

*Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*, 2018, 10, 97 – 107; DOI:10.22211/matwys/0162  
ISSN 2083-0165

Copyright 2018 © Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland



Article is available under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 license CC BY-NC-ND 3.0.

## Praca doświadczalna / Research paper

# Testy poligonowe urządzenia typu PERFOGENERATOR do stymulacji przyływu medium w odwiertach Firing range tests on PERFOGENERATOR devices for stimulating flow into boreholes

Zenon Wilk<sup>1,\*</sup>, Piotr Józwik<sup>1</sup>, Piotr Koślik<sup>1</sup>, Karolina Nikolczuk<sup>1</sup>, Antoni Frodyma<sup>2</sup>, Artur Godzik<sup>2</sup>, Łukasz Habera<sup>2</sup>, Kamil Hebda<sup>2</sup>, Tomasz Kociuba<sup>3</sup>, Krzysztof Szczurzydło<sup>3</sup>, Andrzej Milczanowski<sup>4</sup>

1) Instytut Przemysłu Organicznego, Oddział zamiejscowy – ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn, PL

2) Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Lubicz 25A, 31-000 Kraków, PL

3) Polskie Górnictwo Nafty i Gazu S.A. Oddział Sanok, ul. Sienkiewicza 12, 38-500 Sanok, PL

4) Geofizyka Toruń S.A., ul. Chrobrego 50, 87-100 Toruń, PL

\* E-mail: [zenon.wilk@ipo.waw.pl](mailto:zenon.wilk@ipo.waw.pl)

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono zagadnienia technologii szczelinowania gazowego w górnictwie otworowym, która zwiększa swój udział w dziedzinie intensyfikacji wydobycia ropy i gazu. Temat związany jest z realizacją projektu NCBIR w ramach Programu Badań Stosowanych Nr PBS3/B2/20/2015. Przedstawiono wyniki badań fazy końcowej realizacji projektu – testy funkcjonalne modeli perfogeneratora w warunkach zawodnionych, w rurze okładzinowej atrapy otworu wiertniczego w bloku betonowym, na poligonie strzelowym IPO w Krupskim Młynie. Pozytywne rezultaty badań pozwoliły na wykonanie partii doświadczalnej elementów paliwowych do badań certyfikujących typu UE. IPO uzyskał certyfikat i dopuszczenie do stosowania dla użytkowych form paliw do perfogeneratora. Próby otworowe z zastosowaniem nowej konstrukcji urządzenia typu PERFOGENERATOR PRFG-114(2,4mb), w ramach końcowej fazy przemysłowej realizacji projektu, zostały wykonane na kilku odwiertach w regionie Przemysła (III kw. 2017 r.).

**Abstract:** The paper presents the issue of gas fracturing technology in gas mining, which is being used increasingly to boosting oil and gas extraction. The topic is related to the implementation of the NCBIR project under the Applied Research Program No. PBS3 / B2 / 20/2015. The results of the final phase of the project implementation are presented - functionality tests of the perfogenerator models under fail conditions, in the cladding pipe of the borehole in the concrete block, on the IPO blasting target in the Krupski Młyn. The positive results from these tests endorsed the performance of the experimental parts of the fuel elements, for EU-type certification tests. The IPO obtained the certificate and permits for use for practical forms of perfogenerator fuels. The borehole tests with the use of the new structure of the PERFOGENERATOR PRFG-114 (2.4 m), as part of the final industrial phase of the project, were made on several wells in the Przemysł region (Q3 2017).

**Słowa kluczowe:** paliwa wysokoenergetyczne, generator gazowy, perfogenerator

**Keywords:** propellants, gas generator, perfogenerator

## 1. Wprowadzenie

Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej znajdują się na całym świecie i zgromadzone są w różnych rodzajach skał osadowych np. w piaskowcach, wapieniach i łupkach. Wyróżnia się dwa rodzaje występowania gazu i ropy naftowej: konwencjonalne i niekonwencjonalne. Złoża konwencjonalne to węglowodory zgromadzone w naturalnych pułapkach, w skałach porowatych (przepuszczalnych) przykrytych warstwą skał nieprzepuszczalnych, a złoża niekonwencjonalne to węglowodory zgromadzone w skałach nieprzepuszczalnych. Skały porowate takie jak piaskowce charakteryzują się wysoką przepuszczalnością. Małe pory w tej skale są dobrze połączone i umożliwiają swobodny przepływ gazu do miejsca zgromadzenia, z warstwą nieprzepuszczalną od góry. Z takich zidentyfikowanych obszarów gaz można już stosunkowo łatwo wydobywać poprzez wykonanie odwiertu.

Obecnie zasoby złóż niekonwencjonalnych na świecie są prawie dwukrotnie większe niż złóż konwencjonalnych. Mianem złóż niekonwencjonalnych określa się surowce, które wymagają specyficznych technik jego wydobycia. Jest to przede wszystkim gaz łupkowy (ang. *shale gas*), gaz zamknięty (ang. *tight gas*) oraz metan pokładów węgla (ang. *coal bed methane*). Gaz łupkowy to gaz ziemny zgromadzony w skałach łupkowych. W przeciwieństwie do skał przepuszczalnych, łupki nie umożliwiają swobodnego przepływu gazu wewnątrz swojej struktury. Z tego powodu wydobycie gazu z takich skał wymaga stosowania innych technologii – m.in. szczelinowania hydraulicznego, które polega na tworzeniu szczelin łączących pory w skale, dzięki czemu możliwy jest swobodny przepływ gazu [1].

Dotychczas, najbardziej znaną na świecie technologią pozyskiwania węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych, w tym gazu ziemnego z łupków, jest szczelinowanie hydrauliczne. Jest to technologia dobrze ugruntowana i opanowana, wiążąca się jednak z zaangażowaniem znacznych środków technicznych, materiałowych i ludzkich oraz jest stosunkowo droga. Alternatywą do szczelinowania hydraulicznego jest suche szczelinowanie EPS (ang. *Explosive/Propellant System*) wykorzystujące dynamikę spalania paliw stałych. Suche szczelinowanie EPS ma w stosunku do szczelinowania hydraulicznego głównie zalety ekonomiczne i dotyczące mobilności jej stosowania. Technologia gazodynamiczna zajmuje mniej miejsca, wymaga zaangażowania mniejszej liczby pracowników i niewielkiego udziału specjalistycznego sprzętu.

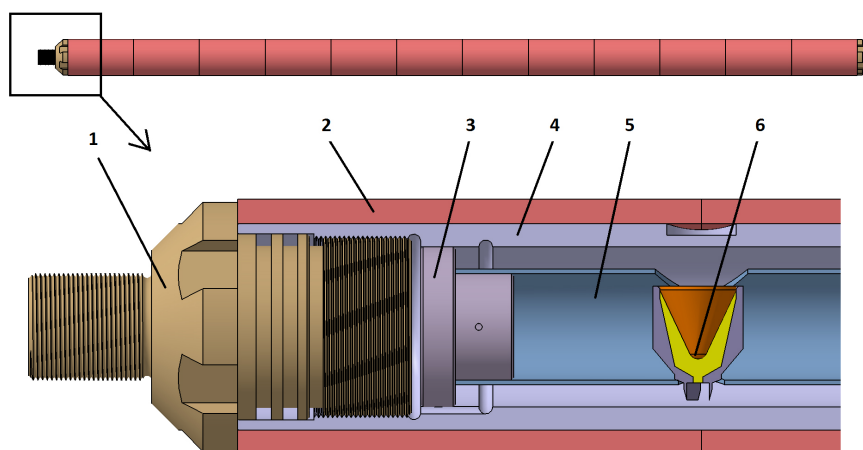
Przedstawione w artykule tematy związane są z realizacją projektu NCBIR w ramach Programu Badań Stosowanych Nr PBS3/B2/20/2015 dotyczącego nowej technologii intensywnego udostępniania złóż za pomocą perfogeneratorów. Projekt realizowany w ramach konsorcjum:

- a) Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy w Krakowie (lider),
- b) Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie – Oddział w Krupskim Młynie,
- c) Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA – Oddział Sanok.

Przedstawiono wyniki badań fazy końcowej realizacji projektu – testy modeli perfogeneratora w warunkach zawodnionych, w rurze okładzinowej atrapy otworu wiertniczego, na poligonie strzałowym IPO w Krupskim Młynie. Pozytywne rezultaty tych badań pozwoliły na wykonanie partii doświadczalnej elementów paliwowych do badań certyfikujących typu UE. IPO uzyskał certyfikat i dopuszczenie do stosowania dla użytkowych form paliw do perfogeneratora.

### 1.1. Nowe rozwiązania – „perfogeneratory”

Metoda dynamicznego oddziaływania na złożę przy użyciu materiałów wybuchowych i paliw wysokoenergetycznych jest technicznie możliwa do wykonania za pomocą kompleksowego urządzenia zwanego perfogeneratorem (rys. 1).



**Rys. 1.** Widok segmentu pefogeneratora: 1 – głowica uszczelniająca, 2 – płaszcz paliwa, 3 – centralizator, 4 – korpus, 5 – zerdź nośna ładunków kumulacyjnych, 6 – ładunek kumulacyjny

Odpalony pefogenerator generuje strumienie kumulacyjne, które perforują złożo uprzednio jednocześnie inicjują proces spalania paliwa. W sensie technologicznym pefogenerator wykonuje dwa zabiegi:

1 – perforacji otworu wiertniczego,

2 – następujące po nim szczelinowanie gazo-dynamicznej formacji trzyotworowej złoża.

Główną zaletą pefogeneratorsa jest możliwość wykonania tych dwóch różnych zabiegów jednym urządzeniem, w jednym procesie technologicznym.

W urządzeniach tych, dla paliwa stałego w formie kształtek pierścieniowych lub tulei, wymaga się zdolności zapłonu w warunkach otworowych, w następstwie zadziałania systemu ładunków kumulacyjnych (faza działania urządzenia jako perforator). W drugiej fazie działania urządzenia – jako generator gazowy następuje spalanie paliwa zawartego w urządzeniu. Paliwo rozmieszczone jest na powierzchni zewnętrznej urządzenia (pefogeneratorsa) w postaci płaszczu rurowego w strefie roboczej.

Dla wykonania niezbędnych badań funkcjonalnych kształtowych ładunków paliwowych w tym zakresie zaplanowano eksperymenty, wykonano odpowiednio partię testową ładunków paliwowych w formie pierścieni i przygotowano odpowiednio stanowiska do badań poligonowych oraz modele pefogeneratorsa do testów.

## 2. Materiały i metody

W przypadku ładunków paliwa kształtowego do pefogeneratorsa, podstawowym wymaganiem jest aby paliwo ulegało zapłonowi na skutek oddziaływania ładunków kumulacyjnych. Wskutek tego, paliwo spalając się gwałtownie w strefie perforacji działa jako generator prochowy, intensywnie szczelinuje wytworzone kanały perforacyjne i strefę złoża.

### 2.1. Wykonania partii próbných paliwa kształtowego w formie pierścieni

Rys. 2 przedstawia widok matrycy do zaprasowywania paliw w postaci segmentów pierścieniowych i widok gotowych paliw kształtowych. Wymiary matrycy umożliwiają prasowanie pierścienia paliwa o wysokości 50 mm, średnicy wewnętrznej 90 mm oraz średnicy zewnętrznej 110 mm.



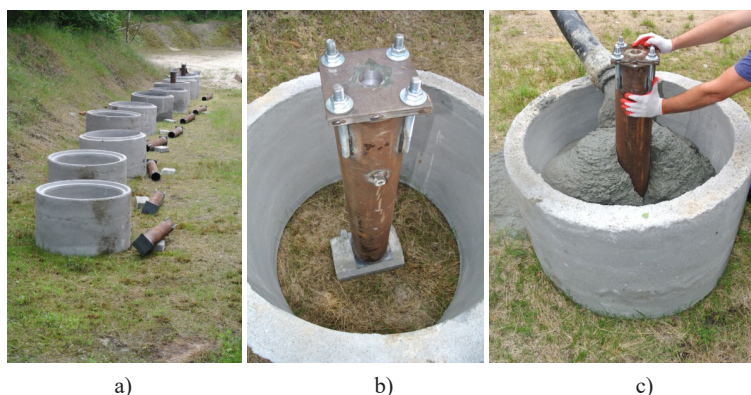
ładunki kumulacyjne perforatora, a których produkty detonacji przebijając paliwo (propelant) inicjują również jego zapalenie. Istotne było jednak zbadanie spodziewanego efektu zapłonu od strumienia kumulacyjnego w warunkach rzeczywistych, gdy na układ (w tym na paliwo) działa odpowiednio duże ciśnienie hydrostatyczne płuczki (woda).

## 2.2. Stanowiska poligonowe do testów perfogeneratora

W kolejnym etapie prac na poligonie Oddziału IPO w Krupskim Młynie, przygotowano 10 stanowisk złożonych z elementów betonowych i stalowych umożliwiających przeprowadzenie badań strzałowych modelowych odcinków perfogeneratora w warunkach symulujących pracę urządzenia w otworze wiertniczym. Zakres prac przygotowawczych obejmował:

- usytuowanie kręgów betonowych na poligonie,
- wykonanie elementów stalowych do rur okładzinowych o długości 1 m, średnicy zewnętrznej około 178 mm i grubości ścianki około 10,5 mm, z zaspawanym szczelnie dnem.

Odcinki rur okładzinowych, symulujących odwiert, miały zaspawane dno i były wyposażone w korki uszczelniające z otworem na złącze elektryczne obwodu odpalającego. Ponadto miały system mocowania pokrywy zamykających oraz króćce na czujnik pomiarowy ciśnienia. Widok kolejnych faz przygotowywania obiektów do badań przedstawia rys. 4.



**Rys. 4.** Badania poligonowe: a) widok stanowisk, b) elementy składowe rury okładzinowej i montaż korka uszczelniającego z pokrywą, c) zalewanie kręgów betonem

Przygotowane w opisany wyżej sposób obiekty do badań strzałowych pozostawiono do sezonowania betonu na okres około 3 miesięcy. Następnie przystąpiono do badań modelowych odcinków perfogeneratora. W badaniach oceniano:

- proces zainicjowania spalania paliwa,
- skuteczność perforacji i szczelinowania na odcinkach imitujących otwór wiertniczy,
- siłę oddziaływania paliwa kształtowego – pierścieniowego poprzez analizę spękań obiektów betonowo-stalowych.

Wyniki badań zapłonu paliwa pierścieniowego stałego stanowiły podstawę do wydania certyfikatu przez WUG w Katowicach.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Badania poligonowe zapłonu paliwa kształtowego-pierścieniowego – badania certyfikujące

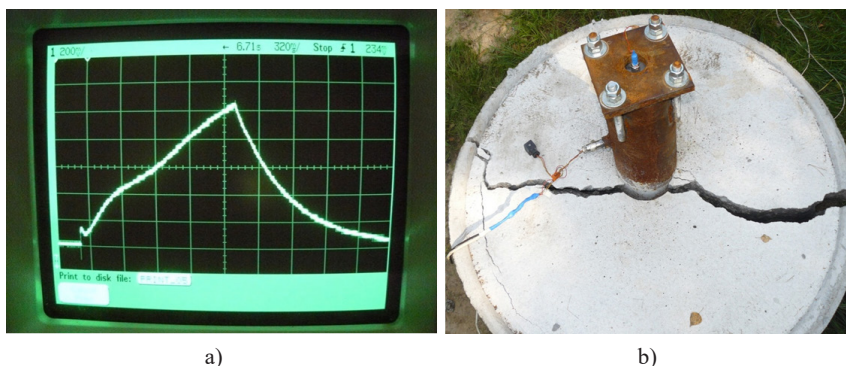
##### Przykład 1. Badanie modelu perfogeneratora w warunkach bez zawodnienia.

Na rys. 5 przedstawiono przygotowanie stanowiska do eksperymentu strzałowego na poligonie.



**Rys. 5.** Stanowisko do testów wersji modelowych nowego urządzenia perforująco-szczelinującego i fazy przygotowań do testu. Widok modelowego odcinka perforatora obok końcówki atrapy otworu wiertniczego oraz etap szczelnego zamknięcia otworu

W wyniku odpalenia modelowego perfogeneratora uzbrojonego w paliwo kształtowe-pierścieniowe o masie 395 g oraz w ładunek kumulacyjny heksogenowy (24 g RDX) z wkładką stożkową miedzianą, nastąpił wzrost ciśnienia i w konsekwencji szczelinowanie obiektu betonowo-stalowego. Podczas badań rejestrowano za pomocą oscyloskopu przebieg ciśnienia. Poniżej, na rys. 6, przedstawiono zrzut obrazu z oscyloskopu rejestrującego przebieg zmian ciśnienia w czasie testu szczelinowania oraz widok modelu otworu wiertniczego po procesie. Większe rozwarście szczeliny nastąpiło w osi działania ładunku kumulacyjnego.



**Rys. 6.** Profil ciśnienia zarejestrowany w trakcie eksperymentu strzałowego (a) i widok szczelin w modelu odcinka otworu wiertniczego (b)

**Przykład 2. Badanie modelu perfogeneratora w warunkach zawodnienia.**

Widok modelu perfogeneratora w fazie przygotowań przedstawia rys. 7.



**Rys. 7.** Przygotowanie modelowego odcinka perfogeneratora do badań w warunkach zawodnienia

Modelowy odcinek perfogeneratora umieszczono w przygotowanym na poligonie betonowym obiekcie, zalewano wodą i szczelnie zamykano odpowiednim korkiem końcówkę odwiertu (rys. 8).



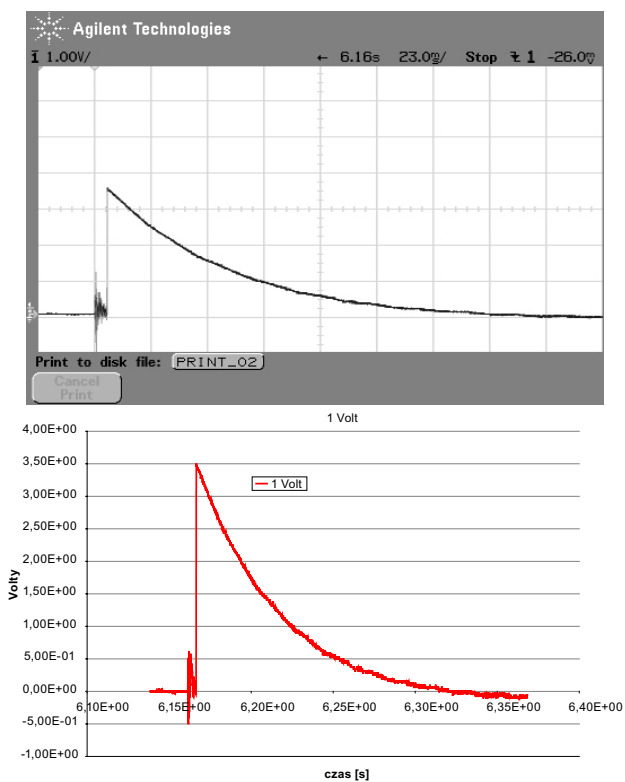
**Rys. 8.** Montaż modelowego odcinka perfogeneratora w betonowym obiekcie z uszczelnieniem zamknięcia odwiertu

Skutek działania modelowego odcinka perfogeneratora w warunkach zawodnienia przedstawia rys. 9. Nastąpiło zainicjowanie działania paliwa pierścieniowego (masa 285 g) oraz jego całkowite spalanie, w rezultacie którego obserwowano szczelinowanie układu, odspojenie betonu od podłoża i rozerwanie kręgu betonowego. Nie uległa zerwaniu pokrywa otworu.



**Rys. 9.** Wynik testu działania modelowego odcinka perfogeneratora w warunkach zawadnienia

Za pomocą piezoelektrycznego czujnika ciśnienia zarejestrowano przebieg zmian ciśnienia w czasie dla badanego układu ładunek kumulacyjny – paliwo. Rys. 10 przedstawia przykładową rejestrację ciśnienia uzyskaną za pomocą oscyloskopu cyfrowego.



**Rys. 10.** Widok zarejestrowanego za pomocą oscyloskopu cyfrowego przebiegu ciśnienia w teście działania zawadnionego perfogeneratora



Zaobserwowano pojawienie się maksymalnego ciśnienia pochodzącego od spalania się paliwa o wartości około 16,7 MPa, a następnie jego spadek wskutek ujścia gazu szczelinami. Czas trwania impulsu fazy dodatniej, pochodzącej od spalania paliwa wynosił około 150 ms.

### 3.2. Badania poligonowe modelowych odcinków perfogeneratora z udziałem przedstawicieli potencjalnych użytkowników (PGNIG Sanok, Geofizyka Toruń S.A.)

Wykonane zostały testy modeli perfogeneratorów z płaszczem paliwa w postaci pierścienia na bazie stałego paliwa kształtowego homogenicznego (Typ ŁB-1). W testach modeli perfogeneratorów zastosowano ładunki z typoszeregu ŁOKT-H-Fe. Cały układ z zewnątrz zabezpieczono przed przedostaniem się wody za pomocą uszczelnień i pokryw zamykających. Kolejne fazy składania elementów perfogeneratora oraz jego umieszczania w rurze okładzinowej imitacji otworu wiertniczego pokazano na rys. 11.



**Rys. 11.** Widok elementów perfogeneratora oraz jego umieszczenie w rurze okładzinowej imitacji otworu wiertniczego

Poniżej przedstawiono wyniki badań dla dwóch kolejnych testów potwierdzających skuteczność działania perfogeneratora. Zarówno w testach 3 i 4, ilustrowanych rys. 12 i rys. 14, nastąpiło całkowite spalanie pierścienia paliwa oraz szczelinowanie układu betonowego – w postaci rozcalenia obiektu betonowego na części. Płaszczyzna pęknięcia betonu pokrywa się z osią działania ładunku perforującego. Nastąpiło odspojenie betonu od podłoża i uległa zerwaniu pokrywa otworu.

**Przykład 3. Test modelu perfogeneratora (1 ŁK+1 pierścień zapłonowy) w warunkach zawodnienia otworu.**

**Rys. 12.** Wynik testu działania modelowego odcinka perfogeneratora w warunkach zawodnienia (test 3)  
– pęknięcie i rozczalenie obiektu betonowego na 2 części

**Przykład 4. Test modelu perfogeneratora (1 ŁK+1 pierścień zapłonowy) w warunkach zawodnienia otworu.**

**Rys. 13.** Wynik testu działania modelowego odcinka perfogeneratora w warunkach zawodnienia (test 4)  
– pęknięcie i rozczalenie obiektu betonowego na 3 części

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione przykłady testów potwierdzają skuteczność ładunków paliw stałych kształtowych w zastosowaniu do perfogeneratora. Potwierdzona została funkcjonalność działania modelowego układu perforującego – szczelinującego w badaniach poligonowych.

Dla wyrobu: Ładunek Prochowy Kształtowy (z paliw stałych typ ŁB1 i MPH) do stosowania na płaszcz paliwowy do nowo opracowanego perfogeneratora, Instytut Przemysłu Organicznego uzyskał Certyfikat – Świadcstwo badania typu UE 1453.EXP.17.0234.

Prezes Wyższego Urzędu Górniczego w Katowicach wydał, odpowiednie dla nowego wyrobu, Świadcstwo nadania numeru identyfikacyjnego materiału wybuchowego przeznaczonego do użytku cywilnego Nr MW-PL-16/17-O\p.

Praca związana jest z realizacją projektu NCBIR w ramach Programu Badań Stosowanych Nr PBS3/B2/20/2015 pt. „PERFO-GENERATOR – Nowa Technologia intensywnego udostępniania złóż za pomocą perfogeneratorów ukierunkowana na zwiększenie szczypania zasobów reszkowych.” Projekt realizowany był w ramach konsorcjum:

- a) Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy w Krakowie (lider),
- b) Instytut Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie,
- c) Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA – Oddział Sanok.

W kolejnym etapie prac, w ramach końcowej fazy przemysłowej realizacji projektu, wykonane zostały na kilku odwiertach w regionie Przemysła (III kw. 2017 r.) próby otworowe z zastosowaniem nowej konstrukcji urządzenia typu PERFOGENERATOR PRFG-114(2,4mb).

#### Literatura

- [1] Frodyma A., Habera Ł. 2013. Zasady oddziaływań fizycznych paliw stałych w środowisku otworu wiertniczego i skał złożonych i ich implikacje dla prac stymulacyjnych. *Materiały Wysokoenergetyczne* 5: 59-79.
- [2] Hadzik J., Koślik P., Wilk Z. 2013. *Badania skuteczności działania ładunków kumulacyjnych i wytypowanej grupy paliw przeznaczonych do intensyfikacji wydobywania ropy i gazu*. Raport nr 10000216, IPO Warszawa/Krupski Młyn.
- [3] Hadzik J., Koślik P., Wilk Z., Frodyma A., Habera Ł. 2014. Badania wstępne wytypowanej grupy paliw o potencjalnych możliwościach ich zastosowania w technologii suchego szczelinowania. *Materiały Wysokoenergetyczne* 6: 5-13.
- [4] Hadzik J., Koślik P., Wilk Z. 2014. *Badania w zakresie modyfikacji paliw przeznaczonych do stosowania w technologii suchego szczelinowania złóż węglowodorów z formacji łupkowych*. Praca statutowa nr EMC 014002213, IPO Warszawa/Krupski Młyn.
- [5] Hadzik J., Koślik P., Wilk Z. 2016. Analiza parametrów termochemicznych oraz badania zapłonu modyfikowanego paliwa heterogenicznego. *CHEMIK* 70 (1): 33-40.

Received: June 25, 2018

Revised: December 28, 2018

Published: December 29, 2018