



Pomiary echometryczne kavern solnych wypełnionych gazem przy użyciu echosondy CHEMKOP

Echometric surveys of salt caverns filled with gas by means of the Echosonda Chemkop sonar

Mateusz FIGARSKI¹, Tomasz KUBACKA²

¹ Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o.
ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków, e-mail: figarski@chemkop.com,

² Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o.,
ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków, e-mail: kubacka@chemkop.com

STRESZCZENIE

Metoda echometryczna pozwala na pomiar wielkości i kształtu kavernowych podziemnych magazynów gazu. Pomiary ultradźwiękowe w gazie wymagają prawidłowego przystosowania aparatury pomiarowej oraz opracowania odpowiedniej metodyki pomiaru. Dzięki zastosowaniu Echosondy CHEMKOP, do końca 2016 roku z sukcesem wykonano 9 pomiarów echometrycznych kavern zlokalizowanych w złożach soli wypełnionych gazem ziemnym pod ciśnieniem. Skuteczność pomiaru potwierdzona została zarówno przy małych jak i dużych ciśnieniach. Prace zostały zrealizowane w sposób zapewniający pełne bezpieczeństwo w środowisku gazowym przy ciśnieniu głowicowym wynoszącym nawet 21 MPa.

Słowa kluczowe: Echosonda CHEMKOP, pomiary echometryczne, pomiary ultradźwiękowe w gazie, kawerna solna, kavernowe podziemne magazyny gazu, KPMG Mogilno, KPMG Kosakowo.

ABSTRACT

The echometric method allows to measure size and shape of underground cavern gas storages. Ultrasonic measurements in gas require proper adaptation of the measuring apparatus and development of an adequate measurement methodology. By using Echosonda CHEMKOP sonar, till the end of 2016 year, nine echometric measurements of cavern located in salt deposit filled with natural gas under pressure was made with

success. Effectiveness of the measurements was proven both for low and high pressures. Works were performed in a method that ensures full safety in gas environment with the wellhead pressure reaching even 21 MPa.

Keywords: ECHOSONDA CHEMKOP sonar, echometric measurements, ultrasonic measurements in gas, salt cavern, cavern underground gas storages, CUGS Mogilno, CUGS Kosakowo.

WSTĘP

Kawerny solne wypełnione gazem ziemnym ze względu na trudne warunki ich eksploatacji m.in. duże głębokości posadowienia, wysokie ciśnienia i temperatura oraz ich duża zmienność, wielocykliczność zatłaczania i odbioru gazu etc., wymagają okresowych inspekcji celem oceny zmian ich kształtu i objętości w czasie. Dla oceny tych zmian wykonuje się okresowe pomiary ultradźwiękowe przy użyciu specjalistycznej echosondy.

Zakład Geofizyki Górniczej działający w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o. wykonuje pomiary echometryczne od ponad 40 lat w kraju i za granicą. Do niedawna pomiary te obejmowały niemal wyłącznie badania kavern wypełnionych solanką. Dzięki zaprojektowaniu i skonstruowaniu specjalistycznej sondy ultradźwiękowej oraz opracowaniu właściwej metodyki pomiarowej od 2015 roku CHEMKOP wykonuje również pomiary wielkości i kształtu kavern solnych wypełnionych gazem.

W artykule przedstawiono autorską metodykę CHEMKOP wykonywania pomiarów echometrycznych kawern wypełnionych gazem ziemnym, którą opracowano i zastosowano do pomiarów kawern KPMG Mogilno i KPMG Kosakowo, których budowę i eksploatację prowadzi Spółka Gas Storage Poland, a właścicielem jest PGNiG SA.

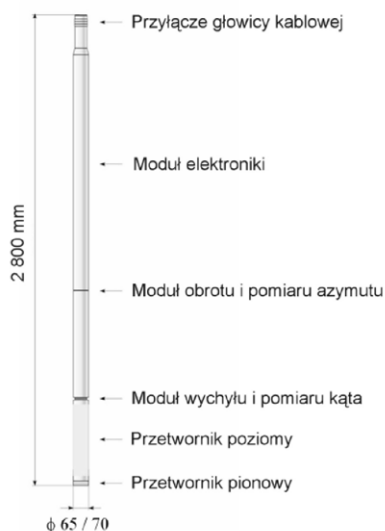
PRZEDMIOT BADAŃ

Do końca 2016 roku z powodzeniem wykonano łącznie 9 pomiarów echometrycznych kawern magazynowych zlokalizowanych w KPMG Mogilno i KPMG Kosakowo wypełnionych gazem ziemnym, charakteryzujących się zróżnicowanym kształtem i objętością geometryczną. Do wykonania takich pomiarów niezbędne było odpowiednie przystosowanie aparatury pomiarowej. Ciśnienia głowicowe badanych komór osiągały wartości do 21 MPa, w związku z tym wykonywanie pomiarów w takich warunkach wymagało stałej kompensacji ciśnienia z zastosowaniem specjalistycznej śluzы ciśnieniowej. W zakresie tych prac współpracowano z Geofizyką Toruń S.A., która posiada wieloletnie doświadczenie, zapewniając tym samym fachowość i pełne bezpieczeństwo.

Specyfika komór magazynowych wypełnionych gazem ziemnym była punktem wyjściowym dla poprawnego zaprojektowania parametrów aparatury pomiarowej jak również dla opracowania odpowiedniej metodyki wykonywanych pomiarów. Z tego względu musiały zostać wzięte pod uwagę takie czynniki jak np.: prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w badanym medium, tłumienie ośrodka, częstotliwość przetwornika ultradźwiękowego, częstotliwość impulsowania, zasięg, rozdzielczość, etc.

PODSTAWY METODY ECHOMETRYCZNEJ

Podstawowym elementem echometrycznego systemu pomiarowego jest Echosonda CHEMKOP (Ryc. 1.). Specjalna



Ryc. 1. Schemat poglądowy Echosondy CHEMKOP
Fig. 1. Schematic diagram of Echosounder CHEMKOP

konstrukcja sondy pomiarowej oraz zastosowanie odpowiedniego magnetostrykcyjnego przetwornika ultradźwiękowego pozwalają na jej zastosowanie do pomiarów kawern wypełnionych zarówno gazem jak i solanką.

Stosowana metoda echometryczna opiera się o wyznaczenie odległości pomiędzy echosondą a ścianą komory. Odległość tę można wyliczyć wykorzystując wzór:

$$R = c \times t / 2$$

gdzie:

R – mierzona odległość [m],

c – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w badanym medium [m/s],

t – czas jaki upłynął pomiędzy nadaniem a odebraniem impulsu ultradźwiękowego [ms].

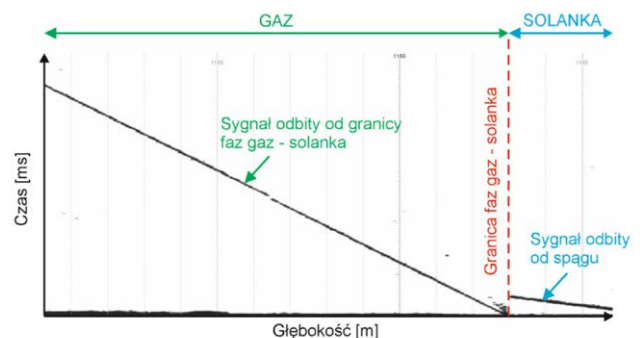
Wyznaczenie prędkości ultradźwięków c jest więc niezbędne do obliczenia drogi R jaką wyemitowany impuls przebywa w czasie t . Czas (w milisekundach) jest mierzony pomiędzy chwilą nadania impulsu a momentem odbioru sygnału odbitego (echa).

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w badanych kawernach magazynowych gazu może znajdować się pewna ilość solanki. Niezbędne jest zatem zmierzenie prędkości propagacji ultradźwięków w obu ośrodkach. W tym celu stosuje się pomiar sondą kalibracyjną lub opracowaną przez CHEMKOP metodą z użyciem echosondy.

Przemieszczając echosondę w górę lub w dół ze stałą prędkością z jednoczesną rejestracją sygnału odbitego od stropu, spągu lub granicy faz gaz – solanka, otrzymuje się echogram z krzywymi. Z nachylenia tych krzywych możliwe jest wyznaczenie prędkości propagacji ultradźwięków w badanym ośrodku (Ryc. 2).

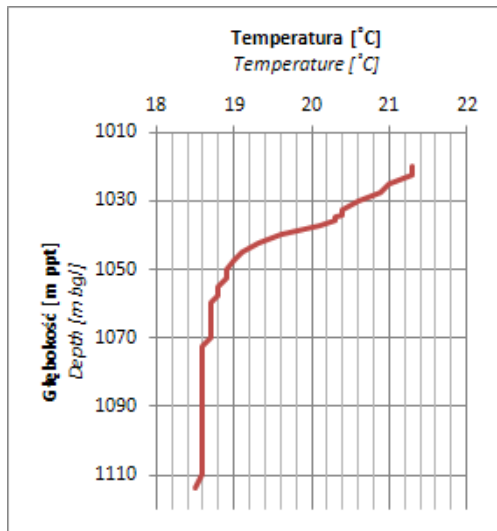
Metodę tę stosuje się również do precyzyjnego określenia głębokości położenia granicy faz podczas przejścia sondy z jednego ośrodka w drugi (Rys. 2).

W pomierzonych kawernach wartości prędkości ultradźwięków w gazie mieściły się w zakresie 445 – 581 m/s. Natomiast w częściach magazynów wypełnionych solanką 1806 – 1822 m/s zmiany prędkości ultradźwięków w danych

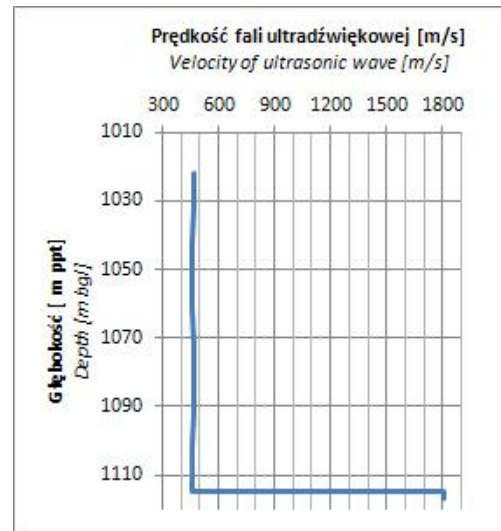


Ryc. 2. Echogram przedstawiający profilowanie wzdłuż osi komory w gazie oraz w solance

Fig. 2. Echogram showing profiling in gas and brine along the chamber axis



Ryc. 3. Profil temperatury
Fig. 3. Temperature Log



Ryc. 4. Profil prędkości fali ultradźwiękowej
Fig. 4. Velocity of ultrasonic wave Log

komorach, wzdłuż ich osi pionowych wynosiły od kilku do kilkunastu m/s.

Wartości temperatury gazu mieściły się w przedziale 18,5 – 57,3 °C, a w solance 22,3 – 50,2 °C. Zmiany temperatur w danych komorach mieściły się w zakresie kilku °C.

Poniżej przedstawiono profil temperatury (Ryc. 3) oraz profil prędkości fali ultradźwiękowej (Ryc. 4), które otrzymano podczas pomiaru jednej z kawern magazynowych.

Przy badaniach echometrycznych prowadzonych w medium gazowym dużym problemem staje się tłumienie, które znacząco wpływa na zasięg tej metody. Przy małych wartościach ciśnienia ośrodku otrzymanie echa z większej odległości może być utrudnione. Dodatkowo tłumienie sygnału wzrasta wraz ze zwiększeniem jego częstotliwości (Jagodziński Z., 1997). Dzięki zastosowaniu przez CHEMKOP przetwornika magnetostrykcyjnego o częstotliwości 47 kHz zarejestrowano, w jednej z mierzonych kawern, echo z odległości 72,5 metrów od ściany komory. Ponadto pomiar od lustra solanki w komorze z niskim ciśnieniem głowicowym rzędu 10,5 MPa, udowodnił, że jest możliwe uzyskanie echa z odległości nawet do 100 m.

Ze względu na niską prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w środowisku gazowym, niezbędne było ustalenie okna czasowego (czas nasłuchu: czas pomiędzy kolejno generowanymi impulsami) o wartości 450 ms, co w teorii, przy prędkości propagacji 445 m/s pozwala na obserwację obiektu usytuowanego w odległości 100 m od przetwornika. Dla większych prędkości zasięg jest odpowiednio większy.

Metoda pomiaru echosondą oparta jest o ciągle nadawanie i odbieranie impulsów ultradźwiękowych przetwornikiem obracającym się wokół własnej osi. Prędkość obrotu, jak również częstotliwość impulsowania będą miały zatem wpływ na pokrycie badanej ściany kawerny.

Przy czasie obrotu wynoszącym 180 sekund i częstotliwości impulsowania 450 ms, impuls generowany jest rzadziej niż co 1° obrotu przetwornika.

Dzięki zastosowaniu głowicy ultradźwiękowej o odpowiednich wymiarach uzyskano wiązkę o pożądanej geometrii. W pionie kąt α rozwarcia wiązki wynosi ok. 2,2°, a w poziomie kąt β wynosi ok. 15°. Wartości tych kątów określają wzory (Hansen R. E., 2012):

$$\alpha \approx \lambda/h \qquad \beta \approx \lambda/d$$

gdzie:

α – kąt rozwarcia wiązki w pionie [°],

β – kąt rozwarcia wiązki w poziomie [°],

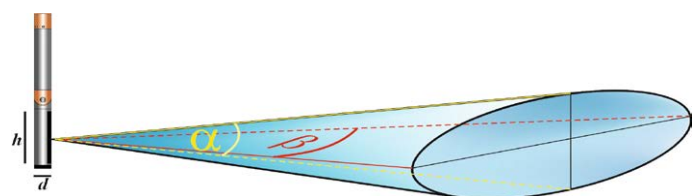
λ – długość fali ultradźwiękowej [m],

h – wysokość przetwornika [m],

d – szerokość przetwornika [m].

Uzyskany horyzontalny kąt rozwarcia wiązki β sygnału (Ryc. 5) zwiększa pokrycie ściany komory w poziomie. Natomiast niewielki wertykalny kąt α (Ryc. 5) wpływa na wysoką rozdzielczość pionową, dzięki której precyzyjnie można określić zmiany kształtu w pionowym profilu kawerny.

Ponieważ pokrycie pionowe zależy od rozwartości wertykalnej wiązki α , do prawidłowego odwzorowania kształtu komory należy ustalić odpowiedni głębokościowy krok pomiaru



Ryc. 5. Kąty rozwarcia wiązki ultradźwiękowej
(α – w pionie; β – w poziomie)

Fig. 5. Angles of the ultrasonic beam (α – vertical; β – horizontal)

rowy. Standardowo wykonuje się profilowania poziome co 5 m i w miarę potrzeb krok ten zagęszcza się – czasem nawet do 0,5 m. Praktyka pokazała, że przy dużej zmienności kształtu kawerny w pionie optymalny krok pomiarowy wynosi 2,5 m. Taka sytuacja ma miejsce najczęściej w komorach usytuowanych w złożach pokładowych (np. KPMG Kosakowo).

METODYKA POMIARÓW ECHOMETRYCZNYCH

Otrzymanie zadowalających wyników pomiarów echometrycznych w kawernach magazynowych gazu było rezultatem odpowiedniego przystosowania aparatury oraz zastosowania autorskiej metodyki pomiarowej. Prace prowadzone były w ściśle określonej kolejności.

Pierwszym etapem jest dowiązanie pomiaru głębokości do buta rur kolumny cementowanej, przy zastosowaniu sondy CCL lub echosondy.

Następnie wykonuje się profile pionowe pozwalające na wstępną ocenę kształtu komory. Profilowania te przeprowadza się przemieszczając sondę w pionie z równoczesnym nadawaniem i rejestracją sygnału. W trakcie profilowania pionowego głowica przetwornika nie wykonuje obrotu.

Kolejnym etapem są profilowania określające rozkład prędkości ultradźwięków wzdłuż pionowej osi komory.

Etapem zasadniczym badania echometrycznego jest umieszczenie sondy na zadanej głębokości. Dalej wykonuje się profilowanie poziome, czyli pełny obrót głowicy pomiarowej z ciągłym emitowaniem sygnału ultradźwiękowego i rejestracją sygnału odbitego od ściany kawerny (Ryc.8). W efekcie otrzymuje się echogram czyli obraz kawerny w przekroju poziomym.

W celu stabilizacji temperaturowej modułu pomiarowego, precyzyjny pomiar temperatury wykonuje się dopiero po zakończeniu profilowania poziomego. Rozdzielczość pomiaru temperatury wynosi 0,1 °C.

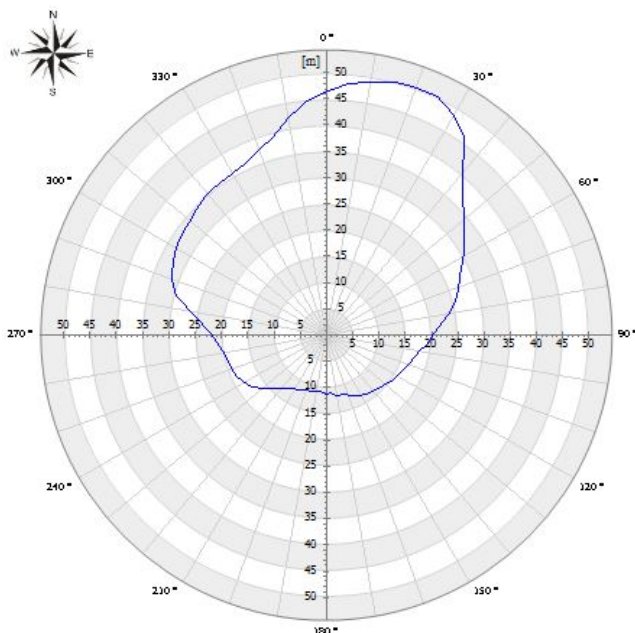
Następnie sondę przemieszcza się na kolejne poziomy o zadany krok głębokościowy, na których wykonuje się profilowania poziome oraz pomiary temperatury.

Interpretacja otrzymanych echogramów (Kościszko M., Rałowicz B., 2010) oraz złożenie wszystkich poziomów pozwala przedstawić wstępny obraz komory, a otrzymane wartości temperatury z poszczególnych poziomów wykreślają profil temperaturowy wzdłuż jej osi pionowej (Ryc. 3).

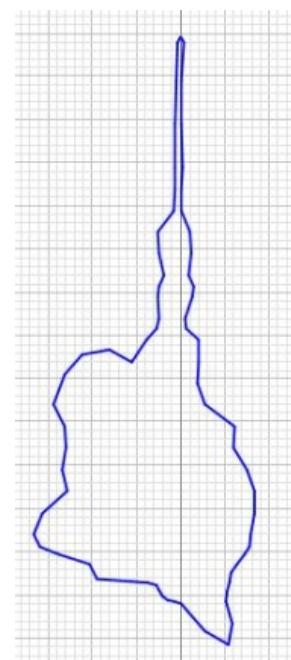
Dla pełnego przedstawienia rzeczywistego obrazu komory niezbędne jest także opomiarowanie jej fragmentów w płaszczyźnie pionowej. W tym celu wykonywane są profilowania poziome z zadanej głębokości, tzw. bazowej, przy użyciu wychylnej głowicy pomiarowej w zakresie kątów $-90^{\circ} \div +90^{\circ}$. Jest to etap szczególnie ważny w komorach zlokalizowanych w złożach wysadowych, gdzie często występują rozłogowania o rozmaitych kształtach, tzw. kieszenie (Kunzman A. i in., 2002). Dzięki wychylnej głowicy pomiarowej otrzymywany jest obraz ewentualnie występujących podługowań oraz części stropowej (kąty $0^{\circ} \div +90^{\circ}$), jak również części spągowej kawerny (kąty $0^{\circ} \div -90^{\circ}$).

Interpretacja echogramów z głębokości bazowych oraz połączenie tych wyników z wcześniejszymi wynikami profilowań poziomych dają pełny obraz pomierzonej kawerny (Ryc. 7 i 9).

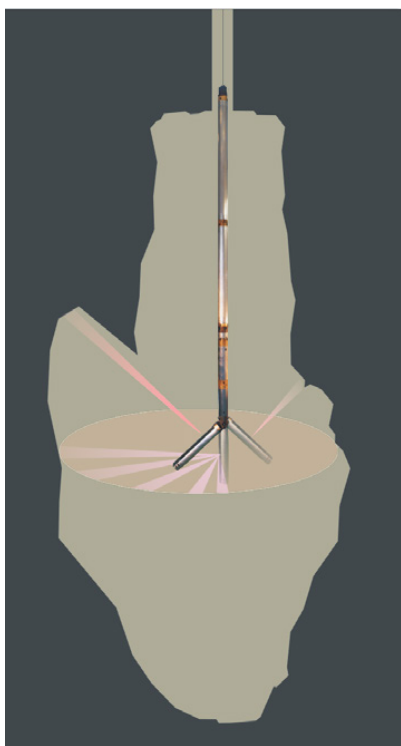
Dodatkowo wykonując echometryczne profilowanie pionowe wyznaczana jest głębokość granicy faz gaz – solanka z rozdzielczością pomiarową 0,1 m.



Ryc. 6. Przekrój poziomy kawerny
Fig. 6. Horizontal section of cavern



Ryc. 7. Przekrój pionowy kawerny
Fig. 7. Vertical section of cavern



Ryc. 8. Idea pomiaru echometrycznego kawerny
Fig. 8. Idea for the cavern echometric measurement

PODSUMOWANIE

Wykonane pomiary potwierdziły skuteczność metody echometrycznej stosowanej przez CHEMKOP dla określenia wielkości i kształtu podziemnych kawern wypełnionych gazem ziemnym pod ciśnieniem.

Parametry techniczne echosondy CHEMKOP pozwoliły na rejestrację sygnału z odległości 100 m, nawet przy niższych ciśnieniach rzędu 10,5 MPa. Wykonanie pomiaru jest bezpieczne pod względem zachowania pełnej szczelności układu nawet przy wysokim ciśnieniu rzędu 21 MPa.

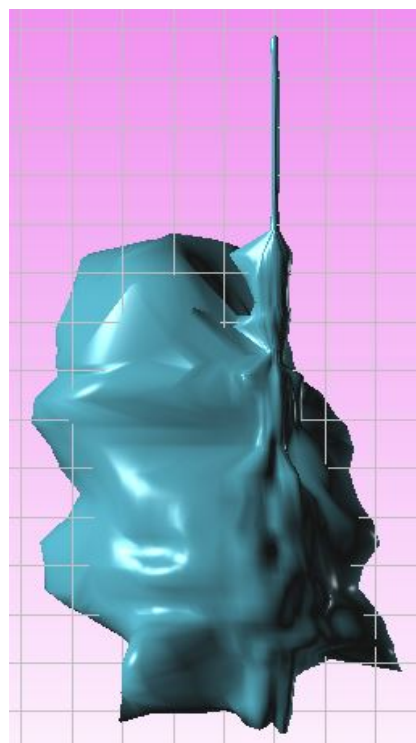
Geometria generowanej wiązki sygnału ultradźwiękowego wpływa na rozdzielczość pomiarową. W części kawerny wypełnionej gazem rozdzielczość ta jest znacznie wyższa niż w części wypełnionej solanką. Wysoka rozdzielczość pomiarowa oraz opracowana metodyka umożliwiają dokładne odwzorowanie kształtu i wymiarów badanej kawerny.

Metoda ultradźwiękowa pozwala również na precyzyjny pomiar położenia granicy faz gaz – solanka.

SUMMARY

The performed surveys proved effectiveness of the echometric method used by CHEMKOP to determine size and shape of the underground cavern filled with pressurized natural gas.

The ECHOSONDA CHEMKOP sonar technical parameters allowed to register signal from a distance of 100 m, even at lower pressure of 10.5 MPa. Measurements are safe even at high pressure of 21 MPa.



Ryc. 9. Widok 3D kawerny
Fig. 9. 3D view of cavern

Geometry of the generated ultrasonic signal beam influences the measurement resolution. In the part of cavern that is filled with gas, this resolution is much higher than in the part that is filled with brine. The high measurement resolution and developed method allow to precisely depict shape and dimensions of the examined cavern.

The ultrasonic method also allows to precisely measure location of the gas – brine phases boundaries.

PODZIĘKOWANIE

Dzięki wsparciu oraz udostępnieniu kawern magazynowych do pomiarów echometrycznych przez firmę GSP Sp. z o.o., zebrano niezbędne doświadczenie oraz uzyskano wyniki, które stanowią podstawę do dalszego rozwoju zarówno aparatury jak i metodyki pomiarowej.

Składamy podziękowania firmie GSP Sp. z o.o. oraz PGNIG SA za możliwość wykorzystania materiałów, które pozwoliły na sporządzenie niniejszego artykułu.

LITERATURA

- JAGODZIŃSKI Z., 1997. *Przetworniki ultradźwiękowe*. Warszawa, 1997.
- KOŚCIUSZKO M., RAŁOWICZ B., 2010. *Automatyczna interpretacja kształtu kawern mierzonych Echosondą Chemkop*. *Geologia*, 2010, 36 (3): 439-449.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2002. *Zarys otworowego ługownictwa solnego*. Kraków, 2002.
- HANSEN R.E., 2012. Course material to INF-GEO4310, University of Oslo, September 26, 2012.