

Michał KACZOROWSKI\*

Jacek BORKOWSKI\*\*

Roman DYGDAŁA\*\*\*

Grzegorz ŚMIGIELSKI\*\*\*\*

\* BaKaCHEM Sp. z o.o.

\*\* Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

\*\*\* Szkoła Wyższa im. Pawła Włodkowica, Płock

\*\*\*\* Wyższa Szkoła Gospodarki, Bydgoszcz

## WPŁYW OTOCZKI WODNEJ NA PRĘDKOŚĆ DETONACJI WYBRANYCH MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu otoczki wodnej na prędkość detonacji wybranych materiałów wybuchowych (MW). Zamieszczone wyniki dotyczą materiałów wybuchowych o różnej prędkości detonacji: saletrolu, emulinitu i plastycznego materiału wybuchowego (MWP SW). W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż wzrasta prędkość niektórych materiałów wybuchowych, gdy umieści się je w otoczce wodnej. Badane materiały wybuchowe zostały przebadane w układzie o specjalnej konstrukcji. Wyniki badań, po zoptymalizowaniu, zostaną zastosowane w tzw. „bombie wodnej” służącej do gaszenia pożarów za pomocą obłoku wodnego dyspergowanego metodą wybuchową.

## INFLUENCE OF LAYER'S WATER FOR DETONATION VELOCITY OF SOME EXPLOSIVES

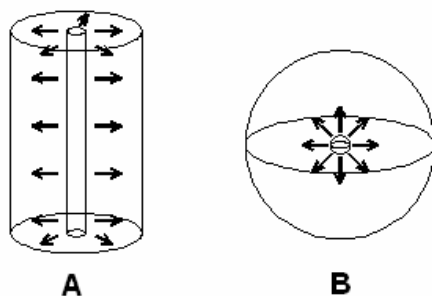
**Abstract:** Influence of layer's water for detonation velocity of some explosives was studied. Results are concerned to explosives with different detonation velocity. From the study resulted that detonation velocity of some explosives is bigger in water than in air. Investigated system, after optimisation, will be adopted in water bomb which will be used as fire extinguishant with aerosol produced by explosive detonation.

### 1. Wstęp

Omawiane poniżej wyniki badań stanowią element szeroko prowadzonych prac nad opracowaniem metody wytwarzania aerozolu wodnego przy użyciu materiałów wybuchowych (MW), realizowanych w ramach programu badawczego nr R00-O0003/3 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego [1].

Wytwarzanie aerozolu wodnego metodą wybuchową polega na umieszczeniu określonego typu ładunku wybuchowego wewnątrz odpowiednio przygotowanej kapsuły wodnej, wykonanej z tkaniny nie przepuszczającej wody, i odpaleniu tego ładunku w odpowiedniej chwili czasu. W wyniku wybuchu, powstaje aerozol wodny używany do gaszenia pożarów. Podstawowym problemem jest zrozumienie i opis od strony fizycznej procesu powstawania aerozolu wodnego od momentu inicjacji materiału wybuchowego do momentu, gdy aerozol samoistnie zaczyna pokrywać obszar, na którym panuje ogień. Rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego zależy między innymi od usytuowania ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej. Założono dwie możliwości umieszczenia ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej: wzdłuż osi symetrii – konfiguracja cylindryczna (Rysunek 1.1 A) oraz w centralnej części – konfiguracja sferyczna (Rysunek 1.1

B). Podczas doświadczeń potwierdzona została przewaga konfiguracji cylindrycznej w kontekście uzyskiwania jak największego obszaru, który został pokryty aerozolem wodnym.



**Rys.1.1. Rozmieszczenie ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej:  
A - konfiguracja cylindryczna, B - konfiguracja sferyczna**

Podstawowym czynnikiem koniecznym do zrozumienia i opisu fizycznego zjawiska wytwarzania aerozolu wodnego jest prędkość detonacji materiału wybuchowego. Jest to podstawowy parametr charakteryzujący materiały wybuchowe, który definiuje się jako prędkość przebiegu reakcji przemiany wybuchowej zachodzącej w materiale wybuchowym [2]. Zależy ona od kilku parametrów: składu chemicznego, gęstości i struktury MW oraz jego średnicy i rodzaju otoczki.

Wpływ otoczki na prędkość detonacji przedstawiono w syntetycznym ujęciu w pracach [3-4]. Według autorów tych prac wpływ otoczki na prędkość detonacji materiałów wybuchowych wynika z faktu, iż otoczka ogranicza wnikanie bocznej fali rozrzedzenia w strefę reakcji chemicznej we froncie fali detonacyjnej. Wpływa to na pełniejsze wykorzystanie energii reakcji chemicznych zachodzących podczas rozkładu materiału wybuchowego. Wynika z tego, że w nieidealnych materiałach wybuchowych, gdzie prędkość detonacji jest niższa w porównaniu do idealnych MW, wpływ ten może być silniej zaznaczony.

Napędzanie cylindrycznej warstwy cieczy produktami wybuchu przedstawiono w pracy [5]. Rozpatrzono w niej wybuch skondensowanego (idealnego) materiału wybuchowego, w którym fala detonacji przemieszcza się wzdłuż cylindrycznego ładunku MW, wokół którego umieszczono warstwę cieczy. Do opisu napędzonej warstwy cieczy zastosowano kilka modeli zakładających ściśliwość i nieściśliwość cieczy.

## 2. Opis metod badawczych

Przy wyznaczaniu prędkości detonacji materiału wybuchowego dokonuje się pomiaru czasu przejścia fali detonacyjnej przez front określonego odcinka pomiarowego [6]. Do pomiaru prędkości detonacji wykorzystuje się metody optyczne (w których stosuje się kamery) oraz metody elektryczne (wykorzystujące różnego typu czujniki współpracujące z miernikami).

W niniejszej pracy prędkość detonacji mierzono metodą czujników zwarciovych wykorzystując dwa sposoby pomiaru czasu przejścia fali detonacyjnej. Przy pomiarach prędkości detonacji metodą zwarciovą ważne jest dokładne określenie bazy pomiarowej na podstawie, której wylicza się prędkość detonacji, gdyż jest to jedno z głównych źródeł błędów pomiarowych. Szacowany błąd pomiaru prędkości detonacji metodą czujników zwarciovych wynosi 2,5 % [7].

W pierwszym sposobie do pomiaru czasu przejścia fali detonacyjnej przez określony odcinek MW a więc wartości umożliwiającej obliczenie prędkości detonacji używano klasycznego miernika TM 795. W mierniku zastosowano generator kwarcowy o

częstotliwości pracy 100 MHz. Możliwe są jednoczesne pomiary na czterech niezależnych kanałach, bądź w układzie wspólnego startu wszystkich kanałów.



**Rys.2.1. Miernik TM 795 stosowany do pomiaru prędkości detonacji**

W drugim sposobie, do pomiaru prędkości detonacji użyto komputer przemysłowy NI PXI serii 1000B firmy National Instruments. Magistrala PXI łączy szybkość oraz parametry elektryczne magistrali PCI z odpornością i zaawansowanymi możliwościami kontroli czasu oraz synchronizacji CompactPCI. Posiada ona następujące zalety:

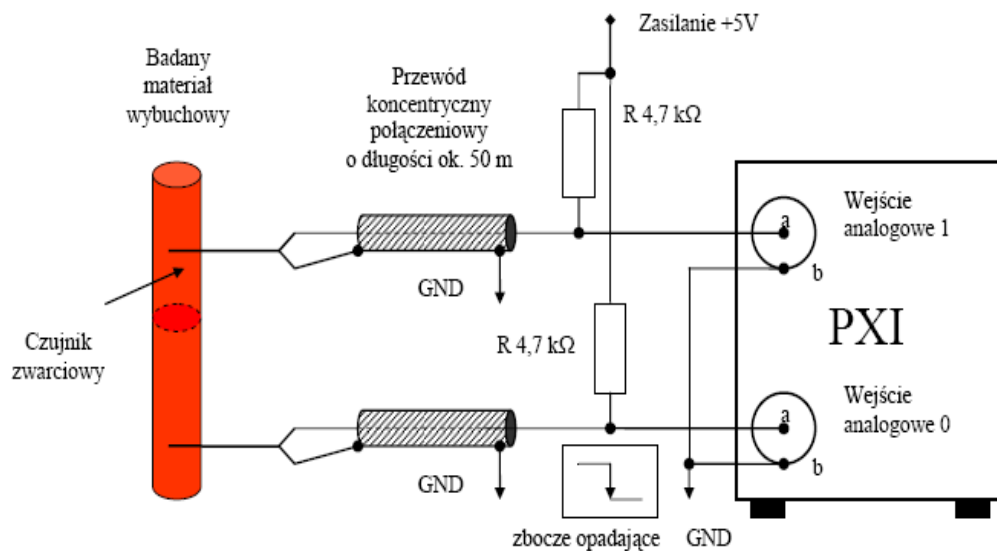
- wysoka odporność komputera na zakłócenia elektromagnetyczne
- możliwość pracy w szerokim zakresie wilgotności oraz temperatury powietrza
- duża odporność na wstrząsy i wibracje

Na komputerze został zainstalowany system operacyjny LabVIEW RT, umożliwiający pracę aplikacji w czasie rzeczywistym.

W badanym materiale wybuchowym, w odpowiednich odległościach umieszczono czujniki zwarciove. Wyprowadzenia każdego czujnika podłączono za pomocą kabla koncentrycznego do masy oraz do jednej linii (a) różnicowego wejścia analogowego karty pomiarowej komputera PXI, druga z linii wejścia analogowego została połączona z masą (b). Ponieważ zastosowano rezystory podciągające R przy rozwartym czujniku na obydwu wejściach analogowych panowało napięcie ok. 5 V.

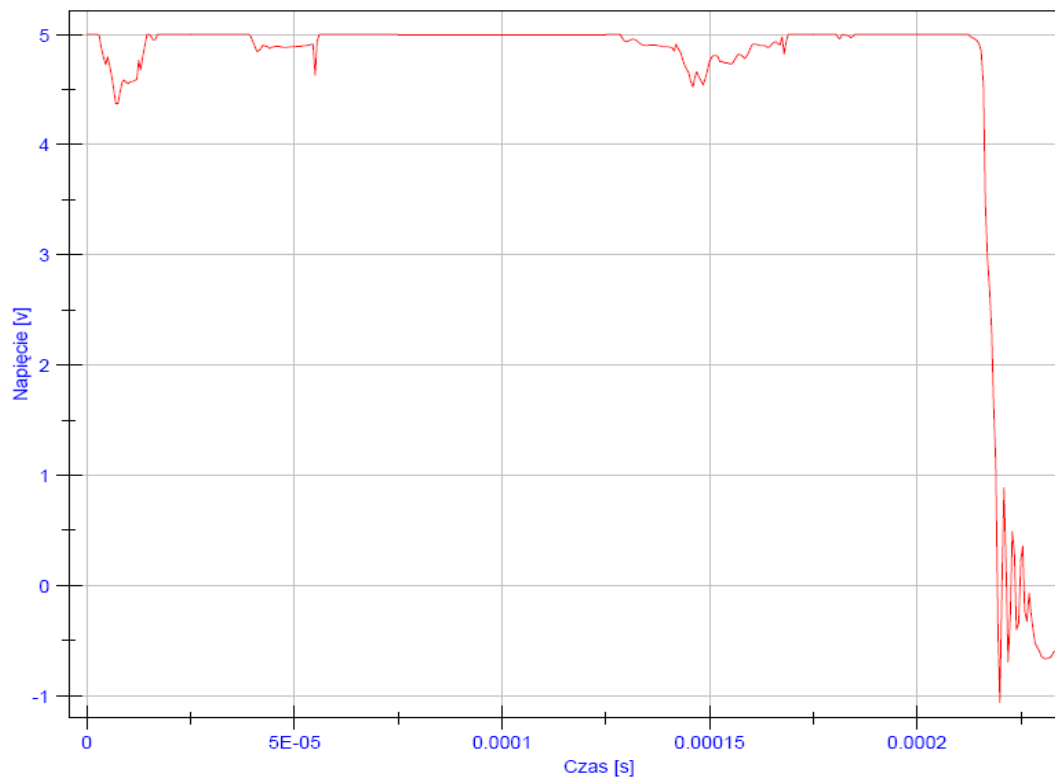
Po uruchomieniu programu na komputerze PXI następowało oczekiwanie na wyzwolenie pomiaru. Funkcję wyzwalającą pełnił kanał analogowy 0 - pojawienie się na nim zbroza opadającego powodowało rozpoczęcie rejestracji zmian napięcia na wejściach analogowych.

Przejście fali detonacyjnej powodowało zwarcie czujnika i wyzwolenie pomiaru. Zebrano dane z dwóch kanałów analogowych. Parametry pomiaru: ilość zebranych próbek 100 tys. i częstotliwość próbkowania 2 mln próbek na sekundę, pozwoliły na pomiar przez 50 ms, z rozdzielczością 0,5 us. Analiza uzyskanych przebiegów pozwoliła na określenie czasu rozchodzenia się fali detonacyjnej a tym samym na jej prędkość.

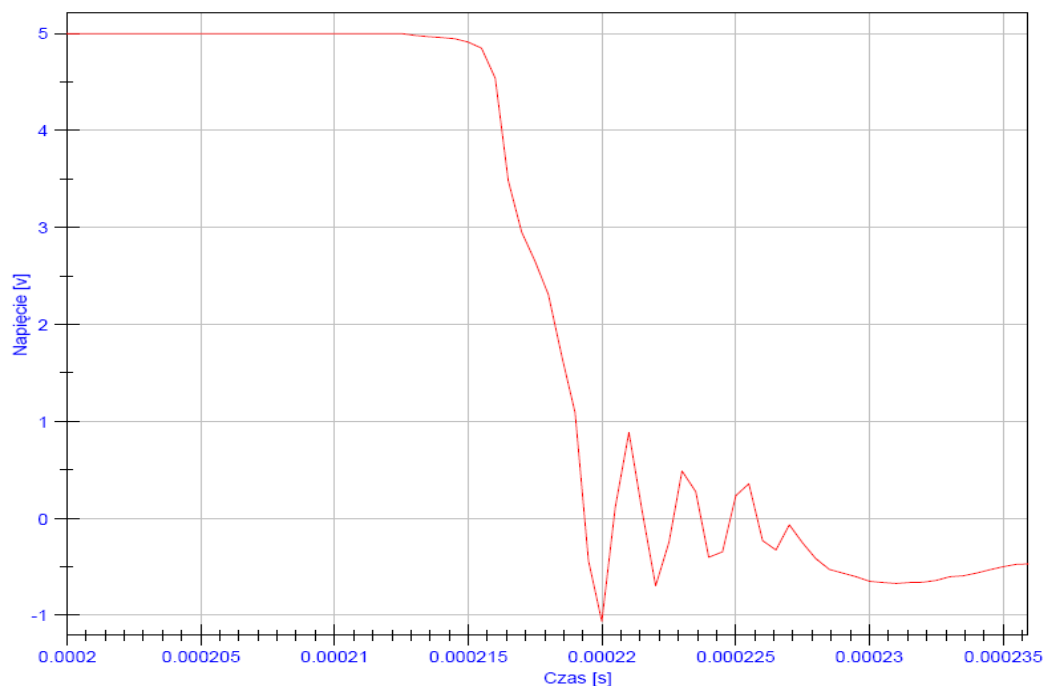


**Rys.2.2 Schemat układu pomiarowego**

Poniżej przedstawiono przykładowy wynik pomiaru czasu rozchodzenia się fali detonacyjnej:



**Rys.2.3. Przykładowy przebieg pochodzący z pomiaru (Emulinit, średnica 40 mm, baza 100 mm)**



**Rys.2.4. Przebieg pochodzący z pomiaru w powiększonej skali (odczytany czas 216 us – prędkość 4630 m/s)**

Średnią prędkość można określić zależnością:

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

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

Błąd pomiaru średniej prędkości rozchodzenia się fali detonacyjnej określono metodą różniczkki 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 i odczytu czasu,  $\Delta s = 0,02m$  - błąd pomiaru odległości między punktami pomiarowymi.

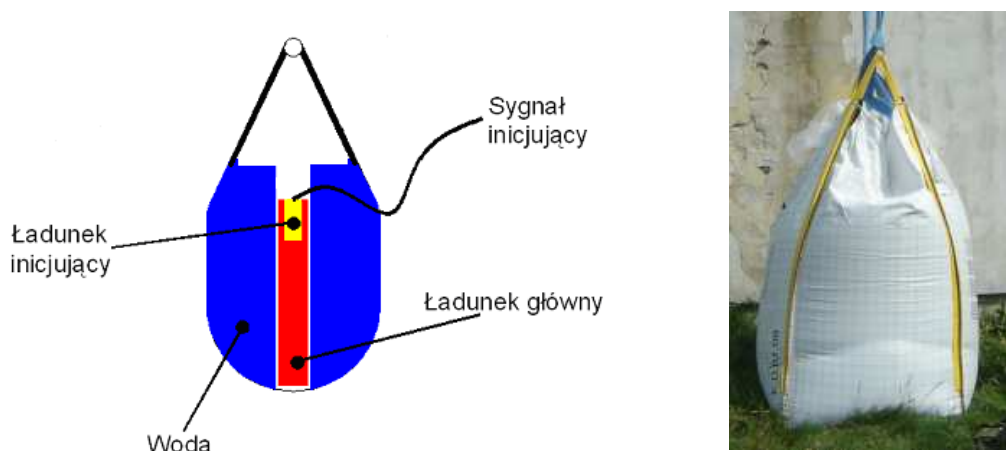
Powyższa zależność pokazuje, że znaczący wpływ na błąd pomiarowy ma niedokładność wyznaczenia odległości. Błąd pomiaru prędkości oszacowano na  $\Delta v = 50 \text{ m/s}$ .

### 3. Warunki wykonania i rezultaty eksperymentów

Jako ładunek podstawowy do tworzenia aerozolu wodnego wykorzystywano drzy rodzaje materiałów wybuchowych, charakteryzujących się różnymi prędkościami detonacji (wg danych katalogowych producenta): emulsyjny materiał wybuchowy Emulinit 2 (5460 m/s), amonowo-saletrzany materiał wybuchowy Saletrol (2140 m/s) oraz plastyczny materiał wybuchowy MWP-SW (7500 m/s).

Badania prędkości detonacji materiałów wybuchowych wykonano w otoczkach z folii polietylenowej dla różnych średnic materiału wybuchowego. Pomiar wykonano przy pomocy trzech par czujników. Dla ładunku o długości ok. 1000 mm czujniki pomiarowe rozmieszczone były co ok. 200 mm. Długość odcinka rozbiegowego fali detonacyjnej wynosiła 200 mm. W przypadku Emulinitu i saletrolu ładunki pobudzone były zapalnikiem

elektrycznym (ZE) i pobudzaczem, Ergodynem o masie 500g a w przypadku MWP-SW detonatorem heksogenowo-cerezynowym o masie 14 g (DHC 14).



**Rys. 3.1. Układ badawczy do badań prędkości detonacji nieidealnych materiałów wybuchowych w wodzie**

Przebadano ładunki Emulinitu o średnicach 40, 80 i 90 mm, ładunki Saletrolu o średnicach 65, 80 i 90 mm oraz ładunki MWP-SW o średnicy 36 i 65 mm. Do prób tworzenia aerozolu wodnego używano worków typu BIG-BAG o średnicy dna ok. 900 mm i średnicy samego worka ok. 1400 mm i pojemności ok. 1,5 m<sup>3</sup>. Badania prędkości detonacji wykonano dla minimalnej długości ładunku ok. 1000 mm.

W tabeli 3.2. zestawiono przykładowe wyniki pomiarów prędkości detonacji metodą czujników zwarciovych. Wykonano dwie serie pomiarów prędkości detonacji w powietrzu i w wodzie, dla każdego ładunku o tej samej średnicy i długości oraz zbliżonych gęstościach i masach. W niektórych przypadkach uzyskano mniej niż trzy wyniki, co było spowodowane dosyć dużą zawadnością zastosowanej metody pomiaru prędkości detonacji.

**Tabela 3.2. Wyniki badań prędkości detonacji wybranych MW**

L.p.	Rodzaj MW	Średnica [mm]	Prędkość detonacji w powietrzu		Prędkość detonacji w wodzie	
			Miernik TM795	Komp. PXI	Miernik TM795	Komp. PXI
1.	Emulinit	40	4 494 ± 100	4 494 ± 50	4 550 ± 100	4 660 ± 50
2.	Emulinit	80	5 450 ± 100	4 908 ± 50	4 823 ± 100	4 938 ± 50
3.	Emulinit	90	4 862 ± 100	5 000 ± 50	4 893 ± 100	5 128 ± 50
4.	Saletrol	65	2 930 ± 100	2 930 ± 50	3 252 ± 100	3 252 ± 50
5.	Saletrol	80	3 302 ± 100	2 969 ± 50	3 361 ± 100	3 361 ± 50
6.	Saletrol	90	3 465 ± 100	3 319 ± 50	3 620 ± 100	3 620 ± 50
7.	PMW	36	7 558 ± 100	7 692 ± 50	7 672 ± 100	7 742 ± 50
8.	PMW	65	7 354 ± 100	7 243 ± 50	7 577 ± 100	7 407 ± 50

#### 4. Analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dla Emulinitu stwierdzono minimalny, w granicach błęd pomiaru, wpływ otoczki wodnej na prędkość detonacji MW. Uzyskane wyniki różnią się od podanej przez producenta wartości prędkości detonacji (5460 m/s), ale ta została wykonana w rurze.

Ten sam materiał zdetonowany w powietrzu, praktycznie bez otoczki (umieszczony w folii polietylenowej), detonował z prędkością około 5000 m/s (dla średnicy ładunku  $\phi = 90$  cm) oraz około 4500 m/s (dla średnicy ładunku  $\phi = 40$  cm). Wyniki te sugerują, iż średnica graniczna Emulinitu jest większa niż 90 cm.

Podczas badań procesu detonacji dla saletrolu stwierdzono, iż umieszczony w otoczce wodnej detonuje z prędkością większą o około 15 – 20 % niż w porównywalnych warunkach w powietrzu. Prędkość detonacji saletrolu podawana przez producenta wynosi 2140 m/s. Producent nie podaje warunków prowadzenia pomiaru. Wydaje się, że uzyskane w tych badaniach większe wyniki wynikają z pobudzenia Ergodynem. W badaniach przeprowadzonych na potrzeby niniejszej pracy stwierdzono, iż saletrol uformowany w ładunki o średnicy 65 mm detonuje na powietrzu z prędkością ok. 3000 m/s i prędkość ta rośnie wraz ze wzrostem średnicy osiągając wartość ok. 3500 m/s dla ładunku o średnicy 90 mm.

Badania prędkości detonacji dla MWP SW wykazały zmniejszenie się jej wraz ze wzrostem średnicy ładunku. Może to wynikać z trudności nabojuwania ładunków o małych średnicach i w związku z tym uzyskiwania mniejszej gęstości ładunku. Stwierdzono również wzrost prędkości detonacji w wodzie o kilka % w stosunku do prędkości detonacji analogicznych ładunków strzelanych w powietrzu.

Generalnie, należy również stwierdzić większą powtarzalność, a tym samym wiarygodność wyników pomiaru prędkości detonacji uzyskiwanych przy pomocy komputera PXI, niż miernika TM 795.

## 5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, iż zastosowanie otoczki wodnej wpływa na prędkość niektórych nieidealnych detonacji materiałów wybuchowych. Uzyskane wyniki wskazują, że należy z większą wnikliwością zbadać wpływ otoczki wodnej na prędkość detonacji materiałów wybuchowych, rozszerzając zakres średnic badanych ładunków oraz dobierając kilka innych MW. Jest to niezbędne do powstania modelu matematyczno-fizycznego wytwarzania aerozolu wodnego przy użyciu materiałów wybuchowych.

*Powyższe badania zostały zrealizowane w ramach programu  
nr R00-O0003/3,2003/R/T00/2007/3 finansowanego przez  
Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

## Literatura

- [1] Dygdała R. S., Stefański K., Lewandowski D., Ingwer-Żabowska M., Kaczorowski M. 2006: Aerosol Produced by Explosive Detonation in a Water Bag as Fire Extinguishant., 3rd International Conference IPOEX 2006, Ustroń – Jaszowiec.
- [2] Korzuń M., 1981: 1000 słów o materiałach wybuchowych, Wydawnictwo MON, Warszawa.
- [3] Nowak H., Smoleński D., 1974: Ładunki kumulacyjne w wojsku, górnictwie i przemyśle, Wydawnictwo MON, Warszawa.
- [4] Włodarczyk E., 1996: Eksperymentalna charakterystyka jednowymiarowych fal detonacyjnych w skondensowanych materiałach wybuchowych (MW). Synteza danych literaturowych., Biuletyn WAT 3/1996 (523), s. 5-54.
- [5] Cudziło S., Trzeciński W.A., Papliński A., 1997: Badanie procesu wybuchowego napędzania cylindrycznej warstwy wody, Biuletyn WAT 5/1997 (537), s. 55-67.
- [6] Suceska M., 1995: Test methods for explosives, Springer-Verlag, New York.
- [7] Cudziło S., Maranda A., Trębiński R., Trzeciński W., 2000: Wojskowe materiały wybuchowe, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.