



Sposób wyznaczenia współczynnika tłumienia w obserwacjach sejsmoakustycznych długich ścian o złożonej geometrii

The method of determining the attenuation coefficient in seismoacoustic observations of longwalls with complex geometry

Dr inż. Joanna Kurzeja^{*)}

Treść: Parametrem określającym spadek amplitudy fali w górotworze, na drodze o znanej długości jest współczynnik tłumienia amplitudy fal sejsmicznych. Wartość przybliżona tego współczynnika jest lokalną cechą pokładu węgla w badanym obszarze. W artykule przedstawiono eksperyment badawczy w jednej z kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), wykorzystujący dwa sposoby wyznaczenia wartości tłumienia na wybiegu ściany wydobywczej, przy pomocy aparatury sejsmoakustycznej. Nietypowa geometria wyrobiska, polegająca na gwałtownym zwiększeniu się frontu eksploatacji z 200 do 300 metrów, wymusiła dla oceny stanu zagrożenia metodą sejsmoakustyczną określenia efektywnej wartości tłumienia. Celem badań było wyznaczenie współczynnika tłumienia z zastosowaniem schematu pomiarowego metody sejsmoakustycznej w oparciu o model pola emisji Kornowskiego i Kurzeji (2009). Zestawiono wyniki współczynnika tłumienia w dwóch etapach eksploatacji o podobnych warunkach naprężeniowych, lecz przy znacząco różnych długościach frontu. Ponadto porównano wartości współczynników tłumienia z wynikami eksperymentu pomiarowego, wykazując ich zbieżność.

Abstract: The parameter that determines the decrease in wave amplitude of the rock mass along the path of a known length is the attenuation coefficient of seismic wave amplitude. The approximate value of this coefficient is the local feature of the coal seam in the study area. The article presents a research experiment in one of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) mines, using two methods of determining the value of attenuation coefficient at the longwall face by means of seismoacoustic equipment. The atypical geometry of the longwall, consisting in a rapid increase in the exploitation front length from 200 to 300 meters, made it necessary to determine the effective value of attenuation coefficient for the assessment of the rock burst hazard using the seismoacoustic method. The aim of the study was to determine the attenuation coefficient using the seismoacoustic method based on the emission field model (Kurzeja, Kornowski 2009). The values of AC measured in two operation stages were compared, i.e. under similar stress conditions but with significantly different front length. Besides, the attenuation coefficient values were compared with the results of the causal experiment, showing their coincidence.

Słowa kluczowe:

współczynnik tłumienia, fale sejsmiczne, zagrożenie sejsmiczne

Keywords:

attenuation coefficient, seismic waves, seismic hazard

1. Wprowadzenie

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym pokłady węgla kamiennego coraz częściej eksploatuje się ścianami o długościach frontu znacznie przekraczającymi 200 m. Stosowana w polskich kopalniach metoda o nazwie „Sposób sejsmoakustycznej obserwacji ścian długich” (Barański i in. 2012) wymaga znajomości wartości współczynnika tłumienia w pokładzie węgla na wybiegu ściany o długości przekraczającej 200 m, w celu określenia takich wielkości jak: współczynnik wzmocnienia toru transmisji oraz skrajne odległości czujników od skrzyżowania ściana – chodnik.

W sejsmologii znaną miarą pochłaniania jest bezwymiarowa wielkość Q^{-1} zwana współczynnikiem pochłaniania lub jej odwrotność, Q , zwana współczynnikiem dobroci. Wielkość ta definiowana jest jako:

$$Q^{-1} = \frac{\alpha V}{\pi f} \quad (1)$$

gdzie współczynnik (niesprężystego) tłumienia α , określa względny logarytmiczny spadek amplitudy drgań na jednostkę odległości, natomiast V i f to odpowiednio, prędkość i częstotliwość fali. W zastosowaniach przyjmuje się zwykle efektywną ogólną postać związku amplitudy A fal ze zmianą odległości x_2/x_1 od źródła, w formie równania (Kornowski, 2002; Toksóz i in. 1988):

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

$$A(x_2) = A(x_1)(x_1/x_2)^n e^{-\alpha(x_2-x_1)} \quad (2)$$

Wartość α jest lokalną cechą pokładu węgla możliwą do wyznaczenia jako wartość przybliżona w pewnym, badanym obszarze. Jest również wskaźnikiem stopnia spękania górotworu (a pośrednio naprężenia) (Szreder i in. 2008). W przypadku długiej ściany na całym wybiegu, pomiar tłumienia wykonywany jest jednorazowo np. pomiarami sejsmicznymi, bezpośrednio przed rozpoczęciem sejsmoakustycznej, stacjonarnej obserwacji tej ściany. W sytuacji, gdy geometria ściany zmienia się wraz z jej postępem, tzn. gdy ściana osiąga długość powyżej 200 m, dopiero w pewnej odległości wybiegu istnieje możliwość wyznaczenia tłumienia ze stacjonarnych pomiarów sejsmoakustycznych. Umożliwia to metoda wyznaczenia tłumienia w oparciu o pole emisji szczegółowo opisana w literaturze (Kornowski 2002, Kornowski, Kurzeja 2008, Kurzeja, Kornowski 2009). Metoda obejmuje zestawienie równań wiążących energię umowną rejestrowaną w jednostce czasu na wyjściu komputerowego systemu obserwacyjnego, z energią emitowaną z frontu ściany. Polem emisji nazywamy model, w którym powierzchnia (otoczenie) frontu ścianowego jest źródłem jednostajnie emitowanego, w pewnym przedziale czasu, strumienia energii docierającego do geofonów. Model pola emisji i związany z nim estymator energii, z pola tego emitowanej, pozwala zaniechać stosowania niefizycznej energii umownej, zastępując ją energią wyrażoną w dżulach, obliczoną na podstawie rutynowych obserwacji AE z zastosowaniem standardowej aparatury (np. ARES), bez lokalizowania źródeł.

W artykule omówiono sposób prowadzenia obserwacji sejsmoakustycznych na przykładzie eksploatacji wyrobiska ścianowego o nietypowej geometrii, w jednej z kopalń w GZW. Do wyznaczenia tłumienia wykorzystano stacjonarne pomiary sejsmoakustyczne prowadzone aparaturą ARES. W momencie gdy ściana osiągnęła długość powyżej 200 m, (utrzymywaną aż do końca wybiegu), wykonano pomiar tłumienia *in situ* przenośną aparaturą sejsmoakustyczną. W końcowej fazie eksploatacji, przy długości ściany ok. 300 m powtórnie wyznaczono tłumienie, na podstawie rejestracji aparaturą stacjonarną. Celem dokonanej analizy było określenie wartości współczynnika tłumienia dla przeprowadzenia

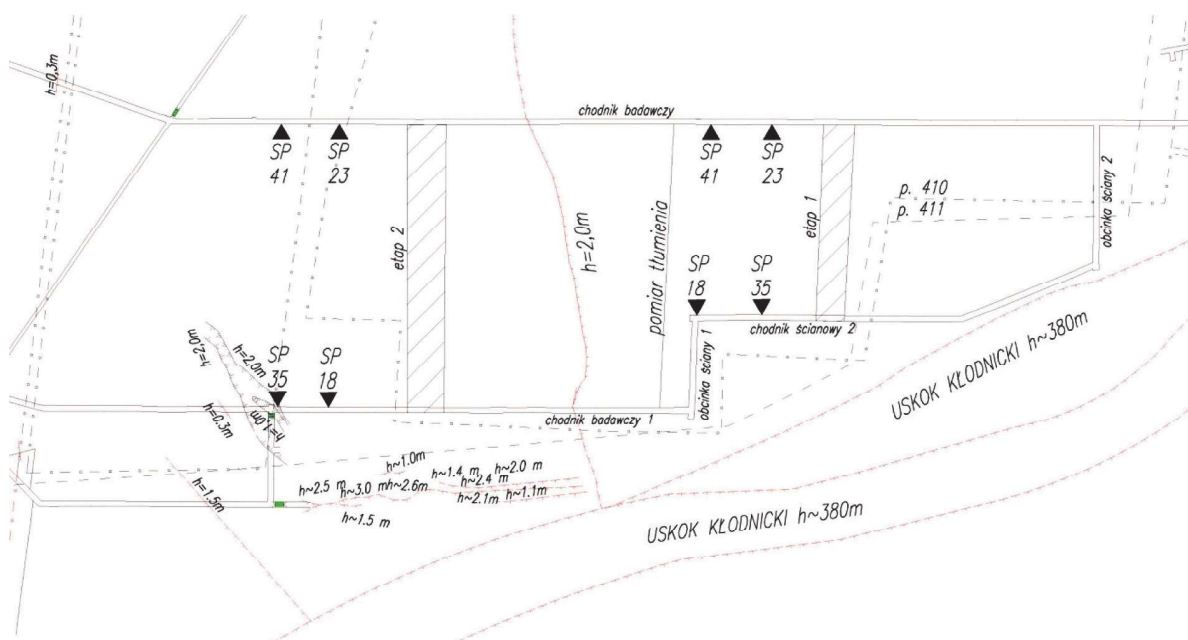
prawidłowej, tj. zgodnie z Instrukcją metody sejsmoakustycznej, obserwacji ściany długiej. Badania przeprowadzono dwiema metodami, tj. z wykorzystaniem sejsmoakustycznej aparatury stacjonarnej oraz przenośnej. Dokonano również analizy wyników współczynnika tłumienia tą samą metodą przy skrajnych długościach frontu ścianowego.

2. Poligon pomiarowy

Poligonem doświadczalnym była ściana wydobywcza w pokładzie 414/1, w bliskim sąsiedztwie uskoku kłodnickiego, w jednej z kopalń GZW (rys. 1). W rejonie ściany pokład węgla zalegał na średniej głębokości od ok. 740 m, a jego miąższość wynosiła od 0,6 m (wymycie pokładu) w części południowo-zachodniej do około 3,95 m w części zachodniej. Eksploatacja prowadzona była na całą grubość pokładu, częściowo pod wybranymi pokładami 410 i 411 zalegającymi w odległości pionowej średnio 129 m i 120 m. Według otworu badawczego, w stropie pokładu 414/1 zalega kolejno: 17,7 m piaskowca, 3,2 m łupka ilastego, 1,6 m piaskowca, 2,8 m łupka ilastego, 1,4 m węgla pokładu 413/2, 3,9 m łupka ilastego, 0,3 m węgla, 0,9 m łupka ilastego, 3,9 m piaskowca, 6,75 m łupka ilastego, 0,35 m łupka węglowego, 0,65 m węgla pokładu 413/1, 6,25 m piaskowca i 12,4 m łupka ilastego. Natomiast w spągu pokładu 414/1 zalega: 1,2 m łupka ilastego, 1,9 m węgla pokładu 414/2, 2,2 m łupka ilastego, 6,0 m piaskowca z przewarstwieniami łupka ilastego i łupka piaszczystego, 0,9 m łupka ilastego, 19,0 m piaskowca, 3,4 m węgla pokładu 415/1, 7,0 m łupka ilastego, 7,0 m piaskowca, 2,8 m węgla pokładu 416, 0,8 m łupka ilastego i 20,5 m piaskowca.

Eksploatacja ścianą prowadzona była ze wschodu na zachód po rozciągłości pokładu węgla systemem podłużnym. Początkowo front ścianowy ulegał stopniowemu wydłużeniu od ok. 140 m do ok. 190 m. Po osiągnięciu ok. 400 m wybiegu, gdy długość frontu została poszerzona do ok. 300 m, do interpretacji zagrożenia metodą sejsmoakustyczną zastosowano tzw. obserwację ścian długich (Barański i in. 2012).

W ścianie przez cały okres jej eksploatacji, która trwała około roku, prowadzono w sposób ciągły stacjonarne obserwacje emisji sejsmoakustycznej, czterema czujnikami aparatury



Rys. 1. Szkic sytuacyjny poligonu badawczego (SP41, SP23, SP18, SP35 - geofony)
Fig. 1. Situational sketch of the testing site (SP41, SP23, SP18, SP35 - geophones)

ARES, (po dwa w ociosach chodników przyścianowych). Czujniki te wraz z postępem eksploatacji były systematycznie przebudowywane. Dzięki temu zgromadzony został obszerny zbiór godzinowych danych dotyczących parametrów emisji akustycznej (AE) oraz odległości czujników od skrzyżowania zmieniających się wraz z postępem ściany.

3. Metodyka

3.1. Eksperyment pomiarowy z zastosowaniem aparatury przenośnej

Po osiągnięciu przez front ścianowy długości ok. 300 m, przeprowadzono eksperyment pomiarowy przedstawiony w dokumentacji (Mutke i in. 2018) mający na celu oszacowanie wartości współczynnika tłumienia fali sejsmicznej na wybiegu ściany. Pomiary *in situ* polegały na wzbudzeniu fali sejsmicznej przez odpalenie ładunku 250 g materiału wybuchowego w przodku ścianowym i jej rejestracji seismoakustycznymi 8 sondami pomiarowymi (CSSP) w chodniku badawczym (przyścianowym). Do wyznaczenia współczynnika tłumienia wykorzystano rejestracje sejsmiczne, w równo oddalonych (co 15 m) dziesięciu otworach strzałowych. Pierwsza sonda umieszczona była w odległości 60 m od skrzyżowania ściany z chodnikiem badawczym, a kolejne sondy co 10 m dalej.

Podstawową relacją zastosowaną do wyznaczenia wartości współczynnika tłumienia było równanie wyrażające energię impulsu w typowych warunkach zagrożenia tąpnięciami z piaskowcem w stropie, dla źródeł w pokładzie przy założeniu, że źródła zawarte są pomiędzy powierzchniami odbijającymi, a powierzchnie falowe mają kształt walca:

$$W = 2\pi r h V \rho e^{2\alpha(r-r_0)} \int_{t_p}^{t_k} \dot{U}^2(t) dt \quad (3)$$

gdzie:

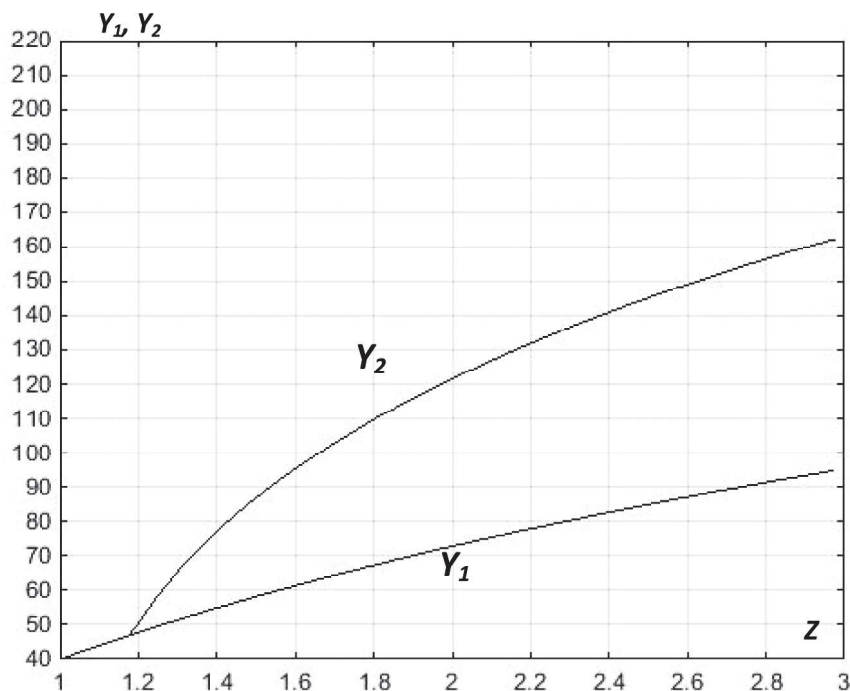
- r – odległość ognisko-czujnik,
- h – grubość pokładu,

- V – prędkość fali w ośrodku,
- ρ – gęstość ośrodka, w którym zainstalowany jest czujnik,
- $U(t)$ – prędkość drgań (sejsmogram prędkości),
- r_0 – promień źródła,
- a – współczynnik tłumienia drgań sejsmicznych.

Wyznaczając współczynnik tłumienia (amplitudy) przed frontem ściany jako medianę dla wyników rejestracji z każdego strzelania oddzielnie, otrzymano $a = 0,012 \text{ m}^{-1}$. Otrzymany wynik wykorzystano dla skonstruowania odpowiedniego nomogramu dla ściany długiej oraz w badaniach porównawczych z metodą stacjonarną.

3.2. Sposób obserwacji ściany długiej

Istota sposobu obserwacji seismoakustycznej ściany długiej, o długości ponad 200 m, polega na tym, by dla takiej ściany tak dobrać wartość współczynnika wzmocnienia (Z) oraz odległości minimalnej (Y_1) i maksymalnej (Y_2) geofonu od skrzyżowania, by w punkcie detekcji amplitudy sygnałów ze środka ściany były takie jak w przypadku ściany odniesienia (o długości frontu 200 m). Następnie, przez cały czas eksploatacji ściany długiej, wzmocnienie ma być niezmienne, a odległość czujnika należy utrzymywać w granicach (Y_1, Y_2), w taki sposób, że czujnik umieszcza się w odległości (Y_2), i gdy ściana zbliży się do niego na odległość (Y_1), ponownie przenosi się go na odległość (Y_2). Poprawna obserwacja ściany długiej wymaga więc właściwego doboru trzech wartości (Z, Y_1, Y_2). Dobór tych wartości dotyczy zawsze konkretnej ściany i jest zależny od średniej wartości współczynnika tłumienia. Wprawdzie wartości (Z, Y_1, Y_2) można by dobrać eksperymentalnie, metodą prób i błędów, lecz byłoby to bardzo uciążliwe. Dlatego też problem sformułowano jako zagadnienie matematyczne, a wynik – w postaci nomogramu ważnego dla danej wartości współczynnika tłumienia – umożliwia natychmiastowe stosowanie metody w praktyce. Na rysunku 2 przedstawiono nomogram przygotowany dla analizowanej ściany, gdzie średnia wartość współczynnika tłumienia wyznaczona z eksperymentu pomiarowego wynosiła $0,012 \text{ m}^{-1}$.



Rys. 2. Nomogram skonstruowany dla badanej ściany w pokładzie węgla 414/1 (Mutke i in. 2018)
Fig. 2. The nomogram made for longwall conditions in the coal seam 414/1 (Mutke i in. 2018)

Ściana obserwowana była za pomocą aparatury sejsmoakustycznej typu ARES-5 oraz ARES-5/E, geofonami zabudowanymi w chodniku podścianowym (badawczy 1 i ścianowy 2) oraz w chodniku badawczym (rys. 1). W chodniku badawczym zainstalowane były geofony SP23 i SP41. Wzmocnienia całego toru dla ściany odniesienia (przy nastawie OA równej 5) wynosiły odpowiednio $2,791 \cdot 10^{-4}$ V·s/m dla SP23 oraz $2,447 \cdot 10^{-4}$ V·s/m dla SP41. Chodnik podścianowy obserwowany był geofonami SP18 i SP35. Wzmocnienia całego toru dla tych czujników wynosiły odpowiednio $3,009 \cdot 10^{-4}$ V·s/m (po wymianie kompletu $2,847 \cdot 10^{-4}$ V·s/m) dla SP18 oraz $2,425 \cdot 10^{-4}$ V·s/m dla SP35.

Wartości Y_1 (min. odległość od skrzyżowania) i Y_2 (max. odległości od skrzyżowania) dla zadanej wartości Z określającej wzrost wzmocnienia względem wzmocnienia stosowanego dla ściany odniesienia wyznaczono z nomogramu. Parametry czujników wykorzystanych dla obserwacji sejsmoakustycznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry geofonów zastosowanych w obserwacjach sejsmoakustycznych metodą ścian długich

Table 1. The parameters of geophones installed in longwall face applied to the AE observations using the lengthy longwall method

Nr czujnika	Wyrobisko	Wzmocnienie toru [V·s/m]	Z	Nastawa OA	Y1 [m]	Y2 [m]	
23	chodnik badawczy	6,589	2,361	8	82	138	
41	chodnik badawczy	5,781	2,362	8	82	138	
18	przed wymianą kompletu	chodnik badawczy 1, ścianowy 2	7,075	2,351	8	82	138
	po wymianie kompletu	chodnik badawczy 1	6,734	2,365	8	82	138
35	chodnik badawczy 1, ścianowy 2	5,735	2,365	8	82	138	

3.3. Metoda z zastosowaniem stacjonarnej aparatury sejsmoakustycznej

W celu wyznaczenia tłumienia na wybiegu wyrobiska ścianowego przy pomocy stacjonarnej aparatury sejsmoakustycznej, przyjęto model emisji przedstawiony w publikacji Kurzeji i Kornowskiego (2009). W zastosowanym modelu, w przypadku obserwacji AE w wyrobisku ścianowym za pomocą liczby $N > 1$ geofonów, zależność energii umownej EU od energii fizycznej E AE emitowanej w kolejnej jednostce czasu wyrażona jest przez układ równań o postaci

$$EU_i = E \cdot C_2 \frac{d_i \cdot I_0(\gamma, L, d_i)}{L \cdot h} \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

gdzie:

- C_2 – parametr zależny od zastosowanej do obserwacji aparatury sejsmoakustycznej oraz właściwości fizycznych ośrodka, takich jak gęstość skał oraz prędkość fali sejsmicznej,
- d – odległość czujnika od skrzyżowania ściany z chodnikiem przyścianowym,

- L – długość ściany,
- h – wysokość ściany,
- γ – współczynnik absorpcji energii fal ($\gamma = 2\alpha$, [m⁻¹], α – współczynnik tłumienia amplitudy fal)
- I_0 – funkcja określona równaniem (5), którą należy interpretować jako uogólnioną transmitancję drogi przebytej przez falę od punktu źródłowego do geofonu włącznie z charakterystyką kierunkową geofonu,

$$I_0(\gamma, L, d_i) = \int_0^L (x^2 + d_i^2)^{-0,5} \cdot e^{-\gamma(x^2 + d_i^2)^{0,5}} \cdot \left(0,111 + \frac{|x|}{(x^2 + d_i^2)^{0,5}}\right)^2 dx \quad (5)$$

Rozwiązanie układu równań (4) ze względu na zmienne (E, γ) polega na znalezieniu takiej pary wartości, dla której suma błędów kwadratowych osiąga minimum. Błędem nazwano w tym przypadku różnicę między obserwowaną a estymowaną wartością $EU(i)$, zatem między lewą i prawą stroną równania (4). Inaczej mówiąc, należy znaleźć wartości (E, γ) optymalizujące przyjętą miarę jakości

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \left(E \cdot C_2 \frac{d_i \cdot I_0(\gamma, L, d_i)}{L \cdot h} - EU_i \right)^2 \quad (6)$$

$i = 1, \dots, N$

Wartość sumy błędów kwadratowych jest zawsze nieujemna i osiąga wartość zero tylko wtedy, gdy wartości estymowane są dokładnie zgodne z wartościami obserwowanymi. W przypadku gdy suma błędów kwadratowych jest różna od zera, jej wartość jest miarą jakości estymacji (E, γ).

Metoda estymacji wartości współczynnika tłumienia γ została zaimplementowana w postaci programu komputerowego. Składa się on z dwóch etapów mających za zadanie:

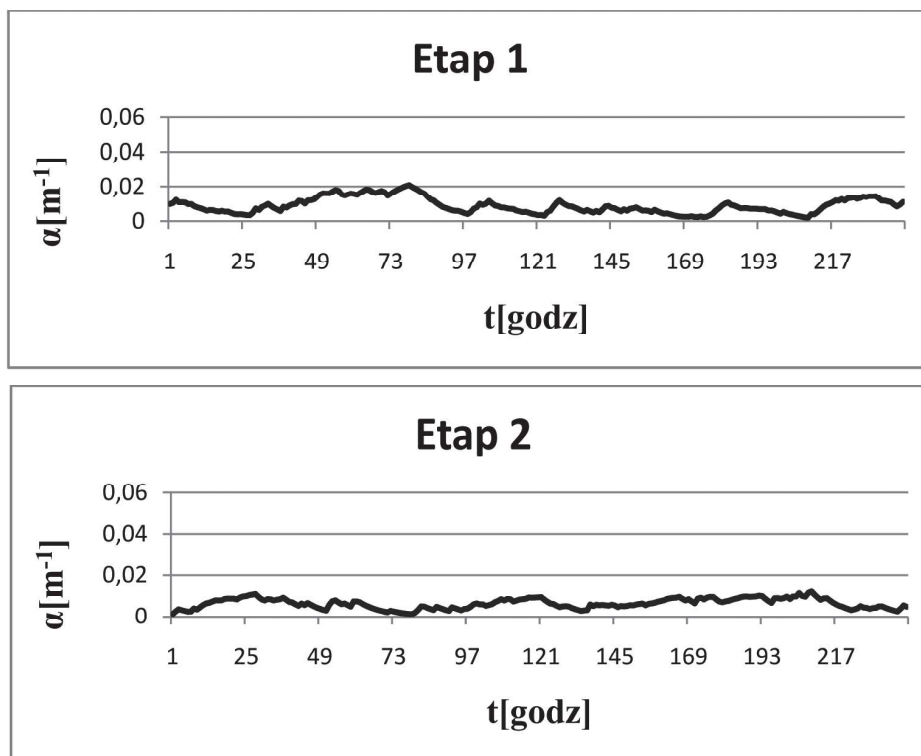
1. obliczenie zależnej od parametrów γ, L, d całki (równanie 5) posługując się standardową metodą Simpsona,
 2. minimalizację funkcji celu (równanie 5).
- Danymi wejściowymi do programu są:
- wartości EU_i godzinowej energii umownej, odczytane z komputerowego wyjścia systemu ARES-5, z co najmniej dwóch kanałów obserwujących daną ścianę,
 - aktualne odległości d i-tych geofonów od skrzyżowania (m),
 - długość L i wysokość h ściany (m),
 - parametr C_2 , który dla aparatury ARES-5 i dla pokładu węgla, gdzie gęstość $\rho = 1300$ kg/m³ i prędkość fali $V = 1800$ m/s ma wartość $C_2 = 187,3131$.

Badania tłumienia przedstawioną metodą, przy pomocy stacjonarnej aparatury ARES, przeprowadzono dwukrotnie. Wiązano je zawsze z jednakową geometrią układu czujników dla danego postępu ściany, co oznacza, że w analizowanym przedziale czasu czujniki nie ulegały przebudowie. Etapy (1 i 2) zaznaczone na rysunku 1, na tle szkicu przedmiotowej ściany, odpowiadały skrajnym położeniom frontu ścianowego w analizowanych przedziałach czasu. W związku z tym:

- 1 – etap wyznaczono, gdy ściana miała długość ok. 190 m i obejmował on 10 kolejnych dni ciągłej obserwacji energii emisji akustycznej,
- 2 – etap obejmował również 10 kolejnych dni obserwacji z tą różnicą, że ściana znajdowała się w końcowej części wybiegu, a jej długość wynosiła około 300 m.

4. Wyniki i ich analiza

Wartości średnie współczynnika tłumienia dla dwóch badanych okresów eksploatacji, estymowano autorskim programem, po dyskwalifikacji wartości równych zero. Najprawdopodobniej wartości te były związane z nieuniknio-



Rys. 3. Wyniki estymacji współczynnika tłumienia dla dwóch badanych okresów obserwacji: etap 1 i etap 2

Fig. 3. Results of estimation of the attenuation coefficient in stage 1 and stage 2

nymi błędami estymacji wartości energii umownej AE, czy też oceną odległości czujników od frontu ściany.

Wyniki estymacji w postaci graficznej, efektywnego współczynnika tłumienia α w pokładzie węgla przed frontem ściany przedstawiono na rysunku 3. W celu uzyskania zmniejszenia rozrzutu wyników, który jest nieunikniony w przypadku pomiarów zakłóconych pracą ludzi i urządzeń, zastosowano ich filtrację w kolejnych godzinach za pomocą ośmiogodzinnej ruchomej średniej (równanie 7) związanej z ośmiogodzinnym cyklem pracy:

$$\alpha_{filtr}(t) = 1/8\alpha_{est}(t) + 7/8\alpha_{filtr}(t - 1) \quad (7)$$

W tabeli 2 przedstawiono statystykę opisową, w postaci średniej arytmetycznej oraz mediany wyników dla etapów 1 i 2. Zawarto również informację o wariancji jako klasycznej mierze zmienności oraz podano liczebności badanych zbiorów. Ze względu na to, że rozkład parametru α odbiegał od rozkładu normalnego oraz nie było równości wariancji w porównywanych etapach, w dalszych badaniach przyjęto nieparametryczną metodę badawczą przy pomocy testu U-Manna-Whitney'a. Wszystkie obliczenia wykonano w ramach pakietu STATISTICA, stosując jako graniczny poziom istotności $p = 0,05$.

Przy pomocy testu nieparametrycznego U-Manna-Whitneya przeprowadzono wnioskowanie, przyjmując jako hipotezę zerową założenie, że dwie próby pobrano z tej samej populacji, czyli o podobnych warunkach naprężeniowych, nie różnicują przeciętnej wartości tłumienia przed frontem ściany. W tym celu dokonano porównania estymowanych wartości α w etapie 1 z etapem 2. Wyniki testu przedstawiono w poniższym zestawieniu (tabela 3).

Zgodnie z wynikiem przeprowadzonego testu ($p=0,49862$), nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Czyli potwierdzona została istotność wnioskowania testowego, że podobne warunki naprężeniowe dla dwóch etapów badanej ściany nie różnicują przeciętnej (efektywnej) wartości współczynnika tłumienia.

Przedstawione wyniki skłaniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Przeprowadzone w trakcie eksploatacji ścianą badanie efektywnej (średniej) wartości współczynnika tłumienia na jej wybiegu przenośną aparaturą sejsmoakustyczną dało wynik $\alpha = 0,012 \text{ m}^{-1}$ zbliżony do wartości uzyskanych w 1 i 2 etapie ($\alpha = 0,010 \text{ m}^{-1}$) obserwacji przy pomocy aparatury stacjonarnej. Porównywalne wyniki tłumienia potwierdziły nie tylko skuteczność zastosowanej metody

Tabela 2. Zestawienie estymowanych wartości efektywnego współczynnika tłumienia α w dwóch etapach przed frontem ściany

Table 2. Summary statistics of effective attenuation coefficient values α in front of the longwall

Nr etapu	Średnie α [1/m]	Mediana α [1/m]	Wariancja	Ilość analizowanych próbek/ilość próbek użytecznych
1	0,011	0,010	6,18E-5	240 / 191
2	0,010	0,010	2,54E-5	240 / 156

Tabela 3. Zestawienie wyników testu U-Manna-Whitneya w pakiecie STATISTICA dla porównywanych etapów 1 i 2

Table 3. Summary of Mann-Whitney U test results in the STATISTICA package for compared 1 and 2 stages.

Test U Manna-Whitneya (z poprawką na ciągłość) (Testy statystyczne 2 etapów)									
Względem zmiennej: Zmn4									
Zaznaczone wyniki są istotne z $p < .05000$									
Zmienna	Sum.rang A	Sum.rang B	U	Z	p	Z popraw.	p	N ważn. A	N ważn. B
alfa etap 1 i 2	33863.50	26514.50	14268.50	0.676663	0.498620	0.676798	0.498635	191	156

- z przyjętym modelem emisji, ale również podobieństwo warunków naprężeniowych w badanych obszarach ściany.
- Na podstawie wykonanych pomiarów współczynnika tłumienia określono względne zagrożenie, które, jak się okazało, było adekwatne do zagrożenia tąpnięciami wyznaczonego przez kopalnię metodą kompleksową (Barański i in. 2012). Według Kopalni wskazywało ono na brak zagrożenia („stan a”), czasami tylko osiągając stan słabego zagrożenia („stan b”).
 - Zastosowany sposób sejsmoakustycznej obserwacji ściany długiej spełnia się jako sposób poprawnej obserwacji sejsmoakustycznej.
 - Przy prawidłowo prowadzonych obserwacjach stacjonarną metodą sejsmoakustyczną zaproponowany sposób wyznaczenia tłumienia zgodnie z przyjętym modelem emisji wydaje się skutecznym sposobem na zastąpienie nie zawsze możliwych do wykonania pomiarów *in situ*.

5. Podsumowanie

Zaprojektowana w jednej z kopalń GZW ściana wydobywcza, ze względu na nietypową geometrię, w pewnej części wybiegu stała się ścianą długą o długości frontu ok. 300 m. Z tego powodu do oceny zagrożenia w tej części wybiegu zastosowano „Sposób sejsmoakustycznej obserwacji ściany długiej” wymagający jednak wcześniejszego określenia wartości tłumienia przed frontem ściany.

Wykonano badania *in situ* przy pomocy przenośnej aparatury sejsmoakustycznej, otrzymując średnią wartość tłumienia $\alpha = 0,012 \text{ m}^{-1}$, a na jego podstawie wykreślono nomogram do wyznaczenia odpowiednich parametrów niezbędnych do prowadzenia obserwacji stacjonarnych.

W związku z tym, że na całym wybiegu do oceny zagrożenia metodą sejsmoakustyczną prowadzono w ścianie stacjonarne obserwacje sejsmoakustyczne aparaturą ARES z czterema czujnikami, dostarczyły one obszernego zbioru danych do analizy tłumienia.

Do oceny tłumienia przed frontem ściany wydobywczej zastosowano metodę sejsmoakustyczną na podstawie przyjętego modelu emisji (Kurzeja, Kornowski 2009).

Badania porównawcze przeprowadzono dla wybranych dwóch etapów eksploatacji, związanych ze stałą geometrią czujników, lecz różniących się długością frontu ścianowego (190 m i 300 m) oraz pomiarami *in situ*.

Otrzymano jednakowe wyniki tłumienia $\alpha = 0,010 \text{ m}^{-1}$, zarówno dla etapu 1, jak i 2 podczas stacjonarnej obserwacji ściany. Wyniki te okazały się być porównywalne z wynikiem pomiarów *in situ* gdzie $\alpha = 0,012 \text{ m}^{-1}$. Potwierdziło to wnioskowanie, że metody te można stosować zamiennie w zależności od geometrii wyrobiska. Gdy mamy do czynienia ze ścianą o długości powyżej 200 m na całym swoim wybiegu, już przed rozpoczęciem eksploatacji należy wyznaczyć współczynnik tłumienia. Natomiast, gdy ściana tak jak w analizowanym przypadku, dopiero w pewnym momencie osiąga długość

powyżej 200 m, to prowadzone pomiary aparaturą stacjonarną, przy zastosowaniu przyjętego modelu emisji, dają równorzędną, lecz od strony technologicznej bardziej uławną technikę wyznaczenia wartości współczynnika tłumienia.

Przeprowadzona analiza wnioskowania statystycznego metodą nieparametrycznego testu U-Manna-Whitneya rozkładów parametru tłumienia w dwóch etapach obserwacji, dowiodła, że podobne warunki naprężeniowe nie różnicują przeciętnej wartości tłumienia. Na podstawie wartości tłumienia nie można jednoznacznie określić stanu zagrożenia sejsmicznego, ale traktując związek tłumienia z naprężeniami jako korelacyjny można próbować identyfikować strefy koncentracji naprężeń. Znalazło to również potwierdzenie w stosowanej przez Kopalnię metodzie kompleksowej oceny stanu zagrożenia.

Wyniki pomiarów współczynnika tłumienia w pokładzie węgla, ze względu na znaczącą niejednorodność ośrodka, niezależnie od stosowanej metody, zawsze należy uśrednić, a pomiary cyklicznie powtarzać w zależności od zmian warunków górnictwo-geologicznych.

Podziękowanie dla Polskiej Grupy Górniczej S.A. za umożliwienie publikacji danych górniczych oraz dyskusję wyników.

Literatura

- BARAŃSKI, A., DRZEWIECKI, J., DUBIŃSKI, J., KABIESZ, J., KONOPKO W., KORNOWSKI, J., KURZEJA, J., LURKA, A., MAKÓWKA, J., MUTKE, G. i STEC, K. 2012 - Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego. Seria Instrukcje Nr 22, Katowice.
- KORNOWSKI J. 2002 - Podstawy sejsmoakustycznej oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, GIG, Katowice.
- KORNOWSKI J., KURZEJA J. 2008 - Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, GIG, Katowice.
- KURZEJA J., KORNOWSKI J. 2009 - Estymacja energii sejsmoakustycznej i współczynnika absorpcji w pokładzie przed frontem skrawanej ściany, Prace Naukowe GIG, nr 4, 41-54.
- MUTKE G, LURKA A., STEC K., KURZEJA J., CHODACKI J., WAŚKO A., SIATA R., LOGIEWA H., SWOBODA P. 2018 - Opracowanie zasad obserwacji sejsmoakustycznych tj. określenie współczynnika tłumienia i wyznaczenie nomogramu dla ściany 1 w pokładzie 414/1 w partii H. Dokumentacja pracy BU nr 58324308-123. GIG Katowice (praca niepublikowana).
- SZREDER Z., PILECKI Z., KŁOSIŃSKI J. 2008 - Efektywność rozpoznania oddziaływania krawędzi eksploatacyjnych metodami profilowania tłumienia oraz prędkości fali sejsmicznej, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, t. 24, z. 2/3, 215-226.
- TOKSÖZ M.N., DAINTY A.M., REITER E., WU R.S. 1988 - A Model for Attenuation and Scattering in the Earth Crust. W: Aki i Wu (eds.). Pure Appl. Geophys. Vol. 122 nr 1-2, 81-100
- Statistica 13.3. Tibco Software Inc., <https://support.tibco.com>.

Artykuł wpłynął do redakcji – marzec 2021
Artykuł akceptowano do druku – 15.05.2021