

Łukasz Habera, Antoni Frodyma

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Piotr Koślik, Zenon Wilk

Institut Przemysłu Organicznego

Nowoczesne urządzenia perforująco-szczelinujące – koncepcja i badania poligonowe

Zespół badawczy postawił sobie za cel sprawdzenie możliwości technicznych zbudowania nowego, kompleksowego urządzenia perforująco-szczelinującego, które mogłoby znaleźć zastosowanie w szczególności na dojrzałych złożach konwencjonalnych. Z tego powodu zbudowano model numeryczny nowego urządzenia i przeprowadzono symulację poprawności jego funkcjonowania i oddziaływania strugi ładunku kumulacyjnego na paliwo prochowe. Dalszej weryfikacji zaproponowanego rozwiązania technicznego dokonano poprzez budowę fizycznych modeli strzałowych, wytworzenie paliwa (propelantu) o żądanym cylindrycznym kształcie oraz poprzez przeprowadzenie prób poligonowych na przygotowanych modelach.

Słowa kluczowe: szczelinowanie gazowe, perforacja kumulacyjna, sprzęt strzelniczy.

Modern perforating and fracturing devices – the concept and firing ground tests

The research team investigated technical possibilities of constructing a new complex perforating and fracturing device, mainly intended for typical mature oil and gas reservoirs. To this end the numerical model of the new device was built and a simulation was performed to validate its functioning and impact of the cumulative jet on propellants. Further verification of the proposed technical solution was made by building physical models of the new equipment, preparing propellants of a desired cylindrical shape, and finally performing firing experiments using the prepared models at a firing ground.

Key words: gas-fracturing, cumulative perforation, new shooting equipment.

Zarys metody szczelinowania gazowego

Szczelinowanie z zastosowaniem paliw prochowych jest uznawane za tanią alternatywę dla konwencjonalnego szczelinowania hydraulicznego w okolicznościach, gdy nie są dostępne ciężkie urządzenia pompowe, istnieje zagrożenie naruszenia konstrukcji odwiertu w trakcie zabiegu albo koszt tradycyjnego zabiegu nie znajduje uzasadnienia [4]. Możliwe zastosowania szczelinowania z wykorzystaniem gazów prochowych obejmują:

- wstępne szczelinowanie przed konwencjonalnym szczelinowaniem hydraulicznym – w celu zmniejszenia ciśnienia zapoczątkowania szczeliny oraz redukcji ryzyka niepożądanego propagacji szczeliny,
 - poprawę chłonności, co może być również użyteczne do powtórnego zatłaczania w trakcie testów otworu,
 - stymulację wydobycia z otworów ropnych i gazowych.
- Uważa się, że szczeliny utworzone pod działaniem gazów prochowych samoczynnie zapobiegają zamykaniu się dzięki dyslokacji ścinającej, do której dochodzi na skutek dynamicznego charakteru oddziaływania gazów prochowych na skałę w trakcie propagacji szczeliny. Eksperymenty laboratoryjne i terenowe, które przeprowadzono już w minionych dekadach wykazały, że wywieranie ciśnienia w otworze drogą spalania paliw pędnych może być skutecznie wykorzystywane do tworzenia wielu szczelin w skałach otaczających otwór [1].

Technika, w której wykorzystywano ładunek paliwa prochowego, uzyskała nazwę szczelinowania gazami o wysokiej energii. Została ona dostosowana do generowania ciśnienia w otworze i wytwarzania wielu szczelin, rozchodzących się promieniowo od osi otworu, bez kruszenia otaczających skał. Za główne cele zabiegów uważano wówczas złoża gazu

ziemnego zalegającego w utworach o niskiej przepuszczalności, jak również utwory zwięzłych łupków. W pierwszym przypadku szczeliny powinny zwiększać przewodność hydrauliczną w strefie przyotworowej, ułatwiając przepływ gazu do otworu, a w drugim zastosowaniu należy ustanowić żądaną chłonność danej formacji w otworze iniekcyjnym.

Przykład gazogeneratorów stosowanych przez Zakład Techniki Strzelniczej INiG – PIB

Zakład Techniki Strzelniczej Instytutu Nafty i Gazu – PIB dysponuje gazogeneratorem ciśnienia posiadającym odpowiednie certyfikaty, atesty i dopuszczenia do stosowania w otworze wiertniczym. Przykład takiego urządzenia pokazano na rysunku 1. Gazogenerator składa się z zespołu dwóch ziaren paliwa o średnicy 80 mm (ŁB-1) i jednego ziarna o średnicy 40 mm (MPH). Wewnątrz każdego ziarna w postaci walcowej jest wydrążony kanał, przez który przebiega lina nośna z kablem strzałowym biegnącym do usytuowanej w dolnej części układu głowiczki zapalającej.

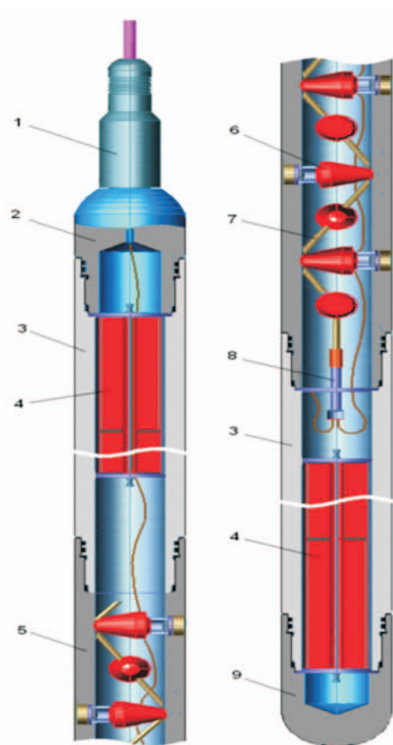
czając propelant powyżej i poniżej centralnie usytuowanego zespołu ładunków kumulacyjnych. Nie został tu jednak wyeliminowany problem niepokrywania się sekcji perforującej z częścią szczelinującą.



Rys. 1. Widok prochowego generatora ciśnienia wyprodukowanego w INiG przygotowanego do zapuszczenia do otworu wiertniczego

Zabieg szczelinowania gazowego wykonuje się w odwiercie sperforowanym, a jeżeli istniejąca sieć perforacji jest w złym stanie technicznym, zaleca się wykonanie reperforacji kluczowego interwału i dopiero zastosowanie generatora ciśnienia. Technologia ta wymusza dwukrotne zapuszczenie sprzętu strzałowego do odwiertu: najpierw wprowadzenie kolumny perforatora, wykonanie kanałów perforacyjnych i wyciągnięcie perforatora, a następnie oddzielne zapuszczenie zespołu generatora ciśnienia i wykonanie szczelinowania. Niedogodność tę po części można zniwelować zapuszczając jednocześnie (tzn. w jednym marszu roboczym) zawieszony na kablu karotażowym perforator, a nad nim gazogenerator. Wadą takiego rozwiązania jest to, że propelant został usytuowany poza osią działania ładunków kumulacyjnych. Jest to technicznie dopuszczalne pod względem bezpieczeństwa konstrukcji otworu, jednak w kontekście optymalizacji procesu szczelinowania gazowego należy dążyć do odpalania generatora ciśnienia precyzyjnie w świetle kanałów perforacyjnych.

W literaturze przedmiotu odnaleźć można także propozycję rosyjską urządzenia (rysunek 2), która kompleksowo łączy perforator z gazowym generatorem ciśnienia, umiesz-

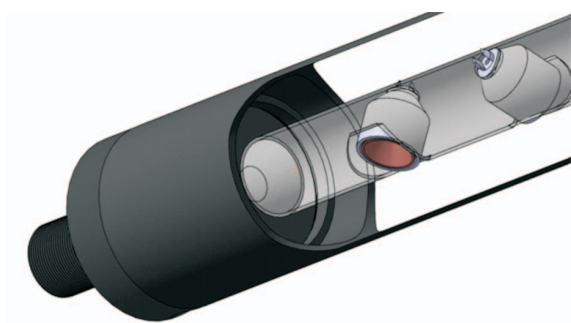


Rys. 2. Rosyjska propozycja urządzenia perforująco-szczelinującego: 4 – propelant w części górnej i dolnej urządzenia, 6 – zorientowany ładunek kumulacyjny [6]

W świetle opisanych powyżej problemów Zakład Techniki Strzelniczej INiG we współpracy z Instytutem Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie podjął próbę opracowania nowego rozwiązania technicznego dążącego do wytworzenia kompleksowego urządzenia perforująco-szczelinującego o wysokiej sprawności działania, z jednym systemem inicjowania i przenoszenia detonacji. Zbudowano model numeryczny nowego urządzenia i przeprowadzono symulację działania zaproponowanego rozwiązania. Na podstawie pozytywnych wyników modelowania komputerowego wykonano fizyczne modele potencjalnego rozwiązania technicznego, wytypowano rodzaj i kształt propelantów oraz przeprowadzono sprawnościowe próby poligonowe.

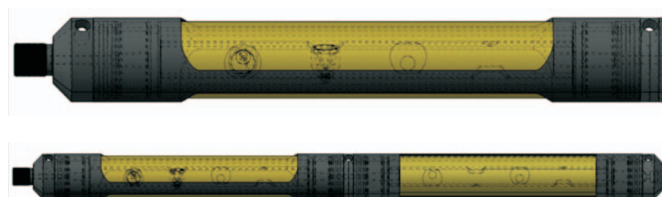
Koncepcja nowego urządzenia perforująco-szczelinującego

Nowo projektowane urządzenie kompleksowe łączy cechy perforatora rurowego i generatora gazów prochowych. Seria ładunków kierunkowych osadzonych na aluminiowej żerdzi nośnej, stabilizowanej korpusem, oraz lontowy system detonacji odpowiedzialne są za perforacyjny charakter urządzenia [5]. Paliwo prochowe zaprasowane w formie pierścieni,



Rys. 3. Widok fragmentu modelu perfogeneratora z zaprojektowaną przestrzenią na paliwo prochowe – w osi urządzenia widoczna żerdź nośna z ładunkami kumulacyjnymi

usytuowane wokół żerdzi nośnej, po odpaleniu ładunków kumulacyjnych, spalając się, wytwarza znaczne objętości gazów, które podążają za strugą ładunku kumulacyjnego. Penetrują one w ten sposób kanał perforacyjny, dodatkowo go rozszczelinowując. Ciśnienie gazów prochowych kierowane jest bezpośrednio w światło kanałów perforacyjnych, co stanowi największą zaletę proponowanego rozwiązania technicznego. Fragment projektowanego urządzenia przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 4. Widok kompletnego urządzenia perforująco-szczelinującego – dolna część rysunku przedstawia przykład złożenia dwóch segmentów perfogeneratora

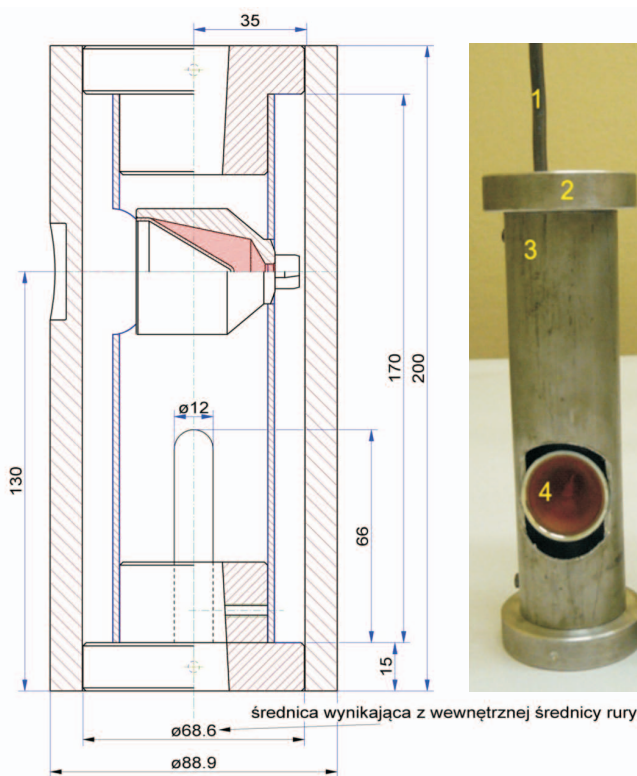
Przygotowanie fizycznych modeli do prób strzałowych

Jak już zauważono w poprzedniej części artykułu, istnieje konieczność opracowania paliwa prochowego o innym kształcie niż dotychczas stosowane, zachowującego jednak swoje właściwości fizyczne [2, 3, 7]. W koncepcji nowego urządzenia perforująco-szczelinującego, według autorów, zachodzi konieczność przygotowania propelantu o kształcie pierścieniowym, mogącym składać się w zespoły paliwa o większej długości ziarna.

Model perfogeneratora zaprojektowanego do testów strzałowych przedstawia rysunek 5. W aluminiowej żerdzi nośnej usytuowano wejście na ładunek kumulacyjny o średnicy podstawy równej 33,3 mm, z litą wkładką kumulacyjną miedzianą w kształcie stożka o kącie 45° i naważce heksogenu 16 g (ŁOKT-H-Fe-33-150). Lont detonujący wprowadzany jest w części górnej poprzez wywiercony otwór w caliźnie stabilizatora lub otwór centralny w osi żerdzi nośnej i centralizatora.

Przygotowane elementy wewnętrzne modelu trafiają do korpusów stalowych takich jak w typowych perforatorach ru-

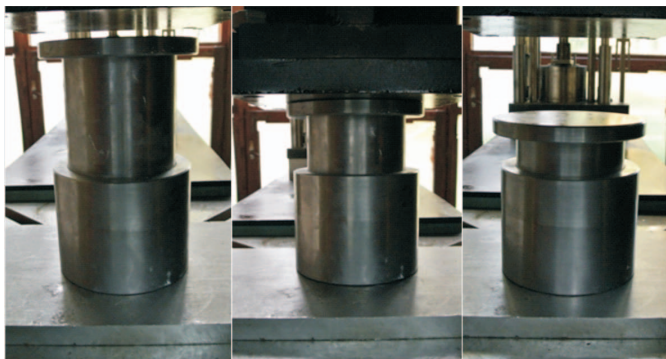
rowych typu PRS. Wysokość korpusów przewidzianych do testów wynosi 200 mm.



Rys. 5. Wewnętrzna część modelu perfogeneratora składająca się z: 1 – lontu detonującego, 2 – górnego i dolnego centralizatora żerdzi nośnej, 3 – aluminiowej żerdzi nośnej, 4 – osiowo-kierunkowego ładunku kumulacyjnego

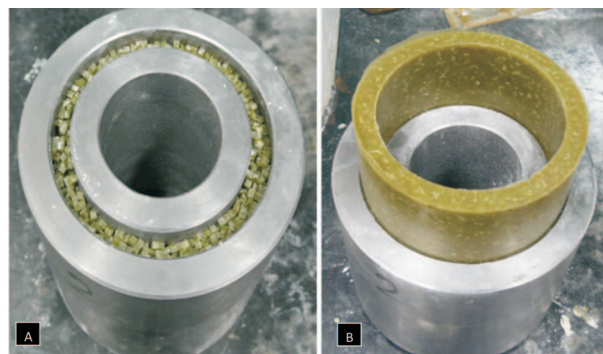
Przygotowanie paliwa do perfogeneratora

Do prób technologicznych wytypowano grupę paliw produkcji krajowej i ich modyfikacje w formie granulowanej [2]. Dla procesu prasowania gotowych wyrobów sporządzono mieszaninę paliw i ich modyfikatorów z dodatkiem lepiszcza nitrocelulozowego (~2% udziału masowego). Tak przygotowaną miesznianą wypełniono matrycę do sporządzania wyprasek walcowych. Matrycę wstawiono pod prasę hydrauliczną i przyłożono ciśnienie. Bazując na doświadczeniach ze wstępnego prasowania tej grupy paliw, ustalono ciśnienie robocze na 16 MPa, którym obciążono tłok zaprasowujący przez okres 60 s. Całość po prasowaniu pozostawiono jeszcze w odprężonej matrycy na 24 godziny. Widok działającej prasy hydraulicznej i zmieniająca się pozycja tłoka zaprasowującego zostały uchwycone fotograficznie i przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Prasa hydrauliczna w trakcie pracy – zarejestrowane fotograficznie różne momenty czasowe

Po upływie 24 godzin zaprasowany wyrób zostaje wytłoczony z matrycy już w postaci pierścienia paliwa, którego waga nominalna wynosi ~220 g, a wysokość wypraski ~50 mm. Wytłoczone z matrycy paliwo pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Napelniona matryca do zaprasowywania paliw (A), po prawej stronie (B) widok wytłoczonego segmentu paliwa o nowym, pierścieniowym kształcie

Średnica zewnętrzna i wewnętrzna pierścienia paliwa wynosi 109 i 89 mm i jest dostosowana do projektowanego urządzenia perforująco-szczelinującego. Wytłoczenie paliwa o kształcie pierścienia kończy etap przygotowania kompletnego modelu perfogeneratora gotowego do prób strzałowych na poligonie (rysunek 8).



Rys. 8. Model nowego urządzenia perforująco-szczelinującego

Badanie poligonowe zapłonu propelantu w nowym urządzeniu perforująco-szczelinującym

Przeprowadzono trzy próby strzałowe pobudzenia fizycznego modelu perfogeneratora.

Próba pierwsza

W eksperymencie zastosowano propelant modyfikowany na bazie paliwa typu Smaragd®, ograniczając jego gramaturę do niezbędnego minimum. Pierwszemu strzałowi w serii zawsze towarzyszy niewiadoma co do dynamiki przebiegu reakcji detonacji i spalania, dlatego w eksperymencie otwierającym badania zastosowano najmniejszy wytłoczony pierścień paliwa – o wadze 115,5 g (wysokość 22 mm). Model perfogeneratora umieszczono w atrapie odwiertu, uzbrojono zapalnikiem elektrycznym i przykryto 30-kilogramowym

walcem stalowym przeciwdziałającym ucieczce gazów prochowych po strzale (rysunek 9).



Rys. 9. Atrapa odcinka otworu wiertniczego i umieszczony w niej pierwszy model strzałowy

Efekty pierwszego strzału najlepiej oddaje dokumentacja fotograficzna sporządzona na poligonie (rysunek 10). Dostrzec można zeszcelinowaną część betonową z wyraźną przewagą spękań w osi i otoczeniu kanału perforacyjnego.



Rys. 10. Rezultaty próby pierwszej: A – model i rura okładzinowa, B – widok spękań betonu, C – przewaga spękań/szczelin w kierunku działania ładunku osiowego, D – otwory perforacyjne w modelu i rurze okładzinowej

Próba druga

W drugim teście strzałowym model perfogeneratora wyposażono w segment paliwa o masie ~222 g i wysokości 50 mm, co pokazano na rysunku 11. Podobnie jak w eksperymencie pierwszym, model strzałowy umieszczono w nowej atrapie



Rys. 11. Widok A przedstawia drugi model strzałowy – na korpus perforatora nałożono propelant na bazie modyfikowanego paliwa Szmaragd® o masie ~222 g. W widoku B atrapa fragmentu odwiertu oraz przygotowany model do próby trzeciej (propelant modyfikowany o łącznej wysokości pierścienia 80 mm i wadze ~288 g)

odcinka odwiertu i po uzbrojeniu w zapalnik elektryczny dokonano inicjacji detonacji.

Zaobserwowane efekty próby drugiej to całkowite zniszczenie betonowej części atrapy odwiertu. Stwierdzono natomiast regularne, równe perforacje elementów stalowych. Zastosowane paliwo spowodowało całkowitą fragmentację części betonowej atrapy, a rozprężające się gazy prochowe wytworzyły wyrwę w gruncie o średnicy 0,8÷1,0 m. Wśród rozproszonych fragmentów betonu nie znaleziono śladów paliwa, co świadczy o całkowitym spaleniu bądź dynamicznym dopaleniu się całego ziarna paliwa.

Próba trzecia

Trzeci eksperyment poligonowy przeprowadzono według tego samego schematu, co dwa poprzednie. Badany model (rysunek 11B) umieszczono centralnie wewnątrz stalowo-betonowej atrapy odcinka odwiertu. Ze względu na odłamkowy charakter eksperymentu, atrapę wkopano w grunt do poziomu licującego – pokrywanego się z punktem zero. Zasadniczą różnicą w prowadzonym badaniu jest odmienny dobór propelantu, czyli roboczego czynnika szczelinującego. Zastosowany pierścień propelantu był kompozycją modyfikowanych paliw typu Szmaragd®, Szafir® i Agat®. W trzeciej próbie strzałowej zestawiono dwa pierścienie propelantu o wysokościach 50 i 30 mm i łącznej wadze ~288 g. Zastosowane pierścienie mieszanki paliw spowodowały całkowite zniszczenie części betonowej atrapy. Dynamiczne rozprężenie się gazów prochowych doprowadziło do wytworzenia wyrwy w caliznie gruntu o średnicy około jednego metra. Po strzale zaobserwowano rozproszone części betonowe i rozsypany grunt. Śladów ziarna paliwa nie dostrzeżono, choć wydobywające się jeszcze z korpusu perfogeneratora gazy wskazują na pewną anomalię, czyli niedoskonałość w procesie czystego i pełnego spalania. Cała objętość pierścienia powinna ulec spaleni w warunkach dynamicznych, generując znaczne objętości gazów prochowych, których ciśnienie przekracza ciśnienie szczelinowania. W tym przypadku nieznaczna część paliwa spaliła się po zakończeniu zasadniczego procesu, nie wykonu-



Rys. 12. Zestawienie poprawnie perforowanych rur okładzinowych i korpusów perfogeneratora

jąc pracy użytkowej. Mimo tej nieznacznej niedoskonałości, próbę uznajemy za pozytywną. Na rysunku 12 przedstawiono

sperforowane fragmenty atrapy odwiertu oraz korpusów perforatora – odpowiednio dla każdej z trzech prób.

Podsumowanie

1. Zaproponowano nowe rozwiązanie technologiczne urządzenia kompleksowego, tzn. łączącego cechy i działanie perforatora korpusowego oraz prochowego generatora ciśnienia.
2. Na podstawie pozytywnych wyników modelowania komputerowego wykonano fizyczne modele potencjalnego rozwiązania technicznego, wytypowano rodzaj i kształt propelantów oraz przeprowadzono sprawnościowe próby poligonowe.
3. Na potrzeby projektu wykonano matrycę do zaprasowywania segmentów paliwowych w kształcie pierścienia, co stanowi istotę proponowanego rozwiązania technicznego.
4. Wyfłoczono segmenty pierścieni paliwowych niezbędnych do przeprowadzenia prób poligonowych, a ich rezultaty udokumentowano fotograficznie i zarchiwizowano.
5. Próby strzałowe przeprowadzono w specjalnie przygotowanych atrapach odcinka otworu wiertniczego, składającego się z zacementowanej rury okładzinowej wkopanej w ziemię do poziomu gruntu. Pomyślnie przeprowadzone badania poligonowe, których celem było potwierdzenie poprawności działania modelu oraz stwierdzenie samego faktu przenoszenia zapłonu pomiędzy elementami perforatora, dowodzą, że obrany kierunek prac projektowych jest właściwy i stwarza realną szansę zbudowania prototypu urządzenia kompleksowego.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2014, nr 5, s. 301–306

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 archiwalny: DK-4100-29/2013; nr zlecenia: 29/ST.

Literatura

- [1] Barrere M. et al.: *Rocket Propulsion*. Elsevier Publishing Comp. 1960, pp. 345–347.
- [2] Florczak B., Lipinska K.: *Thermochemical Properties of Composite Propellants Combustion Products*. Proceedings of the 4th Seminar New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice 2001, pp. 86–98.
- [3] Frodyma A., Habera L., Wilk Z., Koslik P.: *Badania poligonowe zapłonu paliw prochowych stosowanych w perforatorach*. *Nafta-Gaz* 2012, nr 3, s. 180–183.
- [4] Frodyma A., Habera L., Wilk Z., Koslik P.: *Technologia perforacji wspomagananej operatorem gazodynamicznym z zapisem zjawisk ciśnieniowych towarzyszących zabiegowi za pomocą ultraszybkiego wglebnego rejestratora ciśnienia*. Prace INiG nr 170. Krakow 2010, s. 929–934.
- [5] Frodyma A.: *Nowoczesne rozwiązania elektrycznego odpalania urządzeń strzałowych w otworach wiertniczych*. *Nafta-Gaz* 2010, nr 9, s. 782–793.
- [6] Pawłow W. I.: *Zastosowanie gazodynamicznych metod oddziaływania na przygotowaną strefę otworu w celu intensyfikacji i zwiększenia szczytowego złoza*. Materiały informacyjne przedsiębiorstwa naftowego „StS-WMserwis”. 140105 Ramienskoje, Obwód Moskiewski 2001.
- [7] Wilk Z., Koslik P., Cieslicka K., Habera L., Frodyma A.: *Analiza i ocena zdolności inicjacji zapłonu paliw wysokoenergetycznych stosowanych w perforatorach*. Prace INiG nr 170. Krakow 2010, s. 935–941.



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



Mgr inż. Antoni FRODYMA
Główny specjalista inżynierjno-techniczny;
kierownik Zakładu Techniki Strzelniczej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: antoni.frodyma@inig.pl



Dr inż. Zenon WILK
Kierownik Oddziału Instytutu Przemysłu
Organicznego w Krupskim Młynie.
ul. Zawadzkiego 1
42-693 Krupski Młyn
E-mail: zenon.wilk@ipo.waw.pl



Mgr inż. Piotr KOŚLIK
Specjalista badawczo-techniczny w Instytucie
Przemysłu Organicznego w Warszawie Oddział
w Krupskim Młynie.
ul. Zawadzkiego 1
42-693 Krupski Młyn
E-mail: piotr.koslik@ipo.waw.pl