



Źródła wiedzy o procesie ługowania kawern solnych (Proces ługowania kawern solnych cz. I)

Sources of our knowledge about leaching process (Salt cavern leaching process p. I)

Kazimierz URBAŃCZYK

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o.
ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków, e-mail: urbanc@chemkop.pl

STRESZCZENIE

W pracy szczegółowo omówiono źródła naszej wiedzy o procesie ługowania. Są to laboratoryjne testy na próbkach soli, fizyczne modele w blokach soli, doświadczenie górnicze z ługowania kawern oraz eksperymenty in situ. Rozkładem stężenia solanki w kawerni rządzi turbulentne mieszanie. Można w kawernie wyróżnić dwie strefy: całkowitego mieszania, powyżej buta rury wodnej oraz strefę stratyfikacji poniżej.

Słowa kluczowe: Proces ługowania, kawerna solna, szybkość ługowania, fizyczne modelowanie ługowania, opomiarowanie procesu ługowania, eksperymenty ługownicze in-situ.

ABSTRACT

Sources of our knowledge about leaching process are in details discussed in the paper. There are laboratory tests on salt samples, physical models in salt blocks, mining experience with cavern leaching and leaching experiments in situ. Distribution of brine concentration in the cavern is governed by turbulent mixing processes. Two main zones can be found in the salt cavern: zone of total mixing, above the water tubing shoe and stratification zone below.

Key words: Leaching process, salt cavern, leaching rate, physical modeling of leaching, measurements during leaching process, leaching experiments in-situ.

WSTĘP

Niniejszy tekst jest pierwszym i zarazem wstępnym do serii poświęconej procesowi ługowania, która będzie się ukazywać w kolejnych numerach *Przeгляdu Solnego*. Zamierzeniem autora jest podsumowanie wiedzy na ten temat, zwłaszcza jeśli idzie o opis matematyczno-fizyczny, jego stosowalność oraz implementacje w postaci modeli komputerowych.

Każda teoria jednak musi mieć swoją bazę empiryczną, która ją weryfikuje. Dlatego, zanim zacznie się rozpatrywać szczegółowo model procesu ługowania, konieczne jest uświadomienie sobie skąd pochodzi nasza wiedza empiryczna o tym procesie i co ona obejmuje. Temu jest poświęcona niniejsza część I.

Ługami nazywano tradycyjnie stężone roztwory solne, a ługowaniem – wytwarzanie takich roztworów, przez fizykochemiczny proces rozpuszczania. Później uściślono, że proces ługowania polega na częściowym rozpuszczaniu niejednorodnego ośrodka stałego – skały solnej, składającej się z części rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych. Części rozpuszczalne przechodzą do roztworu, części nierozpuszczalne ulegają rozkruszeniu i wymyciu, częściowo opadają na dno kawerny, poprzez roztwór, częściowo tworzą w nim zawiesinę.

Górnictwo ługownicze lub w skrócie ługownictwo, polega na wydobywaniu surowca mineralnego poprzez zatłoczenie do złoża substancji rozpuszczającej (w praktyce wody) i wytłoczeniu roztworu zawierającego rozpuszczony surowiec. W efekcie rozpuszczania w złożu zostaje wytworzona kawerna, wypełniona roztworem.

Surowcem najczęściej eksploatowanym metodą ługowniczą jest sól kamienna. Długi czas celem takiej eksploatacji była produkcja solanki dla potrzeb przemysłu chemicznego i warzelnictwa. Okazało się jednak, że kawerna wytworzona przez ługowanie może być wykorzystywana jako podziemny magazyn substancji użytecznych. Dziś większość kawern ługuje się z myślą o ich przyszłym wykorzystaniu w celach magazynowych.

Technika magazynowania ropy naftowej i ciekłych węglowodorów w ługowniczych kawernach solnych została opatentowana w 1916 roku w Niemczech, rozwinięta teoretycznie w Kanadzie w latach czterdziestych XX w. i po raz pierwszy zastosowana w latach 1950-ych w USA i Wielkiej Brytanii. Dziś czynne w świecie magazynowe kawerny solne liczy się na kilkanaście setek. A w budowie i planowaniu, zwłaszcza w Europie i zwłaszcza dotyczy to kawern magazynowych gazów ziemnych, są dalsze setki kawern.

Wymagania dotyczące kształtu komór magazynowych pociągnęły za sobą konieczność precyzyjnego, na ile to możliwe, kontrolowania rozwoju kształtu kawern w trakcie ich ługowania, stąd zaś narodziła się potrzeba optymalizacji technologii ługowania i w konsekwencji komputerowego modelowania tego procesu.

Nasza znajomość procesu ługowania opiera się na dwóch głównych źródłach informacji:

1. Badania laboratoryjne:
 - testy na próbkach
 - modelowanie fizyczne w blokach solnych
2. Doświadczenie górnicze (obserwacje ługowanych kawern)
 - pomiary wykonywane w kawernach ługowanych z powierzchni
 - pomiary i bezpośrednie obserwacje w kawernach ługowanych z podziemnych wyrobisk kopalnianych

Opis matematyczno-fizyczny procesu ługowania i jego implementacja w formie oprogramowania komputerowego musi, na ile to możliwe, być w zgodzie z powyższą wiedzą.

BADANIA LABORATORYJNE

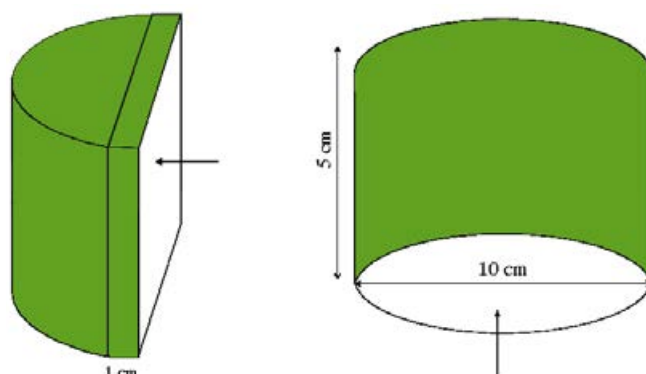
2.1. Testy na próbkach soli

Próbki soli pobrane z wyrobisk kopalnianych bądź rdzeni wiertniczych bada się w laboratorium by uzyskać informacje o własnościach skały solnej. Bada się skład chemiczno-mineralogiczny, udział części nierozpuszczalnych, a przede wszystkim szybkość rozpuszczania (Kunstman i in. 2002, 2007).

Na podstawie badań laboratoryjnych określa się szybkość rozpuszczania się danej skały, jak również wpływ, jaki na tę szybkość mają kąt nachylenia rozpuszczanej powierzchni, temperatura oraz stężenie roztworu, w którym dokonuje się rozpuszczanie. Takie badania o szerokim zakresie wykonuje się rzadko, zwykle raz określwszy zależności, z reguły

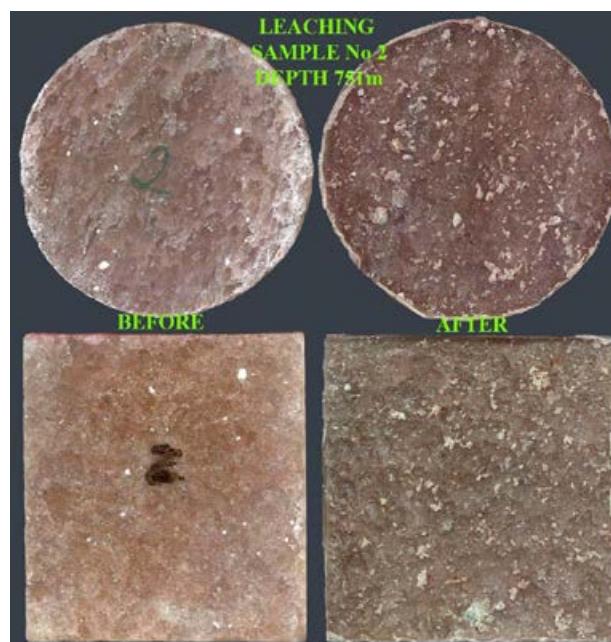
uogólnia się je na wszystkie odmiany soli kamiennych. Później bada się jedynie, jako parametry przyjętych formuł, szybkość rozpuszczania w warunkach standardowych, tj. w wodzie słodkiej i temperaturze 20°C.

Typowe badania, jakie wykonuje się w tych badaniach polegają na zawieszeniu próby w zbiorniku wypełnionym stojącą wodą, przy czym jedna ze ścian próby jest wygładzona, splanimetrowana (zeskanowana) i wystawiona na ługowanie, pozostałe są zaizolowane woskiem. Mierzy się szybkość ługowania bocznego (horyzontalnego) i stropowego (wertykalnego), gdyby jednak była taka potrzeba, kąt nachylenia może być dowolny. Przy tym tak się wycina próbę, by jej położenie (górną-dół) odpowiadało położeniu w złożu. Jeśli próba pochodzi z rdzenia wiertniczego, szybkość ługowania poziomego bada się na fragmencie rdzenia rozciętym na pół. (Kasprzyk 2012, Kasprzyk, Kosowski 2009).



Ryc. 1. Schemat przygotowania próbek do pomiaru szybkości ługowania

Fig. 1. Idea of preparing the salt samples to the leaching rate measurements.



Ryc.2. Wygląd powierzchni rozpuszczanych przed i po teście szybkości ługowania.

Fig. 2. Surfaces of salt samples before and after the leaching rate test.

Ryc.1 przedstawia schematycznie próby przygotowane do testu – wyznaczenia szybkości ługowania bocznego po lewej, a stropowego po prawej. Kolor zielony oznacza powierzchnie zabezpieczone przed rozpuszczaniem, strzałka wskazuje powierzchnię odsłoniętą, rozpuszczaną podczas testu.

Z kolei na Ryc.2. pokazano próby, na których wykonano test ługowania stropowego (u góry) i bocznego (u dołu). Po lewej – widok prób przed testem, po prawej – po teście.

Badania takie wykonuje się w OBR Chemkop, ale także w innych firmach, przy czym np. w UGS Mittenwalde (Edler D., prywatna informacja) nie wygładza się powierzchni próby przed testem. Argumentuje się przy tym, że w kawernie ocios solny nie jest wygładzony. Jednak przy niewygładzonej powierzchni trudniej dokładnie oszacować powierzchnię całej próby, jak też wżerów powstałych przy rozpuszczaniu, czy nierozpuszczonych ostańców. Zaś ewentualną poprawkę na szorstkość powierzchni można łatwo wprowadzić.

Stosowany obecnie współczynnik szybkości ługowania jest wprost szybkością ługowania dla wody czystej, wyliczaną następującym wzorem:

$$k = \frac{\Delta V}{S\Delta t} = \frac{\Delta M}{\rho S\Delta t} \quad (1)$$

gdzie:

ΔV – ubytek objętości,

ΔM – ubytek masy,

Δt – czas przez który próba była ługowana,

S – powierzchnia próby podlegająca ługowaniu,

ρ – gęstość próby.

Współczynnik k ma wymiar prędkości, w SI powinien być w metrach na sekundę. W praktyce stosuje się zwykle [mm/h], lub [cm/h]. Jest to ubytek objętości podzielony przez powierzchnię rozpuszczaną, przy czym powierzchnię się otrzymuje z planimetrowania, objętość z ubytku masy, wyznaczonego poprzez ważenie próby przed i po eksperymencie i podzielenia ubytku masy przez gęstość próby.

Wydaje się, że jest to najbardziej naturalna wielkość, mierzona na tyle bezpośrednio, na ile to możliwe, w jego wartość nie ingeruje żadna teoria.

W pracach amerykańskich np. (Durie, Jessen 1964) często stosowany jest współczynnik masowy:

$$k_m = \frac{\Delta M}{S\Delta t} \quad (2)$$

Współczynnik k_m ma wymiar masy na jednostkę czasu, w SI [kg/s]. Aby przeliczyć go na k wystarczy zwykle dzielenie przez gęstość soli ρ . Również wartość tego współczynnika nie jest zależna od żadnej teorii.

Z kolei w literaturze rosyjskiej (np. Аксельруд, Молчанов 1977), w dokumentacjach technicznych wykonywanych przez Promgaz i Podzemgazprom, pojawia się współczynnik określony następująco:

$$k_1 = \frac{\Delta V \rho}{S(C_N - C)\Delta t} = \frac{\Delta M}{S(C_N - C)\Delta t} \quad (3)$$

gdzie:

C - stężenie masowo-objętościowe (masa soli na objętość solanki),

C_N - stężenie roztworu nasyconego.

Na wartość tego współczynnika wpływają dwa założenia:

- szybkość rozpuszczania zależy liniowo od niedosycenia roztworu

- stężenie roztworu nasyconego wynosi 317 kg/m³ (taką wartość przyjmuje się we wspomnianych pracach).

Wymiar współczynnika k_1 jest taki sam, jak współczynnika k , co łatwo może prowadzić do nieporozumień. Aby otrzymać k należy przemnożyć k_1 przez C_N/ρ , czyli 0,1471 (przyjmując, że gęstość halitu wynosi 2155 kg/m³). Jeśli szybkość ługowania wynosi powyżej 40 mm/h (lub powyżej 10⁻⁵ m/s), z całą pewnością zachodzi powyższy przypadek. Jeśli np. $k_1 = 50$ mm/h, (lub 1,39x10⁻⁵ m/s) to $k = 7,35$ mm/h (lub 2,043x10⁻⁶ m/s).

Tak określony współczynnik miał eliminować wpływ stężenia roztworu, w jakim rozpuszcza się próbę. Miałoby to sens, gdyby szybkość ługowania rzeczywiście zależała liniowo od niedosycenia, co jednak nie zachodzi. Poza tym testy wykonuje się standardowo w wodzie czystej, czyli dla $C = 0$.

Z kolei w dawnej literaturze rumuńskiej (Manualul, 1956) zdefiniowany jest następujący współczynnik szybkości ługowania:

$$k_2 = \frac{\Delta V}{S(C_N - C)^2 \Delta t} = \frac{\Delta M}{\rho S(C_N - C)^2 \Delta t} \quad (4)$$

Współczynnik k_2 w układzie SI miałby wymiar [m⁷/s kg²]. Rumuni stosowali tradycyjne jednostki [mm/h°Kapp²], gdzie °Kapp oznacza stopień Kappellera, równy 10 gramom na litr. Ponieważ Rumuni przyjmowali $C_N = 33^\circ\text{Kapp}$, by przeliczyć k_2 na k , należy przemnożyć k_2 przez 1089°Kapp². Np. współczynniki wynoszącemu 0,011 mm/h°Kapp² odpowiada $k = 12$ mm/h.

W niektórych laboratoriach pomiar szybkości ługowania przeprowadzano odmiennie: rozpuszczając pobocznice rdzenia, zaś izolując górną i dolną powierzchnię. Dla rdzenia o stosunkowo dużej średnicy jest to o tyle korzystne, że powierzchnia rozpuszczana może być spora i pomiar ubytku wagi uzyskuje się z mniejszym błędem względnym. Niemniej powstaje problem zmniejszania się rozpuszczanej powierzchni z upływem czasu. Przy obliczaniu szybkości rozpuszczania stosuje się „powierzchnię średnią” nie określając, co się ma tu na myśli: średnią w czasie, średnią ważoną z wagą na promień próby, na objętość próby, czy na chwilowe tempo ubytku masy. Gdyby przyjąć, że zakrzywienie powierzchni nie wpływa na szybkość rozpuszczania, że walec stoi pionowo, wtedy z uwagi na stałą wysokość walca, powierzchnia

poboczniczy jest liniowo zależna od promienia. A zakładając, że warunki są stałe w czasie i szybkość rozpuszczania stała, promień powinien liniowo maleć z czasem, czyli średnia po czasie jest zarazem średnią po promieniu.

Posługując się jedynie dwiema wielkościami: początkową masą próby M_0 i ubytkiem masy podczas testu ΔM , można wyrazić taką średnią następująco:

$$\bar{S} = 2\pi R_0 H \left(1 - \frac{\Delta R}{2R_0}\right) = S_0 \left\{1 - \frac{1}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta M}{M_0}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\} \quad (5)$$

Spotyka się jednak (Promgaz) średnią braną po masie (lub objętości) próby. Ponieważ objętość zależy w kwadracie od promienia walca, powierzchnia jego poboczniczy, liniowo zależna od promienia, będzie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z objętości. Odpowiednie przeliczenia dadzą w rezultacie:

$$\bar{S} = \frac{2}{3} \frac{S_0}{\frac{\Delta M}{M_0}} \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta M}{M_0}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \quad (6)$$

Nie trzeba wyjaśniać, że pierwszy ze wzorów jest poprawniejszy. Jednak błąd jest poniżej 1%, jeżeli $\Delta M/M_0$ nie przekracza 20%, tak więc z laboratoryjnego punktu widzenia nie ma większego znaczenia, który ze wzorów się zastosuje.

Np. próba o średnicy 8 cm i wysokości 10 cm, ważąca przed testem 1,087 kg, po półgodzinnym teście waży 0,8795 kg. $\Delta M/M_0$ wyniesie ok. 0,19. Początkowa powierzchnia próby wynosiła 251,32 cm². Średnia powierzchnia wyliczona wzorem (5) wynosi 238,76 cm², wzorem (6) – 238,98 cm².

Szybkość ługowania w przypadku pierwszym wyniesie 8,038 mm/h, w drugim 8,030 mm/h. Różnica mieści się w dokładności pomiaru i błędzie zaokrąglenia.

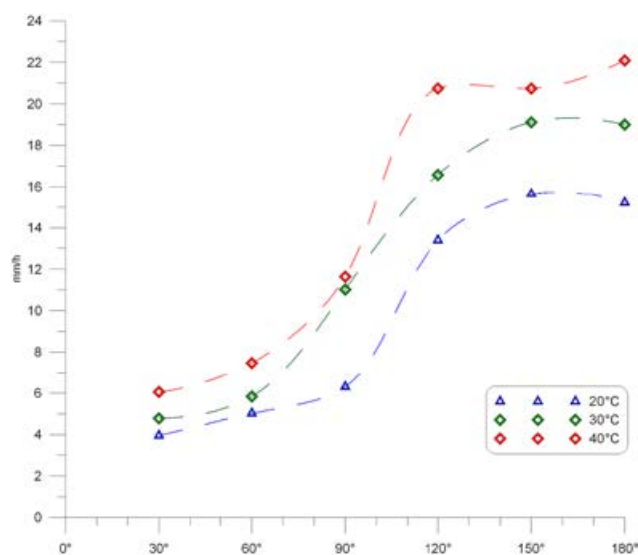
By uniknąć powyższych wątpliwości, co do średniej powierzchni, wymyślono, by przewiercić rdzeń przez środek i rozpuszczać próbę zarówno z zewnątrz, jak i od wewnątrz. W razie równomiernego rozpuszczania, powierzchnia poddawana rozpuszczaniu byłaby stała w czasie. Jednak z uwagi na małą objętość wewnątrz rdzenia, stężenie tam narastało inaczej, niż na zewnątrz. Dlatego, żeby uzyskać wiarygodne wyniki, konieczne stało się rozpuszczanie próby w „warunkach dynamicznych” tj. przy ciągłym, wymuszonym przepływie wody. W tym celu skonstruowano w KBB w latach 70. tzw. „solsimulator”, zapewniający równomierny przepływ wody wzdłuż próby (Meister i in., 1978). Podobne urządzenie skonstruowano też w Chemkopie w latach 80. Wyniki okazały się podobne, jak uzyskane przy pomiarach ługowania bocznego tradycyjnym sposobem a szybkość przepływu wody była praktycznie bez znaczenia. W sumie więc solsimulator nie wniósł niczego nowego, wyjąwszy jedną obserwację: próba ługowała się równomiernie, gdy strumień wody płynął od dołu do góry próby, gdy strumień wody płynął od góry w dół, w gorze próba rozpuszczała się znacznie intensywniej niż

u dołu. Oznaczało to, że przy przepływie z dołu do góry następuje proces szybkiego, grawitacyjnego mieszania się roztworu otaczającego próbę, którego brak podczas przepływu w dół. Okazuje się, że mieszanie grawitacyjne odgrywa większą rolę, niż wymuszony przepływ, nawet przy stosunkowo sporych prędkościach przepływu wody.

Główną zaletą tego urządzenia miał być krótki czas testu, ale w rzeczywistości wcale nie jest on krótszy niż w testach wykonywanych „tradycyjnie”. Najwięcej zresztą czasu zabiera nie sam pomiar a wycięcie próbki i przygotowanie jej do badań. Zdecydowanie trudniej jest przygotować wydrążony walec i precyzyjnie wymierzyć jego powierzchnię, nie mówiąc o weryfikacji, czy faktycznie jest stała do końca pomiaru. Prócz tego przepływ wewnętrzną przestrzenią łatwo ulega zakłóceniu przez wypadające części nierozpuszczalne. No i w solsimulatorze można przebadać jedynie horyzontalną szybkość ługowania.

Badania polskie, czy badania niemieckie (Meister i in., 1978) wskazywały, że szybkość ługowania jest różna dla różnie wykształconych soli. Sole grubokrystaliczne na ogół mają niższą szybkość ługowania, niż drobnokrystaliczne. Wpływ mają też domieszki innych soli rozpuszczalnych, zawartość inkluzji gazowych, a także rozproszone części nierozpuszczalne. Natomiast sam wiek geologiczny soli, jako taki, jest praktycznie bez znaczenia. Brak uwzględnienia efektów geologiczno-mineralogicznych to jeden z zarzutów, jakie postawiono badaniom prowadzonym w IITRI (Illinois Institute of Technology, Research Institute) (Helgeson, 1966).

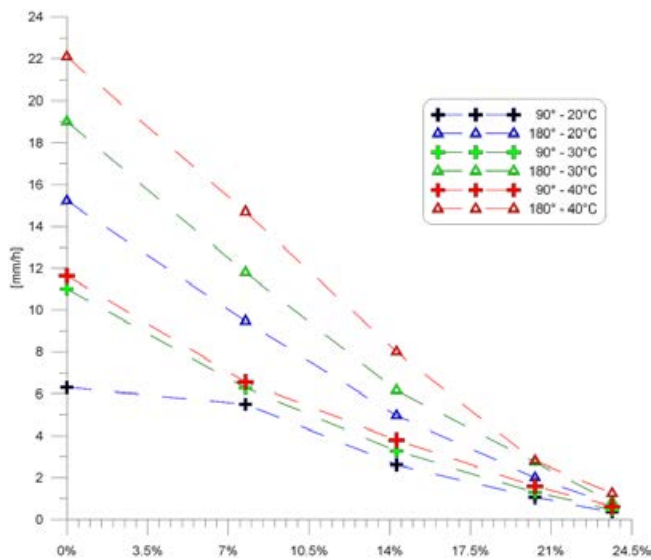
Badania laboratoryjne pokazały, że szybkość ługowania zależy od stężenia roztworu ługującego, temperatury i kąta nachylenia rozpuszczanej powierzchni (Кулле П.А., 1949; Durie, Jessen, 1964; Saberian, 1983; Urbańczyk, 1990), choć stwierdzone zależności różnią się szczegółami.



Ryc. 3. Wpływ kąta nachylenia rozpuszczanej powierzchni na szybkość ługowania.

Fig. 3. Influence of inclination angle of the leached surface on the leaching rate.

Ryc. 3. przedstawia wpływ kąta nachylenia rozpuszczalnej powierzchni na szybkość ługowania. Pomiarzy wykonano w Chemkopie w latach osiemdziesiątych na próbach pobranych z bloku soli z kopalni Kłodawa. Przedstawione pomiary dotyczą ługowania czystą wodą, w trzech temperaturach. Mimo że próby reprezentowały tę samą sól, pomiary wskazują na pewną niejednorodność ich własności.



Ryc. 4. Wpływ stężenia roztworu ługującego na szybkość ługowania.

Fig. 4. Influence of the leaching medium concentration on the leaching rate.

Ryc. 4. przedstawia wpływ stężenia roztworu ługującego na szybkość ługowania. Przedstawiono zależność dla ługowania bocznego (kąta nachylenia 90°) i stropowego (kąta nachylenia 180°), również dla trzech temperatur. Tutaj również daje o sobie znać pewne zróżnicowanie własności soli w, zdawałoby się, jednorodnym bloku. Widać, że zależność od niedosycenia nie jest liniowa. Wprawdzie dla niskich stężeń można by przybliżyć zależność linią prostą, ale przecięła by ona oś x znacznie poniżej stężenia nasycenia. Trzeba też dodać, że nakładają się tutaj dwa efekty: zależność szybkości ługowania od niedosycenia, jak i zależność samego stężenia nasycenia od temperatury.

Szczegółowo wpływ temperatury, stężenia i kąta nachylenia rozpuszczenie powierzchni omawia (Urbańczyk 1990).

Kiedy mowa jest o stężeniu, należy przypomnieć o różnicy pomiędzy pełną mineralizacją solanki (TDS) i zawartością chlorku sodowego. W codziennej praktyce górniczej, przez stężenie rozumie się mineralizację. Tego typu uproszczenie dobrze pracuje, o ile zawartość w nasyconej solance innych rozpuszczonych składników niż NaCl nie przekracza 5 mg/l.

Niewielkie domieszki innych rozpuszczalnych soli mogą mieć istotny wpływ na gęstość solanki. Ponieważ pomiar gęstości jest znacznie prostszy niż chemiczna analiza składu solanki, często ocenia się jej stężenie-mineralizację na pod-

stawie gęstości. Wymaga to jednak uprzedniego zbadania w laboratorium tej zależności dla danej soli z określoną zawartością domieszek. Przykład takiej zależności jest podany w (Kunstman i in. 2002, 2007).

Należy również przy okazji wspomnieć, że niektóre laboratoria wyznaczając zawartość części nierozpuszczalnych w soli, biorą pod uwagę części absolutnie nierozpuszczalne, w żadnych warunkach. Przemywają wodą zmieloną próbę tak długo, aż rozpuści się wszystko, co się może rozpuścić. W praktyce górniczej jednak, sole słabo rozpuszczalne, jak np. anhydryt, zanim zdążą się rozpuścić, opadają na dno kawerny, gdzie zawartość anhydrytu w solance szybko osiąga nasycenie i pozostają nierozpuszczone. Dlatego natrafivszy na termin „udział części nierozpuszczalnych” należy upewnić się, czy chodzi o części teoretycznie nierozpuszczalne w warunkach idealnych, czy o części praktycznie nierozpuszczalne w warunkach górniczych.

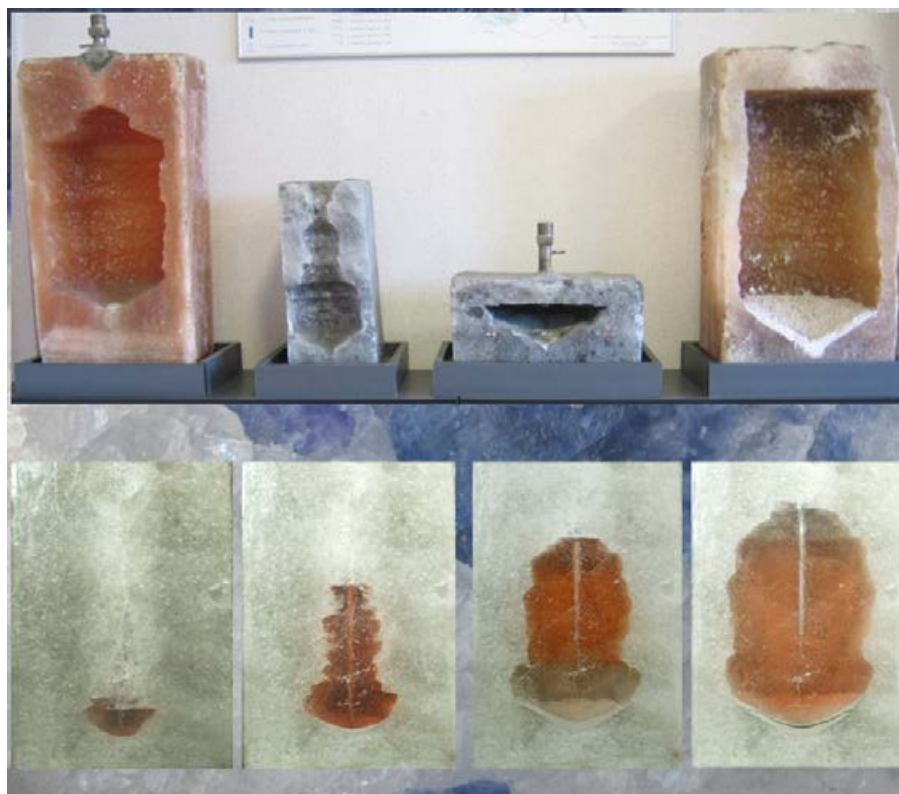
W różnych laboratoriach świata wykonano jeszcze wiele innych eksperymentów, np. w Uniwersytecie w Austin, czy w Illinois Institute of Technology w Chicago. Wiele z tych badań, np. prześwietlanie laserem przyściennej warstwy solanki (Snow, Wulf, 1967), chociaż zapewne sporo wniosły do poznania przebiegu procesu w warunkach laboratoryjnych, to ich wyniki miały się nijak do praktyki górniczej, czasem wręcz prowadziły na manowce. Powierzchnia ługowana nie jest gładka i wszelkie obserwacje zachowania się warstwy przyściennej przy gładkiej powierzchni nie stosują się do procesu ługowania. Ostatecznie stwierdzono, że warstwa przyścienne jest turbulentna (Snow, Nielsen, 1966), w związku z czym szybkość ługowania nie zależy np. od wysokości ługowanej powierzchni, ani od odległości od dna (Univ.of Texas, 1972).

Podsumowanie:

Z badań laboratoryjnych ostatecznie wynika, że szybkość ługowania soli zależy od typu soli, oraz temperatury, kąta nachylenia ługowanej powierzchni i stężenia ługującego roztworu, nie zależy natomiast od wysokości ługowanej powierzchni, zaś przy ługowanej powierzchni panują warunki turbulentne.

Modelowanie fizyczne w blokach solnych

Przez całe lata eksperymenty z ługowaniem w blokach solnych były głównym źródłem wiedzy o procesie ługowania. Wykonywano je w różnych laboratoriach ługowniczych na świecie, m.in. na zlecenie SMRI w University of Texas w Austin (Kazemi, Jessen, 1964; Saberian, 1971; Univ.of Texas 1970, 1971, 1972) i Illinois Institute of Technology w Chicago (Snow, Wolf, 1965; Snow, 1968). W Polsce szczególnie osiągnięcia w tym modelowaniu ma laboratorium Chemkopu, gdzie od lat 60. wykonano dziesiątki minikomór, weryfikując różne koncepcje technologiczne. (Urbańczyk, Kunstman, 1990; Kunstman i in., 2002, 2007).



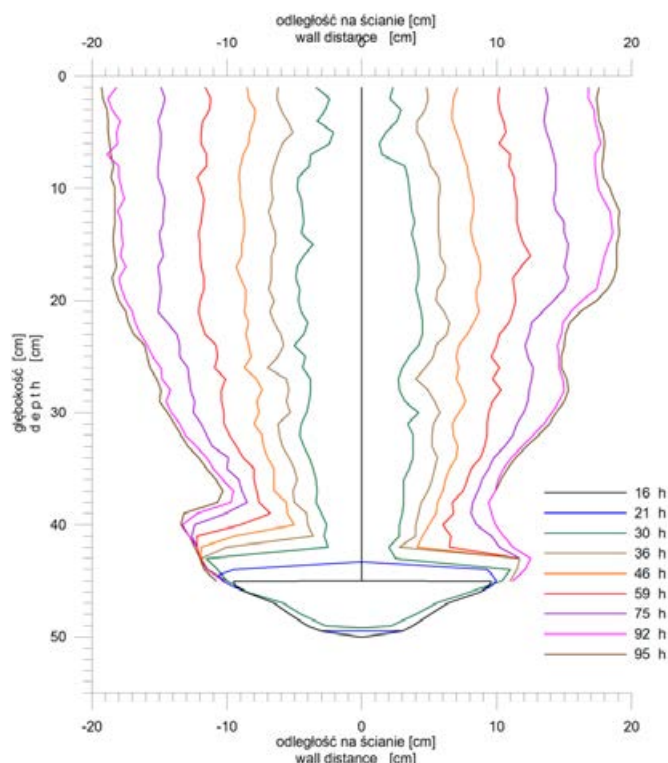
Ryc. 5. Bloki solne z kawernami wylugowanymi w Chemkopie (Kasprzyk 2009)

Fig. 5. Salt block with the small caverns leached in Chemkop (Kasprzyk 2009)

W Chemkopie stosowano skalę 1:100 zarówno w wymiarach przestrzennych, jak i w czasie. Do badań naklejano na wygładzony bok bloku solnego szklaną szybę. W niewielkiej odległości od niej (ok. 3 cm) odwiercano otwór, w który zapuszczano miniaturowe rurki. Postęp ługowania i rozwój kształtu mogły być obserwowane poprzez szybę, zaś stężenie solanki odpowiednio często oznaczane. Jeżeli promień kawerny przekraczał 10 cm, mogła być ona traktowana, jak połowa kawerny osiowo-symetrycznej, zaś lewy i prawy kontur – jako pionowy przekrój przez kawernę. Dodając okresowo barwnik do ługującego medium, można obserwować i nawet filmować zjawiska hydrauliczne w solance wypełniającej komorę.

Ryc. 5. przedstawia mini-kawerny wylugowane w Chemkopie w blokach solnych. Służyły one do przetestowania wybranych technologii ługowania. W oparciu o te badania ustalono, że możliwe jest uzyskanie kawern o kształcie cylindrycznym, ewentualnie z kopułą, uzyskując przez większość czasu solankę o stężeniu przemysłowym. W dolnym rzędzie pokazano kilka zdjęć tej samej kawerny w różnych momentach jej ługowania.

Ryc. 6. przedstawia nieco bardziej szczegółowo rozwój kawerny w czasie, na podstawie obrysów zdejmowanych ze szklanej szyby. W fazie wrębu wodę podawano na głębokości 50 cm, solankę odbierano na 45,5 cm (obieg prawy). Później wodę podawano na głębokości 37,5 cm, solankę odbierano na 45,5 cm, później siedmiokrotnie podciągano rury, zacho-



Ryc. 6. Rozwój kawerny w bloku solnym, rejestrowany przez szklaną szybę (Urbańczyk, Kunstman 1990)

Fig. 6. Development of the cavern leached in salt block registered through the glass plate (Urbańczyk, Kunstman 1990)

wując ich 8-centymetrowy rozstaw. W ostatniej fazie wodę podawano na 30,5 cm, solankę odbierano na 38,5 cm (Urbańczyk, Kunstman 1990).

W eksperymentach wykonywanych w University of Texas płyta, za którą następowało ługowanie miała sieć otworków, przez które można było pobierać próbki solanki i analizować rozkład stężenia, podobnie w ITTRI. Obserwacje rozkładu stężenia w minikawernach na ogół pokazują brak poziomego gradientu stężenia (Snow, Wolf 1965), (Snow, Nielsen 1969). Na tym samym poziomie (głębokości) stężenie jest takie same. Jednie przy ścianie kawerny wyższe i w pobliżu buta rury wodnej niższe. Obserwuje się też pewne zaburzenia w pobliżu buta rury solankowej. Przy obiegu lewym, pomiędzy butami rur obserwuje się stratyfikację solanki (Kazemi, 1963, Kazemi, Jessen, 1964). Powyżej buta rury wodnej stężenie jest niemal jednolite w całej górnej części kawerny, jedynie na samej górze, pod warstwą izolującą nieco niższe (Univ.of Texas 1970, 1971, 1972).

W obiegu prawym, ponad butem rury wodnej, kawerna ługuje się plus-minus równomiernie, odcinki ociosu przemieszczają się bez zmiany kąta nachylenia. Podobny efekt obserwuje się przy ługowaniu obiegiem lewym ze zbliżonymi butami rur, w górnej części kawerny, nieco powyżej buta rury wodnej. Jest to potwierdzeniem, że w górnej strefie kawerny stężenie solanki musi być wyrównane, czyli że następuje tam intensywne mieszanie się solanki.

Kolejnym wynikiem modelowań na blokach jest stwierdzenie granicznego kąta nachylenia. Powierzchnia nachylona pod mniejszym kątem, niż graniczny nie ługuje się. Wystarczy, że pokryje ją drobna warstewka części nierozpuszczalnych i tworzy się przy niej warstwa roztworu nasyconego, która stagnuje, bo części nierozpuszczalne uniemożliwiają jej spływ. Natomiast przy nachyleniu większym, części nierozpuszczalne ześlizgują się z rozpuszczanej powierzchni na dno kawerny. Efektu tego nie obserwuje się na próbach soli. Nawet powierzchnia pozioma, o zerowym kącie nachylenia rozpuszcza się, gdyż nie opadają na nią części nierozpuszczalne z góry, zaś zawartość części nierozpuszczalnych w samej próbce na ogół jest zbyt mała, by zatrzymać spływ warstwy przyściennej.

Najważniejszą obserwacją z modeli w blokach solnych, jest to, że proces w skali 1:100 jest istotnie podobny do rzeczywistego ługowania komory, co wcale nie było oczywiste. Dzięki temu technologie wypróbowane na modelu fizycznym można było bezpośrednio, i to z sukcesem, zastosować w praktyce górniczej. Oznacza to zarazem, że efekty molekularne (związane z lepkością i dyfuzją molekularną) nie odgrywają w procesie ługowania istotnej roli. Wiąże się to faktem, że w niewielkiej odległości (1 cm wg Snow, Nielsen, 1966)) rozwija się turbulencja wywołana siłami grawitacji (gęstość solanki rośnie wraz z jej stężeniem). Pozwala to odrzucić wszelkie teorie ługowania, w których tego typu podobieństwo nie zachodzi, a skala procesu odgrywa istotną rolę.

Podsumowanie:

W kawernie ługowanej w bloku solnym można wyróżnić dwie główne strefy: powyżej i poniżej buta rury wodnej. Powyżej następuje turbulентne mieszanie się solanki w całej objętości, stężenie jest niemal jednorodne, poniżej turbulентne mieszanie możliwe jest jedynie horyzontalnie i następuje stratyfikacja solanki. Nie dochodzi do ługowania powierzchni prawie poziomych, o nachyleniu mniejszym niż pewien kąt graniczny. Efekty molekularne nie grają istotnej roli.

Inne eksperymenty laboratoryjne

Wiele wykonano na świecie rozmaitych eksperymentów laboratoryjnych w celu lepszego zrozumienia mechanizmów ługowania. Najbardziej znane są eksperymenty, jakie wykonali na Teksaskim Uniwersytecie w Austin Jessen, Durie, Kazemi, von Schonfeld, Remolina, Saberian. Badania, jak się dosyca roztwór wypełniający wydrążoną próbę (Reda, Russo, 1984), czy jak się rozpuszcza blok sztucznej soli wytworzony ze sprasowania soli zmielonej (Kolasinski, 1965) to w gruncie rzeczy ślepe uliczki, prowadzące do nikąd.

DOŚWIADCZENIE GÓRNICZE

Pomiary wykonywane na głowicy.

Podczas ługowania kawern, regularnie mierzy się na głowicy (m.in.):

- wydajność zatłaczania wody lub półsolanki,
- temperaturę zatłaczanej wody,
- jeśli zatłacza się półsolankę, to jej stężenie (lub gęstość)
- ciśnienie wody,
- wydajność otrzymywanej solanki,
- temperaturę otrzymywanej solanki,
- stężenie (lub gęstość) otrzymywanej solanki,
- ciśnienie solanki.

Oprócz tego pobiera się próby solanki do analiz chemicznych.

Wydajność otrzymywanej solanki i jej stężenie to najważniejsze dane, służące do określenia ilości wydobytej soli. Stężenie uzyskiwanej solanki może być mierzone na głowicy otworu z dowolną częstością, jak tylko trzeba. Zwykle pomiar wykonuje się raz do sześciu razy dziennie. Najczęściej stężenie jest określane pośrednio, na podstawie zmierzonej gęstości roztworu. Kilkakrotnie w miesiącu wykonuje się również analizy chemiczne składu solanki, które weryfikują pomiary gęstościowe. Należy przypomnieć o różnicy pomiędzy pełną mineralizacją solanki (TDS) i zawartością chlorku sodowego, o czym wspomniano wcześniej.

Z pomiarów stężenia, po przeliczeniu, otrzymuje się wydobyte soli, które z kolei dają oszacowanie objętości komory. Jest to parametr najłatwiejszy do wszelkich porównań z prognozami ługowania.

Relacja pomiędzy wydobyciem soli i objętością komory nie jest jednak aż tak prosta, jak mogłoby się zdawać na pierwszy rzut oka. Trzeba bowiem do wydobytej soli dodać sól zawartą w solance wypełniającej komorę oraz wziąć pod uwagę części nierozpuszczalne.

Prowadzi to wszystko do wzoru:

$$\frac{M}{V_e} = \frac{(\rho - C)(100 - P_{nie})}{1000(100 - \alpha P_{nie})} \quad (7)$$

gdzie:

M – całkowite wydobyte soli z komory (masa soli wydobytej), w Mg (tony);

V_e – objętość komory bez zasypanej części, w m^3 ;

P_{nie} – procent części nierozpuszczalnych w skale solnej;

C – średnie stężenie solanki pozostałej w komorze, w kg/m^3 ;

ρ – gęstość przestrzenna skały solnej, w kg/m^3 ;

α – współczynnik rozluźnienia z jakim części nierozpuszczalnych osiadają w rzępiu kawerny.

Dla przykładu, jeżeli skała solna zawiera średnio 5% części nierozpuszczalnych i szacuje się, że średnie stężenie solanki w komorze wynosi $300 kg/m^3$, to dla takich warunków iloraz M/V_e wynosi 1,9. Jeżeli z komory tej wydobyto np. 250 tys. ton soli, to stosując ten iloraz można obliczyć, że objętość komory (bez zasypu) wynosi 131,5 tys. m^3 . Szczegółowsza dyskusja w: Kunstman i in., 2002, 2007.

Wzór (7) dostarcza objętość kawerny najbliższą wartości rzeczywistej, z wszystkich metod i sposobów jej obliczania, o ile tylko opomiarowanie wydobywanej solanki jest rzetelnie prowadzone. Potwierdzają to pomiary ilości solanki wytłoczonej z kawern napełnianych gazem. Należy jednak przy tym uwzględnić poprawkę na konwergencję, zależnie od głębokości.

W zasadzie pomiary głowicowe niewiele mówią o samym procesie ługowania, pozwalają jednak określić, czy ługowanie przebiega zgodnie z oczekiwaniami. Najważniejsze, z punktu widzenia analizowania procesu ługowania, są zmiany stężenia w czasie, zwłaszcza zmiany zachodzące po zmianie wydajności tłoczenia wody lub położenia rur ługowniczych.

W wysadach solnych zdarza się, że niewiele odległe od siebie kawerny łągają się, przy identycznej technologii, odmiennie. Zwłaszcza jaskrawo to widać w fazie ługowania wrębu.

Posumowanie:

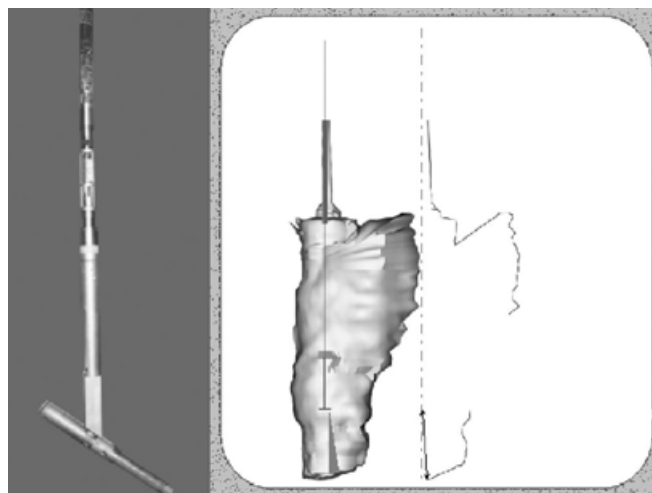
Pomiary wydajności otrzymywanej solanki i jej stężenia pozwalają określić wielkość kawerny, a czasem typ soli, w jakim się rozwija kawerna. Oszacowanie objętości kawerny na podstawie wydobywania soli jest najbardziej dokładne z wszystkich sposobów.

Pomiary wykonywane w kawernie

Okresowo wykonuje się w kawernie pomiary jej kształtu przy użyciu echosondy, rejestrując przy okazji, rozkład

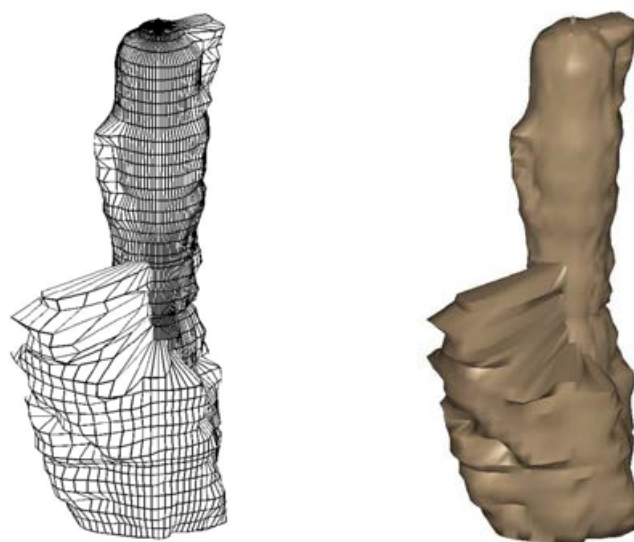
wzdłuż osi kawerny takich wielkości, jak temperatura solanki, gęstość solanki, ciśnienie w solance, szybkość dźwięku w solance itp.

Echosonda dostarcza współrzędnych ośrodku kawerny. Pomiary są wykonywane z osi otworu kawernowego. Pomiar zwykle zawiera serię przekrojów horyzontalnych (pomiary na tej samej głębokości o różnych azymutach) oraz serie przekrojów pionowych (pomiary w tym samym azymucie z różnych głębokości). Dzięki uchyłnej głowicy, przekroje pionowe mogą zawierać informacje o „palcach”, „kominach” czy „kieszeniach”, opisują szczegółowiej powierzchnie stropu kawerny i jej rzępią (powierzchnię zasypu) (Ryc. 7).



Ryc. 7. Schemat działania echosondy z uchylną głowicą (Kunstman i in. 2002, 2007)

Fig. 7. Scheme of survey with use of sonar with tilted head (Kunstman et al. 2002, 2007)

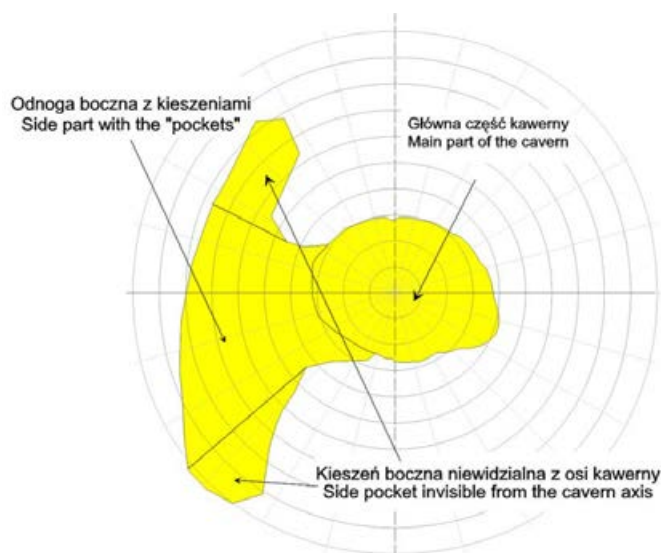


Ryc. 8. Echosonda wykryła, że dolna część kawerny, w efekcie natrafienia na sól łatwiej rozpuszczalną, jest przesunięta w stosunku do osi kawerny.

Fig. 8. Sonar detected that lower part of the cavern is shifted from the cavern axis as the result of entering into easier soluble salt.

Pomiary echosondą wskazują, że w złożach pokładowych kawerna zwykle (nie znaczy że zawsze) ługuje się regularnie, jej kształt niewiele odbiega od osiowo-symetrycznego. W wysadach solnych, gdy warstwy soli o różnych własnościach mają niemal pionowy upad, często zdarzają się niespodzianki, kawerna doługuje się do warstwy o lepszych własnościach ługowniczych, ługowanie w tamtej strefie przebiega szybciej i w efekcie część kawerny jest jakby przesunięta w bok. Ilustruje podobny przypadek Ryc. 8. Pomiary echosondą są najbardziej potrzebne właśnie do stwierdzania tego typu sytuacji.

Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że pomiary echosondą są dokładne, gdy kawerna ma kształt regularny. W przypadku sporych nieregularności, mogą pojawiać się problemy interpretacyjne, a zdarza się, że niektóre części kawerny nie są widoczne dla echosondy znajdującej się w osi komory, co ilustruje przekrój horyzontalny na Ryc. 9.



Ryc. 9. Przekrój poziomy kawerny z pokazaniem „kieszeni” niewidocznych dla echosondy.

Fig. 9. Horizontal cross-section of the cavern showing the “pockets” invisible to the sonar.

Dlatego nie można do wyników uzyskanych przez echosondę podchodzić bezkrytycznie, zwłaszcza jeśli objętość kawerny zmierzona przez echosondę odbiega od objętości ocenionej na podstawie wydobywania, która jest z reguły dokładniejsza, niż według echosondy. Takie różnice mogą świadczyć o błędach interpretacyjnych, albo że echosonda nie widzi całej kawerny.

Pomiary echosondą wykonuje się okresowo – np. raz na dwa lata, lub każdorazowo po wydobywaniu kolejnych 50 tys. ton soli. Często pomiar echosondą nie obejmuje całej kawerny, a jedynie jej część aktualnie eksploatowaną. Zakłada się, że pozostałe strefy kawerny są nieinteresujące, tzn. kształt ich nie uległ zmianie od poprzedniego pomiaru.

Seria kształtów tej samej kawerny w różnym czasie jest cennym źródłem informacji o procesie ługowania, zwłaszcza gdy powiązana jest z danymi głowicowymi z eksploatacji. Taki zestaw umożliwi weryfikację modeli komputerowych procesu ługowania. Prócz tego porównanie kształtu zmierzonego przez echosondę z kształtem projektowanym (zwykle otrzymanym na podstawie modelowania komputerowego) pozwala stwierdzić czy ługowanie przebiega prawidłowo, czy też konieczna będzie modyfikacja projektu technologii ługowania.

Z innych pomiarów wykonywanych przy okazji pomiarów echosondą profil prędkości dźwięku i temperatury należy do standardu. Pomiar wykonywany jest jedynie w osi kawerny. Na podstawie tych pomiarów można określić profil gęstości solanki (a więc i stężenia) w osi kawerny i określić granice stref mieszania się solanki w kawernie.

Możliwe jest również pobieranie próbek solanki z różnych głębokości w osi kawerny. Takie próbkowanie zwykle dotyczy kawern, które mają być opróżnione w celu magazynowania substancji użytecznych, a solanka jest zagospodarowywana przez przemysł chemiczny i jej skład, zwłaszcza zawartość domieszek innych soli jest bardzo istotna.

Pomiary te potwierdzają wnioski z badań laboratoryjnych o strefie stratyfikacji grawitacyjnej solanki i o strefie silnego turbulentnego mieszania powyżej. Potwierdzają to zwłaszcza profile temperaturowe, gdyż temperaturę mierzy się dokładnie, poza tym temperatura w kawernie zmienia się zimą i latem, w związku ze zmianą temperatury zatłaczanej wody.

Niektóre komory magazynowe oprócz otworu głównego wyposażone są również w otwór boczny, który może być wykorzystany do pomiaru rozkładu stężenia i temperatury poza osią kawerny (Wilke i in., 2011). Różnice stężeń pomiędzy głównym otworem a białym nie są wielkie, zróżnicowanie w pionie również nie jest znaczne, jedynie w górnej strefie kawerny, przy ścianie, stężenie jest nieco wyższe.

Podsumowanie:

Pomiary echosondą są jedynym sposobem na poznanie kształtu ługowanej kawerny i pozwalają określić, jak ten kształt zmienia się w czasie. Nie można ich jednak przyjmować bezkrytycznie, zwłaszcza gdy kształt kawerny nie jest regularny. Nie zawsze echosonda rejestruje całą kawernę.

Bezpośredni dostęp do komór z wyrobisk kopalnianych

Dostęp bezpośredni do kawerny możliwy jest po zakończeniu ługowania i opróżnieniu kawerny z solanki. W takiej komorze możliwy jest geodezyjny pomiar kształtu, znacznie bardziej precyzyjny, niż echosonda. Można też dokładnie zbadać zasyp na dnie, jego kształt i jego zawartość.

Poza tym, bezpośredni dostęp nie wnosi nowych informacji. Dawniej jednak, zanim upowszechniły się pomiary echosondą, było to jedyne źródło informacji o kształtach kawern.

Eksperymenty in-situ z ługowaniem kawern

Eksperymenty specjalne mogą dostarczyć więcej danych o procesie ługowania, zwłaszcza o rozkładzie stężenia w kawernie. Ługowanie powinno być prowadzone z podziemnych wyrobisk, gdy docelowy strop kawerny będzie niewiele metrów poniżej poziomu chodnika. Można odwiercić gęstą siatkę otworów o niewielkiej średnicy do różnych głębokości, zacementować w nich rurki. W trakcie ługowania otrzyma się informację o czasie, w którym ocios komory doszedł do końca danej rurki (kontrola rozwoju kształtu w czasie) oraz pobierać przez rurki próbki solanki (pomiar rozkładu stężenia poza osią kawerny).

Przykładem takiego eksperymentu jest eksperyment SMRI w kopalni Detroit należącej do International Salt Company, w 1969 roku (SMRI 1969). Eksperyment miał na celu sprawdzenie ówczesnej teorii dotyczącej obiegu lewego w kawernie.

Kawerna ługowana była w interwale 12 – 31 stóp (3,7 – 9,5 m), w obiegu lewym. Rozwijała się od promienia 2 ft (0,6 m) do 10 ft (3,05 m). Otwory kontrolne rozmieszczono w 8 azymutach co 45°, po 6 otworów w każdym azymucie. Były one w odległościach 3½', 4½', 6½', 8½', 10½', 12½' (1,07 m, 1,37 m, 1,98 m, 2,59 m, 3,20 m, 3,81 m). Służyły do kontroli rozwoju kształtu kawerny oraz do wyznaczania rozkładów stężenia. Stężenia pobierano z sześciu głębokości 12', 15', 20', 25', 27,5', 28'. Zarejestrowane stężenia pokazują, że stratyfikacja solanki nie jest idealna, odchylenia są jednak raczej losowe. Mogłyby być wywołane niedokładną symetrią kawerny, jej niewielkimi rozmiarami, przy których pobór próbki solanki mógł zakłócić rozkład jej stężenia. Nie znając szczegółów eksperymentu trudno to ocenić.

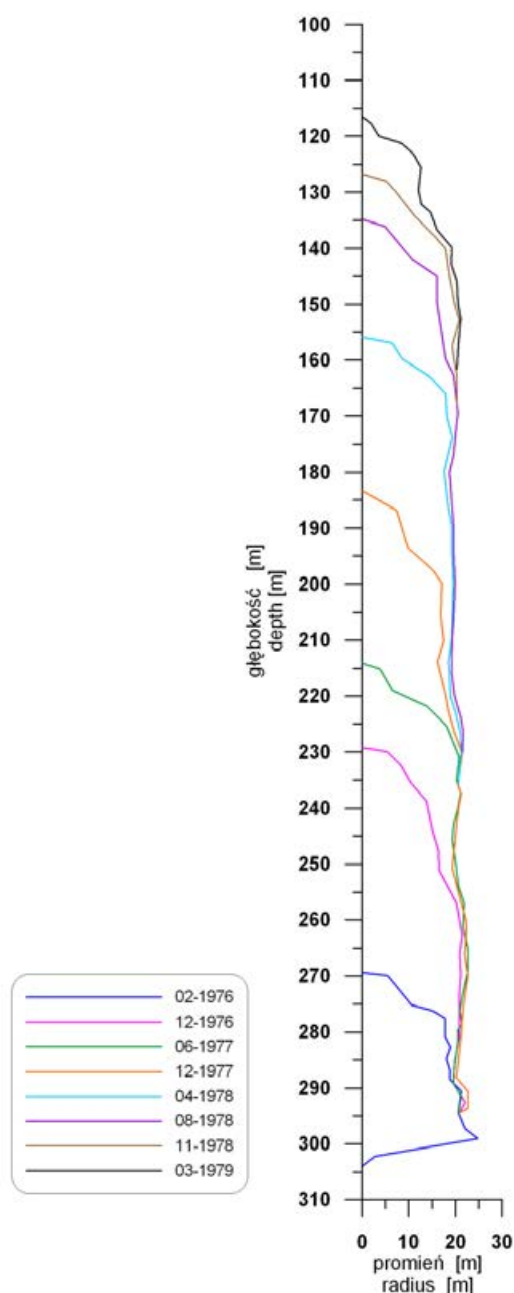
W Polsce tego typu eksperyment wykonywano w kopalni Solno w latach 1985-86, jednak nie został ukończony z powodu likwidacji kopalni (Radomski, 1987).

Z poziomu 7 (578 m p.p.t.) odwiercono otwór eksploatacyjny o głębokości 55 m i uzbrojono go następująco:

- kolumna obsadowa 7½" do głębokości 8 m, zacementowana na całej długości,
- kolumna 5" wolnowiszcząca do 9 m do kontroli medium izolacyjnego,
- kolumna 3" wolnowiszcząca, o zmiennej głębokości,
- kolumna 1½" wolnowiszcząca, o zmiennej głębokości.

Wywiercono 5 otworów kontrolnych do pobierania prób solanki, o głębokości 9,5 m, zarurowanych wstępnie kolumną 5" cementowaną na całej długości. Cztery otwory umieszczono w jednej linii co 1,1 m od otworu eksploatacyjnego, piąty otwór umieszczono w odległości 2,2 m w kierunku prostopadłym do tamtych czterech.

W okresie VII-VIII 1985 wyługowano wrąb kawerny, ze stropem na głębokości 48 m, obiegiem prawym. Następnie ługowano metodą zbliżonych butów rur, które umieszczono na na głębokościach 44 m i 49 m. Izolację stabilizowano na



Ryc. 10. Rozwój kształtu doświadczalnej komory S-1 w kopalni Solno.

Fig. 10. Development of experimental cavern S-1 in Solno mine.

głębokości 9 m. Planowano, że eksperymentalna kawerna docelowa przekroczy średnicę 10 m.

Kiedy kawerna osiągnęła w stropie promień ponad 3,3 m, zapuszczono do trzech, spośród pięciu otworów kontrolnych po cztery rurki ½" do pobierania solanki, każdą do innej głębokości: 9,5 m, 25 m, 34 m, 46,5 m. Do otworu odległego o 3,3 m zapuszczono tylko jedną rurkę, do głębokości 9,5 m, rurek głębszych nie dało się zapuścić.

Następnie przez 10 dni kontynuowano ługowanie i dokonano pierwszego poboru prób solanki. Pomiar wykazał stężenie 312,7 kg/m³ na głębokości 46,5 m, we wszystkich otworach. Poza tym w kawernie panowało jednolite stężenie 294,2 kg/m³, jedynie pod stropem (9,5 m) w otworach odda-

lonych o 2,2 m i 3,3 m stwierdzono nieco niższe stężenie – 292,5 m (takie samo w trzech otworach).

Wyniki te potwierdziły, że powyżej buta rury wodnej następuje intensywne mieszanie się solanki. Podobnie jak w Detroit, pod samym stropem stężenie było nieznacznie niższe. Wielka szkoda, że z powodu likwidacji kopalni Solno, eksperyment musiano po pierwszym pomiarze przerwać.

W kopalni Solno wykonywano też prostsze eksperymenty *in situ*, mające zweryfikować technologie ługowania. W latach 1975-79 wykonano doświadczalną kawernę S-1 w skali technicznej, w celu sprawdzenia, jak przebiega ługowanie gdy strop kawerny chroniony jest jedynie przez rurę cementowaną, bez płynnego medium izolującego strop, z jedną kolumną wolnowiszącą. Podawanie wody odbywało się przez przestrzeń pierścieniową między kolumną solankową a kolumną cementowaną, którą sukcesywnie ucinano (Kunstman, Urbańczyk 1984, 1990).

Ryc. 10. przedstawia rozwój kształtu komory doświadczalnej, w postaci promieni ekwiwaentnych określonych na podstawie pomiarów echosondą. Widać, że przy samej rurze ługowanie następowało nieznacznie szybciej, co prowadziło do wytworzenia się kopuły stropowej. Przebieg ługowania i pomiary wykonane w jego trakcie stanowią bardzo dobry materiał do testowania modeli ługowania.

Podsumowanie:

Eksperymenty *in-situ* umożliwiają dokładniejsze opomiarowanie procesu ługowania, dostarczają przez to dobrego materiału do sprawdzania jego modeli teoretycznych.

PROCESY ANALOGICZNE

Próbowano proces ługowania analizować porównując go do procesów analogicznych, to znaczy procesów opisywanych identycznymi równaniami matematycznymi, różniącymi się fizycznymi stałymi występującymi w równaniach.

Dla procesu ługowania jednak brak procesu analogicznego. Jedynie pewne aspekty procesu mogą być porównywane z innymi procesami. Przechodzenie soli ze skały solnej do roztworu w warunkach turbulentnych próbowano porównywać do wymiany ciepła (Snow, Wolf, 1965). Jednak kontur, na którym zachodzi wymiana ciepła nie zmienia się w efekcie tej wymiany. Mieszanie się solanki w aktywnej części komory bywa porównywane z termicznym mieszaniem towarzyszącym spalaniu. Zachowanie się tzw. „pióra zatłaczania” (*injection plume*) analizuje się poprzez tego typu analogię (Sandia National Laboratories). Nasuwają się jednak wątpliwości, co do poprawności i stosowalności tych rozważań.

REFLEKSJE KOŃCOWE.

Prac badawczych dotyczących procesu ługowania wykonano bardzo wiele, znacznie więcej, niż tu wzmiankowano. Efekty wielu z nich były mizerne, lub żadne. Trochę zwią-

zane było to z tym, że badania prowadzili uczeni, nie mający związku z praktyką górniczą i badania były prowadzone na ślepo. Z drugiej strony i personel górniczy nie przykładął wielkiej wagi do poznania procesu. Często pomiary prowadzono niesystematycznie, czy niestarannie. Dopiero potrzeba kawern do celów magazynowych zwiększyła wymagania, a upowszechnienie pomiarów echosondą dało efekty. W latach 80. można było uznać proces ługowania za rozpoznany w zasadniczych aspektach. Pozwoliło to na rozwój modeli numerycznych.

SUMMARY

Our knowledge of the leaching process is based on two main sources of information. These are laboratory tests which involve mainly tests on samples and physical modeling of salt caverns in salt blocks, and mining experience which includes measurements in caverns leached from the surface, and in caverns leached from underground workings which were then made accessible.

Typical standard laboratory tests consist in measurements of leaching rate - vertical and horizontal, performed on samples prepared as in Fig. 1. The sample surfaces exposed to dissolution are shown in Fig. 2 before and after the test. In the literature, one can find different definitions of leaching coefficients, cf. formulae (1), (2), (3), (4). This can lead to confusion.

Laboratory tests definitively showed that the rate of leaching of salt depends on the type of salt as well as on the temperature, the angle of the leached surface (Fig. 3) and the concentration of the leaching solution (Fig.4). They not depend on the position at the leached surface nor on its height. The conditions in vicinity of the leached surface are turbulent.

Physical modeling in blocks of salt consists in leaching the half-caverns adjacent to the glass plate glued to the salt block. Through this glass one can observe the development of cavern. Fig. 5 shows blocks with salt caverns leached in Chemkop, and Fig. 6 the development of such cavern. Two main zones can be distinguished in the caverns leached in salt block: above and below the water tubing shoe. A turbulent mixing of the entire volume of the brine is going on in the upper zone and the brine concentration is almost uniform. In the lower zone, turbulent mixing can develop only horizontally, and brine stratification occurs. There is no leaching of the surface nearly horizontal, with a slope less than a critical angle. The small scale leaching in the block is similar to the leaching of industrial caverns thus molecular effects do not play a significant role in the leaching process.

Mining experience includes wellhead measurements providing production rate and the brine concentration. These allow calculating the salt production and cavern volume, sometimes also to describe the type of salt, in which cavern

is developing. Estimation of the cavern volume based on salt production is the most accurate of all methods.

Sonar measurements are the only way to obtain the shape of the leached caverns and allow you to describe how the cavern shape changes over time. With the use of tilted head (Fig. 7) it is possible to accurately register roof and bottom of the cavern, as well as detect cavern "chimneys" impossible to register without tilted head. Sonar surveys are especially important, when cavern enter the zone of easier soluble salt and cavern develops irregularly. Example is shown in Fig. 8, where lower part of the cavern is shifted from its axis. Nevertheless, sonar results can not be taken uncritically, especially when the shape of the cavities is not regular. Sometimes the sonar cannot see the entire cavern, as shown in Fig. 9.

Experiments in-situ allow more precise metering of the leaching process, thus providing good material for checking the theoretical models. They are made in underground salt mines at shallow depths (from the level of the excavation). Fig. 10 shows the shape development of the experimental chamber S-1 in the Solno mine, in the experiment aimed to verify how the cavern develops when its roof is protected only by the cemented casing.

LITERATURA/REFERENCES

- АКСЕЛЬРУД Г.А., МОЛЧАНОВ А.Д. 1977 – Растворение твердых веществ. Москва, Изд.Химия.
- DURIE R.W., JESSEN F.W. 1964 – Mechanism of the Dissolution of Salt in the Formation of Underground Salt Cavities - SPEJ 4 183-190.
- HELGESON H.C. 1966 – Critique of the Research Program Sponsored by the Solution Mining Research Institute at IITRI, SMRI Research Report 66-0006-SMRI.
- KASPRZYK W., KOSOWSKI T. 2012 – (niepublikowany raport).
- KASPRZYK W. 2009 – Ocena ługowalności soli jako podstawa do określenia technologii ługowania złóż soli. Assessment of the salt leachability as the base for defining the leaching technology of salt deposits. – XIV Międzynarodowe Sympozjum Quo Vadis Sal, Jelitkowo 2009 (prezentacja nie publikowana drukiem).
- KAZEMI, H. 1963 – Mechanism of Flow and Controlled Dissolution of Salt in Solution Mining, Ph.D. Thesis, University of Texas.
- KAZEMI H., JESSEN F. W. 1964 – Mechanism of Flow and Controlled Dissolution of Salt in Solution Mining - SPEJ 4 (XII 1964) pp.317-328.
- KOLASINSKI R. 1965 – Dissolving of Compressed Salt Blocks, 2nd Symposium on Salt, Cleveland 1965, pp. 280-27.
- КУЛЛЕ П.А. 1949 – Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием, Труды ВНИИГ в. 20.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K. 2002 – Zarys nowoczesnego ługownictwa solnego – aktualne kierunki rozwoju. Wyd. AGH, Kraków 2002.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K. 2007 – Solution mining in Salt Deposits. Wyd. AGH, Kraków 2007.
- KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K. 1984 – Komputerowy model procesu ługowania podziemnych kawern w złożach soli, Sympozjum Górnictwo Surowców Chemicznych - Sympozjum Górnictwo Surowców Chemicznych - Zbiorniki Podziemne - Środowisko Naturalne, Kraków, listopad 1984, wyd. AGH, 267-279.
- KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K. 1990 - UBRO A Computer Model for Designing Salt Caverns Leaching Process Developed at CHEMKOP, SMRI Meeting Paper, Paris 15-18 X 1990.
- MANUALUL INGERULUI DE MINE 1956, IV Sect. XXIV. IV. Metode de exploatare a sari geme. Editura Technica, București.
- MEISTER S., HIEBLINGER J., KLEINITZ W., NOLEN J.S., VON HANTLEMAN G. 1978 – *Die numerische Simulation des Solprozesse* - 24 DGMK Happtagung, 3 IX - 3 X 1978, Hamburg.
- RADOMSKI A. 1987 – Wyniki badań "in situ" w kawernie S-1 w aspekcie określenia efektu histerezy oraz wyniki badań rozkładu stężeń solanki w kawernie S-2. Opracowanie OBRGSchem „CHEMKOP” X06421, Kraków (niepublikowane).
- REDA D.S., RUSSO A.J. 1984 – Experimental Studies of Salt Cavity Leaching Via Fresh-Water Injection, Sandia Report SAND84-0020, Albuquerque, New Mexico.
- SABERIAN A. 1971 – Study of Mixing in Water-brine Systems - University of Texas (Austin) 1971, 113 pages; SMRI File No. 71-0002-SMRI.
- SABERIAN A. 1983 – A Dissolution/Temperature Relation for Vertical Salt Surfaces Dissolved in Saline Solutions SMRI Research Report No: 83-0002-SMRI July 1983.
- SMRI 1969 – Preliminary Report & Data for First Salt Cavity Experiment ISCo.-Detroit Mine August & September 1969, SMRI Research Report 69-0001-SMRI.
- SNOW R.H. 1968 – Solution Mining Studies (Final Report ITTRI) SMRI Research Report 68-0006, Chicago, Illinois.
- SNOW R.H., NIELSEN H.J. 1966 – Solution Mining Studies (Summary Report IITRI), SMRI Research Report 66-0004-SMRI Chicago, Illinois 60616.
- SNOW R.H., NIELSEN H.J. - IITRI-SMRI Solution Mining Studies 3rd Symposium on Salt, Cleveland 1969, 341-359.
- SNOW R.H., WOLF L. 1965 – Preliminary Solution Mining Studies (Final Report) SMRI Research Report 65-0001-SMRI Chicago, Illinois.
- SNOW R.H., WULFF W. 1967 – Solution Mining Studies (Summary Report ITTRI) SMRI Research Report 67-0004-SMRI, Chicago, Illinois.
- UNIVERSITY OF TEXAS 1970 – Progress Report Solution Mining Research Institute Project - Contract No. 30852-2, SMRI Research Report 70-0006-SMRI, Austin, Texas.
- UNIVERSITY OF TEXAS 1971 – Progress Report Solution Mining Research Institute Project - Contract No. 30852-2, SMRI Research Report 71-0006-SMRI, Austin, Texas, 1971.
- UNIVERSITY OF TEXAS 1972 – Progress Report Solution Mining Research Institute Project - Contract No. 30852-2, SMRI Research Report 72-0006-SMRI, Austin, Texas, 1972.
- URBAŃCZYK K.M. 1990 – Szybkość ługowania soli kamiennnej w funkcji stężenia roztworu ługującego, kąta nachylenia ługowanej powierzchni i temperatury procesu *Górnictwo* 14 z.1 25-39.
- URBAŃCZYK K.M., KUNSTMAN A.S. 1990 – *Computer Codes for Controlling the Cavity Leaching Process* - SMRI Meeting Paper, Paris October 1990,
- WILKE F., OBERMÖLLER M., VAN GEENHOVEN H., KUPELUS E., DIJK H. 2011 Solution Mining with Two Boreholes for Gas Storage in Zuidwending, the Netherlands, SMRI Technical Conference York 2011.