

*Michalina Machowicz\**

## ODDZIAŁYWANIE POWIETRZNEJ FALI UDERZENIOWEJ NA OTOCZENIE \*\*

---

### 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zagrożeń powstających podczas prowadzenia robót z zastosowaniem materiałów wybuchowych (MW), oprócz emisji drgań parasejsmicznych, rozrzutu odłamków skalnych, skażenia środowiska, pylenia, jest działanie powietrznej fali uderzeniowej (PFU).

Obowiązek wyznaczania stref bezpieczeństwa ze względu na działanie PFU jest regulowany przez odpowiednie przepisy: 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. Nr 72, poz. 655) oraz Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie rozbiórek obiektów budowlanych wykonywanych metodą wybuchową (Dz.U. Nr 120, poz. 1135).

Pomimo że detonacja materiału wybuchowego powoduje powstanie powietrznej fali uderzeniowej zarówno przy zastosowaniu materiałów wojskowych, jak i cywilnych, i w obu wypadkach ma ona podobny charakter, to obydwie te środowiska podchodzą do problemu nieco inaczej. Inaczej intensywność PFU i wielkość nadciśnienia jest określana w literaturze i przepisach cywilnych, inaczej w technice wojskowej, a przecież wzory opisujące PFU dotyczą tego samego zagadnienia.

### 2. Powstawanie PFU

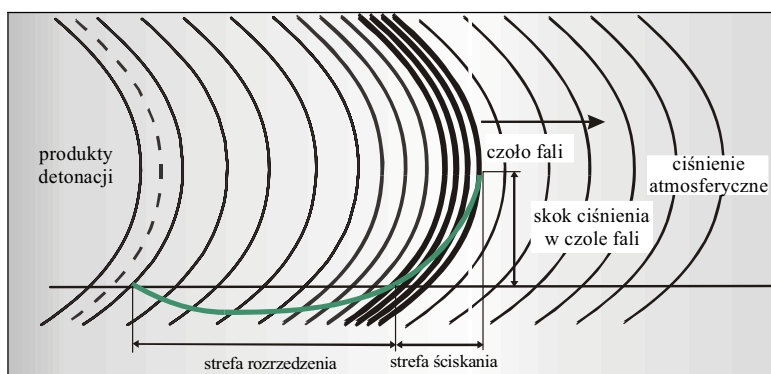
Na skutek detonacji tworzy się wokół źródła wybuchu strefa nagranych produktów gazowych o ciśnieniu znacznie (od kilkudziesięciu do kilkuset razy) przewyższającym wartość ciśnienia panującego w środowisku przed detonacją.

---

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

\*\* Artykuł opracowano w ramach badań statutowych, umowa 11.11.100.953

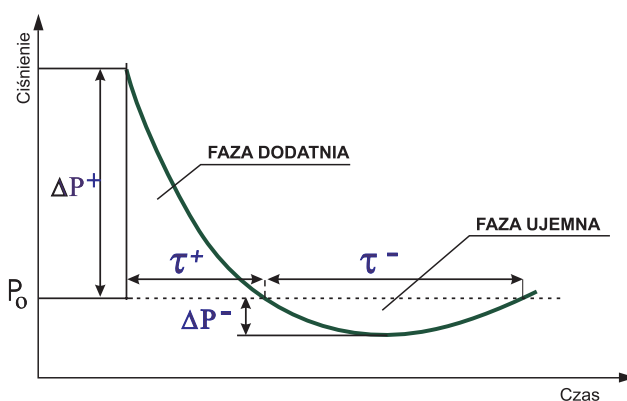
Gazy te rozprzestrzeniają się w kierunku od centrum wybuchu, w postaci fal o wysokiej temperaturze, gęstości i ciśnieniu. Za czołem fali uderzeniowej, następuje rozprężanie produktów gazowych, niosąc za sobą łagodny spadek ich ciśnienia (rys. 1). W rezultacie prowadzi to do obniżenia ich prędkości gazów. Spadek ten spowodowany jest przemieszczającymi się tuż za falą uderzeniową **falą odciążenia** (rozrzedzenia) [2].



Rys. 1. Przebieg ciśnienia w powybuchowej powietrznej fali uderzeniowej

W pewnej odległości od źródła detonacji prędkość gazów postrzałowych spada do zera, a FU rozprzestrzenia się dalej na skutek działania sił bezwładności. Następnie ciśnienie fali uderzeniowej osiąga wartość ciśnienia atmosferycznego, a prędkość fali — prędkość dźwięku. FU rozchodzi się dalej jako fala akustyczna [3].

Wielkościami opisującymi ruch powietrznej fali uderzeniowej zarówno według literatury cywilnej, jak i wojskowej są: nadciśnienie PFU lub impuls nadciśnienia. Impuls nadciśnienia charakteryzowany jest przez nadciśnienie na czołe fali  $\Delta p^+$  (jako zmianę ciśnienia PFU w czasie) oraz czas trwania fazy dodatniej  $\tau^+$  (rys. 2).



Rys. 2. Zmiana impulsu nadciśnienia w czasie

### 3. Metody stosowane w technice cywilnej

Jak już wspomniano, parametrami PFU zasadniczo wpływającymi na powstawanie zagrożeń dla otoczenia są: impuls nadciśnienia i nadciśnienie fali uderzeniowej.

W technice cywilnej ze względów praktycznych brana jest pod uwagę szkodliwość oddziaływania PFU w zakresie ciśnień o niskich wartościach, gdyż właśnie takie występują przy obiekcie chronionym, w znacznej odległości od centrum wybuchu.

Z analizy dotyczącej przemysłowych strzelań wynika, że impuls nadciśnienia przy „małych odległościach” [3] można wyznaczyć, stosując wzory, w których zależy on od masy detonowanego ładunku i odległości od miejsca wybuchu do obiektu chronionego ((1) i (2)). Jednak nie wiadomo, gdzie znajduje się ta granica, poniżej której wartości odległości należy rozumieć jako małe

— dla ładunków na powierzchni terenu

$$I = 63 \cdot g \cdot \frac{m^{2/3}}{r} \quad (1)$$

— dla ładunku MW w powietrzu

$$I = 40 \cdot \frac{m^{2/3}}{r} \quad (2)$$

gdzie:

$g$  — przyspieszenie ziemskie,

$m$  — masa ładunku MW,

$r$  — odległość od miejsca wybuchu do obiektu chronionego.

Ponadto stosuje się pojęcie **odległości względnej**, inaczej **odległości zredukowanej**  $r$ , która umożliwi porównanie ciśnień dla różnych mas ładunku materiału wybuchowego w zmiennej odległości.

$$\bar{r} = \frac{r}{m^{1/3}} \quad (3)$$

gdzie:

$r$  — odległość od centrum wybuchu,

$m$  — masa ładunku MW.

W literaturze proponowane są także wzory wyznaczone doświadczalnie. Dotyczą one różnych warunków realizowanego strzelania i wskazują, że ciśnienie jest funkcją tylko

względnej odległości. Uwzględniany jest tutaj związek tylko trzech czynników: ciśnienia, masy ładunku i odległości.

Wzór ma następującą postać ogólną

$$\Delta p = k_p \cdot \left( \frac{m^{1/3}}{r} \right)^\beta = k_p \cdot [(\bar{r})^{(-1)}]^\beta \quad (4)$$

— dla ładunku umieszczonego na powierzchni

$$\Delta p = 186\,500 \cdot \left( \frac{r}{m^{1/2}} \right)^{-1,2} \quad (5)$$

— dla ładunku umieszczonego w kaliźnie skalnej przy strzelaniu (otwory krótkie i długie)

$$\Delta p = (1865 \div 5895) \cdot \left( \frac{r}{m^{1/3}} \right)^{-1,2} \quad (6)$$

— przy strzelaniu rozszczepkowym ładunkami nakładanymi

$$\Delta p = 6 \cdot 10^8 \cdot (\bar{r})^{2,9} \quad (7)$$

— przy strzelaniu rozszczepkowym ładunkami w otworach bez przybitki

$$\Delta p = 1,2 \cdot 10^7 \cdot (\bar{r})^{2,48} \quad (8)$$

— przy strzelaniu krótkimi otworami w progach podścianowych

$$\Delta p = 1,6 \cdot 10^4 \cdot (\bar{r})^{1,4} \quad (9)$$

— przy strzelaniu długimi otworami — w kierunku wyrobiska

$$\Delta p = 3300 \cdot (\bar{r})^{1,2} \quad (10)$$

— przy strzelaniu długimi otworami — poza urabiane piętro

$$\Delta p = 4700 \cdot (\bar{r})^{1,53} \quad (11)$$

W zależnościach (3)–(11) jako  $m$  podstawia się całkowitą masę materiału wybuchowego, bez uwzględnienia jego rodzaju. W ten sposób w danej odległości (przy obiekcie chro-

nionym) po detonacji MW, bez względu na właściwości, a szczególnie materiału wybuchowego parametry energetyczne, wartość nadciśnienia powietrznej fali uderzeniowej otrzymujemy taką samą, co często nie jest zgodne z rzeczywistością.

W literaturze spotykane są jednak sugestie co do konieczności uwzględniania we wzorach rodzaju detonowanego materiału wybuchowego [4]. Proponowane są zależności, w których ciśnienie zależy od masy ładunku MW, określone jest stosunkiem odległości od miejsca detonacji do promienia ładunku  $r/r_o$ , i przede wszystkim zależy od energii właściwej danego MW. W tym celu literatura [4] podaje wzory pozwalające obliczyć wartość nadciśnienia dla trotylu, jako MW wzorcowego, dla różnych warunków realizowanego strzelania:

— dla ładunku kulistego otoczonego ze wszystkich stron powietrzem

$$\Delta p = 10g \cdot \left( 7 \cdot \frac{m}{r^3} + 2,7 \cdot \frac{m^{2/3}}{r^2} + 0,84 \cdot \frac{m^{1/3}}{r} \right) \quad (12)$$

— dla ładunku kulistego leżącego na powierzchni ziemi

$$\Delta p = 10g \cdot \left( 14 \cdot \frac{m}{r^3} + 4,3 \cdot \frac{m^{2/3}}{r^2} + 1,1 \cdot \frac{m^{1/3}}{r} \right) \quad (13)$$

— dla ładunku wydłużonego otoczonego ze wszystkich stron powietrzem

$$\Delta p = 10g \cdot \left[ 14 \cdot \frac{m}{l \cdot r^2} + 4,3 \cdot \left( \frac{m}{l \cdot r^2} \right)^{2/3} + 1,1 \cdot \left( \frac{m}{l \cdot r^2} \right)^{1/3} \right] \quad (14)$$

— dla ładunku wydłużonego umieszczonego na powierzchni ziemi

$$\Delta p = 10g \cdot \left[ 28 \cdot \frac{m}{l \cdot r^2} + 6,9 \cdot \left( \frac{m}{l \cdot r^2} \right)^{2/3} + 1,1 \cdot \left( \frac{m}{l \cdot r^2} \right)^{1/3} \right] \quad (15)$$

Chcąc wyznaczyć wartość nadciśnienia dla innych, interesujących nas materiałów wybuchowych (różniących się od trotylu właściwościami), każdy człon wyrażenia w nawiasie w powyższych wzorach, należy pomnożyć przez równoważnik porównujący jednostkowe energie stosowanego materiału wybuchowego i wzorca  $q_{MW}/q_{TNT}$  [4].

Obecnie stosowane są materiały wybuchowe o różnych charakterystykach. Często znacznie różnią się one między sobą: ciepłem wybuchu, ciśnieniem wybuchu i prędkością detonacji.

W tabeli 1 przedstawiono zakresy zmienności produkowanych i stosowanych MW.

TABELA 1

**Zakres zmienności wybranych parametrów dla dostępnych MW**

Parametr	Jednostka	Zakres zmienności produkowanych MW
Prędkość detonacji, $D$	m/s	1080÷7744
Gęstość pozorną, $\gamma_o$	kg/dm <sup>3</sup>	0,62÷1,56
Objętość gazowych produktów wybuchu, $V_g$	dm <sup>3</sup> /kg	273÷992
Ciepło wybuchu, $Q_w$	kJ/kg	818÷6044
Ciśnienie wybuchu, $P_w$	MPa	338÷8720

Źródło: [1]

Duży zakres zmienności parametrów stosowanych materiałów wybuchowych daje podstawy, by przypuszczać, że zagrożenia spowodowane detonacją MW o jednakowej masie, lecz o różnych właściwościach, w rzeczywistości nie mogą być takie same.

#### 4. Metody stosowane w technice wojskowej

W literaturze zajmującej się problematyką wojskowych MW dla oceny wartości nadciśnienia w zakresie oddziaływania wybuchu stosowane są często nomogramy lub wzory przybliżone, będące aproksymacją danych doświadczalnych lub wyników numerycznego modelowania. Wzory te są uzależnione od wartości tzw. odległości bezwymiarowej  $\lambda$ .

W przypadku dalekiej strefy wybuchu, w celu określenia nadciśnienia PFU i impulsu nadciśnienia, stosuje się wzory **zgodnie z prawem Sachsa**, według którego bezwymiarowe nadciśnienie i impuls fali podmuchowej, definiowane jako:

$$p_s = \frac{\Delta p^+}{p_o}$$

$$I_s = \frac{I^+ \cdot c_o}{E^{1/3} \cdot p_o^{2/3}}$$
(16)

są funkcjami jedynie bezwymiarowej odległości  $\lambda$  — zwanej także **zmienną Sachsa** — definiowanej jako wielkość zależna od energii wybuchu:

$$\lambda = \frac{r \cdot p_o^{1/3}}{E^{1/3}},$$

gdzie:

- $r$  — odległość od centrum wybuchu,
- $E$  — energia wybuchu MW,
- $p_o$  — ciśnienie początkowe w ośrodku,
- $c_o$  — prędkość dźwięku.

Prawo Sachsa obowiązuje jedynie w dalekiej strefie wybuchu, tj. w obszarze, w którym charakterystyki FU przestają zależeć od kształtu ładunku i sposobu jego inicjowania.

Nie obowiązuje w strefie bliskiej (w odległościach porównywalnych z rozmiarem ładunku  $\lambda = 0,1$ ), czyli tam, gdzie wartość nadciśnienia jest ogromna, na ruch FU mają wpływ kształt ładunku i położenie punktu inicjowania, a jej ruch jest sprzężony z ruchem granicy produktów detonacji, który dopiero po wyhamowaniu umożliwia fali poruszanie się w sposób niezależny.

W opracowaniach wojskowych [2] spotyka się także wzory empiryczne, sporządzone na podstawie pomiarów nadciśnienia w PFU, określające wartość nadciśnienia dla konkretnych MW.

Najczęściej stosowane są wzory aproksymujące Sadowskiego (17) i Stonera (18), które także zależą od bezwymiarowej odległości  $\lambda_T$  dla  $\lambda_T \in [1,10]$ ; gdzie  $\lambda_T = \frac{r}{m^{1/3}}$ :

— dla trotylu

$$p_s = 0,754\lambda_T^{-1} + 2,457\lambda_T^{-2} + 6,5\lambda_T^{-3} \quad (17)$$

— dla pentolitu

$$p_s = 0,863\lambda_T^{-1} + 2,951\lambda_T^{-2} + 7,823\lambda_T^{-3} \quad (18)$$

Znając ciepło wybuchu omawianych materiałów wybuchowych, zmienną  $\lambda_T \in [1,10]$  można łatwo wyrazić w innej postaci, np. przeliczyć ją na zmienną Sachsa, korzystając z zależności

$\lambda_T = \lambda \cdot \left(\frac{Q}{p_o}\right)^{1/3}$  (gdzie  $Q$  – ciepło wybuchu MW):

— dla trotylu

$$p_s = 0,229\lambda^{-1} + 0,227\lambda^{-2} + 0,82\lambda^{-3} \quad (19)$$

— dla pentolitu

$$p_s = 0,240\lambda^{-1} + 0,229\lambda^{-2} + 0,169\lambda^{-3} \quad (20)$$

Inne wzory empiryczne (Henrycha) w odniesieniu do konkretnych materiałów wybuchowych mają postać:

— dla pentolitu

$$p_s = 0,662\lambda_T^{-1} + 4,05\lambda_T^{-2} + 3,288\lambda_T^{-3} \quad (22)$$

Do wyznaczenia wartości nadciśnienia w powietrznej fali uderzeniowej stosuje się także tzw. **równoważnik trotylowy** (heksogenowy). Metodę tę można zastosować dla materiałów wybuchowych o różnych charakterystykach.

Często w opracowaniach wojskowych, w miejsce masy  $m$  jest przyjmowana masa materiału wybuchowego przemnożona przez równoważnik trotylowy lub heksogenowy.

Najprościej definiowany równoważnik uwzględnia wartość ciepła wybuchu (lub energii wybuchu) stosowanego materiału wybuchowego w odniesieniu do ciepła wybuchu (energii wybuchu) MW wzorcowego (trotyl lub heksogen) (23).

Innym sposobem jest porównanie, jaka masa danego materiału wybuchowego jest równoważna danej masie wzorca, czyli określenie takiej masy trotylu (heksogenu), dla której skutki wybuchu są identyczne jak dla wybuchu badanego materiału wybuchowego. Inaczej mówiąc, mnożąc masę danego MW przez równoważnik, można określić masę trotylu wytwarzającą falę podmuchową o takiej samej charakterystyce jak dla MW badanego

$$\alpha_T = \frac{m_T}{m} = \frac{E}{E_T} \quad (23)$$

gdzie:

$\alpha_T$  — równoważnik (trotylowy lub heksogenowy) danego MW,

$m$  — masa danego MW,

$m_T$  — masa materiału wybuchowego wzorcowego,

$E$  — energia wybuchu danego MW,

$E_T$  — energia wybuchu wzorcowego MW.

Znając wartość zmierzonego nadciśnienia w PFU (24) lub wartość impulsu fali (25), można wyznaczyć ekwiwalent trotylowy (heksogenowy):

$$f(\alpha_{TP}) = \frac{P}{P_T} \quad (24)$$

$$f(\alpha_{TI}) = \frac{I}{I_T} \quad (25)$$

gdzie:

$\alpha_{TP}$  — równoważnik trotylowy obliczony na podstawie pomiarów nadciśnienia,

$\alpha_{TI}$  — równoważnik trotylowy obliczony na podstawie pomiarów impulsu nadciśnienia,



- $P$  — nadciśnienie pomierzone dla badanego MW,  
 $P_T$  — nadciśnienie pomierzone dla materiału wybuchowego wzorcowego (np. trotylu),  
 $I$  — impuls fali dla badanego MW,  
 $I_T$  — impuls fali dla materiału wybuchowego wzorcowego (np. trotylu).

Wartości  $P$  i  $P_T$  są liczone z zależności (26) i (27):

$$P = \frac{0,754 \cdot (m \cdot \alpha_{TP})^{1/3}}{r} + \frac{2,457 \cdot (m \cdot \alpha_{TP})^{2/3}}{r^2} + \frac{6,5 \cdot m \cdot \alpha_{TP}}{r^3} \quad (26)$$

$$P_T = \frac{0,754 \cdot m_T^{1/3}}{r} + \frac{2,457 \cdot m_T^{2/3}}{r^2} + \frac{6,5 \cdot m_T}{r^3} \quad (27)$$

W bliskiej strefie wybuchu nie stosuje się ani prawa Sachsa, ani równoważnika trotylowego. Dla bliskiej strefy [2] proponowany jest wzór (28) określający nadciśnienie na czołe fali uderzeniowej dla  $\lambda_T \in [0,05; 0,3]$  i  $\lambda_T \in [0,3; 1]$

$$P_S = \begin{cases} 14,07\lambda_T^{-1} + 5,54\lambda_T^{-2} - 0,3572\lambda_T^{-3} + 0,00625\lambda_T^{-4} & \text{dla } \lambda_T \in [0,05; 0,3] \\ 6,19\lambda_T^{-1} - 0,3262\lambda_T^{-2} + 2,1324\lambda_T^{-3} & \text{dla } \lambda_T \in [0,3; 1] \end{cases} \quad (28)$$

Przy bezwymiarowych odległościach  $\lambda$ , znacznie większych od 3 ( $\lambda_T > 10$ ), według literatury [2] dla oceny wielkości nadciśnienia proponowane są wzory asymptotyczne (29)–(31). Ich zastosowanie może być niekiedy obciążone dużym błędem. Im dalej od miejsca detonacji, tym popełniany błąd jest większy, bowiem w tak znacznych odległościach na przebieg PFU mają wpływ czynniki atmosferyczne, a zwłaszcza wiatr. Jednak wartości nadciśnienia w tak dużych odległościach są raczej niewielkie i ewentualny błąd nie wpływa na wzrost zagrożenia dla otoczenia:

$$P_S = A_1 \cdot \lambda^{-1} \quad (29)$$

$$P_S = A_2 \cdot \lambda^{-1} (\ln \lambda)^{-1/2} \quad (30)$$

$$P_S = A_3 \cdot \lambda^{-4/3} \quad (31)$$

(dla trotylu wzór ten ma postać  $P_S = 1,065 \cdot \lambda_T^{-1}$ ),  
gdzie  $A$  – współczynnik ustalany przy uwzględnieniu wartości nadciśnienia liczonego według wzorów (19) lub (20) dla wartości  $\lambda = 3$ .

W podobny sposób szacowana jest druga z wielkości charakteryzujących PFU — **impuls nadciśnienia**. Dla ładunku trotylu detonowanego w powietrzu można wartość impulsu FU obliczyć, stosując wzory Sadowskiego (32) i Henrycha (33), także uwzględniające wielkość  $\lambda$ :

$$\frac{I^+}{m^{1/3}} = \begin{cases} 350\lambda_T^{-1} & \text{dla } \lambda_T > 0,5 \\ 150\lambda_T^{-1} & \text{dla } \lambda_T < 0,25 \end{cases} \quad [I^+] = \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (32)$$

$$\frac{I^+}{m^{1/3}} = \begin{cases} 6630 - 11150\lambda_T^{-1} + 6290\lambda_T^{-2} - 1004\lambda_T^{-3} & \text{dla } \lambda_T \in [0,4; 0,75] \\ -322 + 2110\lambda_T^{-1} - 2160\lambda_T^{-2} + 801\lambda_T^{-3} & \text{dla } \lambda_T \in [0,75; 3] \end{cases} \quad (33)$$

## 5. Sposoby wyznaczania strefy działania PFU przy wykonywaniu robót strzałowych i robót wyburzeniowych według obowiązujących przepisów

Zgodnie z przepisami obowiązującymi w zakładach górniczych [6], na wielkość strefy szkodliwego oddziaływania powietrznej fali uderzeniowej ma wpływ całkowita masa MW oraz przyjmowany współczynnik bezpieczeństwa

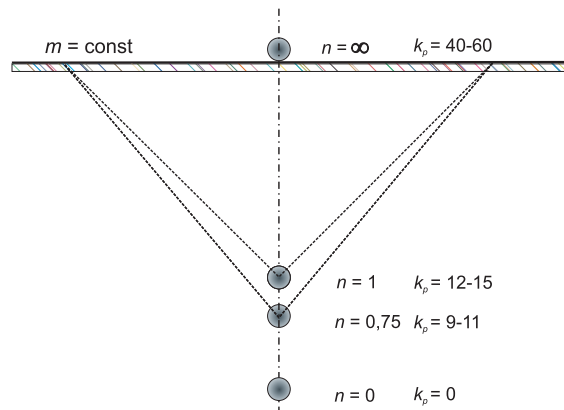
$$r_p = k_p \cdot \sqrt[3]{m} \quad (34)$$

gdzie:

- $r_p$  — promień strefy zagrożenia, [m];
- $k_p$  — współczynnik obliczeniowy (współczynnik bezpieczeństwa obiektu) zależny od stopnia szkodliwości i wskaźnika działania ładunku  $n$ ,
- $m$  — łączna wielkość ładunku materiałów wybuchowych odpalana w serii, [kg].

Wartość współczynnika  $k_p$  zależy od wielkości wskaźnika działania ładunku  $n$ , który charakteryzuje głębokość umieszczenia ładunku w skale. W miarę przybliżania ładunku do powierzchni odsłonięcia, wzrasta wartość wskaźnika działania oraz wartość współczynnika  $k_p$  (rys. 3).

Od chwili uchwalenia Prawa geologicznego i górniczego dwukrotnie zmieniły się przepisy wykonawcze [7, 9]. Zalecany w nich wzór określający „wielkość promienia strefy zagrożenia ze względu na działanie powietrznej fali uderzeniowej” był funkcją trzech wielkości: masy MW, współczynnika  $k_p$  oraz zasięgu działania PFU. Poza tym wzór ten także nie uwzględniał wpływu właściwości stosowanego MW ani tym bardziej jego parametrów energetycznych.



Rys. 3. Wpływ głębokości umieszczenia ładunku na wielkość współczynnika  $k_p$  ( $m = \text{const}$ )

W roku 2003, po ostatniej zmianie przepisów [6], sposób wyznaczania wielkości promienia strefy zagrożenia ze względu na działanie PFU zmienił się, ale w dalszym ciągu obowiązuje w podobnej formie (34). Różnica polega na tym, iż pierwiastek kwadratowy z masy ładunku  $m$  zastąpiono pierwiastkiem sześciennym, co znacznie wpłynęło na wartość liczbową obliczanej strefy.

Wobec powyższego, najczęstszą metodą eliminacji zagrożeń było i jest ograniczanie masy ładunku MW odpalanego w serii strzelań, a przecież w rzeczywistości zagrożenia spowodowane detonacją masy jednego rodzaju materiału wybuchowego nie są takie same, jak te wywołane detonacją takiej samej masy, ale materiału wybuchowego o innych właściwościach.

Można zauważyć, że obowiązujące w technice cywilnej przepisy dotyczące wykonywania robót strzałowych z użyciem MW, wyraźnie pomijają parametry stosowanego materiału wybuchowego. Natomiast przepisy dotyczące przechowywania materiałów wybuchowych, w tym także MW dla użytku cywilnego, przy wyznaczaniu wielkości nadciśnienia PFU, uwzględniają właściwości składowanego MW.

Przepisy dotyczące pomieszczeń magazynowych i obiektów do przechowywania materiałów wybuchowych [10] nakładają obowiązek uwzględnienia możliwości powstania PFU w wyniku ewentualnej detonacji składowanych materiałów wybuchowych i opisują wielkość PFU poprzez nadciśnienie w niej panujące.

Ciśnienie fali uderzeniowej jest tutaj określone jako funkcja odległości czoła fali od miejsca wybuchu materiału wybuchowego i można je wyznaczyć według wzoru

$$P_f = 980 \cdot (r \cdot G^{-0,33})^{-1,89} \quad (35)$$

gdzie:

- $P_f$  — ciśnienie fali uderzeniowej, [kPa];
- $r$  — odległość od miejsca wybuchu do miejsca chronionego, [m];
- $G$  — równoważnik masy heksogenu, [kg].

Trudno znaleźć wzór, który odzwierciedlałby rzeczywisty zasięg działania PFU. Na jej ruch wpływa zbyt wiele czynników, których często nie sposób ująć w formie zależności, a zastosowanie istniejących wzorów i teoretyczne określanie (prognozowanie) wielkości promienia strefy działania nie zawsze pokrywa się z otrzymywanymi później efektami przeprowadzonego strzelania.

## 6. Pomiary poligonowe intensywności PFU

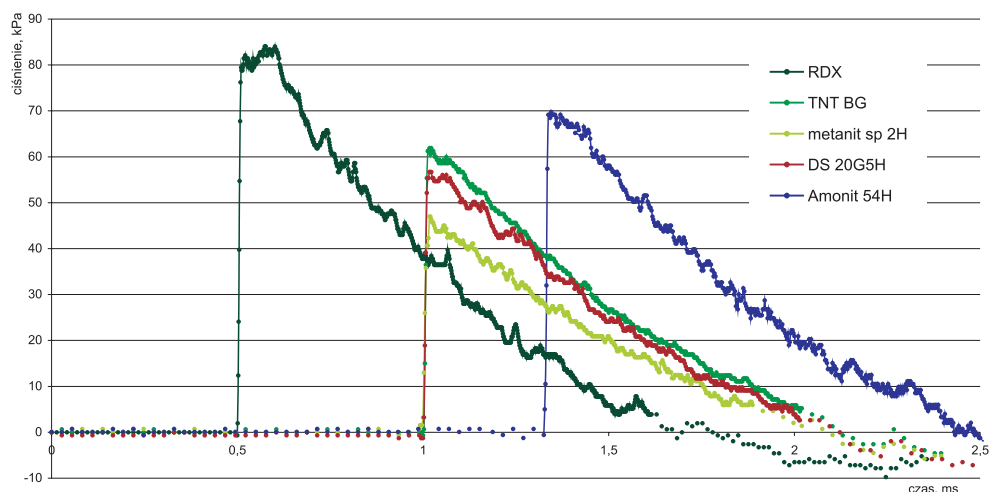
Dla potwierdzenia przypuszczeń przeprowadzono pomiary poligonowe intensywności PFU dla takich samych mas materiałów wybuchowych o różnych właściwościach.

Najefektywniej wpływ właściwości MW na intensywność PFU można zbadać blisko źródła wybuchu, czyli tam, gdzie wartości ciśnień są wysokie, a wpływ czynników zewnętrznych jest ograniczony do minimum lub całkowicie wyeliminowany.

Pomiar nadciśnienia PFU, w stałej odległości od centrum wybuchu, przeprowadzono dla następujących ładunków MW:

- heksogenu (RDX),
- trotylu biegaczowanego,
- amonitu 54H,
- metanitu specjalnego 2H.

Zarejestrowana intensywność PFU dla badanych ładunków MW jest różna (rys. 4).



Rys. 4. Wartości ciśnień PFU dla różnych MW w odległości 2 m od miejsca detonacji

W tabeli 2 przedstawiono maksymalne wartości nadciśnienia PFU oraz wartości impulsu nadciśnienia PFU dla badanych MW.

TABELA 2

**Wartości nadciśnienia i impulsu nadciśnienia PFU dla MW o różnych właściwościach**

Rodzaj MW	Gęstość MW [g/cm <sup>3</sup> ]	Zmierzona prędkość detonacji [m/s]	Max wartość nadciśnienia PFU [kPa]		Wartość impulsu nadciśnienia PFU [Pa·s]	
			w odległości od centrum wybuchu			
			2 m	3 m	2 m	3 m
Metanit specjalny 2H	1,10	2259	43,97	23,30	20,93	13,40
Amonit 54H	0,99	2849	69,38	34,31	33,08	19,70
Dynamit 20G5H	1,4	3374	57,22	29,81	27,55	17,81
TNT biegaczowany	1,22	3400	59,72	30,52	28,52	17,98
RDX (proszek)	1,12	6020	79,85	42,24	41,80	24,85

**7. Podsumowanie**

Przy wyznaczaniu podstawowych wielkości opisujących ruch PFU głównymi czynnikami branymi pod uwagę, są:

- masa detonowanego materiału wybuchowego,
- głębokość umieszczenia ładunku MW w skale,
- właściwości detonowanego materiału wybuchowego.

Wzory stosowane w technice wojskowej uwzględniają masę MW oraz jego właściwości. Analizowany ładunek materiału wybuchowego nie jest umieszczany w górotworze, gdyż najczęściej detonacja odbywa się nad powierzchnią terenu.

W przypadku wzorów proponowanych dla strzelań przemysłowych nadciśnienie PFU jest funkcją masy MW oraz współczynnika uwzględniającego głębokość umieszczenia ładunku w górotworze. Całkowicie pomijany jest wpływ właściwości stosowanego MW.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów poligonowych uzyskano różną intensywność PFU dla tych samych mas różnych rodzajów MW. Otrzymane rezultaty dowodzą, że wpływ właściwości detonowanego MW na przebieg PFU jest znaczny i nie powinien być pomijany we wzorach opisujących wartość nadciśnienia PFU lub wielkość jego zasięgu.

## LITERATURA

- [1] *Batko P.*: Wpływ właściwości strzelniczych materiału wybuchowego na efekt sejsmiczny strzelania, Monografia 105, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2002
- [2] *Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski J., Trębiński R., Trzciniński W.*: Wojskowe Materiały Wybuchowe. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000

- [3] *Onderka Z. (red.):* Badanie korelacji pomiędzy stopniem przereagowania nieidealnych MW (NMW) a efektywnością ich oddziaływania na górotwór. Praca niepubl. AGH Wyd. Górniczy, KGO, Kraków 1994
- [4] *Onderka Z.:* Wpływ robót strzelniczych na otoczenie kopalń odkrywkowych. Technika Strzelnicza, cz. 2, UWND AGH, Kraków 2003
- [5] *Papliński A.:* Narzędzia modelowe do analizy parametrów energetycznych przemysłowych materiałów wybuchowych. Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2003, Wydawnictwo IGSMiE PAN
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 1 kwietnia 2003 r. w sprawie przechowywania i używania środków strzałowców i sprzętu strzałowego w zakładach górniczych (Dz.U. Nr 72, poz. 655)
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 17 czerwca 2002 r. w sprawie nabywania, przechowywania i używania środków strzałowców w zakładach górniczych (Dz.U. Nr 92, poz. 818)
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie rozbiórek obiektów budowlanych wykonywanych metodą wybuchową (Dz.U. Nr 120, poz. 1135)
- [9] Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 19 października 1994 r. w sprawie środków strzałowców i sprzętu w zakładach górniczych (Dz.U. Nr 135, poz. 702)
- [10] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 października 2002 r. w sprawie pomieszczeń magazynowych i obiektów do przechowywania materiałów wybuchowych, broni, amunicji oraz wyrobów o przeznaczeniu wojskowym lub policyjnym (Dz.U. Nr 190, poz. 1589)