

# Autonomiczny rejestrator ciśnienia otworowego – konstrukcja i badania sprawnościowe

## *Autonomous downhole pressure recorder – design and performance testing*

*Antoni Frodyma<sup>1)</sup>, Łukasz Habera<sup>1)</sup>, Zenon Wilk<sup>2)</sup>, Piotr Koślik<sup>2)</sup>*

1) Instytut Nafty i Gazu, ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków, Polska

2) Instytut Przemysłu Organicznego, Oddział w Krupskim Młynie,  
ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn, Polska

**Streszczenie:** *Znajomość faktycznego przebiegu zmian ciśnienia zachodzących w trakcie zabiegu szczelinowania gazowego jest wysoce pożądaną informacją z punktu widzenia oceny skuteczności wykonanej pracy, jak również dla efektywniejszego projektowania dalszych zabiegów. W tym celu zespół badaczy INiG i IPO podjął próbę skonstruowania szybko rejestrującego urządzenia pomiarowego, umożliwiającego zapis zmian ciśnieniowych zachodzących w odwiercie naftowym. W niniejszym referacie zostanie przedstawiona konstrukcja wglębnego rejestratora ciśnienia, sposób jego działania oraz pierwsze optymistyczne wyniki prób pomiarowych zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych – otworopodobnych. Przeprowadzone przez autorów próby poligonowe w zbiorniku ciśnieniowym dotyczyły rejestracji przebiegu zmian ciśnienia podczas spalania paliwa prochowego typu „Smaragd”.*

**Abstract:** *Knowledge of the actual pressure changes occurring in the course of treatment of gas fracturing is highly desired information from the point of view of assessing the effectiveness of the work performed, as well as for a more efficient design of further treatments. To this end, the research team of IPO and INiG attempted to construct a autonomous downhole pressure recorder as a measuring device for recording changes of pressure occurring in the petroleum wells. In this article is presented downhole pressure recorder, the way his activities and initial optimistic results of measuring tests realized in the laboratory conditions.*

**Słowa kluczowe:** *zapis ciśnienia otworowego, szczelinowanie gazowe, spalanie paliwa prochowego*

**Key words:** *down whole pressure recorder, gas fracturing, propellants flaming*

## 1. Wprowadzenie

Szczelinowanie ciśnieniem gazów prochowych, jako jeden z zabiegów stymulujących odwiert gazowy/ropny stanowi alternatywę dla zabiegów szczelinowania hydraulicznego [1,2]. Istotą szczelinowania gazowego jest spalanie paliwa w odwiercie powodując radialne spękanie w strefie przyodwiertowej poprawiając tym samym produktywność odwiertu. Liczne prace pokazują, że wysokie ciśnienie generowane przez materiały wybuchowe przekracza granicę plastyczności skały i powoduje poważne zniszczenia otworu wiertniczego. W stymulacji wybuchowej, skały najpierw są szczelinowane a później rozluźniają się elastycznie po przejściu fali naprężeń. Szczelinowanie gazowe pozwala kontrolować czas przyrostu ciśnienia i może być projektowane tak by podnieść ciśnienie w otworze powyżej ciśnienia górotworu i naprężeń rozciągających by wykonać liczne szczeliny, lecz wciąż pozostając poniżej granicy plastyczności skały unikając w ten sposób zniszczenia odwiertu i pozwalając na jego kontakt z powstałymi szczelinami.

## 2. Rejestrator ciśnienia

Przystępując do prac projektowych, w pierwszym rzędzie zdefiniowano założenia techniczno-eksploatacyjne dla modułu. Przyjęto następujące podstawowe parametry [3]:

- Elektroniczny system cyfrowy z pamięcią:  
Autonomiczny, z możliwością odczytu do oscyloskopu cyfrowego lub komputera po wyjęciu modułu z otworu.;
- Czas rejestracji:  
Min. 30 s z rozdzielczością co 1 ms lub dłużej z większą rozdzielczością.;
- Czas pracy w warunkach podwyższonej temperatury do 100 °C:  
Min. 2 h.;
- Zakres ciśnienia:  
Do 100 MPa lub więcej (zależnie od zakresu czujnika ciśnienia).;
- Obudowa modułu w wersji dostosowanej do odwiertu:  
Umożliwiająca połączenia z systemem generatora prochowego lub zestawu perfogeneratora (np. średnica 89 mm).

### 2.1 Moduł rejestratora ciśnienia – wersja modelowa z jednym kanałem pomiarowym

Zespół INiG-IPO wykonał moduł rejestracji ciśnienia w wersji modelowej z jednym kanałem pomiarowym do rejestracji ciśnienia. Dla tej wersji podstawowej modułu rejestratora opracowany został i zrealizowany cykl badań w zakresie odporności na wysoką temperaturę.

### 2.2 Opis techniczny modułu rejestracji ciśnienia

Rejestrator jest urządzeniem elektronicznym charakteryzującym się niewielkimi rozmiarami i masą oraz małym poborem prądu ( $I < 20$  mA).

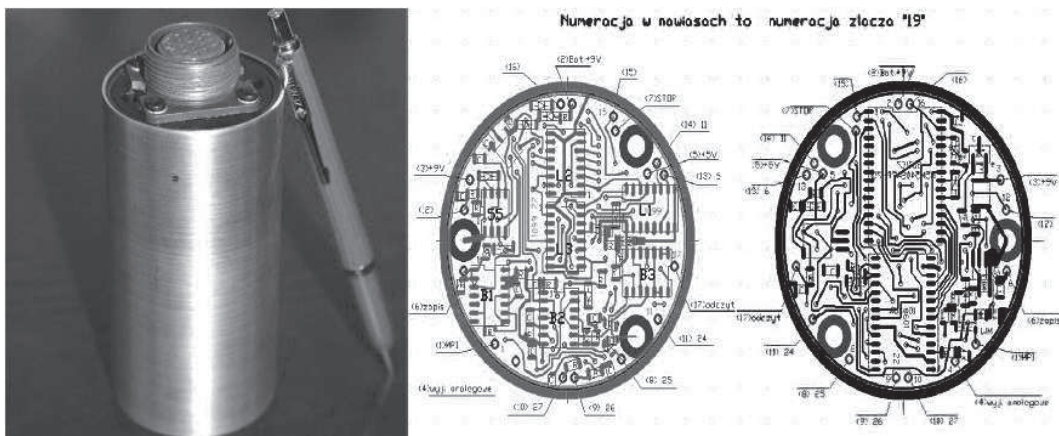
Proces akwizycji i przechowywania wyników pomiarów w postaci przebiegów analogowych polega na ich digitalizacji z krokiem czasowym wynoszącym 250  $\mu$ s dla każdego kanału i z 8 bitową (256 poziomów kwantyzacji) rozdzielczością amplitudy.

Zastosowany krok czasowy pozwala na zapamiętanie i odtworzenie przebiegów jednokrotnych z czasem narastania  $\tau \geq 1$  ms, przy czasie zapisu wynoszącym 32 s.

Z uwagi na fakt, iż rejestrator zawiera w swojej strukturze również układ przetwarzania cyfrowo-analogowego możliwe jest odtworzenie na jego wyjściu (w stanie odczytu) zapisanych i zapamiętanych sygnałów w postaci analogowej. W procesie akwizycji jak i odtwarzania stosowany jest identyczny sygnał zegarowy, zapewniona jest przez to bardzo dobra wierność odtwarzania rejestrowanych sekwencji czasowych sygnału pomiarowego. Wizualizacja i archiwizacja zapisanych sygnałów może być zrealizowana przy użyciu oscyloskopu cyfrowego. W przypadku przenośnego oscyloskopu z zasilaniem bateryjnym możliwe jest również odtworzenie zapisanych sygnałów bezpośrednio w warunkach polowych, po wymontowaniu rejestratora z zestawu pomiarowego.

### 2.3 Konstrukcja rejestratora

Układ elektroniczny rejestratora zmontowany został w technologii montażu powierzchniowego (SMD) na dwustronnie laminowanej płytce drukowanej o średnicy  $\Phi = 46$  mm. Wygląd rejestratora w obudowie, jaki i płytki układu montażowego rejestratora pokazano na rys. 1 i 2.



**Rys. 1.** Widok rejestratora MRC-1 **Rys. 2.** Schemat ideowy czytnika rejestratora MRC-1

Dzięki tak przyjętej konstrukcji obudowy układu elektroniki istnieje łatwa możliwość zwiększenia ilości kanałów rejestracji poprzez zamontowanie w jednej obudowie jedna nad drugą, kilku płytek układowych. Ilość kanałów rejestracji będzie wynosiła wówczas  $4 \times n$  (gdzie  $n$  – ilość zamontowanych płytek układowych). Zmniejszenie częstotliwości generatora zegarowego umożliwia praktycznie dowolne wydłużenie czasu rejestracji. Z uwagi na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz montaż w technologii SMD można przypuszczać, że rejestrator będzie mógł być stosowany również dla pomiarów prowadzonych w trudnych warunkach środowiskowych.

Przedstawione powyżej prace były wykonywane na wersji prototypowej modułu rejestracji ciśnienia jak chodzi o obudowę urządzenia. Równolegle prowadzono prace konstrukcyjne nad zaprojektowaniem obudowy tego urządzenia, która zapewniałaby:

- odporność na ciśnienie statyczne 60 MPa i krótkotrwałe do 90 MPa, z zachowaniem szczelności w tych warunkach ciśnienia i temperatury do 100 °C;
- niezakłócone przejście linii strzałowej, ponieważ moduł rejestracji ciśnienia stanowi elektrycznie odcinek linii strzałowej;
- możliwość osadzenia czujników ciśnienia i temperatury współpracujących z elektroniką w sposób zapewniający ich bezpieczeństwo przy marszach w otworze, oraz łączność z mediami otworowymi zapewniającą niezakłócony pomiar;
- prawidłowe osadzenie zespołu elektroniki rejestratora w sposób chroniący zarazem przed nadmiernym wzrostem temperatury;
- obudowę rejestratora zaprojektowano w sposób przedstawiony na rys. 9.

### 3. Przebieg badań w zbiorniku ciśnieniowym

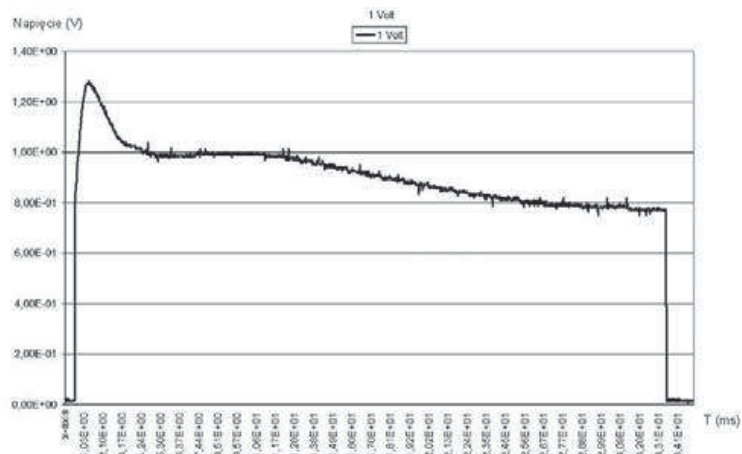
Badanie w zbiorniku wykonano w trzech kolejnych etapach [4÷6]:

- (1) wykonanie rejestracji ciśnień z detonacji ładunku materiału wybuchowego (MW) o masie 16 g, w celu określenia wpływu MW na przebieg procesu zmian ciśnienia w zbiorniku bez zapłonu;
- (2) wykonanie rejestracji ciśnień spalania paliwa typu homogenicznego (oznaczenie - „szmaragd”), zainicjowanego strumieniem kumulacyjnym ŁK;
- (3) wykonanie rejestracji ciśnień spalania paliwa typu złożonego o średnicy 40 mm, (odcinek 100 mm, masa ok. 200 g) w stalowej otoczce, zainicjowanego lontem detonującym (LD) nominalnie przeznaczonym do tego zestawu (heksogenowy, w powłoce metalowej typ LDT-RDX-150, produkcji IPO Krupski Młyn).

Rejestrator autonomiczny w pracach doświadczalnych umieszczony był wewnątrz zbiornika ciśnieniowego w czasie prób zapłonu paliwa. Podstawowym wynikiem doświadczenia było stwierdzenie, iż za każdym razem następowało spalanie paliwa. Otrzymano również przebiegi ciśnienia za pomocą autonomicznego rejestratora umieszczonego wewnątrz zbiornika ciśnieniowego.

### 3.1 Eksperyment pierwszy

W celu określenia wpływu MW na proces rejestracji spalania wykonano w pierwszym etapie eksperyment detonacji ładunku MW o masie 16 g. Wynik w postaci wykresu sygnału z czujnika ciśnienia w czasie przedstawia rys. 3.[6]

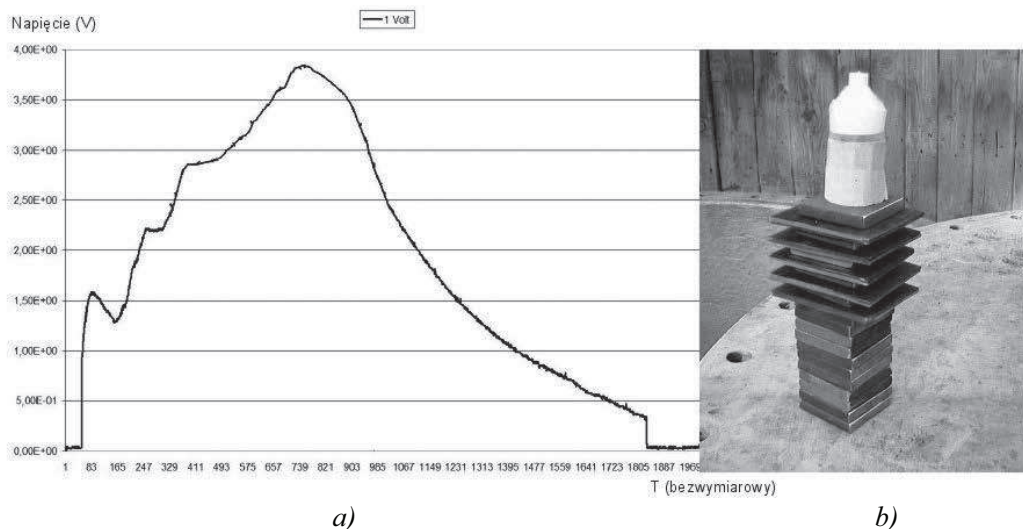


Rys. 3. Rejestracja ciśnienia detonacji ładunku MW – 16 g

### 3.2 Eksperyment drugi

W próbie tej [4] wykonano inicjację paliwa homogenicznego typu szmaragd o łącznej masie 190 g strumieniem kumulacyjnym. W tym celu zastosowano ładunki modelowe o gramaturze 18 g MW w osłonie polipropylenowej z standardową wkładką kumulacyjną prasowaną z proszku miedzi elektrolitycznej.

Układ badawczy obejmował paliwo przekładane na przemian z płytką stalową o grubości 10 mm – rys. 4. Zaobserwowano całkowite spalanie paliwa w zbiorniku. Na wykresie widoczny jest charakterystyczny początkowy pik ciśnienia pochodzący od produktów detonacji ładunku kumulacyjnego.

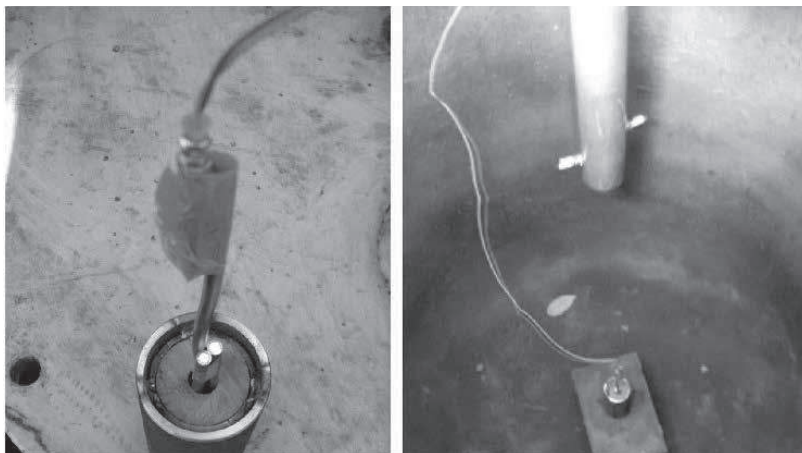


Rys. 4. Wykres rejestracji ciśnienia spalania paliwa homogenicznego typu szmaragd inicjowanego strumieniem kumulacyjnym (a) wraz z widokiem badanego układu (b)

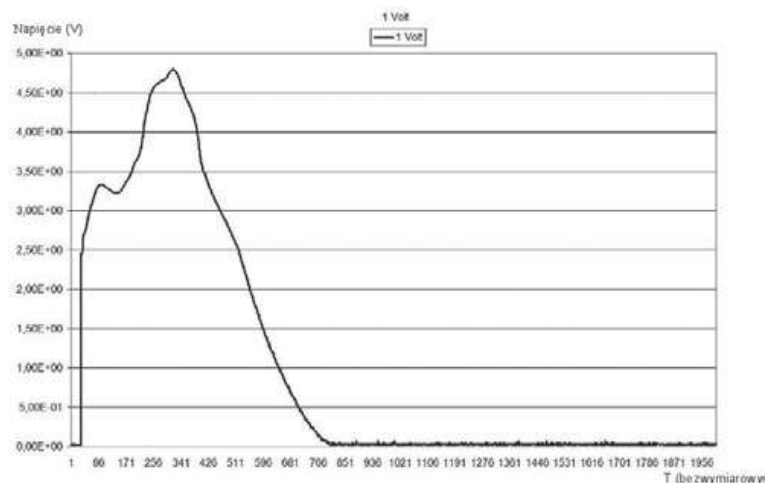
### 3.3 Eksperyment trzeci

W próbie tej dokonano inicjacji paliwa złożonego  $\varnothing$  40mm o masie 200g za pomocą lontu detonującego (LD) przechodzącego przez środek paliwa [4,6]. Zastosowano osłonę stalową na paliwo, która ma symulować warunki ciśnienia zewnętrznego panującego w odwiercie rzeczywistym. Widok przygotowanego zestawu

badawczego przedstawiono na rys. 5. Wynik rejestracji ciśnienia spalania paliwa w trzecim eksperymencie ujęto na rys. 6.



Rys. 5. Widok zestawu do badania zapłonu paliwa złożonego za pomocą lontu



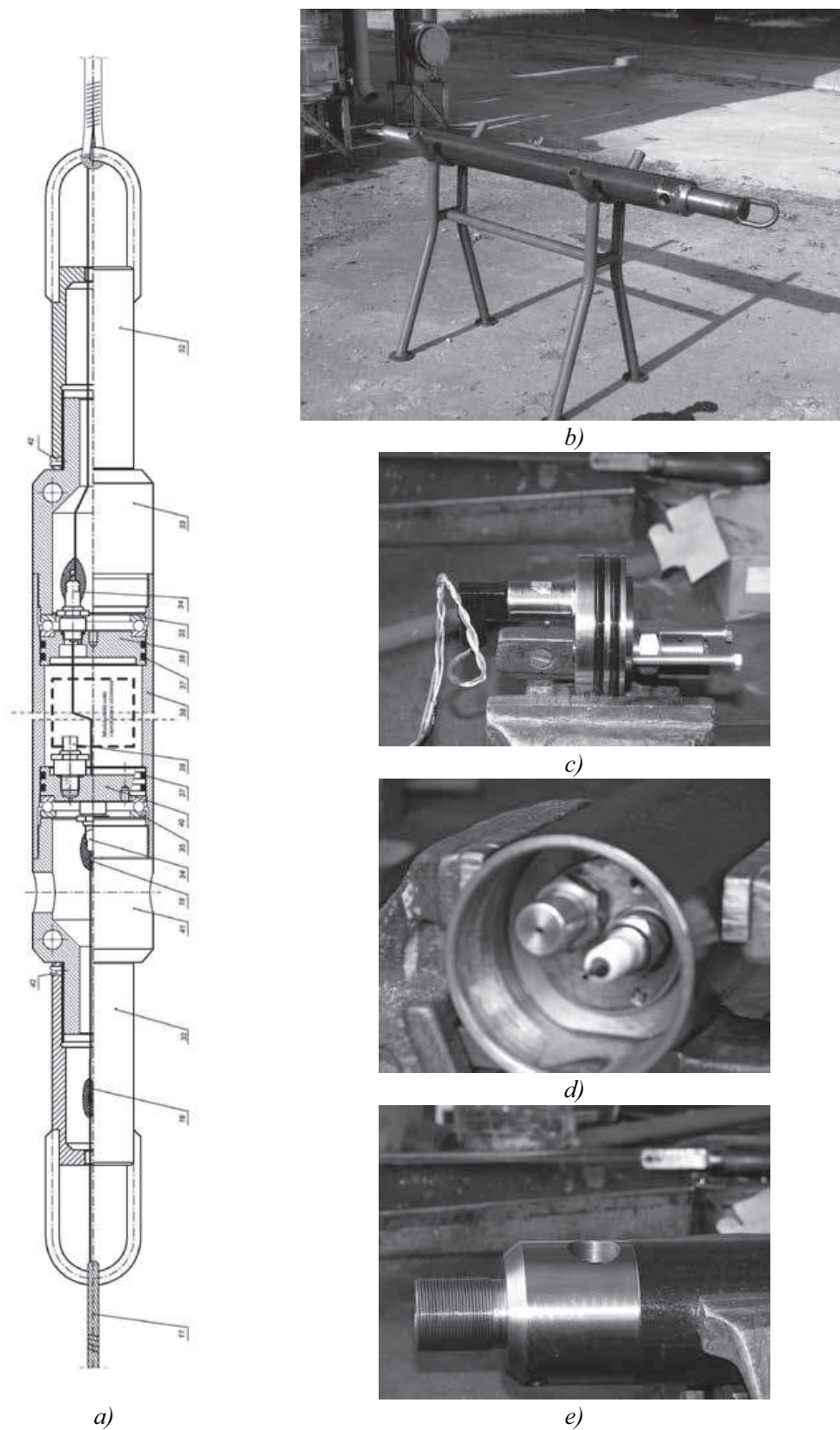
Rys. 6. Wykres rejestracji ciśnienia spalania paliwa złożonego inicjowanego od LD

Zaobserwowano całkowite spalanie paliwa w zbiorniku, jak również charakterystyczny początkowy pik na wykresie ciśnień pochodzący od produktów detonacji LD.

#### 4. Próby rejestracji ciśnienia w warunkach otworopodobnych (stanowisko termobaryczne)

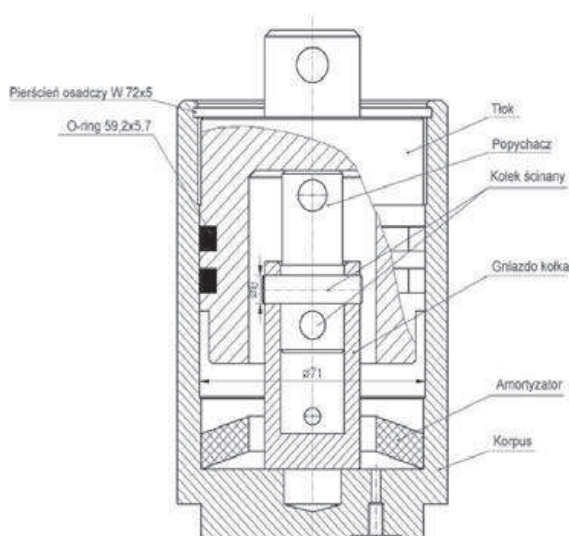
Wykonanie prób rejestracji ciśnienia w warunkach otworopodobnych zaplanowano przeprowadzić na stanowisku termobarycznym INiG w Krakowie [7]. Ma ono formę grubościenną komory stalowej o wymiarach użytecznych przestrzeni badawczej  $L = 2000$  mm,  $\phi = 149$  mm, pracującej w płaszczu olejowym zapewniającym pośredni ogrzewanie i chłodzenie. Komora jest zamykana głowicą z przepustem sygnału elektrycznego (sygnał + masa), medium roboczym jest olej Iterm. W komorze tej można uzyskać parametry robocze  $P = 150$  MPa i  $T = 180$  °C.

Zasadniczym problemem, jaki stanął tutaj przed wykonawcami była metoda wytworzenia impulsu ciśnienia, który miał być mierzony przez rejestrator wewnątrz korpusu komory, w której znajdowałby się już rejestrator w warunkach zadanego ciśnienia i temperatury [8].



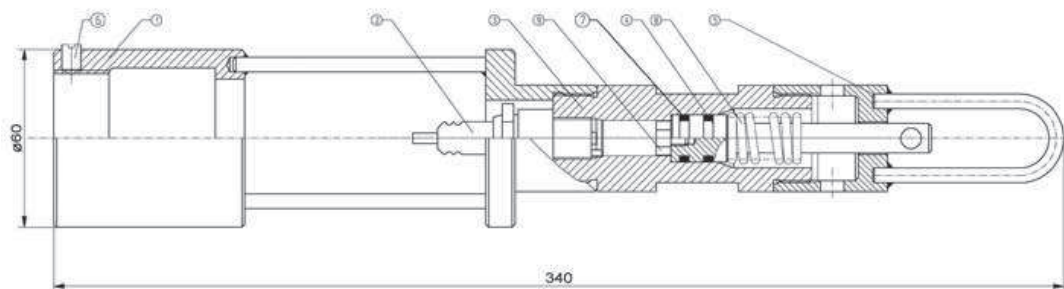
**Rys. 7.** Widok moduły rejestracji ciśnienia w obudowie: a) przekrój poprzeczny kompletnego urządzenia b) korpus zewnętrzny rejestratora, c) wkładka górna, z zamontowanymi czujnikami ciśnienia i temperatury, d) widok wkładki górnej zamontowanej w korpusie rejestratora, e) głowica górna zamontowana w korpusie rejestratora ciśnienia

W pierwszym podejściu zaprojektowano do tego celu urządzenie pracujące na zasadzie ścinania kołka z odpowiednio dobranego materiału – roboczo nazwane impulsatorem. Cała trudność pomiaru polegała na tym, że rejestracja przebiegu ciśnienia uruchamiana jest impulsem typu elektrycznego np. zwarcie/rozwarcie obwodu; sama zaś rejestracja trwa tylko 30 sekund. Zatem zdarzeniu ścinania kołka i związanego z nim ruchu tłoka wywołującego zmianę ciśnienia w komorze mierzonej przez rejestrator musiała jednocześnie towarzyszyć zmiana stanu obwodu wyzwalającego pomiar. Na rys. 8 przedstawiono widok ogólny impulsatora działającego na zasadzie ścinania kołków. Wykonano go w wersji z dwoma otworami na mocowanie kołków, co pozwalało na uzyskiwanie różnych ciśnień ścinania układu przy zastosowaniu 1, 2 kołków i zmiany materiału, z których je wykonywana (molibdenu, aluminium lub stali).



**Rys. 8.** Impulsator z dwoma kołkami ścinanymi. Otwór w korpusie u dołu służy do odpowietrzenia przy montażu i jest zamykany na czasu wykonywania badania

Tak wykonany impulsator okazał się w praktyce niepewny w użytkowaniu, gdyż niepewnie uruchamiał pomiar, a znaczne obciążenia dynamiczne związane ze ścinaniem i uderzaniem elementów wewnętrznych o siebie powodowały szybki zużywanie się jego elementów roboczych i konieczność i ciągłego odtwarzania (co 2-3 pomiary). Z tej przyczyny zdecydowano się wykonać impulsator w wersji pirotechnicznej, który przedstawiono na rys. 9.



**Rys. 9.** Impulsator pirotechniczny do prób rejestracji ciśnienia w warunkach otworopodobnych

Impulsator pirotechniczny zbudowany jest z cylindra (3), który z jednej strony zamknięty jest świecą typu samochodowej (2), zaś z drugiej strony tłokiem (4) uszczelnionym dwoma O-ringami (7). Świeca i tłok tworzą wewnątrz cylindra zamkniętą komorę spalania, w której umieszczona jest główka zapalczą, łączona z obwodem zewnętrznym za pomocą świecy samochodowej. Impuls elektryczny powodujący odpalenie główki zapalczej, a podawany ze zwykłej baterii 9 V, powoduje jednocześnie zapoczątkowanie rejestracji ciśnienia w rejestratorze, wzbudzanej indukcyjnie w momencie zamknięcia obwodu zapalczego. Objętość

wewnętrzną komory spalania można zmieniać poprzez zastosowanie śrub regulacyjnych (9) wkręcanych w tłok od strony komory spalania, o różnej wielkości łba, uzyskując dzięki temu różne skoki tłoka i różne zmiany ciśnienia w zewnętrznej komorze termobarycznej, w której w zadanym ciśnieniu zewnętrznym i temperaturze pracuje rejestrator ciśnienia. Rejestrator jest mocowany do zespołu impulsatora za pośrednictwem tulei (1), zabezpieczanej na głowicy górnej rejestratora wkrętem dociskowym (6). Sprężyna (8) zakładana na trzonek tłoka (4) amortyzuje ruch tłoka ku górze, opierając się na ażurowej głowicy górnej (5) wieńczącej cały przyrząd i umożliwiającej jego zapuszczanie wraz z rejestratorem podwieszonym na tulei (1) do komory termobarycznej. Z uwagi na początkowe trudności związane z poszukiwaniem sposobu wywołania impulsu ciśnienia, pomiary na komorze termo-barycznej zostaną przeprowadzone po ukończeniu trwających obecnie testów kalibracyjnych stanowiska badawczego.

## 5. Podsumowanie

Zespół INiG-IPO z powodzeniem opracował autonomiczny rejestrator ciśnienia. Urządzenie to może rejestrować z bardzo dużą rozdzielczością (o kroku czasowym 250  $\mu$ s) zmiany ciśnienia zachodzące w trakcie zabiegu perforacji otworu wiertniczego czy szczelinowania gazowego formacji skalnej. Na podstawie takich rejestracji możliwe będzie, oprócz potwierdzania poprawności przebiegu zabiegu, gromadzenie danych pozwalających na doskonalenie projektowania przyszłych obróbek. Pierwsze testy poligonowe na zbiorniku ciśnieniowym potwierdzają sprawność urządzenia pomiarowego oraz potwierdzają założony zakres stosowania.

## Literatura

- [1] Frodyma A., Godzik E., Habera Ł., Kostecka A., *Sprzęt i technologie techniki strzelniczej w otworze wiertniczym*. Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2008, 15-18.IX.2008r, Zakopane-Kościelisko, PRACE INiG nr 150, str. 955-960.
- [2] Frodyma A., Habera Ł., Godzik E., *Technika strzelnicza w otworze wiertniczym - kierunki rozwoju*. VI Międzynarodowa konferencja naukowa IPOEX 2009 Materiały Wybuchowe; Badania - Zastosowanie – Bezpieczeństwo, Ustroń 1 – 3.VI.2009r,
- [3] Koślik P., Wilk Z., Habera Ł., Frodyma A. *Badania procesu perforacji kumulacyjnej w zbiorniku ciśnieniowym*. VI Międzynarodowa konferencja naukowa IPOEX 2009 Materiały Wybuchowe: Badania - Zastosowanie – Bezpieczeństwo, Ustroń 1 – 3.VI.2009.
- [4] Koślik P., Habera Ł., *Ocena zdolności inicjowania paliwa wysokoenergetycznego strugą kumulacyjną*. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPOEX 2010, Materiały Wybuchowe - Badania - Zastosowanie – Bezpieczeństwo, Ustroń Zawodzie 7 – 9.VI.2010.
- [5] Koślik P., Wilk Z., Habera Ł., Frodyma A., *Badania zapłonu paliw wysokoenergetycznych stosowanych w perfogeneratorach*. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPOEX 2010, Materiały Wybuchowe - Badania - Zastosowanie – Bezpieczeństwo, Ustroń Zawodzie 7 – 9.VI.2010.
- [6] Wilk Z., Koślik P., Frodyma A., Habera Ł., *Badania ładunków kumulacyjnych z wkładkami reaktywnymi w zbiorniku ciśnieniowym*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, „Techniki udostępniania horyzontów produktywnych”, Szczyrk 18-21.V.2010.
- [7] Frodyma A., Habera Ł., Wilk Z., Koślik P., *Technologia perforacji wspomaganiej operatorem gazodynamicznym z zapisem zjawisk ciśnieniowych towarzyszących zabiegowi za pomocą ultraszybkiego wglębnego rejestratora ciśnienia*. Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2010, 20-23. IX.2010, Zakopane-Kościelisko, PRACE INiG nr 170, str. 929-934.
- [8] Wilk Z., Koślik P., Cieślicka K., Habera Ł., Frodyma A., *Analiza i ocena zdolności inicjacji zapłonu paliw wysokoenergetycznych stosowanych w perfogeneratorach*. Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2010, Zakopane-Kościelisko 20-23.IX.2010, PRACE INiG nr 170, str. 935-941.