



## Specyfika zapłonu stałego paliwa raketowego w gazogeneratorze z wykorzystaniem tabletek pirogenicznych

Tomasz WOLSZAKIEWICZ

*Pracownia Badań Balistycznych w Pionkach, Instytut Przemysłu Organicznego,  
ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa*

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono wyniki pomiarów zapłonu gazogeneratora prochowego za pomocą niskogazowych tabletek pirogenicznych. Przedstawiono wyniki pomiarów balistycznych mieszanin B/KNO<sub>3</sub>, Zr/KNO<sub>3</sub> i Zr/KClO<sub>4</sub> dla dwóch kształtów tabletek (płaskiej i dwuwypukłej). Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników w porównaniu z zapłonem klasycznym opartym na prochu czarnym.

**Słowa kluczowe:** zapłon, tabletki pirogeniczne

### 1. WSTĘP

Dobór sposobu zapłonu stałego paliwa raketowego decyduje o prawidłowej i stabilnej pracy napędu raketowego. Używane do zapłonu stałych paliw raketowych odmiany prochu czarnego typu KB-2, z natury swej wywołują duże przeregulowania strumienia cieplnego w procesie zapłonu. W początkowej fazie pracy zapłonu dochodzi do znacznego wzrostu ciśnienia, co nie zawsze jest jednoznaczne z zapłonem paliwa, a wywiera niekorzystny wpływ na dalsze spalanie. Zamiennikiem klasycznego układu zapłonowego opartego na prochu czarnym może być zapłon z zastosowaniem tabletek pirogenicznych.

Główną zaletą takiego zapłonu jest dłuższy czas działania i większa powtarzalność geometrii tabletek pirogeniczych w stosunku do podsypki z prochu czarnego. Pobudzone tabletki wytwarzają gorące gazy, które oddziałują z powierzchnią paliwa raketowego przez znacznie dłuższy czas (do 50% czasu pracy paliwa) niż proch czarny, przy jednocześnie niższym ciśnieniu maksymalnym. Mieszaniną najczęściej stosowaną do wytwarzania tabletek jest B/KNO<sub>3</sub> [1-3]. Przykładem znormalizowanego układu zapłonowego w tym zakresie jest dokument MIL-P-46994B. Inne znane masy pirogeniczne to Zr/BaCrO<sub>4</sub> [4-5], Zr/KClO<sub>4</sub> [6-7]. Składnikami tabletek pirogeniczych są sproszkowane metale, jako składnik palny, oraz utleniacz. Powszechnie używane utleniacze to chloran(VII) amonu, azotan(V) amonu i chloran(VII) potasu. Zawartość innych składników jest niewielka, np. utwardzacz, katalizator palenia i dodatki poprawiające właściwości starzeniowe.

Głównymi składnikami paliwa homogenicznego stosowanego w urządzeniu, jakim jest gazogenerator prochowy, są nitrogliceryna żelatynizowana nitrocelulozą [8] oraz związki stabilizujące i zapewniające odpowiednie parametry pracy i przetwórstwa. Gazogeneratory prochowe są istotnym elementem złożonych układów napędowych [9-10] – generują strumień gazów o ściśle określonych parametrach. Ich zadanie związane jest z dostarczeniem ustabilizowanego dopływu gazu, który jest między innymi źródłem energii pokładowych wytwornic prądu.

## 2. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW

Przeprowadzono spalania ładunków gazogeneratora prochowego przy użyciu tabletek pirogeniczych. Zapłon był inicjowany w specjalnie skonstruowanym zapłonniku zawierającym tabletki pirogeniczne w ilości trzech sztuk. Samo pobudzenie tabletek odbywało się metodą termiczną, za pomocą spirali z drutu oporowego umieszczonego w dolnej części zapłonnika, bezpośrednio pod tabletkami. Nagrzewanie drutu oporowego odbywało się napięciem stałym o wartości 10 V z zasilacza o dużej wydajności prądowej. Przebieg spalania ładunku był rejestrowany przy użyciu tensometrycznego czujnika ciśnienia firmy Bofors typ TDM-1, o zakresie pracy do 30 MPa z wykorzystaniem systemu ESAM (*Electronic Signal Acquisition Module*). Na podstawie uzyskanych pomiarów zmian ciśnienia w czasie wyznaczono: ciśnienie maksymalne, ciśnienie w 1 s pracy, maksymalne ciśnienie pracy oraz impuls ciśnienia po czasie 0,3 s. Wyniki danych eksperymentalnych zamieszczono w tabeli 1.

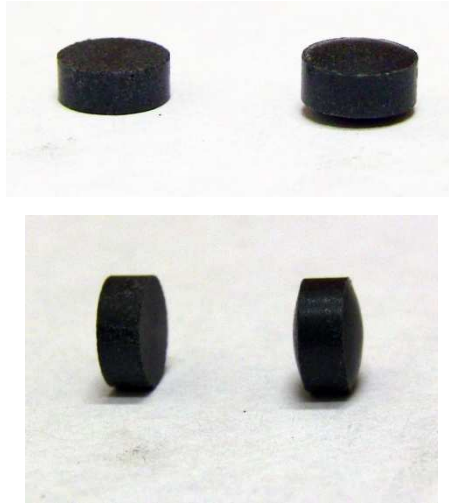
Tabela 1. Charakterystyki balistyczne spalania ładunku gazogeneratora inicjowanego tabletkami pirogenicznymi

Table 1. Ballistic characteristics of combustion of the gas generator charge, initiated with pyrogenic tablets

Rodzaj tabletki pirogenicznej	Ciśnienie maksymalne $p_{\max}$ [MPa]	Ciśnienie w 1 s pracy $p_1$ [MPa]	Impuls ciśnienia po czasie 0,3 s $I$ [MPa·s]
Tabletki wytwarzane przemysłowo typ II-B MIL – P46994B	7,65	7,50	1,71
B/KNO <sub>3</sub> płaskie	9,71	8,76	1,97
B/KNO <sub>3</sub> wypukłe	10,77	9,18	2,22
Zr/KNO <sub>3</sub> 17/83 płaskie	8,72	8,07	1,79
Zr/KNO <sub>3</sub> 17/83 wypukłe	9,19	8,13	2,16
Zr/KNO <sub>3</sub> 25/75 płaskie	8,21	7,07	1,61
Zr/KNO <sub>3</sub> 25/75 wypukłe	9,00	7,67	2,21
Zr/KClO <sub>4</sub> 50/50 płaskie	9,32	8,07	2,25
Zr/KClO <sub>4</sub> 50/50 wypukłe	9,36	8,15	2,26

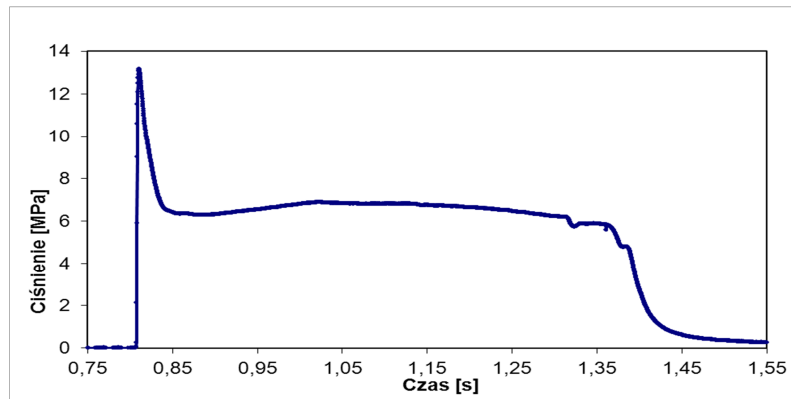
Gazogenerator prochowy inicjowany był tabletkami różniącymi się składem chemicznym i kształtem. Tabletki były zaprasowywane w matrycy o następujących wymiarach: średnica 6 mm, wysokość 2,5 mm. Matryce pozwalały otrzymać walce o płaskich i wypukłych podstawach. Rysunek 1 przedstawia tabletki o kształcie płaskim (po lewej) i kształcie wypukłym (po prawej). W badaniach wykorzystano tabletki wykonane z trzech różnych mieszanin [11]; B/KNO<sub>3</sub>, Zr/KNO<sub>3</sub> oraz Zr/KClO<sub>4</sub>. Tabletki cyrkonu z azotanem(V) potasu zostały wykonane w dwóch proporcjach masowych 17/83 oraz 25/75.

Należy podkreślić, że rysunki 3-11 przedstawiają tylko początkowe chwile pracy gazogeneratora prochowego, podczas gdy całkowity jego czas pracy wynosi od 12 do 14 s (co jest uwarunkowane temperaturą prowadzenia badania).



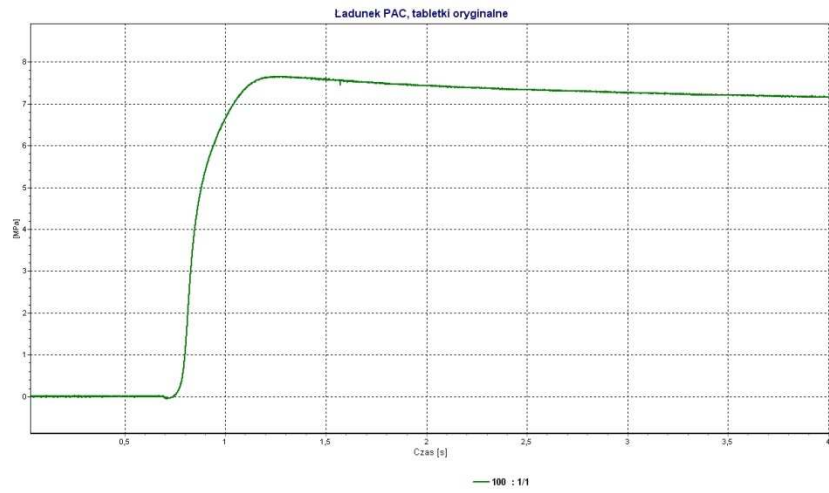
Rys. 1. Zdjęcie przedstawiające tabletkę płaską (po lewej) i wypukłą (po prawej)

Fig. 1. Picture of the tablet: flat (left) and convex (right)



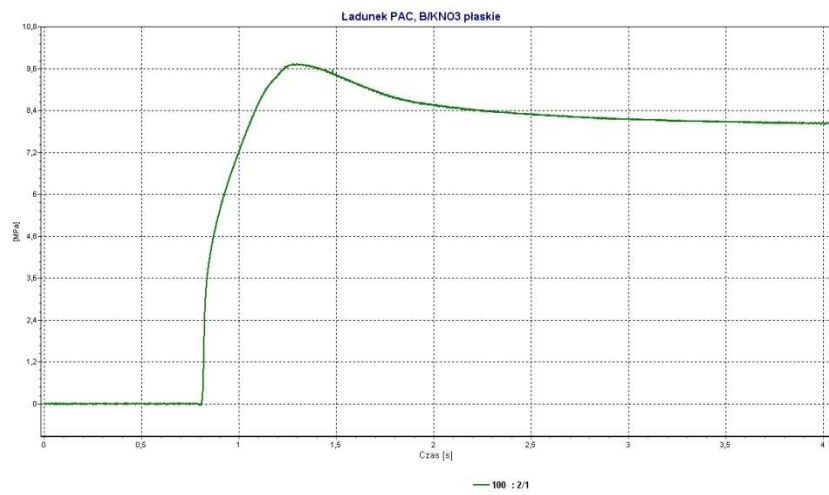
Rys. 2. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla klasycznego zapłonika prochowego

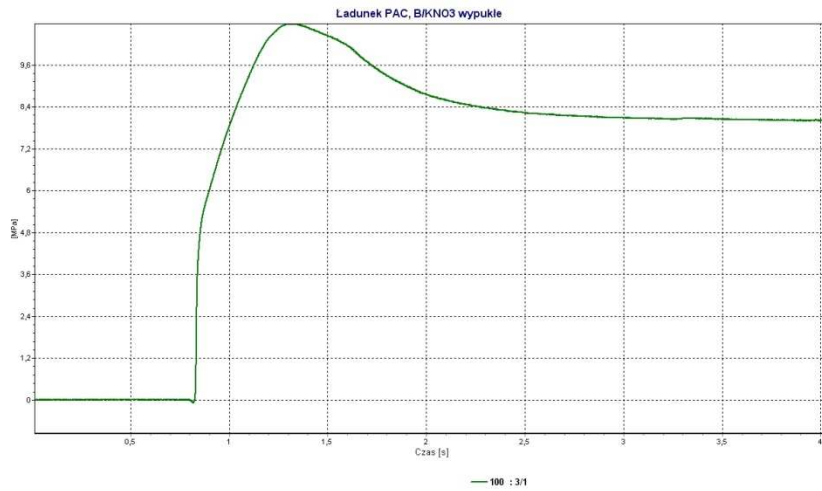
Fig. 2. Pressure variation in terms of time for a classic gunpowder igniter



Rys. 3. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki oryginalnej

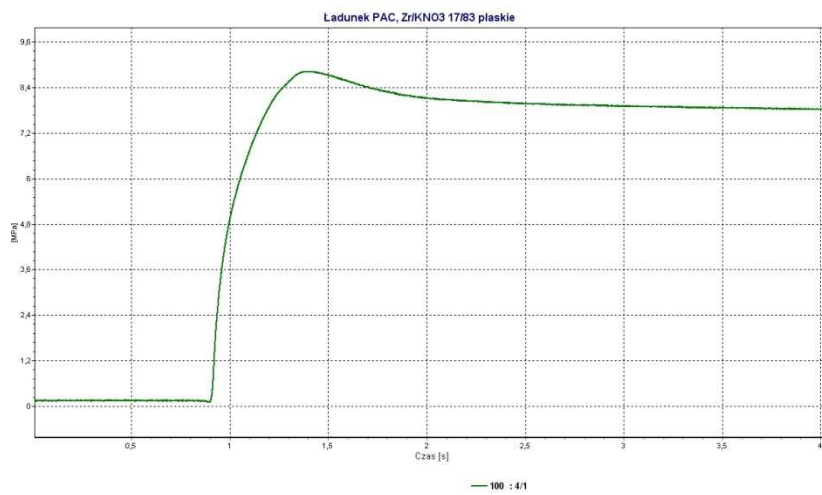
Fig. 3. Pressure variation in terms of time for an original tablet

Rys. 4. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki B/KNO<sub>3</sub> płaskiejFig. 4. Pressure variation in terms of time for a flat B/KNO<sub>3</sub> tablet



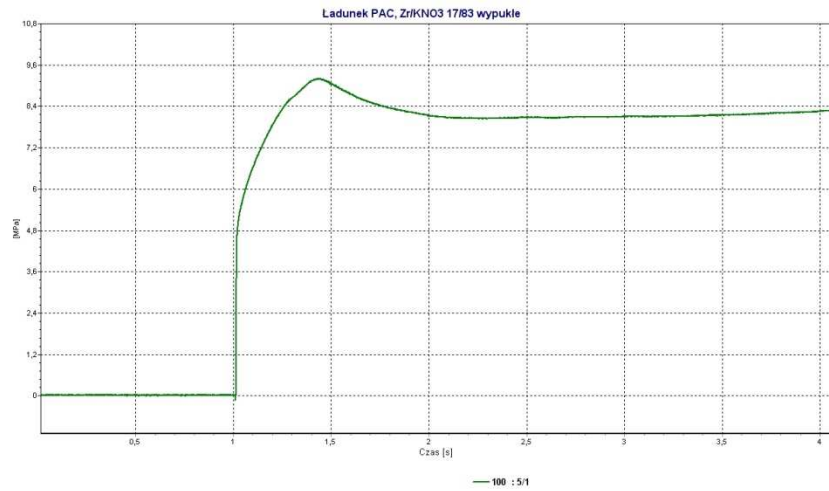
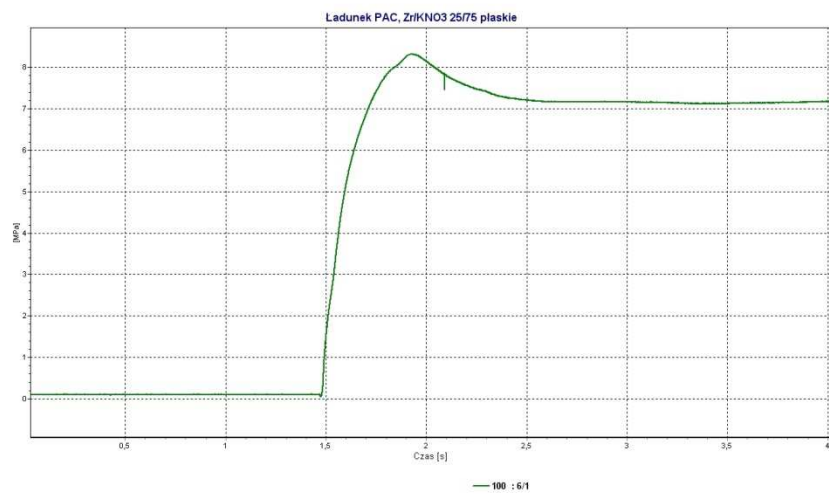
Rys. 5. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki B/KNO<sub>3</sub> wypukłej

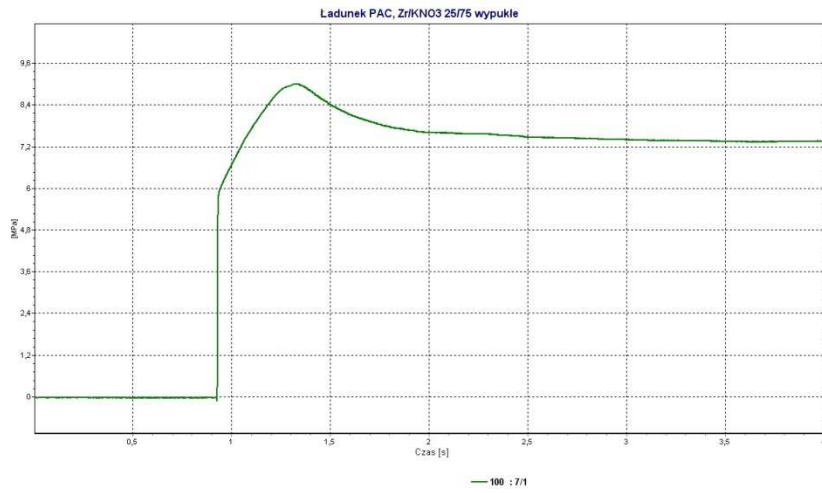
Fig. 5. Pressure variation in terms of time for a bulged B/KNO<sub>3</sub> tablet



Rys. 6. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki Zr/KNO<sub>3</sub> 17/83 płaskiej

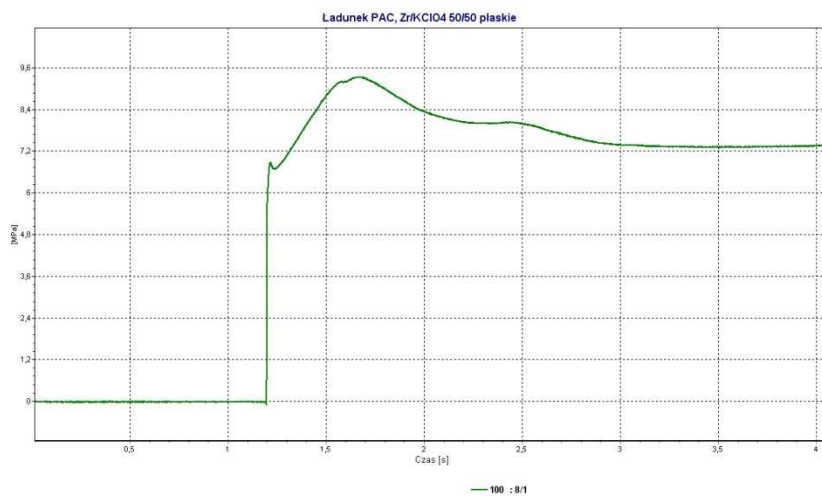
Fig. 6. Pressure variation in terms of time for a flat Zr/KNO<sub>3</sub> 17/83 tablet

Rys. 7. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki Zr/KNO<sub>3</sub> 17/83 wypukłejFig. 7. Pressure variation in terms of time for a bulged Zr/KNO<sub>3</sub> 17/83 tabletRys. 8. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75 płaskiejFig. 8. Pressure variation in terms of time for a flat Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75 tablet



Rys. 9. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75 wypukłej

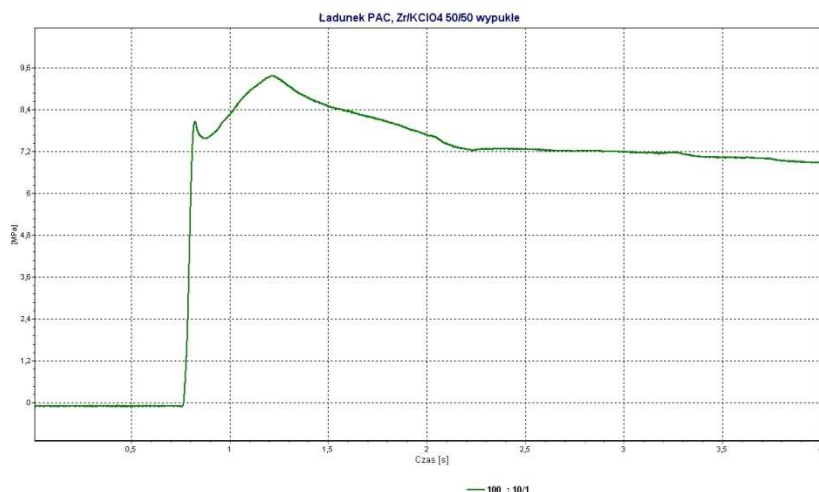
Fig. 9. Pressure variation in terms of time for a bulged Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75 tablet



Rys. 10. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki Zr/KClO<sub>4</sub> 50/50 płaskiej

Fig. 10. Pressure variation in terms of time for a flat Zr/KClO<sub>4</sub> 50/50 tablet





Rys. 11. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla tabletki Zr/KClO<sub>4</sub> 50/50 wypukłej

Fig. 11. Pressure variation in terms of time for a bulged Zr/KClO<sub>4</sub> 50/50 tablet

### 3. DYSKUSJA WYNIKÓW

Wszystkie przetestowane powyżej tabletki pirogeniczne spełniają swoje główne zadanie, jakim jest zapłon paliwa (w tym przypadku paliwa gazogeneratora prochowego, który zgodnie ze składem chemicznym jest paliwem zaliczanym do grupy homogenicznych). Główną zaletą stosowania tabletek jest znacznie niższy wzrost ciśnienia maksymalnego (maksymalna wartość ciśnienia dla przebadanej grupy tabletek to 9 MPa, a dla prochu czarnego – 13 MPa) w pierwszej chwili zapłonu, w porównaniu z zapłonem klasycznym (rys. 2). Wykonane tabletki pozwalają na uzyskanie wyższych wartości ciśnień i impulsu w pierwszej fazie pracy układu w porównaniu do tabletek wytwarzanych przemysłowo. Mieszanki oparte na borze uzyskały wyższe wartości ciśnienia maksymalnego i ciśnienia w 1 s niż tabletki zawierające cyrkon. Najniższe wartości ciśnień uzyskuje się dla mieszanki Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75. Dla wszystkich mieszanin z cyrkonem użycie chloranu(VII) potasu jako utleniacza daje wyższe ciśnienia niż z azotanem(V) potasu. W przypadku impulsu ciśnienia najwyższe wartości uzyskane były z tabletek wykonanych z Zr/KClO<sub>4</sub>, natomiast najniższe wartości impulsu, tak jak w przypadku ciśnień, daje mieszanina Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75. Nie bez znaczenia pozostaje też wpływ kształtu tabletek na powyższe wielkości. Jak można przypuszczać, tabletki o kształcie wypukłym dawały wyższe wartości ciśnień i impulsu ciśnienia. Spowodowane to jest ich większą powierzchnią początkową oraz większą masą.

Dla każdego rodzaju mieszanin, tabletkę wypukłą dawała wyższe ciśnienie maksymalne, ciśnienie w 1 s pracy i impuls ciśnienia w 0,3 s niż tabletkę płaską.

Najmniejszą różnicę w zależności od kształtu tabletki można zauważyć dla mieszaniny Zr/KClO<sub>4</sub> 50/50 – zaledwie setne części MPa. Dokładniejsza analiza przydatności poszczególnych mieszanin wymaga dodatkowych obliczeń i badań uwzględniających między innymi ilość tabletek oraz badania w temperaturach eksploatacji (–35°C i +50°C).

#### 4. WNIOSKI

Otrzymane wyniki eksperymentów dowodzą, że istnieje możliwość zastąpienia niepowtarzalnych (balistycznie) zapłonników opartych na prochu czarnym mieszaninami pirogenicznymi (niskogazowymi) dającymi wysoką temperaturę i dłuższy czas pracy. Dla przeprowadzonych spalań wyznaczono ciśnienie maksymalne, ciśnienie w 1 s pracy oraz impuls ciśnienia w czasie 0,3 s. Tabletki wykonane z mieszaniny boru i azotanu amonu dają najwyższe wartości ciśnienia maksymalnego i ciśnienia w 1 s. Natomiast największą wielkość impulsu ciśnienia po czasie 0,3 s osiągają tabletki Zr/KClO<sub>4</sub>.

#### LITERATURA

- [1] Gransden J.I., Taylor M.J., Study of confined pyrotechnic compositions for medium/large Calibre Gun Igniter Applications, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 32, no. 6, 2007.
- [2] Bhingarkar V., Singh H., Influence of Cellulosic Binders on Sensitivity and Combustion, *Defence Science Journal*, vol. 56, no. 3, pp. 345-351, 2006.
- [3] Wildegger-Gaissmaier E., Johnston I.R., Ignition of a Granular Propellant Bed, *Combustion and Flame*, vol. 106, pp. 219-230, 1996.
- [4] Kuwahara T., Tohara C., Ignition Characteristics of Zr/BaCrO<sub>4</sub> Pyrolant, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 27, no. 5, pp. 284-289, 2002.
- [5] Kuwahara T., Tohara C., Wang C.H., Static Electric Sensitivity Characteristics of Zr/BaCrO<sub>4</sub> Pyrolants, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 29, no. 1, pp. 56-61, 2004.
- [6] Lee J.S., Hsu C.K., The effect of different zirconium on thermal behaviors for Zr/KClO<sub>4</sub> priming compositions, *Thermochimica Acta*, pp. 367-368, 2001.
- [7] Lee J.S., Thermal properties and firing characteristics of the Zr/KClO<sub>4</sub>/Viton A priming compositions, *Thermochimica Acta*, pp. 392-393, 147-152, 2002.
- [8] Wolszakiewicz T., Właściwości fizykochemiczne nitrocelulozy – podstawowego polimeru pochodzenia naturalnego w zastosowaniach specjalnych, *Przemysł Chemiczny*, vol. 91 (7), s. 1427-1434, 2012.

- [9] Wolszakiewicz T., Walenta Z.A., Gazogenerator prochowy. Obliczenia i eksperyment, *Przemysł Chemiczny*, vol. 86 (6), s. 519-523, 2007.
- [10] Wolszakiewicz T., Florczak B., Zmodyfikowane elementy napędowe do gazogeneratora – eksperyment i obliczenia, *Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa*, tom I, s. 131-139, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2008.
- [11] Wolszakiewicz T., *Opracowanie metody otrzymywania pirogeniczych tabletek zapłonowych do paliw raketowych*, Sprawozdanie z grantu badawczego nr O N508004134.

## Specific Features of Ignition of the Solid Rocket Fuel in a Gas Generator with the Use of Pyrogenic Tablets

Tomasz WOLSZAKIEWICZ

**Abstract.** In the paper the results of measurements of ignition of the gunpowder gas generator with the use of pyrogenic tablets of low gas output were presented. The results of ballistic measurements for the mixtures B/KNO<sub>3</sub>, Zr/KNO<sub>3</sub> and Zr/KClO<sub>4</sub>, and for two shapes of the tablets (planar and lens-shaped) were shown. The obtained results were discussed in comparison with the standard type of ignition, based on black gunpowder.

**Keywords:** ignition, pyrogenic tablets

