

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE WĘGLOWODORÓW ORAZ INNYCH SUBSTANCJI W ZŁOŻACH SOLI W POLSCE JAKO NOWY KIERUNEK ICH WYKORZYSTANIA DLA GOSPODARKI NARODOWEJ

UKD 622.692.24.009.1:552.578 + 665:4/6:553.631:551.736.3(438)

Począwszy od lat czterdziestych w Stanach Zjednoczonych oraz sześćdziesiątych w innych, najbardziej uprzemysłowionych państwach świata (np. Francja, Kanada, RFN, Szwecja i ZSRR) obserwuje się intensywny rozwój metod podziemnego magazynowania źródeł energii, opartych w znacznej mierze na ropie naftowej i jej produktach pochodnych. Wspomniane nośniki energii są co prawda przedmiotem ogromnego zapotrzebowania w gospodarce narodowej każdego rozwiniętego kraju, ale ich zużycie jest bardzo zróżnicowane w czasie, tj. nadmiernie zmienia się ilościowo zarówno w ciągu doby, jak i w poszczególnych porach roku. Z związku z powyższym kraje dysponujące takimi zasobami surowców energetycznych, a także kraje zdane na poważny ich import rozwijają u siebie długofalowe programy budowy zbiorników podziemnych.

Podstawowym celem realizacji tych przedsięwzięć są dążenia poszczególnych państw przemysłowych do sprostania szczytowemu okresowi konsumpcji na wymienione surowce energetyczne i troska o uniezależnienie się od kryzysów paliwowych występujących okresowo na światowym rynku. Dużą rolę odgrywają również względy strategiczne. Motywy te znalazły swe odbicie w odpowiednich zarządzeniach i ustawach o obowiązujących zapasach surowców energetycznych, wydanych przez rządy niektórych państw, np. Francji i RFN (7, 10, 14).

Poza wymienionymi okolicznościami, podziemne magazynowanie węglowodorów ma wiele istotnych zalet w porównaniu z klasycznymi zbiornikami metalowymi naziemnymi, jak:

- a) niski koszt własny zmagazynowania 1 m³ produktu w stosunku do zbiorników naziemnych;
- b) duża osiągalna pojemność składowania, przy ograniczeniu do minimum naziemnej części instalacji;
- c) lepsza ochrona środowiska i krajobrazu oraz niemal pełne zabezpieczenie przed pożarami, wybuchami, itp.;
- d) niskie koszty eksploatacji.

W literaturze fachowej (2, 3, 11, 13, 22, 23, 25 i in.) podane są przykłady o następujących sposobach podziemnego magazynowania:

- 1) w zbiornikach naturalnych, złożonych ze skał porowatych i przepuszczalnych ropo-, gazo- i wodonośnych;
- 2) w zbiornikach sztucznych, wykonanych tradycyjnymi metodami górniczymi w skałach nieprzepuszczalnych, takich jak: granity, ity, margle, sól kamienna i wapienie oraz naturalnych pustkach krasowych; do tej grupy zbiorników należą też wyrobiska górnicze w opuszczonych kopalniach, o ile spełniają warunki szczelności i stateczności ociosów;
- 3) w zbiornikach komorowych (kawernach), powstałych z wylugowania soli kamiennej w otworach wiertniczych lub kopalniach podziemnych;
- 4) w zbiornikach mrożeniowych, utworzonych w przypowierzchniowych warstwach ziemi oraz podmorskich lodowcach;
- 5) w zbiornikach tworzonych przy zastosowaniu podziemnych eksplozji nuklearnych w różnych skałach, zwłaszcza pozbawionych naturalnych warunków do magazynowania.

Spśród wymienionych sposobów podziemnego magazynowania najbardziej rozpowszechniły się w świecie zbiorniki komorowe (kawerny), wylugowywa-

ne w złożach soli kamiennej. Służą one do magazynowania różnych mediów, takich jak: ropa naftowa, gaz ziemny i koksowniczy, sprężone powietrze, gazy skroplone (np. propan i butan), etylen w stanie gazowym oraz niebezpieczne odpady przemysłowe, w tym głównie radioaktywne.

PODSTAWY ROZWOJOWE PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA W ZŁOŻACH SOLI

Zbiorniki podziemne do magazynowania węglowodorów ciekłych lub gazowych oraz innych substancji, muszą bezwzględnie odpowiadać takim kryteriom, jak:

- 1) stateczność,
- 2) szczelność,
- 3) zabezpieczenie czystości składowanego produktu przed skażeniem go przez skałę otaczającą.

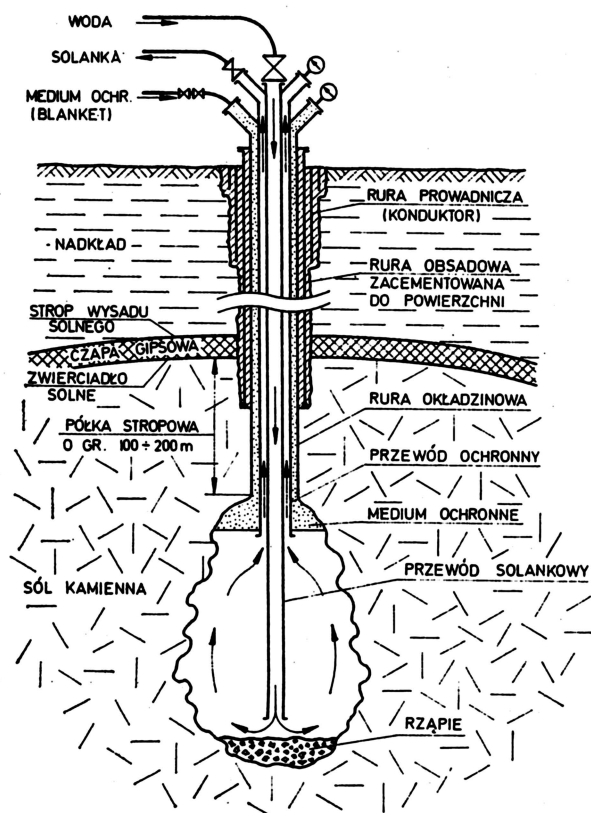
Wśród wielu skał występujących w przyrodzie wymienione kryteria, zdaniem G. Richter-Bernburga (18), spełnia tylko sól kamienna. Przydatność tej skały do lokalizacji zbiorników podziemnych wpływa ponadto z dalszych korzystnych jej własności, jak:

- 4) łatwa rozpuszczalność w wodzie słodkiej lub morskiej,
- 5) podatność na plastyczne odkształcenia pod wpływem granicznych naprężeń.

Wyjątkowe własności fizyczno-chemiczne i geomechaniczne soli kamiennej w stosunku do innych skał zostały wykorzystane w praktyce do łatwego drążenia w niej wodą statecznych i szczelnych komór (kawern) magazynowych. Jak wiadomo, ten najbardziej rozpowszechniony sposób podziemnego magazynowania różnych mediów polega na tym, że w odpowiednio zarurowanym i uszczelnionym otworze wiertniczym wywołuje się wymuszony obieg słodkiej wody na odcinku występowania soli (ryc. 1).

Świeża woda rozpuszcza sól powodując coraz większy przyrost objętości komory. Jej pojemność oblicza się na podstawie dobowego bilansu wydobytej soli, a kształt reguluje zmianą położenia rury eksploatacyjnej względem solankowej. Okresowo kontroluje się metodą akustyczno-echometryczną czy otrzymane kształt komory pokrywa się z żądanym. Rozwój komory w kierunku stropu jest ograniczony przez ekran cieczy obojętnej w stosunku do soli i lżejszej od wody, czyli tzw. „blanket”. Do tego celu nadają się prawie wszystkie węglowodory, jak np. olej opałowy, lekka benzyna, ciekły gaz, a ponadto sporadycznie wykorzystuje się sprężone powietrze.

Właściwy proces ługowania odbywa się dwustopniowo. Najpierw wykonuje się rzapie komory dla gromadzenia części nierozpuszczalnych w wodzie, ponad którym dopiero ługuje się właściwą komorę, aż do zaplanowanej objętości ostatecznej. W ten sposób powstałe komory mają kształt zbliżony do gruszki ustawionej pionowo lub cylindra. Ze względu na zwykle duży wymiar pionowy tych komór, można je ługować tylko w warstwach soli o dużej miąższości, w granicach od kilkudziesięciu do kilkuset metrów. Ponadto jest możliwe, choć niezbyt często i chętnie stosowane, ługowanie komór magazynowych w pokładach solnych o małej miąższości. Wówczas mają one kształty tunelowe, spowodowane poziomym ługowaniem pomiędzy dwoma lub więcej otworami wiertniczymi, wzdłuż szczeliny hydraulicznej.



Ryc. 1. Teoretyczny schemat ługowania komory (kawerny) zbiornikowej w wydzie solnym (wg G. Kricka, 14, uproszczony).

Fig. 1. Theoretical scheme of leaching of reservoir cavern in salt dome (after G. Krick, 1974, simplified).

O praktycznym wykorzystaniu złóż soli do podziemnego magazynowania różnych mediów decydują następujące czynniki lokalizacyjne:

- 1) budowa geologiczna złoża solnego;
- 2) położenie geograficzne złoża w stosunku do rafinerii, rurociągów naftowych, portów i dróg komunikacyjnych oraz większych zakładów przemysłowych i ośrodków urbanistycznych, będących dużymi konsumentami energii;
- 3) dostępność odpowiedniego źródła wody słodkiej lub morskiej;
- 4) możliwość odprowadzenia solanki powstającej przy ługowaniu komór (kawern) zbiornikowych lub jej utylizacja na miejscu.

Pierwszy z wymienionych czynników odgrywa najistotniejszą rolę w omawianym problemie, na co zwracali już niejednokrotnie uwagę następujący autorzy: E. Hofrichter (9, 10), G. Krick (14), S. Lechler (15), G. Richter-Bernburg (18), H. U. Röhr (21) i inni. Wpływa to stąd, że decyzja o lokalizacji zbiornika podziemnego musi być podjęta z jak najmniejszym ryzykiem niepowodzenia, to znaczy po bardzo starannym określeniu danych geologicznych o głębionych formacjach skalnych, zwłaszcza w obszarze występowania soli. Do tego celu wykorzystuje się różne pomiary geofizyczne powierzchniowe, jak i w otworach wiertniczych rozpoznawczych i eksploatacyjnych oraz wszechstronne badania na rdzeniach. Wspomniane prace dotyczą zarówno samego złoża solnego, jak i skał występujących bezpośrednio w jego stropie i spagu. W złożu solnym główny cel sprowadza się do wyjaśnienia jego budowy wewnętrznej (stratygrafia, tektonika), zbadania składu mineralnego i chemicznego skał oraz ustalenia ilości składników nierozpuszczalnych i łatwo rozpuszczalnych w wodzie, a wreszcie do określenia fizyczno-mechanicznych własności

poszczególnych warstw solnych. W przypadku zaś nakładu i spagu złoża chodzi o problem szczelności i wytrzymałości mechanicznej, co jest szczególnie ważne dla niezbyt grubych złóż pokładowych soli kamiennej.

ZAŁOŻENIA GEOLOGICZNO-GÓRNICZE PRZY PROJEKTOWANIU ZBIORNIKÓW PODZIEMNYCH

1. Parametry geologiczno-złożowe. Przydatność złoża solnego do ługowania odpowiednich komór (kawern) magazynowych można określić za pomocą następujących parametrów geologiczno-złożowych:

- a) forma i wielkość złoża,
- b) głębokość zalegania,
- c) sposób ułożenia warstw skalnych w złożu i jego otoczeniu,
- d) skład mineralny i chemiczny skał złożowych,
- e) ilość, rodzaj i sposób rozmieszczenia zanieczyszczeń w profilu złoża,
- f) wykształcenie litologiczne skał bezpośrednio przylegających do złoża solnego.

Forma i wielkość złoża są parametrami wyjściowymi w planowaniu ilości i wielkości komór zbiornikowych. Pod tym względem największe możliwości istnieją w dużych, jednorodnych i w miarę czystych złożach soli kamiennej wydawczych i pokładowych. Powyższe stwierdzenie nie wyklucza jednak możliwości wykorzystania małych złóż wydawczych i cienkich pokładowych, przy czym tych ostatnich pod warunkiem stateczności i szczelności nakładu i spagu złoża.

Głębokość zalegania odgrywa istotną rolę z punktu widzenia mechaniki górotworu, rzutując na stateczność, szczelność i zjawisko konwergencji komór magazynowych zaprojektowanych w soli. Wychodząc z tych założeń, jak również możliwości technologicznych w zakresie wiertniczej eksploatacji soli, głębokość zalegania stropu wydawczych i pokładowych złóż solnych nie powinna przekroczyć 1500 m.

Sposób ułożenia warstw skalnych w złożu i jego otoczeniu decyduje o lokalizacji i wielkości komór zbiornikowych oraz wymiarach filarów ochronnych wokół nich.

Skład mineralny i chemiczny skał złożowych jest podstawą do przeprowadzenia oceny jakościowej danego złoża solnego oraz określenia jego przydatności do podziemnego magazynowania węglowodorów. W obydwu przypadkach chodzi o właściwy wybór warstw soli kamiennej, pozbawionych grubszych i ciągłych przerostów innych skał nierozpuszczalnych lub bardzo łatwo rozpuszczalnych, które wpłynęłyby ujemnie na stateczność i szczelność górotworu solnego wokół komór zbiornikowych.

Z wyżej omówionym zagadnieniem wiąże się określenie ilości, rodzaju i sposobu rozmieszczenia zanieczyszczeń w profilu złoża solnego. Jak wiadomo, do podstawowych zanieczyszczeń występujących w złożach soli kamiennej należą wrostki, ciągle lub nieciągle przerosty oraz grubsze warstwy skał ilowo-mułowcowych, anhydrytowych i potasowo-magnezowych. Wspomniane utwory, w zależności od formy ich występowania, mogą być bezpośrednią przyczyną trudności technologicznych w ługowaniu i eksploatacji podziemnych komór magazynowych. Jako kryterium obowiązujące przy wyborze części złoża solnego, nadającej się do ługowania komór, przyjmuje się maksymalną zawartość części nierozpuszczalnych w wodzie 20% (1, 10). Ilość ta dotyczy zanieczyszczeń występujących przeważnie w postaci wrostków, okruchów i cienkich przerostów, nie odgrywających większej roli w postępie ługowania. Większa bowiem ilość części nierozpuszczalnych w wodzie hamuje postęp ługowania i powoduje duże straty w objętości komory, sięgające już około 50% wydługanej przestrzeni przy ich zawartości około 30%.

Wykształcenie litologiczne skał bezpośrednio przylegających do złoża solnego ma wpływ na stateczność i szczelność górotworu wokół niego oraz ustalenie odpowiedniej grubości calizn ochronnych dla projektowanego systemu podziemnych zbiorników.

2. Własności fizyczno-chemiczne i mechaniczne skał złożowych i otaczających. Projekty technologiczne dotyczące wykonawstwa i eksploatacji podziemnych zbiorników muszą być podbudowane dobrą znajomością następujących własności fizyczno-chemicznych oraz mechanicznych skał solnych i otaczających:

- a) ciężar właściwy i objętościowy,
- b) naturalna przepuszczalność, kawernistość i szczelinowość,
- c) naturalne przewodnictwo cieplne,
- d) gazoność,
- e) nieaktywność (inercja) chemiczna względem węglowodorów i innych substancji,
- f) podatność na ługowanie,
- g) wytrzymałość na ściskanie przy jedno- i trójosiowym stanie naprężeń oraz wytrzymałość na rozciąganie i zginanie.

Na podstawie ciężaru właściwego i objętościowego skał występujących w złożu solnym i jego nadkładzie określa się wielkość ciśnienia panującego w górotworze na głębokości projektowanych komór magazynowych oraz dokonuje innych obliczeń z zakresu mechaniki górotworu. Ponadto te parametry fizyczne wchodzi w skład równań opisujących zjawisko rozpuszczania soli i do wzoru na obliczenie zasobów złoża.

Naturalna przepuszczalność, kawernistość i szczelinowość są ujemnymi cechami petrofizycznymi skał z punktu widzenia mechaniki górotworu oraz zagrożeń wodnych i gazowych, wpływając powiększając na wymiary calizn ochronnych wokół stref eksploatacyjnych. Wspomniane cechy petrofizyczne nie odgrywają jednak większej roli na dużych głębokościach zalegania złóż solnych (poniżej 600 m), gdyż wówczas sól dzięki swym własnościom plastycznym staje się skałą praktycznie nieprzepuszczalną (8, 18).

Znajomość naturalnego przewodnictwa cieplnego oraz temperatury panującej w górotworze solnym na głębokości lokalizacyjnej komór zbiornikowych ma istotne znaczenie przy magazynowaniu mediów bardzo wrażliwych na zmiany ciśnienia i temperatury.

Gazoność skał solnych w strefie głębokościowej zbiorników podziemnych może oddziaływać ujemnie na stabilizację chemiczną składowanych produktów.

Nieaktywność (inercja) chemiczna soli kamiennej względem węglowodorów i innych substancji jest warunkiem niezbędnym dla zachowania ich czystości. W czasie podziemnego magazynowania mogą w pewnych warunkach powstać karbonyle Ni, Fe, V i innych metali ciężkich, zanieczyszczając np. etylen oraz inne gazy (23). Pewne trudności może również przysporzyć siarkowodor występujący w soli lub powstający z rozkładu anhydrytu przez przedostające się do zbiornika mikroby. Nie należy natomiast obawiać się zanieczyszczenia produktów składowanych samą solą, ponieważ jej rozpuszczalność w węglowodorach jest znikomo mała, wynosząc poniżej 1/10 000 g/l. Ponadto w okresie podziemnego magazynowania węglowodorów należy wykluczyć stosowanie takich dodatków uszlachetniających, które wchodziłyby w reakcję z solą kamienną. Większość z nich powinna być raczej dodawana dopiero po pobraniu produktu składowanego ze zbiornika. Wpływ solanki na węglowodory jest praktycznie nieszkodliwy, jeśli do jej wytworzenia wykorzystano odpowiednio czyste źródło wody.

Wytrzymałość na ściskanie przy jedno- i trójosiowym stanie naprężeń oraz wytrzymałość na rozciąganie i zginanie są parametrami określającymi zachowanie się soli kamiennej i warstw nadkładowych podczas wiercenia, ługowania i użytkowania komór magazynowych. Wyniki pomiarów wytrzymałościowych z badań laboratoryjnych, uzupełnione badaniami *in situ* w strefie oddziaływania komór zbiornikowych, są podstawą do obliczeń ich stateczności oraz wyznaczenia reologicznych współczynników bezpie-

czeństwa (16). Ogólnie biorąc wytrzymałość soli kamiennej w stosunku do wielu innych skał osadowych jest tak wysoka, że można w niej ługować duże i stateczne komory bez stosowania zabiegów wzmacniających. Jednakże wyniki badań laboratoryjnych W. Drejera (5, 6) dowiodły, że wytrzymałość na ściskanie różnych odmian soli kamiennej i pośrednio stateczność projektowanych w niej komór w znacznej mierze maleje ze wzrostem w soli substancji stałych nierozpuszczalnych w wodzie.

3. Parametry górniczo-techniczne. Do parametrów górniczo-technicznych odgrywających istotną rolę podczas zakładania i eksploatacji podziemnych zbiorników w złożach soli należą:

- a) średnice zarurowania i odchylenie od pionu otworu eksploatacyjnego,
- b) kształt i pojemność zbiornika komorowego (kawerny),
- c) lokalizacja głębokościowa,
- d) ciśnienie robocze składowania,
- e) szczelność, stateczność i konwergencja,
- f) grubość półki stropowej i spągowej oraz filaru brzeżnego,
- g) minimalny odstęp między komorami (filar międzykomorowy).

Na wielkość średnic zarurowania wpływa przyjęta technologia ługowania komory zbiornikowej oraz sposób jej użytkowania, co wyraża się ilością przepływającej wody oraz produktu zatłaczanego i pobieranego z komory. Otwór eksploatacyjny musi być prostoliniowy i pionowy, przy czym jego maksymalne odchylenie od pionu nie może przekroczyć 1—1,5° (15, 21). Ilustracją poglądową typowego zarurowania otworu przy ługowaniu komory zbiornikowej na wysadowym złożu solnym jest ryc. 1.

Kształt i pojemność zbiornika komorowego zależne są od przyjętej metody ługowania, parametrów geologiczno-złożowych oraz własności fizyczno-mechanicznych skał złożowych i otaczających. Idealnym kształtem komory byłaby kula lub elipsoida obrotowa o stosunku osi 2:5, której dłuższa oś pokrywałaby się z kierunkiem maksymalnej składowej naprężenia podstawowego (15, 16, 24). W praktyce, jak to już wcześniej nadmieniono, uzyskuje się komory cylindryczne, gruszkowate lub tunelowe. W zależności od przeznaczenia, pojemności komór wylugowanych w soli wahają się od kilku do kilkuset tys. m³, a to:

- 1) dla ropy naftowej — powyżej 100 tys. m³,
- 2) dla sprężonego gazu ziemnego — powyżej 50 tys. m³,
- 3) dla gazów skroplonych (np. butanu, propanu, propylenu, oraz ich mieszanki) — powyżej 10 tys. m³ (przeciętnie 30 tys. m³).

Lokalizacja głębokościowa komór zbiornikowych zależy od głębokości zalegania, budowy geologicznej i położenia geograficznego złoża solnego w stosunku do odbiorców zmagazynowanych w nim produktów oraz możliwości technicznych jego udostępnienia. Ogólnie biorąc, istniejące na świecie zbiorniki podziemne założone w złożach soli kamiennej są zlokalizowane najczęściej w przedziale głębokości 100—1 500 m, przy czym na wybór optymalnej głębokości rzutuje rodzaj składowanego medium (9, 12, 11, 17, 22, 23 i in). Przy magazynowaniu gazów skroplonych głębokość musi być tak dobrana, aby ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez płyn wypełniający otwory eksploatacyjne (szyby) było wystarczające dla utrzymania składowanego produktu w stanie ciekłym, uwzględniając temperaturę skały otaczającej. Wobec powyższego, głębokość składowania dla skroplonego butanu powinna być nie mniejsza niż 40—60 m, skroplonego propanu 80—100 m, a w przypadku mediów magazynowanych pod większym ciśnieniem (np. gaz ziemny, sprężone powietrze i etylen) duża głębokość wpływa na zwiększenie pojemności składowania gazu w stosunku do objętości danej komory.

Ciśnienie robocze składowania jest zależne od lokalizacji głębokościowej zbiornika, który w przypadku wypełnienia go medium gazowym będzie zbiornikiem wysokociśnieniowym, obciążanym w dopusz-

czalnych granicach ciśnienia, tj. między maksymalnym i minimalnym ciśnieniem składowania (2, 7, 16, 19–21). Wspomniane granice ciśnienia gwarantują rentowność i żywotność zbiornika komorowego. Przy określaniu maksymalnego ciśnienia składowania za poziom odniesienia przyjmuje się najsłabszy punkt komory, znajdujący się na wysokości buta najgłębiej sięgającej kolumny cementowanych rur obsadowych w jej stropie. Dla tego właśnie poziomu przelicza się maksymalne ciśnienie składowania, posługując się odpowiednimi gradientami ciśnienia, a mianowicie: $1,6 \text{ kp/cm}^2 \cdot 10 \text{ m}$ według doświadczeń francuskich, lub $1,7 \text{ kp/cm}^2 \cdot 10 \text{ m}$ według doświadczeń niemieckich. Minimalne ciśnienie składowania jest natomiast funkcją średniej głębokości komory zbiornikowej i parametrów wytrzymałościowych soli kamiennej.

Szczelność, stateczność i konwergencja górotworu solnego wokół komory magazynowej są uzależnione zarówno od czynników naturalnych, jak i technologicznych, do których należą: głębokość zalegania złoża solnego i stopień zróżnicowania jego budowy wewnętrznej, właściwości fizyczno-mechaniczne skał złożowych i otaczających oraz projektowany system komór zbiornikowych, ich wymiary i warunki ruchowe eksploatacyjne (przyjęte granice ciśnienia roboczego, szybkość obciążania i odciażania komór). Szczelność według A. Clerc-Renarda (4) i D. Dubois (7) bada się za pomocą prób ciśnieniowych w dwóch momentach:

1) w otworze eksploatacyjnym przed rozpoczęciem ługowania komory magazynowej,

2) po wyługowaniu komory, ale przed zapelnieniem jej węglowodorami, określając tzw. zdolność składowania.

W otworze eksploatacyjnym dokonuje się prób ciśnieniowych przed zwierceniem i po zwierceniu korka cementowego, w celu wykazania pełnej szczelności zarurowanego otworu oraz odcinka złoża solnego, przeznaczonego do ługowania komory magazynowej. Z kolei zdolność składowania bada się przy ciśnieniu o 20% wyższym od maksymalnego ciśnienia roboczego, obliczonego jednym z wyżej opisanych sposobów. Dopuszczalną różnicę naprężeń $p_0 - p_1$, czyli górotworu solnego z jednej strony i ciśnienia wewnętrznego w zbiorniku z drugiej, przyjmuje się jako uzasadnioną granicę jego stateczności (21).

Zjawisko konwergencji wiąże się z podatnością soli na plastyczne odkształcenia pod wpływem naprężeń panujących w górotworze. Jego objawem jest kurczenie się objętości wyługowanej komory magazynowej, rosnące ze wzrostem temperatury i głębokości oraz czasowej zmiany różnicy wymiennionych naprężeń $p_0 - p_1$. Wspomniane odkształcenie rozpoczyna się po przekroczeniu granicy plastyczności soli, co zachodzi przy efektywnej różnicy naprężeń $p_0 - p_1$, wynoszącej od 100 do 250 kp/cm^2 (20, 21). Rozmiary tego zjawiska powinny być obowiązkowo badane w komorach magazynowych, zlokalizowanych na głębokości przekraczającej 1000 m.

Grubość półki stropowej i spągowej oraz filaru brzeżnego zależy od stateczności i szczelności górotworu solnego. W tym przypadku należy jednak wykorzystać bogate doświadczenia górnictwa solnego, przedstawione przez G. Richter-Berburga (18). Stosownie do tych wskazań, w wysadowych złożach solnych przyjęto grubość filaru brzeżnego minimum 50 m, a półki stropowej nad komorami magazynowymi w sposób następujący:

1) co najmniej 150–200 m dla złóż zalegających na głębokości do 500 m,

2) co najmniej 100 m dla złóż zalegających na głębokości przekraczającej 500 m.

Dokładniejsze wyznaczenie półki stropowej dla podziemnych komór zbiornikowych można oprzeć na wyznaczonych badaniach laboratoryjnych przez W. Dreyera proporcjach między warstwami stropowymi i średnicą komór (s/d), przy różnym udziale części nierozpuszczalnych w soli kamiennej (vide 21). W przypadku natomiast złóż pokładowych grubość półki

stropowej i spągowej musi być każdorazowo określana, z uwzględnieniem szczelności i stateczności skał stropowych i spagowych, bezpośrednio przylegających do złoża solnego. Filary międzykomorowe nie powinny być mniejsze od podwójnej średnicy komory magazynowej (18) lub też na podstawie omówionego badania W. Dreyera.

ZAKRES NIEZBĘDNYCH GEOLOGICZNYCH PRAC ROZPOZNAWCZYCH

W świetle istniejących w Polsce przepisów, wynikających z „Instrukcji w sprawie zasad i sposobu ustalania zasobów złóż kopalin stałych” obowiązującej od 1964 r. oraz Uchwały nr 66 Rady Ministrów z dnia 4 kwietnia 1975 r., przyjmuje się rozpoznanie geologiczne złoża solnego w kategorii C₁, uzupełnione programem dodatkowych badań, za wystarczające dla oceny jego przydatności do podziemnego magazynowania węglowodorów oraz innych substancji. W tym celu prace geologiczne rozpoznawcze obejmowałyby:

- 1) prace geofizyczne prowadzone z powierzchni,
- 2) prace wiertnicze,
- 3) badania geofizyczne w otworach wiertniczych,
- 4) badania laboratoryjne prób rdzeniowych.

Prace geofizyczne powierzchniowe, oparte najczęściej na metodach grawimetrycznych, elektrycznych, sejsmicznych i geotermicznych, rzadziej natomiast magnetycznych i tellurycznych, służą do rozpoznania konturu złoża solnego, głębokości zalegania, kształtu i morfologii jego powierzchni. Wyniki tych prac wpływają na bardziej racjonalne rozmieszczenie wierceń poszukiwawczych i rozpoznawczych, uściślając ich głębokość oraz zmniejszając liczbę.

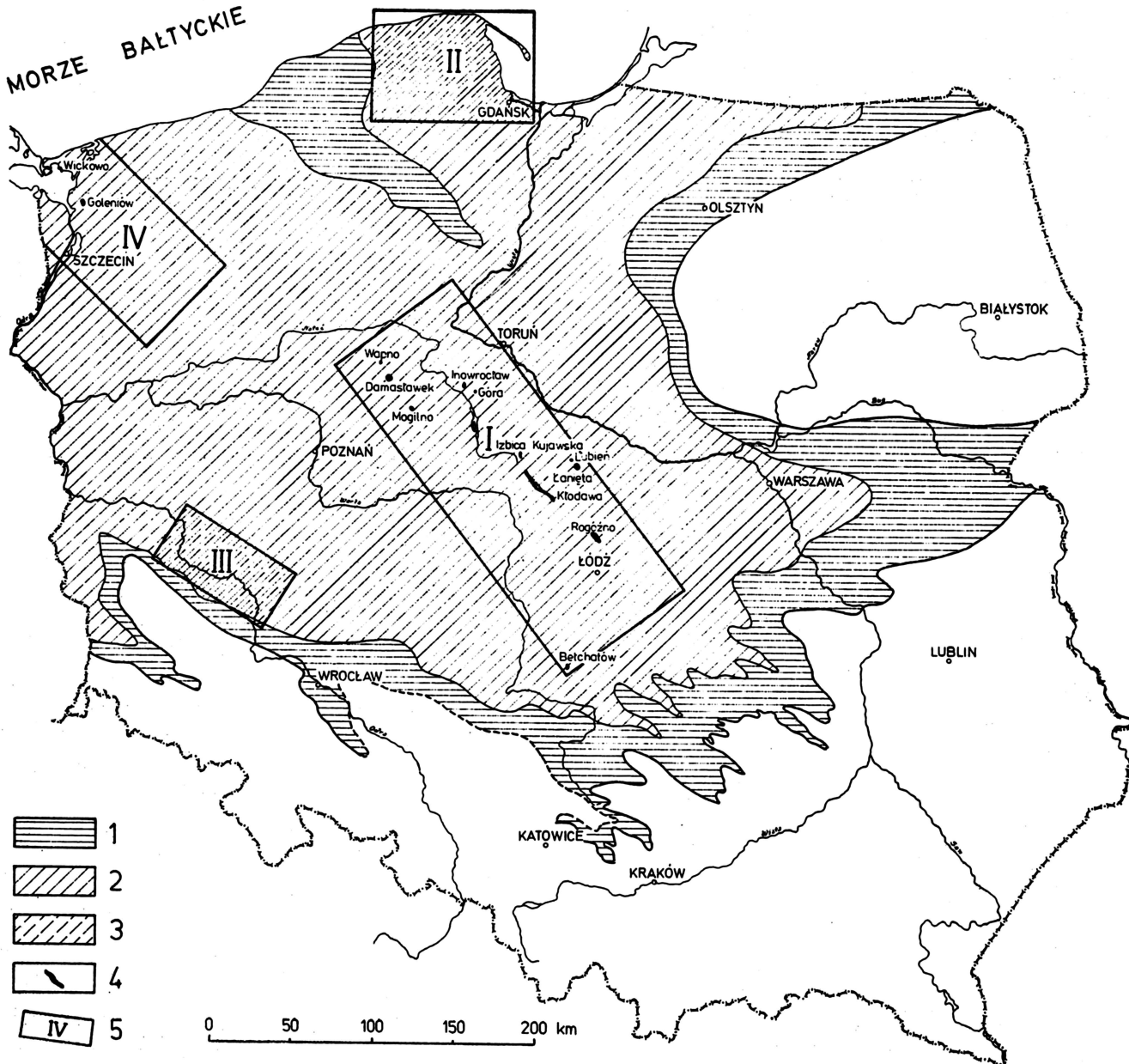
Prace wiertnicze prowadzone są w odpowiednim zagęszczeniu (ilości), wynikającym z przynależności danego złoża solnego do określonej grupy klasyfikacyjnej złóż (I, II lub III) i kategorii rozpoznania zasobów. Podczas wiercenia pobiera się w sposób ciągły rdzeń wiertniczy ze skał litych oraz próby płuczki z skał sypkich. Uzysk rdzenia w złożu solnym powinien wynosić co najmniej 85–90%, a ze skał nadkładowych i spagowych — 70%. W trakcie przewiercania złoża solnego należy stosować płuczkę wiertniczą o takim stężeniu, które zapobiegałoby ługowaniu rdzenia. Z kolei w złożach solnych o zawilślanej budowie wewnętrznej (np. wysadowych) zaleca się pobieranie z każdego otworu po kilka rdzeni orientowanych. Dzięki nim uzyskuje się dane co do układu warstw (rozciągłość, kierunek i kąt upadu), ułatwiające korelację profili różnych otworów, a tym samym właściwą interpretację tektoniki.

Badania geofizyczne w otworach wiertniczych są pomocne w opracowaniu pełnej dokumentacji geologicznej tych otworów w zakresie: litologii przewierconych warstw, wyznaczenia współczynnika porowatości i przepuszczalności różnych skał oraz występowania poziomów wodonośnych, określenia miąższości i jakości złoża solnego, wreszcie ustalenia stanu technicznego otworu pod względem zarurowania i zacementowania. W otworze wiertniczym prowadzi się pomiary standardowe na całej jego długości (skala 1:500 lub 1:200) oraz detaliczne w perspektywicznych odcinkach danego otworu (skala 1:50 lub 1:20). Ze wspomnianych pomiarów uzyskuje się wyniki w formie wykresów, które służą do interpretacji ilościowo-jakościowej albo ilościowej lub jakościowej.

W każdym otworze wiertniczym stosowane są następujące pomiary geofizyczne:

- 1) przed zarurowaniem — profilowanie: oporności (PO), potencjałów polaryzacji własnej (PS), gamma (PG), neutron-gamma (PNG), średnicy (Pśr), krzywizny (Pkr), temperatury i oporności płuczki (POP) rezystwimetrem powierzchniowym;
- 2) po rurowaniu — profilowanie akustyczne dla kontroli cementacji rur (PA);
- 3) końcowe po odwierceniu całego otworu — profilowanie: temperatury i oporności płuczki (POP) rezystwimetrem powierzchniowym, oporność sondy

MORZE BAŁTYCKIE



Ryc. 2. Uproszczona mapa facjalno-złożowa cechztyńskiego zagłębia solnego w Polsce (zestawiona na podstawie Mapy halogenicznej R. Osika i J. Poborskiego, 1970).

1 — facja siarczanowo-węglanowa (litoralna), 2 — facja chlorkowa, 3 — pokładowe złoża soli, 4 — wysadowe złoża soli, 5 — obszar występowania złóż solnych (I — środkowo-polski, II — północny (nadbałtycki), III — południowo-zachodni, IV — północno-zachodni).

Fig. 2. Simplified facies-deposit map of the Zechstein salt basin of Poland (compiled on the basis of the Halogenic Map of R. Osika and J. Poborski, 1970).

1 — sulphate-carbonate (littoral) facies, 2 — chlorine facies, 3 — layered rock-salt deposits, 4 — dome rock-salt deposits, 5 — areas of occurrence of rock-salt deposits (I — Mid-Polish, II — northern, Peri-Baltic, III — southern and IV — north-western).

potencjalną (POp), gamma (PG), gamma-gamma (PGG), neutron-neutron nadtermiczne (PNN), termiczne (przewodność temperaturowa), akustyczne (PA), średnicy otworu (kawernomierz) — (Pśr), krzywizny (Pkr), gazowe (Pgaz).

Badania laboratoryjne próbek wiertniczych, służące do oceny rodzaju i jakości kopalin użytecznych występujących w złożu solnym (sól kamienna, sole potasowo-magnezowe), obejmują:

1) badania składu chemicznego:

- analizy wskaźnikowe (NaCl , K_2O , MgO) na próbkach ciągłych z wydzielonych odcinków rdzenia,
- analizy skrócone (Cl , Na , Mg , Ca , SO_4 , K , Br , cz. nierozp. w H_2O) na próbkach ciągłych pobieranych co 0,1–0,5 m lub 1,0–5,0 m,

- analizy pełne na pojedynczych próbkach (pełny zestaw składników),
 - analiza bromowa wyłącznie na próbkach ciągłych soli kamiennej, pobieranych co 0,1–0,5 m,
 - analiza zawartości pierwiastków śladowych (Rb , Cs , Sr , B , Ba , metale ciężkie) na próbkach ciągłych z wydzielonych odcinków rdzenia;
- 2) badania mineralogiczno-petrograficzne:
- analiza grawitacyjno-optyczna na próbkach proszkowych ze skał solnych,
 - analiza grawitacyjno-optyczna części nierozpuszczalnych w wodzie po rozpuszczeniu soli,
 - analiza mikroskopowa płytek cienkich z wybranych odcinków rdzenia,
 - analiza makroskopowa szlifów powierzchniowych z wybranych odcinków rdzenia;

3) badania specjalne (na wybranych próbkach z przeciętych rdzeni):

- analiza termiczno-różnicowa skał solnych,
- analiza spektralna i rentgenograficzna,
- analiza fluorescencyjna skał solnych bitumicznych,
- określenie omawianych już własności fizyczno-chemicznych oraz mechanicznych skał złożowych i otaczających na pojedynczych próbkach, pobieranych metodą przecinania rdzeni.

Przytoczony wyżej zakres prac geologicznych rozpoznawczych wypływa nie tylko z wymagań dotyczących opracowania dokumentacji geologicznej w kategorii zasobów C_1 , ale i z przyjętych założeń geologiczno-górnich dla podziemnego magazynowania różnych mediów w złożach soli. Uwzględnia on bowiem nowy kierunek wykorzystania złóż solnych, nie wykluczając ich znaczenia czysto surowcowego.

OBCENY STAN ROZPOZNANIA GEOLOGICZNEGO ZŁOŻ SOLI W POLSCE ORAZ MOŻLIWOŚCI ICH WYKORZYSTANIA W GOSPODARCE NARODOWEJ

Według dotychczasowego stanu rozpoznania geologicznego naszego kraju, złoża soli występują głównie w obszarze dwóch zagłębi, tj. cechsztyńskiego i mioceńskiego. Zagłębie cechsztyńskie zajmuje ponad 3/5 powierzchni Polski, stanowiąc tzw. wschodnią prowincję największego zagłębia solnego Europy. Pomimo tak ogromnych rozmiarów powierzchniowych, rozmieszczenie złóż soli w zasięgu facji chlorkowej tego zagłębia w naszym kraju jest bardzo nierównomierne. Przy obecnym stanie techniki górniczej złoża te są dostępne dla eksploatacji w następujących okręgach (ryc. 2):

- 1) środkowopolskim,
- 2) północnym (nadmorskim),
- 3) południowo-zachodnim,
- 4) północno-zachodnim.

W pierwszym i ostatnim z tych okręgów są zgromadzone wyłącznie wysadowe złoża soli, których rozpoznanie geologiczne jest bardzo zróżnicowane. Do złóż zagospodarowanych górniczo należą: „Wapno”, „Inowrocław”, „Góra” i „Kłodawa”. Złożami udokumentowanymi geologicznie w kategorii zasobów C_2 są: „Mogilno”, „Lubień”, „Łanęta” i „Rogóźno”. Ponadto metodami geofizycznymi i pojedynczymi wierceniami wstępnie rozpoznano następujące złoża: „Damasławek”, „Izbica Kujawska”, „Bełchatów”, oraz „Goleniów” i „Wickowo”. W obrębie tego typu złóż najlepsze warunki lokalizacyjne dla założenia zbiorników podziemnych istnieją w jednorodnych masach antyklinalnych starszej soli kamiennej (piętro Z2) w wysadach Lubień i Łanęta, co nie wyklucza pozostałych wysadów solnych, w tym również zagospodarowanych.

W okręgach północnym (nadmorskim) i południowo-zachodnim (monoklina przedsudecka) występuje gruby pokład najstarszej soli kamiennej (piętro Z1), o przeciętnej miąższości kilkudziesięciu do paru set m, niezaburzony lub słabo zaburzony tektonicznie, w którym istnieją bardzo korzystne warunki do zakładania podziemnych zbiorników. Wziąwszy pod uwagę ogólne czynniki lokalizacyjne tych złóż, największe zainteresowanie przedstawiałyby okręg północny (nadmorski), korzystnie usytuowany względem dużych portów morskich i zakładów petrochemicznych. W okręgu tym znajduje się między innymi złożo „Mechelinki”, udokumentowane geologicznie w kategorii zasobów C_1 , które ze względu na czystość soli kamiennej, znaczną miąższość, głębokość zalegania i korzystne położenie geograficzne w pobliżu Trójmiasta nadaje się do lokalizacji komór magazynowych.

Poza tym wszystkie pozostałe złoża pokładowe i wysadowe w zagłębiu cechsztyńskim, z wyjątkiem zagospodarowanych, wymagają rozpoznania geologicznego i udokumentowania w kategorii C_1 zarówno pod kątem surowcowym, jak i podziemnego magazynowania różnych mediów.

Zagłębie mioceńskie znajduje się w południowej części naszego kraju, w której złoża soli — oprócz

odosobnionego złoża pokładowego „Rybnik—Żory—Orzesze” na Górnym Śląsku — koncentrują się w bardzo wąskim pasie przykarpackim, od okolicy Wieliczki na zachodzie po Tarnów i Pilzno na wschodzie. Z powodu bardzo małych rozmiarów większości tych złóż, skomplikowanej budowy wewnętrznej i dużego zanieczyszczenia, nie są one interesujące dla podziemnego magazynowania na obecnym etapie naszej myśli technicznej w tym zakresie.

WNIOSKI

1. Duża baza surowcowa naszego kraju w zakresie złóż soli stwarza korzystne perspektywy zarówno dla rozwoju klasycznego górnictwa solnego, jak i podziemnego magazynowania węglowodorów ciekłych i gazowych oraz innych substancji w soli kamiennej.

2. W racjonalnym wykorzystaniu tej bazy powinno się dążyć do jej kompleksowego zagospodarowania przez przemysł solny i petrochemiczny.

3. Założenia geologiczno-górnice oraz czynniki lokalizacyjne przemawiają za wykorzystaniem do podziemnego magazynowania w pierwszej kolejności cechsztyńskich złóż soli wysadowych w okręgu środkowopolskim (np. „Lubień” i „Łanęta”) oraz pokładowego w okręgu nadmorskim (np. „Mechelinki” i inne).

4. Ze względu na brak odpowiedniego przygotowania krajowej bazy surowcowej zarówno dla rozwoju tradycyjnego górnictwa solnego, jak i pod kątem podziemnego magazynowania, należy rozwinąć dla większości dotychczas nie zagospodarowanych złóż soli w Polsce nakreślony powyżej program prac geologicznych rozpoznawczych w kategorii C_1 , która upoważnia do podejmowania działalności inwestycyjnej zainteresowane gałęzie przemysłu.

LITERATURA

1. Biełocerkowska T. W., Biełocerkowski E. A. — O sozdaniji podziemnych chroniliszcz židkich uglewodorow w soljanych piastach, sodierzaszczich prosjoj nierastworimych porod. Transport i chranenije nefti, 1967, nr 12.
2. Buliga G., Gaube R. — Depozitarea gazelor in goluri subterane, cu privire speciala asupra celor realizate prin exploatarea umeda a sarii. Rev. minelot, 1972, 23, no. 7.
3. Charle J. F., Fontan G. — Grands stockages petroliers souterrains. Travaux, 1975, no. 481.
4. Clerc-Renard A. — La réalisation de reservoirs dans les gisements de sel. Industrie Minière, 1972, vol. 54, no. 12.
5. Dreyer W. — Geomechanische Untersuchungen an Kavernen im Steinsalz und Schlussfolgerungen für die unterirdische Gasspeicherung. Bergakademie, 1969, Bd. 21, H. 7.
6. Dreyer W. — Neuere Forschungsergebnisse zur Standfestigkeit von Rohölspeichern. Erdöl und Kohle — Erdgas — Petrochemie, 1974, Bd. 27, H. 1.
7. Dubois D. — Le stockage souterrain d'hydrocarbures de Manosque. Annales des Mines, 1972, no. 12.
8. Förster S. — Durchlässigkeits- und Rissbildungsuntersuchungen zum Nachweis der Dichtheit von Salzkavernen. Neue Bergbautechnik, 1974, 4 Jg., H. 4.
9. Hofrichter E. — Behälterlose Speicherung von Energieträgern in ausgesalzenen Kavernen — geologisch-lagerstättenkundliche Probleme. Erdöl — Erdgas — Zeitschrift, 1972, 88 Jg., no. 8.
10. Hofrichter E. — Speicherkavernen in Salzstöcken Nordwestdeutschlands — Geologische Probleme, Bemerkungen zur selektiven Auflösung von Kalisalzen. Zeitschrift Erzmetall, 1974, Bd. 27, H. 5.
11. Issenmann O. — Le stockage souterrain des produits pétroliers. Revue Pétrolière, 1962, no. 1041.

12. Iwancow O. M. — Podziemnoje chramienije szczyżennych uglewodornych gazow. Niedra, Moskwa, 1964.
13. Köhsling J., Piekarczyk J. — Rozwój metod podziemnego składowania gazów i produktów naftowych. Nafta, 1975, nr 1.
14. Krick G. — Geologische und technische Aspekte der Salzkavernenspeicherung. Bergbau, 1974, 25, no. 7.
15. Lechler S. — Here's how Mobil prepares storage caverns in German salt-domes. Petroleum and Petrochemical International, 1971, vol. 11, no. 12.
16. Menzel W., Schreiner W. Geomechanische Aspekte bei der Errichtung von Kavernenspeichern in Steinsalzfornationen. Neue Bergbautechnik, 1974, 4 Jg., H. 4.
17. Millet J. L. — Les stockages souterrains. Gaz d'Aujourd'hui, 1972.
18. Richter-Bernburg G. — Geologische Voraussetzungen für die Anlage von Rohöl — Speichern in Salz-Kavernen. OEL — Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft, 1970, no. 7.
19. Rischmüller H. — Salzkavernen zur Speicherung von Rohöl und Erdgas in Bundesrepublik Deutschland. Erdoel — Erdgas — Zeitschrift, 1972, 88 Jg., H. 7.
20. Röhr H. U. — Gebirgsmechanisches Verhalten einer Kaverne in Salzgestein. Kali und Steinsalz, 1973, Bd. 6, H. 5.
21. Röhr H. U. — Zur Planung und Überwachung von Kavernen in Salz. Ibidem, 1975, Bd. 6, H. 12.
22. Rühl W. — Lagerstättenkundliche Grundlagen der unterirdischen Speicherung gasförmiger und flüssiger Kohlenwasserstoffe. Naturwissenschaften, 1967, 54 Jg., H. 12.
23. Rühl W. — Unterirdische Grossraumlagerung von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen. Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, 1971, 24 Jg., H. 5.
24. Siskind D. E., Hardy H. R., Alexander S. S. — A Study of Pressurized Underground Storage Cavities: Theoretical and Laboratory Investigations. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Pergamon Press, 1973, vol. 10, no. 2.
25. Stepek Z. — Magazynowanie podziemne ropy naftowej, produktów naftowych i paliw gazowych. Ośrodek Inform. Centr. Cinte, 1975, nr 15/75.

SUMMARY

The economical development of Poland requires to store steadily increasing amount of oils and derivative products. A large import of these raw materials of petrochemical industry and their consumption changing in time as well as the requirements of environment conservation evoked an increase in interest in underground reservoirs in our country.

The most popular method of underground storage of various media throughout the world is the storage in caverns made in rock salt with the use of water (Fig. 1). On the basis of published information on the experience and world achievements in that discipline, general geological-mining premises obligatory in designing underground reservoirs are presented. Subsequently, the range of geological-reconnaissance works necessary for underground storing are defined and the present-day knowledge of the country basis of salt deposits is analysed.

The array of reconnaissance geological works comprises surficial geophysical surveys, drilling geophysical logging of borehole columns and necessary laboratory measurements made on core material.

Such range of studies meets the requirements of geological demonstration of salt deposits for both the estimation of deposit resources and the underground storage of liquid and gas hydrocarbons and other materials.

In Poland, salt deposits mainly occur in the areas of Zechstein and Miocene salt basins. Their spatial distribution is, however, highly nonuniform, similarly as the level of their geological knowledge. Deposits most interesting from the point of view of underground storage are Zechstein salt deposits of the dome type in Central Poland and of the layer type in the northern (peri-Baltic) region (Fig. 2). In the case of the former, the best conditions for location of stores are in uniform anticlinal massifs of fairly pure older rock salt (Z2 stage) usually several hundred meters thick. In the case of the latter, the best opportunities are in the oldest rock salt layer (Z1 stage), from some tens to several hundred meters thick on the average. The majority of hitherto unmanaged salt deposits in Poland should be covered by the above mentioned programme of geological-prospecting works in the Polish deposit category C₁, which warrants to start making investments.

РЕЗЮМЕ

Хозяйственное развитие Польши требует накопления все больших запасов нефти и ее производственных продуктов. Большой импорт сырья для петрохимической промышленности и необходимость охраны натуральной среды вызвали живой интерес вопросом подземных хранилищ.

Среди нескольких способов подземного складывания разных продуктов чаще всего встречаются в мире бункерные камеры (каверны), долбленные водой в солевых пластах (рис. 1). На основании мировых опытов и достижений в этой области, описанных в литературе, в статье представлены общие горные и геологические предпосылки, действующие в проектировании подземных хранилищ. Приведены пределы геологических и разведочных работ, необходимых для подземного складывания, а также проведен анализ современного состояния разведки отечественной базы солевых месторождений.

В области геолого-разведочных работ выделены поверхностные геофизические исследования, буровые работы, исследование скважинной геофизики и лабораторные испытания образцов полученных из буровых кернов. Предел этих исследований соответствует потребностям геологического документирования солевых месторождений как в области сырья, так и подземного складывания жидких и газовых углеводородов, а также других веществ.

В Польше солевые отложения находятся прежде всего в цехштейновом и миоценовом бассейне. Географическое размещение этих месторождений весьма неравномерно, а степень их разведки — разный. Самыми интересными с точки зрения подземного складывания являются цехштейновые солевые месторождения в форме куполов в центральной Польше и в форме пластов — в северной части страны (прибалтийский район), рис. 2. В пределах солевых куполов самые хорошие условия для локализования подземных хранилищ встречаются в однородных антиклинальных массивах довольно чистой старшей каменной соли (ярус 32), мощностью в несколько сот метров. В пластовых месторождениях соли наилучшие условия для подземных хранилищ находятся в самой старой каменной соли (ярус 31), мощностью с нескольких десятков до нескольких сот метров.

Для большинства неразведанных до сих пор отечественных солевых месторождений необходимо проведение геолого-разведочных работ в категории C₁, которые являются основой для инвестиционных работ.