

# Badanie wpływu różnych dodatków na prędkość detonacji saletroli

## *Testing of influence of different additives on detonation velocity of ANFO explosives*

*Andrzej Maranda, Łukasz Cichosz*

*Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, PL*

**Streszczenie:** *Aktualnie saletrole są dominującym środkiem strzałowym stosowanym w przemyśle wydobywczym. Pomimo, że są to materiały wybuchowe o bardzo prostym składzie w dalszym ciągu realizowane są badania w celu wyjaśnienia wpływu poszczególnych czynników na parametry detonacyjne oraz przebieg procesu detonacji saletroli. W artykule dokonano analizy danych literaturowych dotyczących zależności prędkości detonacji saletroli od ilościowego i jakościowego składu. Przedstawiono również wyniki badań prędkości detonacji oraz intensywności powietrznej fali podmuchowej saletroli zawierających saletrę amonową porowatą lub mieloną.*

**Słowa kluczowe:** *saletrol, prędkość detonacji, powietrzna fali podmuchowa.*

**Keywords:** *ANFO explosives, detonation velocity, shock wave in air.*

### 1. Wstęp

Górnictwo wykorzystuje materiały wybuchowe, które są głównie mieszaninami utleniaczy i składników palnych. Podstawowym utleniaczem jest azotan(V) amonu ze względu na jego cenę oraz zdolność do detonacji w określonych warunkach. Natomiast składnikiem palnym może być dowolna substancja organiczna, pył metaliczny lub siarka. W materiałach wybuchowych sypkich i proszkowych jeżeli składnikiem palnym jest substancja organiczna występuje ona w postaci stałej zazwyczaj o wysokim stopniu rozdrobnienia. W materiałach wybuchowych zawieszinowych organiczne paliwo charakteryzuje się dobrą rozpuszczalnością w wodzie. Natomiast komponentami palnymi organicznymi stosowanymi w saletrolach i materiałach wybuchowych emulsyjnych są różne gatunki olei i wosków.

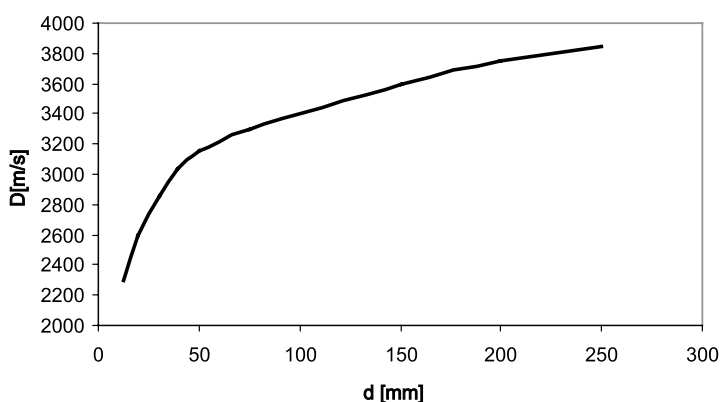
W materiałach sypkich i proszkowych saletra stosowana jest w postaci krystalicznej a najczęściej rozdrobnionych ziaren. Natomiast w przypadku saletroli podstawową formą saletry amonowej jest postać granulowana. Rozdrobnione ziarna utleniacza występują w bardzo niewielkiej ilości (< 1%) jednak mają zdecydowanie pozytywny wpływ na zdolność saletroli do detonacji. Rozwiązanie saletry amonowej rozdrobnionej – olej nie jest stosowane ze względów użytkowych. Ponieważ taka postać materiału wybuchowego uniemożliwia mechanizację ładunku otworów strzałowych. Jednak znajomość parametrów detonacyjnych tego typu mieszanin wybuchowych ma wartość teoretyczną, umożliwiającą lepsze poznanie procesów zachodzących podczas detonacji materiałów wybuchowych, których podstawowym komponentem jest azotan(V) amonu.

### 2. Przegląd danych literaturowych

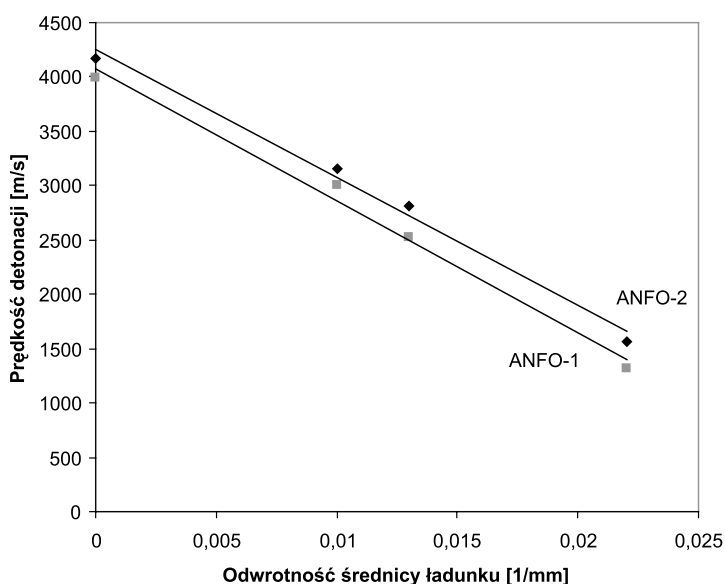
Na efektywność zastosowania saletroli ma wpływ wiele czynników, do których najważniejszych należą: parametry detonacyjne wybuchowych mieszanin, sposób inicjowania, warunki ładunku, średnica i stopień zawodnienia otworów strzałowych, właściwości mechaniczne urabianego górotworu i rodzaj przybitki. Jednym z najczęściej określanym parametrem detonacyjnym jest prędkość detonacji. O jej wartości decyduje ilościowy i jakościowy skład saletroli, gęstość, średnica i rodzaj otoczki ładunku. Podobnie jak w przypadku innych materiałów wybuchowych prędkość detonacji saletroli rośnie wraz z wzrostem średnicy ładunku

(rys. 1). Według autorów pracy [1] maksymalna, hydrodynamiczna prędkość detonacji saletroli o zerowym bilansie tlenowym wynosi  $4750 \text{ m s}^{-1}$  i uzyskana została przy średnicy ładunku  $355 \text{ mm}$ . Dalsze zwiększanie wielkości średnicy, powyżej jej granicznej wartości, oraz zmiana właściwości fizykochemicznych składników nie powoduje wzrost prędkości detonacji. Autorzy pracy [1] nie podają gęstości badanego saletroli. Ale z wcześniej przedstawionych danych wynika, że gęstość saletroli w otworze strzałowym może być w granicach  $(0,75 \div 0,85) \text{ g cm}^{-3}$ , a dane przedstawione na rys. 1 dotyczą górnego zakresu gęstości.

Zbliżoną ( $4700 \text{ m s}^{-1}$ ) maksymalną wartość prędkości detonacji ( $D_{\max}$ ) saletroli (azotan(V) amonu/ olej 94/6, gęstość  $0,95 \text{ g cm}^{-3}$ ) podaje Gordon w pracy [3]. Uzyskał ją wykreślając prostoliniową zależność  $D=f(1/d)$ . Również prostoliniową zależność  $D=f(1/d)$  przedstawiono w pracach [4, 5]. W publikacji [4] dla bliżej nieokreślonego saletroli uzyskano prędkość detonacji w ładunku o nieograniczonej średnicy  $4500 \text{ m s}^{-1}$ . Znacznie niższe wartości  $D_{\max}$  uzyskano w pracy [5] dla saletroli 94,5/5,5 -  $3940 \text{ m s}^{-1}$  i  $4060 \text{ m s}^{-1}$  - zawierających saletrę amonową o chłonności oleju odpowiednio 8% (ANFO-2) i 9,5% (ANFO-1) (rys. 2).



Rys. 1. Zależność prędkości detonacji ( $D$ ) saletroli od średnicy ładunku ( $d$ ). [1]



Rys. 2. Zależność prędkości detonacji saletroli ANFO-1 i ANFO-2 od odwrotności średnicy ładunku. [5]

Natomiast z wykresu zamieszczonego w pracy [6] wynika, że przy większych średnicach ładunków przyrost prędkości detonacji jest mniej intensywny i zależność  $D=f(1/d)$  traci charakter prostoliniowy. Jeszcze wyższą

wartość eksperymentalnie wyznaczonej prędkości detonacji podaje Mader [7] powołując się na pracę Perssona. Persson wykazał, że przy gęstości  $0,88 \text{ g cm}^{-3}$  ładunek saletrolu umieszczony w otworze strzałowym o średnicy 268 mm ma prędkość detonacji  $5500 \text{ m s}^{-1}$ .

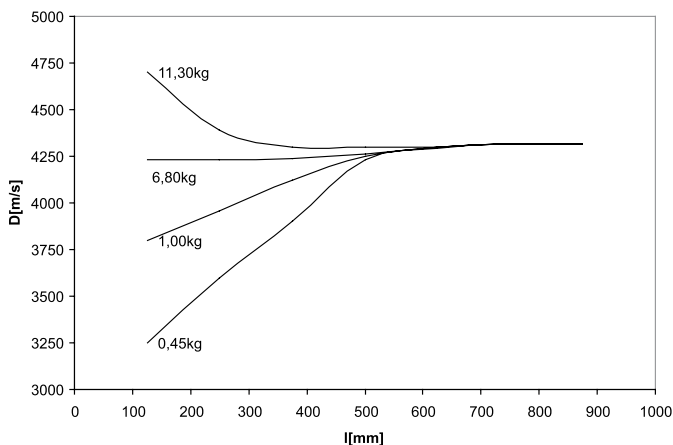
W pracy [3] podano również prędkości i inne parametry detonacji saletrolu (azotan(V) amonu/olej 94/6) o gęstości  $0,95 \text{ g cm}^{-3}$ , zawierających saletrę amonową o różnym stopniu rozdrobnienia. Rezultaty pomiarów przedstawiono w tab. 1.

**Tab. 1.** Zależność parametrów detonacji saletrolu 94/6 od rozdrobnienia saletry amonowej. [3]

Rozdrobnienie saletry amonowej [ $\mu\text{m}$ ]	Średnica krytyczna [mm]	Prędkość detonacji [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Ciśnienie detonacji [GPa]
50	20	2730	1,6
500	48	2440	1,3

Jak wynika z danych zestawionych w tab. 1 wzrost rozdrobnienia saletry amonowej, a więc powierzchni właściwej, powoduje zwiększenie parametrów detonacyjnych i zdolności do detonacji. Zostało to między innymi potwierdzone w pracy [8] dla saletr amonowych rolniczej i porowatej o różnej wielkości ziaren.

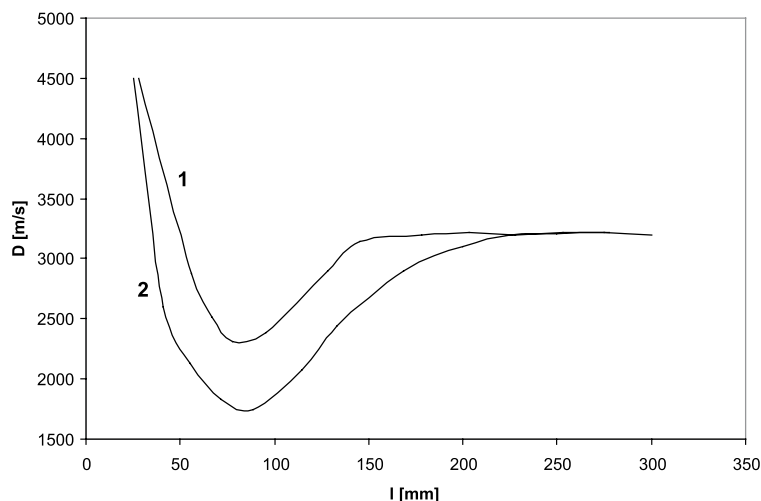
Uformowanie się fali detonacyjnej w materiałach wybuchowych poprzedzone jest okresem przeddetonacyjnego rozwoju procesu wybuchowego. Przebiega on na odległości odpowiadającej od dwóch do trzech średnic ładunku i zależy od masy i średnicy detonatora. Odcinek przeddetonacyjny może zmieniać się od kilku centymetrów, jeżeli średnice ładunku i detonatora są zbliżone, do jednego metra w przypadku kiedy średnica ładunku jest o wiele większa. Rys. 3 ilustruje zależność prędkości detonacji od odległości od czoła detonatora przy różnych jego masach. Wynika z niego, że proces wybuchowy może zacząć się propagować z większą lub mniejszą prędkością, jednak po pewnym czasie (drodze) bez względu na masę detonatora osiąga taką samą wartość prędkości detonacji, charakterystyczną dla danej mieszaniny wybuchowej i warunków detonacji.



**Rys. 3.** Zmiana prędkości procesu wybuchowego ( $D$ ) saletrolu w ładunku o średnicy 229 mm w zależności od masy detonatora i odległości od jego powierzchni czołowej ( $l$ ). [1]

Analogiczne eksperymenty przeprowadzono w pracy [9], gdzie badano rozwój procesu detonacji w saletrolu 94,5/5,5 w ładunkach o średnicy 110 mm w funkcji masy detonatorów heksogenowych. Badano szczegółowo rozwój wybuchowych procesów na początkowym odcinku ładunku i stwierdzono występowanie nietypowego minimum (rys. 4). Występowanie tego minimum autorzy pracy [9] tłumaczą faktem, że w części ładunku w której następuje spadek  $D$ , energia wydzielająca się w wyniku rozkładu obciążanego obszaru MW jest zbyt mała, aby zapewnić stacjonarność procesu. Dopiero po wnikięciu impulsu falowo-uderzeniowego na odpowiednio dużą głębokość w pobudzany ładunek, energia generująca się podczas rozkładu obciążanego obszaru MW jest na tyle duża, że rozpoczyna się samopodtrzymująca reakcja. Od tego momentu prędkość

procesu wybuchowego wzrasta do wartości stacjonarnej, charakterystycznej dla danego MW i uzależnionej od jego składu chemicznego, gęstości, stopnia jednorodności oraz średnicy i rodzaju otoczki.



**Rys. 4.** Prędkość procesu wybuchowego w saletroli 94,5/5,5, w ładunku o średnicy 110 mm, w funkcji odległości od płaszczyzny inicjowania dla różnych mas detonatorów heksogenowych: 1 – 100 g; 2 – 25 g. [8]

Zastosowanie do inicjowania saletroli detonatorów o dużych masach, wykonanych z materiałów wybuchowych o prędkościach detonacji znacznie wyższych od  $D$  saletroli, powoduje większą efektywność ich działania w górotworze. Związane jest to z faktem pełnego wykorzystania energii zawartej w początkowej objętości saletroli gdzie przebiegają procesy przeddetonacyjne.

Wpływ masy inicjatora i rodzaju otoczki na prędkość detonacji saletroli badano również w pracach [10,11]. W pracy [10] badano  $D$  saletroli 94/6 w ładunkach umieszczonych w rurach z tworzywa sztucznego i inicjowanych detonatorami wykonanymi z materiału wybuchowego typu PBX (tab. 2). Na podstawie uzyskanych wyników autorzy pracy twierdzą, że detonacja saletroli jest procesem nieidealnym a w zakresie małych średnic ładunków niewielka zmiana rozdrobnienia utleniacza i geometrii ładunku powoduje duże różnice w wartościach prędkości detonacji. Natomiast z badań przedstawionych w pracy [11] wynika ogólny wniosek, że zastąpienie otoczki ładunku z papierowej na grubościenną stalową powoduje zbliżenie warunków procesu detonacji saletroli 94/6 do reżimów idealnych.

**Tab. 2.** Wpływ masy inicjatora i rodzaju otoczki ładunku na prędkość detonacji saletroli. [10]

Gęstość MW [g cm <sup>-3</sup> ]	Masa inicjatora [g]	Średnica wewnętrzna otoczki [mm]	Grubość ścianki otoczki [mm]	Prędkość detonacji [m s <sup>-1</sup> ]
0,81	18,6	30,6	2,8	1420
0,80	28,1	30,6	2,8	1530
0,85	32,0	55,1	2,8	2080
0,80	60,5	55,1	2,8	2000
0,86	150,0	78,7	2,8	2980

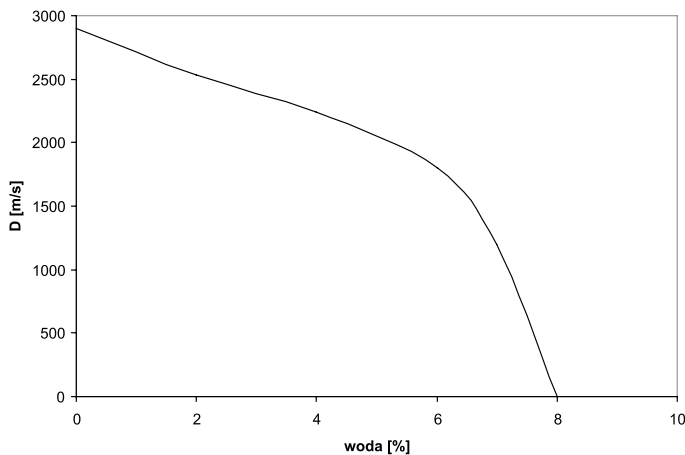
Prędkość detonacji saletroli zależy głównie od stopnia przereagowania azotanu(V) amonu w strefie pomiędzy czołem fali detonacyjnej a płaszczyzną Chapmana-Jougueta. W pracy [8] porównano dane eksperymentalne z rezultatami szacowania teoretycznego dla saletroli o gęstości 0,954 g cm<sup>-3</sup> (tab. 3).

**Tab. 3.** Obliczone i wyznaczone eksperymentalnie parametry detonacyjne saletrolu o gęstości  $0,954 \text{ g cm}^{-3}$  w zależności od stopnia przereagowania azotanu(V) amonu. [7]

Stopień przereagowania azotanu(V) amonu [%]	Wartości oszacowane teoretycznie			Wartości eksperymentalne D [m s <sup>-1</sup> ]
	$p_{CJ}$ [GPa] *	$T_{CJ}$ [K]*	D [m s <sup>-1</sup> ]	
100	8,6	2169	5715	---
75	4,7	1718	4600	4600
50	2,9	1184	3700	3800
45	2,4	1087	3500	3500
40	1,9	992	3200	3200

\* -  $p_{CJ}$ ,  $T_{CJ}$  – odpowiednio, ciśnienie i temperatura w płaszczyźnie Chapmana-Jougueta.

Podstawowym składnikiem saletrolu jest higroskopijna saletra amonowa. Pomimo stosowania środków hydrofobowych w miarę upływu czasu składowania saletrolu zwiększa się w nich zawartość wody. Powoduje ona zbrylanie się granulek azotanu(V) amonu i jednocześnie wpływa negatywnie na prędkość detonacji wzbuchowej mieszanki i jej zdolność do detonacji (rys. 5).



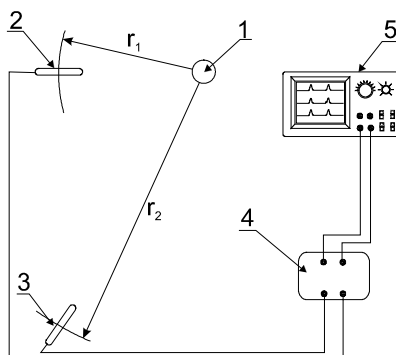
**Rys. 5.** Wpływ stężenia wody na prędkość detonacji saletrolu. [1]

### 3. Część eksperymentalna

Saletrole stosowane w przemyśle wydobywczym są zasadniczo mieszaninami granulowanej saletry amonowej i różnego typu olejów. Ze względu na określoną wytrzymałość mechaniczną porowatych granulek utleniacza mieszanki zawierają również tzw. podziarno, które ma wpływ na parametry detonacyjne saletrolu. Ze względu na niskie ciepło wybuchu do saletrolu dodawany jest pył aluminiowy, który powoduje wzrost ciepła i temperatury wybuchu oraz również oddziałuje na przykład na prędkość detonacji saletrolu.

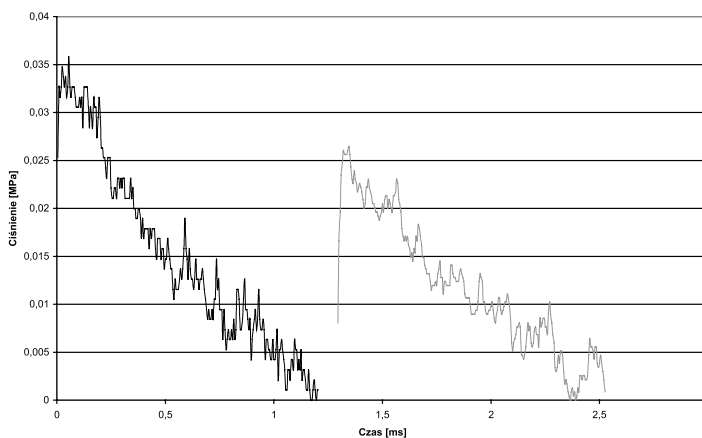
W ramach niniejszej pracy przeprowadzono kilka serii badań, który miały głównie charakter poznawczy. Mierzonymi parametrami była prędkość detonacji i intensywność powietrznej fali podmuchowej. Prędkość detonacji mierzono metodą czujników zwarciowych. Pomiar nadciśnienia fali podmuchowej realizowano za pomocą czujnika ciśnienia PCB Piezotronics, Inc serii 137A21. Czujnik ten dzięki swojej konstrukcji pozwala na zarejestrowanie nadciśnienia fali przechodzącej (ślizgającej się po powierzchni roboczej czujnika). Czujniki ciśnienia tej firmy są czujnikami elektromechanicznymi przetwarzającymi ciśnienie (stosunek działającej siły do powierzchni elementu czynnego czujnika) na proporcjonalny sygnał napięciowy. Wyjściowy sygnał napięciowy uzyskiwany jest dzięki wykorzystaniu efektu piezoelektrycznego.

Ładunki umieszczano na wysokości 1,5 m od powierzchni ziemi. Czujniki zostały umieszczone w odległości 2 m i 2,5 m od ładunku. Odległości czujnika i ładunku od podłoża były wystarczające aby zabezpieczyć się przed wpływem fal odbitych na rejestrowane przebiegi ciśnienia. Schemat układu przedstawiono na rys. 6.



**Rys. 6.** Schemat układu pomiarowego: 1 – ładunek badanego materiału wybuchowego; 2, 3 – czujniki ciśnienia PCB; 4 – wzmacniacz sygnału PCB; 5 – oscyloskop;  $r_1$ ,  $r_2$  – odległości ładunku do poszczególnych czujników.

Testowane mieszaniny wybuchowe umieszczano w rurach winidurowych o średnicy zewnętrznej 50 mm i inicjowano pobudzaczem wykonanym z prasowanego o masie 5 g. W pierwszej serii prób określono intensywność powietrznej fali podmuchowej generowanej w wyniku detonacji saletroli zawierających 5,7% oleju P-10 oraz mieszaninę saletry amonowej granulowanej i rozdrobnionej. Chłonność oleju saletry granulowanej wynosiła 16% a gęstość nasypowa  $0,76 \text{ g cm}^{-3}$ . Natomiast skład wielkość ziaren saletry rozdrobnionej była w zakresie  $(125 \div 600) \mu\text{m}$ . Zastosowany pył aluminiowy płatkowany miał powierzchnię krycia ok.  $5500 \text{ m s}^{-1}$ . Na rys. 7 przedstawiono przykładową rejestrację nadciśnienia powietrznej fali podmuchowej a w tab. 4 obliczone impulsy całkowite.



**Rys. 7.** Przykładowa rejestracja nadciśnienia powietrznej fali podmuchowej generowanej detonacją ładunku saletroli zawierającego [%]: saletra amonowa granulowana – 84,3; saletra amonowa rozdrabniana – 10,0; olej – 5,7.

**Tab. 4.** Impulsy całkowite saletroli zawierających dwa rodzaje saletry amonowej.

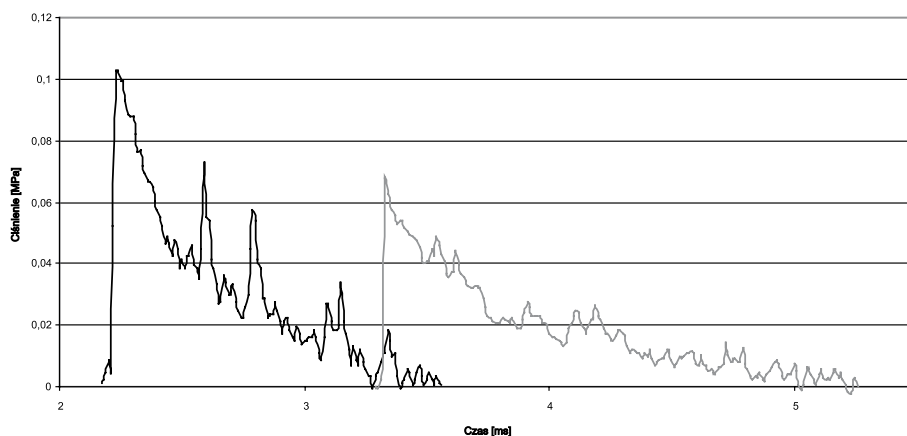
Skład saletroli [%]			Gęstość [ $\text{g cm}^{-3}$ ]	Impuls całkowity [MPas], w odległości [m]	
Saletra amonowa		Olej P-10		2,0	2,5
granulowana	rozdrobniona				
84,5	10,0	5,5	0,83	17,9	14,6
87,0	7,5	5,5	0,84	15,9	13,1
89,5	5,0	5,5	0,80	15,0	13,1

W kolejnej serii eksperymentów badano prędkość saletroli zawierających saletrę amonową rozdrobnioną i olej P-10. Wyniki eksperymentów ilustruje tab. 5.

**Tab. 5.** Prędkości detonacji saletroli zawierających saletrę amonową rozdrobnioną.

Skład saletroli [%]		Gęstość [g cm <sup>-3</sup> ]	Prędkość detonacji [m s <sup>-1</sup> ]
Saletra amonowa rozdrobniona	Olej P-10		
98,0	2,0	1,04	2260
96,0	4,0	0,98	2560
94,3	5,7	0,93	2520

Natomiast w ostatniej serii eksperymentów badano prędkość detonacji i intensywność powietrznej fali uderzeniowej generowanej podczas wysokoenergetycznych przemian aluminizowanych saletroli. Na rys. 8 pokazano przykładową rejestrację nadciśnienia powietrznej fali dla aluminizowanego saletroli a wyniki pomiarów parametrów detonacyjnych zestawiono w tab. 6.



**Rys. 8.** Przykładowa rejestracja nadciśnienia powietrznej fali podmuchowej generowanej detonacją ładunku saletroli zawierającego [%]: saletra amonowa granulowana – 84,0; pył aluminiový płatkowany – 15,0; olej – 1,0.

**Tab. 6.** Parametry detonacyjne aluminizowanych saletroli.

Skład saletroli [%]			Gęstość [g cm <sup>-3</sup> ]	Prędkość detonacji [m s <sup>-1</sup> ]	Impuls całkowity [MPas], w odległości [m]	
Saletra amonowa granulowana	Olej P-10	Pył aluminiový			2,0	2,5
91,1	3,9	5,0	1,07	2930	45,3	35,5
87,6	2,4	10,0	1,02	3350	---	---
84,0	1,0	15,0	1,05	3190	40,3	37,0

#### 4. Analiza wyników badań

Saletrole są aktualnie najbardziej popularnymi materiałami wybuchowymi stosowanymi w zakładach wydobywczych. Mogą mieć również znaczenie nie tylko użytkowe, ponieważ ich nieskomplikowany skład umożliwia prowadzenie badań między innymi mechanizmu procesu detonacji mieszanin wybuchowych zawierających azotan(V) amonu o różnym stopniu rozdrobnienia. Wyniki badań zamieszczone w tab. 4 udowodniły, że dodatek saletry amonowej rozdrobnionej powoduje wzrost zdolności do wykonania pracy saletroli, określonej w tym przypadku metodą pomiaru intensywności powietrznej fali uderzeniowej. Brak rezultatów pomiaru dla saletroli zawierającego wyłącznie granulowaną saletrę amonową wynika z faktu, że

w warunkach prowadzonych eksperymentów nie detonował.

Maksimum na zależności  $D=f(\% \text{ oleju})$  w przypadku mieszanin wybuchowych zawierających rozdrobnioną saletrę amonową uzyskano przy zawartości oleju poniżej stechiometrycznej (tab. 5). Powyższe wyniki eksperymentów świadczą, że ogniskami detonacji saletroli są rozdrobnione ziarna azotanu(V) amonu. W kolejnej fazie chemicznych reakcji zaczyna się egzotermiczny proces dekompozycji granulowanej saletry amonowej i piroliza oleju. Następnie produkty tych reakcji mogą współreagować albo w fali detonacyjnej lub w fali rozrzedzenia.

Dodatek do saletroli pyłu aluminiowego komplikuje reaktywny układ, w którym występują dwa typy składników palnych o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych i termodynamicznych. Wszystkie badane aluminizowane mieszaniny były zbilansowane tlenowo, przy założeniu że pył aluminiowy zawiera 100% glinu. Z porównania wartości impulsu całkowitego podmuchowych fal powietrznych mieszanin zawierających 5% i 15% pyłu aluminiowego wynika, że mniejsza różnica pomiędzy oszacowanymi parametrami na różnych odległościach od epicentrum wybuchu występuje w przypadku kompozycji zawierających większą ilość metalicznego dodatku (tab. 6). Może to świadczyć o procesie „dopalania” się glinu w fali rozrzedzenia.

## 5. Podsumowanie

Azotan(V) amonu ze względu na swoją cenę i dostępność jest niezastąpionym składnikiem górnictwem materiałów wybuchowych. Dlatego znajomość jego wpływu na proces inicjacji i propagacji procesu detonacji jest bardzo istotna w aspekcie konstruowania, optymalnych pod względem jakościowym i ilościowym, składów wybuchowych mieszanin.

Rezultaty badań wskazują, że znaczący wpływ na parametry detonacyjne saletroli ma podziarno saletry amonowej i dodatek pyłu aluminiowego. Podziarno wpływa zarówno na inicjację detonacji jak i wartość prędkości detonacji. Szczególnie istotny jest wzrost zdolności do detonacji MW zawierających rozdrobnioną saletrę amonową. Natomiast dodatek pyłu aluminiowego, który częściowo reaguje w fali rozrzedzenia powoduje rozciągnięcie czasu oddziaływania procesu detonacji MW na górotwór, co między innymi może zapewnić właściwy efekt prac strzałowych.

## Literatura

- [1] Baron V.L., Kantor V.Kh., *Tekhnika i tekhnologia vzryvnykh rabot w SShA*, Izd. Nedra, Moskva 1989.
- [2] *Kalendarz chemiczny. Część I Ogólna*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1954.
- [3] Gordon W.E., *Detonation limits in condensed explosives*, Proc. 4<sup>th</sup> Symp. (Int.) on Detonation, White Oak, October 12-15, 1965.
- [4] Persson P.A., Chiappetta R.F., *Shock waves and detonations explosive performance*, Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Explosives Technology, Pretoria, October 12-14, 1994.
- [5] Maranda A., Gałęzowski D., Świetlik M., *Badanie wpływu chłonności saletry amonowej na parametry detonacji górnictwem saletroli*, Przegl. Górn. 54, 11, 33-37, 1998.
- [6] Souers P.C., Anderson S., Mercer J., McGuire E., Vitello P., *JWL++: A simple reactive flow code package for detonation*, Prop. Expl. Pyrot. 25, 54-58, 2000.
- [7] Mader Ch.L., *Numerical modeling of detonations*, University of California Press, Berkeley-Los Angeles-London 1979.
- [8] Maranda A., Nowaczewski J., *Wpływ rozdrobnienia saletry amonowej na parametry użytkowe saletroli*, Górn. Odkr. 37, 6, 27-33, 1995.
- [9] Maranda A., Nowaczewski J., Trzciniński W., Cudziło S., *Badanie procesu inicjowania detonacji w saletrotach i saletroli*, Przegl. Górn. 51, 6, 23-26, 1995.
- [10] Sadwin L.D., Stressau R.H., Porter S.J., Savitt J., *Nonideal detonation of ammonium nitrate-fuel mixtures*, Proc. 3<sup>rd</sup> Symp. on Detonation, Princeton September 26-28, 1960.
- [11] Cook M.A., Keyes R.T., Ursenbach W.O., *Measurements of detonation shock and impact pressures*, Proc. 3<sup>rd</sup> Symp. on Detonation, Princeton September 26-28, 1960.