

# Wpływ drgań na stateczność skarp wybranych kopalń odkrywkowych

Michał Kowalski<sup>1</sup>, Stanisław Rybicki<sup>2</sup>, Jerzy Flisiak<sup>1</sup>



M. Kowalski



S. Rybicki



J. Flisiak

**Influence of vibrations on slopes stability of selected open-pit mines.**  
Prz. Geol., 65: 823–831.

*Abstract.* Ground vibrations, as a result of seismic or paraseismic reactions, influence the slopes stability. The source of vibrations in the open-pit mines are mainly explosive materials used for crushing rocks or hard soils. Our results show some examples of paraseismic effects caused by the explosive materials use on slope stability. The methods of stability analysis of open-pit slopes resulted from explosive shocks, are also discussed. The examples of pseudo static and full dynamic method of slopes stability analysis are presented as well. Application of pseudo static method for evaluation of slopes stability gives underrated value of stability factor in comparison of full dynamic method and also of real situations in mines. Impact of vibration on the slopes stability showed not only the direct mechanical effects (additional forces), but also indirect influence that caused fissures and micro cracks of the soils. It caused weakness of the mechanical strength of slope material.

*parapety* of full dynamic method and also of real situations in mines. Impact of vibration on the slopes stability showed not only the direct mechanical effects (additional forces), but also indirect influence that caused fissures and micro cracks of the soils. It caused weakness of the mechanical strength of slope material.

**Keywords:** dynamic methods, stability of slopes, paraseismic effects

Drgania gruntów mogą być skutkiem procesów naturalnych (drżania sejsmiczne) oraz działalności człowieka (drżania parasejsmiczne). Drgania parasejsmiczne są wywołane przez użycie materiałów wybuchowych, transport, pracę maszyn itp. Drgania sejsmiczne, powodowane przez ruchy płyt tektonicznych i wulkanizm, mają większą energię i zasięg od parasejsmicznych oraz inną długość fali, amplitudę i częstotliwość. W górnictwie odkrywkowym drżania parasejsmiczne są wzbudzone przez detonacje materiałów wybuchowych w celu rozluźniania i urabiania twardszych skał i gruntów, a także przez transport kołowy i taśmowy, pracę koparek, zwałowarek, spycharek i innych maszyn. Źródłem drgań parasejsmicznych o stosunkowo dużej energii i zasięgu są przede wszystkim roboty strzelnicze z użyciem materiałów wybuchowych. Pomimo wielu lat prowadzenia badań dotyczących wpływu oddziaływań parasejsmicznych na stateczność skarp, w praktyce w obliczeniach najczęściej jest wykorzystywane podejście bazujące na wprowadzaniu do obliczeń współczynników sejsmicznych (pionowych, poziomych bądź obu jednocześnie). Jak jednak wykazują dotychczasowe doświadczenia, podejście to często prowadzi do przeszacowania wpływu drgań na stateczność skarp. W artykule tym przedstawiono alternatywne podejście do uwzględnienia wpływu drgań na stateczność skarp. Informacje o skutkach wpływu drgań na stateczność skarp mogą być przydatne w tworzeniu prognoz stateczności innych obiektów narażonych na oddziaływanie drgań. Problem ten jest szczególnie ważny w górnictwie odkrywkowym.

## PARASEJSMICZNE EFEKTY UŻYCIA MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH W KOPALNIACH ODKRYWKOWYCH

Dotychczasowe polskie dane o efektach drgań parasejsmicznych wywołanych użyciem materiałów wybuchowych

wych wiązały się głównie z urabianiem twardych skał w kopalniach węgla brunatnego „Turów” i „Bełchatów” oraz w kopalni siarki „Machów”. W kopalniach tych testowano dobór całkowitej masy ładunków wybuchowych ( $Q_c$ ) i ładunków w poszczególnych otworach strzałowych ( $Q_o$ ) oraz rozmieszczenie otworów i technikę strzelania, czyli rodzaje materiałów wybuchowych i zapalników, a także zwłokę czasową w odpalaniu tych materiałów w otworach strzałowych. Jedynie w nieczynnej już odkrywkowej kopalni siarki „Machów”, oprócz eksploatacyjnych strzelań rozluźniających osiarkowane wapienie, wykonywano także specjalne, eksperymentalne strzelania w celu zbadania ich wpływu na stateczność skarp nadkładu odkrywki (Rybicki, Szybiński, 1988).

Parasejsmiczne efekty użycia materiałów wybuchowych są zależne głównie od całkowitej masy ładunków we wszystkich otworach, jak i mas ładunków w każdym pojedynczym otworze oraz wartości zwłoki czasowej w odpalaniu poszczególnych ładunków wybuchowych, wpływającej na jednoczesowe sumowanie się wpływu energii wybuchu. Efekty te są także zależne od odległości miejsca pomiaru od pola strzałowego. Wpływ innych czynników, takich jak sposób rozmieszczenia otworów strzałowych, usytuowanie otworów na zboczach kopalni odkrywkowej, rodzaje gruntów i skał itp., jest zazwyczaj mniejszy. Mierzalnymi lub obliczanymi parametrami drgań gruntów i skał wywołanych energią wybuchu są parametry fal naprężeń rozchodzących się w ośrodku, zwłaszcza amplitudy przyspieszeń i przemieszczeń oraz prędkości rozprzestrzeniania się drgań cząstek gruntu czy skał. Należy zaznaczyć, że opisane w tym artykule parasejsmiczne efekty użycia materiałów wybuchowych w wybranych odkrywkach były osiągnięte z zastosowaniem całkowitych mas ładunków wybuchowych ( $Q_c$ ) w granicach od około 300 do 6000 kg, a ładunków w pojedynczych otworach ( $Q_o$ ) w granicach od około 30 do 300 kg.

<sup>1</sup> Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; kowalski@agh.edu.pl.

<sup>2</sup> Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; srybicki@agh.edu.pl.

## KOPALNIA SIARKI „MACHÓW”

W odkrywkowej kopalni „Machów” prowadzono kompleksowe badania efektów strzelania, które obejmowały zarówno geofizyczne pomiary parasejsmicznych drgań wzbudzanych w wapieniach siarkonośnych tworzących skarpy wyrobiska, jak też precyzyjne pomiary geodezyjne przemieszczeń skarp nadkładowych oraz badania geologiczno-inżynierskie, obejmujące pomiary ciśnień porowych w gruntach, a także laboratoryjne badania wpływu obciążeń dynamicznych na zmiany cech geotechnicznych gruntów (Rybicki, Szybiński, 1988).

Północne skarpy nadkładu złoża siarki w Machowie, o wysokości około 25 m i nachyleniu około 45–60°, zostały wycięte w półzwartych neogeńskich iłach krakowieckich. Wykonanie znacznej liczby pomiarów sejsmometrycznych w różnych odległościach od pól strzałowych umożliwiło empiryczne określenie zależności pomiędzy amplitudami drgań a wielkością ładunku całkowitego MW i odległością od źródła drgań. W obliczeniach przyjęto najczęściej stosowaną postać tej zależności:

$$A = K \cdot \rho^n \quad [1]$$

gdzie:

$A$  – amplituda przemieszczeń lub przyspieszeń,

$\rho = r / \sqrt{Q_c}$  – odległość zredukowana,

$Q_c$  – masa ładunku całkowitego,

$r$  – odległość pola strzałowego,

$K$  – współczynnik intensywności drgań,

$n$  – wykładnik potęgowy.

Empirycznie wyznaczone wartości  $K$  i  $n$ , w odległości pól strzałowych nie większej niżeli 600 m, umożliwiły określenie następujących zależności:

$$A_A = 970 \cdot \rho^{-0,74}$$

$$A_a = 23 \cdot \rho^{-1,03}$$

gdzie:

$A_A$  – amplituda przemieszczeń [ $\mu\text{m}$ ],

$A_a$  – amplituda przyspieszeń [ $\text{m/s}^2$ ],

$\rho$  – odległość zredukowana [ $\text{m}/\sqrt{\text{kg}}$ ].

Dla najczęściej stosowanego, całkowitego ładunku wybuchowego  $Q_c = 3000$  kg saletrolu współczynnik sejsmiczny  $k = a/g$ , stosowany w analizie stateczności zbo-

czy, można było określić w przybliżeniu za pomocą zależności:

$$k = 125 \cdot r^{-1} \quad [2]$$

gdzie:

$a$  – wzbudzone przyspieszenie,

$g$  – przyspieszenie ziemskie.

W trakcie odpalania ładunków wybuchowych na zachodnich zboczach odkrywki w Machowie rejestrowano wysoko- i niskoczęstotliwe drgania gruntów, o częstotliwości od kilku do kilkudziesięciu Hz, oraz wysokie wartości współczynnika sejsmicznego  $k$ , osiągające najczęściej około 1,0 g. Zaobserwowano, że w trakcie tych drgań w iłach krakowieckich odslaniających się w skarpach wyrobiska powstają mikroprzemieszczenia (na odległość ok. 1–4 mm). Obserwowano także drobne obsypywanie się fragmentów gruntu ze skarp. Mimo tego skarpa pozostawała stabilna. Dlatego też uznano, że współczynnik sejsmiczny  $k = 1,0$  g wyznacza wartość graniczną stateczności skarp wyrobiska, a jego przekroczenie staje się niebezpieczne dla stabilności. Charakterystyczne cechy drgań, rejestrowane w skałach zachodniej skarpy odkrywki „Machów”, przedstawiono w tabeli 1.

Natomiast u podstawy północnego zbocza odkrywki w Machowie, o wysokości 30 m i nachyleniu 65°, prowadzono eksperyment z odpalaniem ładunków wybuchowych w iłach krakowieckich, którego celem było sprowokowanie osuwiska na skarpie. Otwory strzałowe umieszczono w odległości: seria pierwsza – 50 m (ładunek  $Q_c = 305$  kg,  $Q_o = 101$  kg), seria druga – 25 m (ładunek  $Q_c = 305$  kg,  $Q_o = 101$  kg), seria trzecia – 15 m ( $Q_c = 310$  kg,  $Q_o = 102$  kg). Po odstrzeleniu największego ładunku w III serii wartość przyspieszenia drgań gruntu w rejonie skarpy przekroczyła 1,5 g dla składowej poziomej (X) i około 6 g dla składowej pionowej (Z) – jednak nie nastąpiło natychmiastowe osunięcie się skarpy, a jedynie zaobserwowano obsypywanie się z niej kawałków gruntu. Na podstawie makroskopowych oględzin ściany stwierdzono mikro- i makrospeknięcia gruntu i ogólne naruszenie jego ciągłości. Skarpa uległa osunięciu w miejscu odstrzału dopiero po upływie około 3 tygodni.

Przyczyną tego, że mimo bardzo dużych amplitud przyspieszeń drgań gruntu i dużej wartości współczynnika sejsmicznego nie doszło do natychmiastowego osunięcia się gruntu, było to, że pod wpływem oddziaływania fali sejsmicznej o krótkiej długości i wysokich częstotliwości drgań gruntu, różne części potencjalnej bryły osuwiskowej zostały poddane działaniu sił bezwładności mających różne znaki (kierunki działania), a zatem i kierunki przemiesz-

**Tab. 1.** Charakterystyczne cechy drgań gruntu w Kopalni Siarki „Machów” (Matuszyk, Szybiński, 1988)

**Table 1.** Characteristic features of ground vibrations in sulphur open-pit mine „Machów” (Matuszyk, Szybiński, 1988)

Grupa drgań <i>Group of vibration</i>	Częstotliwość <i>Frequency</i>	Amplituda przemieszczeń <i>Amplitude of displacement</i>	Amplituda przyspieszeń <i>Amplitude of acceleration</i>	Współczynnik sejsmiczny <i>Seismic coefficient</i>	Długość fali <i>Length of wave</i>	Czas trwania <i>Time of persistence</i>	Liczba cykli <i>Number of cycles</i>
	$F$ [Hz]	$A_A$ [ $\mu\text{m}$ ]	$A_a$ [ $\text{m/s}^2$ ]	$k = a/g$	$\lambda$ [m]	[s]	
Wysoka częstotliwość <i>High frequency</i>	20–80	20–200	1–10	0,1–1	10–40	~0,2	10
Niska częstotliwość <i>Low frequency</i>	2–20	200–1200	0,1–1	0,01–0,1	40–400	~1	5

czeń były przeciwne i wzajemnie znosiły się, nie doprowadzając w efekcie do obsuwu skarpy.

Wyniki eksperymentu polegającego na wywołaniu osuwiska w łożach krakowieckich północnej skarpy wyrobiska w Machowie pozwoliły na stwierdzenie, że niebezpieczne dla skarpy są amplitudy przyspieszeń drgań gruntów  $a \geq 1$  g, przy czym nie sam wstrząs inicjował obsuw skarpy, lecz jego następstwa, w postaci mikrospekta i ogólnego naruszenia ciągłości struktury gruntu, co zwiększa np. infiltrację wód opadowych i gruntowych w głąb masywu skarpy i w efekcie doprowadza po pewnym czasie do uruchomienia osuwiska.

### KOPALNIA WĘGLA BRUNATNEGO „TURÓW”

W nadkładzie złoża węgla brunatnego odkrywkowej kopalni „Turów” występują półzwarne i zwarte ropy neogeońskie. W latach 1995–1996 w kopalni tej przeprowadzono eksperymentalne badania z użyciem materiałów wybuchowych, mające na celu rozluźnianie trudno urabialnych partii zapiaszczonych ropy i zlepieńców ze sferysyderytami (Modrzejewski, Grześkowiak, 1995). W trakcie badań dokonano pomiarów propagacji wzbudzanych drgań gruntów na wybranych kierunkach południowo-zachodniego zbocza odkrywki i zwrócono uwagę na wpływ strzelania na stateczność skarp. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem odległości od źródła wzbudzania fal (czyli pola strzałowego) efekty użycia materiałów wybuchowych były dość szybko tłumione w ilasto-piaszczystych utworach nadkładu złoża. Niestety, parametry drgań nie zostały dostatecznie dokładnie opisane (Modrzejewski, Grześkowiak, 1995) – wybrane wyniki zestawiono w tabeli 2.

### KOPALNIA WĘGLA BRUNATNEGO „BEŁCHATÓW”

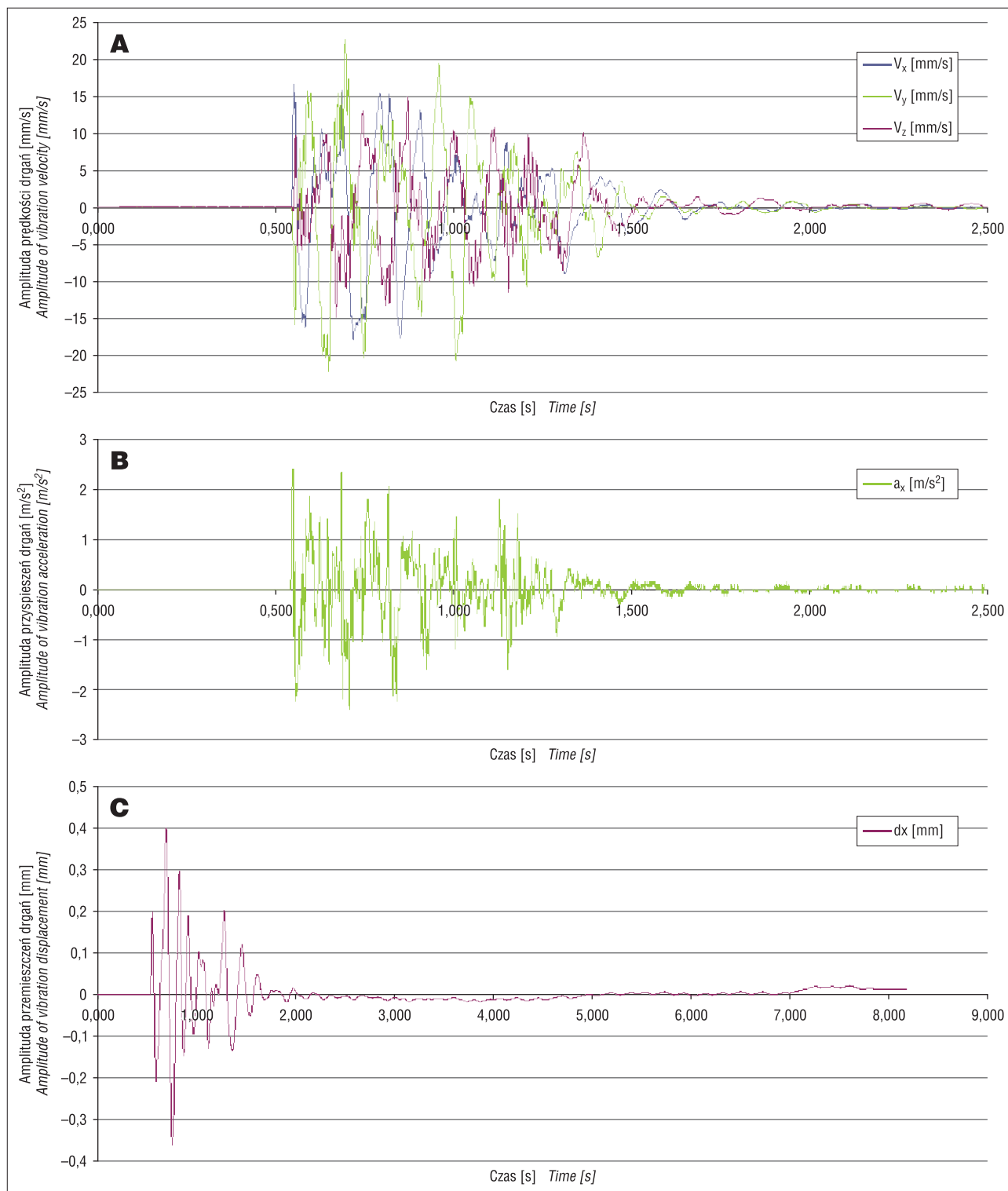
W odkrywkowej kopalni „Bełchatów” w 2010 i 2013 r. prowadzono roboty strzałowe związane z profilowaniem fragmentu południowego zbocza odkrywki w twardych

utworach marglisto-wapiennych kredy górnej (Cała i in., 2010; Cała i in., 2013). Wykonano wówczas geofizyczne pomiary drgań ośrodka gruntowego na skarpach zbocza, celem określenia ich wpływu na górotwór, w tym na stateczność zbocza, oraz na studnie odwodnieniowe kopalni i obiekty budowlane w jej otoczeniu. Do rejestracji drgań użyto nowoczesnej aparatury wielokanałowej, wyposażonej w dwa typy sejsmometrów i umożliwiającej zapis danych oraz ich analizy na komputerze PC. W 2010 r. przeprowadzono pięć serii robót strzałowych na VII i X poziomie nadkładu odkrywki. Ładunki były odpalane z różną zwłoką, w różnej liczbie otworów w seriach (19–65 otworów). Masa całkowitego ładunku materiału wybuchowego ( $Q_c$ ) wynosiła 4268–5726 kg, a masa ładunków w pojedynczych otworach ( $Q_o$ ) 50–301 kg (Cała i in., 2010). Po każdej serii strzelań prowadzono pomiary sejsmometryczne, ilustrowane wykresami amplitud prędkości drgań, przemieszczeń i przyspieszeń, głównie składowej (X), prostopadłej do kierunku rozciągłości zbocza. Stanowiska pomiarowe były oddalone od pól strzałowych o 90–1410 m, a najczęściej 90–560 m w kierunku do zbocza. Wybrane wyniki badań, ilustrujące głównie zmniejszanie się amplitud prędkości przyspieszeń i przemieszczeń cząstek gruntu ze wzrostem odległości pomiaru od pola strzałowego, przedstawiono na rycinach 1 i 2. Wskazują one na duże tłumienie drgań w badanym ośrodku skalnym. Przeprowadzone pomiary rzeczywistych parametrów drgań posłużyły do określenia maksymalnych i średnich wartości współczynników sejsmicznych ( $k = a/g$ ), wykorzystanych w pseudostatycznej analizie stateczności południowego zbocza w rejonie pomiarów. Posłużyły one również do oceny zgodności modeli numerycznych i przeprowadzonych wstępnie dynamicznych analiz stateczności południowego zbocza. Z obserwacji parametrów drgań wynika, że po zastosowaniu całkowitego ładunku materiału wybuchowego ( $Q_c$ ) o masie 4200–5700 kg maksymalna prędkość rozchodzenia się drgań w ośrodku w kierunku do zbocza (X) wahała się w granicach 22–26 mm/s, w odległości pomiarów 90–190 m od pola strzałowego i przy maksymalnym przyspieszeniu około 2–3 m/s<sup>2</sup> (0,2–0,3 g). Powodowały one

**Tab. 2.** Charakterystyczne cechy drgań gruntu wywołanych eksperymentalnymi odstrzałami w kopalni węgla brunatnego „Turów” (Modrzejewski, Grześkowiak, 1995)

**Table 2.** Characteristic features of ground vibrations caused by experimental blowing in “Turów” open-pit mine (Modrzejewski, Grześkowiak, 1995)

Ładunki MW <i>Blowing charges</i>	Odległość pomiaru drgań <i>Distance of vibration measurements</i>	Składowa pozioma prędkości rozchodzenia się drgań <i>Horizontal component of vibrations velocity</i>	Składowa pozioma przyspieszenia drgań <i>Horizontal component of acceleration</i>	Amplituda przemieszczeń poziomych <i>Amplitude of horizontal displacements</i>	Częstotliwość drgań <i>Frequency of vibrations</i>
[kg]	<i>r</i> [m]	$V_{xy}$ [mm/s]	<i>a</i> [m/s <sup>2</sup> ]	<i>A</i> [μm]	<i>n</i> [Hz]
$Q_c = 277,2-291,6$ $Q_o = 9-9,9$ (1995 r.)	70	26,0	0,0259	521	6,00
	140	21,0	–	–	–
	240	12,0	–	–	–
$Q_c = 468-690$ $Q_o = -34,5-59,4$ (1996 r.)	150	29,6	–	–	–
	250	21,5	–	–	–
	500	15,4	–	–	–
	750	0,041	–	–	–
	1300	0,0084	0,0154	521	2,65

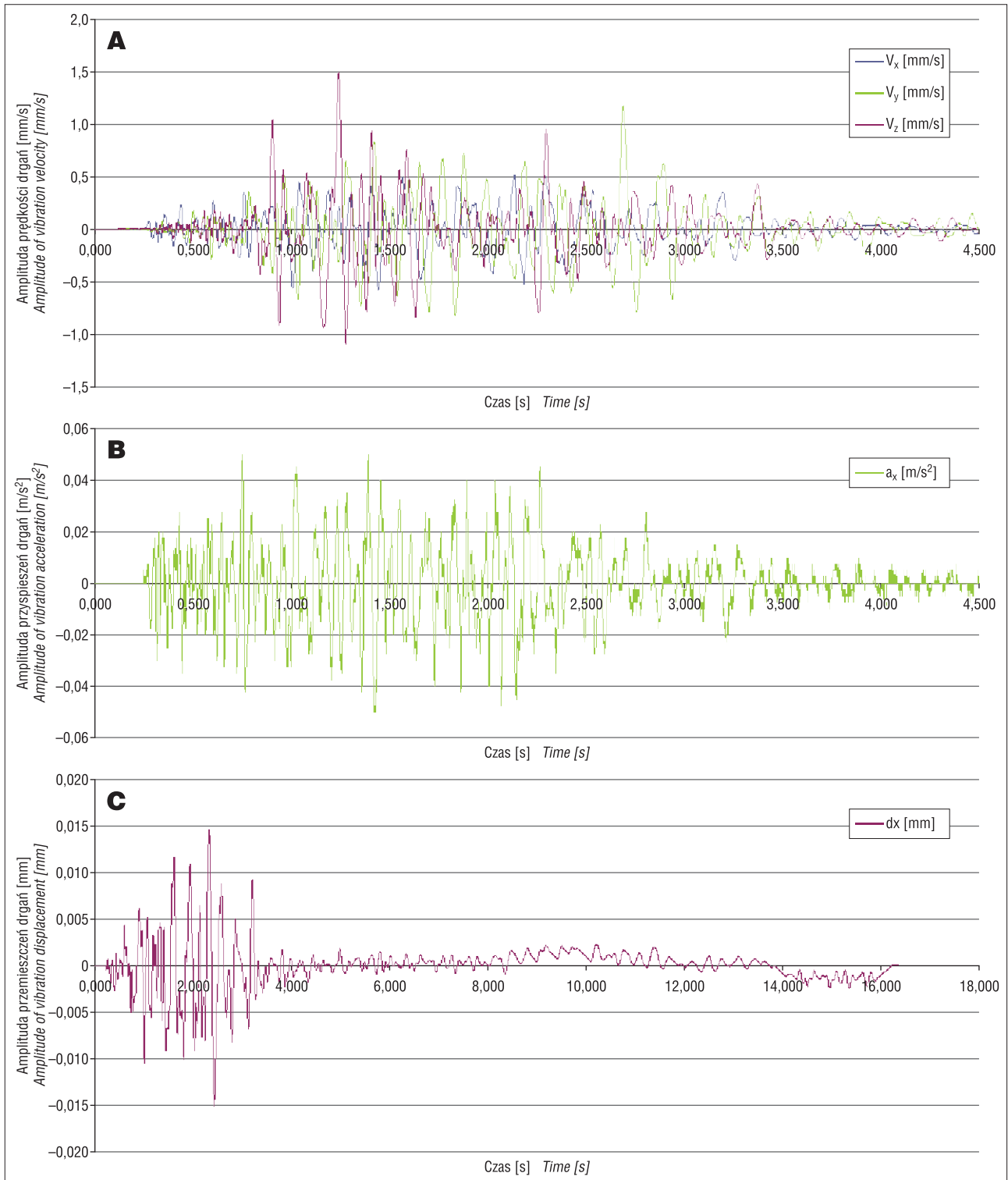


**Ryc. 1.** Amplitudy drgań: **A** – prędkości, **B** – przyspieszeń i **C** – przemieszczeń w odległości 90 m od pola strzałowego po zastosowaniu ładunku całkowitego o masie 4260 kg i ładunku w pojedynczym otworze o masie 76,5 kg (Cała i in., 2010)

**Fig. 1.** Amplitude of vibration: **A** – velocity, **B** – acceleration and **C** – displacement within 90 m distance from blowing field at total blowing charge 4260 kg, and individual blowing charge 76,5 kg (Cała et al., 2010)

niewielkie przemieszczenia, w granicach ok. 0–0,5 mm. Wraz ze wzrostem odległości pomiarów od pola strzałowego wartości te szybko malały, osiągając w odległości ok. 500–600 m maksymalną prędkość 1–3 mm/s, maksymalne przyspieszenie 0,02–0,04  $m/s^2$  (0,002–0,004 g) i nie powodowały przemieszczeń.

W 2013 r. prowadzono roboty strzałowe na poziomach VI i IX południowego zbocza kopalni (Cała i in., 2013). Stosowano ładunki wybuchowe całkowite w zakresie  $Q_c = 2977$ –5422 kg. Pomiary drgań wykonano między innymi w dwóch profilach na zboczu południowym, w pobliżu osuwisk o numerach 24S i 23S. Odległość stanowisk pomiaro-



**Ryc. 2.** Amplitudy drgań: **A** – prędkości, **B** – przyspieszeń i **C** – przemieszczeń w odległości 450 m od pola strzałowego przy ładunku całkowitym 5719 kg i ładunku pojedynczego otworu 301 kg

**Fig. 2.** Amplitude of vibration: **A** – velocity, **B** – acceleration and **C** – displacement within 450 m distance from blowing field at total blowing charge 5719 kg and individual blowing charge 301 kg

wych od pól strzałowych wynosiła 90–887 m. W odległości około 90–150 m od pól strzałowych prędkość zarejestrowanych fal ( $V_x$ ) wahała się w zakresie 5,2–51,0 mm/s (dla ładunków całkowitych), a wraz ze wzrostem odległości do 700–800 m malała do około 0,5–2,0 mm/s. Wyniki eksperymentu były więc podobne do uzyskanych w 2010 r. (Cała i in., 2010). Drgania wzbudzone w kopalni „Bełchatów” nie spowodowały naruszenia stateczności skarp wyrobi-

ska. Można zatem stwierdzić, że drgania gruntów spowodowane przez odpalenie ładunków wybuchowych w nadkładzie złoża kopalni „Bełchatów” oddziałują na stabilność zboczy kopalni w promieniu o długości około 300–400 m od pól strzałowych. Po przekroczeniu tej odległości maksymalne wartości przyspieszeń drgań gruntów nie przekraczają wartości 0,1 g, a zatem ich wpływ na stateczność skarp jest już niewielki.

## METODY ANALIZY STATECZNOŚCI SKARP Z UWZGLĘDNIENIEM ODDZIAŁYWAŃ PARASEJSMICZNYCH

Początkowe analizy wpływu drgań gruntów na stateczność zboczy były następstwem pojawiania się wielu osuwisk ziemnych wywołanych trzęsieniami ziemi (efekty sejsmiczne). Terzaghi (1950) zaproponował, aby w analizach stateczności skarp i zboczy prowadzonych metodami równowagi granicznej uwzględniano tzw. siłę sejsmiczną. Rozchodzące się w ośrodku gruntowym fale sprężyste, wywołane trzęsieniami ziemi, nadają bowiem określonej masie (bryle osuwiskowej) gruntu ( $m$ ) pewne przyspieszenie ( $a$ ), którego efektem jest siła sejsmiczna ( $F$ ):

$$F = m \cdot a = \frac{W \cdot a}{g} = k \cdot W \quad [3]$$

gdzie:

$W$  – ciężar gruntu w bryle osuwiskowej [kG],  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie = 9,81 [m/s<sup>2</sup>],  
 $m$  – masa gruntu w bryle osuwiskowej [kg],  
 $a$  – generowane przyspieszenie [m/s<sup>2</sup>],  
 $k$  – współczynnik sejsmiczny =  $a/g$ .

W obliczeniach wskaźnika stateczności skarp poddawanych wstrząsom sejsmicznym uwzględnia się siłę sejsmiczną jako permanentnie działającą, aktywną siłę statyczną, sumowaną z siłami aktywnymi od ciężaru gruntu i ewentualnymi innymi statycznymi obciążeniami skarpy. Przyjmuje się też, że siła ta jest skierowana poziomo w kierunku nachylenia skarpy lub jest odchylona i działa równoległe do pochylenia powierzchni poślizgu. Taka metoda uwzględniania siły sejsmicznej w analizach stateczności skarp jest nazywana metodą pseudostatyczną.

W większości przypadków z metody tej uzyskuje się zaniżone wartości wskaźników stateczności skarp, wskazujące na przykład na możliwość utraty stateczności, podczas gdy w rzeczywistości skarpy zachowuje stateczność. Powodem tego jest nieuwzględnianie cyklicznej natury wstrząsów, podczas których kierunki działania siły sejsmicznej mogą się wielokrotnie zmieniać w kierunku do i od skarpy, a czas ich działania jest bardzo krótki. Uwzględniając ten fakt Newmark (1965), a następnie Goodman i Seed (1966), Sarma (1979) oraz Chang i Chen (1984) zaproponowali zastąpienie klasycznej metody pseudostatycznej analizą polegającą na zsumowaniu dodatnich przemieszczeń potencjalnej bryły osuwiskowej (w kierunku pochylenia skarpy), osiąganych przy krytycznych wartościach pseudostatycznego wskaźnika stateczności. Metody te są skomplikowane i cechują je także wszystkie niedostatki podejścia pseudostatycznego.

Znane są też inne uproszczone metody uwzględniania drgań gruntów w analizie stateczności zboczy. Na przykład Modrzejewski i Grześkowiak (1995) zastosowali metodę polegającą na zmniejszeniu wartości kąta tarcia wewnętrznych gruntów w zboczu o wartość ( $\psi$ ):

$$\psi = \text{arc tg } a/g$$

gdzie:

$a$  – wzbudzone przyspieszenie drgań,  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie.

W metodzie tej, stosowanej do projektowania pochylenia zbocza lub oceny zmniejszania zapasu jego stateczności pod wpływem drgań, przyjmuje się zmniejszone wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu.

Najbardziej zaawansowane i wiarygodne są dynamiczne metody oceny wpływu drgań na stateczność zboczy, których zastosowanie umożliwił rozwój technik komputerowych i odpowiednich programów analiz numerycznych. Obliczenia takie można przeprowadzić np. w programach wykorzystujących metodę elementów skończonych bądź metodę różnic skończonych.

W celu przeprowadzenia rzeczywistej analizy dynamicznej stateczności zbocza wprowadza się obciążenie dynamiczne w postaci np. impulsu ciśnienia o przebiegu symulującym oddziaływanie strzelania materiałami wybuchowymi w wielu otworach z określonymi opóźnieniami. Przebieg i wyniki dynamicznej analizy stateczności skarp, prowadzonej z wykorzystaniem programu metody różnic skończonych FLAC, opisali Cała i in. (2010, 2013).

Obliczenia w programie FLAC bazują na algorytmie przyrostów czasowych, rozwiązującym pełne równania ruchu, w których jest wykorzystana masa skupiona w węzłach siatki, określona na podstawie rzeczywistej gęstości otaczających elementów (inaczej niż w obliczeniach statycznych, w których jest wykorzystywana fikcyjna masa skupiona).

Przeprowadzenie pełnej analizy dynamicznej w programie FLAC wymaga rozważenia trzech ważnych aspektów:

1. Obciążenie dynamiczne i warunki brzegowe,
2. Tłumienie mechaniczne,
3. Propagacja fal przez model.

### OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE I WARUNKI BRZEGOWE

W analizach dynamicznych, w tym modelujących wpływ robót strzałowych na otoczenie, często stosowaną formułą zadawania obciążenia jest przyłożenie na jedną z granic modelu przyspieszenia o określonym przebiegu. Przebieg ten jest określany na podstawie pomiarów przyspieszeń na powierzchni terenu, po ich przekształceniu i filtracji z użyciem zaawansowanych i skomplikowanych procedur numerycznych (Mejia, Dawson, 2006).

W przypadku dużych modeli, w których źródło wymuszenia kinematycznego jest stosunkowo niewielkie, a zasięg jego wpływu ograniczony, podejściem lepiej odpowiadającym rzeczywistości jest zdefiniowanie lokalnego źródła obciążenia dynamicznego w postaci naprężenia, przyspieszenia lub obciążenia siłą skupioną. Jedną z możliwości zadania takiego obciążenia, wykorzystaną w pracach Cały i in. (2010, 2013), jest przyłożenie na ścianki modelowanego otworu strzałowego równomiernie rozłożonego ciśnienia, które momentalnie wzrasta do wartości maksymalnej. Zadany impuls trwa określony czas (liczony najczęściej w milisekundach), a potem maleje do zera. Cykl ten jest powtarzany w odstępach czasowych odpowiadających odpalaniu ładunków w kolejnych otworach strzałowych w danej serii, tzn. z uwzględnieniem opóźnienia podanego na schematach odpalania.

Ze względu na dynamiczny charakter obciążeń, typowe dla obliczeń numerycznych w zagadnieniach geomechanicznych przemieszczeniowe warunki brzegowe – w postaci

utwierdzenia w jednym lub kilku kierunkach – nie mogą być zastosowane, ponieważ nie zapewniają odpowiedniego rozproszenia energii. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest powiększenie wymiarów modelu numerycznego tak, aby nie doszło do odbicia fali od brzegu modelu przed zakończeniem symulacji. Rozwiązanie takie może jednak prowadzić do nieracjonalnego wzrostu czasu obliczeń. Alternatywnie można zastosować warunki brzegowe w postaci tzw. tłumików, które spowodują rozproszenie energii sprężystej na brzegach modelu numerycznego (np. metoda *quiet boundary* sformułowana przez Kuhlmeyera i Lysmera (1973)). Ich podstawą jest wykorzystanie na granicach modelu tłumików zarówno w kierunku normalnym, jak i stycznym do brzegu. Tłumiki wprowadzają warunki lepkościowe, które są obliczane i przykładane w węzłach granicznych siatki modelu, w każdym kroku obliczeniowym. Zastosowanie tej formuły daje najlepsze rezultaty, gdy źródło obciążenia dynamicznego jest przyłożone do wewnętrznych węzłów modelu numerycznego, a nie w do węzłów znajdujących się na krawędziach bocznych lub dolnej krawędzi modelu. *Quiet boundary* na dolnej granicy modelu symuluje sytuację rzeczywistą, w której masyw skalny jest półpowierzchnią. Dzięki tej właściwości krawędź (brzeg) modelu może absorbować przyrosty naprężeń powodowane obciążeniem dynamicznym, które w innym przypadku mogłyby odbijać się od granic modelu i interferując z pierwotnymi falami zakłócać wyniki obliczeń.

### TLUMIENIE MECHANICZNE

Pierwotnie tłumienie Rayleigha było wykorzystywane w analizach konstrukcji i ciągłych ośrodków sprężystych. Równania są wyrażone w postaci macierzowej, której komponentami są macierz sztywności i macierz masy. W programie FLAC rozproszenie Rayleigha jest opisywane dwoma parametrami:

$\xi_{\min}$  – współczynnik tłumienia – w analizach dynamicznych próbuje się między innymi wytworzyć niezależne od częstotliwości rozproszenie drgań na właściwym poziomie. Współczynnik tłumienia w utworach geologicznych wynosi najczęściej 2–5% (Biggs, 1964).

$f_{\min}$  – częstotliwość centralna [Hz].

Rozproszenie Rayleigha jest zależne od częstotliwości, ale istnieje zakres, w którym nie obserwuje się tej zależności. Pokrywa on około 1/3 spektrum częstotliwości, tzn. jeżeli najwyższa dominująca częstotliwość jest trzykrotnie większa niż najmniejsza dominująca częstotliwość, to ten zakres pokryje większość energii dynamicznej w spektrum. Należy tak dostosować częstotliwość centralną  $f_{\min}$  tłumienia Rayleigha, by jej trzykrotność była zbliżona z zakresem dominujących częstotliwości analizowanego problemu. W wielu przypadkach częstotliwość ta będzie odpowiadała częstotliwości drgań własnych ośrodka. W zagadnieniach geomechanicznych powszechnie stosowane jest tłumienie proporcjonalne zarówno do sztywności, jak i masy.

### OPIS PROPAGACJI FAL PRZEZ MODEL NUMERYCZNY

Zapewnienie właściwego opisu propagacji fal przez model numeryczny determinuje granicę maksymalnej dyskretyzacji (tj. maksymalnego rozmiaru elementu), która może być użyta podczas budowy modelu. Jest to ograniczenie powszechne w analizach numerycznych wykorzystujących dyskretyzację modelu obliczeniowego. Zatem, pomimo że efekt dynamiczny jest rozważany dopiero w drugim etapie obliczeń, musi być uwzględniony już w czasie wstępnego konstruowania modelu, kiedy jest określana przestrzenna dyskretyzacja modelu. Kuhlmeyer i Lysmer (1973) wykazali, że w celu uzyskania właściwej propagacji fal w modelu, wymiar elementu  $\Delta l$  musi być mniejszy niż 1/8–1/10 długości fali wejściowej. Oznacza to, że aby uniknąć numerycznej dyspersji fali, maksymalny wymiar elementu  $\Delta l$  powinien spełniać warunek:

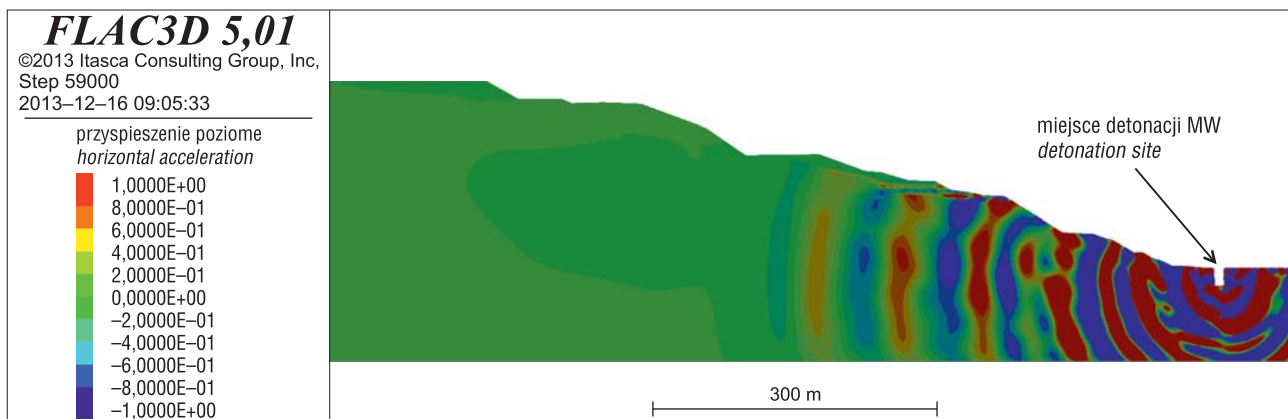
$$\Delta l \leq C / (10^{f_{\max}})$$

gdzie:

$C$  – prędkość propagacji fali w danym ośrodku (fale sejsmiczne typu S i P),

$f_{\max}$  – najwyższa częstotliwość fali.

Jako przykładowy wynik dynamicznej analizy symulacji strzelania na zboczu kopalni „Bełchatów” przedstawiono mapę przyspieszeń poziomych (ryc. 3).



Ryc. 3. Rozkład przyspieszeń poziomych w przekroju  
Fig. 3. Distribution of horizontal acceleration in cross-section

## OCENA STATECZNOŚCI SKARP W WARUNKACH WSTRZĄSÓW PARA SEJSMICZNYCH I KRYTERIA ZAGROŻEŃ SKARP KOPALNIANYCH – WYBRANE PRZYKŁADY

Skutki wpływu wstrząsów parasejsmicznych na stateczność skarp, niezależnie od parametrów drgań gruntów (np. przyspieszenia i prędkości drgań), zależą także od wartości wskaźnika stateczności danej skarpy, która jest związana z geometrią skarpy (wysokość, nachylenie), geotechnicznymi parametrami gruntu, warunkami zawodnienia itp. Ponieważ nie istnieją uniwersalne zasady określania wpływu wstrząsów na warunki stateczności, każde zadanie musi być rozpatrywane indywidualnie, w nawiązaniu do konkretnych warunków geologiczno-inżynierskich danej skarpy albo warunków zespołu skarp (zbozca kopalni).

W praktyce są przyjmowane głównie dwa kryteria szkodliwości wpływu drgań gruntu na skarpy – kryterium związane z przyspieszeniem drgań oraz kryterium związane z prędkością rozchodzenia się drgań. Obydwa są pośrednio związane z naprężeniami powstającymi w gruncie w wyniku przekazania energii ze źródła wzbudzenia do gruntu (np. energii fali uderzeniowej w przypadku użycia materiału wybuchowego). W analizach stateczności skarp częściej stosowane jest kryterium przyspieszeniowe, pozwalające w metodzie pseudostatycznej łatwo wyznaczyć wartość dodatkowej siły sejsmicznej zaburzającej stateczność skarpy.

W byłej odkrywkowej kopalni siarki „Machów”, przy wartościach wskaźnika stateczności skarp roboczych FS ~1,1–1,2, za szkodliwe dla ich stateczności uznawano wartości współczynnika sejsmicznego  $k = a/g \geq 1,0$ , mimo iż z obliczeń metodą pseudostatyczną wskaźnik stateczności przy takim współczynniku był wyraźnie mniejszy od jedności. Powodem przyjęcia takiej granicznej wartości współczynnika sejsmicznego był wynik eksperymentu, który polegał na próbie wywołania osuwiska na skutek użycia materiałów wybuchowych (Rybicki, Szybiński, 1988).

Natomiast w odkrywkowej kopalni węgla brunatnego „Turów” za kryterium szkodliwości oddziaływań parasejsmicznych na skarpy przyjęto prędkość rozchodzenia się drgań gruntów (Modrzejewski, Grześkowiak, 1995). Wzorując się na wielu normatywach dotyczących dopuszczalnych prędkości rozchodzenia się drgań w obiektach różnych klas (w tym w skarpach ziemnych), przyjęto dopuszczalne prędkości drgań gruntów w skarpach stałych KWB „Turów”  $V_x = 3,2$  cm/s i w skarpach roboczych  $V_x = 3,7$  cm/s, jako progowe wartości ich odporności sejsmicznej. Jednocześnie, powołując się na ówczesne normatywy dla budownictwa wodnego, uznano, że dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań nie powinny przekraczać  $a_x = 100$  mm/s<sup>2</sup> ( $k = 0,01g$ ). Było to podejście wysoce konserwatywne.

W 2015 r. wykonano prognozę wpływu planowanych robót strzałowych w kopalni „Turów”, w tzw. utworach trudno urabialnych, na warunki stateczności zachodniego i południowego zbocza wyrobiska (Rybicki i in., 2015). Analizę stateczności zboczy prowadzono zarówno metodą pseudostatyczną, jak i metodą dynamiczną. W warunkach bez uwzględniania oddziaływań parasejsmicznych wskaźniki stateczności tych zboczy wahały się (zależnie od loka-

lizacji przekroju na zboczu) w zakresie FS = 2,55–3,28. Dla wariantowo przyjętych wartości współczynnika sejsmicznego  $k = 0,1$ – $0,3$  g wskaźniki te zmniejszały się (zależnie od przekroju) do wartości FS = 0,99–1,08, przy współczynniku  $k = 0,3$  g.

W obliczeniach dynamicznych dla tych samych przekrojów, przyjmując wielkości ładunków całkowitych materiału wybuchowego ( $Q_c = 4000$ – $6000$  kg) oraz ładunków w poszczególnych otworach ( $Q_o = 100$ – $150$  kg), a także wartości zwłoki czasowej w odpalaniu poszczególnych ładunków, stwierdzono, że dodatkowe obciążenia dynamiczne mają stosunkowo niewielki wpływ na zmniejszenie wartości wskaźników stateczności całych zboczy, a jedynie w najbliższym otoczeniu miejsca wybuchu na skarpie wskaźniki te zmniejszają się około dwukrotnie.

Po uwzględnieniu zmniejszenia spójności gruntu na skutek jego odkształceń pod wpływem drgań, stwierdzono, że zmniejszenie wskaźnika stateczności całego zbocza w jednym z przekrojów wynosiło, zależnie od ładunku w otworach, od około 0,04 do 0,10 w wartościach bezwzględnych, czyli różniło się o około 1,3–3,3% od wartości uzyskanych z obliczeń statycznych. Wynika to, jak już wcześniej wspomniano, ze zróżnicowania kierunków działania sił bezwładności w różnych strefach zbocza (co uwzględniła analiza dynamiczna) i wzajemnego znoszenia się efektów ich oddziaływania na zbocze. W opisanej analizie dynamicznej wykazano więc, że zagrożeniu stateczności mogą podlegać tylko niektóre skarpy, zwłaszcza te w najbliższym otoczeniu miejsca odpalania ładunków wybuchowych, o ile ich wskaźniki stateczności byłyby stosunkowo niskie. Symulacja komputerowa wykazała bowiem, że w odległości do 300 m od strefy wybuchów przyspieszenia poziome drgań cząstek gruntu wynoszą około 1 m/s<sup>2</sup> (0,1g), w odległości do 150 m około 5 m/s<sup>2</sup> (0,5g), a w odległości do 50 m około 25 m/s<sup>2</sup> (2,5g). W odległościach większych od 600 m od strefy wybuchów wzbudzone drgania gruntów wygasają.

Wyniki analiz wpływu drgań parasejsmicznych na południowe zbocze w kopalni „Bełchatów”, uzyskane na podstawie badań przeprowadzonych w 2010 i 2013 r., są podobne do tych, jakie uzyskano w kopalni Turów (Modrzejewski, Grześkowiak, 1995; Cała i in., 2010, 2013). Analiza pseudostatyczna w jednym z przekrojów geologicznych przez południowe zbocze kopalni „Bełchatów” wykazała, że bez uwzględniania drgań parasejsmicznych, wskaźnik stateczności zbocza FS = 1,58. Dla przyjętych obligatoryjnie wartości współczynnika sejsmicznego  $k = 0,1$  g wskaźnik ten wynosił FS = 1,32, a dla  $k = 0,3$  g – FS = 0,76. Analizy dynamiczne ograniczały się tu tylko do takiego wytarowania modelu numerycznego, aby był on zgodny z rejestrowanymi w rzeczywistości przebiegami drgań wskutek odpalania ładunków wybuchowych. Na podstawie rezultatów pomiarów geofizycznych oraz dynamicznych symulacji numerycznych stwierdzono, że wraz ze wzrostem odległości od miejsca strzałów wartości poziomych składowych prędkości rozchodzenia się drgań gruntów oraz wartości przyspieszeń są dość szybko wygaszane. Zasięg przyspieszeń o wartości rzędu 0,2–0,4 g nie przekracza 300 m od pola strzałowego, a w odległości około 400–600 m wartości przyspieszeń są już mniejsze od około 0,05 do 0,1 g. Przy tych maksymalnych wartościach przyspieszenia, prędkość rozchodzenia się drgań wynosi maksymalnie  $V_x = 2,5$  cm/s i taka prędkość została uznana za



szkodliwą dla skarpi kopalni „Bełchatów”. Utratą stateczności są więc zagrożone tylko pojedyncze skarpy, zwłaszcza te o małym wskaźniku stateczności i usytuowane w najbliższym otoczeniu miejsca strzelania.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki geofizycznych pomiarów rozchodzenia się drgań gruntu wskutek użycia materiałów wybuchowych, przeprowadzonych w trzech kopalniach odkrywkowych, a także rezultaty numerycznych analiz stateczności skarpi w tych kopalniach, skonfrontowane z rzeczywistym stanem stateczności, upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Dość powszechne przekonanie o istotnym wpływie wstrząsów parasejsmicznych na stateczność skarpi i zboczy kopalń odkrywkowych wydaje się nie w pełni uprawnione. To przekonanie wynika z tego, iż w wielu dotychczasowych ocenach stateczności skarpi w kopalniach odkrywkowych stosowano tzw. analizę pseudostatyczną.

2. Analiza pseudostatyczna, prosta i wygodna w użyciu, zwłaszcza w rozpowszechnionych klasycznych analizach stateczności metodami równowagi granicznej, zakłada stałe, permanentne działanie wzbudzonej siły sejsmicznej na grunty potencjalnej bryły osuwiskowej i nie uwzględnia rzeczywistych warunków naprężeń i odkształceń, jakim podlega skarpa lub zbocze poddane wstrząsom. W całym zboczu kopalni lub w jego większym fragmencie, przyspieszenia wywoływane wstrząsami działają bowiem jednocześnie i bardzo krótko w kierunku do i od zbocza, co powoduje wzajemne znoszenie się niekorzystnych oddziaływań wywołanych siłami bezwładności odkształcającej się masy gruntu. Jednocześnie, zgodnym z pochylem zbocza, oddziaływaniom siły sejsmicznej może podlegać tylko mniejszy fragment zbocza – pojedyncza skarpa zbocza albo nawet część skarpy, co zwiększa prawdopodobieństwo utraty jej stateczności, zwłaszcza w sytuacji niewielkiego zapasu stateczności takiej skarpy. Jednak i wtedy krótkotrwałość oddziaływań parasejsmicznych na ogół nie powoduje uruchomienia procesu osuwiskowego.

3. Niedocenianym dotychczas i niekorzystnym efektem wstrząsów parasejsmicznych, wpływającym na stateczność skarpi i zboczy, są stwierdzone wizualnie i pomiarami geodezyjnymi, niewielkie, odwracalne i nieodwracalne, poziome i pionowe, przemieszczenia gruntów, powodujące powstawanie mikro- i makrospeków oraz rozwarstwień, a w efekcie zmniejszenie spójności gruntu. Spójność i kąt tarcia wewnętrznego takiego gruntu mogą podlegać dalszemu obniżeniu wskutek wsiąkania wody w powstały system mikrospeków, co w efekcie może prowadzić do powstania osuwiska opóźnionego czasowo w stosunku do okresu strzelań. Wskazuje na to przykład z nieczynnej, odkrywkowej kopalni siarki „Machów”. Wyniki

dotychczasowych obserwacji, prowadzonych w tej kopalni, umożliwiły wstępną ocenę wartości współczynnika sejsmicznego ( $k$ ), przy którym można się spodziewać naruszenia struktury półzwartego i zwartego gruntu i powstania w nim mikrospeków. Można przyjąć, że jest to wartość od około 0,1 do 0,3 lub większa. Zatem w opisanych w artykule 3 kopalniach odkrywkowych, na skutek stosowanych dotychczas metod robót strzelniczych, naruszeniem struktury gruntu, a w konsekwencji procesami osuwiskowymi jest zagrożona strefa zboczy znajdująca się w odległości do około 300 m od pól strzelniczych.

Składamy serdeczne podziękowania Recenzentom za wnikliwą analizę oraz cenne uwagi wniesione do końcowej wersji artykułu.

## LITERATURA

- BIGGS J.M. 1964 – Introduction to Structural Dynamics. McGraw-Hill, New York.
- CAŁA M., FLISIAK J., KOWALSKI M., MACAN. 2010 – Numeryczna analiza oddziaływań dynamicznych wywołanych robotami strzałowymi na masyw skalny w korpusach zboczy stałych wyrobiska górniczego pola Bełchatów. Opr. arch. AGH, Kraków.
- CAŁA M., BLAJER M., BIESSIKIRSKI A., DWORZAK M., KOWALSKI M., PYRA J., SOŁTYS A., STOPKOWICZ A., WIZNER J. 2013 – Pole Bełchatów. Numeryczna analiza oddziaływań dynamicznych wywołanych robotami strzałowymi na masyw skalny w korpusach zboczy stałych wyrobiska górniczego – etap II. Opr. arch. AGH, Kraków.
- CHANG C.J., CHEN W.F., YAO J.Z.P. 1984 – Seismic Displacement in Slopes by Limit Analysis. J. Geotech. Eng. Div., 110, GT 7: 860–874.
- GOODMAN R.E., SEED H.B. 1966 – Earthquake – Induced Displacements in Sand Embankments. J. Soil Mech. Found. Div., 92, SM 2: 125–146.
- KUHLEMEYER R.L., LYSMER J. 1973 – Finite Element Method Accuracy for Wave propagation Problems. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, 99: 421–427.
- MATUSZYK J., SZYBIŃSKI M. 1988 – Zwiększenie opóźnienia międzystrzałowego jako sposób znacznego osłabienia efektu sejsmicznego wywołanego robotami strzałowymi. Z. Nauk. AGH Kraków, Geofizyka Stosowana, 1: 223–236.
- MEJIA L.H., DAWSON E.M. 2006 – Earthquake Deconvolution for FLAC. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics (Proceedings of the 4<sup>th</sup> International FLAC Symposium, Madrid, Spain, May 2006), P. Varona, R. Hart (red.), Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group Inc: 211–219.
- MODRZEJEWSKI S., GRZEŚKOWIAK A. 1995 – Strzelanie rozluźniające w kompleksach trudno urabialnych. [W:] Identyfikacja i modelowanie warunków zalegania i wybierania trudno urabialnych kompleksów geologicznych zaburzonych złóż węgla brunatnego. Poltegor-Institut, pr. zbior. Poltegor-Institut, Redakcja Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław: 193–230.
- NEWMARK N.M. 1965 – Effect of Earthquakes on Dams and Embankments. Geotechnique, 15 (2): 139–159.
- RYBICKI S., SZYBIŃSKI M. 1988 – Ocena wpływu drgań parasejsmicznych na stateczność skarpi nasypów i wykopów. Z. Nauk. AGH, Geofizyka Stosowana, 1: 197–209.
- RYBICKI S., FLISIAK J., KOWALSKI M. 2015 – Analiza wpływu robót strzałowych na stateczność zbocza zachodniego i południowego oddziały KWB Turów (etap II). Opr. arch. AGH Kraków.
- SARMA S.K. 1979 – Stability Analysis of Embankments and Slopes. J. Geotech. Eng. Div., 105, GT 12: 1511–1524.
- TERZAGHI K. 1950 – Mechanisms of Landslides. Geological Society of America, Engin. Geol., Berkeley: 83–123.