

*Józef Lewicki**

PROGNOZOWANIE WIELKOŚCI ZAGROŻEŃ POWSTAŁYCH PRZY PROWADZENIU ROBÓT STRZAŁOWYCH W BUDOWNICTWIE

1. Wprowadzenie

Wybuchowa rozbiórka obiektów budowlanych generuje w otoczeniu rozbieranego obiektu wiele zagrożeń, charakterystycznych dla samego wybuchu i dla energii upadku dużych mas.

Do najważniejszych [6] zagrożeń, które należy minimalizować przy prowadzeniu robót strzałowych w obiektach budowlanych, należą:

- wielkość nadciśnienia powietrznej fali uderzeniowej, Pa;
- wielkość rozrzutu odłamków, m;
- wielkość drgań parasejsmicznych (przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie, częstotliwość, mm/s, Hz;
- energia upadku, MJ.

Ponadto mogą wystąpić zagrożenia termiczne, wysokościowe, toksyczne, pyłowe, prądami błądzącymi itp. Zagrożenia te nie są przedmiotem dalszych rozważań, mimo że istnieją metody minimalizacji tych zagrożeń, dobrze już w praktyce [7] sprawdzone. W niniejszym artykule wszystko jest podporządkowane praktycznemu zastosowaniu, nie ma „nauki dla nauki”, a przedstawiane, niemal podręcznikowe narzędzie ma być przydatne do zastosowania dla każdego inżyniera w rzeczywistych warunkach wykonywanych przez niego strzelań, tak by nie stanowiło to zagrożenia dla otoczenia.

Dla opracowania metody rozbiórki (a w dalszej kolejności dokumentacji i metryk) należy:

- wykonać szkic sytuacji terenowej z zaznaczonymi obiektami naziemnymi i podziemnymi podlegającymi ochronie, w szczególności odległości miejsca strzelania od obiektów chronionych;
- określić dopuszczalną wielkość parametrów zagrożeń (drgania [4, 5], powietrzna fala uderzeniowa itp.); ilościowa wielkość parametrów powinna być określona na podstawie odpowiedniej normy, opinii rzeczoznawcy, tabeli lub w inny sposób;

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

- obliczyć wielkość ładunków dopuszczalnych, tak aby wygenerowane zagrożenia były mniejsze od szkodliwych, wyznaczonych w poprzednim punkcie; do określenia wielkości ładunków dopuszczalnych służą przedstawione dalej wzory i metody;
- opracować technologię wyburzania [6, 7] spełniającą warunki bezpieczeństwa (wielkość ładunku dopuszczalnego, maksymalna energia upadku) tak dobraną, by wygenerowane zagrożenia były mniejsze od dopuszczalnych, zaś sposób wykonania zadania dawał pełną gwarancję bezpieczeństwa otoczenia przy wykonywaniu prac na likwidowanym obiekcie.

Podczas wyznaczania wielkości ładunków dopuszczalnych (bezpiecznych) już na wstępie określa się pewne sposoby i techniki strzelania, które służą do prognozowania wielkości zagrożeń, muszą być również w taki sposób stosowane, jak założono do obliczeń. Należy powiedzieć, że negatywne skutki oddziaływania danej roboty strzałowej na otoczenie zależą od:

- odległości miejsca strzelania (lub upadku masy) od obiektu chronionego;
- charakterystyki gruntu przenoszącego drgania;
- wielkości ładunku;
- sposobu założenia ładunku (nad czy pod powierzchnią gruntu);
- ilości powierzchni odsłoniętych;
- wielkości zabioru (linii najmniejszego oporu);
- charakterystyki materiału wybuchowego [8];
- czasu wyładowania energetycznego (czasu przekazywania podłożu energii wybuchu lub energii upadku);
- sposobu inicjacji MW;
- innych elementów trudnych do zdefiniowania lub parametrycznego opisu.

Duża liczba tych czynników powoduje, że dokładność prognoz może być daleka od rzeczywistości nie zawsze wszystkie czynniki wpływające na propagację danego zagrożenia są w prognozach uwzględniane.

Przedstawiane dalej metody były wielokrotnie weryfikowane [3] pomiarami wykonywanymi przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie. Dokładność uzyskiwanych wyników zależy od wiedzy i doświadczenia osoby wykonującej prognozę, ale też i od dobrego oszacowania wielu parametrów i współczynników.

2. Zagrożenie drganiami parasejsmicznymi

Podczas strzelań występują dwa główne źródła drgań [1, 7, 8, 9]:

- 1) drgania pochodzące od detonacji wielu ładunków MW, umieszczonych powyżej (słupy) i poniżej (fundamenty słupów) powierzchni terenu;
- 2) drgania pochodzące od upadku dużych mas.

Zaburzenia ośrodka rozchodzące się ze skończoną prędkością i przenoszące energię są falą parasejsmiczną (sztuczną, wywołaną działalnością człowieka). Fale te charakteryzowane są różnymi wielkościami fizycznymi (częstotliwość, długość, okres, amplituda, przemieszczenie, przyspieszenie, prędkość przebiegu). Ogólnie rozróżnia się fale (niekoniecznie występujące w każdym przypadku) [8, 9]:

- objętościowe:
 - poprzeczne S o prędkości c_s ,
 - podłużne P o prędkości $c_p \approx 1,71 \cdot c_s$;
- powierzchniowe:
 - Love'a L ,
 - Rayleigha R o prędkości $0,9194 c_s$.

Fale R przenoszą około 67% energii, fale S — 26% energii, a fale P — 7%.

Wykładnik intensywności tłumienia wynosi 2,0 dla fal P i S oraz 0,5 dla fal R . Wynika z tego, że głównym zagrożeniem dla obiektów będą fale R z racji większych energii i mniejszych tłumień. Jednakże dla oceny nie bierze się pod uwagę rodzaju fali, nawet nie jest ona identyfikowana, bowiem przy różnych prędkościach, odległościach i stopniach opóźnienia strzelań tworzy się złożony obraz drgań. Dlatego do oceny skutków strzelania ważna jest amplituda drgań wzbudzonych strzelaniem. Z inżynierskiego punktu widzenia ważne jest uproszczone połączenie przyczyn i skutków, możliwe do jednoznacznej oceny w tym przypadku: warunków strzelania i wielkości drgań. Podane dalej wzory mają służyć takiemu uproszczeniu problemu.

Istnieje wielu różnych wzorów, które łączą skutki strzelania z pewnymi parametrami strzelania. W wyniku przekształceń tych wzorów uzyskuje się formuły, na podstawie których można wyznaczyć wielkość ładunku dopuszczalnego (bezpiecznego) lub wielkość strefy niebezpiecznej. Tak się jednak składa, że brak jest jednego [7] uniwersalnego wzoru, słusznego w każdych warunkach, a używane wzory mają pewien zakres stosowności, szczególnie jeśli dotyczą odległości miejsca strzelania od obiektu chronionego. Na podstawie wieloletnich doświadczeń własnych można określić, że wzorami, które w miarę poprawnie pozwalają szacować wielkość zagrożeń (lub po przekształceniu — wielkość ładunku bezpiecznego) — dla różnych odległości miejsca strzelania od obiektu chronionego, są omówione dalej wzory:

- wzór Glińskiego — dla odległości od 2 do 5 m;
- wzór Drukovanego — dla odległości od 5 do 25 m;
- wzór Kuzniecova [5] — dla odległości od 25 do 100 m;
- wzór Kuzniecova [5, 3], modyfikacja I — dla odległości od 100 do 200 m;
- wzór Kuzniecova [5, 3], modyfikacja II — dla odległości od 200 do 300 m;
- wzór górniczy — dla odległości powyżej 300 m.

Nie oznacza to, że wykaz stosowanych wzorów jest zakończony, a problem prognozowania skutków — zamknięty. Jest to wstęp do dyskusji i do zgłaszania propozycji lepszych i dokładniejszych rozwiązań.

2.1. Wzór Gliškiego

Dość dokładny wzór, ujmujący istotne dla propagacji fal sejsmicznych wielkości, ma postać

$$Q = \frac{C \cdot r^2 \cdot v^2 \cdot \sigma}{K \cdot D^2 \cdot E} \quad [\text{kg}],$$

gdzie:

Q — wielkość ładunku dopuszczalnego, kg;

C — stała, $C = 15\,700$;

r — wielkość strefy (odległość), m;

v — dopuszczalna prędkość drgań, mm/s;

σ — wytrzymałość na ściskanie (dotyczy fundamentu budowli), MN/m²;

K — stała, $K = 2,1$;

D — prędkość detonacji stosowanego MW, dla dynamitu stosowanego podczas wyburzeń i inicjowanego lontem detonującym $D \approx 6800$ m/s, dla dynamitu lub saletrotu inicjowanego zapalnikami $D \approx 2300$ m/s;

E — energia wybuchu MW, dla dynamitu lub saletrotu $E \approx 4,1$ MJ/kg.

2.2. Wzór Drukovanego

Drukowany [10] proponuje określać wielkość ładunku dopuszczalnego ze wzoru

$$Q = \left[\frac{v^2 \cdot r^2}{3,61} \right]^{0,333} \quad [\text{kg}],$$

gdzie:

v — dopuszczalna prędkość drgań, cm/s;

r — odległość miejsca strzelania od chronionego obiektu, m.

2.3. Wzory Kuzniecova

Wzór podstawowy [5] (dla odległości 25÷100 m) ma postać

$$v = \left(\frac{Q}{r^3} \right)^{0,5} \cdot k,$$

skąd

$$Q = \left(\frac{v}{k} \right)^2 \cdot r^3,$$

dla odległości 100÷200 m:

$$v = \left(\frac{Q}{r^{2,9}} \right)^{0,5} \cdot k,$$

skąd

$$Q = \left(\frac{v}{k} \right)^2 \cdot r^{2,9},$$

dla odległości powyżej 200 m:

$$Q = \left(\frac{v}{k} \right)^2 \cdot r^{2,75},$$

skąd

$$v = \left(\frac{Q}{r^{2,75}} \right)^{0,5} \cdot k,$$

gdzie:

v — prędkość drgań, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$;

Q — wielkość ładunku MW, kg;

r — odległość miejsca detonacji MW od obiektu chronionego, m;

k — generalny współczynnik, będący iloczynem 6 współczynników składowych

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6, \text{ gdzie:}$$

k_1 — współczynnik charakteryzujący grunt przenoszący drgania, wynosi on:

- 150 dla temperatur dodatnich,
- 230 dla ujemnych,
- 510 dla gruntów kurzawkowych, zawodnionych;

k_2 — współczynnik charakteryzujący ustawienie frontu strzelań w stosunku do obiektu chronionego; dla robót wyburzeniowych wartość współczynnika jest uśredniona i wynosi 1;

k_3 — współczynnik określający sposób przekazywania energii podłożu, i tak:

- $k_3 = 2$ przy strzelaniu ładunkami poniżej powierzchni terenu lub przy 1–2 powierzchniach odsłoniętych,
- $k_3 = 1$ przy wyładowaniu energetycznym na powierzchni terenu lub przy 3–4 powierzchniach odsłoniętych,
- $k_3 = 0,5$ przy strzelaniach nad powierzchnią terenu lub przy 5 powierzchniach odsłoniętych,

k_4 — współczynnik czasu przekazywania energii, i tak:

- przy strzelaniu natychmiastowym $k_4 = 1$;
- przy strzelaniu milizwłocznym $k_4 = 1,08/n^{0,5}$, gdzie n jest liczbą grup milizwłoczných (ilości opóźnień) w danej serii strzelania;
- przy upadku mas istotny jest czas przekazywania podłożu energii upadku, i dla tego przypadku określa się, że współczynnik

$$k_4 = \frac{0,175}{t^{0,5}},$$

gdzie t jest czasem wyładowania energetycznego, s;

k_5 — współczynnik uwzględniający sposób umieszczania ładunku w wyburzanym bloku, $k_5 = 0,7 \div 1,0$ (ważny jest kierunek otworów strzałowych);

k_6 — współczynnik uwzględniający wpływ liczby szeregów ładunków ustawionych względem obiektu chronionego, i tak:

- dla 1 szeregu $k_6 = 1,0$;
- dla 2 szeregów $k_6 = 1,15$;
- dla 3 szeregów $k_6 = 1,3$;
- dla 4 szeregów $k_6 = 1,4$.

Wzór ten daje bardzo poprawne wyniki (pod warunkiem właściwego ilościowego oszacowania parametrów składowych od k_1 do k_6) dla odległości większych od 25 m, ponadto bezpieczne w przedziale 10÷25 m i zawyżone przy odległościach większych od 100 m. Zawyżenie to sukcesywnie wzrasta w miarę wzrostu odległości, dlatego po pewnej modyfikacji wzór ten nadaje się do inżynierskiego prognozowania skutków — ale w określonym przedziale odległości.

2.4. Wzór górniczy

Wielkość ładunku dopuszczalnego (natychmiastowego lub przypadającego na jedno opóźnienie milisekundowe) przy odległościach większych od 300 m można obliczyć z polskiego wzoru górniczego

$$Q = (r \cdot \varphi)^2 \quad [\text{kg}],$$

gdzie:

r — odległość miejsca strzelania od obiektu chronionego;

φ — współczynnik zależny od prędkości podłużnych fal przemieszczających się w ośrodku, na którym posadowiono obiekt chroniony.

Jeśli prędkość podłużnych fal sprężystych w danym ośrodku jest mniejsza niż 2000 m/s, wówczas wartość współczynnika φ wynosi 0,015÷0,019. Jeśli prędkość podłużnych fal sprężystych mieści się w przedziale 2000÷3000 m/s, wówczas wartość φ wynosi 0,02÷0,025. Jeśli prędkość podłużnych fal sprężystych w ośrodku przekracza 3000 m/s, wówczas wartość

współczynnika ϕ wynosi $0,026 \div 0,03$. Prognozy dotyczą wielkości ładunku określanego na jeden stopień opóźnienia strzelania milisekundowego, pod warunkiem, że odstęp czasu między kolejnymi odstrzałami milisekundowymi jest większy niż $T/2$, gdzie T — okres drgań, a $1/T$ częstotliwość drgań wzbudzonych wybuchem. W robotach wyburzeniowych częstotliwość drgań jest większa niż w robotach górniczych i wynosi od 20 do 50 Hz. Wstępnie można założyć, że $T = 0,023 \cdot Q^{0,185}$, s.

2.5. Uwagi praktyczne

Wykonywanie wyburzeń obiektów wieloprzestrzennych, wszędzie tam gdzie pozwalają na to warunki miejscowe, odbywać się powinno z zastosowaniem zapalników półsekundowych. Wybuch każdego ładunku może być traktowany jako odrębny, jeśli odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi wybuchami jest większy niż połowa okresu drgań ($t > 0,5 T$). W przypadku strzelań wyburzeniowych częstotliwość drgań mieści się w przedziale $20 \div 50$ Hz, $T = 20 \div 50$ ms, wartość graniczna $t = 10 \div 25$ ms. Jeśli kolejne sygnały drgań będą dochodziły do obiektu chronionego w czasie większym od t , każdy taki wybuch można będzie traktować jako niezależny. Przy likwidacji wielkich obiektów, gdy konieczne jest stosowanie dużej liczby otworów strzałowych i dużej masy materiału wybuchowego przy bliskości obiektu chronionego strzelanie może być wykluczone, jeśli wszystkie ładunki zdetonują w czasie mniejszym od $0,5 T$. Dlatego w praktyce można stosować dwa sposoby inicjacji ładunków:

- 1) inicjacja zapalnikami półsekundowymi;
- 2) inicjacja zapalnikami nieelektrycznymi (system Nonel).

Każdy z tych sposobów ma swoje wady i zalety.

Inicjacja nieelektryczna (system Nonel) pozwala na bezpośrednie zastosowanie zapalników LP o zwłocie do 6 s. System ten jest precyzyjny i przy planowaniu strzelania można dokładnie zaplanować ilość MW i czas jego detonacji. Pozwoli to przy dobrych pomiarach dokładnie powiązać skutki z przyczynami. Inicjacja nieelektryczna umożliwia też stosowanie różnych kombinacji opóźnień: poprzez zapalniki (w otworze) i konektory (na powierzchni). Umożliwia to dowolną konfigurację opóźnień i niemal dowolny czas trwania serii (sumowanie czasów konektorów). Ma on jednakże kilka wad (z punktu widzenia strzelania wyburzeniowego):

- nie pozwala na kontrolę ciągłości obwodu metodami pomiarowymi,
- sygnał główny przenoszony jest szeregowo,
- jest kilkakrotnie droższy od zapalników.

System odpalania zapalnikami elektrycznymi półsekundowymi ma jedną podstawową wadę: brak zapalarek do odpalenia szeregowego kilku tysięcy zapalników, także przy połączeniach mieszanych — możliwości jednej zapalarki nie wystarczają.

Natomiast to, co jest pozorną wadą zapalników elektrycznych półsekundowych: rozrzut czasów zadziałania (czas rzeczywisty zadziałania może być różny od czasu nominalnego

o 0,2 s), tworzy serię quasi-milisekundową, co jest ogromną zaletą, jeśli idzie o ograniczenie negatywnego oddziaływania. W praktyce pomiar wskazuje na skutek odpalenia ładunku wielokrotnie mniejszego. Rozwiązaniem perspektywnym jest wykorzystanie zapalników elektrycznych (niekoniecznie półsekundowych) do inicjacji wiązek zapalników NONEL inicjujących ładunki w otworach. W takiej sytuacji istnieje możliwość kontroli obwodu strzałowego, ryzyko dużej liczby niewypałów radykalnie maleje. Zaletą jest też możliwość dowolnej konfiguracji czasowej strzelania.

Przy likwidacji obiektów [7] wieloprzestrzennych o masie nieraz kilkudziesięciu tys. Mg występuje swoiste nakładanie się skutków parasejsmicznych, pochodzących od strzelania i od upadku dużych mas. Można wówczas wydzielić trzy grupy oddziaływań:

- 1) skutki pochodzące tylko od strzelania;
- 2) skutki pochodzące od oddziaływań strzelania i upadku mas;
- 3) skutki pochodzące tylko od upadku mas.

Na sejsmogramach można wydzielić pewne fragmenty zapisu odnoszące sejsmiczne skutki strzelania do wielkości odpalonego ładunku. Niezależnie od prognoz dokonywanych wcześniej, można określić rzeczywistą wartość współczynnika K . Dla momentu „czystego strzelania” (bez nakładania się upadku mas) dane charakterystyczne przedstawiono w tabeli 1, ujmującej wielkość ładunku, numer zapalnika półsekundowego, parametry oceny oraz wartość analizowanego współczynnika.

TABELA 1

Wyznaczenie wartości współczynnika sejsmicznego oddziaływania wybuchu

Numer zapalnika	Wielkość ładunku, kg	Prędkość drgań, cm/s	Wartość współczynnika K
3	12	0,103	32,64
4	21	0,12	28,75
5	27	0,122	25,77
6	31,8	0,095	18,49
7	43,8	0,103	17,08
8	43,8	0,111	18,42

Średnia wartość współczynnika K wynosi 23,52. Przyjmowana do oceny oddziaływania na otoczenie wartość K mieściła się w przedziale 14,7÷28,3. Świadczy to o tym, że prognozy oddziaływania strzelania na otoczenie zostały sporządzone prawidłowo. W tabeli 2 podano odpowiednie dane odnoszące się do łącznego oddziaływania na otoczenie strzelania i upadku.

Ładunek ekwiwalentny jest sumą masy użytego MW i energii upadku części obiektu, przeliczonej na masę MW tego samego rodzaju.

TABELA 2

Wartości współczynnika K dla oddziaływań łącznych

Numer zapalnika	Ładunek ekwiwalentny, kg	Prędkość drgań, cm/s	Wartość współczynnika K
9	43,5	0,205	33,43 (początek upadku)
10	80,5	0,335	41,0
11	70,0	0,35	45,9
12	74,2	0,36	45,9
13	74,2	0,29	37,0
14	74,2	0,233	29,7

Wartość średnia K wynosi 38,82. Do obliczeń prognostycznych przyjmowano od 28,35 do 40,5. Ekwiwalent energii upadku przyjmowano jako średnią część masy przypadającą na jeden stopień opóźnienia. W praktyce upadki odbywają się skokami, po przekroczeniu wytrzymałości pewnej części obiektu. Dokładna analiza byłaby możliwa po całkowitym skorelowaniu upadku mas z wynikami pomiarów.

3. Zagrożenie rozrzutem

Rozrzut odłamków jest naturalnym zagrożeniem powstającym przy prowadzeniu wszelkich prac strzałowych. Cechą charakterystyczną jest to, że rozrzut jest łatwo spostrzegany podczas prac strzałowych. Minimalizacja lub eliminacja tego zagrożenia w określonych przypadkach jest kosztowna, praco- i materiałochłonna. W warunkach górniczych w Polsce wielkość rozrzutu jest określana odpowiednimi zależnościami, przepisami i tabelami, a strefa niebezpieczna jest chroniona w ustalony przepisami sposób. W pracach wyburzeniowych metodyka i przepisy obowiązujące w górnictwie nie mogą mieć zastosowania, gdyż warunki wykonywania prac strzałowych są diametralnie różne. Przy pracach wyburzeniowych nie da się zastosować „górnicznej” strefy bezpieczeństwa, gdyż strzelania prowadzone są z reguły w gęstej infrastrukturze, odległości miejsca strzelania od obiektu chronionego (lub obiektów chronionych) są znacznie mniejsze od wielkości strefy bezpieczeństwa określonej prawnie. Kolejne etapy prawidłowej walki z tym zagrożeniem obejmują:

1. Obliczenia prognostyczne wielkości rozrzutu.
2. Wyznaczenie dla danych warunków dopuszczalnej wielkości ładunku cząstkowego materiału wybuchowego.
3. Stosowanie technik strzelniczych prowadzących do minimalizacji rozrzutu odłamków lub ukierunkowywanie rozrzutu w stronę „bezpieczną”.
4. Wykorzystywanie elementów budowli wyburzanej jako naturalnej osłony przed rozrzutem (ważna jest kolejność prac strzałowych) oraz wykorzystanie do osłony budowli otaczających.

5. Stosowanie różnego rodzaju mechanicznych zabezpieczeń przed rozrzutem (maty słomiane, taśmy, faszyna, darni, deski, siatki, podkłady, worki foliowe z wodą, zużyte wykładziny, gałęzie itp.).

Wzorem, który może posłużyć do wyznaczania stref rozrzutu oraz do tworzenia odpowiednich nomogramów, a w dalszej kolejności do określania dopuszczalnej wielkości ładunku (co wpływa na technologię wyburzenia), jest wzór Pokrowskiego [10]

$$r = 0,66667 \cdot z \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{2000 \cdot Q}{\gamma_o \cdot z^3} - 0,7 \right]^{0,66667} \right\}^4,$$

gdzie:

- Q — ciężar ładunku jednostkowego (cząstkowego) MW, który bezpośrednio oddziałuje na urabiany ośrodek; musi to być jednak ładunek o takiej wielkości, aby można go było uważać za ładunek skupiony;
- z — zabiór (najbliższa odległość od środka ładunku do powierzchni odsłoniętej), m;
- r — wielkość strefy rozrzutu, m;
- γ_o — ciężar objętościowy materiału ośrodka, kg/m³.

Wzór ten dla prawidłowego zastosowania wymaga właściwej interpretacji zjawisk fizycznych zachodzących podczas urabiania materiału ośrodka wybuchem. W tym celu należy podzielić ładunek w otworze strzałowym na odcinki nie większe niż $4d$ i dla tak określonego ładunku z podanego wyżej wzoru Pokrowskiego policzyć wielkość promienia strefy rozrzutu. W ten sposób uzyska się pierwsze przybliżenie wielkości rozrzutu, lecz cząstka materiału ośrodka uzyskuje impuls nie tylko z ładunku cząstkowego znajdującego się najbliżej, ale i z kolejnych ładunków sąsiednich (wynikających z umownego podziału ładunku całkowitego na ładunki cząstkowe). Oczywiście jest, że wpływ na wielkość rozrzutu coraz dalszych ładunków MW będzie coraz mniejszy (silny wzrost z^3). Łączną wielkość strefy rozrzutu uzyska się sumując (choć to sformułowanie nie jest precyzyjne) kolejne przyrosty wartości r od kolejnych ładunków cząstkowych (obliczanych dla danej cząstki materiału ośrodka). System takiego „naliczania” strefy rozrzutu potwierdził się w praktyce, że względu jednak na znikome działanie ładunków oddalonych na analizowaną cząstkę przyjmuje się tę wielkość rozrzutu, jaka wynika z obliczeń dla I przybliżenia, i ewentualnie powiększa się ją o 20%. W praktyce oznacza to, że szczególnie przy kruszeniu elementów płaskich lub długich ładunek całkowity powinien się składać z szeregu ładunków cząstkowych (rozcłonkowanych), co daje nie tylko równomierne „wysycenie” materiału ośrodka ładunkami wybuchowymi, ale i w konsekwencji zmniejsza zagrożenie rozrzutem.

W celu eliminacji lub zmniejszenia rozrzutu [3, 7] powinny być stosowane technologiczne i techniczne sposoby zmniejszania rozrzutu.

Technologiczne sposoby zmniejszenia rozrzutu odłamków to:

- **przesuwanie środka ciężkości** ładunku w dół wszędzie tam, gdzie jest to możliwe i technicznie uzasadnione;

- **ukierunkowanie rozrzutu** przez odpowiedni dobór opóźnień zapalników milisekundowych (w stronę najbardziej bezpieczną);
- **kolejność wyburzania**; istniejące elementy infrastruktury przemysłowej mogą stanowić naturalną osłonę wyłapującą odłamki skalne niemal przy źródle ich powstawania;
- **celowe ukierunkowanie mas** zderzających się po wybuchu, co radykalnie zmniejsza rozrzut odłamków w stronę chronioną.

Techniczne metody zmniejszania zagrożeń rozrzutem obejmują:

- stosowanie przykryć elementów wyburzanych taśmami z przenośników taśmowych;
- wykorzystywanie przykryć z faszyny;
- używanie mat słomianych, desek, zużytych podkładów kolejowych, darni, siana, słomy, siatki itp.;
- nieodkrywanie części fundamentów znajdujących się w ziemi (ziemia jest wówczas naturalną ochroną przed rozrzutem).

Przytoczone metody postępowania dają możliwość wyeliminowania negatywnych skutków odstrzału (rozrzutu odłamków), a przynajmniej znacznie je ograniczają.

4. Zagrożenie powietrzną falą uderzeniową (PFU)

Działanie powietrznej fali uderzeniowej bywa potocznie (oraz w niektórych aktach prawnych dotyczących tego zjawiska) określane jako podmuch. W takim ujęciu podmuch jest ogólnym oddziaływaniem łączącym w sobie sam podmuch (ruch gazów) i PFU. Mimo istnienia „prawnej” zależności pomiędzy wielkością ładunku a strefą zagrożenia podmuchem (zależności poprawnej dla górnictwa), w robotach wyburzeniowych zależność taka praktycznie nie istnieje. W robotach tych ważna jest nie tylko ilość MW odpalanego w serii, ale także sposób odpalania bądź inicjacji MW, a przede wszystkim — stopień odsłonięcia MW. W Polsce istnieje pewien formalny podział stref zagrożenia związanych z oddziaływaniem powietrznych fal uderzeniowych na strefy:

- przylegającą, w której wielkość nadciśnienia PFU (Δp) przekracza 2 MPa;
- bezpośrednią, w której wielkość Δp wynosi od 0,25 do 2 MPa;
- bliską, w której wielkość Δp wynosi od 35 do 250 kPa;
- pośrednią, w której wielkość Δp wynosi od 2 do 35 kPa;
- daleką, w której wielkość Δp wynosi poniżej 2 kPa.

Oddziaływanie PFU na ludzi i obiekty można — na podstawie publikacji [1] oraz opracowań niepublikowanych [3], określić następująco:

- **dla obiektów**
 - Δp do 2 kPa — strefa daleka, wielkość PFU nieszkodliwa dla budynków;
 - Δp powyżej 14 kPa — niszczenie szyb okiennych;
 - Δp powyżej 21 kPa — niszczenie drzwi drewnianych;
 - Δp powyżej 56 kPa — niszczenie ścian z cegły;

— dla ludzi

- Δp do 10 kPa — brak obrażeń u ludzi, strefa bezpieczna;
- Δp 10÷17,5 kPa — możliwość uszkodzenia bębenków słuchowych;
- Δp 17,5÷40 kPa — uszkodzenie układu oddechowego, pękanie płuc;
- Δp powyżej 100 kPa — uszkodzenie słuchu w 50%;
- Δp powyżej 200 kPa — początek zagrożeń śmiertelnych;
- Δp powyżej 300 kPa — śmierć ludzi.

Bywają też inne kryteria oceny szkodliwości [1].

Faktyczne przeciętne wielkości nadciśnienia PFU na obiektach chronionych, występujące podczas strzałów [3] wyburzeniowych, sięgają kilkuset Pa. Prognozowanie wielkości Δp jest bardzo trudne i zależy m.in. od:

- wielkości ładunku,
- odległości miejsca pomiaru od miejsca strzelania,
- sposobu inicjacji,
- sposobu umieszczenia ładunku w wyburzanym tworzywie,
- wielkości przybitki,
- usytuowania frontu strzelania w stosunku do obiektu chronionego.

Podczas strzałów przygotowawczych do wyburzenia Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla w KWK „Siersza” uzyskano zmienne, zależne od sposobu strzelania, wyniki wielkości nadciśnienia PFU rejestrowane na tym samym obiekcie, co pozwoliło na próbę powiązania skutków z przyczynami.

Przy odpalaniu 100 kg MW w fundamentach wagi kolejowej, gdy przybitka była znaczna, uzyskana wielkość nadciśnienia w PFU sięgała 2÷5 Pa. Przy odpalaniu 40 ładunków po 0,05 kg każdy inicjowanych lontem detonującym, przy przybitce sięgającej 10÷15 cm zmierzono Δp 340 Pa. W obu przypadkach odległość miejsca strzelania od punktu pomiarowego była taka sama i wynosiła 125 m.

Wielkość Δp dla ładunków nakładanych, odpalanych na powierzchni terenu, przy istnieniu poszycia, można określić ze wzoru stosowanego przez specjalistów wojskowych

$$\Delta p = 3,2 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot r^{-2} \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

W opracowaniach dla górnictwa odkrywkowego [1] można znaleźć wzór empiryczny, adekwatny do warunków strzałów stosowanych w tym górnictwie. Dla oceny wielkości Δp wygenerowanej podczas likwidacji obiektów skomplikowanych nadaje się tylko w tym przypadku, gdy warunki tych strzałów pokrywają się z warunkami strzałów w górnictwie.

Wzór ten ma postać ogólną

$$\Delta p = a \cdot \left(\frac{r}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1,2} \quad [\text{Pa}] \quad (12)$$

stąd

$$a = \frac{\Delta p}{\left(\frac{Q^3}{r} \right)^{1,2}} \quad (13)$$

gdzie:

- Q — czynna wielkość ładunku, kg;
- r — odległość miejsca strzelania od obiektu chronionego, m;
- $a = f(z)$
- z — wielkość zabioru, m.

Dla strzelań ładunkami na powierzchni wartość a wg [1] wynosi 186 500, natomiast dla ładunków w otworach $a = 1865 \div 5895$. W robotach wyburzeniowych tak duży rozstęp wartości współczynnika uniemożliwia w miarę dokładną prognozę. Na podstawie dokładnych danych, uzyskanych przy strzelaniach wyburzeniowych w KWK „Siersza”, można było wydzielić następujące grupy informacji:

- wielkość ładunku przypadającą na jedno opóźnienie,
- warunki detonacji ładunku,
- wynik strzelania.

Wyniki strzelań przedstawiono w tabeli 3 (będącej ilustracją rozrzutu wyników dla tego samego typu strzelania) i w tabeli 4 określającej wartość współczynnika a dla różnych zabiorów. Inicjacja ładunków odbywała się za pomocą zapalników półsekundowych, co znacznie ułatwiało późniejszą analizę.

TABELA 3

Wartości Δp i współczynnika a dla tego samego typu strzelań

Numer zapalnika	Wielkość ładunku, kg	Wielkość Δp , Pa	Wartość współczynnika a	Zabior, m	Δp wg wzoru (11), Pa
3	12	115	13970	0,4	1073
4	21	110	10680	0,4	1559
5	27	120	10540	0,4	1843
6	31,8	90	7405	0,4	2056
7	43,8	125	9050	0,4	2545
8	43,8	80	5800	0,4	2545
9	45,3	140	10000	0,4	2602
10	24,3	140	12830	0,4	1718
11	13,8	130	14940	0,4	1178

Średnia wartość współczynnika a dla tego typu strzelań (słupy, grube belki) stosowanych dla kaskadowego posadowienia obiektu wynosi 10580 przy wartości odchylenia standardowego $s(x) = 2983$. Błąd standardowy $s(x') = s(x)/n^{0,5} = 995$. Wartości współczynnika a dla innych warunków strzelań przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Wartości Δp i współczynnika a dla różnych zabiorów

Numer zapalnika	Wielkość ładunku, kg	Wielkość Δp , Pa	Wartość współczynnika a	Zabior, m	Δp wg wzoru (11), Pa
12	18	110	11 360	0,5	1406
13	18	100	10 330	0,5	1406
14	18	70	7230	0,5	1406
natychmiastowy	2,386	340	79 100	0,1	363*
5	9,6	220	29 230	0,2	952
7	12	255	30 990	0,2	1073
dowolny	2,5	5	1138	1,2	377

* Według wzoru górniczego dla ładunku odpalonego na powierzchni uzyskano by 388 Pa

Z przytoczonych danych wynika jednoznacznie, że wartość współczynnika a zależy od wielkości zabioru, stąd po modyfikacji wzór powinien mieć postać

$$\Delta p = f(z) \cdot \left(\frac{r}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1,2} [\text{Pa}] \quad (14)$$

gdzie $a = f(z)$ i wynosi w przybliżeniu:

- dla strzelań fundamentów umieszczonych głęboko, przy których wielkość zabioru przekracza 1,0 m — $a = 1100$;
- dla strzelań słupów osadzonych w fundamentach położonych poniżej poziomu terenu ($z = 0,5$ m) — $a = 9600$;
- dla strzelań belek i słupów grubych (strzelania charakterystyczne dla obalania obiektów, przy obalaniu lub strzelaniu kaskadowym) — $a = 10\,600$;
- dla strzelań elementów cienkościennych (20÷30 cm) otworami pionowymi przebiegającymi równolegle do ścianek (przy zabiorze wynoszącym około 0,15÷0,2 m) — $a = 30\,000$;
- dla strzelań w płytach żelbetowych o grubości 20÷25 cm, z zewnętrzną inicjacją lontową (dla małych ładunków wewnątrz płyty, przy $z = 0,1$ m) — $a = 79\,000$;
- przy strzelaniu ładunkami odkrytymi na powierzchni ($z = 0$) — $a = 186\,500$.

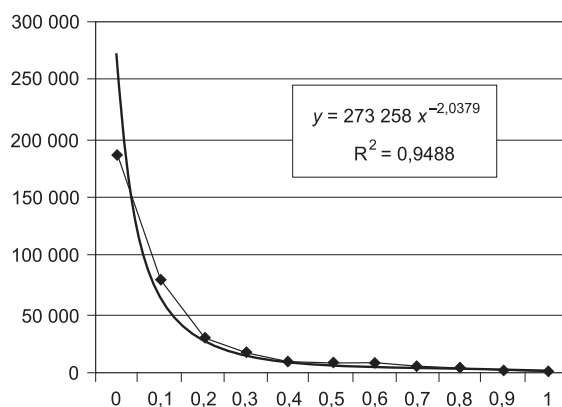
Funkcja $a = f(z)$ może zostać określona w przybliżeniu w sposób pokazany na rysunku 1, przy czym uproszczona postać ostateczna jest następująca

$$a = 270\,000 \cdot \left(\frac{z + 0,1}{0,1} \right)^{-2} \quad (15)$$

zaś wzór dla Δp ma postać końcową

$$\Delta p = 270\,000 \cdot \left(\frac{z + 0,1}{0,1} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{r}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1,2} \quad (16)$$

Wzór daje poprawne wyniki, jeśli wielkość zabioru (linii najmniejszego oporu) jest większa od 0,1 m. W strzelaniach wyburzeniowych bardzo rzadko spotyka się zabiory mniejsze od 0,1 m i większe od 1,0 m, dlatego wzór ten daje podstawy do prawidłowej oceny zagrożenia powietrzną falą uderzeniową powstałą podczas tych strzałów.



Rys. 1. Zależność wartości współczynnika a od wielkości zabioru

5. Sposób prognozowania skutków upadku dużych mas

Upadek dużych mas jest istotnym zagrożeniem dla otoczenia ze względu na:

- zagrożenie niekontrolowanym kierunkiem upadku;
- możliwość wzbudzenia drgań, których parametry przekroczą wielkości dopuszczalne;
- możliwość wywołania podmuchu w najbliższym rejonie upadku (zagrożenie to jest najmniej istotne).

Najpoważniejszym zagrożeniem jest energia upadku, przechodząca w drgania o stosunkowo niskiej częstotliwości i wysokiej energii.

Energia upadku może być obliczona w prosty sposób, jako energia potencjalna obiektu

$$E = m \cdot g \cdot h \cdot 10^{-6} \quad [\text{MJ}],$$

gdzie:

E — energia upadku;

m — masa obiektu, kg;

g — przyspieszenie ziemskie, $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;

h — wysokość środka ciężkości obiektu, m.

Dla obiektów wysokich, dla których podczas upadku występują skomplikowane zjawiska fizyczne, energia upadku liczona może być jak energia kinetyczna, zsumowana dla poszczególnych elementów obiektu ($E = m \cdot v^2 / 2$), uwzględniająca zmiany prędkości padania pod wpływem wiatru, oporów powietrza, momentów hamujących, kumulacji energii w sprężystych elementach padającego obiektu itp. Rzeczywista wielkość energii upadku w takim przypadku jest mniejsza od energii potencjalnej, a różnica może dochodzić do kilkunastu procent.

Po wyznaczeniu wielkości energii upadku należy przeliczyć ją na uśredniony ekwiwalent dynamitowy, oznaczony jako $Q_{\text{DS}} = E / 4,06$. Odpowiada to detonacji określonej ilości dynamitu (kg) i tę wielkość Q podstawia się do wzorów Kuzniecova dla obliczenia wielkości drgań wygenerowanych upadkiem dużych mas, ze szczególnym uwzględnieniem współczynnika dotyczącego czasu przekazywania energii podłożu. W przypadku stosowania wałów łamiących wielkość energii upadku należy pomniejszyć o wielkość energii zużytej (rozproszonej) na wałach i dopiero wtedy obliczać wartość Q_{DS} . W przypadku stosowania rowów przeciwcsejsmicznych, do obliczeń oddziaływania należy przyjąć tę wielkość energii, która przechodzi przez przeszkodę (zwykle wytraceni ulega 40÷60% energii upadku). Wynika z tego, że wały i rowy są w stanie wytłumić znaczną część energii, zaś jej reszta powinna być przeliczana na ekwiwalent MW i traktowana jako Q we wzorach prognostycznych. Nie da się uniknąć stwierdzenia, że model ten wykorzystuje znaczne uproszczenie zjawisk. Ma jednak jedną zaletę — w przybliżeniu odpowiada rzeczywistości.

6. Podsumowanie

Inżynierskie metody prognozowania zagrożeń pozwalają na w miarę dokładne i stosunkowo proste oszacowanie wielkości tych zagrożeń oraz dają możliwość porównania wielkości zagrożeń prognozowanych z wielkościami zagrożeń dopuszczalnych. Umożliwiają projektowanie robót wyburzeniowych (podział obiektu, serie strzelań, techniki inicjowania, systemy zabezpieczeń), tak by ich realizacja nie zagrażała otoczeniu — w odniesieniu do

poszczególnych rodzajów zagrożeń. Stosowana zasada *primum non nocere* pozwala na praktycznie bezpieczne wykonanie niemal każdego zadania wyburzeniowego. Pominęto tu szczególne metody i technologie likwidacji obiektów, gdyż rozwiązania szczególne wynikają z warunków brzegowych, narzuconych przez wyniki obliczeń prognostycznych. Pominęto też warunki związane ze statyką budowli i wytrzymałością materiałów, gdyż te warunki wchodzą w zakres rozwiązań szczególnych.

Można powiedzieć, że w chwili obecnej dysponujemy narzędziami pozwalającymi nie tylko przewidzieć w miarę dokładnie skutki naszych poczynąń (przy nieustającej weryfikacji spostrzeżeń), ale również zaplanować taki sposób rozbiórki, by skutki nie przekroczyły oddziaływań dozwolonych. Zasada *primum non nocere* realizowana jest przez:

- określenie wielkości parametrów dopuszczalnych dla danych obiektów chronionych;
- wyznaczenie dopuszczalnych wielkości ładunków i sposobów inicjowania;
- opracowanie technologii rozbiórki spełniającej warunki bezpieczeństwa;
- obserwacje efektów strzelania pozwalające na korektę wzorów, współczynników i metod.

LITERATURA

- [1] Onderka Z., Sieradzki J., Winzer J.: Wpływ robót strzelniczych na otoczenie kopalń odkrywkowych. UWND AGH, Kraków 2003
- [2] Batko P., Ślęzak J., Lewicki J., Morawa R.: Górnicze środki i sprzęt strzałowy. Tom 1. UWND AGH, Kraków 1998
- [3] Lewicki J., Krzyworączka P.: Specjalne metody likwidacji wybuchowej obiektów skomplikowanych. AGH, Kraków 2003 (badania własne nr 11.11.100.868 — praca niepublikowana)
- [4] PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki
- [5] Kuznecov G.V.: Sejsmičeskaja bezopasnost sooruženii pri vzrywnych rabotach na kar'erach. Gornyj Žurnal, nr 4, 1971
- [6] Lewicki J., Batko P.: Wybrane problemy likwidacji kopalnianych obiektów budowlanych. Materiały konferencji nt. Technika strzelnicza w górnictwie, ART-TEKST, Jaszowiec 2001
- [7] Lewicki J., Batko P., Morawa R. i in.: Opracowanie warunków bezpiecznego wyburzania różnych obiektów — dokumentacje i opracowania archiwalne z lat 1985–2003
- [8] Batko P.: Wpływ właściwości strzelniczych materiału wybuchowego na efekt sejsmiczny strzelania: IGSMiE PAN. Seria: Studia, Rozprawy, Monografie, nr 105, Kraków 2002
- [9] Gurgul M.: Analiza szkodliwego oddziaływania robót strzałowych prowadzonych w kopalni „Żelatowa”. AGH, Kraków 2004 (praca dyplomowa)
- [10] Sulima-Samujłło J.: Inżynieria strzelnicza. Cz. III. Skrypt uczelniany AGH nr 666, Kraków 1979

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.