

Wpływ geometrii ładunku gazogeneratora na jego właściwości balistyczne

Gas generator geometry effect on the ballistic properties

Tomasz Gawor, Tomasz Wolszakiewicz

Instytut Przemysłu Organicznego, ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa, PL

Pracownia Badań Balistycznych w Pionkach

Autor do korespondencji: wolszakiewicz@ipo.waw.pl

Streszczenie: *W ramach tej pracy przeprowadzono badania zmian szybkości spalania, w zależności od składu chemicznego paliwa prochowego akumulatora ciśnienia (PAC). Wytworzone zostały ładunki o różnej zawartości dodatków i dla tych ładunków wyznaczono szybkość spalania. Kolejną część pracy dotyczy wpływu kształtu wgłębienia w czaszy, tj. średnicy i głębokości wgłębienia, na parametry balistyczne gazogeneratora. Wykonano spalania ładunków PAC dla różnych wymiarów wgłębienia w czaszy. Zostały wyznaczone takie parametry jak: ciśnienie maksymalne, ciśnienie w 1 sekundzie, maksymalne ciśnienie pracy, impuls ciśnienia po czasie 0,3 s oraz całkowity czas pracy.*

Abstract: *In this study made an investigation the changes in the burning rate, depending on the chemical composition of the propellant of gas generator (PAC). Charges were produced containing different amounts of these additives and to this charges calculated the burning rate. Another part of the work concerns the impact of the shape of the cavity in the bowl, i.e. the diameter and depth of the cavity, the ballistic parameters of the gas generator. PAC charges with the various dimensions of the cavity of the bowl were burned. There have been designated as parameters; maximum pressure, the pressure in 1 second, maximum operating pressure, pressure impulse after time 0.3 s, and the total working time.*

Słowa kluczowe: *stałe paliwo raketowe, gazogenerat, szybkość spalania*

Keywords: *solid rocket propellant, gas generator, burning rate*

1. Zależność szybkości palenia od składu paliwa

Na właściwości balistyczne i użytkowe decydujący wpływ ma skład paliwa, jego kształt początkowy, temperatura i ciśnienie. Ze względu na skład i sposób otrzymywania paliwa raketowe dzielimy na dwie grupy. Pierwszą z nich są paliwa homogeniczne będące mieszaniną dwóch podstawowych składników – nitrocelulozy i plastyfikatora. Obydwie z tych substancji są utleniające, nie wyróżnia się w nich składnika palnego i utleniacza. Drugą grupę stanowią paliwa heterogeniczne w których wyróżnia się dwa główne składniki – składnik palny i utleniacz. Rolą utleniacza jest dostarczenie tlenu w reakcji utleniania składnika palnego, w którym możemy wyróżnić lepiszcze i plastyfikator. Lepiszcze służy do spojenia wszystkich składników paliwa, natomiast plastyfikator ma za zadanie nadania odpowiednich właściwości fizycznych podczas produkcji jak i gotowemu wyrobowi.

Oprócz wymienionych powyżej głównych składników w skład paliw wchodzi różne dodatki w ilościach do kilku procent. Ich zadaniem jest polepszenie właściwości chemicznych, fizycznych oraz balistycznych paliwa. W każdym paliwie stosowane są tak zwane stabilizatory, czyli substancje przeciwdziałające starzeniu się paliwa. Zapobiegają one takim zmianom fizycznym i chemicznym jak krystalizacja, depolimeryzacja, przerwanie łańcuchów lepiszcza czy zmian faz. Stabilizatory działające w sposób chemiczny wiążą produkty rozkładu paliwa, przeciwdziałając jego dalszemu rozkładowi. Inną grupą stabilizatorów chemicznych są antyutleniacze, które same ulegając utlenieniu, przeciwdziałają utlenianiu się lepiszcza. Drugą grupą stabilizatorów są stabilizatory oddziałujące fizycznie. Są to zazwyczaj substancje powierzchniowo czynne, które adsorbują się na granicy utleniacz – składnik palny, stwarzają warstwę oddzielającą te dwie substancje, uniemożliwiając w ten sposób reakcję utleniania.

Kolejną grupą dodatków są dodatki wpływające na zależność szybkości spalania od temperatury i ciśnienia. Dodatki te mają za zadanie zmniejszyć zależność szybkości spalania od temperatury i ciśnienia, bez istotnej zmiany pozostałych jego właściwości. Najkorzystniejszy jest układ, w którym dla pewnego przedziału ciśnień szybkość spalania pozostaje jednakowa. Wtedy nawet dość znaczne przypadkowe zmiany ciśnienia (mieszczące się w danym przedziale ciśnień) nie powodują zmiany szybkości spalania. W przypadku paliw, w skład których najczęściej wchodzi produkty przerobu ropy naftowej, zachodzi konieczność użycia substancji ułatwiających zapłon takiego paliwa. Stosuje się wtedy dodatek sadzy. Istnieje pewna grupa paliw, której główny składnik azotan(V) amonu i chloran(VII) amonu mają niepożądaną właściwość, jaką jest higroskopijność. W celu wyeliminowania tej wady, kryształki utleniacza pokrywa się substancjami hydrofobowymi. Używane dawniej w tym celu tłuszcze mineralne lub wazelinę zastąpiono substancjami, które mają wyższą odporność na temperaturę, takimi jak silikony, estry oraz mydła metali. Różnorodność substancji wchodzących w skład stałych paliw raketowych powoduje to, że otrzymujemy paliwa o różnych właściwościach mechanicznych. W celu ułatwienia wytłaczania dodaje się np. różnego rodzaju woski czy też oleje mineralne, ale najlepsze efekty daje nawet niewielki dodatek wysokochlorowanych i fluorowanych ciekłych polimerów.

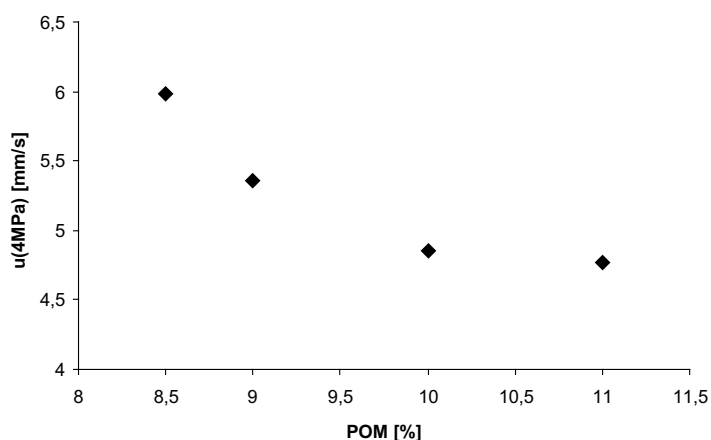
Dla wielu paliw zachodzi konieczność regulowania szybkości spalania. Substancje które wpływają na szybkość spalania nazywamy modyfikatorami szybkości spalania. Wpływ tych substancji powoduje albo wzrost albo obniżenie szybkości spalania, a czasem w zależności od innych składników te same substancje mogą wywoływać i wzrost i obniżenie. Do modyfikatorów szybkości spalania zalicza się różne rodzaje i gatunki sadzy, grafit, krzemionkę, niektóre sproszkowane metale, jak bor, magnez, glin i ich mieszaniny. Na szybkość spalania wpływa bezpośrednio szybkość reakcji powierzchniowych i podpowierzchniowych, a nie tylko szybkość spalania w strefie płomienia. Jednym ze sposobów wpływu tych substancji jest przenoszenie energii do powierzchni spalania przez promieniowanie. Modyfikatory zawierają atomy zdolne do emisji fotonów, o energii wystarczającej do rozerwania wiązań polimeru przez fotolizę. Fotony te zrywając wiązania sieciowania przestrzennego powodują depolimeryzację. Paliwa o wysokim przewodnictwie cieplnym są bardziej przenikliwe dla promieniowania, na skutek czego nagrzewaniu ulega nie tylko warstwa podpowierzchniowa, ale i dalsze partie ładunku. Skutkuje to pirolizą głębszych warstw ładunku, co prowadzi do pęknięć, niestabilnego palenia, a nawet wybuchu. Aby temu zapobiec, stosuje się dodatek sadzy, która zmniejsza przenikliwość ziarna absorbując większość promieniowania w warstwie podpowierzchniowej. Fotoliza jest ważnym czynnikiem wpływającym na szybkość spalania i dotyczy ona atomów pierwiastków metalicznych. Kolejną grupą substancji modyfikujących szybkość spalania są związki chromu, takie jak tlenki chromu, chromiany, dwuchromiany, polichromiany i chrominy. Dzięki swojej wysokiej zdolności absorbowania promieniowania, dostarczają energii rozkładowi egzotermicznemu w warstwie powierzchniowej. Innym sposobem wpływu na szybkość spalania jest rozkład katalityczny utleniacza, w tym przypadku chloranu(VII) amonu, wskutek działania takich tlenków metali jak CuO , ZnO , CrO_3 , CoO_3 . Niemalże znaczenie mają przemiany fizyczne na szybkość spalania. W przypadku paliw zawierających utleniacz o niskiej temperaturze topnienia i łatwo rozkładające się lepiszczce, wewnątrz ładunku powstają pewne ilości substancji ciekłych i gazowych, które w miarę wzrostu temperatury coraz silniej oddziałują w kierunku rozerwania powierzchni. Takie samo działanie powodują przemiany krystalograficzne, które zawsze przy wzroście temperatury powodują wzrost objętości. Różnice we współczynnikach rozszerzalności cieplnej między utleniaczem, a składnikiem palnym powodują liczne pęknięcia powierzchniowe. Wszystkie te zmiany powierzchniowe wpływają na przyspieszenie palenia.

Wymienione w powyższym akapicie dodatki służą zazwyczaj zwiększeniu szybkości spalania. Istnieją jednak takie paliwa nadchloranowe o dużej szybkości spalania, w których te same dodatki powodują zmniejszenie ich szybkości spalania. Substancje taką nazywa się spowalnicami. W badanym, w ramach niniejszej pracy, gazogeneratorze prochowym (Prochowym Akumulatorze Ciśnienia, PAC) stosowany jest właśnie taki dodatek – spowalnic. Do paliwa bazowego, nitroglicerynowo-nitrocelulozowego, z którego wytwarzany jest ładunek PAC, dodawany jest γ -polioksymetylen (γ -POM). Stosuje się go w takiej ilości, aby uzyskać szybkość spalania z zakresu ($5,5 \div 6,5$) mm s^{-1} w ciśnieniu 4 MPa. Ilość ta zazwyczaj zawiera się w granicach od 8 % do 11 %. Zostały przeprowadzone badania szybkości spalania dla czterech prób o zawartości γ -POM (8,5; 9; 10 oraz 11)%. Tabela 1 zawiera zależność liniowej szybkości spalania, oraz wartość szybkości spalania dla ciśnienia 4 MPa od zawartości γ -POM w paliwie bazowym.

Tab. 1. Zależność szybkości spalania w ciśnieniu 4 MPa i liniowej szybkości spalania w zależności od procentowej zawartości γ -POM-u

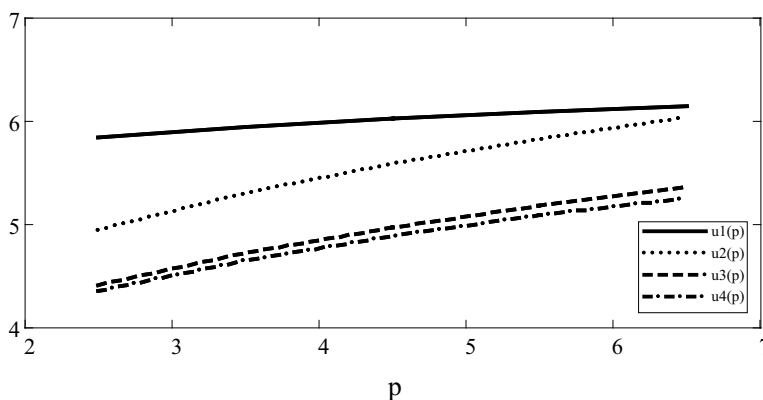
Zawartość γ -POM [%]	Prawo palenia	Szybkości spalania dla 4 MPa [mm s ⁻¹]
8,5	$u = 5,5686 p^{0,0522}$	5,98
9	$u = 4,077 p^{0,209}$	5,35
10	$u = 3,6454 p^{0,2064}$	4,85
11	$u = 3,6281 p^{0,1981}$	4,77

Jak przedstawiono na rys. 1 zwiększanie zawartości γ -POM powoduje asymptotyczne zmniejszanie szybkości palenia gazogeneratora. Jak widać zależność szybkości spalania, w ciśnieniu 4 MPa, od procentowej zawartości γ -POM nie jest zależnością liniową. Wyznaczenie odpowiedniej zawartości γ -POMu, w celu uzyskania szybkości z przedziału (5,5 ÷ 6,5) mm s⁻¹, wymaga wykonania paliwa o kilku składach. W tym przypadku uzyskanie odpowiedniej szybkości palenia wymaga wykonania paliwa o zawartości 8,5 % γ -POM, co daje szybkość palenia 5,98 mm s⁻¹.



Rys. 1. Zależność szybkości spalania, dla ciśnienia 4 MPa, od zawartości γ -POM-u

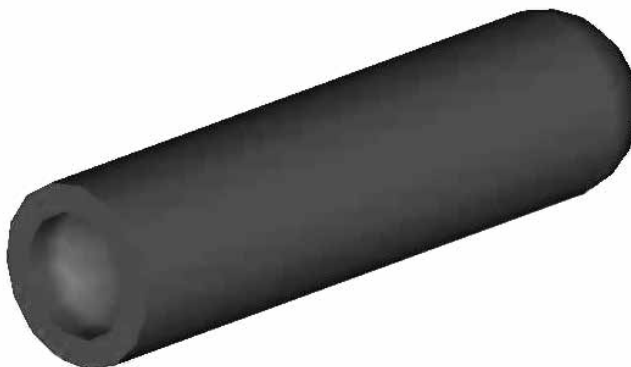
Wykresy szybkości spalania dla poszczególnych składów paliwa przedstawia rys. 2. Dla paliwa o zawartości 8,5 % γ -POM wykładnik ciśnieniowy szybkości spalania wynosi 0,0522. Oznacza to, że paliwo to jest mało wrażliwe na zmiany ciśnienia. Doskonale ten wykładnik widać na poniższym wykresie, jego nachylenie do osi ciśnienia jest niewielkie.



Rys. 2. Wykresy liniowych szybkości spalania dla poszczególnych składów paliwa

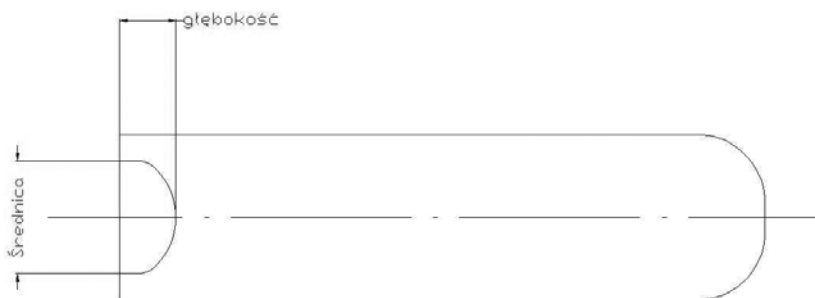
2. Wpływ zmiany kształtu wgłębienia w czaszy na jakość spalania

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, szybkość spalania paliwa w głównej mierze zależy od jego składu chemicznego. Geometria ładunku ma wpływ na główne charakterystyki, takie jak czas pracy, wielkość siły ciągu czy ciśnienie w komorze spalania. Czas pracy zależy od szybkości spalania danego paliwa, oraz od grubości warstwy palnej. W badanym gazogeneratorze, którego przedstawia rys. 3, czas pracy będzie zależał od długości ładunku. Ładunek PAC ma kształt walca z zainhibitowaną powierzchnią boczną i jedną z podstaw. Palenie takiego ładunku przebiega od jego czoła. Powierzchnia palna takiego ładunku jest stała, spalanie przebiega przy prawie stałym ciśnieniu.



Rys. 3. Kształt ładunku PAC

Jak można zauważyć, na powierzchni czołowej ładunku znajduje się wgłębienie. Wymiary tego wgłębienia mają wpływ na impuls ciśnienia po czasie 0,3 s, maksymalne ciśnienie początkowe, oraz ciśnienie w pierwszej sekundzie.



Rys. 4. Przekrój ładunku PAC

W tej części pracy opisano wyniki spalania ładunków z różnymi wymiarami wgłębienia w czaszy. Badania przeprowadzono dla głębokości od 7 mm do 9 mm i średnicy wgłębienia od 15 mm do 18 mm. Wykonane zostały ładunki w zakresie przedstawionych wymiarów, z rozdzielczością co 0,5 mm. W pierwszej kolejności wybrano jedną głębokość wgłębienia i zmieniana była tylko jego średnica. Głębokość ustalono na 8 mm, jako wartość ze środka przedziału. Średnicę przyjęto kolejno (15,0; 15,5; 16,0; 16,5; 17,0; 17,5 oraz 18,0) mm. Dla każdego wymiaru wykonano po 3 spalania. Otrzymane wyniki zostały uśrednione i przedstawione są w poniższych tabelach.

Tab. 2. Wyniki spalania dla różnych wymiarów średnicy wgłębienia w czaszy o głębokości 8 mm

Średnica wgłębienia w czaszy [mm]	Ciśnienie maksymalne p_{\max} [MPa]	Ciśnienie w 1 sekundzie p_1 [MPa]	Maksymalne ciśnienie pracy p_p [MPa]	Impuls ciśnienia po czasie 0,3 s I [MPa*s]	Czas pracy t_p [s]
15,0	11,53	7,86	8,10	2,44	13,48
15,5	9,92	7,82	8,28	2,36	13,68
16,0	10,83	7,72	8,30	2,47	13,54
16,5	10,26	7,88	8,01	2,43	13,79
17,0	10,04	7,69	8,16	2,43	13,56
17,5	10,16	7,63	8,08	2,47	13,41
18,0	10,17	7,73	8,03	2,54	13,46

Następnie wybrano jedną średnicę wgłębienia i zmieniana była tylko jego głębokość. Średnicę ustalono na 16,5 mm, jako wartość ze środka przedziału. Natomiast głębokość przyjęto kolejno (7,0; 7,5; 8,0; 8,5 oraz 9,0) mm. Dla każdego wymiaru wykonano po 3 spalania. Otrzymane wyniki zostały uśrednione i przedstawione są w poniższych tabelach.

Tab. 3. Wyniki spalania dla różnych wymiarów głębokości wgłębienia w czaszy o średnicy 16,5 mm

Głębokość wgłębienia w czaszy, [mm]	Ciśnienie maksymalne, p_{\max} [MPa]	Ciśnienie w 1 sekundzie, p_1 [MPa]	Maksymalne ciśnienie pracy, p_p [MPa]	Impuls ciśnienia po czasie 0,3 s, I [MPa s]	Czas pracy, t_p [s]
7,0	10,35	7,73	7,96	2,27	13,71
7,5	10,28	7,74	8,00	2,30	13,70
8,0	10,77	7,83	8,20	2,49	13,49
8,5	10,32	7,83	8,05	2,53	13,46
9,0	10,16	8,13	8,16	2,71	12,62

Analizując powyższe zależności, można zauważyć że zarówno średnica jak i głębokość mają wpływ na właściwości balistyczne ładunku PAC. Metodą regresji liniowej wyznaczono współczynniki kierunkowe otrzymanych funkcji liniowych. Wyznaczono je w celu zobrazowania, jak duży wpływ na dany parametr ma dany wymiar. Otrzymane wartości współczynników kierunkowych przedstawia tabela 4.

Tab. 4. Wartości współczynników kierunkowych dla kolejnych parametrów balistycznych ładunku PAC

	średnica	głębokość
ciśnienie maksymalne (p_{\max})	-0,156	-0,035
ciśnienie w 1 sekundzie (p_1)	-0,029	0,087
maksymalne ciśnienie pracy (p_p)	-0,027	0,045
impuls ciśnienia po czasie 0,3 s (I)	0,017	0,109
czas pracy (t_p)	-0,021	-0,242

Analizując dane zawarte w tabeli 4 stwierdzono, że największy wpływ na ciśnienie maksymalne ma średnica wgłębienia w czaszy ładunku. Ciśnienie maksymalne maleje wraz ze zwiększaniem średnicy. Natomiast zwiększanie głębokości nie powodują już tak znacznej różnicy w zmianach ciśnienia maksymalnego, która to wynosi 0,19 MPa, czyli 1,83%. Zwiększanie głębokości ma największy wpływ na czas pracy oraz impuls ciśnienia po czasie 0,3 sekundy. Zwiększenie głębokości z 7 mm do 9 mm powoduje skrócenie czasu pracy o ponad 1 sekundę. Spowodowane jest to zmniejszeniem długości ładunku w tej jego części o 2 mm, co przy szybkości spalania ok. 6 mm s⁻¹ daje właśnie o tyle krótszy czas jego spalania. Jednocześnie zwiększanie głębokości, powoduje zwiększanie początkowej powierzchni paliwa, co przyczynia się do zwiększenia ilości gazów produkowanych przez gazogenerator w początkowym etapie jego pracy. Jak pokazują wyniki, następuje wzrost ciśnienia w 1 sekundzie pracy oraz impuls ciśnienia po czasie 0,3 s. Ciśnienie w 1 sekundzie dla głębokości 9 mm, jest większe od tego dla głębokości 7 mm o 0,4 MPa co daje wartość bezwzględną

5,2%. W przypadku impulsu ciśnienia jest to bardziej zauważalna różnica, wynosząca 19,4%, przy różnicy 0,44 MPa. Jak można zauważyć, to głębokość wgłębienia w czaszy ma większy wpływ na zmianę właściwości balistycznych niż jego średnica. Mniejszy wpływ średnicy jednak nie pozostaje bez znaczenia dla warunków pracy gazogeneratora. Wpływ średnicy i głębokości nie jest tak oczywisty, gdyż dochodzą do tego bardziej złożone zależności, zależne od powierzchni początkowej paliwa, szybkości spalania paliwa, objętości swobodnej komory gazogeneratora, parametrów zapłonika i innych.

3. Wnioski

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania gazogeneratora prochowego PAC. Polegały one na znalezieniu zależności między jego głównymi parametrami, a składem chemicznym oraz geometrią wgłębienia w czaszy. W tym celu wykonane zostały ładunki różniące się zawartością jednego z dodatków. Dodatek ten pełni rolę spowalniacza. Wykonano ładunki o zawartości POM od 8,5% do 11%. Szybkość spalania maleje wraz z zawartością POM w paliwie. Uzyskanie optymalnej szybkości spalania w tym przypadku wymagało użycia spowalniacza w ilości 8,5 % składu bazowego paliwa. Ponadto wykładnik ciśnieniowy dla tak otrzymanego paliwa jest bardzo mały, co czyni to paliwo mało wrażliwym na zmiany ciśnienia (mieszczące się w danym przedziale ciśnień).

Dla zbadania wpływu kształtu wgłębienia w czaszy wykonano szereg spalań ładunków o średnicach i głębokościach wgłębienia w zakresie podanego w warunkach technicznych. Wartości te wynosiły dla średnicy od 15 do 18 mm z podziałem co 0,5 mm, oraz dla głębokości od 7 do 9 mm z podziałem co 0,5 mm. Badania te wykazały, że wymiary te mają mniejszy lub większy wpływ na wartości ciśnienia maksymalnego, ciśnienia w 1 sekundzie, impulsu ciśnienia po czasie 0,3 s, czy całkowitego czasu pracy. Największy wpływ zmiany średnicy czaszy zanotowano na ciśnienie maksymalne. Natomiast największy wpływ zmiana głębokość czaszy, ma na ciśnienie w 1 sekundzie oraz impuls ciśnienia po czasie 0,3 s.

Literatura

- [1] Krowicki K., Syczewski M., *Stale paliwa raketowe*. Wyd. MON, Warszawa 1964.
- [2] Urbański T., *Chemia i Technologia Materiałów Wybuchowych*. tom III, MON, Warszawa 1954.
- [3] Wolszakiewicz T., Walenta Z.A., *Gazogenerator prochowy. Obliczenia i eksperyment*. Przemysł Chemiczny. 6 (2007) 519 – 523.
- [4] Wolszakiewicz T., Florczak B., *Zmodyfikowane elementy napędowe do gazogenerator - eksperyment i obliczeni*. VII Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Pułtusk 2008.
- [5] Wolszakiewicz T., Gawor T., Walenta Z.A., *Gazogenerator prochowy – zachowania awaryjne*. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPO „Materiały wybuchowe badania zastosowanie – bezpieczeństwo”, 7-9 czerwca 2010.
- [6] Torecki S., *Balistyka wewnętrzna*. WAT, Warszawa 1980.
- [7] Herder, Weterings, *Mechanical analysis on rocket propellant*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 72 (2003).
- [8] Pesce-Rodriguez R.A., Fifer R.A., *Pyrolytic decomposition of solid propellants*. Pure & Appl. Chem. 65 (1993).
- [9] Wang L., *Experimental study on failure mechanism of solid rocket propellant due to material and geometric effects*. Experimental Techniques. 17, 1993.
- [10] Gao M., Zhao B., *Experimental study on the master curve of the bulk modulus of solid propellant*. Journal of Propulsion Technology. 16 (1995).
- [11] Pang T., *Metody obliczeniowe w fizyce*. PWN, Warszawa 2001.