

prof. dr hab. Roman DYGDAŁA
mgr Grzegorz ŚMIGIELSKI
mgr inż. Damian LEWANDOWSKI
mgr inż. Michał KACZOROWSKI
Wyższa Szkoła Gospodarki, Bydgoszcz

BADANIE PARAMETRÓW FALI UDERZENIOWEJ POWSTAJĄCEJ PRZY WYTWARZANIU AEROZOLU WODNEGO METODĄ WYBUCHOWĄ

W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów fali uderzeniowej powstającej przy wytwarzaniu aerozolu wodnego metodą wybuchową.

1. Wstęp

Wytwarzanie aerozolu wodnego metodą wybuchową prowadzi do powstania fali uderzeniowej oraz obłoku aerozolu, których czoła rozchodzą się z różną prędkością w funkcji czasu Δt od momentu eksplozji materiału wybuchowego.

Falą uderzeniową nazywamy zaburzenie rozchodzące się najczęściej w gazie (lecz także w cieczy lub ciele stałym), mające postać powierzchni (tzw. powierzchni nieciągłości), na której występuje skokowa zmiana parametrów ośrodka: wzrost ciśnienia, gęstości i temperatury oraz spadek prędkości. Przez skokową zmianę należy rozumieć zmianę bardzo gwałtowną (nie dotyczy to gazów rozrzedzonych), zachodzącą na odcinku o długości rzędu drogi swobodnej cząsteczki ośrodka. Fale uderzeniowe powstają przy nagłym zaburzeniu wywołanym np. detonacją lub uderzeniem pioruna albo przy stacjonarnym opływie ciała stałego przez naddźwiękowy strumień gazu. Fala uderzeniowa w gazie przemieszcza się zawsze z prędkością większą niż prędkość dźwięku w tym gazie, przed czołem fali [1]. Po jej przejściu następuje przyrost entropii gazu, czyli nieodwracalny proces przemiany części energii mechanicznej gazu w ciepło.

Celem opisywanych badań był pomiar prędkości fali uderzeniowej i jej ciśnienia oraz prędkości rozchodzenia się czoła obłoku aerozolu wodnego w funkcji odległości od centrum eksplozji dla kilku różnych rodzajów materiałów wybuchowych, energii i wielkości kapsuły wodnej oraz weryfikacja hipotez dotyczących wytwarzania aerozolu wodnego metodą wybuchową.

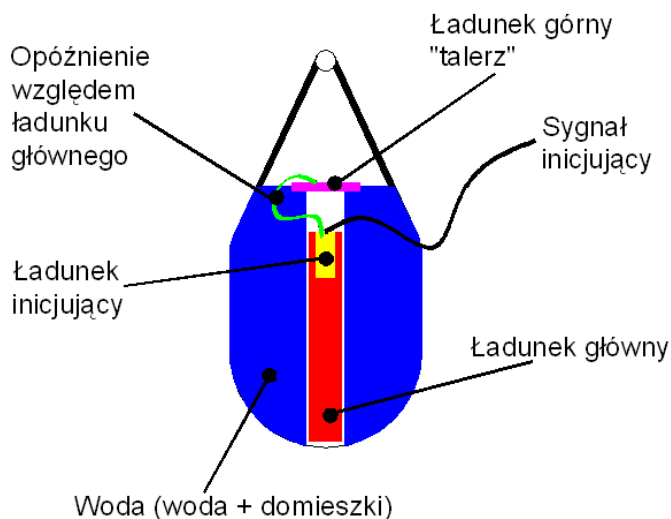
2. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

Aerozol wodny był wytwarzany w wyniku eksplozji ładunku umieszczonego w worku wypełnionym wodą (tzw. kapsuła lub bomba wodna). Pomiary zostały wykonane dla trzech rodzajów materiałów wybuchowych (Emulinit, Saletrol i Plastik), trzech wielkości worka 600, 1200 i 1500 litrów oraz różnych wartości energii (od 4 do 20 MJ).

Schemat budowy worka przedstawiono na rys. 1. Posiada on kształt zbliżony do walca, w którego osi umieszczony jest główny ładunek. Na powierzchni wody znajduje się górny ładunek, detonowany z opóźnieniem w stosunku do ładunku głównego.

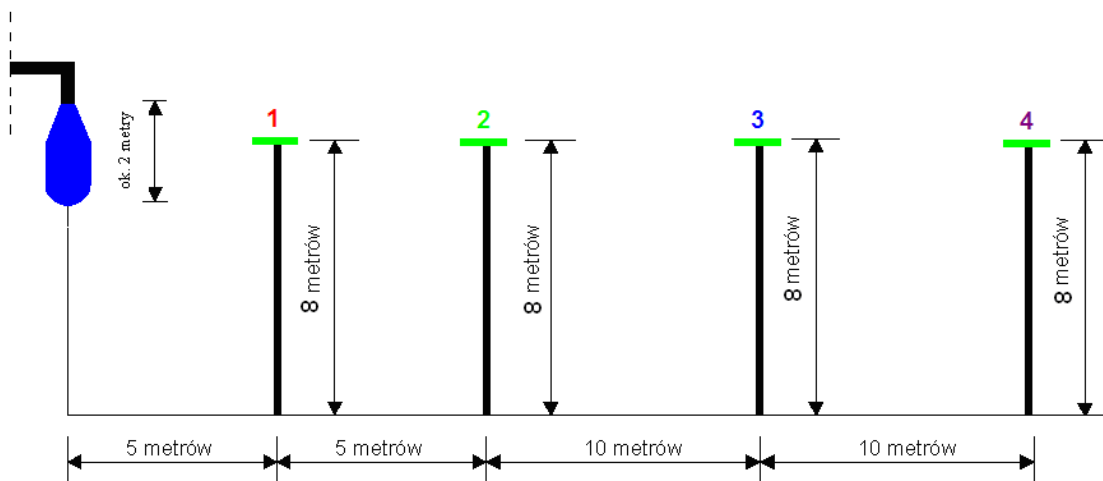
Stanowisko badawcze stanowiła bomba wodna zawieszona ok. 10 metrów nad ziemią oraz czujniki ciśnienia (1 – 4) rozmieszczone na tej samej wysokości wzdłuż osi

rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej z powierzchnią roboczą czujnika usytuowaną równoległe do niej. W odległości ok. 60 metrów od centrum wybuchu umieszczono również szybką kamerę cyfrową (250 klatek/sekundę), przy pomocy której dokonywano rejestracji rozchodzenia się obłoku aerozolu wodnego.



Rys. 1. Schematyczny wygląd worka do bomby wodnej.

Aparatura wykorzystywana do pomiarów parametrów fali uderzeniowej składała się z czujnika zwarcowego, wyzwalającego pomiar; czterech piezoelektrycznych czujników ciśnienia typu ICP, układu kondycjonowania sygnału o regulowanej wartości wzmocnienia oraz komputera przemysłowego PXI z zainstalowanym systemem czasu rzeczywistego LabVIEW RT, wyposażonego w odpowiednią kartę pomiarową.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia czujników ciśnienia względem kapsuły wodnej.

W porównaniu do aparatury użytej w pomiarach pilotażowych sprzęt zakupiony przez Wyższą Szkołę Gospodarki w Bydgoszczy charakteryzował się lepszymi parametrami metrologicznymi oraz większą odpornością na warunki atmosferyczne.



Rys. 3. Czujnik piezoelektryczny.



Rys. 4. Układ kondycjonowania sygnału.



Rys. 5. Komputer przemysłowy PXI.

Numer czujnika	Czułość [mV/kPa]	Maksymalne ciśnienie [MPa]	Rozdzielczość [kPa]
1	0,145	34,5	0,69
2	2,9	34,5	0,001
3	14,5	6,9	0,069
4	14,5	6,9	0,069

Tab. 1. Parametry czujników piezoelektrycznych użytych do pomiarów.

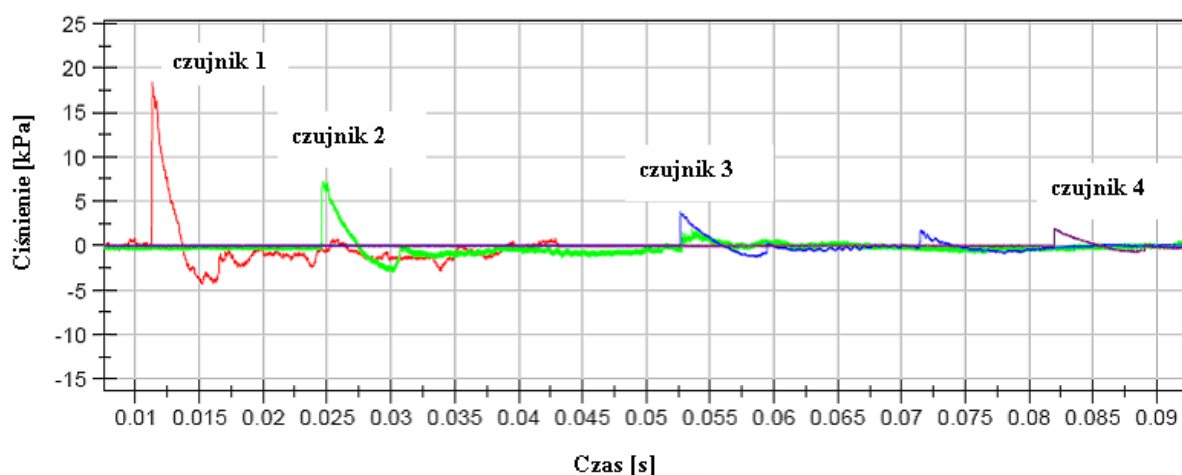
Aplikacja pomiarowa została przygotowana tak, że wyzwolenie pomiaru następowało w momencie eksplozji materiału wybuchowego. Parametry pomiaru: ilość zebranych próbek - 100 tys. i częstotliwość próbkowania - 500 tysięcy próbek na sekundę, pozwoliły na pomiar odcinka czasowego 200 ms, z rozdzielczością 2 μ s. Analiza uzyskanych przebiegów pozwoliła na określenie ciśnienia oraz prędkości rozchodzenia się fali uderzeniowej.



Rys. 6. Wygląd stanowiska pomiarowego.

3. Wyniki pomiarów

Przykładowy przebieg mierzonego ciśnienia przedstawiono na rys. 7. Fala powstała podczas detonacji ładunku wybuchowego odpowiedzialna jest za nagły wzrost ciśnienia w obszarze każdego czujnika (nadciśnienie), następnie następuje zmniejszenie ciśnienia (podciśnienie) i powrót do stanu równowagi (ciśnienia atmosferycznego).



Rys. 7. Przykładowy przebieg ciśnień fali uderzeniowej.

Na podstawie wykresu można określić średnie prędkości fali uderzeniowej na odcinkach pomiędzy workiem a czujnikiem nr 1 oraz między kolejnymi czujnikami. Odstęp czasu pomiędzy rejestracją czoła fali uderzeniowej w kolejnych punktach pomiarowych dla przebiegu z rysunku wynosi odpowiednio 11, 13, 27 i 30 ms co odpowiada średnim prędkościom $\bar{v}_{01} \approx 443 \text{ ms}^{-1}$, $\bar{v}_{12} \approx 375 \text{ ms}^{-1}$, $\bar{v}_{23} \approx 356 \text{ ms}^{-1}$ i $\bar{v}_{34} \approx 341 \text{ ms}^{-1}$.

W zależności od rodzaju zastosowanego ładunku wybuchowego, jego energii oraz wielkości worka maksymalne wartości nadciśnienia wahają się od 9 do 50 kPa, a prędkość fali uderzeniowej od 360 do 525 m/s.

W odległości 30 metrów od centrum eksplozji nadciśnienie ma już wartość rzędu 2 – 3 kPa, a prędkość fali uderzeniowej obniża się do prędkości dźwięku ok. 340 m/s.

Worek [l]	Materiał	Energia [kJ]	Prędkość [m/s] na czujnikach				Ciśnienie [kPa] na czujnikach			
			1	2	3	4	1	2	3	4
600	EMULINIT	10784	384	372	357	330	21,7	8,4	4,6	2,3
1500	EMULINIT	10784	371	372	357	332	20,7	9,7	4,7	2,4
1200	EMULINIT	10784	437	370	353	338	27,6	9,0	4,7	2,3
600	SALETROL	4384	417	373	354	328	17,2	8,6	3,9	2,1
600	SALETROL	7293	389	373	358	331	22,1	9,3	4,8	2,2
600	SALETROL	10784	390	374	358	330	21,7	8,3	5,5	2,5
1500	SALETROL	20092	377	376	362	334	19,3	10,3	6,3	3,1
1500	EMULINIT	20092	399	362	357	334	13,8	7,6	4,5	2,4
1500	PMW	20092	385	370	358	333	37,2	9,3	5,5	2,8

Tab. 2. Średnie wartości ciśnienia na poszczególnych czujnikach w odległości 5, 10, 20 i 30 metrów od centrum eksplozji oraz średnie wartości prędkości czoła fali uderzeniowej na odcinkach między poszczególnymi czujnikami dla wybranych wielkości worków, ładunków i energii.

3.1 Błędy pomiarów

Średnią prędkość można określić zależnością:

$$v = \frac{s}{t},$$

gdzie s – odległość między kolejnymi punktami pomiarowymi, t – odstęp czasu pomiędzy rejestracją czoła fali uderzeniowej w kolejnych punktach pomiarowych.

Błąd pomiaru średniej prędkości fali uderzeniowej określono metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| \Delta t + \left| \frac{\partial v}{\partial s} \right| \Delta s,$$

gdzie $\Delta t = 2\mu s$ - błąd pomiaru czasu, $\Delta s = 0,2m$ - błąd pomiaru odległości między punktami pomiarowymi.

Na podstawie powyższych zależności obliczono błąd pomiaru prędkości, który wyniósł $\Delta v = 7 \div 14$ m/s.

Wartość nadciśnienia określa zależność:

$$p = \frac{U}{K},$$

U – zmierzone napięcie, K – czułość zestawu złożonego z czujnika piezoelektrycznego i układu kondycjonowania sygnału.

Błąd pomiaru ciśnienia:

$$\Delta p = \left| \frac{\partial p}{\partial U} \right| \Delta U + \left| \frac{\partial p}{\partial K} \right| \Delta K,$$

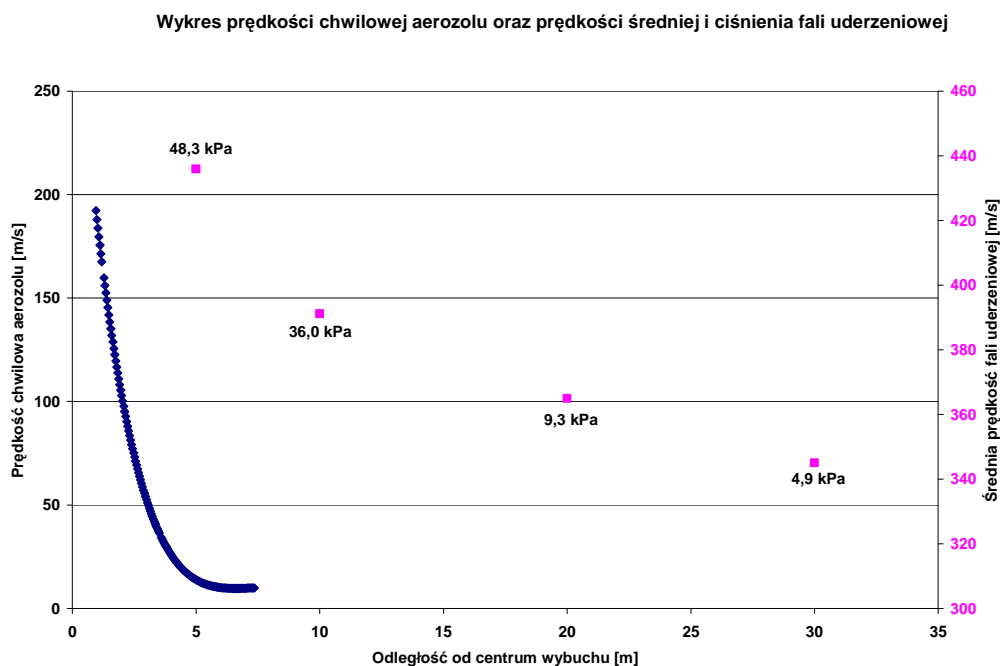
W obliczeniach uwzględniono tylko pierwszy składnik ze względu na pomijalnie małą wartość drugiego.

Błąd pomiaru napięcia $\Delta U = 40$ mV; czułość $K_1 = 14,5$ mV/kPa; $K_2 = 29$ mV/kPa; $K_3 = K_4 = 145$ mV/kPa.

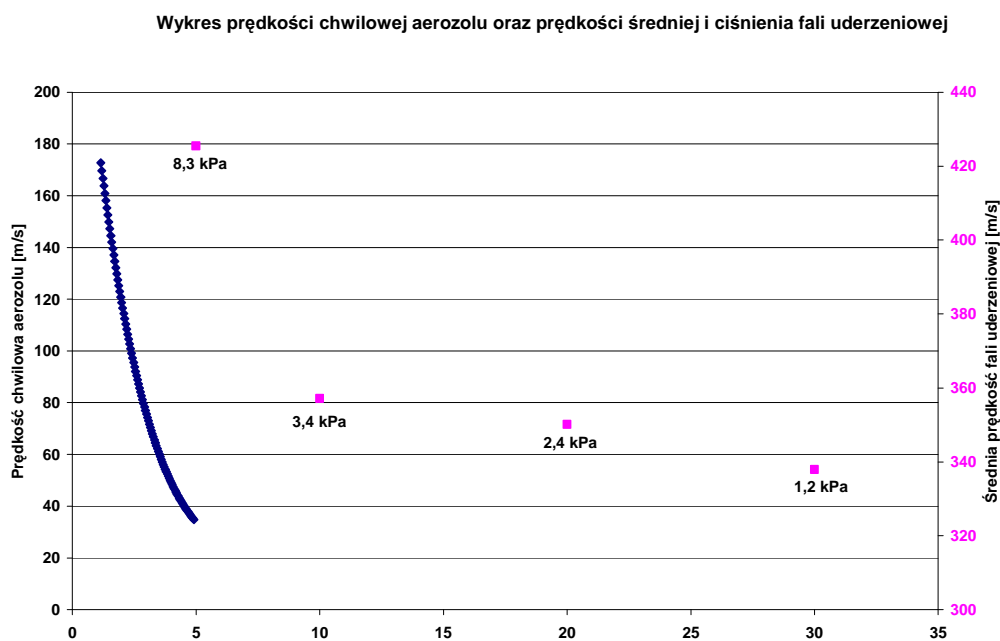
Błąd pomiaru wyniósł 2,6 kPa dla czujnika nr 1; 1,4 kPa dla czujnika nr 2; 0,26 kPa dla czujników nr 3 i 4.

4. Porównanie wyników dla fali uderzeniowej i obłoku aerozolu wodnego

Na rysunkach od 8. do 10. przedstawiono porównanie prędkości rozchodzenia się aerozolu wodnego ze średnią prędkością fali uderzeniowej oraz wartości ciśnień w funkcji odległości od centrum eksplozji dla wybranych prób.

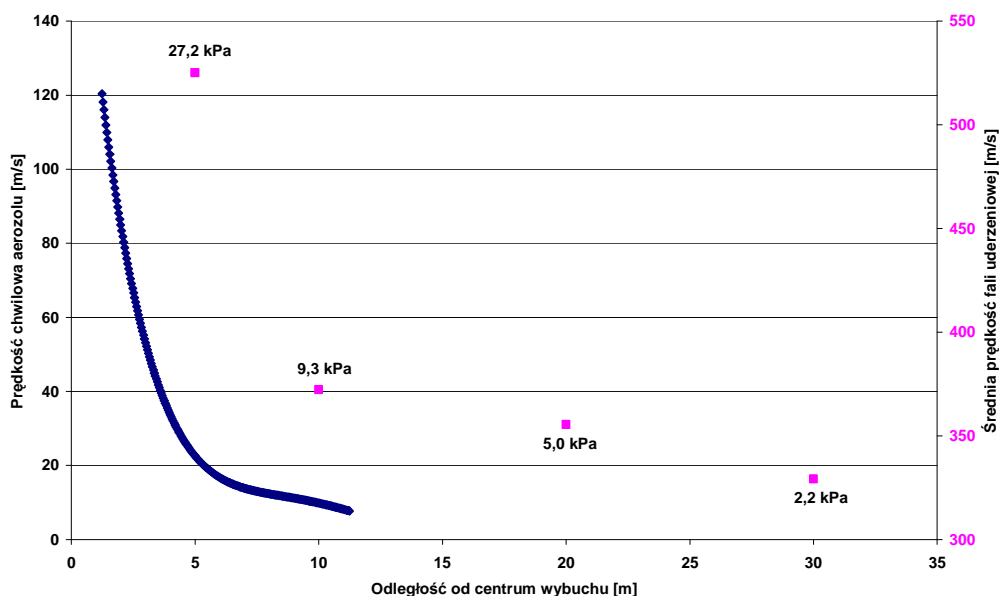


Rys. 8. Saletrol, 20092 kJ, worek 1200 litrów.



Rys. 9. PMW, 10784 kJ, worek 1200 litrów.

Wykres prędkości chwilowej aerozolu oraz prędkości średniej i ciśnienia fali uderzeniowej



Rys. 10. Emulinit, 4384 kJ, worek 600 litrów.

Wyniki te wskazują, że proces produkcji aerozolu wodnego, powstałego w wyniku eksplozji ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej, odbywa się w następujący sposób:

- ⇒ energia ładunku wybuchowego zużywana jest do fragmentacji wody oraz do wytworzenia obszaru wysokiego ciśnienia, które odpowiedzialne jest za nadanie kroplom wody pewnych prędkości początkowych;
- ⇒ powstała przy detonacji fala rozprzestrzenia się ze znacznie większą prędkością niż krople (czoło fali bardzo szybko wyprzedza krople aerozolu).

5. Podsumowanie

Aerozol wodny wytwarzany metodą wybuchową może być stosowany w celach gaśniczych jak również po dodaniu odpowiednich środków służyć do dezaktywacji wybranych powierzchni terenu. Przeprowadzone badania umożliwiły dobrać odpowiedniego materiału wybuchowego, jego energii i konfiguracji, pozwalających na uzyskanie możliwie największej gęstości i stopnia pokrycia aerozolu, przy jak najmniejszej wielkości kropeł.

Pomimo zastosowania pozornie bardzo niebezpiecznej metody wytwarzania aerozolu w odległości 30 metrów od centrum eksplozji wartości nadciśnienia są rzędu 2 – 3 kPa. Oznacza to, że jest to obszar bezpieczny dla człowieka i dopuszcza się w nim nawet zwartą zabudowę obiektów mieszkalnych.

6. Podziękowanie

Autorzy składają podziękowania władzom WSG za możliwość zakupu aparatury oraz przeprowadzenia badań poligonowych.

Literatura

- [1] Tarnogrodzki A.: Dynamika gazów, WKŁ, Warszawa, 2003.
- [2] Teie W.: Firefighter's handbook of wildland firefighting, Dear Valley Press, Recue CA 1994.
- [3] Kuhrt E., Knollenberg J., Martens V., Annals of Burns and Fire Disasters 14 (2001) 151.
- [4] Liu Z., Kim A. K., Carpenter D.: Extinguishment of large cooking oil pool fires by the use of water mist system, in Combustion Institute/Canada Section, Spring Technical Meeting, May 9-12, 2004, pp. 1-6.
- [5] International ESMG Symposium Process Safety and Industrial Explosion Protection, March 16-18, Nurnberg.
- [6] Shoigu S., Annals of Burns and Fire Disasters 6 (1993) 187.
- [7] Zukas A. A., Walters W. P. (eds.): Explosive Effects and Applications, Springer, New York 2003.
- [8] Houghes W. F., Brighton J. A.: Fluid Dynamics, McGraw-Hill, New York 1967. 12
- [9] Roman S. Dygdała, Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Maria Ingwer-Żabowska, Michał Kaczorowski; „Aerosol Produced by Explosive Detonation in a Water Bag as Fire Extinguishant.”, 3rd International Conference IPOEX 2006, Ustroń – Jaszowiec 20 –22 czerwca 2006 r.
- [10] Dz. U. Nr 163, poz. 1577 - Rozporządzenie ministra gospodarki, pracy i polityki społecznej w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy produkcji, transporcie wewnątrzzakładowym oraz obrocie materiałów wybuchowych, w tym wyrobów pirotechnicznych.