



Badania szczelności w kawernach solnych w Kanadzie

Salt cavern Mechanical Integrity Testing (MIT) in Canada

Piotr KUKIAŁKA

CBW Engineering, 700, 435- 4th Ave SW, Calgary, Alberta, T2P 3A8, Canada; piotr@cbweng.com

STRESZCZENIE

Głównym celem badań szczelności (MIT) kawern solnych (kawerny magazynowe oraz do składowania odpadów) przeprowadzanych w Kanadzie jest pokazanie, że magazynowany/składowany produkt jest bezpieczny i jego migracja na powierzchnię terenu lub do innych formacji geologicznych nie jest możliwa. Szczegółowe zalecenia dotyczące MIT zostały określone przez Canadian Standard Association (CSA). Badania szczelności zgodnie z zaleceniami CSA przeprowadzane są z użyciem sprężonego azotu. Zgodnie z regulacjami prawnymi, pierwsze badanie szczelności musi być przeprowadzone po zakończeniu procesu ługowania. Pozytywny wynik MIT jest warunkiem koniecznym do otrzymania koncesji na eksploatację kawerny. Czas pomiędzy kolejnymi testami szczelności nie może być dłuższy niż pięć lat. Zalecany przebieg badań jest opublikowany w biuletynie Z341-14 wydanym przez Canadian Standards Association. W artykule zamieszczono opis przygotowania kawerny do testów szczelności, sposób wykonania testów i interpretację wyników.

Słowa Kluczowe: kawerny solne, kawerny magazynowe, kawerny do składowania odpadów, szczelność kawern, Canadian Standards Association, Z341-14, Kanada

ABSTRACT

The purpose of the salt cavern (storage and disposal) Mechanical Integrity Test (MIT) is to prove that the product stored in the cavern is safe and its leak into the surface or another geological formation is not possible. It is a pressure nitrogen/brine interface type test. Detailed recommendations concerning MIT were described by Canadian Standards Association (CSA). According to CSA, the first test must be done at the end of the cavern mining process and with use of compressed

nitrogen. Positive result of MIT is necessary to obtain license for the cavern service. The test must be repeated every five years. The full recommended test procedure is published in bulletin Z341-14 of Canadian Standards Association. In this paper, caverns preparation for MIT was described as well as practical application of test procedures and results interpretation.

Key words: salt caverns, storage caverns, disposal caverns, cavern integrity, Canadian Standards Association, Z341-14, Canada

WSTĘP

Zgodnie z obowiązującą w Kanadzie procedurą, po zakończeniu procesu ługowania każdą kawernę magazynową i przeznaczoną do składowania odpadów poddaje się testowi szczelności (MIT). Celem tych badań jest stwierdzenie szczelności kawerny jako całości, ze szczególnym wyróżnieniem jej podstawowych komponentów takich jak: głowica, ostanina kolumna zacementowanych rur produkcyjnych wraz z jej butem, oraz wisząca kolumna rur eksploatacyjnych. Pozytywne wyniki testów szczelności są głównym warunkiem otrzymania koncesji na eksploatację każdej kawerny. Jedynym wyjątkiem są kawerny przeznaczone do produkcji solanki, dla których badania szczelności nie są wymagane. Obowiązek przeprowadzenia badań szczelności wynika z przepisów prawnych: kawerny magazynowe i do składowania odpadów podlegają przepisom obowiązującym w przemyśle naftowym, a kawerny do produkcji solanki przepisom dotyczącym przemysłu górnictwa. Ponadto, przekształcenie wyeksploatowanej kawerny do produkcji solanki na kawernę magazynową wymusza sprawdzenie jej szczelności. Z tego powodu, firmy produkujące solankę, jeśli chcą w przyszłości sprzedać wyeksploatowane kawerny firmom zajmującym się

składowaniem odpadów, muszą przestrzegać wyższych standardów obowiązujących w przemyśle naftowym.

WYMAGANIA PRAWNE DOTYCZĄCE SZCZELNOŚCI KAWERN ORAZ METOD BADANIA

Szczegółowe zalecenia dotyczące badań szczelności zostały określone przez Canadian Standard Association i opublikowane w biuletynie Z341-14 „Storage of hydrocarbons in underground formations” dla kawern magazynowych oraz Z341.4-14 „Salt cavern waste disposal” odnośnie kawern do składowania odpadów.

CZĘSTOTLIWOŚĆ WYKONYWANIA BADAŃ SZCZELNOŚCI

Częstotliwość badań szczelności w kawernach magazynowych oraz do składowania odpadów jest ściśle określona w biuletynie Z341-14. Pierwsze badanie szczelności musi być wykonane po zakończeniu procesu ługowania kawerny, jako warunek otrzymania koncesji na jej eksploatację. W okresie późniejszym czas pomiędzy testami nie może przekroczyć pięciu lat. Instrukcja określa również, że w wypadku nieprzewidzianych sytuacji, takich jak utrata składowanego produktu, za wysokie lub za niskie ciśnienie w kolumnie eksploatacyjnej wymaga przeprowadzenia dodatkowych testów szczelności.

TESTY SZCZELNOŚCI

W chwili obecnej tylko metoda testowania szczelności kawern z użyciem medium gazowego jest akceptowana przez kanadyjskie instytucje rządowe. Canadian Standards Association zaleca wykorzystanie do tych testów azotu. Podczas tego testu, badana jest szczelność głowicy, kolumny rur wiszących oraz zacementowanych rur produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem cementacji buta rur (Ryc. 1). Podczas testów do przestrzeni pomiędzy zacementowanymi rurami a pierwszą kolumną rur wiszących zatłaczany jest azot. W trakcie testu granica pomiędzy azotem a solanką znajduje się poniżej cementacji buta rur. Test polega na badaniu zmian położenia tejże granicy.

DANE POCZĄTKOWE:

- Dane dotyczące ostatniej zacementowanej kolumny rur: średnica wewnętrzna oraz zewnętrzna, ciężar właściwy, typ oraz głębokość posadowienia
- Dane dotyczące kolumn rur wiszących: średnica wewnętrzna oraz zewnętrzna, ciężar właściwy oraz typ
- Maksymalne dopuszczalne ciśnienie w punkcie zacementowania ostatniej kolumny rur eksploatacyjnych.

$$p^{max} = p^{geo} = 18.1 \text{ kPa/m} \times D$$

p^{max} – maksymalne dopuszczalne ciśnienie na głębokości buta rur produkcyjnych (kPa)

p^{geo} – ciśnienie geostatyczne na głębokości buta rur produkcyjnych (kPa)

D – głębokość bezwzględna buta rur (m)

Bardzo często przyjmuje się podczas badań MIT, że ciśnienie p^{max} równa się maksymalnemu ciśnieniu operacyjnemu (Maximum Operating Pressure)

- Maksymalne ciśnienie operacyjne w punkcie zacementowania ostatniej kolumny rur eksploatacyjnych (Maximum Operating Pressure).
- Maksymalne ciśnienie podczas testu szczelności w punkcie zacementowania ostatniej kolumny rur eksploatacyjnych

$$p_{test}^{max} = p^{max} \times 1.1$$

p_{test}^{max} – maksymalne ciśnienie podczas testu w punkcie zacementowania ostatniej kolumny rur (kPa)

p^{max} – maksymalne dopuszczalne ciśnienie eksploatacyjne buta rur produkcyjnych (kPa),

przy czym nie może przekroczyć 80% ciśnienia szczelnowania na danej głębokości oraz 100% ciśnienia niszczącego kolumnę rur eksploatacyjnych.

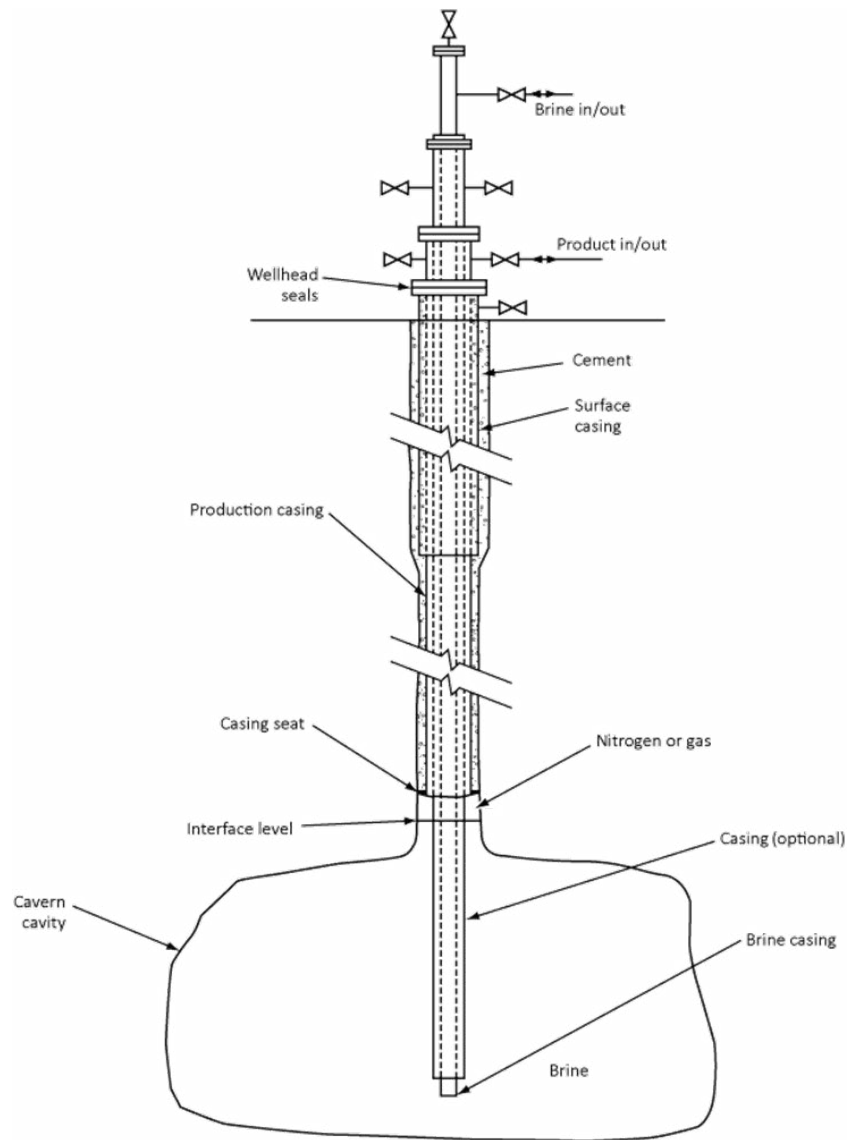
- Ilość azotu wymagana do testu.
- Ciśnienie azotu na głowicy.
- Ciśnienie solanki na głowicy.

PRZYGOTOWANIE KAWERNY DO TESTÓW SZCZELNOŚCI

Testy szczelności mogą być przeprowadzane jedynie w kawernach, w których nastąpiło ustabilizowanie ciśnienia. W szczególności dotyczy to nowo ługowanych kawern oraz kawern już eksploatowanych, do których zatłaczana była solanka o niskim stężeniu lub słodka woda. Po zakończeniu procesu zatłaczania medium ługującego, kawerna pozostaje w stanie stabilizacji/spoczynku. W tym okresie w kawernie nadal zachodzi proces ługowania skały solnej, którego tempo maleje wraz ze wzrostem nasycenia solanki NaCl. Różnica objętości solanki względem wyługowanej skały solnej jest sukcesywnie uzupełniana poprzez zatłaczanie do kawerny w pełni nasyconej solanki. Tempo zatłaczania solanki nie powinno przekroczyć tempa wzrostu ciśnienia w kawernie (max. 20 kPa/min). Proces stabilizacji trwa do momentu, kiedy dzienny spadek ciśnienia w kawernie jest mniejszy od 70 kPa (Cicchini 2015). Po osiągnięciu tej wartości kawerna jest gotowa do testu szczelności.

PRZEBIEG TESTU

Po ustabilizowaniu się ciśnienia w kawernie, świadczącego o prawie całkowitym nasyceniu solanki znajdującej się w kawernie, wykonywany jest pomiar wielkości kawerny sondą echometryczną, oraz mierzony jest profil temperatury w kawernie od głowicy do głębokości przynajmniej 15 m poniżej spodziewanej końcowej granicy solanka/ azot. Po dokonaniu



Ryc. 1. Schemat testu szczelności w kawernie solnej (CSA Z341 Series-14)
Fig. 1. Mechanical integrity test reference diagram (CSA Z341 Series-14)

niu tych pomiarów przystępuje się do zatłaczania azotu do otworu. Azot zatłaczany jest do przestrzeni pomiędzy ostatnią kolumną zacementowanych rur produkcyjnych, a kolumną rur wiszących. Podczas tego procesu, za pomocą metod geofizycznych, wykonywane są rutynowe pomiary głębokości zwierciadła solanki. Dokładnie notowana jest również ilość zatłaczanego azotu. Zwierciadło solanki jest sukcesywnie obniżane, aż jego poziom znajdzie się poniżej buta zacementowanych rur produkcyjnych. Po obniżeniu zwierciadła solanki poniżej buta rur produkcyjnych i dokładnego określenia jego głębokości, wykonuje się kolejny pomiar temperatury. Po tym pomiarze, kawerna jest pozostawiona na okres nie krótszy niż 24 godziny, (zazwyczaj pomiędzy 48 a 72 godziny). W tym czasie dokładnie monitorowane i zapisywane jest ciśnienie na głowicy otworu azotu i solanki. Następnie, po raz kolejny przeprowadza się pomiar głębokości zwierciadła solanki oraz temperatury.

Ostatnim etapem badań szczelności jest wykonanie obliczeń zmian objętości azotu. Obliczenie dokładnej objętości azotu jest niezbędne do określenia przyczyn zmian ciśnienia takich jak temperatura, rozpuszczanie soli lub jej płynięcie, które powodują zmiany objętości otworu i kawerny.

OBLICZENIA

• Objętość jednostkowa otworu

Objętość azotu potrzebną do wykonania testów szczelności można obliczyć na dwa sposoby. Pierwsza metoda polega na wstępnym obliczaniu objętości przed rozpoczęciem testu. Objętość otworu od głowicy do buta rur zależy od średnicy wewnętrznej zacementowanej kolumny rur eksploatacyjnych oraz od zewnętrznej średnicy ostatniej kolumny rur wiszących. Ponadto, objętość ta poniżej buta rur obliczana jest na podstawie wyników badań echometrycznych sonarem lub na podstawie otworowego profilowania średnicy.

Druga metoda jest metodą empiryczną polegającą na wypompowaniu określonej objętości azotu i zbadaniu poziomu zwierciadła solanki w otworze.

$$V = \frac{\text{azot (m}^3\text{)}}{\text{głębokość (m)}}$$

V – Objętość jednostkowa otworu (m³/m)

• Czas trwania testu integralności rur produkcyjnych

Do obliczania czasu potrzebnego do stwierdzenia integralności rur produkcyjnych stosuje się poniższy wzór

$$T = \frac{V \times R \times 365 \text{ dni/rok} \times 24 \text{ godzin/dzień}}{16\text{m}^3/\text{rok}}$$

T – Czas trwania testu (godziny)

V – Objętość jednostkowa otworu (m³/m)

R – Minimalna rozdzielczość sondy badającej poziom zwierciadła solanki (m)

• Minimalny czas trwania testu wymaganego do obliczenia minimalnego wykrywalnego ubytku azotu (*Minimum Detectable Leak Rate- MDLR*)

Poniższy wzór stosowany jest do obliczenia czasu trwania testu szczelności, dla którego wartość Minimum Detectable Leak Rate może być niższa od 160m³/rok.

$$T = \frac{V \times R \times 365 \text{ dni/rok} \times 24 \text{ godzin/dzień}}{160\text{m}^3/\text{rok}}$$

T – Minimalny czas trwania testu (godziny)

V – Objętość otworu (m³/m)

R – Minimalna rozdzielczość sondy badającej poziom zwierciadła solanki (m)

• Minimalny wykrywalny ubytek azotu (*Minimum Detectable Leak Rate – MDLR*)

Do obliczenia Minimum Detectable Leak Rate (MDLR) służy poniższy wzór

$$MDLR = \frac{V \times R \times 365 \text{ dni/rok}}{T}$$

MDLR – Minimum Detectable Leak Rate

T – Czas trwania testu (dni)

V – Jednostkowa objętość otworu (m³/m)

R – Minimalna rozdzielczość sondy badającej poziom zwierciadła solanki (m)

• Szybkość ubytku azotu (*Calculated Nitrogen Leak Rate – CNLR*)

Wzór ten jest używany do obliczania Calculated Nitrogen Leak Rate (CNLR)

$$CNLR = \frac{1}{T} \times \left[V_s - \frac{P_f \times V_f}{P_s} \right] \times 365 \text{ dni/rok}$$

CNLR – Calculated Nitrogen Leak Rate

T – Czas trwania testu (dni)

V_s – Objętość azotu na początku testu (m³)

V_f – Objętość azotu na końcu testu (m³)

P_s – Ciśnienie azotu na początku testu (kPa)

P_f – Ciśnienie azotu na końcu testu (kPa)

INTERPRETACJA WYNIKÓW

W praktyce przyjmuje się, że wynik testu będzie pozytywny i wykaże szczelność kawerny, jeżeli głębokość lustra solanki jest taka sama w obu pomiarach tj. zaraz po zatłoczeniu azotu oraz po zakończeniu testu. Jednak w zależności od sytuacji panującej w kawernie, różnica do 30 cm jest akceptowalna (CSA Z341). Natomiast, jeżeli opisana różnica wynosi jeden metr lub więcej wskazuje na nieszczelność kawerny.

Wśród najczęściej spotykanych objawów nieszczelności kawerny można wymienić:

- nieszczelność kolumny rur wiszących – wzrost ciśnienia solanki oraz obecność w niej azotu;
- nieszczelność zacementowanej kolumny rur produkcyjnych oraz cementacji buta tychże rur – spadek ciśnienia azotu oraz solanki przy jednoczesnym podniesieniu się poziomu lustra solanki;
- nieszczelność kawerny – spadek ciśnienia azotu oraz solanki przy równoczesnym obniżeniu się poziomu lustra solanki.

PODSUMOWANIE

Po zakończeniu testu i wykonaniu obliczeń, końcowy raport musi zostać wysłany do odpowiedniej instytucji w danej prowincji wydającej pozwolenia na eksploatację kawern solnych. Dla przykładu, w Albercie jest nią Alberta Energy Regulator (AER). Aby kawerna zaliczyła test szczelności wartość szybkość ubytku azotu (*Calculated Nitrogen Leak Rate – CNLR*) musi być mniejsza od 160 m³/rok.

Pozytywne wyniki testu szczelności są podstawowym warunkiem do otrzymania lub przedłużenia istniejącej już licencji na eksploatację danej kawerny.

LITERATURA / REFERENCES

- CICCHINI O., 2015. Guidelines for mechanical integrity testing of storage caverns, materiały archiwalne CICCHINI PROJECTS LTD.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBANCZYK K., 2002. Zarys otworowego ługownictwa solnego, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne
- Z341 Series-14 Storage of hydrocarbons in underground formations, 2014, Canadian Standards Association
- Z341.4-14 Salt cavern waste disposal, 2014. Canadian Standards Association