

Wiesław Szott, Andrzej Gołąbek
Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Symulacje procesów eksploatacji złóż naftowych z zastosowaniem sterowania sprzężeniem zwrotnym.

Część I. Sterowanie eksploatacją złóż i PMG

Wstęp

W praktyce stosowania symulacyjnych modeli złożowych do prognozowania pracy złóż naftowych stosunkowo często napotyka się na problemy związane z realizacją różnorodnych warunków i ograniczeń eksploatacyjnych, narzuconych przez inwestora lub operatora złoża. Przykładowo, dla złoża ropno-gazowego może to być warunek jednoczesnego, zadanego wydobycia ropy i gazu w fazie *plateau* pracy złoża przy użyciu uzupełniających odwiertów gazowych o zadanym priorytecie pracy.

Do niedawna standardowo dostępne symulatory złożowe nie pozwalały na sterowanie procesem eksploatacji złoża dla tak skomplikowanych założeń tego procesu. Używano wówczas różnych, złożonych technik i metod zastępczych.

Obecnie w ramach symulatorów złożowych pojawiły się dodatkowe mechanizmy sterowania procesem symulacji – o charakterze sprzężenia zwrotnego, wykorzystujące

możliwości definiowania w trakcie symulacji wielkości pochodnych od standardowo używanych (takich jak: ciśnienie, wydajności wydobycia itp.) oraz pozwalające na ich użycie do warunków realizacji działań sterujących procesem eksploatacji.

W niniejszej pracy przeanalizowano trzy przykłady wykorzystania mechanizmów sterowania eksploatacją poprzez sprzężenie zwrotne, wielkościami opisującymi jej przebieg. Na przykładach realistycznych modeli symulacyjnych złóż krajowych przedstawiono również rozwiązania typowych problemów eksploatacyjnych. Obliczenia wykonano przy użyciu symulatorów pakietu ECLIPSE [1].

Praca składa się z dwóch części: w pierwszej z nich przedstawiono zastosowanie sterowania sprzężeniem zwrotnym do symulacji procesów eksploatacji złóż i PMG, w zakresie utrzymania napowierzchniowych warunków funkcjonowania tych obiektów.

Sterowanie wydobyciem gazu ze złoża ropy naftowej

Podczas wykonywania prognostycznych symulacji złożowych często pojawia się problem sterowania wydobyciem gazu w złożach ropy naftowej [2]. Problem ten polega na jednoczesnym wydobywaniu ze złoża zadanej ilości ropy i gazu. Odwierty ropne wydobywają rozpuszczony w ropie gaz. Wydobycie to jest zmienne w czasie, m.in. na skutek zmieniających się warunków złożowych (np. spadku ciśnienia złożowego). Na początku eksploatacji złoża odwiert ropny pracujący ze stałą wydajnością wydobycia

ropy może wydobywać nawet kilkakrotnie mniej gazu niż w końcowej fazie eksploatacji. Dlatego w przypadku takich złóż utrzymanie obydwu wielkości wydobycia (ropy i gazu) jednocześnie stanowi poważny problem. W symulatorach złożowych typu ECLIPSE odwiertom wydobywającym ropę zadaje się wydajność wydobycia ropy, natomiast ilość wydobywanego gazu zależy od warunków panujących w złożu. Przy użyciu standardowych opcji sterowania (udostępnionych w omawianych symulatorach)

jednoczesne wydobywanie zadanej ilości ropy i gazu jest bardzo utrudnione lub wręcz niemożliwe.

W niniejszej części pracy podjęto próbę rozwiązania tego poważnego problemu poprzez zastosowanie udostępnionych w najnowszych wersjach symulatora mechanizmów sprzężenia zwrotnego. Złoże ropne, którego model symulacyjny wykorzystano w pracy jako typowy przykład, posiada czapę gazową, z której gaz na bieżąco jest szcerpiany pięcioma odwiertami gazowymi. Odwierty te pracują na zasadzie odwiertów uzupełniających wydobywanie gazu i są włączane do eksploatacji tylko wówczas, gdy suma wydajności wydobywanego gazu przez odwierty ropne (27 odwiertów) jest niższa od zadanej przez operatora złoża *plateau* gazu. Odwierty uzupełniające włączane/wyłączane są do/z eksploatacji pojedynczo, w odpowiedniej i zadanej kolejności.

W omawianym przykładzie takiej eksploatacji, w modelu symulacyjnym złoża ropnego przyjęto (zgodnie z danymi otrzymanymi od operatora):

- wydajność wydobywania ropy (q) na poziomie $1330 \text{ Nm}^3/\text{d}$,
- wydajności wydobywania gazu (q_g) na poziomie $1,05 \text{ mln Nm}^3/\text{d}$.

Od początku prognozowanej eksploatacji złoża wielkość wydobywania gazu przez odwierty ropne była niższa niż zadany poziom jego wydobywania na całym złożu, w efekcie czego już od samego początku prognozy, w wydobywaniu gazu musiały brać udział uzupełniające odwierty gazowe.

W wykonanych symulacjach, umożliwiających rozwiązanie omawianego problemu, założono typowe ograniczenia spotykane podczas tworzenia prognoz eksploatacji złóż ropy naftowej, takie jak:

- maksymalne wydajności wydobywania dla poszczególnych odwiertów,
- minimalne ciśnienie na spodzie odwiertu (w omawianym przykładzie $P_{bhp,min} = 200 \text{ bar}$),
- minimalne wydajności wydobywania ropy,
- maksymalne dopuszczalne depresje ciśnień,
- maksymalne wykładniki wodne,
- maksymalne wykładniki gazowe.

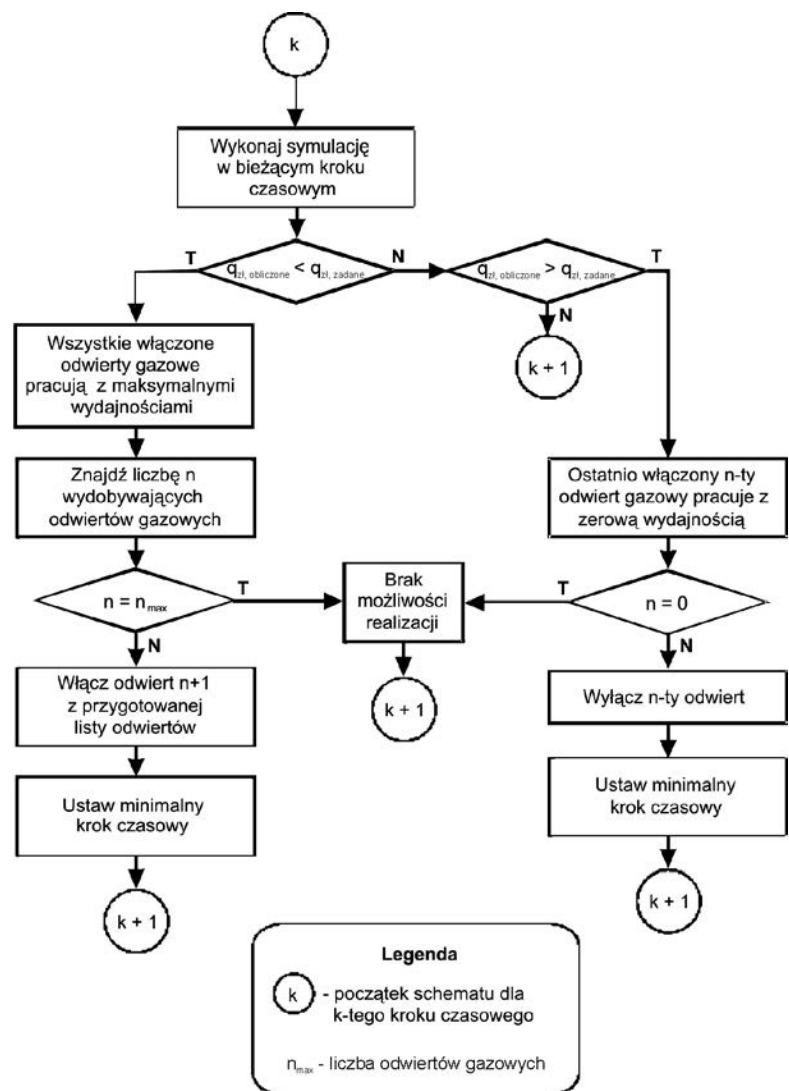
Prognozowany przebieg eksploatacji omawianego złoża obejmuje okres 27 lat: od stycznia 2010 r. do grudnia 2037 r. Użyty model symulacyjny tego złoża został skalibrowany w oparciu o dane historyczne z okresu od 12 marca 2001 r. do 31 grudnia 2009 r.

Badając omawiane zagadnienie przy pomocy symulatora ECLIPSE użyto tzw. zmiennych użytkownika. Ogólny schemat prezentujący uzyskane rozwiązania przedstawiono na rysunku 1.

W pierwszym kroku rozwiązywania problemu wszystkie odwierty eksploatacyjne podzielono na dwie grupy: grupę odwiertów ropnych oraz grupę odwiertów gazowych. Sterowanie grupą odwiertów ropnych ustawiono na wydobywanie ropy i zadano wydajność jej wydobywania (q_o), natomiast sterowanie grupą odwiertów gazowych ustawiono na wydobywanie gazu, a wydajność tej grupy odwiertów $q_{g(\text{odwiertów_gazowych})}$ przy użyciu zmiennej użytkownika, określono jako uzupełnienie do łącznej wartości:

$$q_{g(\text{odwiertów_gazowych})} = q_g - q_{g(\text{odwiertów_ropnych})}$$

Takie podejście pozwala określić, ile gazu muszą wydobywać odwierty gazowe, aby ze złoża wydobywano



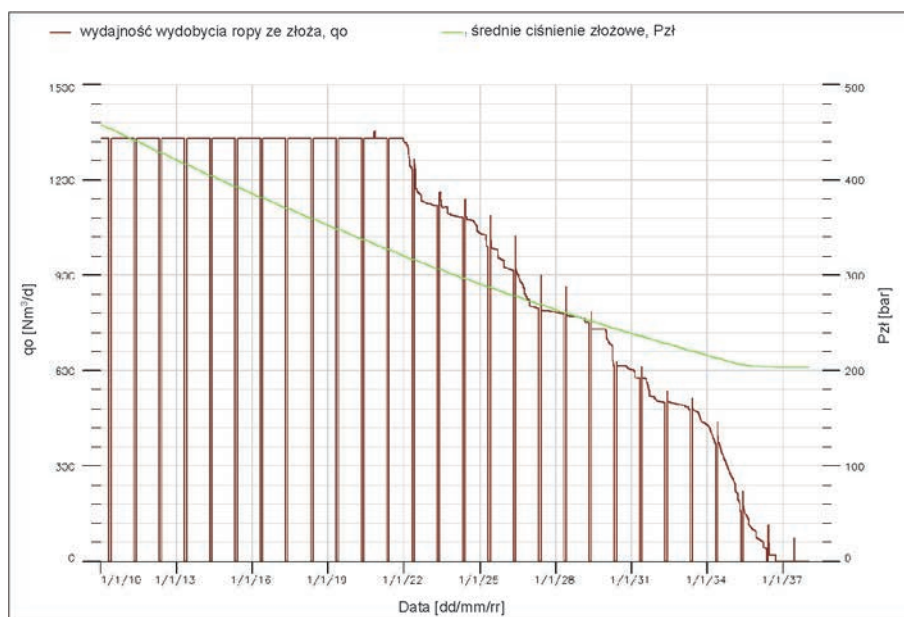
Rys. 1. Schemat procedury sterowania wydobywaniem gazu ze złoża ropy naftowej

jego zadaną ilość. Jeżeli grupa odwiertów ropnych będzie wydobywać ilość gazu zadaną dla całego złoża, wówczas grupie odwiertów gazowych zostanie przypisana zerowa wydajność. Niestety, takie obliczanie wydajności wydobywania gazu odwiertami gazowymi jest obciążone błędem już od początku symulacji, wiążącym się z jej krokami czasowymi. Błąd ten polega na tym, że w zadanym kroku czasowym symulator oblicza wydajność wydobywania gazu dla grupy odwiertów uzupełniających, a dopiero w następnym kroku uwzględnia ją w eksploatacji złoża.

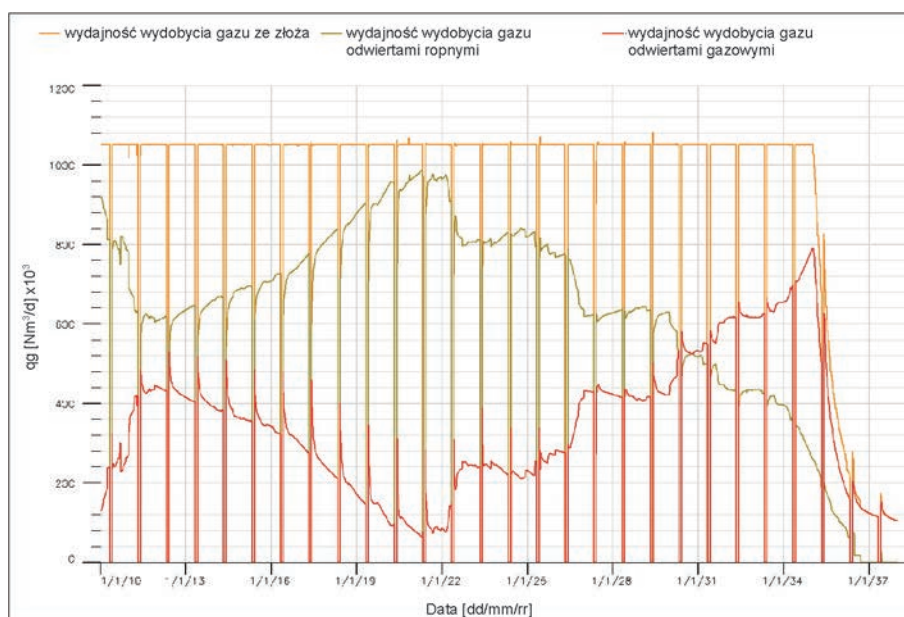
W celu uniknięcia przekroczenia zadanej ilości wydobywania gazu założono limit na jego wydobywanie z całego złoża, natomiast aby ilość gazu wydobywana ze złoża nie była zbyt mała, do wydajności wydobywania gazu grupy odwiertów gazowych dodano stałą wartość – dobraną tak, aby zadana ilość wydobywania gazu ze złoża była zawsze przekroczona. W wyniku tego zawsze zostaje osiągnięty limit na wydobywanie gazu ze złoża, a wydajności wydobywania odwiertów są ograniczane przez symulator tak, aby wydajność wydobywania gazu ze złoża utrzymać na stałym, zadanym poziomie. Niestety tego typu sterowanie wydajnością gazu generuje kolejny błąd: w sytuacji, gdy limit na jego wydobywanie ze złoża jest przekroczony, wówczas symulator redukuje wydajności wydobywania poszczególnych odwiertom. Ograniczenie to dotyczy zarówno odwiertów gazowych jak i ropnych, co z kolei uniemożliwia utrzymanie wydobywania ropy na stałym, zadanym poziomie. Dlatego w następnym kroku ustalono hierarchię pracy poszczególnych odwiertów – w taki sposób, aby symulator podczas uzyskania limitu na wydajność wydobywania gazu ze złoża w pierwszej kolejności ograniczał odwierty gazowe (uzupełniające). W tym celu ustalono udziały w wydobywaniu poszczególnych odwiertów. Odwiertom gazowym zadano udział w wydo-

byciu ze złoża na poziomie tysięcy razy mniejszym niż odwiertom ropnym.

Wyniki symulacji nr I przedstawiono na rysunkach 2-4. Wskazują one, że zamierzony cel jednoczesnego sterowania wydobywaniem ropy i gazu został osiągnięty. Zarówno wydobywanie ropy jak i gazu do 2022 roku utrzymuje się na stałym, zadanym poziomie. Po 2022 r. wydajność wydobywania ropy zaczyna stopniowo spadać (rysunek 2); w wyniku wyłączania z eksploatacji odwiertów ropnych osiągających limit na wykładnik wodny, bądź w wyniku ograniczania wydajności wydobywania ropy odwiertom



Rys. 2. Symulacja I. Wydajności wydobywania ropy ze złoża oraz średnie ciśnienie złożowe

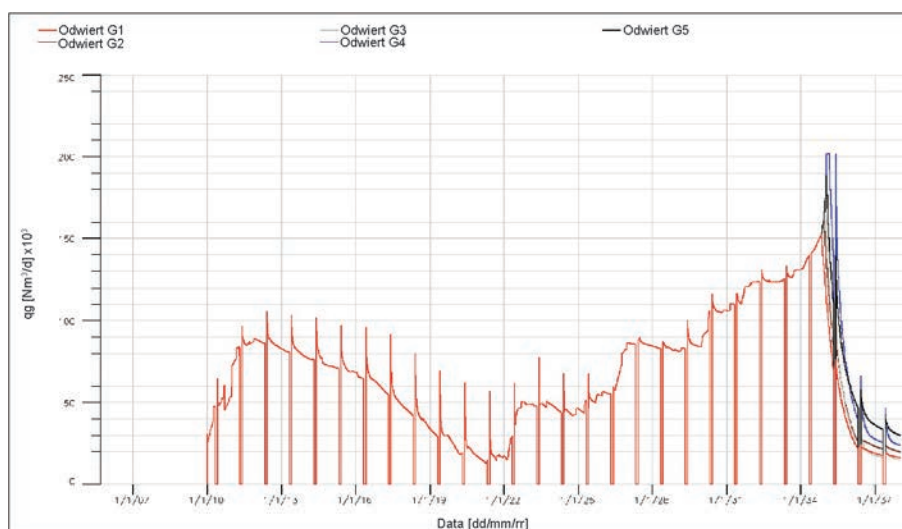


Rys. 3. Symulacja I. Wydajności wydobywania gazu: ze złoża, z grupy odwiertów ropnych oraz z grupy uzupełniających odwiertów gazowych

osiągającym maksymalny dopuszczalny wykładnik gazowy. Wydobycie gazu natomiast utrzymuje się na stałym, zadanym poziomie do około 2035 roku i zaczyna spadać dopiero wtedy, gdy odwierty uzupełniające (gazowe) uzyskują limit na minimalne ciśnienie denne.

W symulacji nr I osiągnięto jednoczesne sterowanie wydobyciem ropy i gazu, lecz bez zachowania innego założenia eksploatacji złoża, dotyczącego kolejności włączenia i wyłączenia odwiertów uzupełniających. Na rysunku 4 widać, że wszystkie odwierty uzupełniające rozpoczynają pracę w tym samym momencie i pracują z taką samą wydajnością z powodu założonego, ich równego udziału w wydobyciu. Faktycznym założeniem operatora złoża, które podano powyżej, jest to aby odwierty uzupełniające włączały się do eksploatacji pojedynczo, w odpowiedniej kolejności. Pierwszy odwiert rozpoczyna wydobycie gazu w momencie, gdy grupa odwiertów ropnych wydobywa ilość gazu mniejszą od zadanej. Następny odwiert powinien włączyć się do pracy dopiero wówczas, gdy jego poprzednik pracuje z maksymalną dozwoloną wydajnością wydobycia gazu, lecz mimo tego wraz z gazem pochodzącym z odwiertów ropnych nie jest w stanie zapewnić zadanego poziomu *plateau*. Aby uwzględnić tego typu pracę odwiertów uzupełniających w następnej symulacji wykorzystano nowe funkcje symulatora, pozwalające na warunkową zmianę zasad eksploatacji poprzez użycie instrukcji ACTIONX, będącej kolejnym mechanizmem sprzężenia zwrotnego udostępnionym w symulatorach ECLIPSE. Instrukcja ta umożliwia użytkownikom symulatora wprowadzanie zmian dotyczących sterowania zarówno pracą całego złoża, jak i poszczególnych odwiertów, które wywoływane są wówczas, gdy zostanie spełniony zadany warunek.

Warunek, po spełnieniu którego mają być wprowadzone zmiany, może być bardzo rozbudowany i może składać się z wielu warunków połączonych ze sobą operatorami logicznymi (np. typu iloczyn lub suma logiczna). Przykładowo: aby pierwszy odwiert gazowy (uzupełniający) rozpoczął swoją pracę dopiero wówczas, gdy suma wydobycia gazu przez odwierty ropne jest niższa od zadanego *plateau*, w kolejnej symulacji użyto następującego „kodu” (ciągu instrukcji):



Rys. 4. Symulacja I. Wydajności wydobycia gazu – odwierty uzupełniające

```
ACTIONX
GPR 100000 0 /
FGPR < 1049000.00 AND /
MNTH != ,MAY' AND /
WGPR ,G1' = 0 /
/
WELOPEN
,G1' ,OPEN' /
/
ENDACTIO
```

W drugiej linijce przedstawionego kodu podano nazwę akcji (GPR – *Gas Production Rate*), którą symulator ma wykonać po spełnieniu zadanego warunku. Obok nazwy podano maksymalną liczbę wywołań omawianej akcji (100000), którą w tym przypadku ustawiono dowolnie dużą – tak, aby warunek był sprawdzany przez cały okres wykonywanej prognozy. Ostatni parametr podany w tej linijce odpowiada za minimalny przedział czasu pomiędzy wywołaniami omawianej akcji. W tym przypadku ustawiono go na 0 – po to, aby akcja była wykonana zawsze gdy warunek jest spełniony, niezależnie od czasu jej poprzedniego wywołania. W kolejnych trzech linijkach przedstawionego kodu zadano warunek, który musi zostać spełniony aby akcja została wykonana. Warunek ten składa się z trzech warunków cząstkowych, połączonych ze sobą iloczynem logicznym AND.

Pierwszy z warunków sprawdza wydajność wydobycia gazu z całego złoża i zostanie spełniony, jeżeli wydajność ta (FGPR – *Field Gas Production Rate*) spadnie poniżej 1,049 mln Nm³/d. W warunku tym użyto minimalnie mniejszej wartości od zadanej wydajności wydobycia gazu, aby wyeliminować sytuację, w której symulator

włącza do eksploatacji odwiert uzupełniający z powodu niestabilności obliczeń (ze względu na złożoność problemu obliczeniowego symulator nie zawsze idealnie utrzymuje zadane limity). Kolejny warunek (MNTH ! = ,MAY') postawiono ze względu na występowanie w symulowanych prognozach całomiesięcznych, majowych stójek podczas eksploatacji złoża. Warunek ten jest konieczny, ponieważ podczas stójki wydajność wydobywania gazu ze złoża jest równa 0, co spełnia pierwszy omówiony warunek. Trzeci z wymienionych warunków (WGR ,G1' = 0) sprawdza, czy pierwszy z odwiertów uzupełniających (odwiert G1) jest wyłączony. Następnie w omawianym kodzie użyto słowa kluczowego WELOPEN, po wywołaniu którego symulator włączy do eksploatacji odwiert G1.

W ten sposób rozwiązano problem włączania do eksploatacji pierwszego odwiertu uzupełniającego wydobywanie gazu. W przypadku włączania do eksploatacji każdego następnego odwiertu uzupełniającego, do omówionych warunków dodano czwarty, który sprawdza wydajność wydobywania gazu odwiertu włączanego poprzednio. Jeśli ze złoża wydobywana jest mniejsza ilość gazu od zadanej, a poprzednio włączony odwiert uzupełniający pracuje ze swoją maksymalną dozwoloną wydajnością, to symulator włącza do eksploatacji kolejny odwiert gazowy. Rozwiązania takie pozwalają symulować włączanie się do eksploatacji kolejnych odwiertów uzupełniających wydobywanie gazu, jeśli wszystkie warunki podane w słowach kluczowych ACTIONX zostaną po kolei spełnione. Aby było to możliwe potrzebna jest jeszcze jedna modyfikacja, dotycząca udziałów w wydobywaniu odwiertów uzupełniających. Udziały poszczególnych odwiertów uzupełniających dobrano tak, aby każdy kolejno włączany odwiert gazowy posiadał udział w wydobywaniu gazu stukrotnie mniejszy od poprzedniego. Takie ustawienie udziałów w wydobywaniu odwiertów uzupełniających zapobiega sytuacji, w której po włączeniu do eksploatacji następnego odwiertów gazowych spadają wydajności wydobywania odwiertów włączonych poprzednio.

Następnym etapem symulowania pracy odwiertów uzupełniających było ustalenie przebiegu ich działania w sytuacji, w której na skutek spadku ciśnienia w złożu rosną wykładniki gazowe w odwiertach ropnych i zmniejsza się zapotrzebowanie na gaz z odwiertów gazowych. Dzięki udziałom ustalonym w powyższy sposób, w pierwszej kolejności symulator będzie ograniczał wydajność wydobywania odwiertu włączanego najpóźniej, jednak odwiert ten nigdy nie zostanie wyłączony. Gdy wydobywanie gazu odwiertami ropnymi nadal będzie się zwiększać to symulator zacznie ograniczać następnego odwiert uzupełniający, a ten poprzedni będzie pracował z bardzo niską wydajnością. Aby temu

zapobiec znów wykorzystano ciąg instrukcji ACTIONX – o nazwie GPR9, z założonymi warunkami, po spełnieniu których symulator ma wywołać akcję zamykającą poszczególne odwierty. Poniżej przedstawiono napisany w pliku wejściowym do symulatora kod zamykający ostatni (piąty) odwiert uzupełniający:

```
ACTIONX
GPR9 100000 0 /
FGPR >= 1050000.00 AND /
WGPR ,G4' < 266400 AND /
WGPR ,G5' > 0.0 /
/
WELOPEN
,G5' ,SHUT' /
/
ENDACTIO
```

W kodzie tym warunek wywołania akcji to iloczyn logiczny trzech warunków, które są odwrotne do warunków podanych podczas włączania odwiertów uzupełniających. Aby ostatnio włączony odwiert został wyłączony, wydobywanie gazu ze złoża musi być równe bądź większe od zadanej wartości *plateau* na wydobywanie gazu, a poprzednio włączony odwiert (w tym przypadku G4) musi pracować z wydajnością niższą niż jej maksymalna dozwolona wartość. Ostatni konieczny i dość oczywisty warunek sprawdza czy odwiert, który ma być wyłączony podczas wykonania tej akcji bierze czynny udział w eksploatacji złoża.

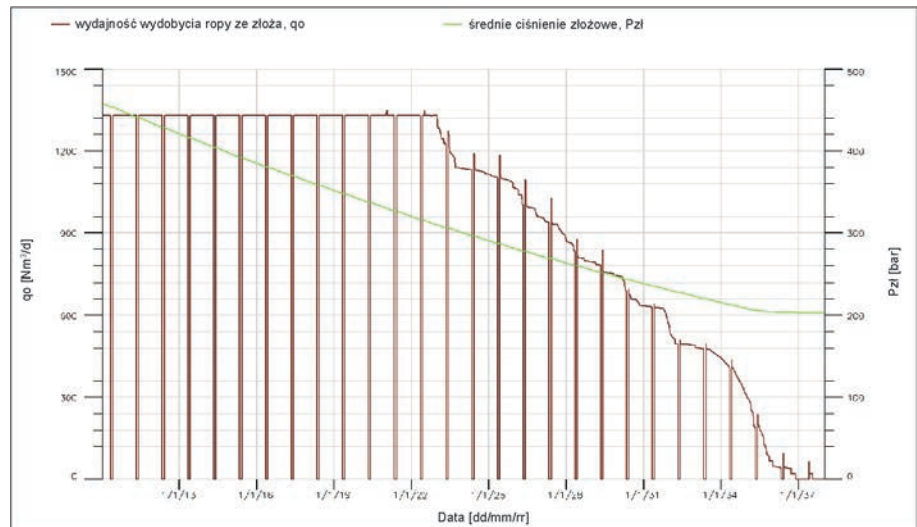
Końcowym etapem tej części zadania było ustalenie warunków pracy odwiertów uzupełniających w przypadku, gdy pod koniec wykonywanej prognozy ciśnienie na spodzie odwiertów osiąga limit minimum i symulator ogranicza im wydajności. W omówionym powyżej przypadku włączania odwiertów gazowych każdy kolejny odwiert uzupełniający jest włączany do eksploatacji wtedy, gdy jego poprzednik (wcześniej włączony odwiert uzupełniający) pracuje ze swoją maksymalną dozwoloną wydajnością wydobywania gazu. Gdy odwiert osiąga limit na minimalne ciśnienie denne, symulator ogranicza jego wydajność i odwiert ten nie ma możliwości pracować z maksymalną wydajnością – w wyniku czego nie zostają spełnione warunki włączenia do eksploatacji kolejnego odwiertu uzupełniającego, co prowadzi do zmniejszenia sumarycznego wydobywania gazu ze złoża. W celu uzyskania poprawnej pracy odwiertów uzupełniających w warunkach limitującego ciśnienia dennego zmodyfikowano omówiony wcześniej kod dotyczący włączania do eksploatacji odwiertu uzupełniającego. Zmianę wprowadzono tylko dla czterech odwiertów uzupełniających – z wykluczeniem pierwszego, ponieważ pierwszy odwiert gazowy jest włączany do eks-

ploatacji zawsze wtedy, gdy grupa odwiertów ropnych produkuje zbyt mało gazu, natomiast włączanie następnych odwiertów uzupełniających wydobycie gazu zależy od pracy ich poprzedników. Poniżej przedstawiono zmodyfikowany kod typu ACTIONX o nazwie GPR2, włączający do eksploatacji drugi odwiert gazowy:

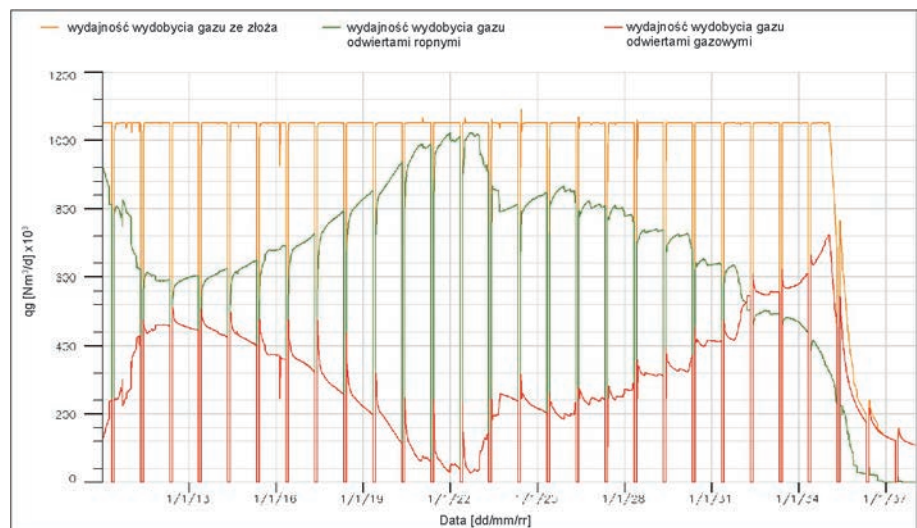
```
ACTIONX
GPR2 100000 0 /
(FGPR < 1049000.00 AND /
MNTN != ,MAY' AND /
WGPR ,G1' = 244800 AND /
WGPR ,G2' = 0) OR /
(FGPR < 1049000.00 AND /
MNTN != ,MAY' AND /
WGPR ,G1' < 244800 AND /
WBHP ,G1' = 200.0 AND /
WGPR ,G2' = 0) /
/
WELOPEN
'G2' 'OPEN' /
/
ENDACTIO
```

Warunek przedstawiony w powyższym kodzie umożliwia włączenie do eksploatacji odwiertu uzupełniającego G2 w dwóch przypadkach: pierwszy dotyczy sytuacji opisaną wcześniej, gdy symulator włączy odwiert G2 po tym, jak jego poprzednik (odwiert G1) będzie pracował z maksymalną dozwoloną wydajnością, a wydobycie gazu ze złoża będzie niższe od zadanego, natomiast drugi przypadek dotyczy sytuacji, w której wydobycie gazu ze złoża jest niższe od zadanego, a odwiert G1 pracuje z ograniczoną przez symulator wydajnością wydobycia gazu, związaną z osiągnięciem limitu na minimalne ciśnienie denne.

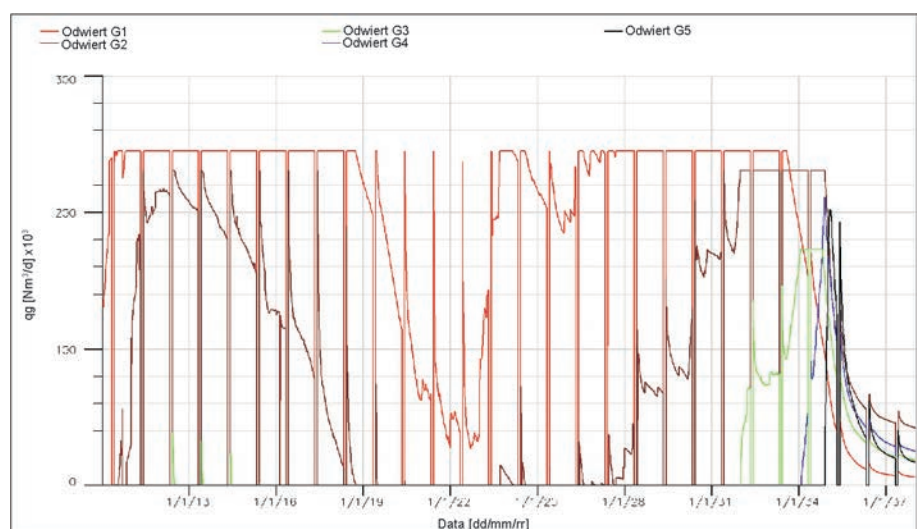
Wyniki symulacji nr II uwzględniającej prawidłową pracę odwiertów uzupełniających przedstawiono na rysunkach 5-7. Podobnie jak w symulacji I, cel



Rys. 5. Symulacja II. Wydajności wydobycia ropy ze złoża oraz średnie ciśnienie złożowe



Rys. 6. Symulacja II. Wydajności wydobycia gazu: ze złoża, z grupy odwiertów ropnych oraz z grupy odwiertów gazowych



Rys. 7. Symulacja II. Wydajności wydobycia gazu – odwierty uzupełniające

jednoczesnego sterowania wydobyciem ropy i gazu został osiągnięty.

W odróżnieniu od symulacji I, w niniejszej symulacji odwierty uzupełniające pracują w odpowiedniej, wymaganej przez operatora kolejności (rysunek 7). Od początku gaz wydobywany jest przez odwiert G1. Z chwilą osiągnięcia przez niego maksymalnej wydajności dozwolonej dla wydobycia gazu rozpoczyna swoją pracę odwiert G2. Odwierty te razem z odwiertami ropnymi realizują zaleźny limit na wydobycie gazu. Pod koniec 2018 roku na skutek wzrostu wykładników gazowych, a więc wzrostu wydobycia gazu w odwiertach ropnych, odwiert G2 zostaje wyłączony, natomiast G1 ogranicza swoją wydajność. W dalszej kolejności, na skutek wypadania z produkcji odwiertów ropnych, a więc ograniczonego wydobycia przez nie gazu, obserwuje się powrót do jego wydobycia uzupełniającymi odwiertami gazowymi: najpierw odwiertem G2 – od połowy 2023 roku, a później następnymi odwiertami: G3 – od 2031 roku, G4 – od początku 2034 roku oraz G5 – pod koniec 2035 roku.

Sterowanie jakością gazu odbieranego z PMG

Kolejnym problemem występującym podczas wykonywania symulacji złożowych jest sterowanie jakością gazu odbieranego z podziemnego magazynu gazu [3]. Problem ten pojawia się wówczas, gdy gaz buforowy jest mocno zanieczyszczony (np. zawiera znaczną domieszkę azotu) lub w całości składa się z gazu niewęglowodorowego (np. bufor z CO₂). Podczas pracy każdego podziemnego magazynu gazu występuje zjawisko mieszania się zatłaczanego gazu wysokometanowego z gazem buforowym, w wyniku czego zazwyczaj jakość gazu odbieranego z magazynu jest niższa od jakości gazu do niego zatłaczanego. W rzeczywistości operator obsługujący PMG stara się odbierać gaz o jak najwyższej jakości, którego zanieczyszczenie nie przekracza pewnej zadanej koncentracji. W tym celu odpowiednio dobiera się udział poszczególnych odwiertów w odbiorze całkowitego strumienia gazu. W standardowych symulatorach typu ECLIPSE przy użyciu typowo dostępnych opcji sterowania nie można uzależnić odbioru gazu z magazynu od zawartości jego wybranego składnika.

W niniejszej części pracy podjęto próbę rozwiązania tego problemu przy użyciu udostępnionych ostatnio w symulatorach mechanizmów sprzężenia zwrotnego. Ogólny schemat przyjętego rozwiązania przedstawiono na rysunku 8. Szczegółowy opis jest bardziej złożony i zamieszczono go w dalszej części opracowania.

Do rozwiązania tego problemu wybrano model symulacyjny przykładowego podziemnego magazynu gazu,

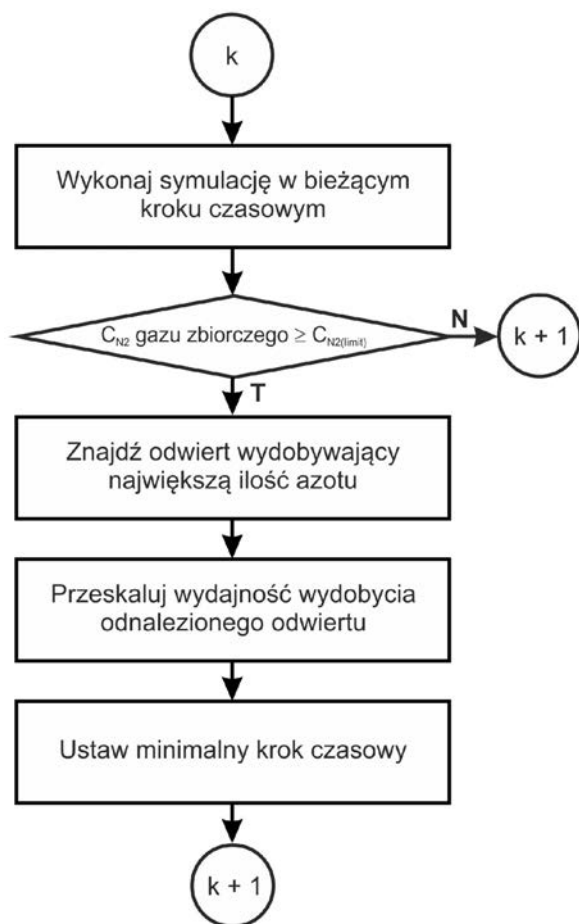
Każdy kolejny odwiert rozpoczyna eksploatację po osiągnięciu limitu na wydobycie gazu przez odwiert poprzedni.

Poprawne sterowanie odwiertami uzupełniającymi korzystnie wpłynęło na sumaryczne wydobycie ropy ze złoża (rysunek 5) – w symulacji II zadany poziom *plateau* został utrzymany o ponad rok dłużej niż w symulacji I. W pierwszym podejściu odwierty uzupełniające po włączeniu się do eksploatacji pracowały z identycznymi wydajnościami wydobycia gazu i do końca symulowanego okresu nie zostały wyłączone – co spowodowało obniżenie wydajności wydobycia odwiertów ropnych. Wydobycie gazu w obu omawianych symulacjach jest porównywalne, ponieważ w obu tych przypadkach spadek wydajności jego wydobycia ze złoża zależy od ciśnienia na spodzie odwiertów uzupełniających. Mimo że czas osiągnięcia limitu na minimalne ciśnienie denne przez poszczególne odwierty uzupełniające w obu symulacjach jest różny, to różnica ta jest zbyt mała, by mogła w znaczący sposób wpłynąć na wydobycie gazu ze złoża.

którego buforem jest gaz rodzimy (gaz znajdujący się w strukturze przed jej konwersją na PMG), zawierający w swoim składzie wysoką koncentrację azotu (29,6%). Symulacje wykonane w ramach tej części opracowania obejmują jeden pełny cykl pracy przykładowego magazynu (fazę zatłaczania oraz fazę odbioru). Omawiany problem sterowania dotyczy fazy odbioru gazu z magazynu, dlatego wszystkie założenia dotyczące fazy zatłaczania przyjęto tak jak w innych symulacjach prognostycznych wybranego PMG. Podczas trwania tej fazy (tj. od 15 kwietnia do 15 listopada) do magazynu zatłaczane jest 550 mln Nm³ gazu wysokometanowego, ze stałą wydajnością na poziomie 2,675 mln Nm³/d, natomiast w fazie odbioru gazu z magazynu, która rozpoczyna się 25 listopada, a kończy 31 marca następnego roku, założono *plateau* na poziomie 3,9 mln Nm³/d. Podczas trwania tej fazy musi być spełniony również warunek jakości odbieranego gazu.

Akceptowane przez operatora magazynu zanieczyszczenie odbieranego, zbiorczego gazu (zawartość składników niewęglowodorowych zdominowanych przez azot) nie może przekroczyć $C_{N2_{(limit)}} = 5\%$ koncentracji. Gdy jednak zadany limit zostaje przekroczony, wówczas należy obniżyć wydajność odwiertu z najwyższą koncentracją azotu w odbieranym gazie.

Założenie dotyczące jakości odbieranego gazu zbiorczego nie może zostać zrealizowane bez użycia udostępnionych w symulatorze mechanizmów sprzężenia zwrotnego.



Rys. 8. Schemat procedury sterowania jakością odbieranego gazu

W celu rozwiązania omawianego problemu użyto instrukcji ACTIONX oraz zmiennych użytkownika UDQ. Ponieważ w symulatorze niemożliwe jest bezpośrednie odnalezienie odwiertu odbierającego najbardziej zanieczyszczony gaz, zatem najpierw zdefiniowano zmienną odpowiadającą za odnalezienie wśród wszystkich odwiertów tego o najwyższej wydajności odbieranego azotu:

```
UDQ
DEFINE FUWORSTW MAX(WCGPR_1 ,O*') /
/
```

W drugiej linijce powyższego kodu na pierwszym miejscu znajduje się instrukcja definiująca zmienną. Następny parametr to nazwa definiowanej zmiennej, a obok nazwy – funkcja, której wartość przypisywana jest zmiennej w każdym kroku czasowym symulacji. Zadana funkcja wyszukuje maksymalną wydajność odbioru (WCGPR) odpowiedniego komponentu odbieranego gazu (w tym przypadku składnik nr 1: azot) z spośród wszystkich odwiertów, których nazwy rozpoczynają się od litery O. Zatem aby wartość zdefiniowanej zmiennej była liczona prawidłowo, nazwy wszystkich odwiertów biorących udział w odbiorze

muszą zaczynać się na tę właśnie literę. Z tego powodu we wszystkich omówionych w tym rozdziale symulacjach odwierty zdefiniowano jako: O-1, O-2 ... O-16.

Następnym krokiem rozwiązywania problemu było zdefiniowanie zmiennych odpowiadających wydajnościom odbioru gazu przez poszczególne odwierty. W pierwszym kroku symulacji odwierty odbierają gaz z magazynu według zadanych udziałów odbioru, natomiast w następnych krokach symulacji odwierty te mogą pracować z ograniczonymi wydajnościami (jeśli zostanie osiągnięty limit na dopuszczalne zanieczyszczenie odbieranego gazu). Dlatego wydajności odbioru gazu z odwiertów zadeklarowano przy pomocy zmiennych użytkownika, którym przypisano wartości początkowe na poziomie wydajności obliczonych z udziałów w odbiorze poszczególnych odwiertów.

Po zdefiniowaniu i określeniu początkowych wydajności odbioru gazu dla wszystkich odwiertów, zdefiniowano akcję umożliwiającą ograniczenie wydajności odbioru gazu odwiertowi z najwyższą koncentracją azotu. Ponieważ bezpośrednie odnalezienie tego odwiertu jest niemożliwe, dlatego omawianą akcję napisano oddzielnie dla każdego z odwiertów biorących udział w fazie odbioru gazu. Poniżej przedstawiono przykładowy zbiór instrukcji umożliwiających ograniczenie wydajności odbioru gazu odwiertowi O-2:

```
ACTIONX
ACTW2 1000 0 /
FZMF_1 ,>=' 0.05 AND /
WCGPR_1 ,O-2' = FUWORSTW /
/
UDQ
DEFINE FUO2 FUO2OLD*0.5 /
/
NEXTSTEP
0,0001 /
ENDACTIO
```

Omawiana akcja, o nazwie ACTW2, będzie wykonana wówczas, gdy zostaną spełnione dwa warunki: pierwszy z nich sprawdza koncentrację azotu w odbieranym gazie zbiorczym (FZMF_1 ,>=' 0.05), natomiast drugi warunek (WCGPR_1 ,O-2' = FUWORSTW) kontroluje, czy odwiert O-2 odbiera azot z wydajnością najwyższą spośród wszystkich odwiertów. Jak można zauważyć, w warunku drugim wykorzystano wprowadzoną wcześniej zmienną użytkownika o nazwie FUWORSTW, której wartość odpowiada najwyższej wydajności odbieranego azotu z spośród wszystkich odwiertów biorących udział w fazie odbioru. Gdy oba te warunki zostaną spełnione symulator zmieni wydajność odwiertu O-2 według wzoru:

$$\text{nowa wydajność odbioru gazu} = \text{obecna wydajność odbioru gazu} \times K$$

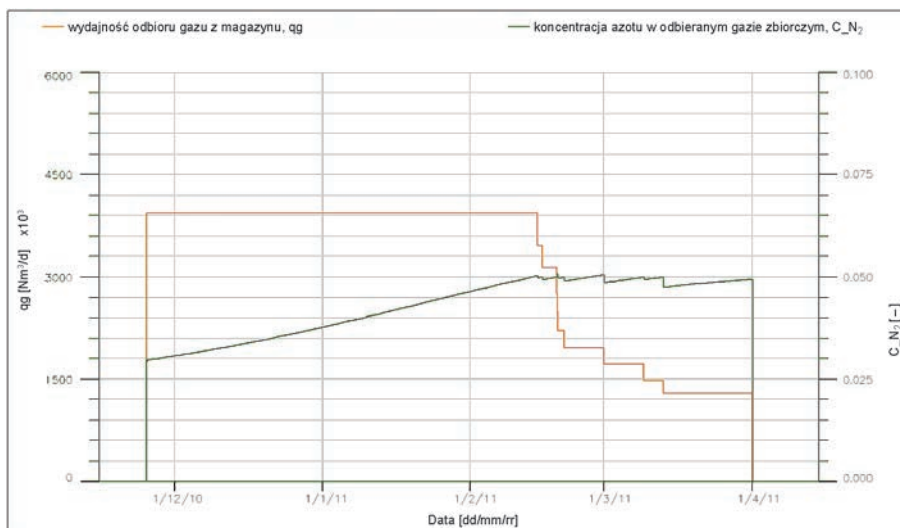
Podana w tym wzorze stała K odpowiada czynnikowi skalującemu bieżącą wydajność odbioru gazu przez odwiert i powinna mieścić się w przedziale od 0 do 1.

W przedstawionym na poprzedniej stronie zbiorze instrukcji omówionemu wzorowi odpowiada deklaracja zmiennej użytkownika UDQ, w której FUDQ2 to nowa wydajność odbioru gazu, FUDQ2OLD to bieżąca wydajność odbioru gazu, a liczba 0.5 to czynnik skalujący K . Instrukcja NEXTSTEP umożliwia określenie długości następnego kroku czasowego wykonywanego przez symulator. W omawianym przykładzie instrukcji tej użyto w celu uzyskania jak najkrótszego kroku czasowego po wywołaniu akcji ograniczającej wydajność odbioru danego odwiertu, dla uzyskania „natychmiastowej” zmiany jego wydajności odbioru gazu.

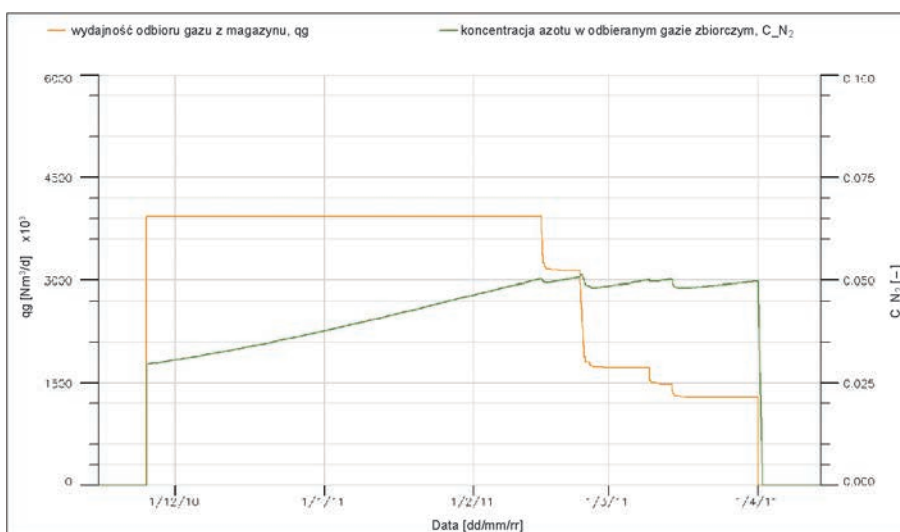
Po odpowiednim zdefiniowaniu wszystkich omówionych wcześniej zmiennych użytkownika oraz akcji dotyczących poszczególnych odwiertów, wykonano kilka symulacji, różniących się od siebie czynnikiem skalującym wydajności odbioru gazu poszczególnych odwiertów. Na rysunkach 9-11 przedstawiono wyniki trzech symulacji, o nazwach kolejno: wariant I, II i III. We wszystkich tych symulacjach uzyskano zamierzony cel sterowania jakością odbieranego gazu. W wariantie I czynnikiem skalującym wydajności odbioru odwiertów przypisano wartość 0. W praktyce oznacza to, że po uzyskaniu 5-procentowej zawartości azotu w odbieranym gazie zbiorczym odwiert produkujący największą ilość azotu zostaje całkowicie wyłączony z odbioru. Na rysunku 9, przedstawiającym wydajność odbioru gazu z magazynu oraz zawartość azotu w odbieranym gazie zbiorczym, widać, że zadane plateau wydobywania jest utrzymane do połowy lutego 2011 r. Następnie zawartość azotu w odbieranym

gazie zbiorczym przekracza 5% i odwiert wydobywający największą ilość azotu zostaje wyłączony z eksploatacji. Każdy stopniowy spadek wydajności odbioru gazu z magazynu, widoczny na omawianym rysunku, odpowiada wypadnięciu z eksploatacji kolejnego odwiertu.

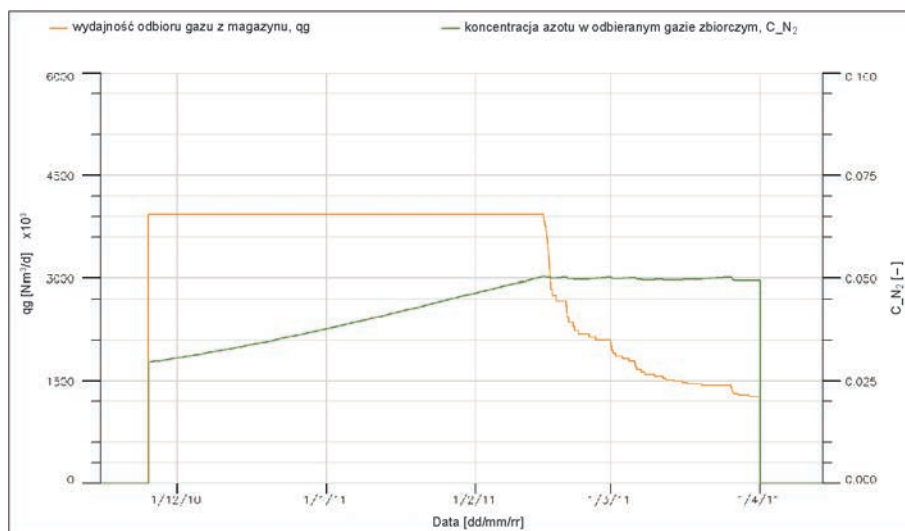
W następnym wariantcie czynnik skalujący wydajności odbioru dla odwiertów ustawiono na poziomie 0,5. Jeśli zanieczyszczenie odbieranego gazu zbiorczego przekroczy zadany limit to wydajność odbioru gazu odwiertu wydobywającego największą ilość azotu zostanie dwukrotnie zmniejszona. Uzyskane wyniki dla wariantu II przedstawiono na rysunku 10, który pokazuje, że czas trwania plateau w stosunku do wariantu I nie uległ zmianie i pierwsze ograniczenie wydajności rozpocznie się w połowie lutego 2011 r. W porównaniu z wariantem I,



Rys. 9. Wydajność odbioru gazu z magazynu oraz koncentracja azotu w odbieranym gazie zbiorczym – wariant I



Rys. 10. Wydajność odbioru gazu z magazynu oraz koncentracja azotu w odbieranym gazie zbiorczym – wariant II



Rys. 11. Wydajność odbioru gazu z magazynu oraz koncentracja azotu w odbieranym gazie zbiorczym – wariant III

omawiane wyniki wariantu II charakteryzują się przede wszystkim dłuższą pracą poszczególnych odwiertów. Ograniczanie wydajności odwiertom (zamiast ich całkowitego wyłączenia z eksploatacji) powoduje łagodniejszy spadek wydajności odbioru gazu z magazynu, co przekłada się na zwiększenie sumarycznego odbioru surowca o prawie 3,6 mln Nm³.

wysokimi wydajnościami, utrzymując przy tym zanieczyszczenie odbieranego gazu zbiorczego na stałym poziomie.

Podsumowując, należy stwierdzić, że użycie przedstawionej metody automatycznego sterowania pracą odwiertów zapewnia skuteczną realizację warunków na jakość odbioru gazu oraz pozwala zbadać szczegółowe efekty różnych sposobów jej zastosowania.

Podsumowanie i wnioski

W pracy sformułowano zagadnienia z zakresu symulacji procesów eksploatacji złóż naftowych i podziemnych magazynów gazu, wymagających zastosowania sterowania z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego. Do zagadnień tych zaliczono:

- sterowanie równoczesnym wydobywaniem ropy naftowej i gazu ziemnego ze złoża ropno-gazowego,
- sterowanie odbiorem gazu ziemnego z podziemnych magazynów gazu, zapewniającym uzyskanie surowca o określonej jakości,
- sterowanie procesem wytwarzania podziemnych magazynów gazu, pod kątem wytworzenia optymalnego buforu z gazu niewęglowodorowego.

W niniejszej części pracy przedstawiono zagadnienia (a) i (b), które analizowano na przykładzie realistycznych złóż i podziemnych magazynów gazu w Polsce.

Do rozwiązania tych zagadnień zastosowano najnowsze opcje i możliwości symulatorów złożowych; w szczególności wykorzystano możliwości definiowania wielkości pomocniczych, wykonywania operacji logiczno-arytmetycznych oraz ich używania do sterowania procesami eksploatacji w schemacie sprzężenia zwrotnego. Wielkości te pozwoliły określić zmiany istotnych parametrów kontrolnych, ich odstępstwo od zadanych warunków eksploatacji, a także ilościowe modyfikacje wielkości bezpośrednio odpowiedzialnych za symulowany proces eksploatacji.

Możliwość wielokrotnego użycia powyższego schematu pozwoliła w efektywny sposób zrealizować sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym, a w konsekwencji – spełnić złożone warunki eksploatacji złóż i podziemnych magazynów gazu.

Artykuł nadesłano do Redakcji 2.11.2011 r. Przyjęto do druku 8.11.2011 r.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Eclipse 300 v. 2010.1, firmy GeoQuest (Schlumberger).
 [2] W. Szott i zespół: *Prognozowanie efektywności wybranych metod wtórnych z wykorzystaniem wieloskładnikowego modelu symulacyjnego złoża BMB*. INiG O/Krosno, marzec 2011.
 [3] W. Szott i zespół: *Aktualizacja symulacyjnego modelu złożowego PMG Wierzchowice oraz jego kalibracja dla potrzeb prognozowania i optymalizacji pracy magazynu*. INiG O/Krosno, grudzień 2010.



Dr Wiesław SZOTT – absolwent Uniwersytetu Jagiellońskiego i Texas A&M University. Założyciel i kierownik Zakładu Symulacji Złóż Węglowodorów i PMG w Instytucie Nafty i Gazu, Oddział w Krośnie. Od ponad 20 lat zajmuje się problematyką modelowania i symulacji złożowych. Autor przeszło 30 prac naukowych i licznych opracowań, głównie z zakresu powyższej tematyki.



Mgr inż. Andrzej GOŁĘBEK – absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Od 2008 roku pracownik Zakładu Symulacji Złóż Węglowodorów i PMG Instytutu Nafty i Gazu Oddział Krosno. Zajmuje się różnorodnymi zagadnieniami z zakresu symulacji złóż i informatyki.

ZAKŁAD SYMULACJI ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW I PMG

- sporządzanie ilościowych charakterystyk złóż naftowych (konstruowanie map cyfrowych dla podstawowych wielkości złożowych);
- analizy geostatystyczne dla potrzeb projektowania modeli złóż naftowych, w tym PMG i obliczeń wolumetrycznych wielowymiarowych i wielofazowych;
- konstruowanie kompletnych symulacyjnych modeli złóż;
- wszechstronne badania symulacyjne dla potrzeb:
 - » weryfikacji zasobów płynów złożowych,
 - » wtórnych metod zwiększania wydobywania (zatlaczanie gazu lub wody, procesy WAG, procesy wypierania mieszającego, oddziaływanie chemiczne),
 - » optymalizacji rozwiercania i udostępniania złóż,
 - » prognozowania złożowych i hydraulicznych (w tym termalnych) charakterystyk odwiertów (w szczególności poziomych) dla celów optymalnego ich projektowania,
 - » sekwestracji CO₂;
- projektowanie, realizacja i wdrażanie systemów baz danych dla potrzeb górnictwa naftowego.

Kierownik: dr Wiesław Szott

Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno

Telefon: 13 436-89-41 w. 104

Faks: 13 436-79-71

E-mail: wieslaw.szott@inig.pl

