

# Badanie zjawiska wybuchu w powietrzu ładunków wydłużonych typu saletrole z zastosowaniem nowoczesnych metod numerycznych

Andrzej MARANDA – Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Warszawa; Piotr KOŚLIK, Justyna HADZIK\*, Zenon WILK – Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie, Oddział w Krupskim Młynie

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2014, 68, 1, 9–16

## Wstęp

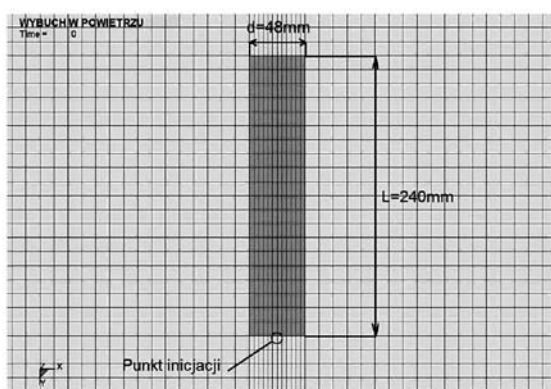
Zagadnienia związane ze zjawiskiem wybuchu w powietrzu wymagają uwzględnienia podstawowych czynników, takich jak wymiary i kształt ładunku oraz rodzaju materiału wybuchowego. Elementy te mają istotny wpływ na kształt geometryczny, wartości ciśnienia i impulsu rozchodzącej się fali podmuchowej w powietrzu w różnych kierunkach, szczególnie w strefie bliskiej wybuchu. Za pomocą modeli komputerowych możliwa jest bardzo szczegółowa analiza i ocena ilościowa wpływu wybuchu na otoczenie.

W artykule przedstawiono wyniki analiz i badań związanych z modelowaniem numerycznym ładunków materiałów wybuchowych typu saletrol na bazie saletry amonowej z dodatkiem aluminium i oleju oraz weryfikacji uzyskanych wyników w eksperymencie poligonowym. Badania w warunkach rzeczywistych pozwoliły na określenie kształtu formowania się produktów detonacji oraz oszacowanie impulsu gęstości za pomocą testu Helda.

## Część eksperymentalna

### Budowa modelu geometrycznego i numerycznego

Model wykonano w programie Ansys Ls-Dyna. Układ geometryczny zbudowany jest z dwóch elementów: cylindrycznego ładunku wybuchowego oraz otaczającego go powietrza. Wymiary charakteryzujące ładunek to długość  $L=240$  mm oraz średnica  $d=48$  mm. Ładunek pobudzany jest punktowo centralnie z jednego końca. Rysunek 1 przedstawia analizowany układ geometryczny z naniesioną siatką numeryczną (MESH). Model został zbudowany z 290 tysięcy elementów.



Rys. 1. Opis modelu

W model numerycznym dla materiału wybuchowego zastosowano równanie stanu JWŁ

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right) e^{-R_1 \frac{\rho}{\rho_0}} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right) e^{-R_2 \frac{\rho}{\rho_0}} + \omega E \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie,  $\rho$  – gęstość,  $E$  - energia wewnętrzna,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  – parametry materiałowe.

Do opisu powietrza zastosowano równanie EOS LINEAR POLYNOMIAL

Autor do korespondencji:  
Mgr inż. Justyna HADZIK, e-mail: justyna.hadzik@ipo.waw.pl

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (2)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie,  $E$  - energia wewnętrzna,  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  – parametry materiałowe.

Parametry materiałowe dla zastosowanego materiału wybuchowego typu saletrol na bazie saletry amonowej z dodatkiem aluminium oraz oleju przedstawiono w Tablicy I.

Tablica I

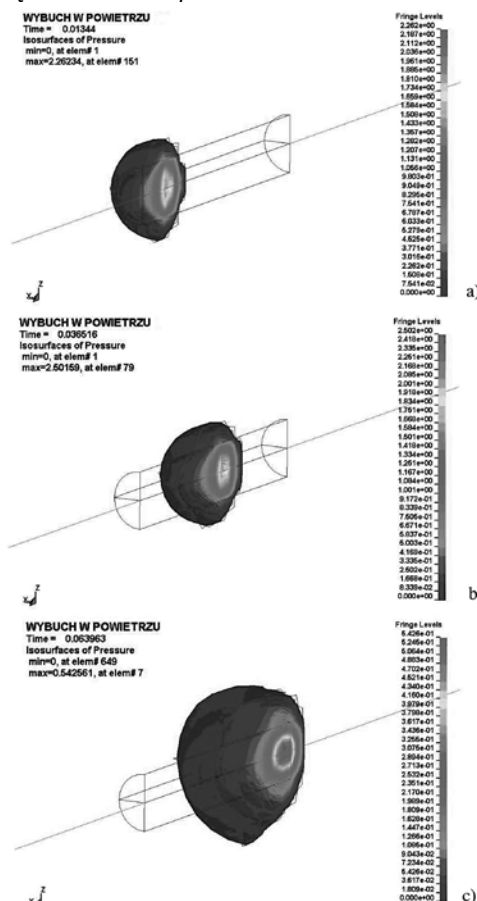
Parametry równania stanu JWŁ dla MW typu saletrol

$\rho_0$ kg/m <sup>3</sup>	Pc-j GPa	A, GPa	B, GPa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	$\omega$
931,0	5,15	49,46	1,891	3,907	1,118	0,333

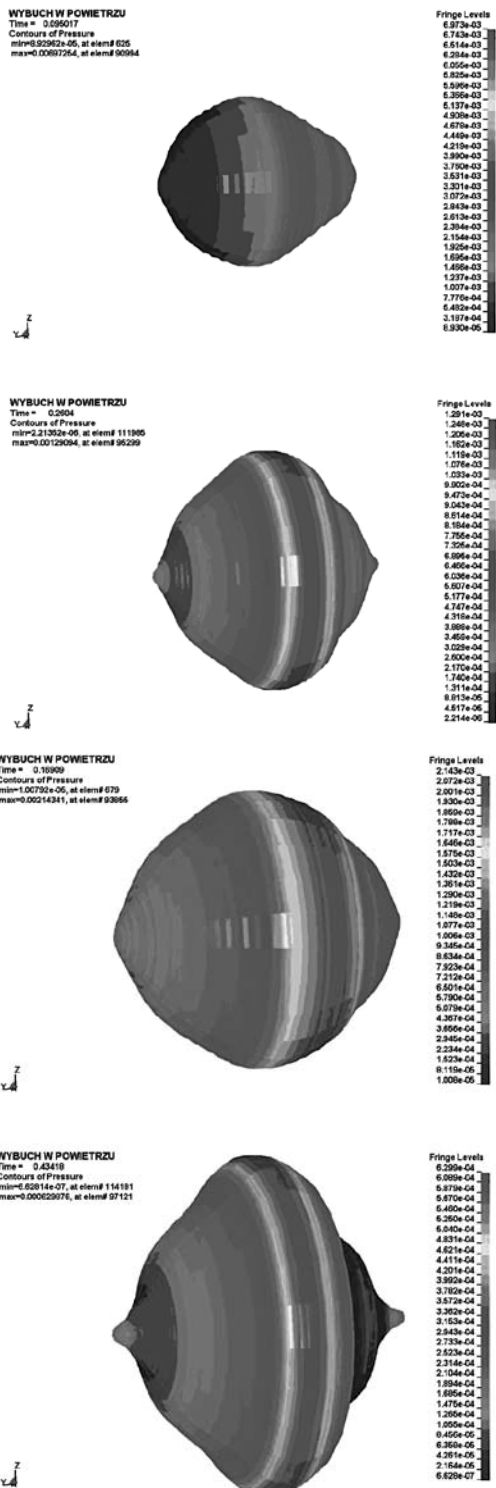
## Wyniki modelowania

W procesie przeprowadzonej analizy numerycznej otrzymano bardzo bogaty zbiór wyników obejmujący okres detonacji ładunku MW i ekspansji produktów detonacji w powietrzu. Dalej przedstawiono wybrane fragmenty rezultatów obliczeń numerycznych w układzie przestrzennym 3D.

Rysunek 2 ukazuje przebieg procesu detonacji (obrazy ciśnień) ładunku materiału wybuchowego o długości  $L=240$  mm. Okres detonacji mieści się w czasie ok. 64  $\mu$ s.



Rys. 2. Detonacja ładunku MW – obrazy ciśnień po czasie: a) 13  $\mu$ s; b) 36,5  $\mu$ s; c) 64  $\mu$ s



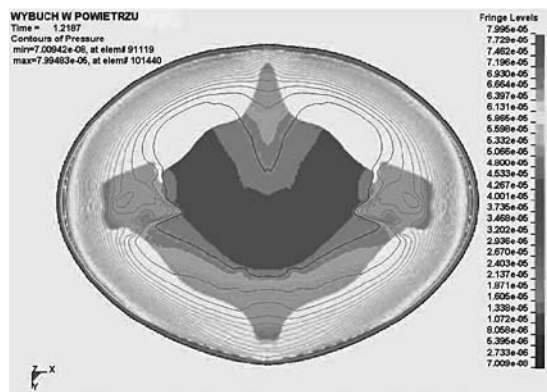
Rys. 3. Ekspansja produktów detonacji (obrazy ciśnień) w czasie od 95  $\mu$ s do 434  $\mu$ s

Na Rysunku 3 przedstawiono w kolejnych sekwencjach obrazy kolorową mapą ciśnień, ukazujące ekspansję i formowanie się produktów detonacji.

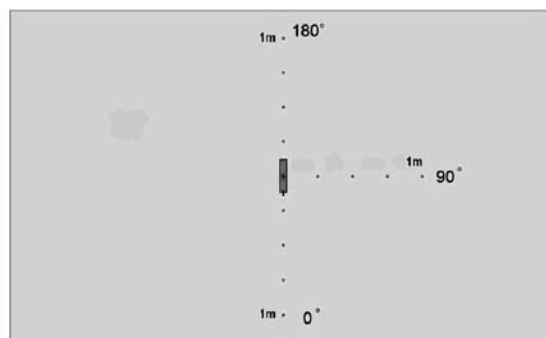
W układzie 2D (Rys.4) przedstawiono obraz produktów detonacji oraz front fali ciśnienia powietrza wywołany wybuchem po czasie ok. 1219  $\mu$ s. Przed rozprzestrzeniającymi się produktami detonacji obserwuje się w powietrzu front fali nadciśnienia.

Z punktu bezpieczeństwa prac strzałowych istotne są czynniki rażące występujące podczas wybuchu ładunku. Do czynników tych zaliczamy nadciśnienie generowane przez ładunek MW. W celu określenia nadciśnienia rozchodzącej się fali podmuchowej w powietrzu wykonano symulacje dla założonego modelu i wyznaczono wartości ciśnień w trzech kierunkach: pod kątem 0° (tj. od strony inicjatora wybuchu), 90° (tj. w kierunku prostopadłym do osi ładunku i 180°

(tj. od strony końca ładunku), w odległości 1 m od środka ładunku. Rysunek 5 przedstawia układ badawczy z rozmieszczonymi punktami pomiarowymi.

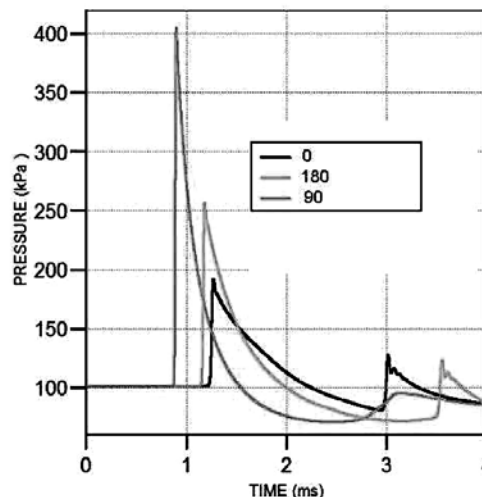


Rys. 4. Obraz 2D produktów detonacji i fali nadciśnienia powstałej w powietrzu



Rys. 5. Układ badawczy z rozmieszczonymi punktami pomiarowymi

Rysunek 6 przedstawia wykres ciśnień otrzymanych w wyniku analiz numerycznych w wybranych punktach pomiarowych.



Rys. 6. Wykresy ciśnień otrzymane w modelowaniu w odległości 1 m

Na podstawie powyższego wykresu wnioskować można, że najbardziej niszczące działanie fala ciśnienia generuje się w kierunku 90° ( $P_{max} = 405$  kPa), tzn. w kierunku prostopadłym do osi ładunku. Ciśnienie maksymalne obserwowane dla pozostałych kierunków jest znacznie niższe: dla kierunku 0° –  $P_{max} = 192$  kPa, dla kierunku 180° –  $P_{max} = 256$  kPa.

### Badanie fali podmuchowej w teście Helda

Wyniki dotyczące badania ładunków MW typu saletrol otrzymane z symulacji komputerowych porównano z wynikami uzyskanymi w badaniu poligonowym. Na poligonie strzałowym detonowano ładunki MW o następujących składach:

- Saletra amonowa „EXTRA” 91,85%, olej 4,51%, Al płatki 3,64%,
  - Saletra amonowa „EXTRA” 88,71%, olej 4,02%, Al płatki 7,27%,
  - Saletra amonowa „EXTRA” 85,23%, olej 2,65%, Al płatki 12,20%.
- Ładunki wykonane w kształcie walca o długości 250 mm i średnicy 42 mm miały gęstość średnią 0,99 g/cm<sup>3</sup>.

Fotografia 1 przedstawia układ badawczy z rozmieszczonymi względem siebie pod kątem 90° trzema czujnikami piezoelektrycznymi. Odległość czujników od centrum układu, tj. środka ładunku MW wynosi 1 m.



Fot. 1. Układ badawczy do testu Helda wraz z rozmieszczonymi czujnikami ciśnienia

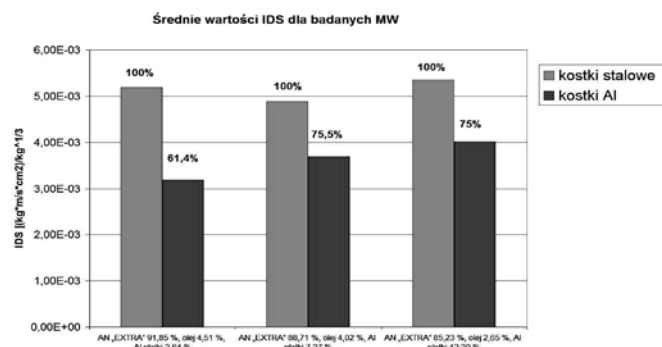
W badaniu jednocześnie wykonano test Helda umożliwiający obliczenie gęstości impulsu dla badanych ładunków MW na podstawie rozrzutu kostek stalowych i aluminiowych. W Tabelcy 2 zestawiono obliczone maksymalne i średnie wartości gęstości impulsu dla badanych MW. Wartość gęstości impulsu podano w formie przeskalowanej ( $I_{DS}$ ), tj. odniesionej do masy ładunku MW.

Tabelca 2

Maksymalne i średnie wartości gęstości impulsu ( $I_{DS}$ ) dla badanych ładunków

Badany ładunek %wag.	Promień 0,5m kostki stalowe		Promień 0,75m kostki aluminiowe	
	$I_{DS}$ 10 <sup>5</sup> Pa*s/kg <sup>-1/3</sup>		$I_{DS}$ 10 <sup>5</sup> Pa*s/kg <sup>-1/3</sup>	
	max	Średnia	max	średnia
AN 91,85 olej 4,51 Al płatki 3,64	1,44E-002	5,19E-003	9,3E-003	3,18E-003
AN 88,71 olej 4,02 Al płatki 7,27	1,14E-002	4,88E-003	9,02E-003	3,69E-003
AN 85,23 olej 2,65 Al płatki 12,20	1,58E-002	5,36E-003	1,01E-002	4,02E-003

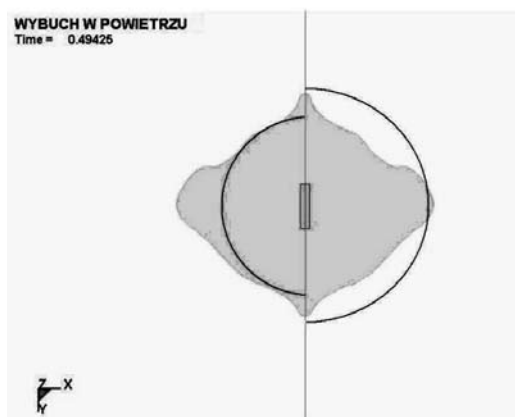
Wartości średnie  $I_{DS}$  dla badanych ładunków MW przedstawiono w postaci wykresu (Rys. 7).



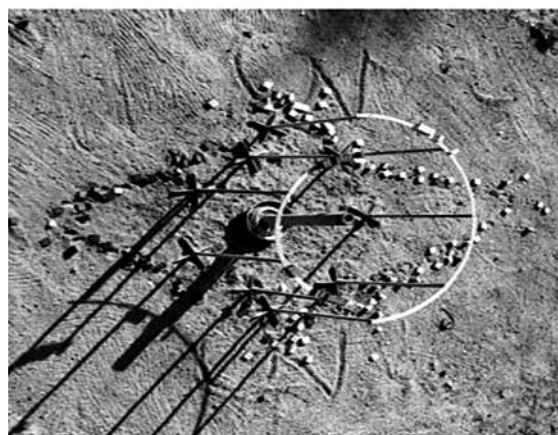
Rys. 7. Średnie wartości impulsu  $I_{DS}$  dla badanych MW

Z wykresu wynika, że dla wszystkich badanych materiałów typu saletrol, wartość gęstości impulsu dla kostek Al (promień 0,75 m) jest niższa a niżeli dla kostek stalowych (promień 0,5 m).

W teście Helda ocenie podlega również charakter rozprzestrzeniania się produktów detonacji i wielkości ciśnienia w odniesieniu do geometrii ładunku. W tym celu jednocześnie wykonano pomiary ciśnienia fali podmuchu za pomocą piezoelektrycznych czujników ciśnienia z wielokanałowym oscyloskopem cyfrowym. Po detonacji ładunku MW zaobserwowano rozłożenie kostek, których obraz przedstawia bardzo zbieżny kształt formowania się produktów detonacji zarejestrowany w numerycznej symulacji. Dalej przedstawiono obrazy zarejestrowane w symulacji komputerowej (Rys. 8) oraz na poligonie (Fot. 2).



Rys. 8. Rozkład produktów detonacji na tle półokręgów z testu Helda



Fot. 2. Rozkład kostek w teście Helda

### Badanie fali podmuchowej przy pomocy piezoelektrycznych czujników ciśnienia

W celu określenia wartości nadciśnienia generowanego z ładunków materiału wybuchowego wykorzystano stanowisko pomiarowe składające się z oscyloskopu cyfrowego (GwINSTEK GDS-2204 – maksymalna szybkość próbkowania 1 Gs s<sup>-1</sup>), który rejestrował sygnały z czujników ciśnienia. W badaniach wykorzystano czujniki ciśnienia piezoelektryczne firmy PCB PIEZOTRONICS serii 137A. W Tabelcy 3 podano parametry użytych czujników.

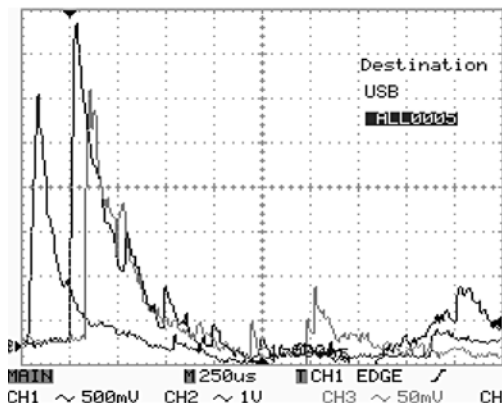
Tabelca 3

Parametry techniczne czujników ciśnienia PCB PIEZOTRONICS serii 137A

Parametr	Jednostka miary	Wartość dla czujnika 137A22	Wartość dla czujnika 137A23
Zakres pomiarowy	kPa	0–3448	0–345
Rozdzielczość	kPa	0,069	0,069
Czułość (± 15%)	mV/kPa	1,45	14,5
Maksymalne ciśnienie	kPa	6895	6895

Po detonacji ładunku uzyskano na ekranie oscyloskopu zapis z pomiaru ciśnień w trzech charakterystycznych kierunkach rozmieszczenia czujników (Rys. 9):

- w kierunku naprzeciwko położenia zapalnika – rejestracja na kanale 1 (CH1)
- w kierunku znajdującym się pod kątem 90° do kierunku rozchodzenia się detonacji – rejestracja na kanale 2 (CH2)
- w kierunku od miejsca położenia inicjału (zapalnika) – rejestracja na kanale 3 (CH3).



Rys. 9. Profile zarejestrowanych ciśnień na ekranie oscyloskopu

W Tabelcy 4, na podstawie uzyskanych przebiegów ciśnień na oscyloskopie, uwzględniających czułości poszczególnych czujników i ustalenia czułości poszczególnych kanałów oscyloskopu, przedstawiono wyniki z zarejestrowanych maksymalnych ciśnień.

Tabelca 4

**Wyniki ciśnień fali podmuchowej uzyskane za pomocą czujników ciśnienia**

Nr kanału oscyloskopu	Rodzaj czujnika	Czułość mV/kPa	P <sub>max</sub> kPa
1	czujnik 137A23 nr seryjny 7282	14,32	254,2
2	czujnik 137A23 nr seryjny 7283	13,88	406,3
3	czujnik 137A22 nr seryjny 7233	1,42	204,2

Z porównania wyników uzyskanych z pomiarów za pomocą czujników w eksperymencie poligonowym wynika, że są one zbliżone z profilami ciśnień otrzymanych w symulacji komputerowej; uzyskano takie same położenia czasowe poszczególnych impulsów ciśnienia. Także długość trwania impulsu ciśnienia (obszar nadciśnienia) jest podobny i wynosi odpowiednio ok. 670 μs oraz ok. 650 μs dla przypadku ciśnienia rejestrowanego pod kątem 90°.

**Podsumowanie i wnioski**

W artykule przedstawiono wyniki badań procesów zachodzących w czasie detonacji i ekspansji produktów detonacji w powietrzu. Szczegółowej analizie poddano ładunki MW typu saletrol w kształcie walca. Zjawiska zachodzące w czasie wybuchu MW w powietrzu zamodelowano w programach Ansys LS-Dyna w postaci modeli przestrzennych (3D). Na podstawie analizy komputerowej wyznaczono charakterystyki fali ciśnienia, ich maksymalne wartości oraz kształt obłoku produktów detonacji. Obserwacje dokonane na komputerze dają jasny obraz zjawisk zachodzących w czasie detonacji i ekspansji produktów detonacji. Potwierdzeniem bardzo bogatego zbioru wyników otrzymanego z symulacji numerycznej są wyniki uzyskane doświadczalnie. Zarówno pomiar ciśnienia fali podmuchowej, jak i obraz uzyskany z rozrzutu kostek w teście Helda potwierdziły,

iż największa ekspansja produktów detonacji dla rozpatrywanego kształtu ładunku następuje w kierunku prostym do osi ładunku.

Ponadto symulacje komputerowe w pełni odzwierciedlają procesy, jakie zachodzą w czasie wybuchu MW w powietrzu. Dzięki numerycznym narzędziom, jakimi są nowoczesne komputery sprzężone z specjalistycznymi programami, specjaliści zajmujący się rażącym oddziaływaniem materiałów wybuchowych na otoczenie mogą poddać szerokiej ocenie charakter pracy środków strzałowych i mieszanin wybuchowych na środowisko.

**Literatura**

1. Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski J., Trębiński R., Trzciński W.: *Wojskowe materiały wybuchowe*. Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
2. LS-DYNA Keyword Use's Manual Version 970. Livermore Software Technology Corporation 2003.
3. Held M.: *New diagnostic techniques in blast waves, Proc. of the 9<sup>th</sup> Seminar New Trends in Research of Energetic Materials*. Pardubice, April 19.21.2006, part I, 16 – 41.
4. Koślik P., Wilk Z., Cieślicka K.: *Badanie zjawiska wybuchu z wykorzystaniem komputerowych metod numerycznych etap III – wybuch w powietrzu*. Sprawozdanie nr EMC 063900013, IPO Warszawa/ Krupski Młyn 2010.

Prof. dr hab. inż. Andrzej MARANDA ukończył studia w roku 1971 Wydział Chemiczny Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje w Wojskowej Akademii Technicznej oraz w Instytucie Przemysłu Organicznego w Warszawie. Zainteresowania naukowe: chemia i technologia materiałów wybuchowych, ochrona środowiska. Jest autorem i współautorem pięciu monografii, 20. patentów oraz ponad 500. publikacji zamieszczonych w czasopismach naukowych oraz prezentowanych na krajowych i zagranicznych konferencjach naukowych.  
e-mail: amaranda@wat.edu.pl, tel. +48226837541

\* Mgr inż. Justyna HADZIK – absolwentka Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach, na kierunku Technologia Chemiczna, specjalność Technologia Organiczna. Studia podyplomowe na kierunku Technologia Materiałów Wybuchowych. Asystentka w Instytucie Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie. Zainteresowania naukowe związane z opracowaniem i badaniem materiałów wybuchowych i środków strzałowych.  
e-mail: justyna.hadzik@ipo.waw.pl, tel. 32 392 84 74

Dr inż. Zenon WILK – adiunkt, absolwent Politechniki Śląskiej w Gliwicach, specjalność Przetwarzanie i Użytkowanie Energii. Studia podyplomowe: Technologia Materiałów Wybuchowych, doktorat na Wydziale Mechatroniki WAT w Warszawie. Specjalista w zakresie technologii materiałów wybuchowych, mechaniki i modelowania zagadnień wybuchu, szczególnie zjawiska kumulacji. Kierownik Oddziału Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie. Realizator wielu projektów badawczych i aplikacyjnych w zakresie wyrobu materiałów wybuchowych i sprzętu strzałowego dla górnictwa otworowego i prac specjalistycznych.  
e-mail: zenon.wilk@ipo.waw.pl, tel. 32 382 11 91

Mgr inż. Piotr KOŚLIK – absolwent Politechniki Wrocławskiej, specjalność Mechanika i Budowa Maszyn – konstrukcje, wytwarzanie i eksploatacja oraz Politechniki Częstochowskiej, specjalność Mechanika i Budowa Maszyn – spawalnictwo. Specjalista badawczo-techniczny w Instytucie Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie. Zainteresowania w zakresie wykorzystania narzędzi numerycznych w procesach związanych ze zjawiskiem wybuchu oraz do projektowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych środków strzałowych.  
e-mail: piotr.koslik@ipo.waw.pl, tel. 32 392 84 74