



Badanie charakterystyk fal podmuchowych generowanych przez improwizowane ładunki wybuchowe

ARTUR STECKIEWICZ¹, WALDEMAR A. TRZCIŃSKI

¹Centrum Szkolenia Policji, Zakład Szkoleń Specjalnych, 05-121 Legionowo, ul. Zegrzyńska 121
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy zmierzono i oszacowano teoretycznie charakterystyki fal podmuchowych generowanych detonacją nieidealnych mieszanin wybuchowych stanowiących potencjalne wypełnienia improwizowanych ładunków wybuchowych. Po wyznaczeniu parametrów fal podmuchowych obliczono współczynniki trotylowe dla badanych mieszanin wybuchowych. Dokonano również weryfikacji najczęściej stosowanych wzorów do prognozowania parametrów fal podmuchowych, wykorzystując dane otrzymane dla trotylu z eksperymentów prowadzonych w Zakładzie Materiałów Wybuchowych WAT.

Słowa kluczowe: improwizowane urządzenia wybuchowe, nieidealne materiały wybuchowe, fale podmuchowe, ładunki wybuchowe

Symbolu UKD: 662.1/.4

1. Wstęp

Na podstawie dostępnych danych policyjnych w pracy [1] dokonano przeglądu materiałów wybuchowych stosowanych jako wypełnienia w improwizowanych urządzeniach wybuchowych. Stwierdzono, że w zasadzie wykorzystywane są wszystkie dostępne materiały wysokoenergetyczne: kruszące materiały wybuchowe pochodzenia wojskowego, górnicze materiały wybuchowe, materiały miotające i pirotechniczne. Jako wypełnienia najczęściej stosowane są mieszaniny dwóch lub więcej składników. Reakcja na impuls inicjujący oraz skutki wybuchu takich nieidealnych materiałów wybuchowych są trudne do przewidzenia. W pracy [2]

wytypowano osiem różnych mieszanin wybuchowych, biorąc pod uwagę dostępność składników dla świata przestępczego. Zbadano charakter przemiany chemicznej (deflagracja, wybuch, detonacja) wytypowanych mieszanin zamkniętych w typowym, improwizowanym urządzeniu rurowym (mufy hydrauliczne zamknięte korkami) analizując stopień fragmentacji obudowy (liczba i wielkości odłamków). Uzyskane wyniki zweryfikowano poprzez zastosowanie znormalizowanego testu z rurą stalową. Zbadano również zdolność miotającą wybranych mieszanin wybuchowych wykonując tzw. test cylindryczny i wyznaczając energię i prędkość Gurneya. Wyniki badań prowadzonych w pracy [2] można wykorzystać do oceny prędkości odłamków napędzanych produktami detonacji mieszanin wybuchowych i skutków ich rażenia.

W niniejszej pracy kontynuowano badania nad czynnikami rażącymi improwizowanych ładunków wybuchowych. Skoncentrowano się na pomiarze i oszacowaniu teoretycznym charakterystyk fal podmuchowych generowanych detonacją nieidealnych mieszanin wybuchowych. Po wyznaczeniu parametrów fal podmuchowych obliczono współczynniki trotylowe dla badanych mieszanin. Porównano również wyniki uzyskane za pomocą powszechnie stosowanych wzorów do prognozowania charakterystyk fal podmuchowych z danymi uzyskanymi dla trotylu.

2. Charakterystyki fali podmuchowej

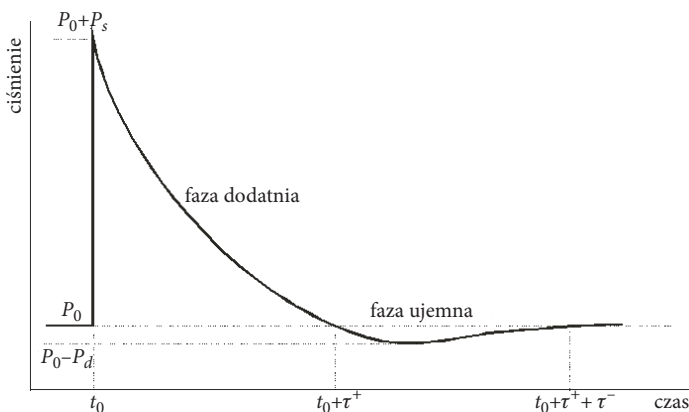
Głównym czynnikiem rażącym wybuchu ładunku materiału wybuchowego jest mechaniczne działanie fal uderzeniowych i propagujących się za nimi fal odciążenia. Zespół fali uderzeniowej i fal odciążenia nazywany jest *falą podmuchową*. Dla oceny skutków oddziaływania fali podmuchowej na obiekty potrzebna jest informacja o przebiegu nadciśnienia $\Delta P(t)$ wytwarzanego przez tę falę w danym punkcie przestrzeni. Charakter tego przebiegu przedstawiono na rysunku 1.

Profil ciśnienia w fali podmuchowej charakteryzuje się następującymi wielkościami: nadciśnienie na czole fali P_s , maksymalne podciśnienie P_d , czas trwania dodatniej fazy impulsu τ^+ , czas trwania ujemnej fazy impulsu τ^- . Ponadto jako charakterystykę fali podmuchowej wprowadza się wielkość będącą całką z nadciśnienia po czasie w dodatniej fazie nadciśnienia

$$I_s = \int_0^{\tau^+} \Delta P(t) dt. \quad (1)$$

Wielkość tą nazywa się *impulsem fali podmuchowej*.

Znając wartość nadciśnienia P_s na czole fali, można, wykorzystując wzory dla odbicia fal uderzeniowych, ocenić wielkość nadciśnienia po odbiciu fali. Znając



Rys. 1. Zmiany w czasie ciśnienia w danym punkcie przestrzeni po dotarciu do niego fali podmuchowej

funkcję $\Delta P(t)$, możemy również określić zmiany w czasie nadciśnienia działającego na dany obiekt.

Dla prognozowania charakterystyk fali podmuchowej stosuje się różne wzory będące wynikiem analiz teoretycznych lub badań eksperymentalnych [3]. Najbardziej znane są wzory otrzymane dla sferycznych ładunków trotylowych (TNT):

— Sadowskiego [4]

$$P_s = \begin{cases} \frac{1039}{Z^3} - 98,1 \text{ [kPa]} & \text{dla } Z \leq 1 \\ \frac{74,5}{Z} + \frac{245,2}{Z^2} + \frac{637,4}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1 \leq Z \leq 15 \end{cases} \quad (2)$$

$$I_s = 340 \div 360 \frac{\sqrt[3]{(m_{\text{TNT}})^2}}{r} \text{ [kbar} \cdot \text{s]} \quad \text{dla } Z > 0,5$$

— Henrycha [5]

$$P_s = \begin{cases} \frac{1379,96}{Z} + \frac{543,26}{Z^2} - \frac{35,029}{Z^3} + \frac{0,6129}{Z^4} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,05 \leq Z \leq 0,3 \\ \frac{607,40}{Z} - \frac{31,989}{Z^2} + \frac{209,12}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{64,92}{Z} + \frac{397,17}{Z^2} - \frac{322,44}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_{\text{TNT}}}} = \begin{cases} 6500 - \frac{10934}{Z} + \frac{6165}{Z^2} - \frac{984,6}{Z^3} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,4 \leq Z \leq 0,75 \\ -316 + \frac{2069}{Z} - \frac{2118}{Z^2} + \frac{775,5}{Z^3} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,75 \leq Z \leq 3, \end{cases}$$

gdzie: $Z = r/\sqrt[3]{m_{\text{TNT}}}$ — tzw. zredukowana odległość;

r — odległość od ładunku w [m];

m_{TNT} — masa trotylu w [kg].

W raporcie AASTP-4 [6] zebrano dane z szeregu pomiarów przebiegu ciśnienia w falach podmuchowych generowanych detonacją ładunków trotylowych i przedstawiono je w postaci graficznej. W celu wykorzystania tych danych w niniejszej pracy dokonano aproksymacji odczytanych z wykresów dyskretnych wartości odpowiednich parametrów w funkcji zredukowanej odległości (rys. 2-3). Otrzymano następujące wzory na maksymalne nadciśnienie i impuls:

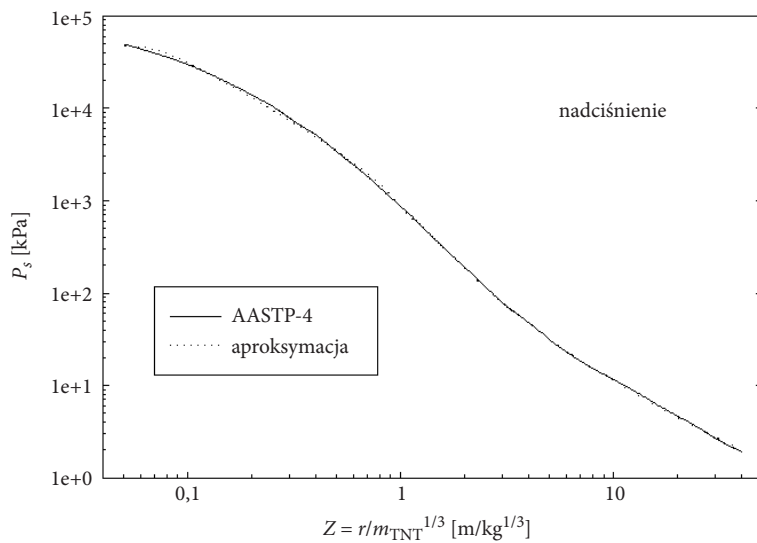
$$P_s = \begin{cases} -1245 + \frac{1935}{Z} + \frac{235,3}{Z^2} - \frac{10,65}{Z^3} \quad [\text{kPa}] & \text{dla } 0,05 \leq Z \leq 1,15 \\ \frac{70,7}{Z} + \frac{360,2}{Z^2} + \frac{489,1}{Z^3} \quad [\text{kPa}] & \text{dla } 1,15 \leq Z \leq 40 \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_{\text{TNT}}}} = \begin{cases} 308,2 - \frac{106,65}{Z} + \frac{18,89}{Z^2} - \frac{0,401}{Z^3} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,05 \leq Z \leq 1,15 \\ 1,79 + \frac{196,0}{Z} + \frac{8,62}{Z^2} + \frac{30,5}{Z^3} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}] & \text{dla } 1,15 \leq Z \leq 40. \end{cases}$$

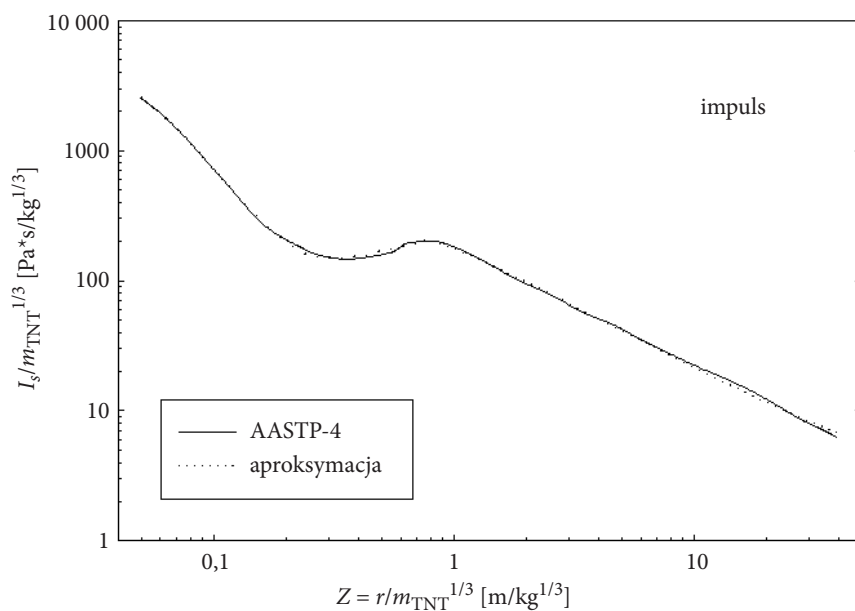
Na rysunkach 4 i 5 porównano zależności amplitudy fali podmuchowej i impulsu od zredukowanej odległości otrzymane ze wzorów (2)-(4). W przypadku maksymalnego nadciśnienia największe różnice obserwuje się dla niewielkich odległości od ładunku (dla małych wartości Z). Natomiast wartości impulsu ciśnienia różnią się zdecydowanie od siebie w całym analizowanym zakresie zredukowanej odległości.

Zgodnie z prawem Sachsa [7] ładunki dwóch różnych materiałów wybuchowych wytworzą falę podmuchową o tych samych charakterystykach, jeżeli ich energie wybuchu będą takie same. Przyrównując energię ładunku danego materiału wybuchowego X i trotylu możemy określić, jaka masa tego materiału m jest równoważna danej masie trotylu m_{TNT} .

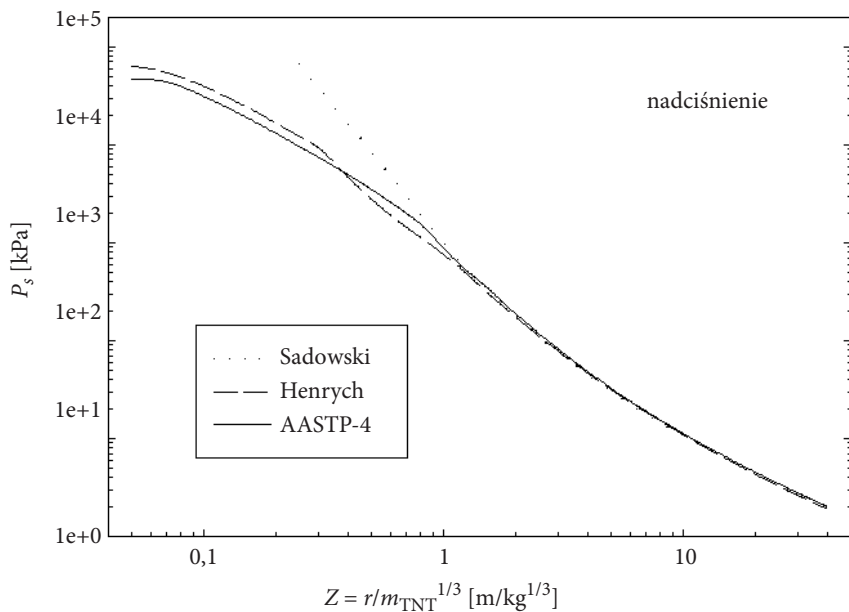
$$m_X Q_X = m_{\text{TNT}} Q_{\text{TNT}} \quad (5)$$



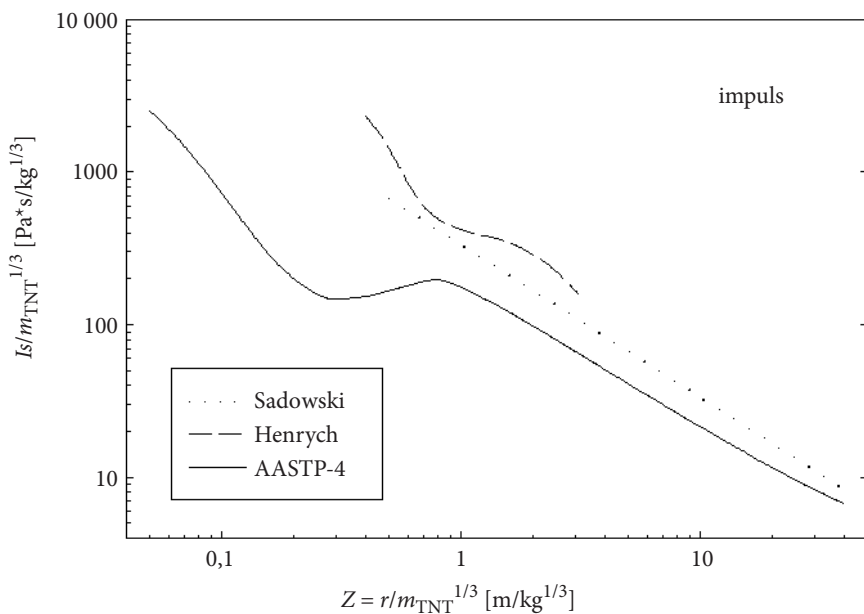
Rys. 2. Aproxymacja podanej w raporcie AASTP-4 zależności naciśnienia na czole fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla ładunków trotylowych



Rys. 3. Aproxymacja podanej w raporcie AASTP-4 zależności impulsu fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla ładunków trotylowych



Rys. 4. Porównanie zależności naciśnienia od zredukowanej odległości otrzymanych ze wzorów (2-4)



Rys. 5. Porównanie zależności impulsu od zredukowanej odległości otrzymanych ze wzorów (2-4) dla $m_{TNT} = 1$ kg

Stąd

$$\alpha_T = \frac{m_{\text{TNT}}}{m_X} = \frac{Q_X}{Q_{\text{TNT}}}. \quad (6)$$

Q oznacza efekt cieplny wybuchu jednostki masy materiału wybuchowego. Zazwyczaj przyjmuje się, że jest to ciepło detonacji.

Współczynnik α_T nazywany jest *równoważnikiem trotylowym* danego materiału wybuchowego. Liczbowo równy jest masie trotylu równoważnej energetycznie masie 1 kg danego materiału wybuchowego. Mnożąc masę danego ładunku przez α_T , określamy masę trotylu wytwarzającą falę podmuchową o tych samych charakterystykach. Wielkość tę możemy wykorzystać we wzorach (2-4) do obliczenia nadciśnienia na czole fali podmuchowej lub impulsu w określonej odległości od centrum wybuchu.

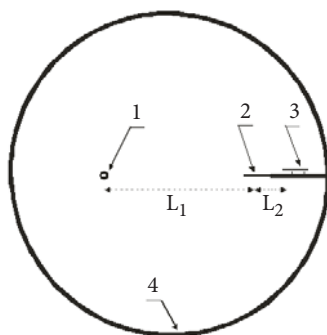
Oszacowane na podstawie wzorów (2-4) wartości maksymalnego nadciśnienia i impulsu dla materiałów wybuchowych innych niż trotyl różnią się znacznie od wartości eksperymentalnych. Różnice te wynikają z faktu, że nie cała energia wybuchu materiału wybuchowego przekazywana jest do powietrza. Część z niej pozostaje w produktach detonacji. Relacja pomiędzy energią przekazaną i pozostałą może być różna dla różnych materiałów wybuchowych. Ponadto rozlotowi produktów detonacji w powietrzu towarzyszy turbulентne mieszanie produktów z powietrzem i ich dopalanie. Ilość dodatkowej energii zależy od bilansu tlenowego materiału wybuchowego. Stąd wynikają różnice w wartościach nadciśnienia czy impulsu. Dlatego wprowadza się również trotylowy ekwiwalent danego materiału wybuchowego wyznaczony na podstawie pomiarów wartości nadciśnienia i impulsu fali podmuchowej w różnych odległościach od centrum wybuchu. Pierwszy z nich nazywa się *równoważnikiem trotylowym danego materiału ze względu na nadciśnienie* α_{TP} , drugi zaś *równoważnikiem trotylowym ze względu na impuls* α_{TI} . Równoważnik trotylowy ze względu na wielkość nadciśnienia α_{TP} jest definiowany jako masa ładunku trotylu, efektem jego detonacji jest taka sama wartość nadciśnienia na danej odległości od ładunku, jak po detonacji danego materiału wybuchowego o jednostkowej masie. Tak zdefiniowany równoważnik zależy od odległości na jakiej mierzone jest nadciśnienie. Z reguły podaje się wartość średnią równoważnika. W podobny sposób definiuje się równoważnik trotylowy α_{TI} ze względu na wielkość impulsu.

3. Pomiary ciśnienia w fali podmuchowej

Fala podmuchowa jest głównym czynnikiem rażącym wybuchu w przypadku otwartych improwizowanych urządzeń wybuchowych, tzn. urządzeń charakteryzujących się całkowitym brakiem obudowy lub obudową nie wytwarzającą odłamków (papier, tkanina, taśmy izolacyjne itp.) [1]. Również tzw. konstrukcje zamknięte lekkie, w których zasadniczy ładunek umieszczony jest w obudowie z tworzywa sztucznego, drewna, pojemniku blaszanym lub ceramicznym, generują silną falę

podmuchową. Dzieje się tak, ponieważ z uwagi na niewielką wytrzymałość tego rodzaju materiałów, główna część energii wybuchu zużywana jest na wygenerowanie fali uderzeniowej w powietrzu, a tylko niewielka część wykorzystywana jest do napędzenia fragmentów obudowy. W niniejszej pracy do badań charakterystyk fali podmuchowej wybrano konstrukcje zamknięte lekkie. W ten sposób zapewniono identyczny kształt ładunków badanych materiałów wybuchowych o różnej strukturze i gęstości — odlewanych, prasowanych i sypkich.

Przebiegi ciśnienia w falach podmuchowych generowanych wybuchem improwizowanych ładunków wybuchowych rejestrowano w zamkniętym betonowym bunkrze o objętości ok. 40 m^3 . W testach ładunek materiału wybuchowego o masie ok. 200 g umieszczano w cylindrycznej rurze winidurowej o średnicy wewnętrznej 46 mm i grubości ścianki 2 mm. Do zainicjowania procesu detonacji lub wybuchu zastosowano detonator trotylowy o masie 5 g i zapalnik elektryczny typu Erg. Ładunek wieszano na wysokości 1,5 m nad powierzchnią ziemi. Dwa czujniki piezoelektryczne umieszczano w odległościach 2 i 2,5 m od ładunku w sposób zapewniający pomiar parametrów fali padającej, tzn. powierzchnia czynna czujnika była równoległa do kierunku propagacji fali (rys. 6).



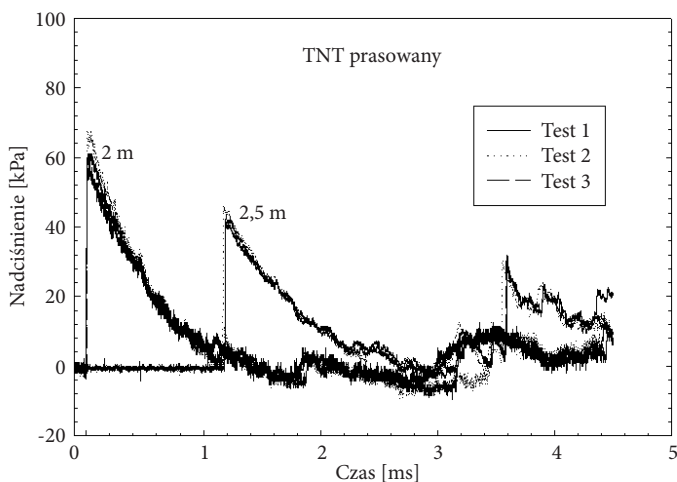
Rys. 6. Układ do pomiaru przebiegu nadciśnienia w fali podmuchowej: 1 — ładunek MW; 2-3 — czujniki ciśnienia; 4 — ściana bunkra; $L_1 = 2 \text{ m}$, $L_2 = 0,5 \text{ m}$

Na podstawie wyników testów prowadzonych w układach rurowych [2], do badań wytypowano następujące wypełniacze improwizowanych urządzeń wybuchowych:

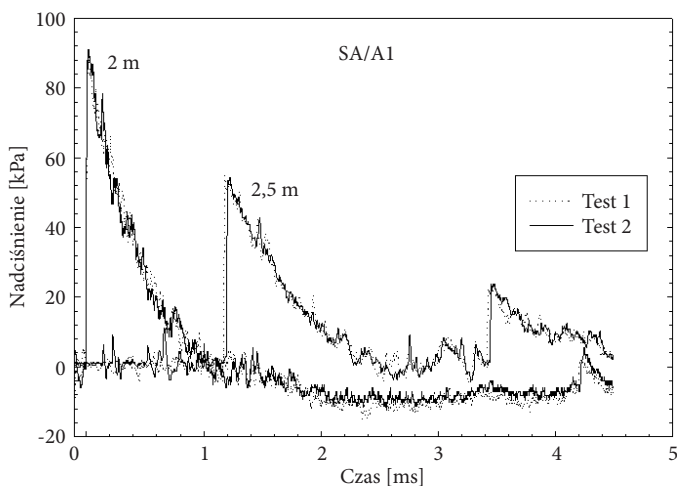
- trotyl odlewany — TNTI (gęstość $\rho_0 = 1,60 \text{ g/cm}^3$),
- trotyl łuskowany — TNTł ($\rho_0 = 0,83 \text{ g/cm}^3$),
- mieszania trotylu i prochu P4 50/50 — TNT/P4 ($\rho_0 = 0,88 \text{ g/cm}^3$),
- mieszania saletry amonowej rolniczej i aluminium 85/15 — AN/Al ($\rho_0 = 0,95 \text{ g/cm}^3$),
- mieszania saletry amonowej porowatej i oleju 94/6 — ANFO ($\rho_0 = 0,86 \text{ g/cm}^3$).

Wybór rodzaju azotanu amonu w ostatniej mieszance był rezultatem analizy wyników badań detonacji ANFO w rurach miedzianych prowadzonych w pracy [2]. Dodatkowo testowano trotyl prasowany (TNTp) o gęstości $\rho_0 = 1,59 \text{ g/cm}^3$. Charakterystyki uzyskane dla niego oraz trotylu odlewanego pozwoliły na weryfikację wymienionych wcześniej wzorów na maksymalne nadciśnienie.

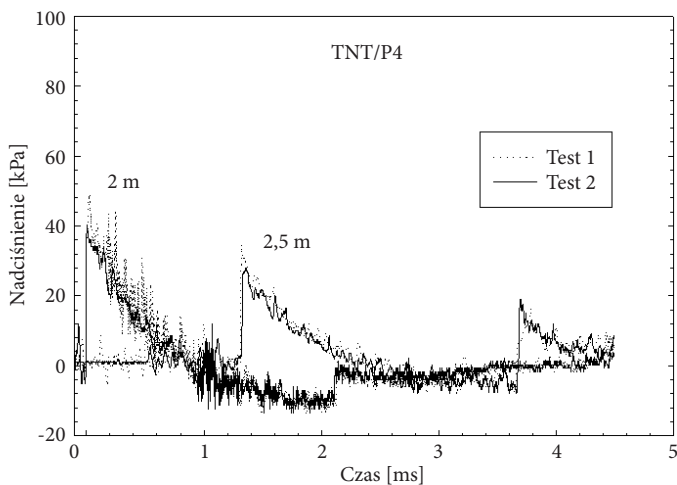
Dla każdego materiału wybuchowego wykonano co najmniej 3 testy. Rejestracja ciśnienia w niektórych próbach zakończyła się niepowodzeniem. Przykładowe przebiegi nadciśnienia pokazano na rysunkach 7-10.



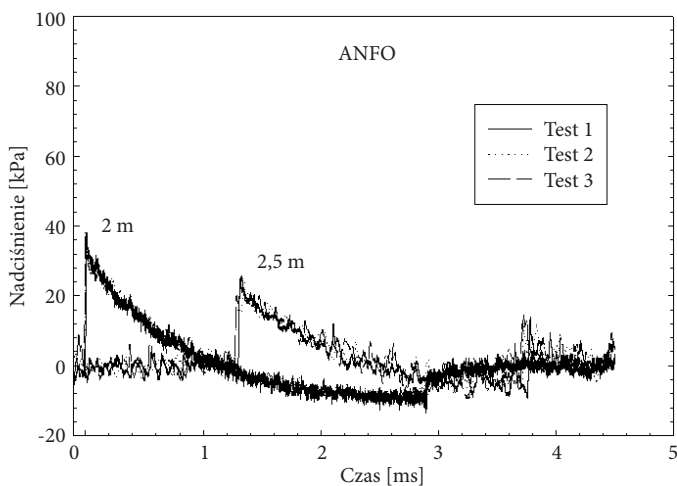
Rys. 7. Profile fal podmuchowych generowanych detonacją ładunków trotylu prasowanego



Rys. 8. Profile fal podmuchowych generowanych detonacją ładunków mieszanki AN/AI



Rys. 9. Profile fal podmuchowych generowanych wybuchem ładunków mieszanki TNT/P4



Rys. 10. Profile fal podmuchowych generowanych wybuchem ładunków ANFO

4. Analiza wyników pomiarów

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk fali podmuchowej, maksymalnego nadciśnienia P_s oraz impulsu I_s , dla testowanych kompozycji wybuchowych. Wartości impulsu fali podmuchowej obliczano numerycznie, wykorzystując wzór (1).

TABELA 1

Charakterystyki fal podmuchowych generowanych wybuchem badanych materiałów wybuchowych

Materiał wybuchowy	Odległość $r = 2$ m		Odległość $r = 2,5$ m	
	P_s [kPa]	I_s [Pa s]	P_s [kPa]	I_s [Pa s]
TNTI	$62,7 \pm 3,7$	$31,1 \pm 0,1$	$44,8 \pm 0,6$	$25,2 \pm 0,5$
TNTp	$61,8 \pm 4,3$	$28,7 \pm 1,3$	$43,4 \pm 2,8$	$23,9 \pm 0,6$
TNTł	$52,7 \pm 8,9$	$25,5 \pm 3,4$	$36,9 \pm 5,1$	$17,9 \pm 0,5$
AN/Al	$86,6 \pm 2,8$	$33,3 \pm 0,3$	$54,3 \pm 1,1$	$26,7 \pm 0,6$
TNT/P4	$44,6 \pm 6,0$	$14,9 \pm 1,6$	$31,3 \pm 4,9$	$12,1 \pm 1,5$
ANFO	$37,9 \pm 1,1$	$14,3 \pm 0,4$	$25,0 \pm 0,7$	$10,9 \pm 0,7$

W tabeli 2 porównano zmierzone parametry fal podmuchowych wytworzone detonacją ładunków trotylu lanego i prasowanego z wartościami prognozowanymi za pomocą wzorów (2)-(4). Dodatkowo wykorzystano dane eksperymentalne prezentowane w pracy [8], w której mierzono, między innymi, przebieg ciśnienia w fali podmuchowej po wybuchu ładunku 288 g trotylu. Z porównania prezentowanego w tabeli 2 jednoznacznie wynika, że najlepszą zgodność parametrów obliczonych i zmierzonych uzyskuje się w przypadku zastosowania wzoru (4), otrzymanego z aproksymacji danych zawartych w raporcie AASTP-4.

TABELA 2

Zmierzone i obliczone, według wzorów (2)-(4), charakterystyki fal podmuchowych generowanych wybuchem ładunku trotylu odlewanego TNTI i prasowanego TNTp

Źródło	Odległość $r = 2$ m		Odległość $r = 2,5$ m		Odległość $r = 2,0$ m [8]	
	P_s [kPa]	I_s [Pa s]	P_s [kPa]	I_s [Pa s]	P_s [kPa]	I_s [Pa s]
TNTI (eksp)	$62,7 \pm 3,7$	$31,1 \pm 0,1$	$44,8 \pm 0,6$	$25,2 \pm 0,5$	—	—
TNTp (eksp)	$61,8 \pm 4,3$	$28,7 \pm 1,3$	$43,4 \pm 2,8$	$23,9 \pm 0,6$	$83,0 \pm 3,7$	$38,9 \pm 0,2$
Sadowski	59,1	57,0	39,3	45,6	74,8	72,7
Henrych	61,0	74,3	41,0	($Z > 3$)	76,3	108,8
AASTP-4	63,7	34,5	42,5	27,9	80,2	43,8

Wyniki pomiarów przebiegu nadciśnienia umożliwiają obliczenie trotylowych równoważników badanych kompozycji wybuchowych, czyli wyznaczenie masy trotylu, którego detonacja generuje falę podmuchową o tej samej amplitudzie lub

impulsie, co jednostka masy testowanej kompozycji. Jeśli założymy, że w badanym przedziale masy ładunku maksymalne nadciśnienie jest liniową funkcją masy materiału wybuchowego, to równoważnik trotylowy ze względu na nadciśnienie dla danego materiału X możemy obliczyć ze wzoru:

$$\alpha_{Tp} = \frac{(P_s)_X}{(P_s)_{TNT}}. \quad (7)$$

Nadciśnienie P_s generowane jest przez ładunki danego materiału wybuchowego i trotylu o tej samej masie i mierzone w tej samej odległości od miejsca detonacji. W podobny sposób można oszacować równoważnik trotylowy ze względu na impuls:

$$\alpha_{TI} = \frac{(I_s)_X}{(I_s)_{TNT}}. \quad (8)$$

W tabeli 3 zebrano wartości równoważników α_{Tp} i α_{TI} dla testowanych materiałów wybuchowych. Jako materiał odniesienia przyjęto trotyl lany. Dla porównania w tabeli umieszczono również wartości teoretyczne energetycznego równoważnika trotylowego α_T — wzór (3). Jako ciepło detonacji Q dla badanych materiałów wybuchowych przyjęto energię detonacji E_d , obliczoną za pomocą kodu do obliczeń termochemicznych CHEETAH [9]. Energia detonacji obliczona jest na podstawie izentropy rozprężania produktów detonacji ze stanu w punkcie Chapmana-Jougueta do ciśnienia atmosferycznego. Założono pełną aktywność chemiczną składników mieszanin wybuchowych w strefie reakcji chemicznych fali detonacyjnej. Uzyskano następujące wartości energii detonacji: TNTł — 4519 J/g, TNTp — 4508 J/g, TNTł — 3698 J/g, AN/Al — 5995 J/g, TNT/P4 — 3670 J/g, ANFO — 4113 J/g.

TABELA 3

Współczynniki trotylowe badanych kompozycji wybuchowych

Materiał wybuchowy	α_T	Odległość $r = 2$ m		Odległość $r = 2,5$ m		Średnia wartość	
		α_{Tp}	α_{TI}	α_{Tp}	α_{TI}	α_{Tp}	α_{TI}
TNTp	1	0,99	0,93	0,97	0,95	0,98	0,94
TNTł	0,82	0,84	0,83	0,82	0,78	0,83	0,81
AN/Al	1,33	1,38	1,16	1,25	1,14	1,32	1,15
TNT/P4	0,81	0,72	0,52	0,72	0,50	0,72	0,51
ANFO	0,91	0,61	0,50	0,58	0,46	0,60	0,48

Równoważniki trotylowe umożliwiają porównanie tzw. zdolności podmuchowej różnych materiałów wybuchowych. Im wyższe są wartości równoważników trotylowych danego materiału, tym wyższe parametry fali podmuchowej generowanej po jego wybuchu. Największymi wartościami współczynników trotylowych charakteryzuje się mieszanina azotanu amonu z proszkiem alumiiniowym. Generowana przez ładunki tej mieszaniny fala podmuchowa ma zdecydowanie wyższe charakterystyki niż fala wytworzona po detonacji trotylu w każdej postaci (trotylu odlewanego, prasowanego czy w postaci ładunku o gęstości usypowej). Parametry fali podmuchowej dla mieszanin TNT/P4 i ANFO są z kolei mniejsze od parametrów otrzymanych dla trotylu. Ponadto dla tych mieszanin równoważniki trotylowe obliczone na podstawie zmierzonych amplitud i impulsów fal podmuchowych są znacznie mniejsze niż współczynniki oszacowane z teoretycznej energii detonacji. Dla oceny skutków oddziaływania fali podmuchowej na konstrukcje i ludzi po wybuchu tych materiałów powinny być brane pod uwagę te pierwsze równoważniki.

Podziękowania

Autorzy dziękują dr. inż. Józefowi Paszuli za pomoc w rejestracji przebiegów nadciśnienia. Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2009 jako projekt badawczy nr 0011/B/T00/2008/34.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.09.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2008 r.

LITERATURA

- [1] R. STECKIEWICZ, W. A. TRZCIŃSKI, *Samodziałowe urządzenia wybuchowe*, Biul. WAT, 54, 5-6, 2005, 149-162.
- [2] R. STECKIEWICZ, W. A. TRZCIŃSKI, *Badanie reakcji na bodziec inicjujący oraz wyznaczenie zdolności miotających wypełnień improwizowanych urządzeń wybuchowych*, Biul. WAT, 56, 4, 2007, 223-242.
- [3] S. CUDZIŁO, A. MARANDA, J. NOWACZEWSKI, R. TRĘBIŃSKI, W. A. TRZCIŃSKI, *Wojskowe Materiały Wybuchowe*, Częstochowa, 2000.
- [4] M. A. SADOWSKY, *Mechaniczeskoje dejstwie wozdusznyh udarnykh woln wzrywa po dannym eksperimentalnyh issedowanij*, Fizika wzrywa, no. 1, Moskwa, 1952.
- [5] J. HENRYCH, *The dynamics of explosion and its use*, Academia, Prague, 1979.
- [6] M. A. HOPKINS-BROWN, A. BAILEY, *AASTP-4 Chapter 2 (Explosion Effects) Part 1 (Blast)*, Royal Military College of Science, Cranfield University, 1998.
- [7] R. G. SACHS, *The dependence of blast on ambient pressure and temperature*, BRL Report 466, Aberdeen Proving Ground, MD, 1944.
- [8] W. A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, J. PASZULA, *Studies of free field and confined explosions of aluminium enriched RDX compositions*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 32, 6, 2007, 502-508.
- [9] L. E. FRIED, *CHEETAH 1.39 — User's manual*, LLNL, 1996.

A. STECKIEWICZ, W. A. TRZCIŃSKI

Investigation of blast wave characteristics produced by improvised explosive charges

Abstract. In the work, characteristics of blast waves produced by detonation of non-ideal explosive mixtures were measured and estimated theoretically. These mixtures are possible fillings in improvised explosive devices. After determination of the parameters of blast waves, TNT equivalencies were calculated for the explosives tested. Equations commonly used for the estimation of the blast parameters were verified by applying the data obtained for TNT charges in this work and in other experiments performed at the Department of Explosives of the Military University of Technology.

Keywords: improvised explosive devices, non-ideal explosives, blast waves, explosive charges

Universal Decimal Classification: 662.1/.4