

Praktyczne reguły wstępnego projektowania procesu zatłaczania gazu kwaśnego do złoża

Zatłaczanie gazu kwaśnego do złoża (ang. Acid Gas Injection, AGI) stało się realnym sposobem radzenia sobie z kwaśnym gazem (mieszaniną CO_2 i H_2S), który jest produktem ubocznym uzdatniania surowego gazu ziemnego. Projektowanie procesu AGI wymaga dużej ilości danych, z których większość pochodzi z testów w terenie. Kiedy jednak rozpoczynamy studium wykonalności, nie zawsze mamy wszystkie wymagane dane. W tym artykule przedstawiono kilka uproszczonych metod (praktycznych reguł), które pozwolą inżynierowi na przeprowadzenie studium wykonalności lub nawet wstępnego projektu w przypadku braku wszystkich wymaganych danych.

Eugeniusz Grynia



John J. Carroll



Ponadto te praktyczne reguły można zastosować w szczegółowych obliczeniach w celu przesiania dostarczonych informacji. Znaczne odchylenia od praktycznych reguł powinny stanowić sygnał ostrzegawczy i wymagać od projektanta potwierdzenia podanych informacji. Wyeliminowanie niektórych potencjalnych błędów na wczesnym etapie procesu projektowania pozwala uniknąć opóźnień na etapie projektu wykonawczego.

Na koniec, w niniejszym artykule przedstawiono niektóre studia przypadków z wykorzystaniem informacji będących w posiadaniu autorów, które ilustrują stosowanie tych reguł.

WPROWADZENIE

Zatłaczanie gazu kwaśnego stanowi alternatywę dla radzenia sobie z mieszaniną H_2S + CO_2 , która jest produktem ubocznym uzdatniania surowego gazu ziemnego. Zasadniczo kwaśny gaz pochodzi z instalacji do usuwania kwaśnego gazu (AGRU, ang. Acid Gas Removal Unit), ma niskie ciśnienie, stosunkowo wysoką temperaturę i jest nasycony wodą. Strumień ten jest sprężany, transportowany rurociągiem do odwiertu zatłaczającego i zatłaczany do odpowiedniego podpowierzchniowego złoża, zwykle w celu usunięcia.

kierowany do pochodni, a odgazowana woda może być usuwana. Jeśli kopalnia gazu ziemnego posiada instalację do obróbki kwaśnej wody, to woda z separatora zrzutowego może zostać tam przesłana do obróbki. Możliwe jest osuszenie kwaśnego gazu do wystarczającego poziomu za pomocą samego sprężania i chłodzenia, ale może być konieczne dodatkowe osuszanie w oddzielnym urządzeniu. W większości projektów można osiągnąć wymagane ciśnienie zatłaczania stosując jedynie sprężarkę. Jednak w niektórych projektach może być potrzebne wyższe ciśnienie, które można osiągnąć dzięki zastosowaniu pompy do kwaśnego gazu o dużej gęstości. Z tego powodu na schemacie blokowym instalacja do osuszania gazu kwaśnego i pompa są pokazane jako opcjonalne. We wszystkich metodach stosowanych do osuszania kwaśnego gazu powstaje strumień kwaśnego, mokrego gazu odlotowego. Z tym gazem odlotowym należy się uporać i często zwraca się go do sprężarki. Istnieją jednak inne możliwości. Kończąc opis procesu, gaz słodki z AGRU jest wysyłany do dalszej obróbki, w tym do osuszania i kontroli węglowodorowego punktu rosy.

GAZ KWAŚNY

Z punktu widzenia procesu niezbędna jest znajomość składu chemicznego strumienia, jego natężenia przepływu, a także temperatury i ciśnienia. Zostanie to omówione w dalszej części artykułu.

Skład chemiczny gazu

W żaden sposób nie możemy z góry przewidzieć, jaki będzie skład kwaśnego gazu. Producent/kopalnia musi przekazać nam minimalną potrzebną ilość informacji. Mimo jej braku, możemy jednak przygotować trzy lub więcej scenariuszy po prostu w celu sprawdzenia ich wykonalności. Takie proste scenariusze to (1) 75% CO_2 + 25% H_2S , (2) 50% CO_2 + 50% H_2S i (3) 25% CO_2 + 75% H_2S . Rozsądnie byłoby uwzględnić 1 lub 2% metanu w mieszaninie, aby uczynić jej skład bardziej realistycznym. Ponadto kwaśny gaz jest nasycony wodą (patrz kolejny rozdział).

Natężenie przepływu

Ilość wytwarzanego kwaśnego gazu jest podstawową wielkością, którą musimy znać, aby rozpocząć projektowanie. Zasadniczo nie ma sensu rozpoczynać projektowania bez znajomości natężenia przepływu gazu kwaśnego, ale można dokonać pewnych spostrzeżeń, jeśli mamy do czynienia z niskim natężeniem przepływu (mniej niż około 140 000 Sm^3/d).

Zachowanie się wykresu fazowego

Zastosowanie szybkich metod do analizy przemian fazowych dla mieszaniny gazu kwaśnego jest ograniczone. Jednak po ustaleniu składu, zgodnie z poprzednim ustępem, dostępne stają się narzędzia do szybkiego obliczenia równowagi fazowej.



Rys. 1: Schemat blokowy AGI

Uproszczony schemat blokowy AGI przedstawiono na rysunku 1. Podstawowe trzy elementy na tym schemacie to (1) blok sprężania, (2) rurociąg i (3) odwiert do zatłaczania. Zamieszczono również blok usuwania gazu kwaśnego, ale ściśle mówiąc, nie jest on częścią procesu AGI. Podczas sprężania i chłodzenia kwaśnego gazu woda ulega kondensacji. Ma ona odczyn kwaśny i należy się z nią obchodzić ostrożnie. Jedną z możliwości jest zmieszanie jej z wodą złożową. Drugą jest skierowanie jej do separatora zrzutowego przy pochodni, gdzie gaz wydzielający się z wody jest

Gdy mamy już wykres fazowy dla przypadku podstawowego, możemy zastosować pewne spostrzeżenia. Po pierwsze, lekkie składniki, takie jak metan i azot, mają tendencję do zwiększania temperatury wrzenia (powstawania pierwszego pęcherzyka pary) pod danym ciśnieniem. Etan i propan wydają się być neutralne, mają stosunkowo niewielki wpływ na wykres fazowy. Węglowodory cięższe niż propan (C4+) mają tendencję do obniżania temperatury wrzenia (powstawania pierwszego pęcherzyka pary) pod danym ciśnieniem.

Zawartość wody

Strumień gazu kwaśnego wypływa ze szczytu kolumny regeneracyjnej aminy i ma temperaturę około 50° C oraz ciśnienie od 1,5 do 2,5 barów. Biorąc pod uwagę temperaturę i ciśnienie strumienia, możemy dokładnie obliczyć zawartość wody na podstawie następującego równania:

$$x_w = P^{\text{sat}}/P_{\text{tot}} \quad (1)$$

gdzie: x_w – ułamek molowy wody
 P^{sat} – prężność pary czystej wody
 P_{tot} – ciśnienie całkowite lub ciśnienie strumienia

Prężność pary czystej wody można odczytać z tablic parowych. Przy niskich ciśnieniach w górnej części regeneratora równanie to może być stosowane niezależnie od składu kwaśnego gazu.

Przy wyższym ciśnieniu obliczenie zawartości wody w kwaśnym gazie jest skomplikowane. Zawartość wody w stałej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem wykazuje dwa rodzaje zachowania: (1) minimum zawartości wody i (2) przemiana fazowa.

Zawartość wody w kwaśnym gazie pod wysokim ciśnieniem jest dość złożona [więcej szczegółów patrz Carroll (2002)] i nie można tu korzystać z metod uproszczonych do jej obliczania. W przypadku bardzo wstępnego projektowania lub studium wykonalności możemy ten problem (zawartości wody) odłożyć na później.

Hydraty

Możliwość powstawania hydratów powinna być brana pod uwagę przy projektowaniu zatłaczania kwaśnego gazu do złoża, nawet na wstępnych etapach projektowania. Hydraty mają tendencję do tworzenia się w gazie kwaśnym przy stosunkowo niskich ciśnieniach i utrzymują się w stosunkowo wysokich temperaturach. Jeśli znany jest skład gazu kwaśnego, możemy oszacować położenie krzywej tworzenia się hydratu.

Istnieje jednak jedna ważna praktyczna reguła, którą możemy wykorzystać. Jeśli temperatura jest wyższa od około 30°C, hydraty nie powinny stanowić problemu bez względu na skład. Nie oznacza to jednak, że należy dostarczać ciepło, aby utrzymać temperaturę gazu kwaśnego powyżej 30°C!

ZŁOŻE

Przy wyborze docelowego złoża do zatłaczania kwaśnego gazu należy uwzględnić: (1) powstrzymywanie, (2) chłonność i (3) negatywne oddziaływanie na skałę złożową i płyny złożowe.

Tylko pełne badanie złoża może ustalić, czy wybrana strefa spełnia wszystkie te kryteria. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy kwaśny gaz jest ponownie zatłaczany do strefy, z której został wydobyty. Strefa produkcyjna złoża powinna z założenia spełniać te wszystkie kryteria. Należy jednak wykonać badania złoża, aby określić wpływ zatłaczania kwaśnego gazu na wydobywanie, szczególnie na wzrost H_2S w wydobywanym płynie. Niemniej jednak takie badania wykraczają poza zakres studium wykonalności lub podstawowego studium inżynierskiego.

Najlepszym sposobem na uzyskanie warunków złożowych jest ich pomiar. Jednak na wczesnych etapach projektowania nie zawsze mamy takie informacje. Poniższe ustępy zawierają wytyczne dotyczące szacowania warunków złożowych.

Warunki złożowe

Normalne ciśnienie w zbiorniku można oszacować na podstawie wysokości ciśnienia statycznego słupa czystej wody. Stosuje się to do około 9,8 kPa/m



lub 9,8 MPa/km. Jest to dobry punkt wyjściowy, ale nawet w naturalnych zbiornikach można spowodować nadciśnienie (ciśnienie większe, niż oszacowane) lub niedociśnienie. Ponadto, jeśli zatłaczanie odbywa się do złoża szcerpanego, ciśnienie może być znacznie niższe niż oszacowane. Temperaturę złoża można oszacować na podstawie gradientu geotermicznego. Jego wartość zależy od miejsca, a nawet prowincji lub stanu, ale zazwyczaj wynosi około 25°C/km.

$$T_{\text{res}} = T_{\text{surf}} + h \cdot (dT/dz) \quad (2)$$

gdzie: T_{res} – temperatura złoża
 T_{surf} – temperatura powierzchni
 h – głębokość złoża
 dT/dz – gradient geotermiczny

Na szerokościach geograficznych między około 50° a 60° temperatura powierzchni wynosi około 5°C.

Ciśnienie zatłaczania

Najlepszym sposobem oszacowania wymaganego ciśnienia zatłaczania jest wykonanie testu zatłaczania. Obejmuje on zatłaczanie wody. Wykorzystując podobieństwo (tj. porównanie właściwości kwaśnego gazu z właściwościami wody), można uzyskać najlepsze oszacowanie ciśnienia zatłaczania. W przypadku braku takiego testu, ciśnienie zatłaczania można oszacować na podstawie mechaniki płynów.

Ogólne równanie do oszacowania ciśnienia głowicowego ruchowego (tj. ciśnienia zatłaczania) podano poniżej:

$$\begin{aligned} \text{Ciśnienie w odwiercie} &= \text{ciśnienie złożowe} \\ &+ \text{spadek ciśnienia spowodowany przepływem przez formację} \\ &+ \text{spadek ciśnienia z powodu uszkodzenia strefy} \\ &+ \text{spadek ciśnienia przez perforacje} \\ &- \text{ciśnienie statyczne płynu w syfonówkach} \\ &+ \text{spadek ciśnienia spowodowany tarcieniem} \end{aligned} \quad (3)$$

Wszystkie członki w powyższym równaniu powodują wzrost ciśnienia zatłaczania, z wyjątkiem ciśnienia statycznego płynu. Kombinacja członków: ciśnienie złożowe plus przepływ przez formację oraz uszkodzenie strefy plus perforacje nazywane jest ciśnieniem na granicy odwiertu i złoża (ang. sandface pressure).

$$\begin{aligned} \text{Ciśnienie głowicowe} &= \text{ciśnienie na granicy odwiertu i złoża} \\ &- \text{ciśnienie statyczne płynu w syfonówkach} \\ &+ \text{spadek ciśnienia spowodowany tarcieniem} \end{aligned} \quad (4)$$

Ciśnienie na granicy odwiertu i złoża można dokładnie określić tylko za pomocą testu zatłaczania wspomnianego powyżej. W przypadku niskich przepływów wiele z członów równania (4) jest pomijalnie małych, a ciśnienie na granicy odwiertu i złoża jest w przybliżeniu równe ciśnieniu złożowemu.

Ciśnienie statyczne płynu można obliczyć za pomocą następującego równania:

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \quad (5)$$

gdzie: dP/dz – ciśnienie statyczne nieskończenie cienkiej warstwy płynu
 ρ – gęstość płynu
 g – przyspieszenie grawitacyjne (9,81 m/s²)

Chociaż równanie to wygląda dość prosto, problem z kwaśnym gazem polega na tym, że (1) występuje znaczna zmiana gęstości płynu od góry do dołu odwiertu i (2) gęstość jest silną funkcją ciśnienia i temperatury. Trzeba więc mieć dobry model gęstości, aby scałkować to równanie.

RUROCIĄG

Obliczenia spadku ciśnienia kwaśnego gazu w rurociągu wykonuje się w taki sam sposób, jak w przypadku innych rurociągów. Należy znać poprawne właściwości kwaśnego gazu w rurociągu. Gęstość jest zazwyczaj dość duża (od 600 do 900 kg/m³ w zależności od warunków), a lepkość jest niska (około jednej dziesiątej lepkości wody). W przypadku niskiego przepływu spadek ciśnienia zwykle nie stanowi problemu i stosuje się nominalne średnice rur wynoszące 2 cale lub 3 cale i jest to często decyzja firmy (właściciela), a nie inżynierska.

Rozważmy przepływ 142 000 Sm³/dzień kwaśnego gazu (5 MMSCFD – milionów standardowych stóp sześciennych na dzień) sprężanego do 7 MPa. Wychładza się on w rurociągu do temperatury gruntu (5°C); spadek ciśnienia w 2-calowym rurociągu o grubości ścianki 5,54 mm (Schedule 80) szacuje się na mniej niż 500 kPa/km (2 psi/100 stóp), co mieści się w typowej specyfikacji technicznej. Dla rurociągu 3-calowego o grubości ścianki 7,62 mm (Schedule 80) spadek ciśnienia wynosi 55 kPa / km (0,25 psi/100 stóp).

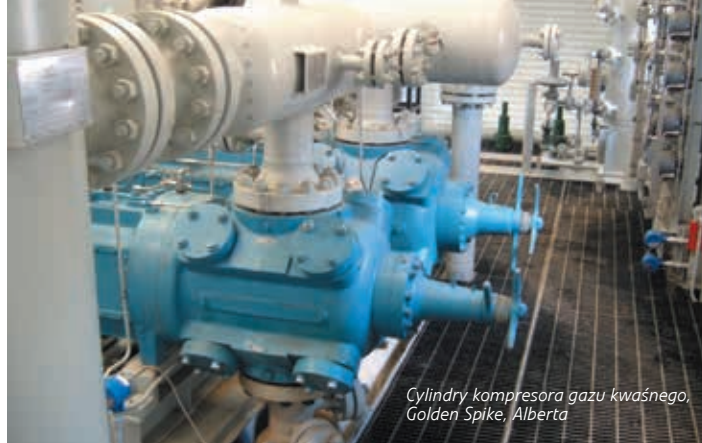
Chociaż używamy terminu „kwaśny gaz”, płyn w rurociągu jest cieczą lub płynem podobnym do cieczy. Dlatego nie należy stosować równań właściwych dla przepływu gazu, takich jak równania Weymoutha lub Panhandle'a.

Projektowanie rurociągu nie odbiega od typowego podejścia pod względem sposobu obliczania średnicy (spadek ciśnienia) i grubości ścianki rury (bezpieczeństwo). Grubość ścianki opiera się na równaniu naprężenia obwodowego zmodyfikowanym kilkoma współczynnikami bezpieczeństwa (ze względu na bliskość zaludnionego obszaru, autostrad, przejść przez rzeki itp.). Podstawowe równanie naprężenia obwodowego to:

$$t = \frac{r P}{\sigma} \quad (6)$$

gdzie: t – grubość ścianki
 r – promień wewnętrzny rurociągu
 P – ciśnienie w rurociągu
 σ – naprężenie

Jednostki są wewnętrznie spójne; należy używać tych samych jednostek dla t i r (mm lub in) i tak samo dla σ i P (MPa lub psi). W przypadku zwykłych stali przemysłowych ostrożny szacunek dopuszczalnego naprężenia wynosi 250 MPa (36 000 psi), należy jednak dodać współczynnik bezpieczeństwa od 2 do 4, który zmniejsza wartość σ w równaniu (6). W przypadku stali węglowej zwykle dodaje się naddatek na korozję w wysokości 1,59 mm (0,0625 cala) dla stali węglowej, a dla stali nierdzewnej 0,82 mm (0,03125 cala). Jest on dodawany do grubości ścianki określonej na podstawie analizy naprężenia obwodowego. Korzystając z tabeli standardowych rozmiarów rur, można dobrać grubość ścianki nieco większą od obliczonej.



SPRĘŻARKA

W przypadku projektów dotyczących niskiego natężenia przepływu gazu kwaśnego (w tym przypadku mniej niż około 280 000 Sm³/d, 10 MMSCFD) często stosuje się wielostopniową sprężarkę tłokową. Zazwyczaj używa się 4 lub 5 stopni sprężania, co można osiągnąć za pomocą jednej sprężarki. Chłodzenie międzystopniowe odbywa się za pomocą chłodnic powietrznych. Wartość zadana temperatury dla chłodnicy wynosi około 50°C (120°F) lub nieco więcej w cieplejszym klimacie. Przy wyższych prędkościach przepływu wykorzystywane są duże sprężarki odśrodkowe. Chłodzenie międzystopniowe jest nadal osiągane za pomocą chłodnic powietrznych. Spręż jest stosunkiem ciśnienia na tłoczeniu do ciśnienia na ssaniu. Dopóki używane są te same jednostki, można stosować dowolne jednostki ciśnienia. Są to ciśnienia absolutne, a nie manometryczne.

Temperatura na tłoczeniu po każdym stopniu sprężania powinna być ograniczona do około 150°C. Ogranicza to spręż do wartości poniżej 4 na stopień.

Przy projektowaniu wstępnym zasadą jest stosowanie równych wartości sprężu dla każdego stopnia sprężania. Rzadko zdarza się to na etapie projektu wykonawczego, ale wystarcza, aby szybko oszacować całkowite zapotrzebowanie mocy.

Moc sprężania

Zapotrzebowanie mocy dla jednego stopnia sprężania można oszacować za pomocą następującego równania:

$$W_s = \frac{C \langle z \rangle k Q T_i}{\eta (k-1)} \left(\frac{P_{std}}{T_{std}} \right) \left[\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (7)$$

gdzie: W_s – praca na wale

C – stała do przeliczania jednostek miar

$\langle z \rangle$ – średni współczynnik ściśliwości

k – stosunek pojemności cieplnych

Q – natężenie przepływu standardowej objętości w jednostce czasu, np. Sm³/h, MMSCFD)

P_{std} – ciśnienie standardowe

T_{std} – temperatura standardowa w jednostkach absolutnych (K lub R)

T_i – temperatura na ssaniu w jednostkach absolutnych (K lub R)

η – wydajność

P_o – ciśnienie na tłoczeniu

P_i – ciśnienie na ssaniu

Stała C jest uwzględniona w zasadzie po to, aby zapewnić prawidłowe jednostki. Zatem można wybrać dowolny zestaw jednostek do obliczenia mocy, zarówno w koniach mechanicznych (KM), jak i w watach, pod warunkiem, że zastosowano odpowiednią wartość dla współczynnika C . W amerykańskich jednostkach inżynierskich (AEU) wartość ta wynosi 3,03 dla Q w MMSCFD i W_s w KM. W jednostkach SI dla Q w 10³ Sm³/d i W_s w kW, wartość C wynosi 0,0116. Ponadto w branży naftowej standardowe warunki to 60°F (519,7 R) i 14,969 psia (1 atm), co odpowiada 15,56 °C (288,7 K) i 101,325 kPa. Jeśli zastosujemy inne standardowe warunki, równanie można odpowiednio dostosować.

Chociaż równanie to jest nieco kłopotliwe w obliczeniach manualnych, jest łatwe w użyciu w arkuszu kalkulacyjnym.

Jako przybliżenie pierwszego rzędu można założyć, że średni współczynnik ściśliwości wynosi 1. Takie założenie sprawdza się przy niskim ciśnieniu (błąd poniżej 10%), ale przy wysokim ciśnieniu może wynosić około 30%. W przypadku kwaśnego gazu można przyjąć jako przybliżenie pierwszego rzędu, że $k = 1,3$. Należy zauważyć, że współczynnik k jako stosunek dwóch pojemności cieplnych, jest bezwymiarowy.

Ciśnienia w wyrażeniu na współczynnik sprężania P_o/P_i , są ciśnieniami absolutnymi i mogą być wyrażane w dowolnych jednostkach pod warunkiem, że są one takie same.

Małe sprężarki tłokowe, zwykle stosowane do zatłaczania kwaśnego gazu, mają sprawność około 85%, ale stosując ją w równaniu (7), $\eta = 0,85$.

Równanie (7) stosuje się do pojedynczego stopnia sprężania. W przypadku sprężarki wielostopniowej równanie to należy zastosować dla każdego stopnia, a całkowita moc sprężarki jest sumą mocy dla poszczególnych stopni.

Z równania (7) wynika, że moc jest wprost proporcjonalna do natężenia przepływu. Chociaż nie jest to do końca prawdą, jest to dobra zasada. Tak więc podwojenie natężenia przepływu w przybliżeniu podwaja moc wymaganą do sprężenia strumienia. Z drugiej strony związek między mocą a sprężem P_o/P_i jest bardziej skomplikowany, jak to widać w równaniu (7).

Wreszcie temperaturę strumienia na tłoczeniu dla jednego stopnia sprężania można oszacować następująco:

$$T_o = T_i \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{(k-1)/k} \quad (8)$$

Temperatura może być wyrażona w K lub R, a ciśnienia, wyrażone jako ciśnienia absolutne, mogą być podane w dowolnych jednostkach, pod warunkiem, że są one wszystkie spójne. Powtórzmy, to równanie jest stosowane do każdego stopnia sprężarki wielostopniowej.

Na koniec należy zauważyć, że równanie to nie uwzględnia przemiany fazowej. Chociaż jest proste w użyciu i wygodne do szybkiego wykonywania przybliżonych obliczeń, nie bierze jednak pod uwagę możliwości kondensacji kwaśnego gazu między stopniami sprężania. Na wstępnym etapie, gdy wszystko, co jest wymagane, to przybliżone oszacowanie mocy sprężarki, przeoczenie tego szczegółu nie stanowi problemu, ale trzeba być ostrożnym, kiedy przechodzi się do etapu bardziej szczegółowych obliczeń.

Przykład 1

Pojedynczy stopień sprężania służy do sprężania kwaśnego gazu o natężeniu przepływu 28 317 Sm³/d (1 MMSCFD) od 165,5 kPa do 496,4 kPa (od 24 psia do 72 psia). Temperatura ssania wynosi 48,9°C (579,7 R). W przypadku gazu kwaśnego należy zastosować $k = 1,3$. Zastosujmy równanie (7) w celu oszacowania wymaganej pracy i równanie (8) w celu oszacowania temperatury na tłoczeniu.

Korzystając z jednostek AEU:

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{C(z)kQT_i}{\eta(k-1)} \left(\frac{P_{std}}{T_{std}} \right) \left[\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \\ &= \frac{3.03(1)(1.3)(1)(579.7)}{0.85(1.3-1)} \left(\frac{14.696}{519.7} \right) \left[\left(\frac{72}{24} \right)^{(1.3-1)/1.3} - 1 \right] \\ &= (8954.66)(0.028278) \left[(3)^{0.23077} - 1 \right] = (8954.66)(0.028278)(0.28856) \\ &= \underline{73 \text{ hp}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_o &= T_i \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{(k-1)/k} \\ &= 579.7 \left[\left(\frac{72}{24} \right)^{(1.3-1)/1.3} \right] = (579.7)(1.28856) \\ &= 747.0 \text{ R} = \underline{287.3^\circ\text{F}} \end{aligned}$$

A korzystając z jednostek SI:

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{C(z)kQT_i}{\eta(k-1)} \left(\frac{P_{std}}{T_{std}} \right) \left[\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \\ &= \frac{0.0116(1)(1.3)(28.317)(322.1)}{0.85(1.3-1)} \left(\frac{101.325}{288.7} \right) \left[\left(\frac{496.4}{165.5} \right)^{(1.3-1)/1.3} - 1 \right] \\ &= (539.39)(0.35097) \left[(3)^{0.23077} - 1 \right] = (539.39)(0.35097)(0.28856) \\ &= \underline{54.6 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_o &= T_i \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{(k-1)/k} \\ &= 322.1 \left[\left(\frac{496.4}{165.5} \right)^{(1.3-1)/1.3} \right] = (322.1)(1.28856) \\ &= 415.05 \text{ K} = \underline{141.9^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

SCENARIUSZE

Biorąc pod uwagę założenie, że mamy mało danych na początek, nie mamy też żadnego przypadku do zbadania poza podstawowymi informacjami. Jeśli chcemy, możemy jednak stwarzać takie przypadki. Na przykład możemy procentowo zmieniać ciśnienie i natężenie przepływu. Pierwszym przypadkiem byłoby ciśnienie podane przez klienta lub oszacowane na podstawie uproszczeń, a dodatkowe przypadki mogłyby zostać stworzone poprzez zwiększanie powyższych wielkości co 10%, 20% itd., W ten sposób możemy przygotować tyle przypadków, ile uznamy za konieczne. Niestety nie działa to dla niektórych innych wielkości, jak temperatura i skład chemiczny.

Dla temperatury przypadku można budować za pomocą przyrostów temperatury. Można więc zbadać przypadek podstawowy i przypadki, w których temperaturę zmienia się o $\pm 10^\circ\text{C}$. Zazwyczaj mamy dobre oszacowanie temperatury zasilania (zwykle około 50°C), ale nie tak dobre dla temperatury głowicowej i temperatury złoża. Zatem można zbadać kilka kombinacji, aby zaobserwować przewidywany wpływ na ciśnienie zatłaczania.

Skład chemiczny jest nieco bardziej skomplikowany, biorąc pod uwagę, że nie możemy po prostu zwiększyć jeden z ułamków molowych. Tutaj proponuję zmienić stężenie H₂S o $\pm 10\%$ molowych, a następnie znormalizować skład gazu.

PRZYPADK 1

Z moich plików... Klient kontaktuje się ze mną z prośbą o wstępne zaprojektowanie procesu AGI. Podaje, że złożo znajduje się na głębokości 3658 m (12 000 stóp) i ma temperaturę 177°C (350°F) i ciśnienie 41,4 MPa (6000 psia).



Głowica odwiertu do zatłaczania gazu kwaśnego, Rycroft, Alberta

Coś wydaje się niezwykle, więc sprawdźmy:

$$P_{res} = 9,8 \times 3658 = 35,8 \text{ MPa (5192 psia)}$$

$$T_{res} = 5 + 3,658 \times 25 = 96^\circ\text{C (205}^\circ\text{F)}$$

Ciśnienie złożowe wydaje się nieco duże, ale może być OK, jeśli w złożu wytworzono zbyt wysokie ciśnienie. Podana temperatura złoża jest zdecydowanie za wysoka. Rozsądnie jest poprosić klienta o potwierdzenie podanych wartości przed przystąpieniem do projektowania, nawet na etapie wstępnym.

PRZYPADK 2

Ponownie, z moich plików... Klient kontaktuje się ze mną z prośbą o przygotowanie wstępnego projektu. Bez podania wielu informacji klient mówi, że należy zaprojektować sprężarkę na ciśnienie tłoczenia około 46,9 MPa (6800 psia).

Jest to bardzo duże ciśnienie tłoczenia dla kompresora kwaśnego gazu, które zazwyczaj wynosi mniej niż 20 MPa (często znacznie mniej) i rzadko powyżej 25 MPa. Zapytałem klienta o źródło tej wartości, a on powiedział, że ciśnienie złożowe wynosi około 6200 psia i chciał upewnić się, że ma wystarczająco duże ciśnienie, aby zatłoczyć gaz, dlatego dodał około 10%.

PRZYPADK 3

Strefą wybraną do usuwania kwaśnego gazu jest węglanowa warstwa wodonośna na głębokości 3246 m (10 650 stóp). Natężenie zatłaczania kwaśnego gazu wynosi 28 320 Sm³/d (1MMSCFD). Kwaśny gaz ma temperaturę 50°C i jest pod ciśnieniem 2,5 bara. Pierwsza próba oszacowania kwaśnego gazu podana jest poniżej.

Ditlenek węgla	65.29%
Siarkowodór	33.64%
Metan	1.05%
C ₂ +	0.02%

Nie podano żadnych dodatkowych informacji. Jest to typowe dla wstępnego projektowania – klient nie udziela wielu informacji.

Projektowanie

Poczynając od złoża, możemy oszacować ciśnienie złożowe na podstawie jego głębokości:

$$P_{res} = 9,8 \times 3,246 = 31,8 \text{ MPa (4614 psia)}$$

i temperaturę:

$$T_{res} = 5 + 3,426 \times 25 = 91^\circ\text{C (196}^\circ\text{F)}$$

Ponieważ natężenie przepływu jest dość niskie, założmy, że kwaśny gaz dociera do głowicy odwiertu w temperaturze gruntu (5°C, 41°F). Ponadto założmy, że rurki są standardowe 2-calowe (Dz = 2,375 cala, grubość 0,190 cala). Do oszacowania ciśnienia zatłaczania skorzystajmy z programu GLEWPro (Wang i Carroll, 2006).

John J. Carroll, Eugeniusz Grynia
Gas Liquids Engineering, Ltd.
Calgary, Alberta, Canada

LITERATURA

Carroll, J.J., "The Water Content of Acid Gas and Sour Gas from 100° to 220°F and Pressures to 10,000 psia", 81st Annual GPA Convention, Dallas, TX, March 11-13, (2002).

Wang, S. and Carroll, J.J., "Model Calculates Acid-Gas Injection Profiles", Oil & Gas Journal, 104 (33), (2006).

RAPORT Z OBLICZEŃ

1.1 Procedura obliczeniowa
Ciśnienie głowicowe i profile zatłaczania

1.2 Wymagania dotyczące danych i obliczeń

1.2.1 Ułamki molowe składników płynu

Nazwa składnika	Ułamek molowy
H ₂ S	0.3364
CO ₂	0.6529
Metan	0.0105
Etan	0.0002

1.2.2 Wymiary rur w odwiertcie

Nazwa	Wartość	Jednostka
Głębokość	3246	m
Średnica zewnętrzna	2.375	cal
Grubość ścianki	0.19	cal
Chropowatość ścianki	0.04	mm

1.2.3 Zadane wartości przepływu

Nazwa	Wartość	Jednostka
Natężenie przepływu	1	MMSCFD
Ciśnienie denne	31.8	MPa

1.2.4 Profil temperaturowy zatłaczanego płynu

Nazwa	Wartość	Jednostka
Temperatura ruchowa głowicowa	5	C
Temperatura ruchowa denna	90	C

1.3 Wyniki obliczeń i profil odwiertu

1.3.1 Zestawienie wyników

Nazwa	Wartość	Jednostka
Kierunek przepływu	Zatłaczanie, przepływ w dół	
Natężenie przepływu	1	MMSCFD
Ciśnienie głowicowe	6897.7	kPa
Ciśnienie denne	31.8	MPa
Temperatura ruchowa głowicowa	5	C
Temperatura ruchowa denna	90	C

1.3.2 Profil odwiertu									
Nr	Głębokość	Ciśnienie	Temp	Gęstość	Lepkość	Prędkość	Para	Woda	Kondensat
	m	kPa	C	kg/m ³	cP	m/s	% wag.	% wag.	% wag.
1	0.00	6897.75	5.0	895.64	0.09754	0.094	0.00	0.00	100.00
2	162.30	8309.67	9.2	882.22	0.09489	0.096	0.00	0.00	100.00
3	324.60	9700.41	13.5	869.07	0.09236	0.097	0.00	0.00	100.00
4	486.90	11070.41	17.8	856.21	0.08995	0.099	0.00	0.00	100.00
5	649.20	12420.16	22.0	843.68	0.08765	0.100	0.00	0.00	100.00
6	811.50	13750.23	26.2	831.52	0.08548	0.102	0.00	0.00	100.00
7	973.80	15061.23	30.5	819.76	0.08342	0.103	0.00	0.00	100.00
8	1136.10	16353.80	34.8	808.42	0.08149	0.105	0.00	0.00	100.00
9	1298.40	17628.62	39.0	797.51	0.07968	0.106	0.00	0.00	100.00
10	1460.70	18886.41	43.2	787.06	0.07799	0.107	0.00	0.00	100.00
11	1623.00	20127.89	47.5	777.06	0.07641	0.109	0.00	0.00	100.00
12	1785.30	21353.78	51.8	767.52	0.07495	0.110	0.00	0.00	100.00
13	1947.60	22564.81	56.0	758.43	0.07358	0.112	0.00	0.00	100.00
14	2109.90	23761.69	60.2	749.79	0.07232	0.113	0.00	0.00	100.00
15	2272.20	24945.14	64.5	741.58	0.07115	0.114	0.00	0.00	100.00
16	2434.50	26115.83	68.8	733.79	0.07006	0.115	0.00	0.00	100.00
17	2596.80	27274.42	73.0	726.41	0.06906	0.116	0.00	0.00	100.00
18	2759.10	28421.55	77.2	719.42	0.06814	0.118	0.00	0.00	100.00
19	2921.40	29557.81	81.5	712.80	0.06729	0.119	0.00	0.00	100.00
20	3083.70	30683.78	85.8	706.52	0.0665	0.120	0.00	0.00	100.00
21	3246.00	31800.00	90.0	700.58	0.06577	0.121	0.00	0.00	100.00

