

Łukasz Habera

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Badania zapłonu propelantów na stacjonarnym silniku laboratoryjnym

Artykuł powstał na podstawie ukończonego projektu badawczego dotyczącego badań zapłonu paliw stałych na różnych stanowiskach laboratoryjnych oraz w warunkach poligonowych. W niniejszym artykule przedstawiono fragment prac dotyczący badań zapłonu paliw na stacjonarnym silniku laboratoryjnym. Na potrzeby testów opracowany został nowy silnik do spalania propelantów, zaprojektowano i wykonano zestawy dysz wylotowych, przygotowano próbki trzech rodzajów paliw modyfikowanych oraz przeprowadzono serię badań spalania wytypowanej grupy propelantów wraz z rejestracją profili ciśnienia.

Słowa kluczowe: propelanty modyfikowane, badania zapłonu, szczelinowanie gazowe.

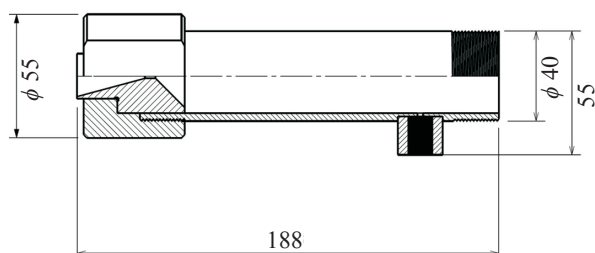
### Propellants' ignition tests on a solid rocket engine

This article is based on a completed research project regarding propellants' ignition experiments carried out on different laboratory test stands as well as at the firing ground. In the following paper the author particularly focused on propellants' ignition tests performed on a solid rocket engine. For this work a new laboratory plant was designed and executed. Nozzles of different sizes and three types of propellant samples were prepared for performing the ignition tests. The rising pressure profile of each completed experiment was recorded and presented in this work.

Key words: modified propellants, ignition tests, gas fracturing.

### Przygotowanie stanowiska badawczego

Do testów propelantów modyfikowanych zaprojektowano i wykonano silnik laboratoryjny. Jest to stacjonarne urządzenie do badania podstawowych parametrów materiałów pędnych, takich jak liniowa prędkość spalania, ciśnienie spalania czy siła ciągu [4]. Na rysunku 1 przedstawiony został projekt klasycznego silnika raketowego adaptowanego na potrzeby niniejszego projektu.



Rys. 1. Rysunek złożeniowy półwidok-półprzekrój silnika laboratoryjnego do badań zapłonu propelantów

W widocznej na rysunku 1 głowicy zagnieżdżono grafitową dyszę oraz króciec pomiarowy, do którego został wkręcony piezoelektryczny przetwornik ciśnienia przekazujący sygnał do oscyloskopu. Fragment wykonanego silnika wraz z głowicą i dyszą pokazano na rysunku 2.



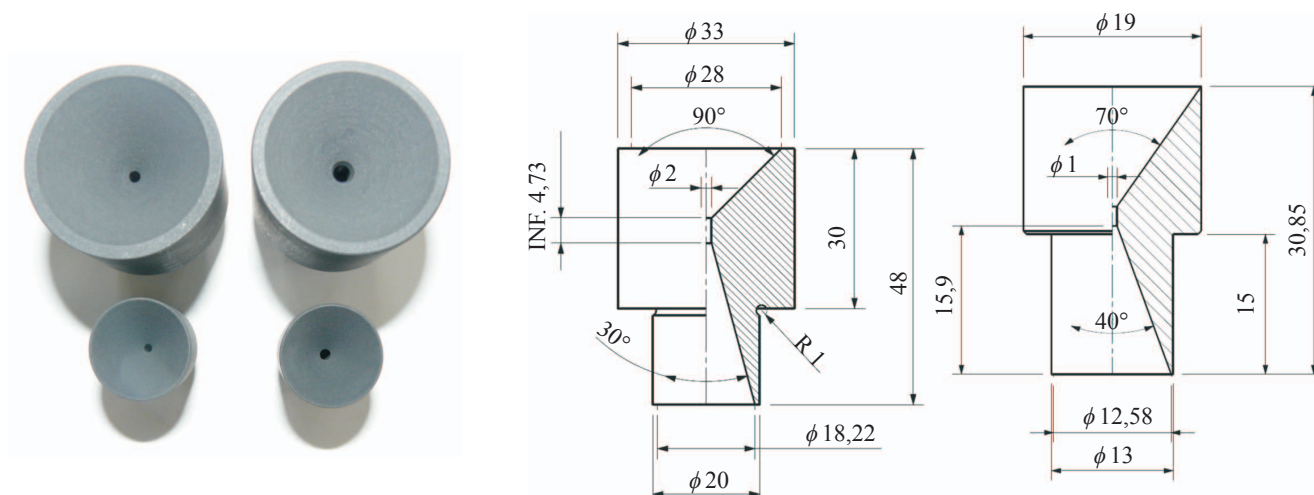
Rys. 2. Części silnika laboratoryjnego do badania propelantów. Po lewej dysza wylotowa, w środku głowica silnika, w której umieszczona jest dysza, po prawej gwintowana końcowa część korpusu, umożliwiającą dokręcenie głowicy, oraz charakterystyczny króciec pomiarowy do usytuowania piezoelektrycznego przetwornika ciśnienia

### Przygotowanie zespołu dysz wylotowych do silnika laboratoryjnego

Bardzo ważną częścią silnika raketowego do badań parametrów spalania propelantów jest dysza wylotowa. To właśnie przez nią produkty spalania opuszczają korpus silnika. Towarzyszą temu wysokie ciśnienie, temperatura i prędkość gazów prochowych, dlatego dysze muszą być odpowiednio zaprojektowane i rzetelnie wykonane. Praktyka badań propelantów na laboratoryjnych silnikach raketowych

wskazuje, że najlepsze rezultaty i powtarzalność wyników otrzymuje się przy średnicach dysz zbliżonych do 1 mm [3]. Projekt dysz oraz przykładowe modele zaprezentowano na rysunku 3.

W trakcie badań dysze są narażone na ekstremalne warunki fizyczne ciśnienia i temperatury, dlatego wykonano ich kilka sztuk w każdym zaplanowanym rozmiarze.



Rys. 3. Z lewej strony rysunku pokazano gotowy wyrób – zespół dysz wykonanych metodą toczenia z wałka grafitowego, a z prawej strony – rysunek projektowy dysz wylotowych w dwóch wariantach. Dysza „większa”, o średnicy  $\phi = 2\text{ mm}$ , średnicy konfuzora (części dolotowej/zbieżnej)  $\phi_{konf} = 33\text{ mm}$  i średnicy dyfuzora (części rozbieżnej)  $\phi_{dyfuzora} = 20\text{ mm}$ , oraz dysza wylotowa „mniejsza”, o parametrach: średnica  $\phi = 1\text{ mm}$ , średnica konfuzora  $\phi_{konf} = 19\text{ mm}$ , średnica dyfuzora  $\phi_{dyfuzora} = 13\text{ mm}$

### Przygotowanie próbek propelantów do badań zapłonu na silniku laboratoryjnym

Kolejnym etapem pracy było przygotowanie próbek paliw. Zdecydowano się na wybór techniki zaprasowywania paliw w matrycy stalowej pod prasą hydrauliczną. Paliwa wyselekcjonowane do badań sprawnościowych to nitrocelulozowo-nitroglicerynowe heterogeniczne paliwa raketowe pierwotnie (i nadal) używane w przemyśle lotniczym i obronnym. Podane modyfikacjom stabilizatorów spalania i dodatków małowzrostkowych komponentów lepiszcza znalazły zastosowanie w przemyśle naftowym [2]. Rozdrobnione paliwo w formie granulatu połączono z lepiszczem nitrocelulozowym i zaprasowano w przygotowanej matrycy. Technologię zaprasowywania propelantu wykorzystano w przypadku wszystkich trzech rodzajów paliw badanych w pracy [1]. Na rysunku 4 pokazano efekt końcowy zaprasowywania paliwa w matrycy stalowej.

Na potrzeby przedstawionego w pracy [1] projektu przygotowano zestawy

trzech rodzajów propelantów: typu Szafir<sup>®</sup>, Szmaragd<sup>®</sup> i Grafit<sup>®</sup>, które po modyfikacji strukturalnej występują odpowiednio pod nazwami Propelant #1, Propelant #2 i Propelant #3. Dalszy etap przygotowania próbek paliwa to wykonanie niezbędnego układu inicjującego zapłon, co częściowo zostało zaprezentowane na rysunku 5.



Rys. 4. Przykładowe wypraski paliwa przygotowane do badań na silniku laboratoryjnym [1]



Rys. 5. Kolejne etapy przygotowania zespołu inicjowania zapłonu propelantu

Otwór znajdujący się w górnej części ziarna propelantu zasypano 1,5 g granulowanej masy pirotechnicznej, pobudzającej cały układ paliwowy. Następnie w wierzchniej warstwie kanału wypełnionego masą pirotechniczną umiejscowiono główkę zapalczą z przewodami prądowymi. Posiada ona bardzo wrażliwy materiał pierwotny – azydek ołowiu.

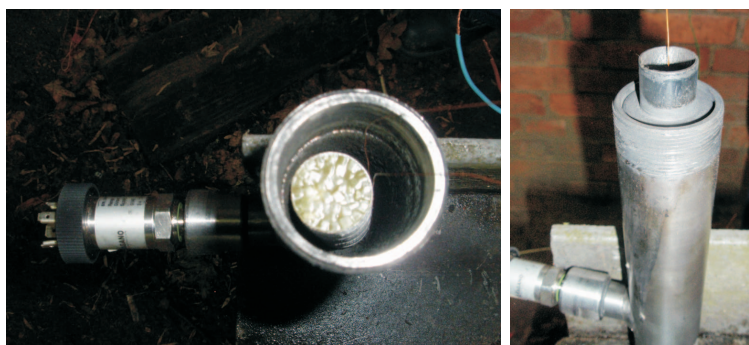
### Przebieg badań laboratoryjnych

Ogółem przygotowano 9 lasek paliwa modyfikowanego, o zbliżonej wadze i rozmiarach fizycznych. Jako pierwsze badaniu zostało poddane paliwo heterogeniczne dwubazowe Propelant #1, na bazie paliwa Szafir<sup>®</sup>, następnie przystąpiono do badania heterogenicznego propelantu zmodyfikowanego na bazie paliwa Szmaragd<sup>®</sup>, prezentowanego pod nazwą Propelant #2. Ostatnie w serii paliwo to heterogeniczny propelant na bazie paliwa Grafit<sup>®</sup>, pierwotnie o zastosowaniu militarnym, następnie zmodyfikowany i dostosowany do potrzeb przemysłu naftowego. Na rysunku 6 przedstawiono przykład instalowania próbki paliwa w komorze silnika i składania pozostałych elementów (głowicy, dyszy wylotowej, linii strzałowej).

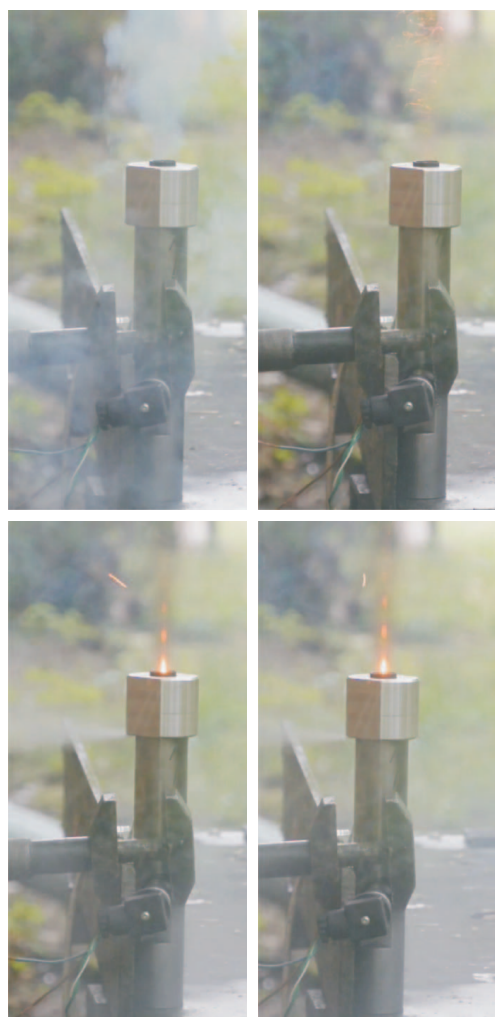


Rys. 6. Instalowanie próbki paliwa w komorze silnika laboratoryjnego

W pionowo usytuowanym korpusie silnika umieszczono laskę paliwa Propelant #1. Miedziane przewody linii strzałowej w izolacji polipropylenowej zastały przewleczone



Rys. 7. Po lewej stronie widok paliwa osadzonego w komorze silnika, po prawej – komora silnika z paliwem zamkniętą grafitową dyszą wylotową. Widoczne przewody linii strzałowej i przetwornik ciśnienia w dolnej części korpusu



Rys. 8. Przebieg inicjacji i spalania paliwa Propelant #1. Fotografia przedstawia pracujący silnik laboratoryjny w trakcie testu spalania paliwa w różnych momentach czasowych

przez dyszę wylotową w kierunku od konfuzora do dyfuzora, a następnie korpus wraz z dyszą uszczelniono poprzez dokręcenie głowicy silnika.

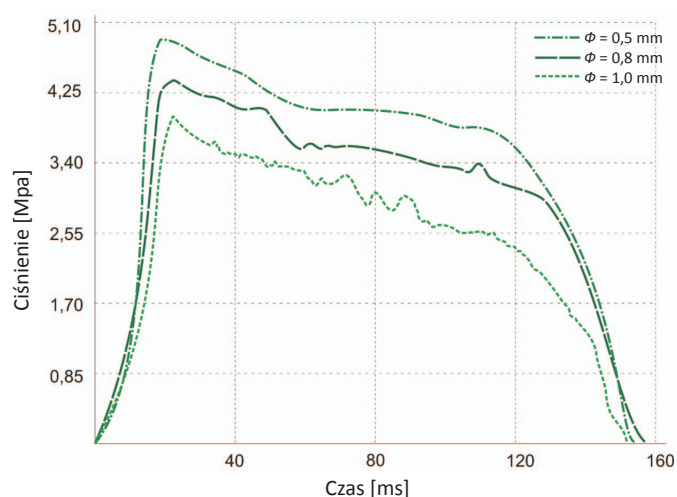
Oprócz zapisu profilu ciśnienia prowadzono równolegle

rejestrację video przebiegu badania. Kamera rejestrująca obraz z dużą częstotliwością klatek na sekundę pozwoliła uchwycić tok eksperymentów. Przykładowe rejestracje obrazu z testu paliwa Propellant #1 przedstawiono na rysunku 8.

### Wyniki badań zapłonu propelantów

Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów zmian ciśnienia zarejestrowanych na oscyloskopie w testach spalania propelantów w silniku laboratoryjnym. Testom poddane zostały trzy rodzaje propelantów modyfikowanych na bazie paliw Szafir<sup>®</sup>, Szmaragd<sup>®</sup> i Grafit<sup>®</sup>, które w artykule występują odpowiednio pod nazwami roboczymi Propellant #1, Propellant #2 i Propellant #3.

#### Eksperyment pierwszy



Rys. 9. Profil zmiany ciśnienia dla paliwa Propellant #1. Trzy krzywe spalania odpowiadają testom prowadzonym przy zastosowaniu różnych dysz wylotowych, o średnicach:  $\phi_1 = 0,5$  mm,  $\phi_2 = 0,8$  mm,  $\phi_3 = 1,0$  mm

Jako pierwsze poddano badaniu paliwo heterogeniczne dwubazowe Propellant #1. Przygotowana do badań próbka paliwa charakteryzowała się następującymi cechami: masa próbki  $m_{(1)} = 96$  g, wysokość  $h_{(1)} = 88$  mm, średnica  $\phi_{(1)} = 20$  mm. Na rysunku 9 przedstawiono uzyskane profile ciśnienia spalania dla trzech różnych średnic dysz wylotowych.

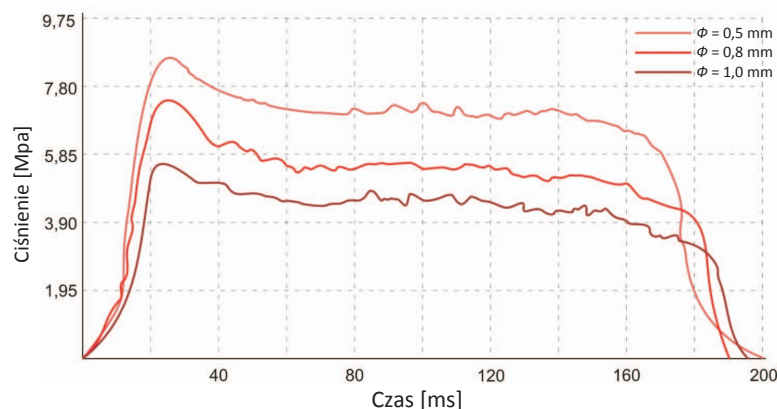
Dla paliwa prochowego Propellant #1 przeprowadzono serię trzech eksperymentów, których celem była inicjacja zapłonu i rejestracja ciśnienia w komorze silnika laboratoryjnego w trzech konfiguracjach dyszy wylotowej. Zainicjowane paliwo spaliło się całkowicie, generując charakterystyczny otwierający pik ciśnienia równy odpowiednio:  $P_{\max}^{(\phi 0,5)} = 5,9$  MPa,  $P_{\max}^{(\phi 0,8)} = 5,7$  MPa,  $P_{\max}^{(\phi 1,0)} = 5,5$  MPa. Czas

spalania poszczególnych próbek wyniósł odpowiednio:  $t_k^{(\phi 0,5)} = 151$  ms,  $t_k^{(\phi 0,8)} = 156$  ms,  $t_k^{(\phi 1,0)} = 149$  ms. Stabilny charakter procesu spalania dał się zaobserwować w teście z najmniejszą dyszą wylotową. W przedziale czasowym 50÷100 ms krzywa spalania uwidacznia niemal poziomy odcinek, świadczący o utrzymywaniu się ciśnienia w korpusie silnika na stałym poziomie rzędu 3,9 MPa. W teście spalania z dyszą o średnicy  $\phi_2 = 0,8$  mm efekt ten jest słabiej widoczny, a w teście ostatnim ( $\phi_3 = 1,0$  mm) takiego zjawiska nie zaobserwowano. Eksperyment przebiegł bez zakłóceń i nieprzewidzianych trudności, a jego pozytywny rezultat pozwolił na kontynuowanie badań.

#### Eksperyment drugi

W drugim eksperymencie przystąpiono do badania zmodyfikowanego heterogenicznego propelantu na bazie paliwa Szmaragd<sup>®</sup>, prezentowanego pod nazwą Propellant #2. Przygotowana do badań próbka paliwa posiadała następujące cechy: masa próbki  $m_{(2)} = 99$  g, wysokość  $h_{(2)} = 91$  mm, średnica  $\phi_{(2)} = 20$  mm. Do badań przygotowano zestaw trzech zaprasowanych lasek paliwa oraz trzy dysze wylotowe, o średnicach:  $\phi_1 = 0,5$  mm,  $\phi_2 = 0,8$  mm,  $\phi_3 = 1,0$  mm. Na rysunku 10 przedstawiono uzyskany profil ciśnienia dla trzech wariantów prowadzonego testu.

Zainicjowane paliwo Propellant #2 spaliło się całkowicie, a sam proces palenia trwał dłużej niż w poprzedniej serii testów, średnio o 40 ms. Zaobserwowano, że propelant pod-



Rys. 10. Profil zmiany ciśnienia w teście spalania paliwa Propellant #2

dany badaniu ma nieco inną charakterystykę energetyczną, co odzwierciedla zarejestrowany profil przebiegu ciśnienia.

Dla każdego z trzech testów spalania Propelantu #2 zostały zarejestrowane profile przebiegu zmian ciśnieniowych, a reprezentujące je krzywe wykazywały cechy podobieństwa. Początkowa część testu to wyraźny wzrost ciśnienia, z osiągnięciem wartości szczytowej około dwudziestej milisekundy, a następnie łagodny i nieznaczny spadek ciśnienia, którego zahamowanie zarejestrowano w przedziale czasowym 50÷70 ms. Po tym czasie obserwowana była stabilizacja spalania i wyraźnie pozioma część krzywej. Końcowy etap testów to gwałtowny spadek ciśnienia i całkowite wypalenie Propelantu #2, odpowiednio po czasie:  $t_k^{(\phi 0,5)} = 202$  ms,  $t_k^{(\phi 0,8)} = 189$  ms,  $t_k^{(\phi 1,0)} = 196$  ms.

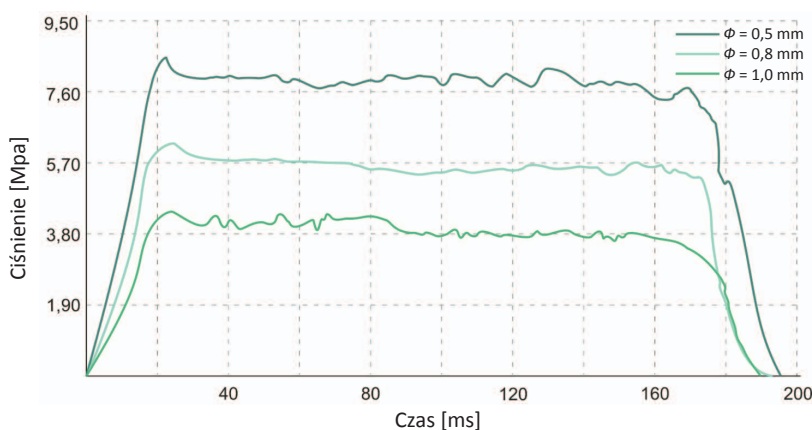
### Eksperyment trzeci

Trzeci eksperyment otwiera serię badań ostatniego paliwa przewidzianego do testów na silniku laboratoryjnym. Tym paliwem jest heterogeniczny propelant na bazie paliwa Grafit<sup>®</sup>, pierwotnie o zastosowaniu militarnym, następnie zmodyfikowany i dostosowany do potrzeb przemysłu naftowego. Ostateczny produkt przedstawiony został pod nazwą Propelant #3. Przygotowana do badań próbka paliwa charakteryzowała się następującymi cechami: masa próbki  $m_{(3)} = 105$  g, wysokość  $h_{(3)} = 99$  mm, średnica  $\phi_{(3)} = 20$  mm.

Na rysunku 11 zaprezentowano uzyskany profil ciśnienia dla trzech wariantów prowadzenia testu.

W toku prowadzenia trzeciej serii badań – spalania paliwa heterogenicznego Propelant #3 zaobserwowano następujące punkty charakteryzujące wszystkie trzy profile ciśnienia:

- nagły i gwałtowny wzrost ciśnienia do wartości:  
 $P_{\max}^{(\phi 0,5)} = 8,1$  MPa,  $P_{\max}^{(\phi 0,8)} = 6,3$  MPa,  $P_{\max}^{(\phi 1,0)} = 4,4$  MPa;
- szybkie ustabilizowanie ciśnienia spalania i jego utrzymanie do ~170 ms;
- szybki i gwałtowny spadek ciśnienia po całkowitym wypaleniu Propelantu #3.



Rys. 11. Profil zmiany ciśnienia w teście spalania paliwa Propelant #3

### Podsumowanie

1. Do badań na silniku laboratoryjnym wytypowano trzy rodzaje propelantów, których cechy energetyczne wskazują na potencjalną możliwość zastosowania ich w otworach naftowych w zabiegach szczelinowania gazowego.
  2. Zaprojektowano i pomyślnie wykonano stacjonarny silnik laboratoryjny wraz z zestawem dysz wylotowych o różnych konfiguracjach geometrycznych.
  3. Zastosowano technologię zaprasowania paliwa w formie granulowanej w celu uzyskania próbek propelantów o zadanym, cylindrycznym kształcie.
  4. Zaimplementowano skutecznie elektryczny układ inicjacji zapłonu, który sprawdził się we wszystkich dziewięciu próbach spalania propelantów.
  5. Przeprowadzono serię badań propelantów modyfikowanych, potwierdzających skuteczny zapłon i stabilne spalanie paliwa w trakcie większości testów.
  6. Cykl badań służył wstępnej ocenie przydatności poszczególnych propelantów do zabiegów stymulacyjnych w odwiertach ropnych i gazowych. Uzyskane profile spalania wskazują na stabilniejszy proces palenia i wyższą energetyczność propelantów #2 i #3. Paliwo Propelant #1 jako jedyne w przeprowadzonych eksperymentach wykazało
- degresywny charakter spalania, co uwidoczniło się na krzywej ciśnienia, notującej spadek tuż po otwierającym piku związanym z samym zapłonem. Propelanty #2 i #3 wykazały neutralny charakter palenia, co możliwe jest do zaobserwowania, gdy ciśnienie gazów roboczych w komorze silnika nie zmienia się podczas spalania w określonym przedziale czasowym.
7. Eksperymenty na silniku laboratoryjnym stanowią zwykle pierwszy bądź jeden z początkowych etapów badania zapłonu i charakteru spalania propelantów. Zarejestrowane profile ciśnienia w cyklu dziewięciu testów wykazały stabilność paliw modyfikowanych, zachowujących charakter spalania w różnych warunkach ciśnienia. Udało się to sprawdzić dzięki zastosowaniu zestawu trzech różnych dysz wylotowych. Dysza o największej średnicy ( $\phi = 1$  mm) pozwalała na relatywnie szybkie wydostawanie się gazów prochowych z komory silnika. Uzyskane wartości ciśnienia w tych eksperymentach były najniższe. Zmniejszając średnicę dysz odpowiednio do  $\phi = 0,8$  mm i  $\phi = 0,5$  mm, zawężano tym samym drogę ujścia i utrudniano wylot gazów z komory silnika. Wyraźny wzrost ciśnienia odwzorowuje krzywa spalania. Zarejestrowane

wartości maksymalne i średnie ciśnienia gazów prochowych służą w tym przypadku porównaniu poziomu energetyczności trzech rodzajów propelantów i zdolności ich efektywnego zapłonu w różnych warunkach fizycznych prowadzenia testu. Z uwagi na laboratoryjną skalę eksperymentu gramatura spalanych propelantów była niewielka, podyktowana względami bezpieczeństwa, a zarazem zgodna z ogólnie przyjętą metodyką. W kon-

sekwencji uzyskiwane wartości ciśnienia nie przekraczały 10 MPa. W rzeczywistych warunkach otworu wiertniczego zainicjowane wielokilogramowe ziarno paliwa generuje pole ciśnienia rzędu kilkuset MPa, pokonując maksymalne naprężenia górotworu. Badania zapłonu propelantów o większej masie Zakład Techniki Strzelniczej INiG – PIB prowadzi na grubościenniej stalowej komorze balistycznej oraz na otwartym poligonie strzałowym.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2014, nr 11, s. 778–783

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Perfo-szczelinowanie. Testy wybranego rozwiązania technologicznego do budowy kompleksowego urządzenia perforująco-szczelinującego* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 29/ST, nr archiwalny: DK-4100-29/2013.

## Literatura

- [1] Frodyma A., Godzik E., Habera L.: *Perfo-szczelinowanie. Testy wybranego rozwiązania technologicznego do budowy kompleksowego urządzenia perforująco-szczelinującego*. Materiały INiG – PIB, 2014.
- [2] Habera L., Frodyma A., Koslik P., Wilk Z.: *Nowoczesne urządzenia perforująco-szczelinujące – koncepcja i badania poligonowe*. *Nafta-Gaz* 2014, nr 5, s. 301–306.
- [3] Habera L., Frodyma A., Wilk Z., Koslik P.: *Badania poligonowe zapłonu paliw prochowych stosowanych w perfogeneratorach*. *Nafta-Gaz* 2012, nr 3, s. 180–183.
- [4] Wolszakiewicz T.: *Badania balistyczne i wytrzymałościowe stałych paliw raketowych w aspekcie prawidłowości ich*

*zapłonu oraz możliwości wystąpienia sytuacji awaryjnych pracy silników raketowych*. Instytut Przemysłu Organicznego, Warszawa 2013.



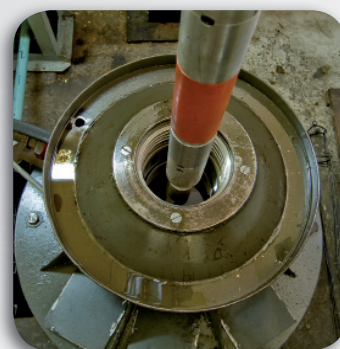
Dr inż. Łukasz HABERA  
Adiunkt w Zakładzie Techniki Strzelniczej.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: [lukasz.habera@inig.pl](mailto:lukasz.habera@inig.pl)

## OFERTA

### ZAKŁAD TECHNIKI STRZELNICZEJ

Zakres działania:

- konstrukcja urządzeń strzelniczych przeznaczonych do udostępniania poziomów ropo- i gazonośnych;
- opracowywanie technologii i metod prowadzenia prac udostępniających przy wykorzystaniu własnych rozwiązań konstrukcyjnych sprzętu strzelniczego;
- konstrukcja urządzeń strzelniczych przeznaczonych do prac specjalnych i ratunkowych w otworach wiertniczych (korki detonacyjne, ładunki o działaniu pionowym, obcinacze rur okładzinowych i płuczkowych);
- przywracanie cyrkulacji w odwiercie – uwalnianie przewodu wiertniczego;
- intensyfikacja oraz stymulacja przyływów medium do odwiertu (szczelinowanie strefy przyotworowej złoża prochowymi generatorami ciśnienia);
- badania atestacyjno-wytrzymałościowe sprzętu strzałowego;
- małoseryjna produkcja urządzeń strzelniczych (perforatory, korki detonacyjne, obcinacze do rur).



**Kierownik:** mgr inż. Antoni Frodyma  
**Adres:** ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
**Tel:** 12 617-74-73  
**Faks:** 12 653-16-65  
**E-mail:** [antoni.frodyma@inig.pl](mailto:antoni.frodyma@inig.pl)

