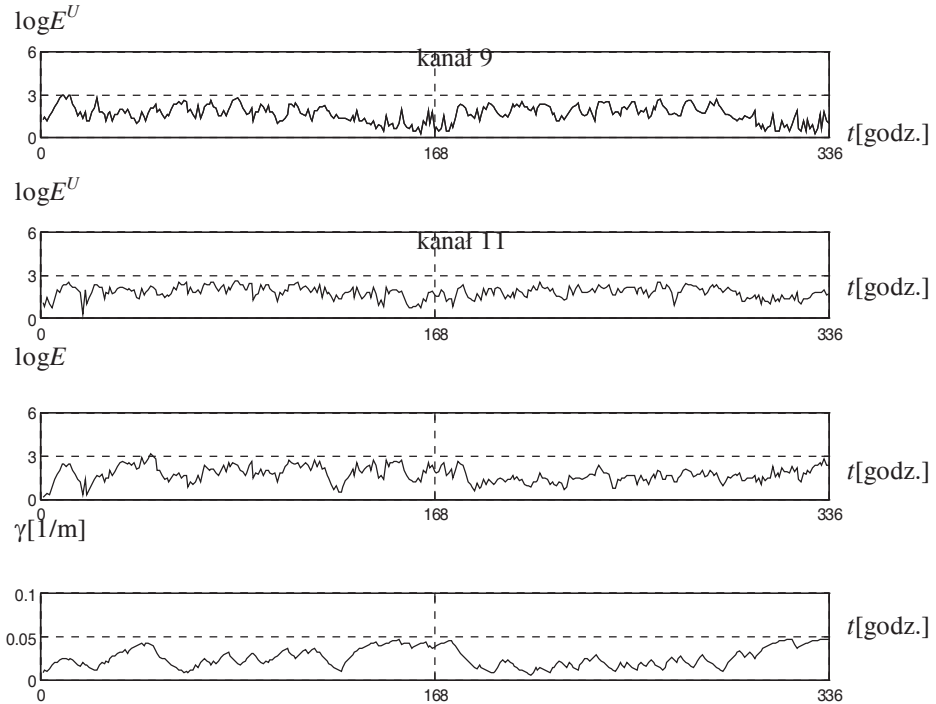
O wynikach tych można powiedzieć, że są jednoznaczne, stabilne i realistyczne (tzn. wartości γ są typowe i zbliżone do wartości otrzymywanych w bezpośrednich pomiarach tłumienia) oraz przedstawiają bezproblemowe działanie estymatora (2). Z uwagi na to, że w zagadnieniu występują dwie niewiadome (E oraz 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 rysunku 3 dla przypadku ściany 37 w kopalni „Wesoła”, obserwowanej (w tym czasie) za pomocą dwóch geofonów. W celu ułatwienia werbalnego opisu przyjęto, że rysunek 3 składa się z czterech „linii”. Na osiach poziomych zawsze jest czas w godzinach, 336 godzin to dwa tygodnie. Dwie górne linie przedstawiają 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 $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$ J, wartości współczynnika γ – w przedziale $0,01 - 0,05$ m⁻¹.

Warto dodać, że sekwencyjna, automatyczna estymacja współczynnika absorpcji przed frontem skrawanej ściany bywa nazywana – może nieco na wyrost – tomografią tłumieniową i może stać się 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 obserwacji sejsmoakustycznej.



Rys. 3. Przykład dwutygodniowej obserwacji $EU_1(t)$, $EU_2(t)$ energii umownej i wyników estymacji emitowanej energii oraz współczynnika tłumienia; energię przedstawiono na skali logarytmicznej

Fig. 3. 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

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Prognozowanie zagrożenia sejsmicznego Z^S – w szczególności znaną metodą prognozy liniowej – (Kornowski 2003; Kurzeja 2005; Kornowski, 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. Konieczne jest więc liczenie („fizycznej”, a nie „umownej”) energii (E^{AE}) AE (z tego samego okresu

i w przybliżeniu z tego samego obszaru co E^w), także wyrażonej w dżulach. Obliczenia te muszą być wykonywane na podstawie rutynowych rejestracji energii umownej EU i bez lokalizowania ognisk AE. Sposób rozwiązania tego zadania opisano w niniejszym artykule.

Najważniejsze wnioski wynikające z opisanych analiz można sformułować następująco:

1. Estymacja wielkości opisujących źródła lub parametrów emisji źródłowej (w tym energii E^{AE}), zawsze wymaga – oprócz obserwacji EU – silnych założeń do modelu źródła lub pola źródłowego i ośrodka. **W tym sensie jest możliwa tylko warunkowa estymacja energii E^{AE} , a jakość tej estymacji zawsze zależy od jakości modelu.**
2. 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 (12) wiąże E z EU , a w przypadku obserwacji wieloczuJNIKOWYCH układ równań typu (12) umożliwia estymację wartości E oraz γ .
3. Równania (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.
4. **Optymalizacja zadania (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.**
5. Zwiększając liczbę geofonów stosowanych do obserwacji zagrożonej ściany można 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”.

Praca, na podstawie której napisano niniejszy artykuł, była częściowo finansowana w ramach projektu (MNiSW) 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 zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego. Główny Instytut Górnictwa Seria Instrukcje nr 20.
2. Cianciara B., Grzybowski A., Kornowski J., Marcak H., Pilecki Z., Trombik M., Zuberek W. (1988): Instrukcja stosowania metody sejsmoakustycznej do oceny stanu zagrożenia tąpnięciami. Katowice, Wspólnota Węgla Kamiennego.
3. Konopko W. (1994): Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tąpnięciami. Prace Naukowe GIG nr 795.
4. Kornowski J. (2002): Podstawy sejsmoakustycznej oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Katowice, GIG.

5. Kornowski J. (2003): Linear Prediction of Aggregated Seismic and Seismoacoustic Energy Emitted from a Mining Longwall. *Acta Montana ser. A*, No. 22 (129), s. 5–14.
6. Kornowski J., Kurzeja J. (2008): Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Katowice, GIG.
7. Kurzeja J. (2005): Sekwencyjna prognoza energii sejsmicznej generowanej eksploatacją pokładu węgla. *Prace Naukowe GIG nr 867*.
8. Kurzeja J. (2008): Weryfikacja wybranych estymatorów maksymalnych przyspieszeń a_{\max} drgań na powierzchni terenów górniczych na Górnym Śląsku. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi T. 24, z. 2/3*, s. 291–302.
9. Kurzeja J. (2009): Energia emisji sejsmoakustycznej i sejsmologicznej jako podstawa liniowej prognozy zagrożenia sejsmicznego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa (w druku)*.
10. Kurzeja J., Kornowski J. (2009): Energia emisji, strumień energii i energia umowna w sejsmoakustyce górniczej. *Warsztaty 2009*. Kraków, Wydaw. IGSMiE PAN, s. 142–163.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz