

**Autoreferat**

**zawierający opis dorobku i osiągnięć naukowo-badawczych**



### 1. Imię i nazwisko

Tomasz Wolszakiewicz

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

09.06.1992 r. - uzyskanie stopnia magistra inżyniera, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, praca pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Leona Gradonia *Analiza metod wydzielenia jednorodnych frakcji aerozoli cząstek niekulistych o różnych smukłościach.*

10.07.2001 r. - uzyskanie stopnia doktora nauk chemicznych w zakresie chemii, na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej, za rozprawę pt. *Własności fizykochemiczne układów dwuskładnikowych zawierających nitrocelulozę i związek małowcząsteczkowy*; promotor prof. dr hab. Andrzej Książczak.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

1. Technolog Wydziału Trójpolicofosforanu Sodiu w Zakładach Chemicznych „Alwernia”  
10.10.1992 – 10.04.1993.
2. Instytut Przemysłu Organicznego; ul. Annapol 6, 03-236 Warszawa,  
Kierownik Pracowni Badań i Technologii Materiałów Wybuchowych Miotających w Pionkach

stanowisko: adiunkt

01.10.1993 do chwili obecnej

### 4. Osiągnięcie wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

#### a) tytuł osiągnięcia naukowego

*Gazogenerator prochowy - układ wysokoenergetyczny zapewniający stabilny dopływ gazów w złożonych układach raketowych*

#### b) autor, rok wydania, nazwa wydawnictwa

Tomasz Wolszakiewicz, 2018.

#### c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

## Wskazanie osiągnięcia

Jako osiągnięcie wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wskazuję jednotematyczny cykl publikacji pt. „**Gazogenerator prochowy - układ wysokoenergetyczny zapewniający stabilny dopływ gazów w złożonych układach raketowych**”. Na cykl składa się 9 wymienionych poniżej publikacji (w tym 1 patent).

- 1) **Wolszakiewicz T.**, Walenta Z.A., Gazogenerator prochowy. Obliczenia i eksperyment, Przemysł Chemiczny, **2007**, 86(6), 519-523.  
Udział własny 60%.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: ustaleniu planu badawczego, przeprowadzeniu badań doświadczalnych, analizie otrzymanych wyników, edycji tekstu.* IF – 0,196
- 2) **Wolszakiewicz T.**, Właściwości fizykochemiczne nitrocelulozy do zastosowań specjalnych, Przemysł Chemiczny, **2012**, 91(7), 1427-1434. IF – 0,344
- 3) Gawor T., **Wolszakiewicz T.**, Wpływ geometrii ładunku gazogeneratorskiego na jego właściwości balistyczne, Materiały Wysokoenergetyczne, Tom 4, **2012**, 60-65.  
Udział własny 60%.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji badań, analizie dostępnych danych pomiarowych, edycji tekstu.*
- 4) **Wolszakiewicz T.**, Specyfika zapłonu stałego paliwa raketowego w gazogeneratorze z wykorzystaniem tabletek pirogenicznych, Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa, **2013**, 4, 2(12), 29-40.
- 5) **Wolszakiewicz T.**, Zapłon stałych paliw raketowych – wybór z prac własnych i analiza literaturowa, 27-32, Chemik **1/2016**.
- 6) **Wolszakiewicz T.**, Walenta Z.A., Analiza sytuacji awaryjnych podczas pracy gazogeneratorskiego, Przemysł Chemiczny, **2014**, 93(6), 868-872.  
Udział własny 60%.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: przygotowaniu materiałów do badań i analizie wyników RTG, współautorstwo analizy wyników, obliczeniach numerycznych.* IF – 0,399
- 7) **Wolszakiewicz T.**, Walenta Z.A., Measurement of Energy Emitted by Pyrogenic Tablets Used for Ignition of Solid Rocket Propellants, Central European Journal of Energetic Materials, **2015**, 12(2), 359-375.  
Udział własny 60%.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: ustaleniu planu badawczego, przeprowadzeniu analizy wyników zgromadzonych podczas kierowania Projektem Badawczym, opracowaniu i analizie wniosków i edycji tekstu.* IF – 1,28

- 8) **Wolszakiewicz T.**, Gawor T., Florczak B., Myśliwiec R., Sypień J., *Stałe paliwo raketowe*, patent P. 410717, 2015.  
Udział własny 50%.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: inspiracji podjęcia tematyki badań, wytypowaniu składów paliw, kontrolę nad przeprowadzeniem badań, analizie wyników.*
- 9) **Wolszakiewicz T.**, Florczak B., *Opracowanie składu paliwa dla gazogeneratora*, VII Konferencja Naukowo–Techniczna „Perspektywy rozwoju krajowej produkcji napędów raketowych oraz amunicji strzeleckiej i artyleryjskiej” Kołobrzeg 21—23 maja 2015.  
Udział własny 70%.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu analizy doboru składów ciast prochowych, nadzór nad wykonaniem próbek i przeprowadzeniem badań liniowej szybkości spalania*

## SPIS TREŚCI

---

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów .....	5
1. Wprowadzenie.....	6
2. Badania procesu zapłonu.....	8
3. Obliczenia gazogeneratora prochowego .....	14
3.1. Sytuacje awaryjne.....	17
4. Zmodernizowany ładunek gazogeneratora - PAC-M.....	23
5. Literatura .....	28
Podsumowanie .....	30



## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

---

- $2e_1$  - grubość warstwy palnej,  
 $A_p$  - współczynnik w prawie palenia zależny od właściwości paliwa,  
 $C_{in}$  - wydatek masowy gazu z jednostki powierzchni spalania,  
 $C_{out}$  - stała określająca przepływ przez dyszę,  
 $d_k$  - średnica krytyczna dyszy,  
 $n$  - potęgowy wykładnik ciśnienia w prawie palenia,  
 $p$  - ciśnienie,  
 $p_0$  - ciśnienie początkowe,  
 $R$  - indywidualna stała gazowa,  
 $R_y$  - rezystor wzorcowy,  
 $S(t)$  - pole powierzchni spalania,  
 $t$  - czas,  
 $T'(t)$  i  $V'(t)$  - pochodne temperatury i objętości komory po czasie,  
 $u$  - liniowa szybkość spalania,  
 $\gamma$  - wykładnik adiabaty,  
 $\rho$  - gęstość paliwa.

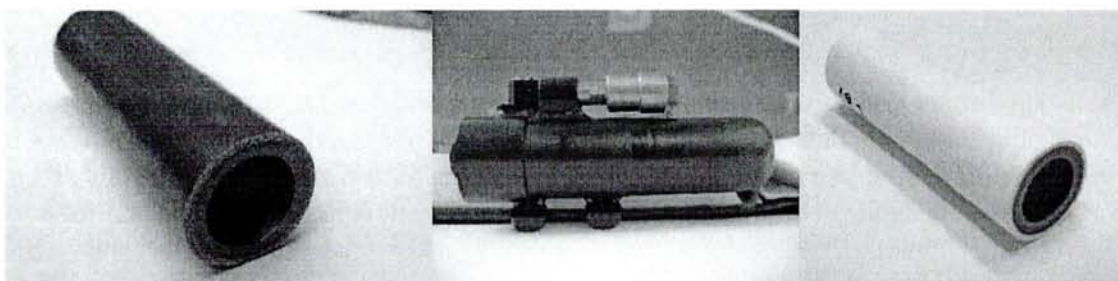
### Wykaz ważniejszych skrótów

- CI* - (dietylodifenylouretan), centralit I  
*DNT* - dinitrotoluen,  
*NC* - nitroceluloza (O-azotan celulozy),  
*NG* - nitrogliceryna (triazotan gliceryny),  
*NLPR-70* - niekierowany lotniczy pocisk raketowy 70 mm,  
*POM* -  $\gamma$ -polioksymetyleno-dwumetyloeter ( $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$ ),  
*PAC* - prochowy akumulator ciśnienia  
*PAC-M* - zmodyfikowany prochowy akumulator ciśnienia  
*P1, P2* - nazwy ciast „surowych”  
*GROM, PIORUN* - kryptonimy kierowanych pocisków przeciwlotniczych  
*BKB* - kauczuk butadienowo - akrylonitrylowy  
*E5* - żywica poliestrowa

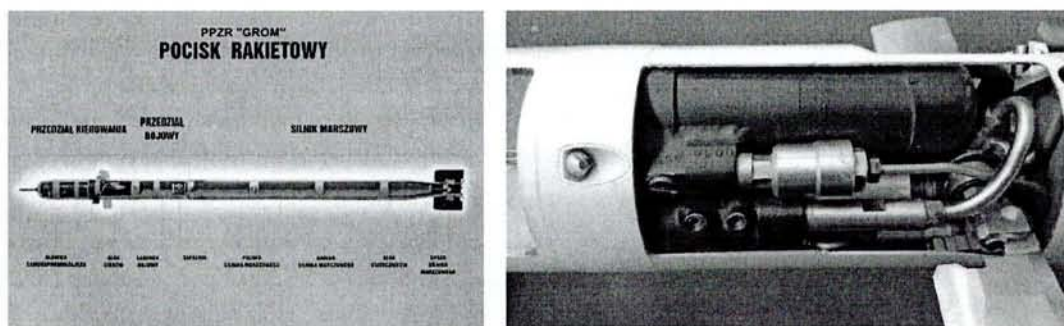
## 1. WPROWADZENIE

Gazogenerator prochowy jest istotnym elementem złożonych układów napędowych używanych w sterowanych systemach raketowych. Jego zadaniem jest dostarczanie stabilnego strumienia gazów prochowych, o ściśle określonych parametrach do pokładowych wytwornic prądu. W konkretnych rozwiązaniach konstrukcyjnych jako źródło gazów, stosowane jest kontrolowane spalanie homogenicznego stałego paliwa raketowego.

Polska jest producentem przenośnego zestawu przeciwlotniczego *GROM* i wdrażany jest zmodyfikowany zestaw przeciwlotniczy *PIORUN*. W obu systemach wykorzystywany jest gazogenerator prochowy, o różnym zakresie czasu pracy związany ze zwiększonym zasięgiem systemu *PIORUN*. Głównymi składnikami stosowanego paliwa jest mieszanina nitrocelulozy z azotanem glicerolu (nitrogliceryny), oraz związki stabilizujące i zapewniające odpowiednie parametry pracy i przetwórstwa [1]. Poza właściwościami energetycznymi gazogeneratory muszą również zapewniać odpowiednie parametry wytrzymałościowe i balistyczne, co badałem na przykładzie innych paliw homogenicznych i złożonych [2-5].



Rys. 1. Od lewej: zdjęcie ładunku PAC – z tradycyjnym inhibitorem, zdjęcia środkowe – komora do badań stacjonarnych, zdjęcie z prawej – ładunek PAC-M z nowym rodzajem inhibitora



Rys. 2. Od lewej: zdjęcie makiety pocisku raketowego „Grom”, zdjęcie z prawej – komora ładunku PAC zainstalowana w przedziale kierowania

W latach 70-tych ubiegłego wieku pojawiły się pierwsze opracowania dotyczące składu ciasta prochowego dla gazogeneratora prochowego i technologii jego inhibitowania [6-8]. Początkową inspiracją prowadzonych badań było wykorzystanie gazogeneratora w rakiecie przeciwlotniczej *Strzala-2M*.

W 2004 roku zostałem głównym koordynatorem prac związanych z wdrożeniem do produkcji seryjnej prochowego akumulatora ciśnienia (PAC) dla potrzeb rakiety *GROM*. Od 2006 roku, po przeprowadzeniu badań prototypowych IPO zostało uznane za jedynego dostawcę gazogeneratorów do Mesko S.A. Kolejne lata nadzorowałem produkcję, co przyniosło znaczącą poprawę jakości gotowego wyrobu.

Nowy system przeciwlotniczy *PIORUN* wymagał opracowania nowego paliwa, które zapewniłoby wydłużony czas pracy pokładowego źródła energii o około 22%, zapewniając

czas pracy w temperaturze  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  minimum 17 s. W 2014 zostałem odpowiedzialny za zaprojektowanie nowego paliwa, które pozwoliłoby na wydłużenie czasu pracy o 3 s, bez zmiany masy i dotychczasowej geometrii gazogeneratora. Wynikiem moich dwuletnich prac badawczych jest patent (P.410717), na podstawie którego w 2017 roku uzyskano wdrożenie do produkcji zestawu przeciwlotniczego *PIORUN*, poprzedzone badaniami prototypu i typu.

Produkcja gazogeneratora prochowego jest procesem złożonym. Pierwszym etapem jest wykonanie tzw. surowego ciasta prochowego (zamawiany skład w oddziale Mesko S.A w Pionkach), które następnie pod moim nadzorem jest modyfikowane poprzez dodanie odpowiednich ilości modyfikatorów spalania (stearynianu ołowiu  $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{O}_4\text{Pb}$ , salicylanu miedziano-ołowiawego  $\text{C}_{14}\text{H}_{19}\text{O}_9\text{CuPb}$  i  $\gamma$ -polioksymetyleno-dwumetyloeteru  $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$ ).

Kolejna operacja to walcowanie ciasta prochowego i proces tłoczenia w prasach hydraulicznych (ten etap wykonywany jest pod moim nadzorem w Zakładach Produkcji Specjalnej „Gamrat” w Jaśle). Wyprodukowane kształtki prochowe po przeprowadzeniu kontroli rentgenograficznej przekazywane są do Pracowni Badań i Technologii Materiałów Wybuchowych Miotających w Pionkach. Kolejny etap to pokrycie ładunków warstwą ekranującą co ma zapewnić efekt tzw. „spalania papierosowego”.

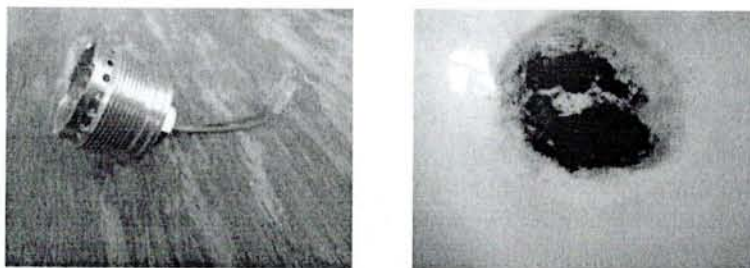
W pierwszych opracowaniach pochodzących z lat 80-tych ubiegłego stulecia, w skład masy ekranującej wchodził: kopolimer metakrylanu metylu i n-butylu, metakrylan n-butylu, azbest chryzotylowy i nadtlenek benzoilu. W kolejnych latach ze względu na kancerogenne właściwości azbestu, zastąpiono go tarnoformem, który spełnia rolę wypełniacza w masie ekranującej. W latach 2015-2016 brałem udział w opracowaniu nowego składu inhibitora, który ma zapewnić stabilne spalanie po długotrwałym (38 dni) termostataowaniu w temperaturze  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , w procesie przyspieszonego starzenia.

Świadome i w pełni kontrolowane udoskonalanie i modyfikowanie działania gazogeneratora prochowego wymagało podjęcia badań nie związanych bezpośrednio z technologią produkcji. Przeprowadziłem symulacje numeryczne procesu zapłonu, spalania i analizy sytuacji awaryjnych.



## 2. BADANIA PROCESU ZAPŁONU

Dobór sposobu zapłonu stałego paliwa raketowego, decyduje o prawidłowej i stabilnej pracy napędu raketowego. Używane do zapłonu stałych paliw raketowych odmiany prochu czarnego, z natury swej wywołują duże przeregulowania strumienia cieplnego w procesie zapłonu. Zapłonnik składa się z układu inicjującego i podsypki z prochu czarnego. Jest to klasyczne rozwiązanie inicjowania pracy układów miotających i ma pewne wady. 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 (rys. 3), może być zapłon z zastosowaniem tabletek pirogenicnych [9]. Główną zaletą takiego zapłonu jest dłuższy czas działania i większa powtarzalność geometrii tabletek pirogenicnych, w stosunku do zapłonu z użyciem 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.



*Rys. 3. Po lewej – zdjęcie zapłonika, zdjęcie po prawej proch czarny pobrany z zapłonika*

Mieszaniną najczęściej stosowaną do wytwarzania tabletek jest B/KNO<sub>3</sub>. Inne znane masy pirogeniczne to; Zr/BaCrO<sub>4</sub>, Zr/PbCrO<sub>4</sub>, Al/KClO<sub>4</sub>, Zr/KClO<sub>4</sub> [9]. W ramach projektu badawczego (0041/B/T00/2008/34), którym kierowałem, opracowałem nowatorską metodę wyznaczania energii emitowanej przez tabletki pirogeniczne, które zostały wykonane na specjalnie do tego celu skonstruowanej tabletkarce (rys. 4).



*Rys. 4. Ręczna tabletkarka do wytwarzania mas pirotechnicznych*

Główną zaletą stosowania tabletek pirogenicnych jest niższe ciśnienie maksymalne (maksymalna wartość ciśnienia dla przebadanej grupy tabletek to 9 MPa, a dla prochu czarnego to 13 MPa) w pierwszej chwili zapłonu, w porównaniu z zapłonem klasycznym opartym na prochu czarnym. Wykonane tabletki dają wyższe wartości ciśnień i impulsu w pierwszej fazie pracy układu, w porównaniu do tabletek wytwarzanych przemysłowo. Po przeprowadzonych badaniach balistycznych stwierdziłem, że mieszaniny oparte na borze



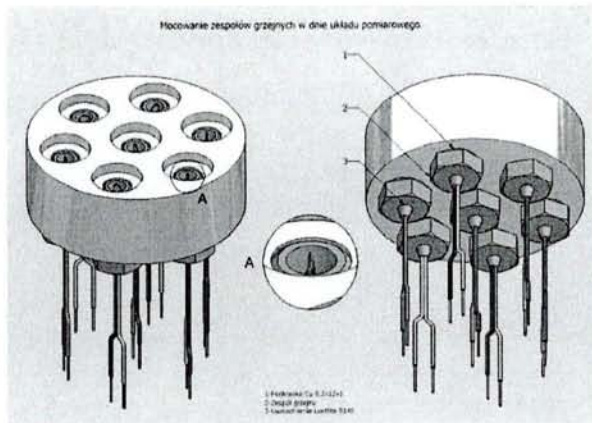
uzyskały wyższe wartości ciśnienia maksymalnego i ciśnienia w pierwszej sekundzie pracy, w porównaniu do tabletek zawierających cyrkon. Najniższe wartości ciśnień uzyskuje się dla mieszaniny Zr/KNO<sub>3</sub> 25/75. Dla wszystkich mieszanin z cyrkonem użycie chloranu(VII) potasu jako utleniacza daje 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. Wyniki eksperymentów dowodzą, że istnieje możliwość zastąpienia niepowtarzalnych (balistycznie) zapłonników opartych na prochu czarnym, mieszaninami pirogenicznymi (niskogazowymi dającymi wysoką temperaturę i dłuższy czas pracy) [10]. Dla przeprowadzonych spalań wyznaczyłem 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 wartość impulsu ciśnienia po czasie 0,3 s osiągają tabletki Zr/KClO<sub>4</sub>.

**Tabela 1.** Porównanie parametrów tabletek pirogeniczych

Rodzaj tabletki pirogeniczej	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

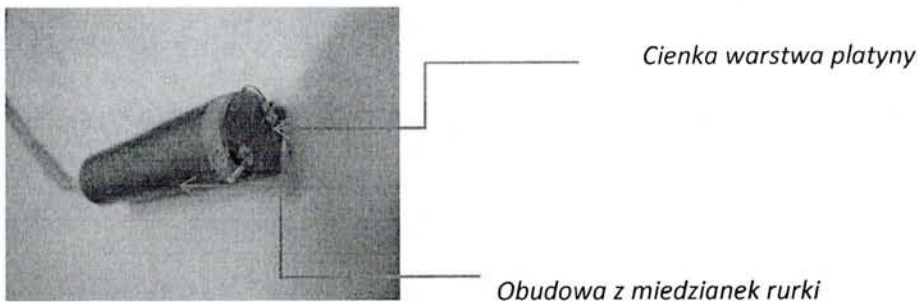
Poza badaniami balistycznymi zająłem się wyznaczeniem energii emitowanej przez tabletki pirogeniczne [11]. Energię niezbędną do zainicjowania zapłonu dostarcza zwykle ładunek zapłonowy, ulegając spaleniowi lub odpowiednie źródło promieniowania cieplnego. Łączna intensywność wymiany ciepła między gazami zapłonowymi i zapalaną powierzchnią paliwa, można wyrazić jako strumień cieplny proporcjonalny do różnicy temperatury gazów zapłonowych i temperatury zapalanej powierzchni. Współczynnikiem proporcjonalności jest sumaryczny współczynnik przejmowania ciepła uwzględniający wymianę ciepła konwekcyjną, radiacyjną i inne. Takie oddziaływanie gazów zapłonowych sprawia, że miejscowe temperatury nagrzanej warstwy paliwa stają się coraz wyższe, przy czym najwyższe są na powierzchni.





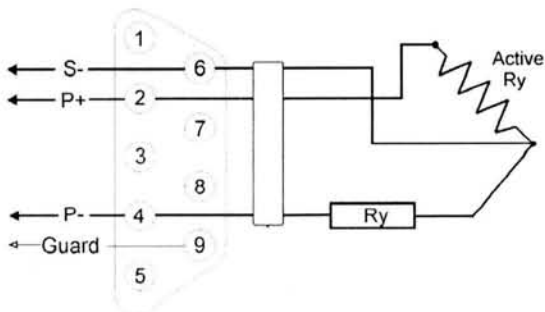
Rys. 5. Wizualizacja sposobu montownia tabletek zapłonowych w komorze pomiarowej

Pomiar temperatury wewnątrz komory prowadziłem przy użyciu termometru platynowego, wykonanego z płytki szklanej z naniesioną platynową ścieżką.



Rys. 6. Zdjęcie czujnika temperatury

Wraz ze wzrostem temperatury rośnie również liniowo oporność elementu pomiarowego. Na tej podstawie zmierzonej oporności i znajomości właściwości wykonanego termometru prowadziłem pomiar temperatury. Ze względu na niewielkie zmiany oporności, konieczne było wykorzystanie dokładnych metod pomiaru oporności jakimi są pomiary przy użyciu układów mostkowych. Do pomiarów wykorzystywałem układ pomiarowy *ESAM TRAVELLER* wraz ze współpracującym z nim oprogramowaniem. Zastosowałem wewnętrzne źródło zasilania urządzenia i termometr platynowy (*Active Ry*) podłączony w układzie ćwierćmostkowym z zewnętrznym rezystorem wzorcowym (*Ry*), jak na rys. 7. Wykorzystywane



Rys. 7. Układ połączeń w układzie ćwierć-mostka

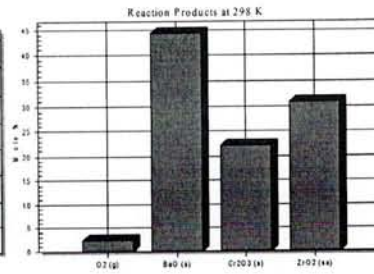
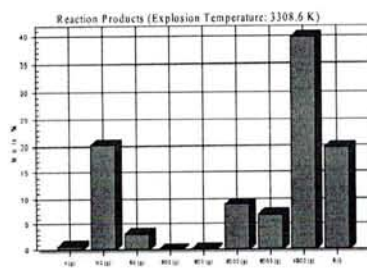
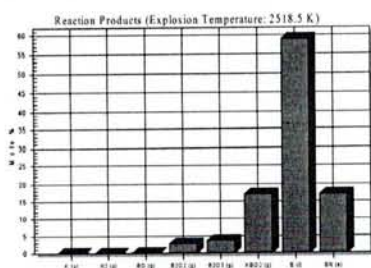
Przed przystąpieniem do symulacji numerycznych określających optymalne wymiary komory pomiarowej, konieczne było określenie jakie gazy i w jakiej ilości będą emitowane w

produktach spalania. Do tego celu posłużyłem się programem *ICT – Thermodynamic – Code*. Poniżej przedstawiłem wyniki wykonanych obliczeń dla przykładowych składów tabletek pirogenicnych.

B/KNO<sub>3</sub> – 40/60

B/KNO<sub>3</sub> – 20/80

Zr/BaCrO<sub>4</sub> – 20/80



$O=17,804$

$N=7,913$

$B=18,501$

$K=7,913$

$O=23,738$

$N=5,935$

$B=37,003$

$K=5,935$

$O=12,632$

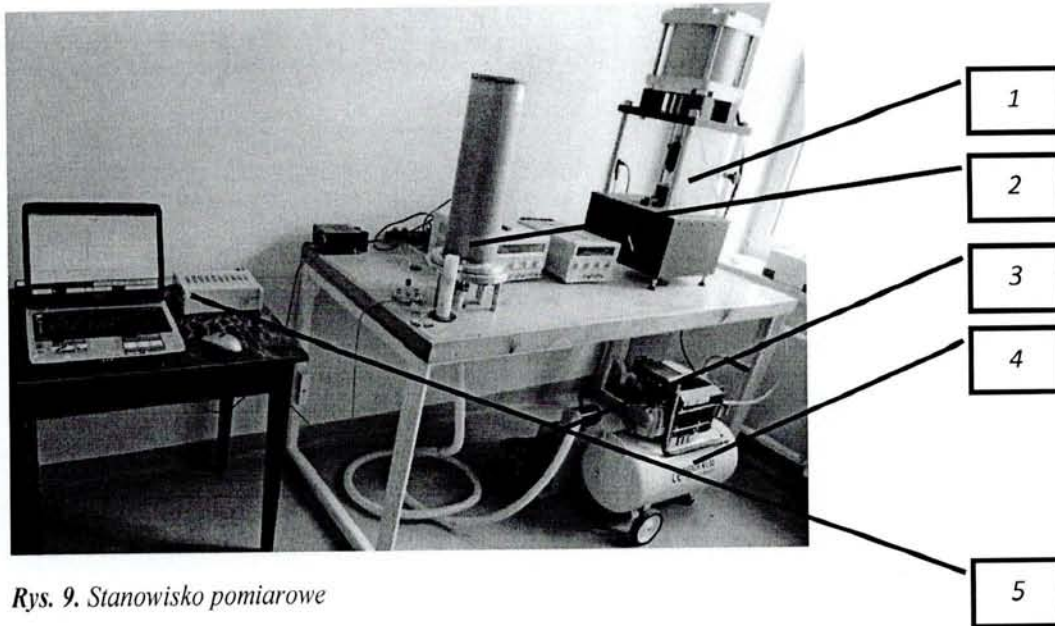
$Ba=3,158$

$Cr=3,158$

$Zr=2,193$

Rys. 8. Graficzna interpretacja składu gazów po spalaniu tabletek

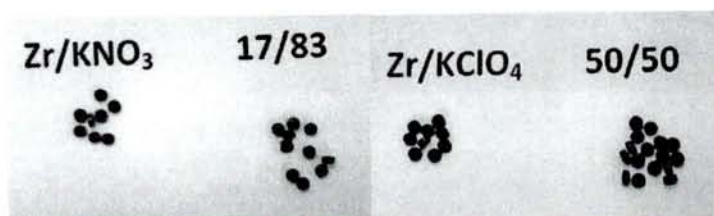
Dla uproszczenia obliczeń zastąpiłem dwa pierwsze produkty (N<sub>2</sub> i BO) jednym, o średniej masie molekularnej 27,85, a trzy następne również jednym, o średniej masie molekularnej 75,81. Obecność boru (będącego cieczą) w strumieniu gazów pominąłem. Przyjąłem ostatecznie, że ułamek masowy pierwszego „uśrednionego” składnika produktów spalania (N<sub>2</sub>+BO) wynosi 0,297, a drugiego 0,703. Przyjąłem, że tabletka zapłonowa ma kształt walca o średnicy 4 mm i wysokości 3 mm, oraz że gęstość materiału tabletki wynosi 1,6 g/cm<sup>3</sup>, prędkość spalania 4 mm/s, temperatura produktów spalania 2483 K, oraz że pali się tylko jedna płaska strona tabletki. Całkowity czas spalania tabletki wynosi 0,075 sekundy, zatem aby pomiar rozkładu emisji energii w czasie miał sens, stała czasu dla pomiaru nie może przekraczać 100 mikrosekund. W ciągu tego czasu z tabletki wyemitowanych zostanie około  $2 \cdot 10^{18}$  molekuł. Tymczasem w komorze pomiarowej w postaci krążka o wysokości 10 mm i średnicy 50 mm (najmniejsze przewidywane wymiary) w warunkach standardowych (ciśnienie 1 bar, temperatura 298,15K) znajduje się ok.  $4,77 \cdot 10^{20}$  molekuł powietrza – o ponad dwa rzędy więcej. Wydaje się prawdopodobnym, że powietrze to zakłóci pomiar, czyniąc go co najmniej niedokładnym. Dla zweryfikowania tej hipotezy wykonałem obliczenia metodą Bezpośredniej Symulacji Monte Carlo dla warunków opisanych powyżej, przyjmując że wewnątrz komory jest próżnia, albo że jest ona wypełniona powietrzem. Tabletkę umieszczono na osi komory, na jej dolnej ścianie, czujnik pomiarowy – na górnej ścianie, naprzeciw tabletki. Wykonane obliczenia wykazały, że czas do ustalenia warunków równowagi wynosił około 150 mikrosekund. Po przeprowadzeniu symulacji numerycznych przystąpiłem do wykonania tabletek pirogenicnych i wykonałem badania ich energii (rys. 9).



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe

- 1 – tabletkarka
- 2 – pomiar energii
- 3 – pompa próżniowa
- 4 – sprężarka powietrza
- 5 – system rejestracji danych

Wykonanie tabletek pirogeniczných polegało na podsuszaniu dobranej masy w temperaturze w granicach  $80\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  przez 4 godziny. Następnie granulowaniu przez sита  $0,6\div 0,85\text{ mm}$ , a zgranulowaną masę suszono w temperaturze  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  przez 6 godzin. Wilgotność po wysuszeniu nie przekraczała 0,65%. Wysuszoną masę przesiewano przed prasowaniem przez sito  $0,6\div 1,2\text{ mm}$ . W wyniku wytłaczania uzyskano przedstawione poniżej tabletki o dwóch różnych kształtach (dwuwypukłe i płaskie) (rys. 10).

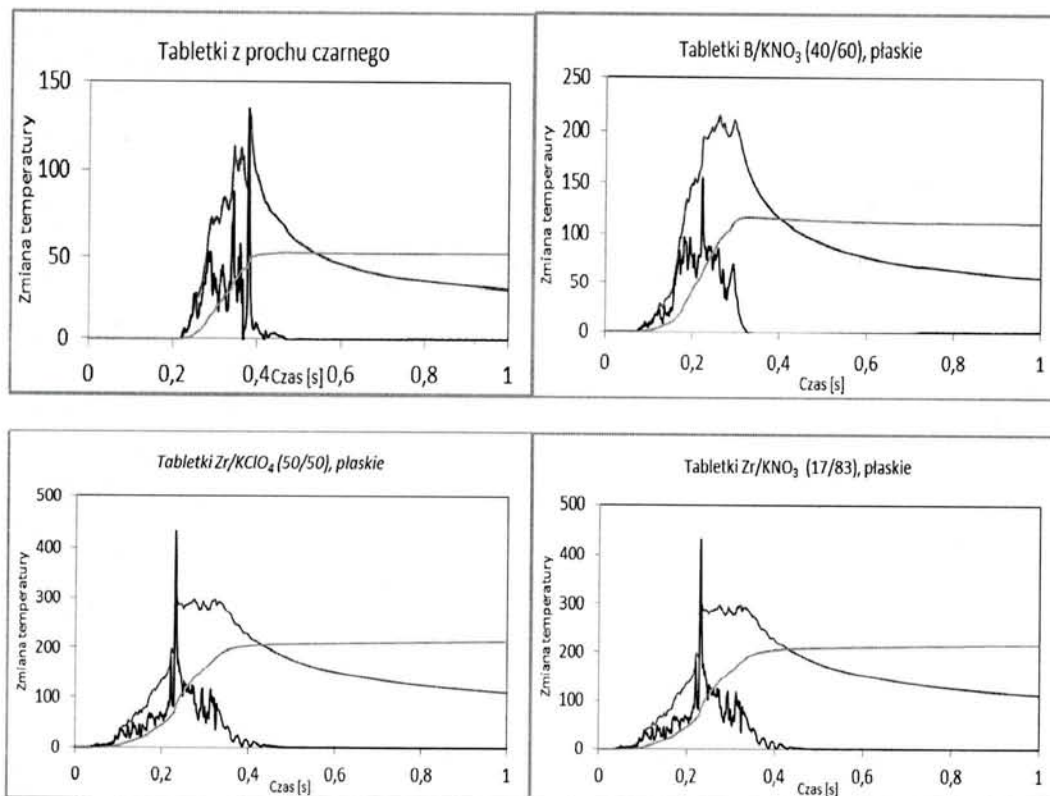


Rys.10 a) Zdjęcia tabletek  $\text{Zr}/\text{KNO}_3$  (po lewej „płaskie”, po prawej „dwuwypukłe”)

Rys.10 b) Zdjęcia tabletek  $\text{Zr}/\text{KClO}_4$  (po lewej „płaskie”, po prawej „dwuwypukłe”)

Opisana w pracy [11] procedura wyznaczania energii przekazywanej przez tabletki pirogeniczne do paliwa raketowego pozwoliła na wyznaczenie; zmian temperatury (poprzez bezpośredni pomiar za pomocą bardzo czułych czujników temperatury), obliczenie strumieni ciepła docierających do powierzchni paliwa i wyznaczenie ciepła odebranego. Na rys. 11 przedstawiłem wyniki pomiarów prochu czarnego i wybranych tabletek pirogeniczných.

*Dołucki*



Oznaczenia krzywych na wykresach

--- zmiana temperatury

--- strumień ciepła,  $W/cm^2$

--- ciepło odebrane,  $J/cm^2 \cdot 0,1$

Rys. 11. Zbiorcze rysunki zmian temperatury, strumienia ciepła i ciepła odebranego wybranych tabletek pirogeniczných

Wyzaczyłem dynamiczne zmiany (w funkcji czasu trwania eksperymentu) energii emitowanej przez tabletki pirogeniczne. Czas pracy tabletek mieścił się w zakresie od  $0,25 \div 0,56$  s, a impulsy ciśnienia w zakresie  $0,041 \div 0,132$  MPa\*s. Praca paliw inicjowanych nowymi tabletkami była stabilna i powtarzalna, a używane w rozwiązaniach konstrukcyjnych tabletki B/KNO<sub>3</sub> pracują stosunkowo krótko (0,25 s) i dają impulsy ciśnienia ( $0,041 \div 0,065$  MPa\*s). Najdłuższe czasy pracy uzyskano dla mieszanin Zr/KNO<sub>3</sub>, a największe impulsy ciśnienia dla mieszanin Zr/KClO<sub>4</sub>. Ciepło odebrane od tabletek wahało się w granicach od  $13 \div 24$  J/cm<sup>2</sup>. Według przeprowadzonej analizy optymalną mieszaniną pirogeniczną jest Zr/KNO<sub>3</sub> o składzie 25/75 zapewniającą długi czas pracy ( $0,55 \div 0,65$  s), dużą ilość ciepła odebranego na poziomie  $21$  J/cm<sup>2</sup> i impuls ciśnienia zbliżony do tabletek B/KNO<sub>3</sub>. 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/cm<sup>2</sup>) (Tabela 2).

*Włóka*

**Tabela 2.** Wyniki wyznaczonych parametrów tabletek pirogenicznych

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

### 3. OBLICZENIA GAZOGENERATORA PROCHOWEGO

W celu bliższego poznania natury spalania gazogeneratora prochowego (rys. 12), podjąłem się zadania numerycznego obliczenia pozostałych wartości fizykochemicznych (istniejący układ pomiarowy umożliwia tylko rejestrację zmian ciśnienia w funkcji czasu), w szczególności temperatury i gęstości gazów emitowanych z gazogeneratora, opierając się częściowo na metodzie Bezpośredniej Symulacji Monte Carlo, a częściowo na rozwiązaniach równań Naviera–Stockesa [12]. Powyższe obliczenia, w powiązaniu z zarejestrowaną zmianą ciśnienia, pozwoliły na pełną kontrolę wpływu gazów o ściśle określonych parametrach.



Rys.12. Zdjęcie komory gazogeneratora prochowego



Rys. 13. Zdjęcie czaszy gazogeneratora

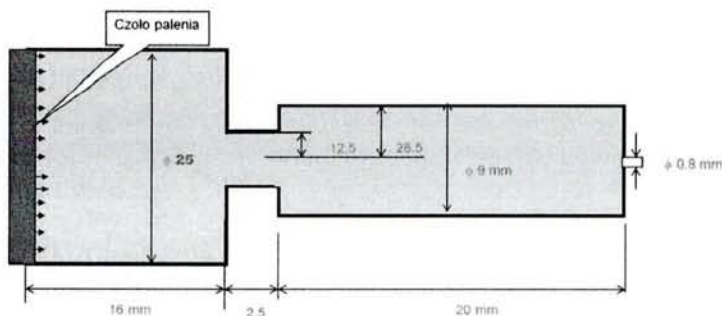
Wymiana pędu i energii między gazem i ściankami może zachodzić wyłącznie w wyniku zderzeń. Istnieje szereg modeli opisujących zderzenia ze ściankami. Korzystałem z najprostszego modelu, zaproponowanego jeszcze przez Maxwella [13], część molekuł odbija

*Wolna*

się od ścianki w sposób zwierciadlany (zachowuje się moduł prędkości, a kąt odbicia równy jest kątowi padania), reszta w sposób dyfuzyjny (molekuły są adsorbowane przez ściankę, a następnie emitowane w kierunkach wybranych losowo z prędkościami odpowiadającymi temperaturze ścianki). Stosunek liczby molekuł odbitych dyfuzyjnie do liczby wszystkich odbitych molekuł nosi nazwę współczynnika akomodacji. Współczynnik ten określa intensywność wymiany ciepła i pędu (tarcia) na powierzchni. Ponieważ dla większości tzw. „technicznych powierzchni” tak określony współczynnik akomodacji jest bardzo bliski jedności, taką wartość przyjąłem w obliczeniach. W obliczeniach korzystałem z autorskiego oprogramowania opracowanego w języku Fortran77 pracującego pod kontrolą systemu Linux. Dodatkowo przyjąłem następujące założenia:

- symetryczny kształt generatora, zachowując wiernie rzeczywiste wymiary wszystkich przekrojów (rys. 14),
- płaski front spalania. Nie uwzględniono istnienia czasy w początkowym etapie spalania (rys. 13),
- molekuły są emitowane z powierzchni spalania w liczbie odpowiadającej prędkości spalania, w kierunkach wybranych losowo; prędkości ich ruchu są określone „połowicznym” rozkładem Maxwella (nie ma prędkości skierowanych w stronę paliwa).

Początkowa liczba molekuł w gazogeneratorze wynosiła 3,5 mln; po zakończeniu pierwszej fazy obliczeń liczba ta wzrosła do ponad 20 mln. W sensownym czasie (nie przekraczającym dwóch miesięcy obliczeń), możliwe było przeliczenie zaledwie pierwszego okresu pracy gazogeneratora. Istotne w tego typu obliczeniach są pierwsze sekundy pracy, kiedy to układ dochodzi do stanu równowagi. Całkowity czas pracy gazogeneratora prochowego, wynoszący od 12 s w temperaturach ujemnych, do 14 s w temperaturach dodatnich, wykraczał poza praktyczne możliwości metody i dlatego w końcowym okresie należało posłużyć się modelem ośrodka ciągłego i równaniami Naviera–Stockesa.

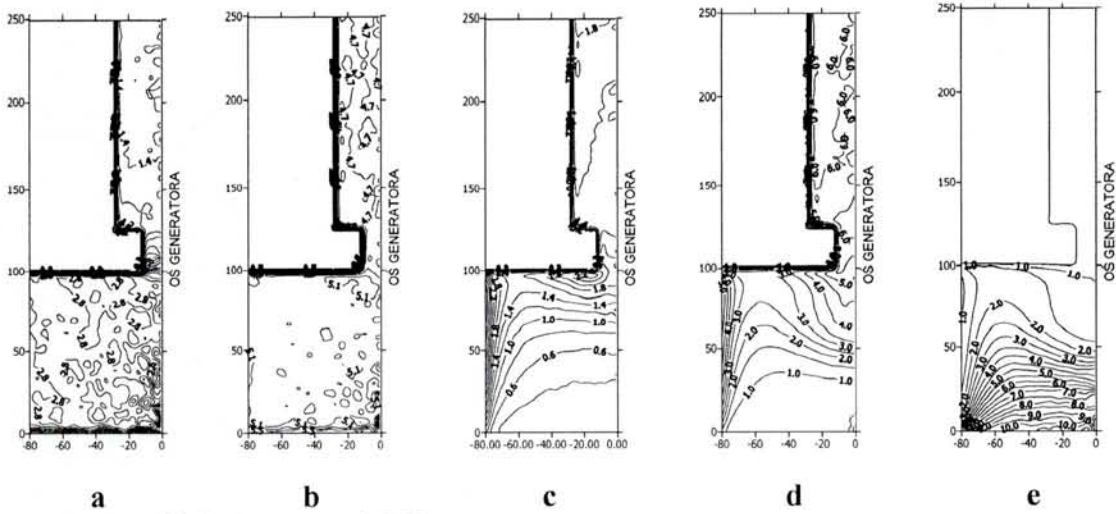


Rys. 14. Schemat ideowy obszaru obliczeń gazogeneratora prochowego

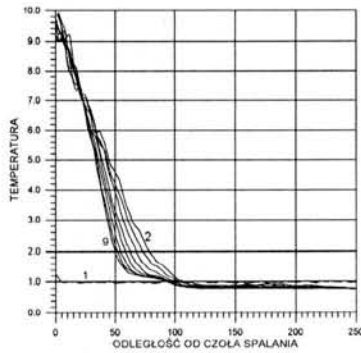
Obliczenia Monte Carlo przeprowadziłem jedynie dla pierwszej fazy pracy generatora, gdy niestacjonarność zjawisk odgrywała istotną rolę. Na rys. 15 pokazano:

- rozkłady ciśnienia wewnątrz gazogeneratora dla dwóch chwil czasowych – po ok. 0,32 oraz 3,2 ms (odpowiednio dla 4000 i 40000 kroków całkowania) od momentu zapłonu,
- rozkłady gęstości gazów w tych samych chwilach,
- rozkład temperatur po ok. 3,2 ms od zapłonu,
- wykresy temperatury, gęstości i ciśnienia gazów w funkcji odległości od powierzchni spalania dla dziewięciu kolejnych chwil czasowych.

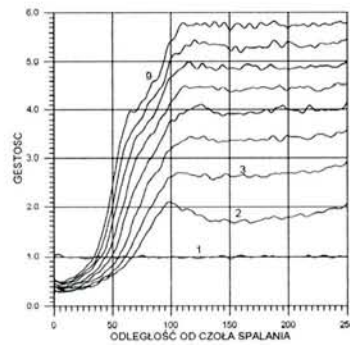
Jednostka długości na wszystkich wykresach jest równa 0,16 mm. Jednostki temperatury, gęstości i ciśnienia są wielkościami bezwymiarowymi. Wartościami odniesienia są dla nich temperatura i ciśnienie otoczenia, oraz wynikająca z nich gęstość początkowa.



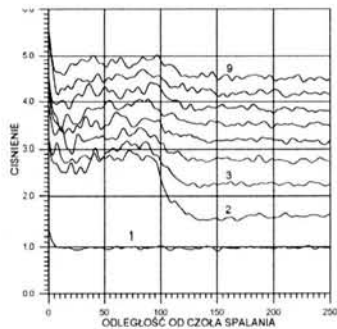
Rys. 15 a) Rozkład ciśnienia po ok. 0,32 ms  
 Rys. 15 b) Rozkład ciśnienia po ok. 3,2 ms  
 Rys. 15 c) Rozkład gęstości po ok. 0,32 ms  
 Rys. 15 d) Rozkład gęstości po ok. 3,2 ms  
 Rys. 15 e) Rozkład temperatury po ok. 3,2 ms



Rys. 16. Temperatury gazów przy osi gazogeneratora w funkcji odległości od powierzchni spalania dla dziewięciu kolejnych chwil odległych od siebie o ok. 0,4 ms



Rys. 17. Gęstości gazów przy osi gazogeneratora w funkcji odległości od powierzchni spalania dla dziewięciu kolejnych chwil odległych od siebie o ok. 0,4 ms



Rys. 18. Ciśnienie gazów przy osi gazogeneratora w funkcji odległości od powierzchni spalania dla dziewięciu kolejnych chwil odległych od siebie o ok. 0,4 ms

*[Handwritten signature]*



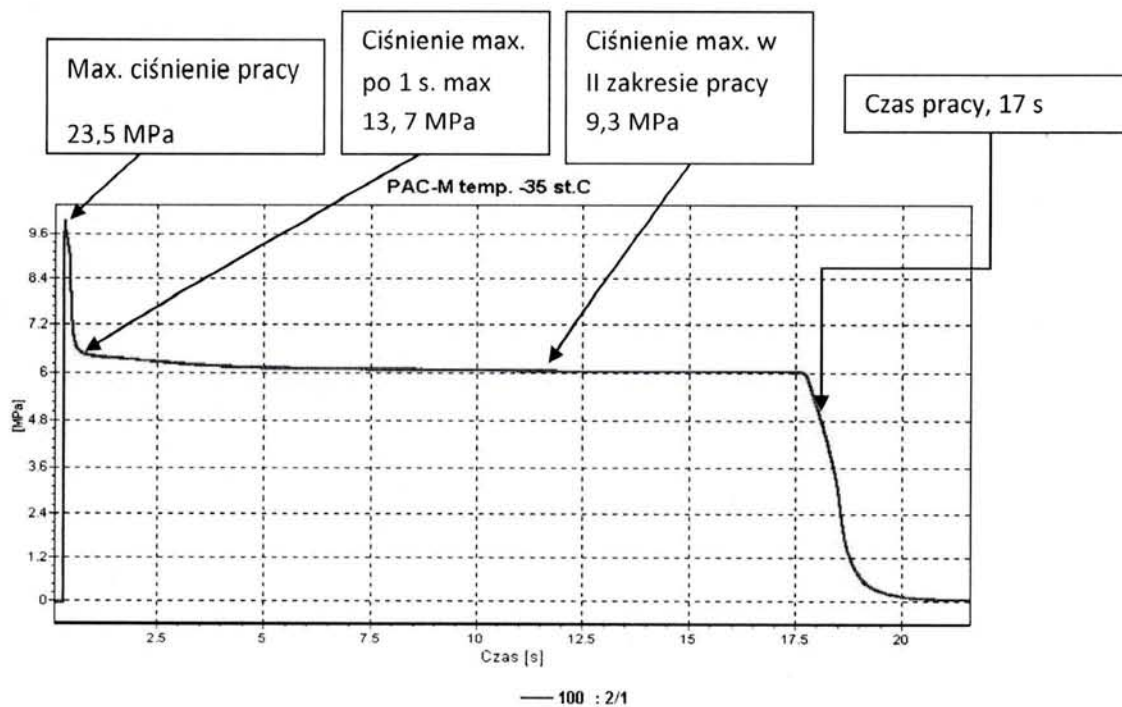
Jak można sądzić w oparciu o rys. 16-18, warunki przepływu w gazogeneratorze ustalają się bardzo szybko. Po tym wstępnym okresie, rozkład temperatur gazu wewnątrz komory zmienia się nieznacznie. O jego charakterze decyduje głównie wymiana ciepła ze ściankami, co do których założono w obliczeniach, że mają stałą temperaturę. W rzeczywistości wraz z nagrzewaniem ścianek komory temperatura gazu może wzrastać. Rozkład gęstości w komorze gazogeneratora ma charakter odwrotny do rozkładu temperatury, gęstość gazów jest najniższa przy powierzchni palenia i rośnie ze wzrostem odległości od niej. W dalszej części gęstość staje się prawie niezależna od odległości od powierzchni palenia, natomiast zauważalnie rośnie z upływem czasu. Ciśnienie w komorze gazogeneratora ma rozkład prawie zbliżony do jednorodnego i powoli rośnie z biegiem czasu. W przewężeniu za komorą następuje spadek ciśnienia, szybko malejący z biegiem czasu, tak że przepływ przez to przewężenie bardzo wczesnie staje się poddźwiękowym. Dalej, w kanale, ciśnienie jest znowu prawie jednorodne i rośnie z upływem czasu. Powyższe obserwacje sugerują, że po wstępnym okresie ustalania się warunków przepływu, procesy w gazogeneratorze przybierają charakter quasi-stacjonarny. Wpływ zjawisk niestacjonarnych można zatem pominąć; o działaniu urządzenia decyduje szybkość spalania, oraz prawidłowy dobór wymiarów przewężeń. Do obliczeń w tej fazie można korzystać z prostego modelu komór połączonych przewężeniami.

### 3.1. SYTUACJE AWARYJNE

Zrealizowanie kontraktu związanego z produkcją gazogeneratorów zobligowane jest przeprowadzeniem badań zdawczo-odbiorczych. W tabeli 3 zamieściłem wymagania badań odbiorczych gazogeneratora prochowego PAC-M. Balistyczne badania stacjonarne odbywają się w bojowej komorze G 1.1.2.3.030, wraz z filtrem G 1.1.2.3.040 i zapłonikiem G 1.1.2.3.100.

*Tabela 3. Wymagania odbiorcze dla gazogeneratora PAC i PAC-M*

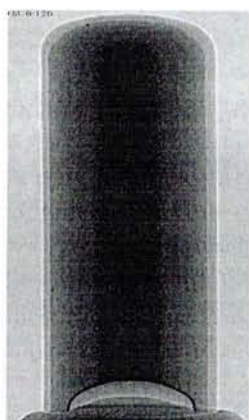
<b>Wymagania dla temperatury +50 °C</b>	
Maksymalne ciśnienie pracy, MPa	23,5
Czas pracy, nie mniej niż, s	11 (dla PAC), 14 (dla PAC-M)
Ciśnienie maksymalne w II zakresie, MPa	9,3
Ciśnienie po 1 s., nie więcej niż, MPa	13,7
Impuls po 0,3 s. nie większy niż, MPa	5,88
<b>Wymagania dla temperatury – 35°C</b>	
Czas pracy, nie mniej niż, s	14 (dla PAC), 17 (dla PAC-M)
Ciśnienie w II zakresie, nie mniej niż, MPa	5,88
Impuls po 0,33 s. nie mniej niż, MPa	2,6



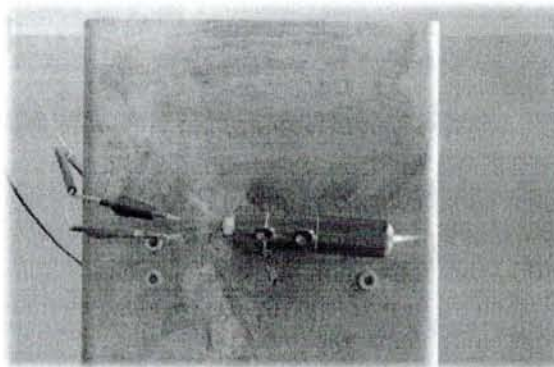
Rys. 19. Graficzna reprezentacja wymagań odbiorczych ładunków PAC i PAC-M

Każdy ładunek gazogeneratora zostaje poddany badaniom defektoskopowym, które mają za zadanie wykrycie nieprzylegania inhibitora, zbyt dużej ilości pęcherzy powietrza w inhibitorze, czy niewystarczającej jego grubości (rys. 20). Badania te, prowadzone są celem wyeliminowania niekontrolowanego procesu spalania, co w konsekwencji mogłoby prowadzić do uszkodzenia całego systemu raketowego. Badania zdawczo-odbiorcze prowadzone są w Pracowni IPO w Pionkach, na stanowisku przedstawionym na rys. 21. Pomimo pozytywnych wyników badań RTG, zdarzały się przypadki rozerwania komory podczas badań. Przykładowy fragment ładunku PAC po rozerwaniu komory przedstawiłem na rys. 22.

W związku z zaistniałą sytuacją przeanalizowałem wpływ czynników zewnętrznych, które mogły doprowadzić do sytuacji awaryjnych (rys. 23) [14].



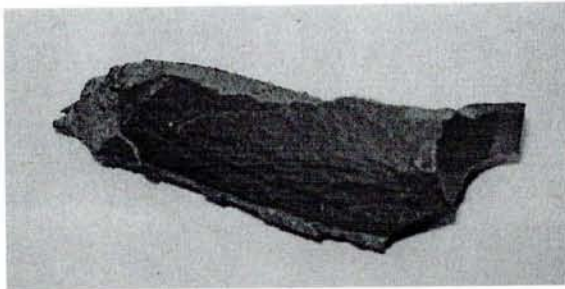
Rys. 20. Zdjęcie RTG ładunku PAC



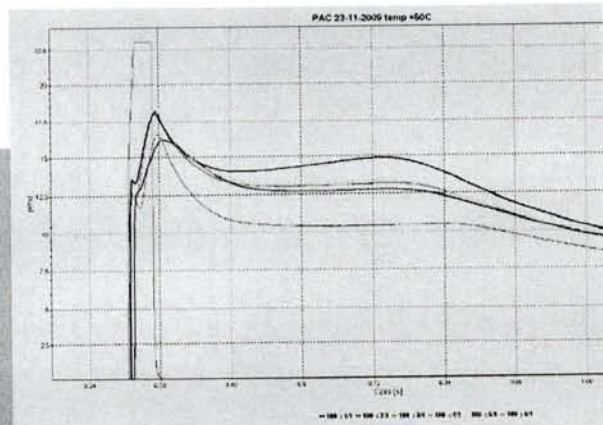
Rys. 21. Badania stacjonarne ładunku PAC

Przeprowadziłem badania numeryczne wpływu zmiany granulacji prochu czarnego na zapłon, oraz wpływ defektów strukturalnych na dynamikę spalania ładunku PAC.

*Abh*



Rys. 22. Zdjęcie fragmentu ładunku PAC po rozerwaniu komory



Rys. 23. Zarejestrowana zmiana ciśnienia podczas rozerwania komory (ułamki sekund od zapłonu)

Działanie gazogeneratora podzieliłem na dwa etapy. Etap pierwszy trwał ok. 1 ms. i jest to etap szybkich zmian parametrów, dający się modelować metodą bezpośredniej symulacji Monte Carlo. Następujący później etap zmian względnie powolnych został opisywany metodami klasycznej dynamiki gazów. Ponieważ, jak zostało stwierdzone, niebezpieczny wzrost ciśnienia następował nie wcześniej niż po kilkunastu milisekundach pracy gazogeneratora, do jego opisu zastosowałem klasyczną dynamikę gazów. Dla opisu pracy gazogeneratora przyjąłem, że na ciśnienie wewnątrz komory ma wpływ dopływ gazu w wyniku spalania paliwa, wypływ przez dyszę do turbiny, zmiana temperatury gazu w komorze, oraz zmiana objętości komory związana z ubytkiem spalanego paliwa. Założyłem, że wydatek gazu dostarczanego do komory gazogeneratora zależy od prędkości spalania i wielkości powierzchni spalania. Ubytek paliwa zachodził ze znaną prędkością w kierunku prostopadłym do powierzchni spalania, co przy zadanym początkowym kształcie tej powierzchni decydowało o późniejszych zmianach jej kształtu i wielkości. Wypływ gazu przez dyszę można było opisać równaniami klasycznej dynamiki gazów. Jak wynika z wykonanych obliczeń Monte Carlo [12], po okresie „rozruchowym”, trwającym ok. 1 ms, wypływ ten był naddźwiękowy, a zatem wydatek gazu wypływającego był całkowicie określony przez parametry przed dyszą, oraz wielkość minimalnego przekroju dyszy.

Przy powyższych założeniach przebieg zmian ciśnienia w komorze gazogeneratora opisuje równanie:

$$\frac{dp}{dt} = C_{in} * S(t) * \frac{R * T(t)}{V(t)} - C_{out} * \frac{p * \sqrt{R * T(t)}}{V(t)} + \left( \frac{T'(t)}{T(t)} - \frac{V'(t)}{V(t)} \right) * p \quad (1)$$

w którym:  $p$  oznacza ciśnienie,  $t$  czas,  $C_{in} = \rho u_1$  wydatek masowy gazu z jednostki powierzchni spalania,  $u_1$  – szybkość palenia paliwa,  $\rho$  - gęstość paliwa,  $S(t)$  pole powierzchni spalania,  $R$  indywidualną stałą gazową produktów spalania,  $T(t)$  ich temperaturę (założono, że jednorodną w całej komorze),  $V(t)$  objętość komory,  $T'(t)$  i  $V'(t)$  pochodne temperatury i objętości komory po czasie (dla uproszczenia przyjęto, że pochodna temperatury jest stała w czasie). Stała  $C_{out}$  występująca w równaniu (1) ma postać:

$$C_{out} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} * \sqrt{\gamma} * \frac{\pi}{4} * d^2$$

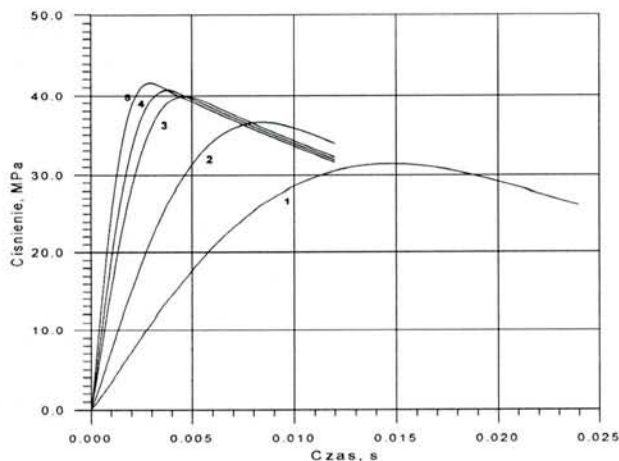
gdzie:  $d$  - średnica krytyczna dyszy,  $\gamma$  - wykładnik adiabaty produktów spalania

Równanie (1) rozwiązałem numerycznie dla przypadku spalania prochu czarnego w początkowym okresie pracy gazogeneratora, oraz dla późniejszego spalania paliwa.

Proch czarny stosowany w zapłonnikach miał postać ziaren o kształcie zbliżonym do kuli, o różnym rozdrobieniu (rys. 3). Przy zadanej masie powierzchnia spalania była tym większa im drobniejsze były ziarna. Prędkość spalania prochu zależy od ciśnienia, co opisuje wzór empiryczny [14]

$$u_1 = 1,72(p/p_0)^{0,164 \pm 0,017}$$

w którym: prędkość  $u_1$  - wyrażona jest w cm/s, a  $p_0$  jest ciśnieniem odniesienia (1 atm.). Ponieważ masa prochu w zapłonniku (rys. 3), była niewielka (0,77 g) w stosunku do masy paliwa (77 g), a czas spalania krótki, można było zaniedbać zmianę objętości komory w tym czasie, jak również zmianę temperatury w wyniku chłodzenia.



Rys. 24. Zmiany ciśnienia w komorze gazogeneratora wywołane spalaniem prochu czarnego w zapłonniku, dla różnych średnic  $d$  ziaren prochu 1 – 2 mm; 2 – 1 mm; 3 – 0,5 mm; 4 – 0,4 mm; 5 – 0,3 mm

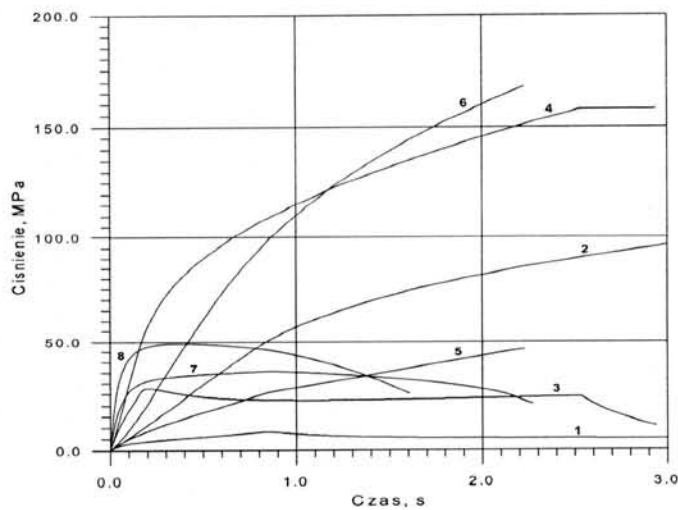
Na podstawie wyników obliczeń dla spalania zapłonników z prochem czarnym, (rys. 24), widoczne jest, że rozdrobienie ziaren prochowych może powodować wzrost ciśnienia w komorze gazogeneratora powyżej 40 MPa, co stanowi zagrożenie dla całości pracy urządzenia, będącego jednolicie pracującym zespołem zapłonnik – gazogenerator prochowy.

Obliczenia zmian ciśnienia przy spalaniu paliwa, przeprowadziłem dla kilku najbardziej prawdopodobnych sytuacji, mogących doprowadzić do awaryjnego spalania. Rozpatrzyłem cztery możliwe sytuacje obejmujące:

- i - pięciokrotne zwiększenie prędkości spalania (założenie skrajne, mające tylko znacznie teoretyczne),
- ii - spalania paliwa z jednym i z dwoma pęknięciami,
- iii - z otworkiem („włosowiną”) biegnącym przez całą długość ładunku,
- iiii - spalania przy zaczipowanej dyszy wylotowej.

W przypadku pęknięć paliwa, jak też istnienia „włosowiny”, przyjąłem, że cała powierzchnia pęknięcia i włosowiny zapalała się natychmiast, równocześnie z powierzchnią zagłębienia. W rzeczywistości płomień rozchodził się z prędkością bliską prędkości dźwięku w gorących gazach (ok. 1000 m/s) i czas jego przejścia wzdłuż kształtki paliwa nie

przekraczał 100  $\mu$ s. Wyniki obliczeń zmian ciśnienia przy spalaniu paliwa przedstawiłem na rys. 25.



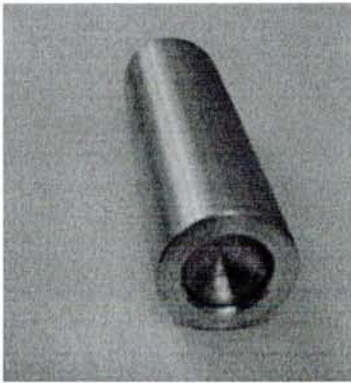
- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1 – spalanie standardowe,                                      | 2 – jak 1, zamknięty wylot |
| 3 – spalanie 5x szybsze od normalnego,                         | 4 – jak 3, zamknięty wylot |
| 5 – „włosowina” $\varnothing$ 0,5 mm,                          | 6 – jak 5, zamknięty wylot |
| 7 – jedno pęknięcie przechodzące przez oś,                     |                            |
| 8 – dwa pęknięcia prostopadłe do siebie, przechodzące przez oś |                            |

Rys. 25. Zmiany ciśnienia w komorze generatora wywołane spalaniem paliwa (pierwsze 3 s)

W celu zasymulowania wady jaką jest włosowina, wywiercono w ładunkach otwory o średnicy 1 mm i długościach 10 i 20 mm. Przeprowadzono też próbę polegającą na zaślepieniu filtra metalowym wkrętem, co odpowiadało hipotetycznej sytuacji, w której przy montażu do wlotu filtra dostaje się ciało obce zmniejszające, lub całkowicie zaślepiające przekrój otworu wylotowego. W następnej próbie zaślepiono filtr plastikowym korkiem, używanym jako zabezpieczenie otworu wylotowego filtra podczas transportu, przechowywania oraz termostatowania zmontowanego już układu. Ostatnią próbą była próba z pękniętym ładunkiem. Pęknięcie zostało wykonane poprzez ściśnięcie ładunku w imadle ślusarskim. Pęknięcie nastąpiło wzdłuż osi podłużnej ładunku. Wykonano dwa zdeformowane ładunki, z tym że dla drugiego ładunku wykonano dwa pęknięcia. Drugie pęknięcie wykonano poprzez ściśnięcie ładunku obróconego o  $90^{\circ}$ , wzdłuż osi ładunku, względem pierwszego pęknięcia.

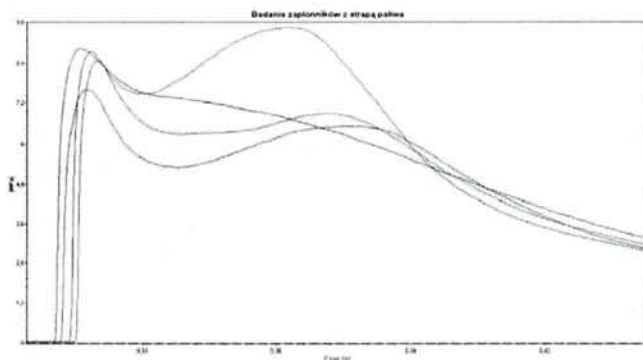
Z przedstawionych na rys. 25, wyliczonych zmianach ciśnienia wynika, że w czasie spalania paliwa przy zacopowanej dyszy wylotowej zawsze następuje wzrost ciśnienia niszczący urządzenie. Przy dyszy drożnej najgroźniejsze były przypadki podwójnego pęknięcia laski paliwa (krzywa 8) oraz włosowiny (krzywa 5). Maksymalne ciśnienie w komorze wynosiło wtedy odpowiednio 46 MPa i 49 MPa, z tym że krytyczna wartość 40 MPa w przypadku włosowiny osiągnięta została dopiero po czasie 1,8 s od momentu zapłonu. Pięciokrotne zwiększenie prędkości spalania ponad wartość nominalną (krzywa 3) powodowało wzrost ciśnienia zaledwie do 27,5 MPa. Przy pojedynczym pęknięciu (krzywa 7) ciśnienie osiągało ok. 35,5 MPa, ale dopiero po 0,8 s. Najszybsze narastanie ciśnienia miało miejsce przy spalaniu paliwa z podwójnym pęknięciem (krzywa 8). Ciśnienie 30 MPa osiągnięto po ok. 0,045 s, a 40 MPa po ok. 0,09 s.

Przeprowadziłem również badania z atrapą paliwa raketowego, dzięki czemu przy zachowaniu tego samego wypełnienia komory spalania, możliwe było przedstawienie pracy samych zapłonników (rys. 26).



Rys. 26. Zdjęcie makiety gazogeneratora

Badania przeprowadziłem z wykorzystaniem oryginalnych zapłonników, takich samych jak w gotowym wyrobie, na losowo wybranej próbie 5 sztuk. Zmiany ciśnienia zarejestrowane podczas doświadczalnych badań zapłonników przedstawiłem na rys. 27.



Rys. 27. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu podczas spalania zapłonników z atrapą paliwa dla czasu pracy zapłonników 0,15 s

Wyniki badań wskazały na niejednorodność stosowanych zapłonników. Pomijając podobne wartości impulsu ciśnienia zmieniające się w granicach  $\pm 10\%$ , istotniejsze dla charakteru zapłonu wydały się maksima pochodzące od spalania prochu czarnego ( $P_{\max I}$ ) i od spalania wzmacniacza pirotechnicznego ( $P_{\max II}$ ). Wartości  $P_{\max I}$  wahały się w granicach  $7,62 \div 8,83$  MPa, co oznaczało zmianę ciśnienia o 16%. Wartości drugiego ciśnienia maksymalnego zmieniały się w granicach  $5,2 \div 9,4$  MPa, co oznaczało zmianę ciśnienia o 82% dla tego samego czasu od chwili inicjacji palenia. Tak duża rozbieżność pracy zapłonników mogła mieć niekorzystny wpływ na procesy spalania zachodzące w komorze gazogeneratora prochowego (tabela 4).

Tabela 4. Czas opóźnienia zapłonu, ciśnienia maksymalne I i II oraz impulsy ciśnienia dla badanych zapłonników

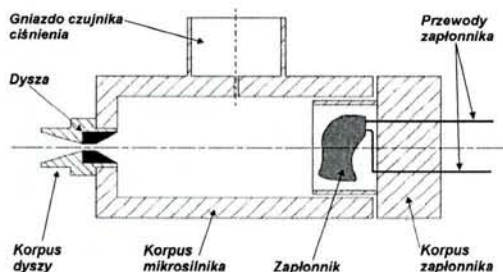
$t_{oz}$	$P_{\max I}$	$P_{\max II}$	I
0,012	7,71	5,20	0,90
0,012	7,62	6,52	0,92
0,015	8,49	6,89	0,95
0,014	8,75	9,44	1,05
0,010	8,83	brak piku	1,05

Przeprowadzone obliczenia i badania przypadku wadliwego spalania ładunku prochowego, oraz niekontrolowanego rozdrobnienia prochu czarnego wskazują że:

- Propagacja i emisja gazów wskutek wadliwego spalania się powierzchni palnej badanego paliwa (włosowiny, pęknięcia itp.) do czasu zaistniałej sytuacji awaryjnej (0,012 s) nie pozwala na osiągnięcie ciśnienia 40 MPa.
- Osiągnięcie takiego ciśnienia po upływie 0,012 s jest możliwe w przypadku rozdrobnienia ziaren prochowych do wartości  $0,3 \div 0,5$  mm

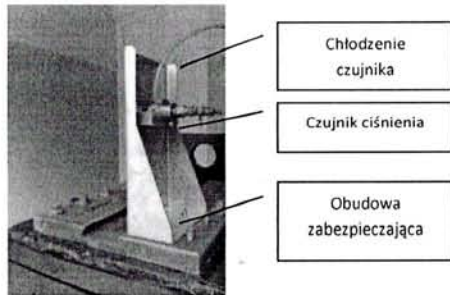
#### 4. ZMODERNIZOWANY ŁADUNEK GAZOGENERATORA - PAC-M

Nowy skład paliwa (kryptonim *Cytryn*) opracowany pod moim kierownictwem, charakteryzuje się niską wartością wykładnika  $n$  w prawie palenia (bliskiej zeru), dzięki czemu paliwo jest mało wrażliwe na zmiany ciśnienia, co jest cechą bardzo korzystną w przypadku pracy gazogeneratora [16, 17]. Nitroceluloza jest głównym składnikiem ciast prochowych wykorzystywanym przy produkcji homogenicznych stałych paliw raketowych. W przeglądowej pracy [1] wskazałem na istotny wpływ związków małowcząsteczkowych na właściwości przetwórcze, reologiczne i zanikanie struktury włóknistej nitrocelulozy (stopień żelatynizacji), po dodaniu odpowiednich modyfikatorów. Wartość liniowej szybkości spalania na poziomie 4,5 mm/s zapewnia wydłużenie pracy gazogeneratora do około 17 s w temperaturze  $-35$  °C i 14 s w temperaturze  $+50$  °C (rys. 28) (co było głównym celem prowadzonych prac). Metoda badania liniowej szybkości spalania, w zależności od ciśnienia, polega na wykonaniu czterech spalań badanej próbki paliwa, przy różnych ciśnieniach. Regulacja ciśnienia panującego w komorze mikrosilnika dokonywana jest przez zmianę średnicy dysz, które dobierane są eksperymentalnie dla danego paliwa tak aby uzyskać wartości ciśnień w wymaganym zakresie [18].



Rys. 28. Schemat mikrosilnika balistycznego [18]

W mikrosilniku przedstawionym na rys. 28 umieszczana jest dokładnie zwymiarowana próbka paliwa. Następnie wkręcany jest korpus z zapłonikiem i wyprowadzonymi na zewnątrz przewodami do linii zapłonowej. Z drugiej strony silnika umieszczany jest korpus dyszy wraz z wkładką o odpowiedniej średnicy. Tak zaelaborowany mikrosilnik montowany jest na stanowisku pomiarowym (rys. 29). Stanowisko pomiarowe wyposażone jest w czujnik ciśnienia, połączony poprzez kartę analogowo-cyfrową z komputerem oraz linią zapłonową podłączoną do generatora zapłonowego. Do pomiarów ciśnienia stosowałem czujniki tensometryczne firmy Bofors typ TDM-1 i TDS – 1 o zakresie pracy do 30 MPa.



Rys. 29. Zdjęcie stanowiska pomiarowego

Na podstawie uzyskanego wykresu odczytywany był czas palenia paliwa i ciśnienie w czasie spalania. Szybkość palenia w danym ciśnieniu obliczana jest na podstawie poniższego równania

$$u = \frac{2e_1}{2t}$$

gdzie:  $2e_1$  – grubość próbki paliwa,  $t$  – czas palenia paliwa

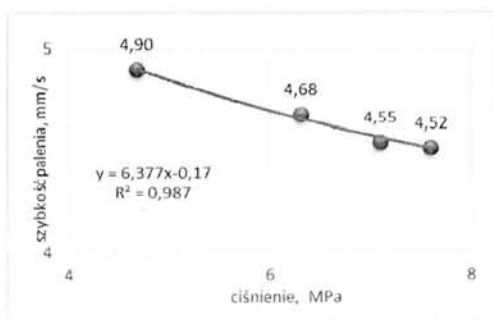
średnie ciśnienie spalania próbki

$$P_{sr} = \frac{1}{t_k - t_p} \int_{t_p}^{t_k} p(t) dt$$

Po wykonaniu czterech spalań dla badanego paliwa przy różnych ciśnieniach i określeniu powyższych parametrów konstruuje się wykres szybkości palenia w funkcji ciśnienia (rys. 30). Zależność liniowej szybkości spalania od ciśnienia przy założeniu spalania bezerozyjnego oraz dla normalnej temperatury początkowej ładunku paliwa raketowego, wyrażona jest za pomocą wzoru Vieille'a

$$u = A_p \cdot p^n$$

gdzie:  $u$  - liniowa szybkość spalania,  $A_p$  – współczynnik zależny od właściwości paliwa,  $p$  – ciśnienie w komorze spalania,  $n$  – potęgowy wykładnik ciśnienia zależny od rodzaju paliwa.



Rys. 30. Liniowa szybkość spalania płytów prochowych dla gazogeneratora PAC-M



Przeprowadziłem serię badań dla dwóch wytypowanych ciast surowych P1 i P2 (tabela 5), do których dodawałem różne ilości katalizatorów.

**Tabela 5.** Składy chemiczne ciast „surowych”

Nazwa ciasta	P1	P2
Nitroceluloza (o zawartości azotu 12,31%), %	54,50	59,00
Nitrogliceryna, %	33,30	32,80
Dinitrotoluen, %	8,00	5,80
Centralit I, %	4,20	2,40
Kaloryczność, kJ/kg	4111,91	4411,95
Zawartość wilgoci, %	25,50	27,50

W badaniach wstępnych przeprowadziłem 10 prób. Do każdego ciasta P1 i P2 dodawałem zmienne ilości dwóch katalizatorów (POM i StCu) – tabela 6 i 7. Wykonano również walcowanie prób zerowych, w skład których wchodziły tylko składniki podstawowe wymienione w tabeli 5, bez dodatków katalizatorów. Wyniki pomiaru liniowej szybkości spalania przedstawiłem w tabeli 8.

**Tabela 6.** Składy chemiczne prób z ciasta P1 z dodatkami katalizatorów

Nr próby	P 1/0	P 1/1	P 1/2	P 1/3	P 1/4
Masa ciasta prochowego, kg	10	10	10	10	10
Masa ciasta „na sucho”, kg	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45
POM, kg	0	0,56	0,64	0,72	0,8
StCu, kg	0	0,08	0,08	0,08	0,08

**Tabela 7. Składy chemiczne prób z ciasta P2 z dodatkami katalizatorów**

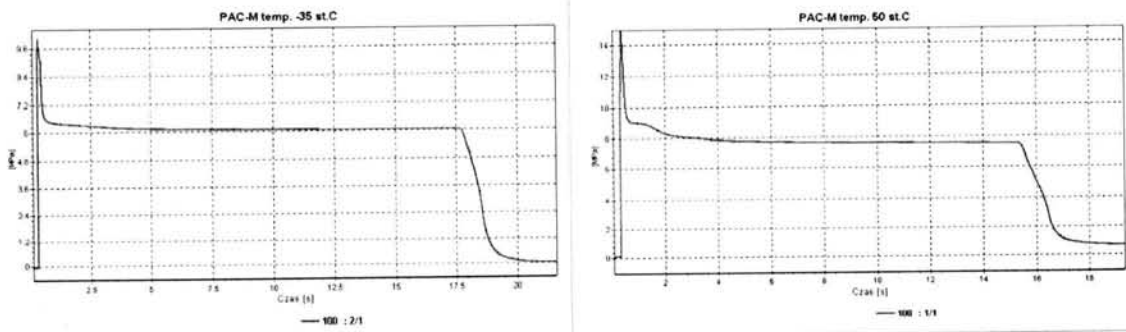
Nr próby	P 2/0	P 2/1	P 2/2	P 2/3	P 2/4
Masa ciasta prochowego, kg	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
Masa ciast „na sucho”, kg	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
POM, kg	0	0,6	0,66	0,74	0,82
StCu, kg	0	0,08	0,08	0,08	0,08

**Tabela 8. Wyniki liniowej szybkości palenia dla prób 1/5, 1/6, 2/5 i 2/6**

Próba	Równanie liniowej szybkości palenia	Szybkość spalania dla 7,9 MPa, mm/s
1/5	$u=3,7737p^{0,1232}$	4,87
1/6	$u=4,9513p^{-0,048}$	4,49
2/5	$u=5,6337p^{-0,092}$	4,66
2/6	$u=3,9906p^{0,083}$	4,74

Poza parametrami związanymi z odpowiednio dobranym składem paliwa, istotna jest również optymalizacja geometrii czaszy i średnicy ładunku. W pracy [19] omówiłem wpływ geometrii ładunku, a w szczególności średnicy wgłębienia czaszy i jej głębokości, oraz dobór średnicy ładunku na uzyskane czasy pracy, ciśnienia maksymalne i inne parametry wyszczególnione jako parametry odbiorcze (tab. 3).

Na rys. 31 przedstawiłem wybrane dwa spalania zmodyfikowanego gazogeneratora PAC-M termostatowane przed badaniem odpowiednio w temperaturach  $-35^{\circ}\text{C}$  i  $+50^{\circ}\text{C}$ . Charakter zmian ciśnienia w funkcji czasu jest zgodny z wymaganiami zamawiającego (Mesko S.A), a w tabeli 9 przedstawiłem wyznaczone doświadczalnie parametry odbiorcze i geometrię ładunku (wymiar B i C) [19].



Rys. 31. Zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla spalań gazogeneratora PAC-M w temp. +50 °C i -35 °C

Tabela 9. Wyniki stacjonarnych badań balistycznych ładunku PAC-M

Lp.	temp., °C	B, mm	C, mm	t <sub>op</sub> , s (max 0,05)	P w 1 s, MPa (max 13,7)	Impuls 0,33 s, MPa*s (min 2,6)	Impuls 0,3 s, MPa*s (max 5,88)	P pracy, MPa (min 5,88)	P pracy, MPa (max 9,3)	P <sub>max</sub> , MPa (max 23,5)	Czas pracy, s (min 15 i 17 s)
1	-35	5	16	0,024		2,59		6,5			18,05
2	-35	5	16	0,019		2,65		6,1			17,80
3	-35	6	17	0,014		3,1		6,6			17,66
4	+50	6	17	0,01	7,9		3,45		7,56	14,92	15,76
5	+50	6	17	0,023	8,68		3,47		7,50	12,53	15,87
6	+50	6	17	0,007	8,49		3,38		7,08	13,39	15,43

W ramach prac nad otrzymaniem nowego inhibitora do zmodyfikowanego homogenicznego paliwa dla gazogeneratora PAC-M opracowano skład masy ekranującej spełniającej poniższe warunki:

- Podwyższona wytrzymałość termiczna (pozytywny wynik badań w temperaturze +70 °C),
- Możliwość inhibitowania kształtek paliwa metodą zalewania pod próżnią do formy z umieszczonym w niej ziarnem wykonanym z homogenicznego paliwa raketowego
- Możliwie wysoka homogeniczność masy ekranującej,
- Nieprzezroczystość masy ekranującej,
- Technologiczny czas życia masy ekranującej na poziomie 30 min.

Tabela 10. Skład dotychczasowej masy ekranującej

Surowce	Zawartość, %
Tarnoform	35
Kopolimer metakrylanu metylu i n-butylu	32
Metakrylan metylu	24
Metakrylan butylu	8
Nadtlenek benzoilu	0,2
Tlenek chromu	0,8

W celu osiągnięcia powyższego założenia badania podzielono na następujące etapy:

- Modyfikacja dotychczasowego inhibitora z wykorzystaniem żywic poliestrowych,
- Wykonanie masy ekranującej w układzie żywica poliestrowa (metakrylan n-butylu) granulatu polistyrenowy (PS)
- Wykonanie masy ekranującej w układzie żywica poliestrowa - wypełniacz nieorganiczny

Zaprojektowano aparaturę umożliwiającą inhibitowanie gazogeneratorów za pomocą ciekłych składników w skali półtechnicznej (rys. 32). Szczegółowe omówienie procesu (niejawne) zostało przekazane w formie sprawozdania do Mesko S.A [20, 21].



Rys. 32. Wizualizacja komory do inhibitowania ładunków PAC-M

## 5. LITERATURA

---

1. Wolszakiewicz T., Właściwości fizykochemiczne nitrocelulozy do zastosowań specjalnych, *Przemysł Chemiczny*, **2012**, 91(7), 1427-1434.
2. Zalewski R., Wolszakiewicz T., Analysis of Uniaxial Tensile Tests for Homogeneous Solid Propellants under Various Loading Conditions, *Central European Journal of Energetic Materials*, **2011**, Vol.8, No8, 223-231.
3. Zalewski R., Wolszakiewicz T., Badania podstawowych właściwości mechanicznych homogenicznych stałych paliw rakietowych, *Przemysł Chemiczny*, **2012**, 91(9), 1825-1829.
4. Zalewski R., Wolszakiewicz T., Bajkowski J., Wpływ temperatury na podstawowe właściwości mechaniczne homogenicznych stałych paliw rakietowych, *Przemysł Chemiczny*, **2012**, 91(9), 1830-1833.
5. Wolszakiewicz T., Gawor T., Zalewski R., Analiza balistyczna homogenicznych stałych paliw rakietowych obciążonych termicznie i mechanicznie. Badania wstępne., *Przemysł Chemiczny*, **2012**, 91(9), 1854-1857.

6. Szmajda J., Kral H., Skrócony projekt procesowy otrzymywania ładunków 9Ch-154 do rakiety Strzała-2M, IPO, **1981**.
7. Szmajda J., Ładunek 9Ch-154 do prochowego akumulatora ciśnienia (PAD), IPO, **1986**.
8. Szmajda J., Niezawodna technologia inhibitowania ładunków czołowo palących się na przykładzie ładunku 9Ch-154, IPO, **1986**.
9. Wolszakiewicz T., Zapłon stałych paliw raketowych – wybór z prac własnych i analiza literaturowa, *Chemik*, **2016**, 1, 27-32.
10. Wolszakiewicz T., Specyfika zapłonu stałego paliwa raketowego w gazogeneratorze z wykorzystaniem tabletek pirogeniczných, *Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, **2013**, 4, 2(12), 29-40.
11. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A., Measurement of Energy Emitted by Pyrogenic Tablets Used for Ignition of Solid Rocket Propellants, *Central European Journal of Energetic Materials*, **2015**, 12(2), 359-375.
12. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A., Gazogenerator prochowy. Obliczenia i eksperyment, *Przemysł Chemiczny*, **2007**, 86(6), 519-523.
13. J.C. Maxwell, The scientific paper of James Clerk Maxwell (red. W.D. Niven) New York **1952**, 2, 706.
14. Wolszakiewicz T., Walenta Z.A., Analiza sytuacji awaryjnych podczas pracy gazogeneratora prochowego, *Przemysł Chemiczny*, **2014**, 93(6), 868-872.
15. Papliński A., Surma Z., Dębski A., Teoretyczna i eksperymentalna analiza parametrów balistycznych prochu czarnego, *Materiały Wysokoenergetyczne*, **2009**, tom 1, 89.
16. Wolszakiewicz T., Florczak B., *Opracowanie składu paliwa dla gazogeneratora*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Perspektywy rozwoju krajowej produkcji napędów raketowych oraz amunicji strzeleckiej i artyleryjskiej” Kołobrzeg 21—23 maja 2015.
17. Wolszakiewicz T., Gawor T., Florczak B., Myśliwiec R., Stałe paliwo raketowe, P. 410717, **2015** (decyzja o przyznaniu patentu z dnia 13.04.2018).
18. 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. Monografia.
19. Gawor T., Wolszakiewicz T., Wpływ geometrii ładunku gazogeneratora na jego właściwości balistyczne, *Materiały Wysokoenergetyczne*, **2012**, tom 4, 60-65.

20. *Zoptymalizowanie technologii inhibitowania - sprawozdanie*, kierownik tematu Tomasz Wolszakiewicz, Zleceniodawca-Mesko S.A., zgodnie z umową UBK/BW/2016/087.

21. *Badania fizykochemiczne i balistyczne ładunku PAC-M - sprawozdanie*, kierownik tematu Tomasz Wolszakiewicz, Zleceniodawca-Mesko S.A., zgodnie z umową UBK/BW/2016/087.

## PODSUMOWANIE

---

Uważam, że do moich najważniejszych osiągnięć naukowych w okresie po doktoracie należy zaliczyć:

- Skonstruowanie prototypowej aparatury do wyznaczania dynamicznych zmian strumienia energii dostarczanej podczas zapłonu paliw raketowych. Przeprowadzenie oryginalnych badań pozwalających na wyznaczenie energii emitowanej przez zapłonowe tabletki pirogeniczne.
- Wdrożenie do produkcji nowego składu paliwa homogenicznego umożliwiające wydłużenie czasu pracy gazogeneratora o 3s, przy zachowaniu dotychczasowej geometrii i masy ładunku. Wdrożenie zostało zastosowane w systemie przeciwlotniczym *PIORUN*.

### 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

#### 5.1 Zainteresowania naukowe

Po ukończeniu technikum energetycznego o specjalizacji energetyka cieplna w Radomiu, rozpocząłem studia na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej. W roku 1992 obroniłem pracę magisterską, *Analiza metod wydzielenia jednorodnych frakcji aerozoli cząstek niekulistych o różnych smukłościach*, opiekunem pracy był prof. dr hab. inż. Leon Gradoń. Jesienią 1992 roku rozpocząłem pracę jako technolog wydziału trójpolifosforanu sodu w Zakładach Chemicznych w Alwerni.

Od października 1993 roku do chwili obecnej pracuję w Instytucie Przemysłu Chemicznego w Warszawie, w pracowni zamiejscowej w Pionkach. W pierwszych latach pracy, moje zainteresowania dotyczyły głównie prochów dwubazowych do broni małokalibrowej. Prowadzone z moim udziałem badania dotyczyły procesu flegmatyzacji prochów, a w szczególności prochów kulkowych. W roku 1994, rok po rozpoczęciu pracy w IPO, otrzymałem za zadanie wdrożenie systemu pomiarowego *ESAM (Electronic Signal Acquisition Module)*, do pomiarów i rejestracji procesów spalania materiałów wysokoenergetycznych. Do badań balistyki wewnętrznej prochu używałem bomby manometrycznej o objętości 200 cm<sup>3</sup>. Badania w bombie manometrycznej pozwalały na pomiar zmian ciśnienia w funkcji czasu, a dalsze obliczenia umożliwiły wyznaczenie takich parametrów jak, względną siłę prochu i kowolumenu.

W roku 1996 zostałem przeniesiony na stanowisko asystenta. W 1998 roku rozpocząłem badania pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Książczaka na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej. W ramach badań związanych z pracą doktorską zajmowałem się

oddziaływaniami związków małowcząsteczkowych z nitrocelulozą wykorzystując do pracy głównie kalorymetry skaningowe (DSC). Związki małowcząsteczkowe takie jak 2,4-dinitrotoluen, 2,6-dinitrotoluen, difenylamina, 2-nitrodifenylamina i 2,4,6-trinitrotoluen, mają za zadanie podnieść energetykę prochów, bądź zapewnić większą stabilność podczas wieloletniego przechowywania gotowych wyrobów lub poprawić ich właściwości reologiczne. W roku 2001 obroniłem pracę doktorską ***Własności fizykochemiczne układów dwuskładnikowych zawierających nitrocelulozę i związek małowcząsteczkowy.***

Od początku pracy w IPO uczestniczyłem w pracach projektowych dotyczących prochów wielobazowych i stałych paliw raketowych (GROM, PSS, Pelikan, PAC, prochy kulkowe). W latach 1997-2000, brałem udział, jako wykonawca, w realizacji trzyletniego projektu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych, ***Badanie i rozwój nowoczesnych materiałów wybuchowych kruszących, miotających i pirotechnicznych oraz podstaw technologii ich wykonywania.*** W latach 2003-2005 byłem współautorem prac nad wdrożeniem do produkcji krajowej NPRL – 70 z ZM „Mesko” i ZPS „Gamrat”. Współpraca z norweską firmą *NAMMO* przyniosła efekt w postaci produkcji w/w produktu i uzyskaniem patentu nr 207094 „Stale paliwo raketowe”, który jest obecnie wykorzystywany.

Od ponad dekady jestem głównym wykonawcą i prowadzę nadzór z ramienia IPO nad produkcją gazogeneratora prochowego dla Mesko S.A. Wieloletnie badania w których brałem czynny udział, przyniosły oczekiwane wyniki w postaci powtarzalnego procesu. Gazogenerator prochowy jest istotnym elementem opartym na składzie paliwa homogenicznego, wchodzącym w skład przeciwlotniczej rakiety GROM. Powtarzalność parametrów balistycznych jest warunkiem koniecznym zapewnienia odpowiednich przepływów gazów, uruchamiających pokładowy generator prądu zasilający cały system raketowy. W 2014 zostałem odpowiedzialny za zaprojektowanie nowego paliwa, które pozwoliłoby na wydłużenie czasu pracy o 3 s, bez zmiany dotychczasowej geometrii gazogeneratora prochowego. Wynikiem 2 letnich badań jest patent (P.410717), na podstawie którego w 2017 roku uzyskano wdrożenie do produkcji seryjnej zestawu przeciwlotniczego *PIORUN*.

Wieloletnia współpraca z dr hab. inż. Zbigniewem Walentą pozwoliła mi na opanowanie zaawansowanych metod obliczeniowych, a w szczególności Bezpośrednią Metodę symulacji Monte Carlo. Zastosowane przeze mnie metody obliczeniowe pozwoliły na szczegółową analizę numeryczną pierwszych sekund pracy gazogeneratora prochowego, analizę sytuacji awaryjnych tego systemu i zaprojektowanie aparatury do wyznaczania energii emitowanej przez tabletki pirogeniczne (***Grant: 0041/B/T00/2008/34***).

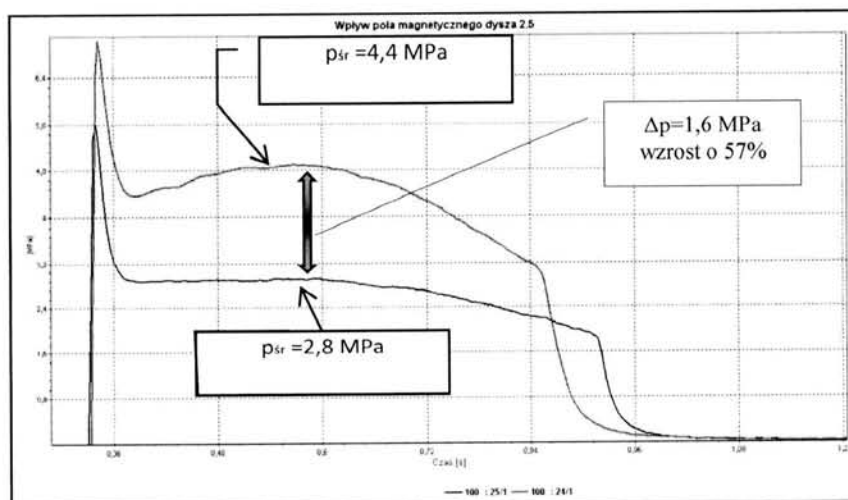
Od roku 2007 rozpocząłem współpracę z dr hab. inż. Robertem Zalewskim, z Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Nasze wspólne badania i wzajemne uzupełnianie różnych dziedzin wiedzy doprowadziły do uzyskania wsparcia finansowego na realizację badań związanych ze zmianami parametrów wytrzymałościowych stałych paliw raketowych (***projekt: N501 113136***). Owocem naszej wspólnej współpracy poza licznymi publikacjami jest monografia (Bajkowski J, Szlitkus P,



Wolszakiewicz T, Zalewski R, *Modelowanie i badania nieliniowych właściwości stałych paliw raketowych*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii i Eksploatacji - PIB, Warszawa-Radom, ISBN 978-83-7789-090-5 (235 stron).

Kolejnym polem badawczym są badania starzeniowe stałych paliw raketowych i opracowanie metod pozwalających na określenie resursy na kolejne lata użytkowania materiałów miotających. Pod moim kierownictwem prowadzone są badania w bombie manometrycznej, w balistycznych silnikach i na maszynie wytrzymałościowej *INSTRON*, do oceny zmian parametrów balistycznych.

Kolejna dziedzina moich zainteresowań dotyczy wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na proces spalania stałych paliw raketowych zawierających dodatek ferromagnetyczny (patent 224985). Zbudowałem stanowisko pomiarowe zawierające stały magnes neodymowy zintegrowany z komorą badań balistycznych, wraz z oprzyrządowaniem do ciągłej rejestracji zmian ciśnienia podczas procesu spalania. Przeprowadziłem badania balistyczne paliwa heterogenicznego z dodatkiem cieczy magnetoreologicznej firmy *LORD*. Paliwo heterogeniczne wykonane było metodą odlewania w układzie próżniowym i termostатовane w temp. 60 °C przez 4 doby. Skład paliwa był następujący: BKN + E5 + ADO – 18%, Pył aluminiowy – 8%,  $NH_4ClO_4$  – 74%, 3, 5 lub 10 części wagowych cieczy magnetoreologicznej powyżej 100% składu. *BKN* – kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy (carboxylated nitrile rubber), *E5* – żywica epoksydowa, *ADO* – *dioctyl adipate*,  $NH_4ClO_4$  – *ammonium perchlorate*. Przeprowadziłem badania spalania ładunków, bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego, a następnie zachowując te same warunki przeprowadziłem pomiary z udziałem zewnętrznego pola magnetycznego. Na rys. 33 zaprezentowałem zmiany ciśnienia w funkcji czasu dla przeprowadzonych eksperymentów spalania kształtek paliwa złożonego z dodatkiem związku ferromagnetycznego.

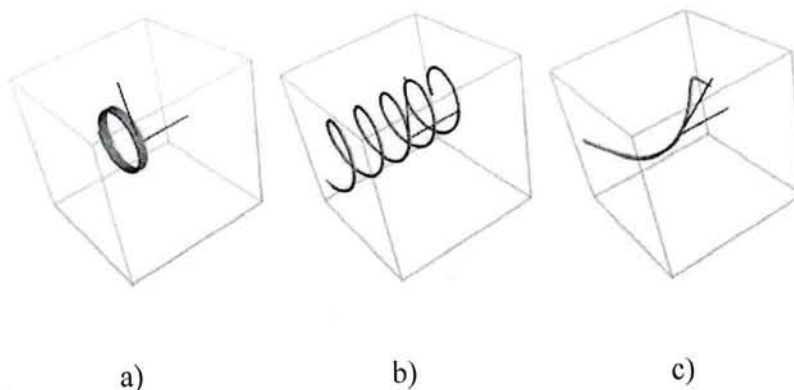


Rys. 33. Zmiany ciśnienia w komorze spalania. Linia czarna – bez oddziaływania pola magnetycznego, linia czerwona – z udziałem pola magnetycznego. Dodatek ferromagnetyczny – 10%.

Widoczny jest istotny wpływ pola magnetycznego na charakter zarejestrowanych krzywych. Otrzymane wyniki mogą być wytłumaczone w następujący sposób; w



początkowym etapie spalania molekuly uwalniają się z powierzchni paliwa przechodząc z fazy stałej do gazowej i poruszają się w kierunku spadku ciśnienia – w kierunku dyszy, rys. 34a.



Rys. 34. Etapy ruchu molekuł, a) – ruch postępowy, b) – efekt dryfowania, c) – przewidywany wzrost ciśnienia

W momencie kiedy trajektoria ruchu molekuły napotka prostopadle oddziaływanie linii pola magnetycznego dochodzi do tzw. efektu dryfowania molekuł. Molekuly zaczynają swój ruch po liniach spiralnych rys 34b, co wpływa na spowolnieniu ich ruchu postępowego, co w efekcie prowadzi do lokalnego wzrostu ciśnienia rys 34c. Taki efekt zaobserwowano w przeprowadzonych badaniach.

## 5.2 Osiągnięcia dydaktyczne

W latach 2001 – 2002 prowadziłem wykłady z katalizy chemicznej i zajęcia laboratoryjne z fizyki chemicznej, na Wydziale Materiałoznawstwa i Technologii Obuwia Politechniki Radomskiej.

## 5.3 Współpraca z jednostkami naukowymi i przemysłowymi

### 5.3.1 Współpraca z instytucjami zagranicznymi:

Udział w opracowaniu technologii produkcji ładunku do NLPR-70 (Niekierowanego Lotniczego Pocisku Rakietowego – 70 mm) i udział we wdrożeniu w kooperacji z ZM. „MESKO” i NAMMO (Norwegia), 2000 – 2006.

### 5.3.2 Współpraca z instytucjami krajowymi

- ZPS „Gamrat” w Jaśle: badania związane z wdrażaniem nowych materiałów miotających, nadzór nad produkcją ciast prochowych, badania zapłonu.
- Mesko S.A., jestem głównym koordynatorem prac związanych z badaniami i produkcją gazogeneratora prochowego.
- Mesko S.A oddział Pionki: nadzór nad produkcją ciast prochowych, badania pirostatyczne i balistyczne.
- Instytut Technologii Eksploatacji – Radom. Efektem współpracy był wspólnie realizowany Projekt Wieloletni (*PW-004/ITE/02/2006*), dotyczący budowy aparatury do monitorowania zmian strukturalnych podczas badań wytrzymałościowych w stałych paliwach raketowych.

- Politechnika Warszawska – Wydział SiMR, wspólny projekt badawczy: *Modelowanie badania nieliniowych właściwości mechanicznych stałych paliw raketowych w aspekcie ich parametrów użytkowych i balistycznych.*

## 5.4 Pozostałe osiągnięcia

### 5.4.1 Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach

#### a) kierownictwo w projektach badawczych

1. Projekt: 0041/B/T00/2008/34, *Opracowanie metody otrzymywania pirogenicznych tabletek zapłonowych do paliw raketowych* – kierownik projektu (zakończony w czerwcu 2011).

#### b) wykonawstwo projektów badawczych

1. Projekt Badawczo – Rozwojowy: 019-12, *Badanie i rozwój nowoczesnych materiałów wybuchowych kruszących, miotających i pirotechnicznych oraz podstaw technologii ich wykonywania*, 2000.
2. Projekt: T09B 026 14, *Termochemia i zmiany strukturalne układów dwuskładnikowych polimer + związek małowcząsteczkowy*, 2000.
3. Projekt: 3-T09B02127, *Opracowanie technologii otrzymywania wysokoenergetycznych układów heterogenicznych zawierających dodatki o zmniejszonej wrażliwości na bodźce zewnętrzne.*
4. Projekt: MC-804300010, *Badania nad otrzymywaniem heterogenicznych paliw raketowych modyfikowanych cyklopentadienylowymi i arenowymi związkami metali przejściowych.*
5. Projekt Badawczo-Rozwojowy: 001/R/T00/2006/01, *Technologia formowania elementów napędowych metodą wytłaczania.*
6. Program Wieloletni PW-004/ITE/02/2006, *Aparatura badawczo-testowa do wykrywania i śledzenia procesów pękania w materiałach wysokoenergetycznych*, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu, Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie, **główny wykonawca** z ramienia IPO.
7. Projekt: N501113136, *Modelowanie badania nieliniowych właściwości mechanicznych stałych paliw raketowych w aspekcie ich parametrów użytkowych i balistycznych* – wykonawca i inspirator podjętych badań.

### 5.4.2 Autorstwo lub współautorstwo odpowiednio dla danego obszaru: opracowań zbiorowych, dokumentacji prac badawczych

załącznik 8

### 5.4.3 krajowe nagrody za działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną;

1. Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej I stopnia zespołowa - " Za cykl prac wnoszących istotny wkład do rozwoju badań nad nieklasycznymi materiałami - materiałami wysokoenergetycznymi", 1 październik 2013.

2. Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej I stopnia zespołowa - "Za udział w pracach zespołu z Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w roku 2012", 1 październik 2013.

5.4.4 udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism

- komitet redakcyjny konferencji IPOEX
- członek Rady Naukowej IPO
- członek rady naukowej czasopisma Materiały Wysokoenergetyczne

5.4.6 członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach Naukowych – *nie dotyczy*

5.4.7 staże w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

Staż naukowy – Politechnika Warszawska, Wydział Chemii, Zakład Materiałów Wysokoenergetycznych, 01.10.1999 – 30.06.2000 (9 miesięcy).

5.4.8 opieka naukowa nad doktorantami – jestem promotorem pomocniczym pracy doktorskiej mgr inż. Rafała Bogusza – temat rozprawy „Badanie właściwości stałych heterogenicznych paliw raketowych o zmniejszonej zawartości chlorowodoru w produktach spalania”. (załącznik z uchwałą Rady Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej).

5.4.9 autorstwo zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego lub technologicznego – załącznik 8

5.4.10 pełnione funkcje:

Od roku 2001 pełnię funkcję kierownika Pracowni Badań i Technologii Materiałów Wybuchowych Miotających w Pionkach – zamiejscowej placówki Instytutu Przemysłu Organicznego w Warszawie.

5.4.11 inne osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki – *nie dotyczy*

5.4.12 recenzje publikacji

1. Materiały Wysokoenergetyczne – wydawnictwo IPO – 1 recenzja
2. Central European Journal of Energetic Materials – 7 recenzji

**Odnaczenia**

- Brązowy medal za zasługi w dziedzinie rozwoju i umacniania obronności Rzeczypospolitej Polskiej (2003)
- Srebrny medal za zasługi w dziedzinie rozwoju i umacniania obronności Rzeczypospolitej Polskiej (2007)



### 3. Informacje o całkowitym dorobku naukowym

G) Sumaryczny *impact factor* według listy Journal Citation Reports (JCR) zgodnie z rokiem opublikowania: **10,577**

H) Liczba cytowań według bazy Web of Science (WoS): **126 (bez autocytowań 50)**

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): **6**

Publikacje z listy JCR – 23

Otrzymane patenty - 3

Pozostałe publikacje recenzowane – 12

Monografie - 2

Wystąpienia – 76

