

Zasady wyznaczania stref zagrożeń wywołanych stosowaniem materiałów wybuchowych w górnictwie skalnym

Szymon Modrzejewski

Instytut Górnictwa Odkrywkowego „Poltegor – Instytut”, Wrocław

Streszczenie: *W artykule przedstawiono zasady kompleksowego określania zagrożeń towarzyszących urabianiu skał przy pomocy materiałów wybuchowych.*

Oprócz dotychczas stosowanych procedur wyznaczania stref wpływów drgań sejsmicznych, rozrzutu odłamków skalnych i podmuchu podano sposoby i zasady obliczeń strefy zagrożenia toksycznymi gazami powybuchowymi oraz oddziaływania robót strzałowych na górotwór i stateczność zboczy. Scharakteryzowano niekorzystne wpływy środowiskowe i zdrowotne mogące wystąpić w trakcie wybuchowego urabiania skał.

1. Wprowadzenie

Podstawowym sposobem urabiania surowców skalnych jest technika strzelnicza; na potrzeby której w 2004 roku w ponad 210 zakładach zużyto ok. 10700 Mg materiałów wybuchowych (MW). Konsekwencją prowadzenia tych prac jest między innymi emisja niekorzystnych oddziaływań środowiskowych, które przejawiają się w formie drgań parasejsmicznych, rozrzutu odłamków skalnych i powietrznej fali uderzeniowej (podmuchu). Zasięg niebezpiecznych wpływów robót strzałowych określony w rozporządzeniu wykonawczym *Prawa geologicznego i górnictwa* należy traktować jako pierwszy stopień przybliżenia. Dlatego omawiając specyfikę poszczególnych oddziaływań i ich wpływy na obiekty, środowisko oraz ludzi, przedstawiono metody identyfikacji, prognozowania i sterowania procesami wybuchowego urabiania skał, pozwalające na bezpieczne prowadzenie strzelań zwiększonymi ładunkami MW. Przy rozwiązywaniu problemu uwzględniono konieczność aplikacji przemysłowych proponowanych rozwiązań z wykorzystaniem najnowszych trendów w doborze MW nowych generacji oraz nowoczesnych środków strzałowych. Omówiono również i przedstawiono sposób określania zasięgu strefy szkodliwych wpływów na ludzi toksycznych gazów powybuchowych. Dotychczasowa praktyka wyznaczania stref zagrożeń i uwarunkowania prawne są przyczyną w wielu przypadkach nieuzasadnionego ograniczania wielkości odpalanych ładunków MW oraz częstych błędnych interpretacji. Skutkiem tego są ograniczenia produkcyjne. Wprowadzenie proponowanych, dokładniejszych metod wyznaczania stref zagrożeń i warunków bezpieczeństwa środowiskowego robót strzałowych pozwala na poprawę efektywności wydobywania z uwzględnieniem eliminacji szkód powstałych w wyniku stosowania MW.

W 2004 roku wydobyte wszystkich surowców wyniosło 363,9 mln Mg, a surowców skalnych 168,9 mln Mg co stanowi 46% wydobywania wszystkich kopalni w Polsce. Podstawowym procesem wydobywczym jest urabianie złóż oparte na technice strzelniczej. Jest ona zróżnicowana w poszczególnych rodzajach eksploatowanych skał. W ostatnim czasie obserwuje się coraz szersze wprowadzanie materiałów wybuchowych w tym typu ANFO.

Od dwóch lat zauważalny jest w tym zakresie wyraźny postęp. Masowe strzelania wieloszeregowo, milisekundowe metodą długich otworów o dobranych interwałach czasowych opóźnień do warunków poszczególnych kopalni czy nawet poziomów eksploatacyjnych powoduje obniżenie zużycia jednostkowego MW o ok. (5 - 15)%, obniżenie kosztów urabiania w wyniku zmniejszenia zakresu robót wiertniczych, strzelań wtórnych, ograniczenie przestojów technologicznych związanych z prowadzeniem robót strzelniczych, przejazdów koparek, prac pomocniczych (podgarnianie usypu, ramowanie ścian) o ok. (15 - 20)% oraz poprawę bezpieczeństwa prowadzonych prac w tym ograniczanie zasięgu niekorzystnych wpływów środowiskowych. Odpowiedni dobór schematów odpalania oprócz poprawy jakości urobku, kształtu usypu, jakości ściany i spągu po strzeleniu umożliwia ograniczenie emisji drgań sejsmicznych rozrzutu i podmuchu. Wymienione korzyści są silnym bodźcem wprowadzenia nowej technologii strzelania opartej na wykorzystaniu możliwości, jakie

stwarzają systemy nieelektryczne oraz materiały wybuchowe typu ANFO i emulsyjne ładowane do otworów mechanicznie. Ilustrują to tabele 1 i 2.

Tabela 1. Zmiany struktury zużycia MW w górnictwie odkrywkowym [1]

Rok	Rodzaj MW [%]						
	Saletrol	Emulsyjne	Saletrot	Amonity	Dynamity	Trotyl	Inne
2000	48,20	11,60	14,40	18,00	4,00	3,60	0,20
2001	43,80	21,40	15,90	12,40	2,30	3,60	0,50
2002	54,49	29,44	2,55	8,47	1,31	2,88	0,86
2003	60,64	28,70	4,23	2,54	2,16	1,12	0,90

W górnictwie odkrywkowym w roku 2003 zużyto 9,8 tys. Mg MW oraz 525,5 tys. sztuk zapalników, w tym 164 tys. zapalników nieelektrycznych i 435,5 tys. mb lontów detonujących oraz 65,2 tys. pobudzaczy.

Tabela 2. Struktura zmian rodzajowych zużycia zapalników w górnictwie odkrywkowym [1]

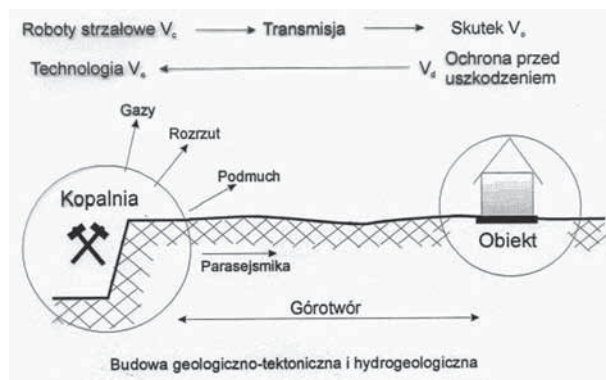
Rok	Rodzaj zapalników [%]			
	Milisekundowe	Nieelektryczne	Natychmiastowe	Półsekundowe
2000	51,14	10,20	38,60	0,06
2001	39,53	13,90	51,40	0,17
2002	45,10	18,70	34,10	2,10
2003	37,30	31,10	30,70	0,90

Przedstawione wskaźniki pokazują, że wzrost zużycia nowoczesnych MW (saletrole –ANFO i MWE) z odpowiednio 48% i 11% w roku 2000 do 60% i 28% w roku 2003 jest prawidłową tendencją nadążającą za trendami światowymi. Podobnie przedstawia się sytuacja w zmianach struktury wprowadzania nowoczesnych, bezpiecznych systemów odpalania, czego wykładnikiem jest zużycie zapalników nieelektrycznych, których udział z 10% w roku 2000 wzrósł do 31% w roku 2003 oraz ograniczenie zużycia zapalników natychmiastowych świadczące o zmniejszeniu strzelań wtórnych (głównie rozszczepkowych), co jest elementem znacznie eliminującym zasięg zagrożeń towarzyszących robotom strzałowym (spadek z 38% w roku 2000 i z 51% w roku 2001 do 31% w roku 2003), głównie rozrzutu. Ogólnym wskaźnikiem wyjściowym do oceny zagrożeń środowiskowych jest zużycie jednostkowe MW, które w warunkach Polskich kształtuje się w zależności od rodzaju urabianej skały od 0,10 kg m⁻³ do 1,8 kg m⁻³ (Tab.3)

Tabela 3. Średnie zużycie jednostkowe MW w poszczególnych rodzajach skał

Rodzaj skały	Zużycie jednostkowe MW [kg m ⁻³]	
	zakres	średnie
Bazalty	0,15-1,44	0,55
Granity	0,31-1,50	0,91
Granitognejsy	0,60-1,80	0,89
Melafiry	0,36-0,80	0,56
Wapień	0,10-0,80	0,35
Margle	0,31-0,48	0,43
Dolomity	0,33-0,92	0,50

Dokonujący się obecnie dynamiczny postęp w opracowywaniu nowoczesnych, bezpiecznych i przyjaznych środowiskowo MW, środków strzałowych umożliwia optymalizowanie procesów wybuchowego urabiania skał. Schemat czynników oddziaływań robót strzałowych przedstawiono na rys.1.



Emisja

- ilość wyzwolonej energii propagowanej MW
- częstotliwość wzbudzanych drgań w funkcji schematu odpalania
- czas emisji drgań

Propagacja

- dekrement tłumienia
- prędkość rozchodzenia się drgań
- częstotliwość drgań własnych górotworu
- rozproszenie energii

Oddziaływanie

- rodzaj podłoża i dekrement tłumienia podłoża-fundament
- prędkość drgań i ich częstotliwość
- częstotliwość drgań własnych
- czas oddziaływania
- odporność na wstrząsy

Rys. 1. Schemat czynników środowiskowego oddziaływania robót strzałowych

Systemy mechanicznego sporządzania i załadowywania MW do otworów strzałowych stwarzają nowe możliwości efektywnego zastosowania w praktyce techniki strzelniczej. Przykłady aplikacji tych technologii szczególnie w kopalniach eksploatujących surowce skalne na potrzeby kruszyw łamanych powodują wzrost odpalanych wielkości ładunków MW. Ograniczanie wielkości ładunków wynika często już nie ze względu na zasięg wpływu stref zagrożeń takich jak drgania parasejsmiczne, rozrzut czy podmuch, ale ze względów ekonomicznych. Przykładowo, przeprowadzenie strzelania w jednej z kopalń bazaltu ładunkiem całkowitym około 20 Mg pozwoliło na uzyskanie surowca na ponad 10 miesięcy, co spowodowało, że części środków finansowych zaangażowanych w ten odstrzał (koszty wiercenia, zakup i załadunek MW do otworów strzałowych) została pokryta ze sprzedaży produktów dopiero po pół roku. Z drugiej strony uzyskane efekty ekonomiczne wynikające z lepszego wykorzystania energii wybuchu poprzez zmniejszenie jednostkowego użycia MW, jednorazowego przestoju kopalni w trakcie wykonywania strzelania i ograniczenia ilości strzelań oraz lepsza granulacja urobku, eliminacja progów przyspągowych, brak nawisów skalnych czy spękań wstecznych i znaczące obniżenie nadgabarytów przemawiają za coraz szerszym stosowaniem strzelań zwiększonym ładunkiem- strzelań masowych. Wiąże się to jednak z koniecznością identyfikacji wszystkich rodzajów zagrożeń towarzyszących takim strzelaniom i oceną ich wpływów środowiskowych.

2. Zagrożenia

2.1. Drgania parasejsmiczne

Detonacja ładunku MW umieszczonego w caliznie skalnej powoduje promieniowe, falowe rozprzestrzenianie się zmiennych naprężeń, zwanych drganiami parasejsmicznymi. Falę tę można scharakteryzować w skrócie w oparciu o amplitudę, prędkość, jak i przyspieszenie w danym punkcie górotworu i odpowiadającej im częstotliwości. Drugą grupę opisowych parametrów drgań parasejsmicznych stanowią prędkości rozprzestrzeniania się podłużnej, poprzecznej i skrętnej składowej drgań. Wielkości tych parametrów są funkcją właściwości przewodnictwa sejsmicznego górotworu, głównie rodzaju skał, sprężystości, dekrementu tłumienia drgań i budowy geologiczno tektonicznej. Podstawowe znaczenie w emisji drgań ma wielkość ładunku przypadającego na opóźnienie, sposób jego odpalania oraz umiejscowienie w urabianej zabierce [5]. Drgania parasejsmiczne są głównym, niepożądanym efektem wybuchowego urabiania skał i stanowią

potencjalnie największe ze wszystkich oddziaływań zagrożenia środowiskowe, przede wszystkim dla obiektów kubaturowych, infrastruktury kopalnianej, a niekiedy i górotworu. Sposób wyznaczania zasięgu niebezpiecznej strefy drgań parasejsmicznych dla obiektów budowlanych oblicza się w zależności od sposobu strzelania i wielkości odpalanego ładunku. Podstawową zależność określono ogólnie w rozporządzeniu wykonawczym *Prawa geologicznego i górniczego* [6]. Zależność tę należy traktować jako pierwszy stopień przybliżenia. Rzeczywisty zasięg zagrożenia można określić na podstawie modelowania propagacji parasejsmicznej w oparciu o formułę [3]:

$$V = K_1 \cdot Q^v \cdot r^{-\kappa} \quad [\text{cm s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie: V - prędkość drgań sejsmicznych w punkcie; K_1, v, κ - współczynniki określające sprężyste właściwości górotworu oraz warunki emisji drgań; Q - masa odpalanego ładunku MW; r - odległość między miejscem odpalenia ładunku o masie Q , a punktem, w którym występują drgania V .

Podana formuła po wycechowaniu współczynników w oparciu o bezpośrednie pomiary pozwala na wyznaczenie zasięgu strefy zagrożenia oddziaływaniem drgań parasejsmicznych w danych warunkach w funkcji wielkości odpalanego ładunku MW i progno odporności obiektów, wg wzoru [4]:

$$R_S = \left(\frac{K}{V_d} \right)^v \cdot \sqrt{Q_Z} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

gdzie: V_d - odporność sejsmiczna obiektu; Q_Z - maksymalny ładunek MW przypadający na jeden stopień opóźnienia milisekundowego; K, v - współczynniki wycechowane na podstawie pomiarów.

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że wprowadzenie odpowiednio dostosowanej do danych warunków złożowych parametrów strzelania pozwala ładunek całkowity serii otworów (Q_C) zwielokrotnić w funkcji maksymalnego ładunku MW przypadającego na jeden interwał opóźnienia milisekundowego (Q_Z). Zwielenienie to jest uwarunkowane doborem czasu opóźnienia milisekundowego do właściwości urabianej skały, zastosowanego schematu odpalania i parametrów siatki otworów oraz doborem rodzaju MW i sposobem jego inicjacji w otworze [2]. Uwzględnienie powyższych czynników jest możliwe obecnie dzięki nowym generacjom materiałów wybuchowych i środków strzałowych oraz aparaturze badawczej pozwalającej na wycechowanie zależności (1) z ufnością powyżej 99% i w konsekwencji precyzyjnym wyznaczeniem zasięgu oddziaływania (2). Z przeprowadzonych badań wynika, że nowoczesne technologie strzelania opracowane w oparciu o pomiary propagacji parasejsmicznych wg przedstawionej metody umożliwiają prowadzenie w sąsiedztwie robót strzałowych ładunkami o znacznych wielkościach (rzędu kilkunastu Mg) obiektów bez powodowania w nich uszkodzeń [2].

2.3. Rozrzut odłamków skalnych

Określenie zasięgu rozrzutu odłamków skalnych jest zagadnieniem trudnym ze względu na konieczność uwzględnienia w obliczeniach wielu czynników o dużej zmienności. Dlatego zgodnie z obowiązującym prawem [6] zasięg strefy rozrzutu wyznacza się w oparciu o sposób strzelania (metodę strzelania) oraz kierunek zagrożenia („do wyrobiska”, „poza wyrobisko” lub „wokół miejsca strzelania”). Dla powszechnie stosowanych metod strzelania zasięgi zagrożenia rozrzutem wynoszą $R_r = 200$ m tj. dla strzelania metodą długich otworów pionowych i odchylonych od pionu nie więcej niż 20° , rozszczepkowego lontem wybuchowym z przybitką wodną i rozszczepkowego ładunkami w krótkich otworach bez przybitki oraz poza wyrobisko dla strzelania otworami strzałowymi długimi poziomymi oraz zwykłymi i poziomymi z poszerzonym dnem. Zasięg rozrzutu dla pozostałych metod zawiera się do $R_r = 500$ m.

Z dotychczasowej praktyki wynika jednak, że przy prawidłowym prowadzeniu robót strzałowych, a szczególnie, gdy:

- dostosowano długość przybitki do zabioru i odległości między otworami, średnicy i długości otworów strzałowych,
- zachowano równoległość otworów strzałowych i równoległość do ociosów zabierki,

- zbiór w zależności od rodzaju od rodzaju skał w granicach $z = (25 - 40)d$, gdzie d - średnica otworów w [m],
- jednostkowe zużycie MW dostosowane do wymagań urabiania skały, to podane w cyt. rozporządzeniu [6] zasięgi zagrożenia rozrzutem będą mniejsze. W takim przypadku można posłużyć się wzorem [4]:

$$R_r = 0,204 \frac{q \cdot e \cdot \eta}{\rho} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

gdzie: q - jednostkowy ładunek MW, kg m^{-3} ; e - jednostkowa energia potencjalna ładunku MW (koncentracja energii), J kg^{-1} ; η - sprawność energetyczna wybuchu (określająca ile energii MW zostanie zużytkowane na wyrzut odłamków skalnych), zależna od warunków strzelania, głównie od wielkości i rodzaju przybitki oraz zabioru, $\eta = 0,2 - 0,75$; ρ - gęstość urabianej skały, kg m^{-3} .

Jednostkowy ładunek MW wyznaczony musi być z warunków geometrycznych stożka wyrzutu. W przypadku lokalizacji miejsca strzelania na zboczach podana zależność musi być skorygowana nachyleniem stoku według wzoru:

$$\Delta R_r = \frac{R_r}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4h}{R_r}} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (4)$$

gdzie: h - różnica wysokości pomiędzy miejscem strzelania a zasięgiem strefy rozrzutu R_r ,

Ponieważ w przedstawionych zależnościach występuje zespół 4 parametrów o dokładności określenia $\pm 10\%$, to obliczenia wykonane w oparciu o przedstawioną metodę muszą być sprawdzone pomiarami terenowymi.

2.4. Podmuch

Podmuchem nazywa się powietrzną falę uderzeniową (PFU). Sposób wyznaczania tego zagrożenia zgodnie z obowiązującymi przepisami uwzględnia masę ładunku i głębokość jego umieszczenia w caliznie skalnej oraz dopuszczalne kryterium bezpieczeństwa [6]. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi zagrożenie PFU dla ludzi i obiektów są impuls nadciśnienia i nadciśnienie fali uderzeniowej. Nadciśnienie fali uderzeniowej przy strzelaniu metodą długich otworów (poza urabiane piętro) można obliczyć według wzoru [1]:

$$\Delta_p = 470 \cdot \rho_p^{1,53} \quad [\text{kPa}] \quad (5)$$

przy czym $\rho_p = \frac{r}{\sqrt[3]{Q_C}}$

Próg odporności obiektów na działanie PFU zawiera się w granicach $\Delta_p = 130 \pm 200 \text{ Pa}$ ($136 \pm 140 \text{ dB}$). Nadciśnienie powyżej 200 kPa stanowi zagrożenie dla życia ludzi. W warunkach górnictwa skalnego i specyfiki robót strzałowych istotny wpływ na podmuch mają takie czynniki jak rodzaj odpalanego MW, lokalizacja miejsca strzelania w stosunku do powierzchni, konfiguracja terenu oraz warunki meteorologiczne. Obliczenia teoretyczne uwzględniające powyższe są skomplikowane a ilość występujących współczynników korekcyjnych powoduje duży rozrzut otrzymanych wyników od wartości rzeczywistych. Dlatego dla orientacyjnego wyznaczania strefy zagrożenia podmuchem wystarcza formuła określona w obowiązujących przepisach [6] a w przypadkach wątpliwych należy przeprowadzić pomiary propagacji fali podmuchu i na tej podstawie obliczyć zasięg strefy bezpieczeństwa i podać uwarunkowania technologiczne jej zachowania [4].

2.5. Zagrożenie toksycznymi gazami powybuchowymi

W trakcie wybuchowego urabiania skał powstają z procesów przemian chemicznych MW gazowe produkty, których składnikami toksycznymi, są przede wszystkim tlenki azotu (NO_x) oraz tlenek węgla CO. Ponieważ produkty te stanowią istotne zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego, stąd producenci prowadzą systematyczne działania w celu ograniczenia ich zawartości w gazach postrzałowych MW. W tab. 4 przedstawiono zmiany zawartości toksycznych składników w miarę postępu w produkcji MW. Wyraźna tendencja ograniczania zużycia

dynamitów i wprowadzania MW emulsyjnych przyczynia się również do ograniczania w trakcie strzelania emisji szkodliwych gazów. Obecnie w krajach o rozwiniętej technice strzelniczej coraz powszechniej stosowane są MW emulsyjne, a ich właściwości ograniczonej emisji toksycznych gazów postrzałowych zdecydowanie odbiegają (na korzyść) od innych MW (tab.5) [2].

Tabela 4. Emisja toksycznych produktów gazowych różnych rodzajów MW

Rodzaj MW	Emisja gazów powybuchowych			
	Tlenki azotu NO _x		Tlenki węgla CO _x	
	[m ³ Mg ⁻¹]	[%]	[m ³ Mg ⁻¹]	[%]
Dynamity	35 - 40	100	160 - 240	100
Saletrole	30	75	51	21
Emulsyjne	1 - 2	5	11 - 46	19
Emulsyjne LWC	0,6	1,5	27	11

Tabela 5. Zawartość procentowa toksycznych produktów wybuchu MW emulsyjnych

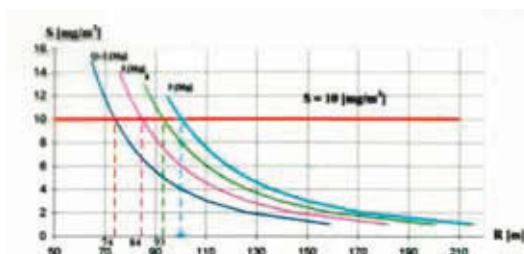
Składnik	Nazwa emulsyjnego materiału wybuchowego			
	Emulgit LWC	Emulgit LWC-AL	Emulgit 82 GP	Emulgit 22
Tlenek węgla CO	0,116	0,046	0,051	0,093
Tlenki azotu w przeliczeniu na NO ₂	0,006	0,027	0,027	0,006

W dotychczasowej praktyce górniczej nie prowadzono obliczeń zasięgu strefy zagrożenia toksycznymi gazami powybuchowymi. Z uwagi jednak na zwiększenie masowości odstrzałów i wielkości odpalonych ładunków MW problem ten w szczególnych warunkach może mieć istotne znaczenie. Dlatego w IGO Poltegor-Institut opracowano metodykę obliczania zasięgu strefy niebezpiecznej ze względu na zagrożenie zdrowia ludzkiego toksycznymi gazami powybuchowymi wg wzoru:

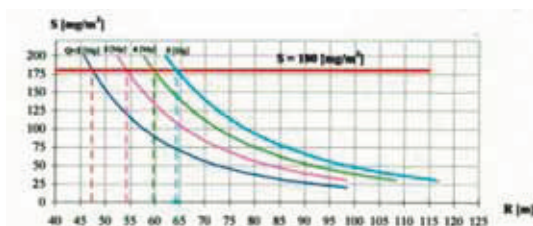
$$R_g = \sqrt[3]{\left[\left(\frac{q_N}{q_{norN}}\right)^3 + \left(\frac{q_C}{q_{norC}}\right)^3\right]} \cdot \frac{Q}{\pi} \quad [m] \quad (6)$$

gdzie: q_N , q_C -jednostkowa emisja tlenków azotu i węgla; q_{norN} , q_{norC} - dopuszczalne normowe stężenia chwilowe tlenków azotu i węgla; Q - masa odpalnego ładunku, kg.

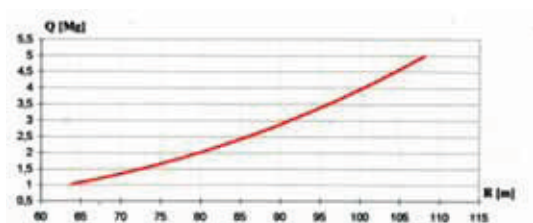
Przykładowo uwzględniając zawartości toksycznych gazów w produktach wybuchu zasięg strefy zagrożenia dla 20 Mg MW emulsyjnego wyniesie: $R_g = (45 - 70)$ m. Dla porównania w przypadku odpalenia ładunku 20 Mg MW nitroglicerynowych (np. dynamitu) w rozpatrywanych warunkach zasięg strefy zagrożenia zawierał by się w granicach 140 - 160 m a dla ANFO ok. 130 m. Dla zobrazowania znaczenia opisywanego zagrożenia sporządzono nomogram zasięgu strefy zagrożenia w funkcji wielkości odpalnego ładunku nitroglicerynowego MW (Rys.2 - 4).



Rys. 2. Zależność stężenia NO_x od miejsca strzelania i wielkości ładunków MW nitroglicerynowych



Rys. 3. Zależność stężenia CO od miejsca strzelania i wielkości ładunków MW nitroglicerynowych



Rys. 4. Zależność zasięgu strefy zagrożenia toksycznym tlenkami azotu i tlenkiem węgla od masy ładunku dla MW nitroglicerynowych

2.6. Oddziaływanie robót strzałowych na górotwór

Przy projektowaniu eksploatacji złoża z zastosowaniem MW należy również uwzględnić jego potencjalne oddziaływanie na górotwór. Ma to szczególne znaczenie przy urabianiu złóż blocznych lub gdy zachodzi konieczność prowadzenia wydobywania na jednym złożu dla potrzeb zarówno do produkcji kruszywa jak i elementów foremnych. W takim przypadku mamy do czynienia przede wszystkim z oddziaływaniem drgań parasejsmicznych a ich skutki mogą przejawiać się spękaniami calizny skalnej i naruszeniem struktury blocznej. Inne możliwe oddziaływania robót strzałowych na górotwór to:

- uaktywnienie zjawisk osuwiskowych i spęływanie zboczy,
- wzajemne przesunięcia warstw skalnych lub ich rozwarstwienie,
- uaktywnienie uskoków tektonicznych,
- zmiany hydrogeologicznych warunków wód podziemnych.

Prognozowanie zależności propagacji wpływów robót strzałowych na górotwór określają formuły na zasięg strefy spękań:

$$R_{SP} = \sqrt[3]{Q} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot c_p \cdot a}{\sigma}} \cdot c_1 \quad [\text{m}] \quad (7)$$

i

$$Q = 2\pi \cdot \left(\frac{q}{c_2}\right)^2 \cdot L \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

gdzie: R_{SP} - zasięg spękań górotworu, [m]; Q - masa bezpiecznego ładunku MW, [kg]; a - odległość pomiędzy otworami, [m]; c_1 i c_2 - współczynniki stałe wyznaczone z pomiarów terenowych; L - długość otworów strzałowych, [m]; σ - dopuszczalne naprężenia osiowe górotworu, [Kg m^{-2}]; ε - energia właściwa stosowanego MW, [kJ kg^{-1}]; ρ - gęstość urabianej skały [kg m^{-3}].

Tabela 6. Parametry wytrzymałościowe skał w rejonie dolnośląskim

Lp.	Rodzaj skały	Wytrzymałość doraźna [MPa]	
		Ściskanie	Rozciąganie
1.	Granity i sjenity	90 - 220	5 - 8
2.	Bazalty	100 - 420	5 - 17
3.	Marmury	40 - 280	2 - 6
4.	Gabra	160 - 210	6 - 7,5
5.	Wapień	25 - 190	1,5 - 2
6.	Sjenity	120 - 300	5,5 - 9
7.	Piaskowce	15 - 320	~ 2,5

Zasięg strefy spękań górotworu określa również zależność:

$$R_{SP} = d \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{p_d}{\sigma_S} + 1 \right)} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

gdzie: R_{SP} – maksymalny zasięg strefy spękań; d – promień ładunku skupionego, (średnica otworu); p_d – ciśnienie detonacji MW;

$$p_d = \frac{D^2 \cdot q_{MW}}{4} \quad (10)$$

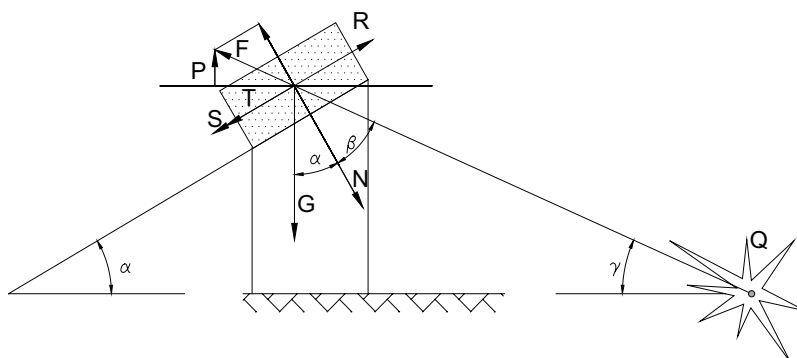
gdzie: D – prędkość detonacji; q_{MW} – gęstość MW w otworze; σ_S – wytrzymałość skał na ściskanie (tab.3).

Bezpieczne oddziaływanie drgań sejsmicznych na bloczność złóż w rejonie Dolnego Śląska (z uwzględnieniem ich właściwości fizycznych) wynosi:

- kryterium wytrzymałościowe $V_d = 43 \text{ cm s}^{-1}$
- wg Mosinca $V_d = 30 \text{ cm s}^{-1}$
- wg Jimeno C. $V_d = 25 \text{ cm s}^{-1}$
- wg Dowdinga, Rozena $V_d = 20 \text{ cm s}^{-1}$

2.7. Wpływ robót strzałowych na stateczność zboczy

Oddziaływanie robót strzałowych na otoczenie kopalń może mieć znaczenie, gdy w pobliżu znajdują się czynne osuwiska lub gdy zbocza są w stanie równowagi granicznej. Oddziaływanie to poprzez przyspieszenie drgań wpływa na podstawowe parametry geotechniczne stateczności, jakimi są kąt tarcia wewnętrznego φ i spójność c . Schemat obciążenia elementarnej cząstki siłami wywołanymi obciążeniem sejsmicznym $F = m \cdot a$ przedstawiono na rys. 5, gdzie m - masa elementarnej cząstki gruntu znajdującej się na hipotetycznej płaszczyźnie poślizgu, a - przyspieszenie drgań sejsmicznych oddziałujących na tę elementarną cząstkę.



Rys. 5. Schemat zsuwu bryły skalnej wzdłuż płaskiej powierzchni poślizgu wskutek działania fali sejsmicznej

Wartości poszczególnych sił są następujące:

- | | |
|--|---|
| - ciężar elementarnej bryły | $G = m \cdot g,$ |
| - normalna do powierzchni poślizgu | $N = G \cdot \cos\alpha,$ |
| - siła zsuwająca | $T = G \cdot \sin\alpha,$ |
| - siła reakcji górotworu przeciwdziałająca poślizgowi | $R = N \cdot \operatorname{tg}\varphi,$ |
| - siła wymuszenia parasejsmicznego | $F = m \cdot a,$ |
| - składowa wymuszenia parasejsmicznego powodująca wzrost sił zsuwających | $S = F \cdot \sin\beta,$ |
| - zmniejszenie siły normalnej na skutek wymuszenia parasejsmicznego | $P = F \cdot \cos\beta,$ |
- i gdzie g przyspieszenie ziemskie.

Stąd warunek równowagi stateczności zbocza k , można zapisać

$$k = \frac{\operatorname{tg}\varphi \left(\cos\alpha - \frac{a}{g} \sin\alpha \right)}{\left(\sin\alpha + \frac{a}{g} \cos\alpha \right)} \quad (11)$$

ze względów bezpieczeństwa $k \geq 1,1 - 1,4$.

2.8. Zagrożenia ekologiczne

Oprócz dotychczas wymienionych negatywnych skutków robót strzałowych na środowisko należy uwzględnić również potencjalne zagrożenia wynikające z możliwości oddziaływań głównych składników MW którymi są:

- saletra amonowa,
- nitrozwiazki (dinitrotoluen, trinitrotoluen - trotyl),
- olej.

W przypadku nieumiejętnego obchodzenia się z MW istnieje ryzyko skażenia środowiska wodnego i gruntowego związanego z:

- rozsypaniem MW w trakcie przygotowania i ładunku do otworów strzałowych,
- umieszczeniem w górotworze spękanym części ładunku MW w szczelinach,
- stosowaniem ładunku o średnicy mniejszej od średnicy krytycznej MW i w związku z tym niezdetonowaniem części ładunku,
- stosowaniem w części zawodnionej górotworu MW nieodpornych na wodę,
- stosowaniem w otworach zawodnionych ładunków MW niedostatecznie przenoszących detonację, skutkiem czego w części kolumny ładunku MW dochodzi do zaniku detonacji,
- stosowaniem zbyt słabego ładunku udarowego pobudzającego detonację w otworze; szczególnie w przypadku odpalania saletroli i saletrotów w otworach strzałowych o średnicach zbliżonych do średnicy krytycznej (następuje wtedy nieodpalenie części ładunku),
- przeładowaniem otworów strzałowych na skutek zbyt małej przybitki - wtedy część górna kolumny ładunku MW może zostać „wyrzucona” z otworu.

Przy prawidłowo wykonywanych robotach strzałowych opisywane zagrożenia nie występują.

2.9. Inne zagrożenia

W trakcie robót strzałowych występują dodatkowe oddziaływania środowiskowe takie jak hałas czy zapylenie, ale z uwagi na krótkotrwałość i ograniczony zasięg, wpływy te przy prawidłowej technologii urabiania nie stanowią istotnego zagrożenia i mogą być pomijane. Na uwagę zasługuje sprawa oddziaływania na zdrowie ludzkie niektórych składników samych MW. Dotyczy to przede wszystkim bezpośredniego kontaktu z materiałami, których składnikami są substancje rakotwórcze (np. trotyl). Zestawienie zagrożeń, głównych czynników wpływających na ich zasięg oraz potencjalne skutki przedstawiono tabeli 7.

Tabela 7. Środowiskowe i ekologiczne zagrożenia stosowania w górnictwie odkrywkowym materiałów wybuchowych

Lp.	Rodzaj zagrożenia	Główne czynniki warunkujące	Średnia wielkość (zasięg) zagrożenia [m]	Skutki oddziaływania
1	Drgania sejsmiczne	technologia strzelania, sposób i wielkość maksymalnego ładunku, MW na jedno opóźnienie, czas opóźnień milisekundowych, rodzaj falowodu	100 - 2000	uszkodzenia obiektów, przyspieszone zużycie obiektów
2	Rozrzut odłamków skalnych	technologia strzelania, zabiór, wielkość i rodzaj ładunku MW, zużycie jednostkowe MW	100 – 400	uszkodzenia obiektów. zagrożenie zdrowia i życia ludzkiego
3	Powietrzna fala udarowa	wielkość ładunku całkowitego serii, sposób strzelania, głębokość umieszczenia ładunku MW w caliznie, konfiguracja wyrobiska i terenu	30 - 250	uszkodzenia obiektów, sporadycznie zdrowia ludzkiego, przyspieszone zużycie obiektów
4	Hałas	wielkość, sposób i głębokość umieszczenia ładunku MW w caliznie	impulsowo (1 – 2) s; 100 - 400	sporadycznie, w niewielkim zakresie zdrowia ludzkiego w bezpośrednim sąsiedztwie odstrzału
5	Gazy powybuchowe	rodzaj stosowanego MW, sposób inicjacji i odpalania, wielkość ładunku	15 - 150	zdrowie ludzkie, zanieczyszczenie atmosfery
6	Zapylenie	wielkość ładunku, rodzaj skały, geometryczne parametry strzelania, warunki atmosferyczne	< 150	w ograniczonym zakresie środowisko
7	Oddziaływanie na wodę	rodzaj stosowanego MW, sposób inicjacji	w skrajnych przypadkach do kilkuset metrów	możliwość skażenia nitrozwiązkami wód powierzchniowych i gruntowych
8	Oddziaływanie na górotwór	sposób umieszczenia ładunku w caliznie, sposób odpalania, wielkość ładunku, rodzaj MW, czas opóźnień	<50	wywołanie spękań górotworu, możliwość połączenia horyzontów wodonośnych
9	Zdrowie ludzkie	rodzaj MW, sposób wykonywania robót strzałowych (bezpośredni kontakt z toksycznymi składnikami niektórych MW)	zatrucia, zwiększone narażenie na zjawiska kancerogenne	choroby układu krwionośnego, wzrost zachorowalności na raka
10	Niekontrolowany wybuch	przestrzeganie obowiązujących przepisów	do kilkuset metrów	zagrożenie życia ludzkiego, uszkodzenia obiektów

3. Podsumowanie

Umiejętne stosowanie techniki strzelniczej przy urabianiu surowców skalnych nie stanowi istotnego zagrożenia środowiskowego, a używanie nowoczesnych i ekologicznych MW oraz środków strzałowych najnowszych generacji pozwala minimalizować negatywne skutki strzelań. Istotnym elementem wpływającym na ograniczanie i eliminację przedstawionych zagrożeń jest prowadzenie robót strzałowych przez wyspecjalizowane jednostki. Poprawa efektywności i optymalizacja stosowania techniki strzelniczej jest ściśle związana z ograniczeniami zagrożeń gdyż nakierowana jest na maksymalne wykorzystanie energii wybuchu MW na urobienie i rozdrobnienie calizny, co w konsekwencji zmniejsza udział energii propagującej niekorzystne wpływy środowiskowe. Sposobem intensyfikacji tych przemian są badania adaptacyjne propagacji przedstawionych zagrożeń pod

kątem dostosowywania parametrów technologicznych do specyfiki budowy geologiczno-tektonicznej urabianej skały z uwzględnieniem doboru MW i środków strzałowych. W konsekwencji wszędzie tam, gdzie działania takie podjęto uzyskano znaczną poprawę wskaźników ekonomicznych urabiania przy ograniczeniu niekorzystnych oddziaływań środowiskowych. Aktualne tendencje w zakresie zwiększania udziału stosowania proekologicznych MW i systemów odpalania najnowszych generacji oraz najnowsze technologie pomyślnie roszą dalszemu ograniczeniu niekorzystnych wpływów robót strzałowych na środowisko.

Literatura

- [1] Krzelowski J., Szulik A., *Stosowanie materiałów wybuchowych w zakładach górniczych*. Górnictwo i Geoinżynieria, 3/1, strony 2004.
- [2] Modrzejewski Sz., *Identyfikacja i optymalizacja adaptacyjna technologii urabiania skal związanych w górnictwie odkrywkowym i oddziaływań towarzyszących*. IGO Wrocław 2002.
- [3] Modrzejewski Sz., *Prędkość drgań jako wskaźnik propagacji parasejsmiczej*. Górnictwo i Geoinżynieria, 3/1, strony 2004.
- [4] Modrzejewski Sz., *Prognozowanie wpływów robot strzałowych prowadzonych w górnictwie odkrywkowym na środowisko*. Górnictwo Odkrywkowe, 5-6, 2004.
- [5] Oloffson Stig O., *Applied explosives technology for construction and mining*, Örebo 2004.
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 1 kwietnia 2003 r. w sprawie przechowywania i używania środków strzałowych i sprzętu strzałowego w zakładach górniczych (Dz. U. 2003 nr 72 poz. 655). Załącznik Nr 4.