

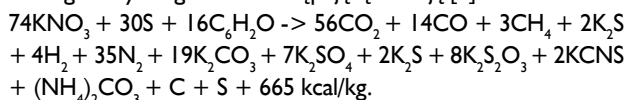
Zapłon stałych paliw raketowych – wybór z prac własnych i analiza literaturowa

Tomasz WOLSZAKIEWICZ* – Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie, Pracownia Badań Balistycznych, Pionki

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2016, 70, 1, 27–32

Wprowadzenie

Klasyczne zapłoniki stosowane do zapłonu stałych paliw raketowych oparte są na prochu czarnym, który wytwarza duże ilości produktów gazowych zgodnie z następującą reakcją [1]:



Podstawową wadą prochu czarnego jest trudność uzyskania podczas procesu produkcji powtarzalności charakterystyk balistycznych, które zależą w dużym stopniu od rodzaju użytego węgla drzewnego i temperatury zwęglania drewna [2]. Niepowtarzalność struktury prochu czarnego oraz krótki czas pracy, przy jednoczesnym wysokim wzroście ciśnienia w chwili zapłonu, wyklucza stosowanie prochu czarnego w nowoczesnych systemach zawierających stałe paliwa raketowe. Do zapłonu stałego paliwa silnika raketowego używane są trzy typy zapłonników: pirotechniczne, pirogeniczne i hipergoliczne [3].

Teoria zapłonu stałych paliw raketowych oparta jest na trzech podstawowych postulatach: reakcji w fazie gazowej, ciała stałego i heterogenicznej. Teoria fazy gazowej postuluje, że proces zapłonu jest sterowany przez reakcje pomiędzy paliwem i utleniaczem, który ma odparowywać, prawdopodobnie włączając tlen z atmosfery. W teorii fazy stałej przyjmowane jest, że materiał miotający przechodzi reakcję egzotermiczną w fazie stałej i nie bierze się pod uwagę wydzielania ciepła, ani dyfuzji do fazy gazowej. Według teorii heterogenicznej, stały utleniacz ulega rozkładowi do postaci gazowego utleniacza, który reaguje egzotermicznie z powierzchnią paliwa. Model zapłonu hipergoli jest szczególnym przypadkiem teorii heterogenicznej i zakłada, że nie ma zewnętrznego ogrzewania. W literaturze znane są trzy prace przeglądowe, w których usiłowano zwięźle przedyskutować każdą z wymienionych teorii: Price [4], Kulkarni [5] oraz Hermance [6]. Zadaniem zapłonników w silnikach pracujących na stałe paliwo raketowe jest podniesienie stanu termicznego paliwa do poziomu, który umożliwia zapłon i jego podtrzymanie w określonym czasie. Zaobserwowano, że dla optymalnego zapłonu, ważne jest właściwe oddziaływanie temperatury i ciśnienia w funkcji czasu. Ogólne wymagania dla zapłonników można określić następująco [7, 8]:

- Temperatura powierzchni paliwa powinna zostać podniesiona powyżej temperatury samozapłonu.
- Ciśnienie w komorze silnika powinno wzrosnąć ponad minimalne ciśnienie konieczne dla stabilnego palenia paliwa.
- Opóźnienie zapłonu, to jest czas od przyłożenia impulsu elektrycznego do momentu, kiedy osiągnięte jest 10% piku ciśnienia w komorze spalania; powinno ono być ustalone w ściśle określonych granicach.
- Odstęp czasu zapłonu od 10 ÷ 90% piku ciśnienia silnika, powinien być dostatecznie krótki, w przeciwnym razie – wskutek wymiany ciepła – więcej ciepła zostanie odprowadzone niż jest wytworzone przez gazy zapłonika.
- Szybkość zmian ciśnienia w czasie (dp/dt), w komorze silnika podczas zapłonu nie powinna być zbyt wysoka, aby nie doprowadzić

do niepożądanych pików ciśnienia i obciążeń udarowych. Z drugiej strony, nie powinna być zbyt niska, bo to grozi niestabilnością i opóźnieniem zapłonu.

- Zapłonnik powinien spełniać wymagane ograniczenia rozmiaru, masy i sposobu połączenia z komorą zawierającą paliwo.
- Zapłonnik powinien spełniać wymagania ochrony środowiska i składowania; powinien być także określony sposób inicjacji oraz jego właściwości elektryczne.

Obliczenia i symulacje numeryczne

Celem przeprowadzonych obliczeń było opracowanie podstaw do zaprojektowania aparatury umożliwiającej pomiar energii emitowanej przez tabletki pirogeniczne. Istotą prowadzonych badań był pomiar energii całkowitej oraz pomiar rozłożenia jej emisji w czasie. Wykorzystano do tego celu czujniki do pomiaru wymiany ciepła w postaci termometrów oporowych z cienkiej folii metalowej (grubość ~0,1 μm) nałożonej na izolator. Czujniki takie mają czas reakcji rzędu 1 μs i czułość wystarczającą do projektowanych pomiarów. Istotną sprawą było określenie kształtu i głównych wymiarów komory pomiarowej, a także warunków w jej wnętrzu, optymalnych ze względu na pomiar. Przed przystąpieniem do konstruowania aparatury badawczej przeprowadzono szereg badań numerycznych, których zadaniem było ustalenie szacunkowych wymiarów komory, oddalenie czujników od gniazd pomiarowych i określenie ilości propagowanych gazów. Przyjęto, że tabletkę zapłonową ma kształt walca o średnicy 4 mm i wysokości 3 mm oraz, że gęstość materiału tabletki wynosi 1,6 g/cm³, prędkość spalania 4 cm/s, temperatura produktów spalania 2483K oraz że pali się tylko jedna płaska strona tabletki. Całkowity czas spalania tabletki wynosi 75 ms, zatem aby pomiar rozkładu emisji energii w czasie miał sens, stała czasu dla pomiaru nie może przekraczać 100 μs. Dla zweryfikowania tej hipotezy wykonano obliczenia metodą Bezpośredniej Symulacji Monte Carlo [9 ÷ 13]. Tabletkę umieszczono na osi komory, na jej dolnej ścianie, czujnik pomiarowy – na górnej ścianie, naprzeciw tabletki. Wykonane obliczenia wykazały, że gdy w chwili początkowej w komorze pomiarowej była próżnia, to czas potrzebny do ustalenia warunków pomiaru wynosił ok. 150 μs. Długość tego czasu zależy od odległości między tabletką i czujnikiem – można go więc skrócić zmniejszając tę odległość. Natomiast, gdy w chwili początkowej w komorze było powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym, to po upływie 600 μs warunki były dalekie od ustalenia. Co więcej, molekuly produktów spalania, które dotarły do czujnika, miały energię odpowiadającą temperaturze powietrza wypełniającego komorę, co wynikało z faktu, że molekuly te na swej drodze wielokrotnie zderzały się z molekulaми powietrza.

Zasady pomiaru energii emitowanej przez tabletki zapłonowe

Na przełomie lat 50. i 60. XX w. zajmowano się nim m.in. w związku z rozwojem techniki raketowej, lotami orbitalnymi itp. Opracowano wówczas metodę pomiaru strumienia ciepła w warunkach niestacjonarnych – w rurach uderzeniowych i urządzeniach na nich opartych [14, 15], która polega na pomiarze zmieniającej się w czasie

Autor do korespondencji:
Dr inż. Tomasz WOLSZAKIEWICZ, e-mail: wolszakiewicz@ipo.waw.pl

temperatury powierzchni ścianki ciała opływającego. Traktując zmierzoną temperaturę jako warunek brzegowy dla równania przewodnictwa, w materiale ścianki można określić strumień ciepła odbieranego. Przed przystąpieniem do symulacji numerycznych, konieczne było określenie, jakie gazy, i w jakiej ilości, będą emitowane w produktach spalania. Do tego celu posłużył program ICT – Thermodynamic – Code. Szczegóły założeń do obliczeń i wyniki symulacji przedstawiono w [16].

Jednowymiarowe równanie przewodnictwa ciepła w materiale ścianki w ogólnym przypadku ma postać:

$$\rho \cdot c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}] \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość; θ – temperatura; $c(\theta)$ – ciepło właściwe; $k(\theta)$ – współczynnik przewodnictwa cieplnego (zależny od temperatury); t – czas; x – współrzędna przestrzenna.

Równanie to należy rozwiązać przy warunku początkowym i brzegowym:

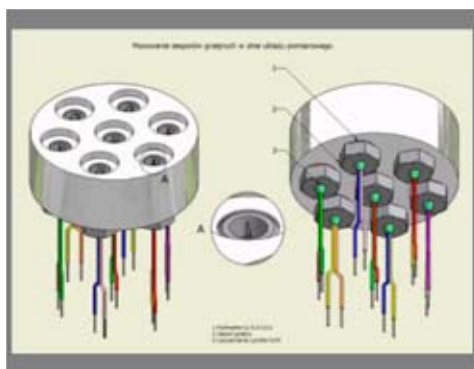
$$\begin{aligned} \theta(x,t) &= 0 & \text{dla} & \quad t = 0; \quad x > 0 \\ \theta(x,t) &= 0_w(t) & \text{dla} & \quad t \geq 0; \quad x = 0 \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} \theta(x,t) &= 0 \end{aligned}$$

Poszukiwany strumień ciepła przechodzący przez płaszczyznę $x = 0$ wyraża się zależnością:

$$\dot{q}(t) = -k(\theta) \left[\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (2)$$

Układ pobudzenia

Do budowy układu pobudzenia wykorzystano drut oporowy FeCrAl 135 o średnicy 0,13 mm firmy Term Tech. Jest to materiał (odpowiednik Kanthal D®, Resist Ohm 135®) oporowy na bazie żelaza, chromu i aluminium o rezystywności właściwej $\rho = 135 \mu\Omega/\text{cm}$. Struktura drutu FeCrAl powoduje, że jest on odporny na działanie atmosfer nawęglających i zasiarczonych. Na Rysunku 1 przedstawiono rozmieszczenie układu pobudzenia układu pomiarowego w trakcie prowadzonych pomiarów.



Rys. 1. Rozmieszczenie układów pobudzenia

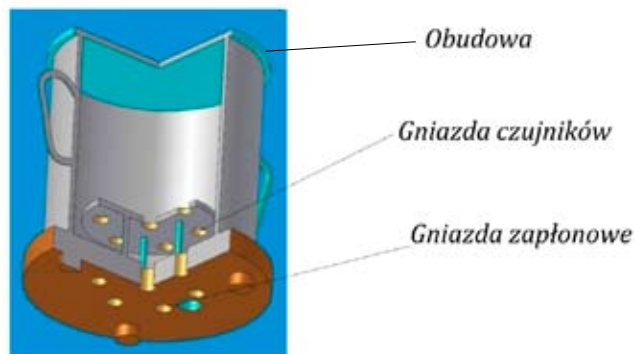
Układ pomiarowy



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe: 1 – tabletkarka; 2 – komora do pomiaru energii; 3 – układ pobudzenia i zapłonu; 4 – przewód pompy próżniowej; 5 – sprężarka powietrza; 6 – system rejestracji danych



Rys. 3. Zdjęcia czujnika pomiarowego

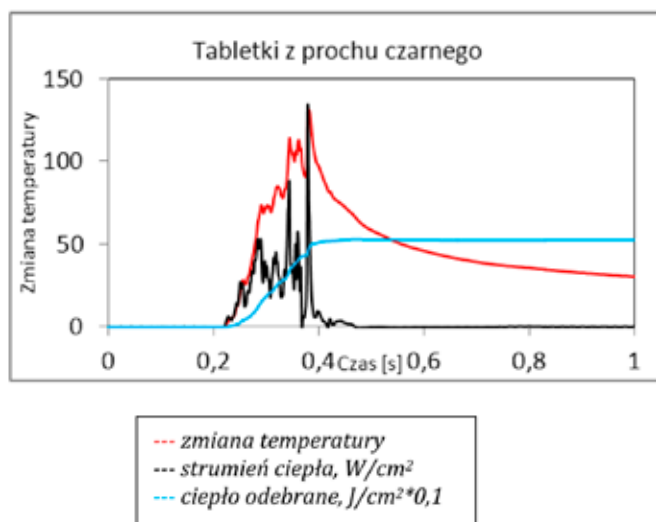


Rys. 4. Rysunek układu pomiarowego

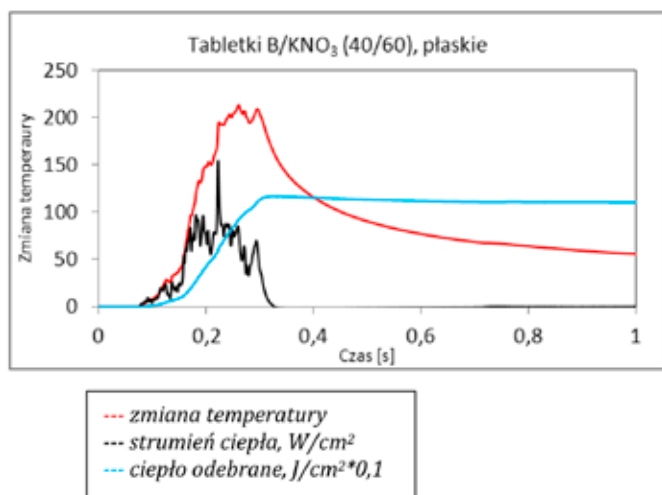
Rysunek 4 przedstawia fragment aparatury, wewnątrz której prowadzono pomiar. Pomiar temperatury wewnątrz komory odbywał się przy użyciu termometru platynowego, wykonanego ze szklanej płytki, na którą naniesiona była platynowa ścieżka (Rys. 3). Wraz ze wzrostem temperatury, rosła również liniowo oporność elementu pomiarowego. Na podstawie zmierzonej oporności, i znajomości właściwości wykonanego termometru, dokonywany był pomiar temperatury. Do pomiarów wykorzystano urządzenie rejestrujące ESAM TRAVELLER wraz z współpracującym z nim oprogramowaniem. Wykorzystywane termometry platynowe wykonywane były ręcznie; każdy z nich nieznacznie różnił się opornością. Wykluczono to zastosowanie jednego rezystora wzorcowego dla wszystkich termometrów.

Wyniki badań

Na Rysunkach 5 i 6 przedstawiono zbiorcze wyniki przeprowadzonych badań. Wyznaczono zmianę temperatury, strumień ciepła i ciepło odebrane. Pozostałe wyniki badań przedstawiono w [15].



Rys. 5. Zbiorczy wykres zmian temperatury, strumienia ciepła i ciepła odebranego dla tabletek z prochu czarnego



Rys. 6. Zbiorczy wykres zmian temperatury, strumienia ciepła i ciepła odebranego dla tabletek B/KNO₃ o geometrii „płaskiej”

Dodatkowo po przeprowadzeniu badań cieplnych, wyznaczono – za pomocą badań w komorach balistycznych – impulsy ciśnienia generowane przez mieszaniny pirogeniczne (Tab. 1).

Tablica I

Wyniki pomiarów impulsu ciśnienia dla tabletek pirogenicznych

Typ tabletki	Skład	Geometria	Czas pracy s	Ciepło odebrane J/cm ²	Impuls, MPa*s
BKNO ₃	Oryginał	Wypukła	0,26	13,0	0,084
BKNO ₃	40/60	Płaska	0,25	12,7	0,041
BKNO ₃	40/60	Wypukła	0,34	14,5	0,065
Zr/KClO ₄	50/50	Płaska	0,27	10,5	0,115
Zr/KClO ₄	50/50	Wypukła	0,43	24,0	0,132
Zr/KNO ₃	25/75	Płaska	0,43	21,5	0,09
Zr/KNO ₃	25/75	Wypukła	0,52	22,5	0,11
Zr/KNO ₃	17/83	Płaska	0,55	10,0	0,08
Zr/KNO ₃	17/83	Wypukła	0,65	14,0	0,09
Proch czarny			0,25	5,5	

Wnioski

Przedstawiono prototypową aparaturę do pomiaru efektów podczas zapłonu tabletek pirogenicznych. Zastosowanie bardzo czułych czujników (termorezystancyjnych) umożliwiło zarejestrowanie zmianę temperatury na powierzchni czujnika, a za pomocą autorskiego oprogramowania wyznaczono strumień ciepła i całkowite ciepło emitowane przez tabletki. Ciepło odebrane od tabletek wahało się w granicach od 13 ÷ 24 J/cm². Według przeprowadzonej analizy, optymalną mieszaniną pirogeniczną jest Zr/KNO₃ o składzie 25/75 zapewniająca długi czas pracy (0,55 ÷ 0,65 s), dużą ilość ciepła odebranego na poziomie 21 J/cm² i impuls ciśnienia zbliżony do tabletek B/KNO₃. Porównano otrzymane wyniki z klasycznym zapłonem za pomocą prochu czarnego i wyznaczono czas pracy (0,25 s) i znacznie niższe ciepło odebrane (5,5 J/cm²).

Financial support from the State Committee for Scientific Research (KBN Project O N 508 004134) is gratefully acknowledged.

Literatura

1. Urbański T.: *Chemia i technologia materiałów wybuchowych*. MON, Warszawa 1954.
2. Heger L.: *Elaboracja amunicji*. Warszawa 1955.
3. Babrauskas V.: *Ignition handbook*. 2003.
4. Price E.W., Bradley H., Dehority G.L., Ibricic M.M.: *Theory of ignition of solid propellants*. AIAA Journal 1966, 4, 7, 1153.
5. Kulkarni A.K., Kumar M., Kuo K.K.: *Review of solid propellant ignition studies*. AIAA, pp. 80–1210, New York 1980.
6. Hermance C.E.: *Solid-Propellant Ignition Theories and Experiments*, pp. 239–304 in Prog. in Astronautics and Aeronautics, vol. 90: Fundamentals of Solid-Propellant Combustion, AIAA, New York 1984.
7. Ellern H.: *Military and civilian pyrotechnics*. 1996.
8. *Solid rocket motor igniters*. AFOSR, 67–1765, NASA Sp-8051, 1971.
9. Bird G.A.: *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*. Clarendon Press, Oxford 1994.
10. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A.: *Gazogenerator Prochowy. Obliczenia i Eksperyment*. Przemysł Chemiczny 2007, 86, 6, 519–523.
11. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A.: *Zastosowanie metody symulacji Monte-Carlo w obliczeniach pracy gazogeneratora prochowego*. III Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPO „Materiały wybuchowe badania zastosowanie – bezpieczeństwo”, 16–18 czerwiec, 2006.
12. Wolszakiewicz T., Walenta Z. A.: *Porównanie symulacji Monte-Carlo z wynikami eksperymentalnymi badania układu gazogeneratora prochowego*. VI Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, 11–13 październik, Waplewo 2006.
13. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A., *Dyskretne metody symulacji zjawisk przepływowych w gazach i cieczach*. Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa 2013, 4, 4(14), 67–76.
14. Hall J.G., Hertzberg A.: *Recent advances in transient surface temperature thermometry*. Jet Propulsion 1958, 28, 11.
15. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A.: *Measurement of Energy Emitted by Pyrogenic Tablets Used for Ignition of Solid Rocket Propellants*. CEJEM 2015, 12, 2, 359–375.
16. Wolszakiewicz T.: *Badania balistyczne i wytrzymałościowe stałych paliw raketowych w aspekcie prawidłowości ich zapłonu oraz możliwości wystąpienia sytuacji awaryjnych pracy silników raketowych*. IPO, Warszawa 2013, ISBN 978–83–914922–2-2.

*Dr inż. Tomasz WOLSZAKIEWICZ jest absolwentem Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej (1992). Doktorat na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej (2001). Obecnie pracuje w Instytucie Przemysłu Organicznego jako kierownik Pracowni Badań Balistycznych w Pionkach. Zainteresowania naukowe: badania zapłonu oraz badania balistyczne i wytrzymałościowe stałych paliw raketowych. Jest autorem 1 monografii, współautorem 1 monografii, 17 artykułów z listy filadelfijskiej, 23 artykułów o zasięgu krajowym oraz autor i współautor 70 posterów i wystąpień na konferencjach krajowych i zagranicznych.
e-mail: wolszakiewicz@ipo.waw.pl

8 mld PLN na innowacje z NCBR

Aż o 8 mld PLN z przeznaczeniem na badania naukowe i prace rozwojowe mogą się starać w tym roku przedsiębiorcy i naukowcy. W 2016 NCBR ogłosi 25 konkursów (nie licząc konkursów w ramach programów międzynarodowych), a połowa z nich to nowe propozycje adresowane zarówno do przedsiębiorców, jak i uczelni i jednostek naukowych. Większość konkursów będzie przeprowadzona w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. (kk)
(<http://www.ncbir.pl/>, 8.01.2016)