

Kryteria doboru złoża do zatłaczania gazu kwaśnego lub sekwestracji ditlenku węgla



Eugeniusz Grynia



John J. Carroll

Gas Liquids Engineering,
Calgary, Alberta, Kanada

Gaz kwaśny jest produktem ubocznym uzdatniania zasiarzonego gazu ziemnego do gazu handlowego i jest zasadniczo mieszaniną siarkowodoru i ditlenku węgla. Ditlenek węgla, pochodzący głównie ze spalania paliw kopalnych, jest odpowiedzialny za globalną zmianę klimatu. Jedną z metod usuwania zarówno gazu kwaśnego, jak i antropogenicznego ditlenku węgla jest ich sprężanie i zatłaczanie do podziemnej formacji geologicznej. Technologia ta w przypadku ditlenku węgla nazywa się wychwytywaniem i sekwestracją CO₂ (CCS, ang. *Carbon Capture and Storage*).

Ponieważ zatłaczanie ma na celu pozbycie się gazu, ważne jest, aby pozostał on w formacji, do której został zatłoczony. Dlatego złożo wybrane do tego celu powinno zapewniać zatrzymanie gazu. W niniejszym artykule przedstawiono wytyczne doboru złoża do zatłaczania niepożądanych płynów. Owe wytyczne obejmują magazynowanie, oddziaływanie ze złożem i uwarunkowania przepływu.

Od początku

Zatłaczanie gazu kwaśnego (AGI, ang. *Acid Gas Injection*) zaczyna się już od wydobycia surowego gazu ziemnego zawierającego siarkowodor lub ditlenek węgla lub obydwu gazy. Składniki te należy usunąć z gazu ziemnego, aby uzyskać gaz o wymaganej specyfikacji. Usunięte składniki, będące produktem ubocznym procesu uzdatniania, nazywa się gazem kwaśnym. Taki gaz kwaśny spręża się, przesyła rurociągiem do odwiertu i zatłacza do podziemnej formacji geologicznej, zwykle w celu pozbycia się go, ale czasami w celu utrzymania ciśnienia lub intensyfikacji wydobycia ropy naftowej (EOR, ang. *Enhanced Oil Recovery*). Wychwytywanie i sekwestracja CO₂ (CCS) jest bliźniaczą siostrą zatłaczania gazu kwaśnego do złoża (AGI). Typowy projekt CCS obejmuje usuwanie (wychwytywanie) ditlenku węgla ze spalin, sprężanie i przesył do odwiertu zatłaczającego. Należy zwrócić uwagę, że wiele elementów składających się na CCS jest takich samych jak w przypadku AGI.

AGI jest technologią dosyć dojrzałą; jej pierwsze zastosowanie miało miejsce w 1989 r. Obecnie na świecie działa ponad 150 instalacji AGI. Natomiast CCS jest technologią rozwijającą się. Działa tylko kilka instalacji, z których większość to instalacje doświadczalne.

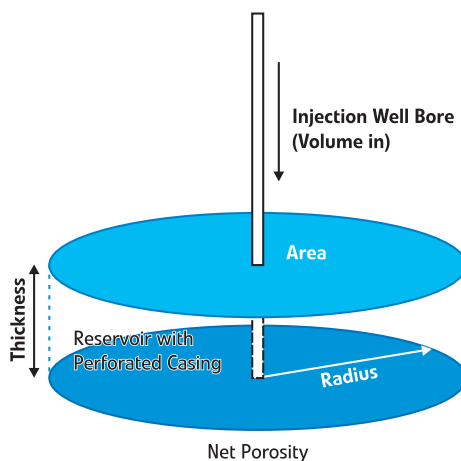
Pierwszym etapem projektu AGI lub CCS jest znalezienie odpowiedniego złoża – takiego, które będzie mogło zatrzymać w sobie zatłoczony płyn. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie kryteriów doboru odpowiedniego złoża.

Magazynowanie

Zasadniczo magazynowanie oznacza to, że zatłoczony płyn pozostanie w złożu, do którego go skierowano. Można wyróżnić cztery ważne aspekty magazynowania: 1. objętość złoża, 2. skała stropowa, 3. inne odwierty penetrujące strefę zatłaczania i 4. cement do rur okładzinowych. Każdy z tych elementów został omówiony poniżej.

2.1 Objętość złoża

Złożo do zatłaczania jest porowatą skałą, piaskowcem lub skałą węglanową (wapień, dolomit itd). Gutierrez i Hunter (2015) opisują podstawowy model radialny, który można wykorzystać do obliczenia pojemności złoża do zatłaczania. Mimo swej prostoty, umożliwia on dobre oszacowanie pojemności.



Rys. 1. Podstawowy model radialny złoża [w oparciu o publikację Gutierrez i Huntera (2015)]

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1, objętość skały złożowej wynosi:

$$V_{\text{rock}} = \pi r^2 h \quad (1)$$

gdzie: V_{rock} - objętość skały złożowej
 r - promień złoża
 h - średnia miąższość złoża

Jednak zatłaczany płyn może zajmować jedynie objętość porów. Średnią porowatość złoża uży-

kuje się na podstawie pomiarów laboratoryjnych, wykresów rejestratorów i innych metod, a często na podstawie kombinacji powyższych metod. Efektywną porowatość skały uzyskuje się po wprowadzeniu poprawki na nasycenie wodą:

$$\Phi_{\text{eff}} = \Phi_{\text{meas}} (1 - S_w) \quad (2)$$

gdzie: Φ_{eff} - porowatość efektywna
 Φ_{meas} - porowatość zmierzona
 S_w - nasycenie wodą

Tak więc objętość złoża, którą można wykorzystać do zatłaczania płynów przedstawia wzór:

$$V_{\text{eff}} = (\pi r^2 h) \Phi_{\text{eff}} \quad (3)$$

Trzeba pamiętać, że jest to objętość rzeczywista, podczas gdy objętość gazu zatłaczanego podaje się dla warunków standardowych czy normalnych. Znając temperaturę i ciśnienie panujące w złożu można przeliczyć objętość w warunkach rzeczywistych na objętość w warunkach normalnych i w ten sposób oszacować pojemność złoża.

2.2 Skała stropowa

Najlepiej byłoby, gdyby skała stropowa stanowiła nieprzepuszczalną barierę; w rzeczywistości jest ona nadzwyczaj mało przepuszczalna (10⁻⁹ Darcy) i nakłada się na strefę zatłaczania. Skała stropowa zapobiega przemieszczaniu się zatłoczonych płynów do płytszych formacji, albo co byłoby jeszcze gorsze – na powierzchnię. Skała stropowa jest zazwyczaj skałą łupkową, ale może to być inna nieprzepuszczalna formacja. Jeśli w formacji, czy to zawierającej węglowodory, czy wodonośnej, nie zmienia się ciśnienie, to jest to dowód na to, że skała stropowa jest nieprzepuszczalna.

2.3 Inne odwierty

Innym możliwym problemem związanym z utrzymaniem gazu w formacji geologicznej są odwierty penetrujące strefę zatłaczania gazu. Aby dane złożo nadawało się do zatłaczania gazu, należy sprawdzić, czy żaden z odwiertów penetrujących strefę (w tym odwierty

zlikwidowane) nie będzie powodował migracji zatłoczonego płynu do innych formacji lub na powierzchnię.

Dotyczy to również cementowania wszystkich tych odwiertów, co jest tematem następnego punktu. Dla istniejących odwiertów pomiary stanu zacementowania rur okładzinowych (CBL, ang. *Cement Bond Logs*) są wykorzystywane do oceny integralności mechanicznej i jakości cementowego spoiwa. Pomiary CBL należy uzyskać dla wszystkich odwiertów. Jeśli ich brak lub są wątpliwej jakości, pomiary sondą CBL należy wykonać ponownie. W przypadku odwiertów zlikwidowanych należy potwierdzić zarówno integralność cementu użytego do ich likwidacji jak i samego odwiertu.

2.4 Cement

Niezależnie od tego, czy odwiert zatłaczający jest odwiertem nowo odwierconym czy istniejącym, należy upewnić się, czy cement użyty w odwiercie nie jest podatny na uszkodzenie przez ditlenek węgla. (Jacquemet et al., 2011). W przypadku nowych odwiertów wystarczy dobrać odpowiedni cement, ale – jak to wspomniano wcześniej – w przypadku istniejących może to nie być takie proste. Reaktywność chemiczna cementu wobec płynów – zatłaczanego gazu kwaśnego i solianki złożowej – występująca w okresie geologicznego składowania tych płynów – może spowodować zmiany parametrów cementu. Reakcje chemiczne mogą zmienić właściwości cementu, takie jak porowatość, przepuszczalność i wytrzymałość mechaniczną. Tak więc właściwości cementu mające wpływ na zatrzymywanie płynów w złożu mogą ulec degradacji, tworząc przestrzenie, którymi owe płyny mogą przedostać się na powierzchnię.

Wzajemne oddziaływanie (interakcja)

Poza możliwymi reakcjami cementu znajdującego się w odwiercie istnieje prawdopodobieństwo, że zatłoczony płyn będzie oddziaływał na płyn, który już pierwotnie był w złożu lub na samą skałę złożową. Jest mało prawdopodobne, aby gaz kwaśny reagował z węglowodorami w złożu, ale w wodzie mogą być obecne składniki nastroczające problemów. Na przykład jeśli w wodzie jest duża zawartość żelaza, może to powodować wytrącanie się siarczków żelaza i zatykanie otworów w orurowaniu odwiertu. Należy przeprowadzić badania laboratoryjne mające na celu oszacowanie skali tych oddziaływań.

Nie wszystkie jednak oddziaływania są szkodliwe. Mineralizacja jest pożytecznym mechanizmem magazynowania ditlenku węgla, pod warunkiem, że nie utrudnia dalszego zatłaczania. Poza tym, ponieważ H_2S i CO_2 tworzą słabe kwasy, gdy rozpuszczają się w wodzie, mogą one w rzeczywistości poprawić możliwości zatłaczania płynów przez rozpuszczenie części skał, szczególnie w pobliżu odwiertu.

Kilka uwag na temat przepływu

Przepływ płynu zatłaczanego do złoża podle-



Głowica odwiertu do zatłaczania gazu kwaśnego, Rycroft w północnej Albercie

więcej niż jeden odwiert zatłaczający. Z równania (5) wynika, że zmniejszenie przepływu o połowę (dwa odwierty) powoduje zmniejszenie spadku ciśnienia na złożu o połowę. Należy zwrócić uwagę, że nie oznacza to spadku ciśnienia o połowę w głowicy odwiertu, ponieważ wzór odnosi się do przepływu przez złożo.

Ponowne zatłaczanie do złoża

ga prawu Darcy'ego (Craft i Hawkins, 1991). Dla przepływu promieniowego (radialnego) w układzie współrzędnych walcowych (to znaczy oddających geometrię odwiertu zatłaczającego), prawo Darcy'ego przedstawia wzór:

$$Q = C_f \frac{k h}{B_G \mu} \left(\frac{\Delta P}{\ln [r_e / r_w]} \right) \quad (4)$$

gdzie: Q - natężenie przepływu zatłaczanego płynu
 C_f - przelicznik, którego wartość liczbowa zależy od wyboru jednostek miar pozostałych wielkości ujętych w równaniu
 K - przepuszczalność skały
 h - grubość złoża
 B_G - współczynnik objętości formacji
 μ - lepkość płynu
 ΔP - spadek ciśnienia
 r_e - promień granicy formacji wyznaczonej przez odległości między odwiertami
 r_w - promień odwiertu

Równanie powyższe zakłada, że właściwości fizyczne płynów są stałe.

Ponieważ gaz kwaśny jest w stanie gazowym pod niskim ciśnieniem, zwykle wyraża się natężenie jego przepływu w jednostkach objętości (na jednostkę czasu): Nm^3/d lub MSCFD (tysiącach standardowych stóp sześciennych na dzień). Zanim jednak zatłaczany płyn dotrze do złoża, zwiększa on swoją gęstość do względnie wysokiej wartości, zwykle między 600 i 800 kg/m^3 . Lepkość tego płynu jest względnie niska, około 0,01 do 0,2 cP.

Przyjmując, że wartość Q wyrażona jest w MSCFD, k w mD (miliDarcy), h w stopach (ft), B_G w $bbl[act]/SCF$, μ w cP, a ΔP w psi, wówczas wartość C_f wyniesie $7,082 \times 10^{-6}$.

Równanie (4) można przekształcić tak, aby można było obliczyć spadek ciśnienia:

$$\Delta P = Q \frac{B_G \mu}{C_f k h} \ln [r_e / r_w] \quad (5)$$

Zatłaczanie płynów do ciśnienia większego niż ciśnienie szczelinowania jest zapewne nieuzasadnione, a w niektórych przypadkach zabronione prawem.

Jeśli spadek ciśnienia wywołany przepływem przez media porowate jest czynnikiem limitującym zatłaczanie, wówczas potrzebny być może

Złożem, które wydaje się być oczywistym zbiornikiem dla zatłaczanego gazu kwaśnego, jest złożo produkcyjne. Dlaczego nie zwracać gazu kwaśnego do strefy, z której został on wydobyty? Jest kilka zalet takiego podejścia, ale są również wady.

Po pierwsze, jasne jest, że złożo ma wystarczającą objętość do przyjęcia zatłaczanego płynu, ponieważ ten płyn stanowi jedynie ułamek wydobytego gazu ziemnego. Po drugie, nie powinno być obaw co do szczelności skały stropowej, ponieważ utrzymywała ona gaz w złożu przez okres geologiczny.

Z drugiej strony zatłaczanie gazu kwaśnego z powrotem do złoża produkcyjnego spowoduje zwiększenie zasiarczenia płynu złożowego. Oznacza to, że stężenie H_2S i CO_2 w wydobywanym gazie ziemnym będzie się zwiększać.

Podsumowując

CCS i AGI są technologiami wykorzystywanymi do pozbywania się strumieni niepożądanych płynów. Dobór złoża do magazynowania ditlenku węgla lub gazu kwaśnego jest pierwszym etapem opracowania pomyślnie zrealizowanego projektu. Omówiono szczegółowo kryteria doboru złoża do zatłaczania kwaśnych gazów. Trzy główne czynniki, które należy brać pod uwagę, to magazynowanie, wzajemne oddziaływanie złoża i zatłaczanego płynu, oraz jego przepływ. Po dokonaniu wyboru złoża, pozostaje zaprojektowanie procesu, jego ocena i na koniec instalacja urządzeń.

Literatura

- Craft, B. C. i Hawkins, M. F., *Applied Petroleum Reservoir Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1991)
- Jacquemet, N., Pironon, J., Lagneau, V., i Saint-Marc, J., „Well Cement Aging in Various H_2S - CO_2 Fluids at High Pressure and High Temperature: Experiments and Modelling”, w *Carbon Dioxide Sequestration and Related Technologies*, Wu, Carroll, i Du (ed.), strony 423-435, Scrivener Publishing, Salem, MA, (2011)
- Gutierrez, A. A. i Hunter, J. C., *Review and Testing of Radial Simulations of Plume Expansion and Confirmation of Acid Gas Containment Associated with Acid Gas Injection in an Underpressured Clastic Carbonate Reservoir*, w *Acid Gas Extraction for Disposal and Related Topics*, Wu, Carroll, i Zhu (ed.), Scrivener Publishing, Salem, MA, (2015)