

ANDRZEJ MACIEJEWSKI*

Podziemne magazynowanie paliw płynnych

Wprowadzenie

W niniejszej publikacji przyjmiemy, że przez paliwa płynne rozumie się węglowodory (lub mieszaniny węglowodorów) ciekłe lub utrzymywane w stanie ciekłym w warunkach magazynowania i wykorzystania. Magazynowanie takich mediów odbywa się w zbiornikach na powierzchni ziemi (o konstrukcji, odpowiadającej właściwościom magazynowanego medium) lub w podziemnych komorach w złożach mineralnych. Z praktycznego punktu widzenia istotne znaczenie mają magazyny w kawernach, wytworzonych w złożach soli kamiennej. Zajmiemy się zatem kawernowymi magazynami węglowodorów ciekłych (z wyłączeniem skroplonego metanu). Kawerny magazynowe wykonywane są metodą ługowania otworowego.

1. Złoża soli kamiennej są szczególnie przydatne do podziemnego magazynowania ciekłych węglowodorów, bo sprzyja temu:
 - powszechność występowania złóż soli,
 - specyficzne warunki hydrogeologiczne, panujące w złożach solnych – szczelność struktur,
 - korzystne właściwości geomechaniczne soli kamiennej: zwięzłość, nieprzepuszczalność, plastyczność odkształceń,
 - obojętność chemiczna soli względem magazynowanych substancji,
 - znaczne miąższości złóż solnych, umożliwiające utworzenie komór o pożądanej objętości.
2. Technologia podziemnego, kawernowego magazynowania musi zapewniać:
 - stabilność kawerny i bezpieczeństwo magazynowanego produktu,

* Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP w Krakowie;
e-mail: amaki@chemkop.pl

- utrzymanie jakości produktu w okresie magazynowania,
 - możliwość napełnienia i opróżnienia magazynu z żadaną przez użytkownika wydajnością – odpowiednią dla obu procesów.
3. Podstawowe warunki bezpiecznej budowy i eksploatacji magazynu kawernowego węglowodorów ciekłych zostały przedstawione w trzech zasadniczych grupach:
- Warunki bezpieczeństwa związane ze statecznością geomechaniczną i szczelnością kawerny.
Projektując wielkość i kształt kawerny należy (uwzględniając typ złoża – pokład lub wysad) zaprojektować, korzystając z oprogramowania symulacyjnego, lokalizację głębokościową komory, jej wielkość, kształt, miąższość półki stropowej i spągowej, grubość filarów międzykawernowych i bocznych, wielkość i kształt kopuły oraz szyi kawerny. Otwór wiertniczy należy uzbroić w jedną lub dwie (zależnie od typu złoża) kolumny rur okładzinowych (cementowanych). W procesie ługowania należy zastosować odpowiednio dobraną technologię oraz kontrolować szczelność oraz rozwój kształtu i wielkości kawerny. Parametry szczelności powinny odpowiadać standardom, określonym przez Solution Mining Research Institute (dalej: SMRI). Rozwój kawerny bada się regularnie za pomocą pomiarów echosondą, co pozwala wprowadzać korekty technologiczne. Uzyskanie założonego kształtu i wielkości kawerny gwarantuje, przy zachowaniu właściwego ciśnienia podporowego, utrzymanie konwergencji w granicach 1% rocznie.
 - Warunki bezpieczeństwa związane z technologią eksploatacji magazynu.
W podziemnych, kawernowych magazynach ciekłych węglowodorów medium manewrowym jest solanka – najkorzystniej o pełnym nasyceniu. Produkt wypierany jest z kawerny solanką, pobieraną ze zbiorników buforowych (zlokalizowanych na powierzchni), ze słonych jezior (jeżeli istnieją tak korzystne warunki) lub z bieżącej produkcji przy współpracy z kopalnią solankową. Z reguły eksploatację magazynu prowadzi się przy współpracy zbiorników buforowych i jednego z wymienionych źródeł solanki. W przypadku magazynów strategicznych, opróżnianych w przypadkach szczególnych można – zakładając mniejszą od maksymalnej początkową wielkość kawerny – użyć jako medium manewrowego wody lub solanki nienasyconej. W tym przypadku po kilku lub kilkunastu cyklach za- i rozładunku komora osiąga wielkość maksymalną w danych warunkach geomechanicznych i zwykle przeznaczają się ją wówczas do magazynowania gazu ziemnego, produkt ciekły przenosząc do innej, wcześniej przygotowanej kawerny. Powyższe stwierdzenia wskazują na istotny problem gospodarki wodno-solankowej na kawernowym polu magazynowym. Na marginesie stwierdzić należy, że problem ten jest znacznie mniej złożony w przypadku kawernowych magazynów gazu ziemnego, które pracują jako tzw. oddychające bez stosowania medium manewrowego.
Bezpieczeństwo operacji manewrowych czyli unikanie przepełnienia kawern lub mieszania produktu i solanki – co może prowadzić do eksplozji – eliminują odpowiednie urządzenia kontrolno-pomiarowe, najczęściej bardzo proste.

- Warunki bezpieczeństwa związane z jakością magazynowanego produktu.
Duża różnica gęstości solanki w stosunku do magazynowanych produktów oraz laminarny przepływ w kawernie (powody: podawanie solanki poniżej granicy rozdziału oraz wielkość kawerny) ogranicza występowanie problemów jakościowych do produktów o dużej zawartości węglowodorów aromatycznych, tj. o stosunkowo znacznej rozpuszczalności w solance. Dochodzi w tym przypadku do zanieczyszczenia solanki.
Wieloletnie badania laboratoriów amerykańskich, niemieckich i francuskich (Materiały z mityngów Solution Mining Research Institute z lat 1995 do 2007) wykazały, że ropa surowa po wielu latach magazynowania nie wykazuje zmian jakościowych wpływających na konieczność zmian w procesie rafinacji.
To samo dotyczy olejów: bazowego, napędowego i opałowego. Ograniczenia występują przy zmianie przeznaczenia kawern. Nie można magazynować benzyn w komorach po ropie lub olejach – prowadzi to do zmian jakościowych uniemożliwiających obrót towarowy. Użycie kawerny po benzynie dla oleju napędowego jest związane z koniecznością „przepłukania” olejem, który trzeba skierować do powtórnej rafinacji – ekonomicznie może to być nieopłacalne.
Kwestia magazynowania benzyn jest bardziej skomplikowana. Przykładowo źródła niemieckie (Materiały z mityngów Solution Mining Research Institute z lat 1995 do 2007) podają, że sprzedawano bez problemów benzynę po 9 latach magazynowania w komorach o kilkusetmetrowej wysokości (magazyn Heide) – lojalnie jednak przyznają, że kilkumetrową partię ze strefy kontaktowej należało powtórnie rafinować. Źródła innych krajów oraz ekspertyzy ośrodków badawczych (w tym polskich) wykluczają długookresowe magazynowanie benzyn w wielkich komorach lub ograniczają taką możliwość do stosunkowo niewielkich, specjalnie wyługowanych komór o szybkiej rotacji produktu. W ekspertyzach tych wyeksponowano zanieczyszczenie solanki manewrowej węglowodorami aromatycznymi, co uniemożliwiało jej zagospodarowanie.
- Wypadki i katastrofy.
Szczegółowe opisy wypadków i katastrof, związanych z eksploatacją magazynów kawernowych można znaleźć w pracach SMRI (Materiały z mityngów Solution Mining Research Institute z lat 1995 do 2007). Jest ich kilkanaście i dotyczą terenu USA, gdzie eksploatuje się kilka tysięcy kawern. Znakomita większość awarii związana była z magazynami produktów, takich jak LPG lub etylen. Wszystkie wywołane były błędami ludzkiego działania (poczynając od fazy projektowania do parametrów eksploatacji). Analiza tych przypadków w odniesieniu do ilości i pojemności eksploatowanych kawern uzasadnia **wniosek o wyjątkowo bezpiecznej pracy magazynów tego rodzaju.**

1. Światowa praktyka podziemnego magazynowania paliw

Technika magazynowania ropy naftowej i innych ciekłych węglowodorów w kawernach wylugowanych w złożach soli kamiennej została opatentowana w 1916 r. w Niemczech, rozpracowana teoretycznie w Kanadzie w latach czterdziestych XX wieku i po raz pierwszy zastosowana w latach pięćdziesiątych w USA i Wielkiej Brytanii.

Najpełniejsze informacje na temat magazynowania w kawernach pochodzą przede wszystkim z rządowych agencji, odpowiedzialnych za gospodarkę zasobami strategicznymi, w USA, Niemczech i Francji. Dane te stosunkowo łatwo uzyskać i w dalszych wywodach posłużą one za bazę informacji. Oprócz zapasów strategicznych poszczególne kompanie naftowe magazynują dla własnych, operacyjnych potrzeb znaczne ilości przede wszystkim produktów naftowych. Magazyny takie mają podwójny charakter – strategiczno-operacyjny – i służą bezpieczeństwu zasilania rafinerii oraz operacjom giełdowym.

1.1. Stany Zjednoczone AP

Rezerwami strategicznymi ropy naftowej zajmuje się agencja rządowa Strategic Petroleum Reserve (SPR), podlegająca Ministerstwu Energii – Biuru Paliw Kopalnych. SPR posiada kilka dużych, kawernowych magazynów w stanach Teksas, Luizjana, Missisipi i Kansas.

Łącznie obecna operacyjna pojemność magazynowa SPR wynosi około 115 mln m³ lub 98 mln Mg ropy naftowej. Łączna zdolność rozładowcza magazynów wynosi 29 tys. m³/godzinę. Koszt budowy magazynów kawernowych wraz z infrastrukturą wyniósł około 5 mld \$, a wartość zmagazynowanej ropy wynosi obecnie około 65 mld \$. Należy zwrócić uwagę na proporcję kosztów budowy do wartości zmagazynowanego medium. Jest to parametr charakterystyczny dla magazynów kawernowych. Dodać należy, że ropę zakupiono w okresie niskich cen za kwotę 17 mld \$.

Planuje się dalszą rozbudowę bazy magazynowej do pojemności 159 mln m³ i wydajności rozładowczej 39 tys m³ ropy na godzinę.

Obsługę magazynów SPR zleca na zasadzie out sourcing wyspecjalizowanym firmom. W ramach obsługi badana jest jakość ropy i solanki oraz wykonuje się testy środowiskowe.

Rezerwy strategiczne USA mogą zapewnić zasilanie przemysłu przez około 170 dni.

W stanie Kansas zlokalizowano natomiast kilkaset kawern o pojemności około 200 tys. m³ każda, w których firmy wynajmują pojemności dla magazynowania operacyjnego produktów petrochemicznych jak np.: LPG, LNG, benzyny i olej opałowy. Produkty w tych kawernach cechuje duża rotacja, głównie z przyczyn komercyjnych.

1.2. Niemcy

Rezerwami strategicznymi w tym kraju zajmuje się agencja Erdölbevorratungsverband (EBV). Agencja ta zrzesza obowiązkowo wszystkie firmy importujące i przerabiające

produkty naftowe, zobowiązane zgodnie z dyrektywą UE do posiadania 90-dniowych zapasów. EBV posiada obecnie cztery duże magazyny kawernowe w złożach soli (wysadowych) nad Morzem Północnym. Pojemność tych magazynów wynosi około 40 mln m³ i wykorzystana jest w około 80%.

Niemieckie firmy naftowe posiadają oprócz tego wiele kawern magazynowych dla celów operacyjnych. Dane na ten temat są jednak z reguły objęte tajemnicą handlową.

EBV zasadniczą wagę przywiązuje do badania jakości. Próbki produktów są pobierane i badane co pół roku.

1.3. Francja

We Francji rezerwami strategicznymi ropy naftowej i jej produktów zajmuje się agencja rządowa Comité Professionnel des Stocks Strategiques Petroliers (CPSSP). Głównym magazynem rezerw CPSSP jest magazyn kawernowy w Manosque (Prowansja), posiadający 26 kawern o łącznej pojemności około 6 mln m³. Kawerny mają średnio 250 tys. m³ pojemności każda. Wydajność rozładunku wynosi 1,3 tys. m³ na godzinę. Solanka manewrowa jest pobierana ze zbiorników powierzchniowych o pojemności 300 tys. m³ oraz ze słonego jeziora Lavalduc. Magazyn mieści ponad 40% rezerw strategicznych kraju.

Ciekawostką przyrodniczą jest fakt zlokalizowania magazynu na terenie parku narodowego – świadczy to o proekologicznym charakterze tego rodzaju instalacji.

1.4. Kanada

Jako eksporter ropy Kanada nie magazynuje rezerw strategicznych. Źródłem ropy naftowej w Kanadzie jest termiczna przeróbka piasków bitumicznych (oilsands), dająca ciężką ropę, wymagającą mieszania z lżejszymi frakcjami (np. NGL). Firmy naftowe wykorzystują zatem kawerny jako zbiorniki buforowe. W prowincji Alberta funkcjonuje magazyn kawernowy o łącznej pojemności około 2,5 mln m³, wykorzystywany przez szereg firm-udziałowców. W prowincji Ontario czynnych jest 75 kawern solnych o łącznej pojemności 3,5 mln m³, służących do magazynowania benzyn, oleju opałowego, LPG, NGL.

Wymienione wyżej kraje są zarazem prekursorami i potentatami w dziedzinie magazynowania podziemnego. Szereg krajów uprzemysłowionych posiada również znaczący potencjał w tym zakresie (Wielka Brytania, Dania) lub jest na etapie jego budowy i rozbudowy (Portugalia, Hiszpania, Turcja). Do krajów tych należy również Polska, o czym będzie mowa w dalszej części referatu.

2. Polskie potrzeby magazynowe

Sytuacja na światowym rynku ropy naftowej i paliw oraz konieczność zapewnienia ciągłości dostaw (tzw. bezpieczeństwo energetyczne) wymuszają tworzenie rezerw o cha-

rakterze strategicznym oraz operacyjno-handlowym. Rezerwy strategiczne, gromadzące w zasadzie ropę naftową, są domeną rządów i agencji rządowych. Informacje w tym zakresie są publikowane i stąd dostępne.

Rezerwy operacyjno-handlowe są tworzone przez koncerny paliwowe i dane na ten temat są trudno dostępne bo ukrywane przed konkurencją.

Sformalizowana ocena (w ujęciu matematycznym) wielkości potrzeb magazynowych w skali kraju jest bardzo trudna. Zdaniem Romana Frydrycha z New York University efektywność tego rodzaju makroekonomicznych wyliczeń jest niewielka. Powodem tego jest ilość zmiennych, będących zależnościami o nieprzewidywalnym charakterze. Biorąc powyższe pod uwagę wykonana zostanie próba oszacowania tych potrzeb, uwzględniając uogólnione wielkości obrotu ropą naftową i produktami. Liczby użyte poniżej zostały zaczerpnięte z opracowania „Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata” (wydanie z roku 2003, PAN). Należy również wziąć pod uwagę, że estymacja ta przedstawia punkt widzenia projektanta, który stoi przed problemem udzielenia odpowiedzi na pytanie o wykonalność przedsięwzięcia w określonych warunkach – stąd posłużenie się przybliżeniami.

Przyjmujemy dla wymienionych celów następujące dane:

- zużycie ropy naftowej niezależnie od źródeł pochodzenia – 20 mln Mg rocznie,
- zużycie benzyn silnikowych – 4,8 mln Mg rocznie,
- zużycie oleju napędowego – 6,0 mln Mg rocznie,
- zużycie oleju opałowego – 5,5 mln Mg rocznie,
- zużycie LPG – 2,0 mln Mg rocznie.

2.1. Kryteria prawne

Należy wziąć pod uwagę trzy podstawowe akty normatywne:

- Ustawa z dnia 26.7.1996 o rezerwach państwowych i zapasach obowiązkowych paliw (Dz.U. 90/96).
- Dyrektywa Unii Europejskiej nr: 98/93/EC z 14 grudnia 1998.
- Ustawa z dnia 16 lutego 2007 „O zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym” (Dz.U. z 2007 Nr 52, poz. 343).

Wyżej przytoczona ustawa ustala odpowiednie wielkości rezerw **obowiązkowych** oraz wymagania (wysokie) odnośnie kluczowych parametrów eksploatacyjnych instalacji magazynowych tzn. możliwości dostępu do zgromadzonych rezerw.

W odniesieniu do ropy naftowej przyjąć należy wymóg posiadania rezerw w wysokości 90-dniowego zużycia, a więc **około 5 mln Mg**. W odniesieniu do paliw ustawa nie przewiduje rezerw strategicznych, nakładając jednak na producentów i importerów obowiązek zapewnienia stabilności dostaw.

2.2. Kryteria strategiczne

Mówiąc o kryteriach strategicznych należy uwzględnić strukturę zaopatrzenia i dostaw oraz strukturę zużycia. Kraje produkujące i eksportujące ropę naftową tworzą rezerwy strategiczne w ograniczonym zakresie (USA 14% rocznej konsumpcji) lub ich nie tworzą (Kanada). Kraje-importerzy są żywotnie zainteresowane posiadaniem rezerw, amortyzujących fluktuacje rynku światowego. Do nich należą Niemcy i Francja. Polska, nie mając znaczących źródeł ropy naftowej, jest zależna od dostaw importowych. Dostawy te otrzymujemy w 80% z jednego kierunku: ze źródeł rosyjskich oraz tranzytem przez Rosję.

Jeżeli chodzi o strukturę zużycia to w Polsce głównymi konsumentami produktów naftowych są: transport, przemysł chemiczny i niezawodowe instalacje ogrzewcze i energetyczne. Energetyka zawodowa praktycznie nie jest uzależniona od dostaw produktów naftowych.

Przykłady relacji zużycia i rezerwy ropy naftowej:

- USA
 - zużycie roczne – 900 mln Mg,
 - rezerwy – 135 mln Mg,
 - wydajność magazynów – 30 tys. Mg/godzinę;
- Francja
 - zużycie roczne – 100 mln Mg,
 - rezerwy – 20 mln Mg,
 - wydajność magazynów – ponad 2 tys. Mg/godzinę;
- Niemcy
 - zużycie roczne – 130 mln Mg,
 - rezerwy – 40 mln Mg,
 - wydajność magazynów – 5 tys Mg/godzinę.

Wszystkie wymienione kraje mają możliwość dywersyfikacji kierunków importu pod względem kontraktowym i logistycznym.

Odnosząc te liczby do warunków polskich oraz uwzględniając potrzebę dywersyfikacji dostaw sądzić należy, że **powinniśmy dążyć do posiadania strategicznych pojemności magazynowych o wielkości 8 – 10 mln m³ w dwóch lokalizacjach**, obsługujących dostawy ruropociągowe i morskie. Wydajność magazynów osiągać powinna 1,5–2 tys. Mg/godzinę.

2.3. Kryteria operacyjno-handlowe

Szczegółowe dane, dotyczące programów i planów koncernów w tym zakresie, objęte są poufnością w ramach ładu korporacyjnego. Na podstawie publikowanych, zapewne niepełnych danych, można przyjąć następujące liczby dla benzyn i oleju napędowego i opałowego łącznie:

- lokalizacja centralna docelowo 1,3 mln Mg,
- lokalizacja nadmorska 1,2 mln Mg.

W ramach programów strategii marketingowej polskich koncernów naftowych pojawił się problem magazynów interwencyjno-operacyjnych w rejonie Dolnego Śląska. Posiadanie

w tym rejonie odpowiednich rezerw produktowych wzmocniłoby pozycję konkurencyjną w stosunku do zachodniego sąsiada. Jak dotychczas opracowano studia wykonalności dla złóż pokładowych rejonu LGOM. Decyzje inwestycyjne zostały przyhamowane między innymi z powodu trudności z odbiorem solanki. Być może zmiana technologii elektrolizy w Zakładach Chemicznych „Rokita” i przejście na zasilanie solanką otworzy możliwości budowy magazynów w tym rejonie.

3. Możliwości budowy podziemnych magazynów w Polsce

Dla wybudowania i eksploatacji podziemnego magazynu ropy naftowej i paliw w złożu soli konieczne jest spełnienie następujących warunków, wymienionych według stopnia istotności:

- posiadanie złoża o rozmiarach wystarczających dla rozmieszczenia kawern o wymaganej pojemności;
- możliwość zrzutu lub zagospodarowania solanki w trakcie ługowania oraz możliwość prowadzenia prawidłowej gospodarki wodno-solankowej w trakcie eksploatacji magazynu;
- możliwość poboru odpowiedniej ilości wody (lub medium ługującego) we wszystkich fazach działania;
- lokalizacja korzystna z punktu widzenia logistyki;
- dysponowanie zaawansowaną technologią ługowania, opartą na doświadczeniach zespołach specjalistów, narzędziami projektowania (w tym oprogramowaniem symulacyjnym) oraz oprzyrządowaniem kontrolnym (pomiaru kształtu i wielkości kawern w trakcie wykonywania, badania szczelności).

3.1. Warunki złożowe

Złoża soli kamiennej o znaczeniu przemysłowym, występujące w Polsce, należą do dwóch geologicznych formacji solonośnych: cechsztyńskiej (perm górny) i mioceńskiej (trzeciorzęd). **Utwory solne cechsztynu** występują na obszarze Niżu Polski środkowej i północno-zachodniej. Na tym obszarze wyodrębnić można rejony stosunkowo płytkiego występowania soli cechsztyńskich o znacznej miąższości, na głębokościach dostępnych dla eksploatacji, a mianowicie:

- region środkowopolski, obejmujący Kujawy i obszary w kierunku północnym i północno-zachodnim (w kierunku Szczecina) – mamy tu do czynienia wyłącznie z **wysadami**, wyniesionymi do głębokości od stu do kilkuset metrów pod poziom terenu;
- obszar przedsudecki, rozciągający się wzdłuż Odry od okolic Nowej Soli przez Głogów w kierunku południowo-wschodnim, pokrywając się w znacznej części z obszarem LGOM. **Pokład** cechsztyńskich soli najstarszych o miąższości do 200 m występuje tu na głębokości od 500 do 2000 m;

- obszar nadbałtycki, sięgający od Łeby do Zatoki Puckiej – **pokładowe** złoża soli cechsztynu zalegają na głębokości od kilkuset do 2000 m, osiągając miąższość do około 200 m.

Zasoby bilansowe (Bilans gospodarki... 1996–2003) wymienionych powyżej rejonów złóż stanowią obecnie ponad 95% zasobów w Polsce. **Utwory solne miocenu** występują na przedgórzu Karpat. Tworzą one kilka złóż, leżących w wąskim pasie przykarpackim od Wieliczki do Tarnowa. Wyjątek stanowi złożo pokładowe „Rybnik-Żory-Orzesze”, leżące na obszarze Górnego Śląska. Skomplikowana budowa oraz nikiłe zasoby złóż mioceńskich (około 5% zasobów krajowych) wyłączają te struktury z obszaru zainteresowania.

Schemat występowania wymienionych złóż obrazuje załączona mapa.

Budowa i parametry formacji solonośnych Polski przesądzają o potencjalnych możliwościach lokalizacji podziemnych, kawernowych magazynów ropy i paliw.

3.2. Warunek prawidłowej gospodarki wodno-solankowej

Jeżeli przyjąć warunek posiadania odpowiedniego złoża za oczywisty, to kluczowym problemem i warunkiem *sine qua non* budowy magazynów kawernowych jest możliwość zagospodarowania lub zrzutu solanki z ługowania oraz gospodarki wodno-solankowej w czasie eksploatacji magazynu. W Polsce możliwości zagospodarowania solanki są skromne. Przemysł chemiczny ze złóż kujawskich odbiera około 1000 m³ solanki nasyconej na godzinę i to jest obecnie wszystko, czym można dysponować. Zakładając, że budując hipotetyczny magazyn, będziemy ługować kawerny odbierając tę ilość solanki, to czas uzyskania 1 miliona m³ kawern wyniósłby około 15 miesięcy. W przypadku magazynu gazu ziemnego w tym momencie problem solanki przestaje istnieć. W przypadku magazynu węglowodorów ciekłych w ciągu całego okresu eksploatacji potrzebna jest solanka manewrowa, której ilość zależy od wymaganej wydajności poboru medium magazynowanego. Należy też wziąć pod uwagę, że ze względu na zjawisko konwergencji, kawerna nie może być opróżniona i pozostawać pod ciśnieniem atmosferycznym.

Proces ługowania można zintensyfikować zrzucając solankę bez jej przemysłowego wykorzystania. Robiono tak w Niemczech i we Francji wykorzystując duże przepływy wody słodkiej przy ujściach rzek do rozcieńczania solanki lub zrzucając solankę wprost do morza, przy zachowaniu odpowiednich warunków, chroniących biosferę. W Polsce zrzut do rzek nie wchodzi w rachubę, ponieważ zarówno Wisła jak i Odra niosą bardzo duży ładunek chlorku sodu, związany z odwadnianiem kopalń węgla kamiennego. Wobec wykorzystania potencjału zrzutowego przemysłu chemicznego – będzie to omówione dalej – obszarem zainteresowania staje się pas nadmorski (wyniesienie Łeby) z możliwością zrzutu do zatok lub otwartego morza. W każdym przypadku należy zachować wszelkie warunki bezpieczeństwa ekologicznego.

Z różnych możliwych rozwiązań tego problemu – zdaniem autora – zrzut solanki do ujścia Wisły, jako najbardziej obiecujący, wymaga szczegółowego rozważenia. W przekroju

Kieźmarku rzeka niesie średnio około **1000 m³ wody słodkiej na sekundę**. Przy maksymalnej intensywności ługowania w tym obszarze można się spodziewać zrzutu **2000 m³ solanki nasyconej na godzinę**. Ze stosunku tych liczb wynika, że przy właściwym wprowadzeniu strumienia solanki do biegu rzeki, można uzyskać bezpieczne rozcieńczenie chlorku sodu. Należy również mieć na uwadze fakt, że Bałtyk jest morzem nisko zasolonym (wysładzanie przez wielkie rzeki przy odcięciu wymiany wód przez cieśniny duńskie) o średniej zawartości NaCl około 6 g/l i dodatkowa ilość tego czynnika może warunki biologiczne poprawić. Morze Północne niesie około 17 g/l NaCl.

Wniosek z powyższych danych jest następujący: rejon perspektywiczny dla budowy magazynów kawernowych to pas złóż nadmorskich.

3.3. Warunki dostawy wody

W warunkach rzeczywistych do wylugowania 1 m³ kawerny zużywa się – licząc uśrednioną wielkość w ciągu całego procesu – około 7 m³ wody. Wracając do podanego wyżej hipotetycznego przykładu ługowania kawerny o objętości 1 mln m³ w ciągu 15 miesięcy – potrzeba na to 7 mln m³ wody, czyli tyle ile przepływa Wisłą w przekroju Kieźmarku w ciągu około 18 minut. Dodać należy, że nie ma szczególnych wymagań jakościowych w odniesieniu do czynnika ługującego, może to być woda morska, rzeczna, jeziorna lub wręcz odpadowa (jest jeden wyjątek, a mianowicie jeżeli solanka ma zasilać membranową instalację elektrolizy chloru). Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzić należy, że zapewnienie w Polsce dostaw czynnika ługującego, szczególnie w warunkach pasa złóż nadmorskich, powinno być całkowicie realne.

Reasumując: w pasie nadmorskim w pełni realne jest wybudowanie kawernowych magazynów ropy i paliw o docelowej pojemności 5–6 mln m³. Wraz ze zrealizowanym magazynem w kopalni Góra koło Inowrocławia o pojemności 3,5–5 mln m³ Polska w ciągu najbliższych lat może posiadać w pełni wystarczającą bazę magazynową. Osobną kwestią jest możliwość zakupu i zamrożenia tak znacznej ilości drogiego towaru – stosunek kosztów budowy magazynu do kosztu medium magazynowanego pozostaje w proporcji ca. 1 do 15.

3.4. Technologie ługowania i eksploatacji magazynów kawernowych

W Polsce posiadamy doświadczony zespół specjalistów w zakresie specyficznej i niszowej dyscypliny, jaką jest otworowa eksploatacja soli kamiennej (zwana ługownictwem). Zespoły te zdobyły wiedzę teoretyczną i doświadczenie w trakcie kilku dziesięcioleci prac w tej dziedzinie. Prace te dotyczyły eksploatacji soli oraz budowy magazynu gazu ziemnego w Mogilnie – jednego z najnowocześniejszych w Europie. W ciągu tych lat wypracowano metody i oprzyrządowanie projektowe, kontrolne i realizacyjne na poziomie światowym – świadczy o tym przywoływanie naszych zespołów do prac za granicą. Zespoły, o których mowa, są zgrupowane w firmach OBRGSChem.-CHEMKOP, INVESTGAS S.A. oraz IKS SOLINO S.A.

4. Kawernowe magazyny ropy naftowej i paliw w Polsce

4.1. Magazyny ropy naftowej

Polska posiada obecnie jeden, nowoczesny kawernowy magazyn ropy naftowej. Jest on odpowiedzią na zapotrzebowanie, wywołane wprowadzeniem wymienionych wcześniej aktów normatywnych i racjonalną polityką gospodarczą. Właścicielem magazynu jest PKN Orlen, a operatorem IKS Solino. Koncepcja tego magazynu powstała w roku 2000 i polegała na wykorzystaniu pustek poeksploatacyjnych kopalni soli Góra – należącej do IKS Solino. Kopalnia Góra posiada kawerny poeksploatacyjne o ogólnej objętości około 15 mln m³. Z tej ogólnej ilości wybrano najbardziej odpowiednie z punktu widzenia kryteriów, omówionych wcześniej.

W pierwszym etapie budowy oddano do eksploatacji dwie komory magazynowe ropy naftowej. Czynne pojemności tych komór wynosiły odpowiednio 570 tys. m³ i 540 tys. m³. Odpowiadało to łącznie ilości 0,95 mln Mg ropy. Wszystkie komory magazynowe, oddane w tym etapie, powstały w wyniku przekształcenia istniejących kawern eksploatacyjnych. Najważniejszymi elementami procesu konwersji kawern były: rekonstrukcja istniejącego otworu (zacementowanie w istniejącym otworze z ostatnią cementowaną kolumną 13 3/8” dodatkowej kolumny 10 3/4” na odcinku 30 m. w soli), wykonanie kopuły nad dotychczasowym płaskim stropem kawerny oraz odwiercenie do kawerny dodatkowego otworu. Cementacja dodatkowej kolumny w istniejącym otworze spowodowana była koniecznością zapewnienia długotrwałej szczelności, zamiana stropu płaskiego na kopułowy zapewniła długotrwałą stateczność geomechaniczną, a odwiercenie dodatkowego otworu – wymaganą wydajność operacyjną magazynu. Dodatkowy otwór tzw. bisowy miał ostatnią cementowaną kolumnę 13 3/8” i był uzbrojony w wolnowiszącą kolumnę rur 10 3/4”, sięgającą około 20 m poniżej spągu strefy magazynowania. Produkt podawany i odbierany jest kolumną 10 3/4” otworu głównego, a solanka wolnowiszącą kolumną 10 3/4” w otworze bisowym. Uzbrojenie to pozwala na uzyskanie wydajności ponad 500 m³ na godzinę z otworu. Tym samym już w etapie pierwszym uzyskano docelową, zakładaną w założeniach wydajność magazynu (dostosowaną do wydajności infrastruktury powierzchniowej i połączeń rurociągowych), tj. 1000 m³ na godzinę (pracują dwie komory równocześnie).

Etap drugi i trzeci zrealizowano również przez analogiczną konwersję kawern eksploatacyjnych. Uzyskano docelowo pojemność magazynową dla ropy naftowej w siedmiu kawernach ponad 4 mln m³, co odpowiada około 3,5 mln Mg ropy. Głębokość strefy magazynowania waha się od 350 do 750 m p.p.t. Pole kawernowe Góra stwarza możliwość powiększenia tej pojemności w miarę wzrostu potrzeb – należy jednak pamiętać o relacji kosztów.

Reasumując stwierdzić należy, że realizacja koncepcji magazynu Góra zaowocowała bardzo szybkim i tanim uzyskaniem koniecznych w danym momencie pojemności. Bardzo przybliżony rachunek kosztów wskazuje, że w stosunku do magazynów typu „tank farm” cena była około dwunastokrotnie niższa. Poza dyskusją jest przewaga w zakresie bezpieczeństwa oraz ochrony środowiska.

Podobnej wielkości magazyn, zlokalizowany w pasie złóż nadmorskich, jest w fazie projektowania i procedur koncesyjnych. Złoża te mają charakter pokładowy i są korzystniejsze dla lokalizacji kawern magazynowych.

4.2. Magazyny paliw

Jedyny polski magazyn paliw jest również zlokalizowany na polu ługowniczym kopalni Góra. Argumenty za tym rozwiązaniem były analogiczne do powyżej przytoczonych. Magazyn zrealizowano również w trzech etapach, a proces konwersji był podobny, ale z pewnymi istotnymi różnicami. W pierwotnych zamierzeniach było wykorzystanie jednej kawerny istniejącej i wyługowanie dwóch specjalnie zaprojektowanych. Proces konwersji przeprowadzono z powodzeniem, uzyskując wydajność 350 m³ na godzinę przy zarurowaniu: ostatnia cementowana kolumna 13 3/8", a wolnowiszcząca 8 5/8". Bardzo trudne warunki geologiczno-górnice napotkane w kawernach nowoługowanych (wystąpiło niebezpieczeństwo powstania bocznych kieszeni – pułapek na magazynowany produkt) spowodowały konieczność zmiany planów. Dla zrealizowania programu magazynowego należało zaadaptować dwie dalsze istniejące kawerny, pozostawiając nowoługowane dla eksploatacji soli. Adaptacja wymagała – dodatkowej w stosunku do poprzednich prac – trudnej operacji sfrezowania pewnych odcinków starych rur wraz z cementacją. Operacja została przeprowadzona pomyślnie, a nowe zarurowanie oraz odwiercenie otworów bisowych pozwala na eksploatację z wydajnością 350 m³ na godzinę. Łączna pojemność magazynu paliw w trzech kawernach wynosi około 1 mln m³, co odpowiada 0,85 mln Mg. Magazynowane są głównie oleje: bazowy, napędowy i opałowy. Głębokości stref magazynowych są silnie zróżnicowane: strop od 270 do 420 m p.p.t., spąg od 480 do 820 m p.p.t.

W programie magazynów zlokalizowanych w pasie nadmorskim uwzględniono oczywiście paliwa. Pojemności magazynowe dla paliw najprawdopodobniej zaprogramowane zostaną jako znacznie większe od magazynu Góra.

4.3. Magazyny LPG i innych produktów naftowych

Szybko rozwijający się rynek **LPG**, pracujący dotychczas „just on time”, został zobowiązany do posiadania rezerw. Również działający na nim kontrahenci zorientowali się w możliwościach wykorzystania sezonowych różnic cen.

Planowana docelowa pojemność magazynowa dla LPG wynosi 0,5 mln Mg.

Lokalizacja i stan zaawansowania magazynów LPG:

- w rejonie Kujaw – projekt techniczny w trakcie realizacji,
- w rejonie nadmorskim – faza koncepcji.

W sferze rozważań jest magazynowanie etylenu w stanie nadkrytycznym. Koncepcja i projekt rozwiązania tego problemu, bardzo ciekawego i trudnego technicznie, zostały opracowane po raz pierwszy w roku 1975. Magazyn złożony z dwóch kawern po 9 tys. m³ został zlokalizowany na złożu Lubień Kujawski. Inwestycję zaniechano w roku 1981.

Obecnie, wobec gwałtownego rozwoju rurociągowego przesyłu etylenu w Europie oraz kawernowych magazynów tego produktu, w Polsce określono potrzeby w tym zakresie na docelowo około 50 tys. Mg i opracowane zostało studium wykonalności. Decyzja inwestycyjna nie została podjęta.

Na marginesie wspomnieć wypada o dyskusjach na temat magazynowania produktów naftowych, zużywanych przez przemysł chemiczny, a przechowywanych w stanie skroplonym. Dotyczy to etanu, propylenu i dwuchloru etylenu. Budowa takich magazynów, ze względu na preferencję dla ropy i paliw oraz ograniczone możliwości zagospodarowania solanki, jest w najbliższej przyszłości mało realna.

Wnioski

1. Podziemne kawernowe magazyny ropy naftowej i paliw są – dzięki swym parametrom – nadzwyczaj ważnym elementem systemu bezpieczeństwa energetycznego kraju.
2. Polskie potrzeby pojemności magazynowych sięgają 12 do 14 mln Mg.
3. Pojemności, o których mowa powyżej, posłużą magazynowaniu różnych produktów ze zdecydowaną przewagą strategicznych rezerw ropy naftowej.
4. Magazyny winny być zlokalizowane w dwóch lub trzech strategicznie wybranych rejonach złóż soli.
5. Polska posiada wszystkie warunki do zrealizowania tak zarysowanego programu. Wymaga on jednak współdziałania agend rządowych i korporacji przemysłowych.
6. Budowa magazynów kawernowych jest najbardziej realnym sposobem uzyskania dostatecznie dużych, absolutnie bezpiecznych i tanich możliwości lokowania rezerw mediów energetycznych.

LITERATURA

Wymienione zostały wyłącznie publikacje ogólnodostępne. Opracowania badawcze i projektowe, będące własnością inwestorów, są dostępne tylko za ich zgodą.

Materiały z mityngów Solution Mining Research Institute z lat 1995 do 2007 (dostępne w bibliotece OBRGSChem, CHEMKOP).

Materiały z dorocznych sympozjów Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego pod ogólnym hasłem „Quo vadis sal” z lat 2000 do 2007 (dostępne w archiwum PSGS lub bibliotece CHEMKOP).

Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K., 2000 – Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju. Wydawnictwa AGH, Kraków.

Praca zbiorowa: Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata 1996–2003. PAN Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Kraków 2003.

Słowa kluczowe

Paliwa płynne, magazynowanie, kawerny solne

Streszczenie

Publikacja ta została przedstawiona po raz pierwszy na III Polskim Kongresie Naftowców i Gazowników w Bóbrce w dniu 15 maja 2008. W treści przedstawiono analizę potrzeb i możliwości realizacji magazynów w kawernach solnych na terenie Polski.

Przedstawiono podstawowe parametry, stanowiące o wyjątkowej przydatności złóż soli kamiennej do budowy magazynów, a mianowicie:

- powszechność występowania złóż soli,
- specyficzne warunki hydrogeologiczne, panujące w złożach solnych – szczelność struktur,
- korzystne właściwości geomechaniczne soli kamiennej: zwięzłość, nieprzepuszczalność, plastyczność odkształceń,
- obojętność chemiczna soli względem magazynowanych substancji,
- znaczne miąższości złóż solnych, umożliwiające utworzenie komór o pożądanej objętości.

Omówiono warunki prawidłowej technologii magazynowania. Opisano warunki bezpiecznej budowy i eksploatacji magazynu kawernowego:

- stabilność kawerny i bezpieczeństwo magazynowanego produktu,
- utrzymanie jakości produktu w okresie magazynowania,
- możliwość napełnienia i opróżnienia magazynu z żadaną przez użytkownika wydajnością – odpowiednią dla obu procesów.

Posługując się przykładami i danymi z krajów takich jak USA, Niemcy, Francja i Kanada dokonano, na tle światowej praktyki magazynowania w kawernach solnych, oceny polskich potrzeb w tym zakresie. Potrzeby skonfrontowano z możliwościami, biorąc pod uwagę następujące kryteria:

- prawne,
- strategiczne,
- operacyjno-handlowe.

Przedstawiono problemy krytyczne, a w szczególności kluczowy problem gospodarki wodno-solankowej. Problemy te zebrano w następujących grupach według stopnia istotności:

- posiadanie złoża o rozmiarach wystarczających dla rozmieszczenia kawern o wymaganej pojemności;
- możliwość zrzutu lub zagospodarowania solanki w trakcie ługowania oraz możliwość prowadzenia prawidłowej gospodarki wodno-solankowej w trakcie eksploatacji magazynu;
- możliwość poboru odpowiedniej ilości wody (lub medium ługującego) we wszystkich fazach działania;
- lokalizacja korzystna z punktu widzenia logistyki;
- dysponowanie zaawansowaną technologią ługowania, opartą na doświadczonych zespołach specjalistów, narzędziami projektowania (w tym oprogramowaniem symulacyjnym) oraz oprzyrządowaniem kontrolnym (pomiaru kształtu i wielkości kawern w trakcie wykonywania, badania szczelności).

Przedstawiono obecny stan realizacji obiektów magazynowych w Polsce oraz perspektywy rozwoju w najbliższych latach.

UNDERGROUND STORAGE OF LIQUID FUELS

Key words

Liquid fuels, storage, salt caverns

Abstract

This publication has been first presented on 15 May 2008, during 3rd Polish Congress of Petroleum and Gas Industry Specialists in Bóbrka. Publication includes the analysis of needs and possibilities of storage in salt caverns of Poland.

Publication lists the major parameters evidencing particular suitability of salt caverns for storage purposes, namely:

- salt deposits are common,
- particular hydrogeological conditions observed in salt deposits – tightness of structures,
- advantageous geomechanic properties of rock salt: cohesion, non-permeability, plastic deformations,
- chemical inertness of salt to stored substances,
- high thickness of salt deposits, allowing establishment of caverns with desired volume.

Publication discussed also proper storage technologies, as well as conditions for safe construction and operation of cavern storage:

- stability of cavern and safety of stored products,
- preservation of product quality during storage,
- filling and emptying of cavern storage with efficiency required by operator, respectively for both processes.

The publication includes also the assessment of Poland's needs in this respect, based on the examples and data from such countries as Canada, France, Germany, and the USA, and in the context of worldwide practice in this area. The needs were confronted with possibilities, with following criteria adopted:

- legal,
- strategic,
- operational and commercial.

Document presents critical issues, in particular the issue of water supply and brine handling, which are listed below in the sequence of their significance:

- possession of a deposit sufficient in size for location of caverns with required capacity,
- possibilities for disposal or utilisation of brine during leaching process, and possibilities for ensuring correct management of water and brine during storage operation,
- possibilities for uptake of sufficient quantity of water (or leaching medium) on all phases of process,
- advantageous location for logistics,
- possession of advanced leaching technology based on experienced teams of specialists, design tools (including simulation software), and control instruments (measurements of shape and size of caverns in the making, tightness tests).

Publication presents the current status of storage cavern construction in Poland, as well as perspectives for near future.

