

Tadeusz Kwilosz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Szacowanie niepewności wyliczenia zasobów gazu w PMG w jednostkach energii

W prezentowanej pracy opisano metodę wyliczenia ilości gazu zgromadzonego w buforze pierwotnym, buforze dotłoczonem i w aktualnej (ustalanej dla konkretnej doby magazynowej) pojemności czynnej dla podziemnych magazynów zlokalizowanych w wysokometanowych złożach szcerpanych. Dla każdej tak wyliczonej wartości dokonano oszacowania niepewności uzyskanego wyniku.

Słowa kluczowe: podziemny magazyn gazu, jednostki energii, szacowanie.

Estimation of the uncertainty in the calculation of UGS gas resources in energy units

In the presented article describes a method of calculating the amount of gas accumulated in the primary buffer, the secondary buffer and working capacity (specified for the selected day storage) of underground storage fields located in high-methane depleted reservoirs. For each, such calculated value, an estimation of the uncertainty of the results was performed.

Key words: Underground Gas Storage, energy units, estimation.

Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie powstało w odpowiedzi na zapotrzebowanie oszacowania ilości gazu zgromadzonego w podziemnych magazynach, wyrażonej w jednostkach energii. Dotychczas wszystkie rozliczenia przepływów gazu do/z podziemnych magazynów były wykonywane w jednostkach objętościowych. W związku z tym cały system pomiarowy podziemnych magazynów gazu (PMG): Wierchowice, Husów, Strachocina, Swarzów, Brzeźnica, a także kawernowego podziemnego magazynu gazu (KPMG) Mogilno ustawiony był na potrzeby rejestrowania głównie danych objętościowych [4]. Pomiaru składu gazu (kaloryczności) były wykonywane sporadycznie w celach kontrolnych. Podstawą do rozliczeń gazu w jednostkach energetycznych jest pomiar ciepła spalania gazu suchego (*csgs*). Najstarsze magazyny gazu zlokalizowane na południu Polski (Swarzów i Brzeźnica) są eksploatowane, począwszy od 1979 roku [2]. Niestety, pomimo bardzo długiej eksploatacji ww. magazynów, ilość dostępnych dobowych pomiarów

csgs jest niewielka. Najwięcej pomiarów *csgs* wykonano dla magazynów: Husów, Mogilno i Wierchowice (ponad tysiąc), najmniej dla magazynu Brzeźnica (kilkadziesiąt). Magazyn Brzeźnica jako jedyny do dzisiaj nie został wyposażony w chromatograf. Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania, oszacowanie niepewności dla wyliczonych wartości ilości gazu wyrażonych w jednostkach energii stało się ważnym elementem przeprowadzenia całej procedury. W przedmiotowym opracowaniu zaprezentowano metodę wyliczenia ilości gazu zgromadzonego w buforze pierwotnym, buforze dotłoczonem i w aktualnej (ustalanej na konkretną dobę magazynową) pojemności czynnej dla podziemnych magazynów zlokalizowanych w wysokometanowych złożach szcerpanych. Dla każdej tak wyliczonej wartości dokonano oszacowania niepewności uzyskanego wyniku. Posłużono się przykładami obliczeniowymi wykonanymi dla jednego magazynu zlokalizowanego w złożu wysokometanowym.

Szacowanie w jednostkach energii pojemności PMG utworzonych w szcerpanych złożach gazu wysokometanowego

Zastosowana metoda dotyczyć będzie postępowania z magazynami gazu utworzonymi w złożach szcerpanych gazu ziemnego zawierających tzw. gaz rodzimy wysokometanowy. Tego typu magazyny gazu występują na południu Polski. W pierwszej kolejności należy dokonać oszacowania, w jednostkach energii, ilości gazu pozostawionego w złożu po zakończeniu jego eksploatacji, jako początkowej wielkości bufora przyszłego PMG. Wielkość tę będziemy nazywać buforem pierwotnym. Często w trakcie magazynowania gazu dokonywane jest pomniejszenie lub powiększenie jego części buforowej poprzez decyzje administracyjne związane z przekwalifikowaniem części gazu znajdującego się w pojemności czynnej do pojemności buforowej lub na odwrót. Po przeprowadzeniu ostatniej procedury przepisanego gazu do bufora dysponujemy

aktualną bilansową wielkością – wyrażoną w jednostkach objętościowych – tak uzyskanej części bufora, którą nazywać będziemy buforem dotłoczonym. Dokonano odrębnego oszacowania ilości gazu w jednostkach energii obydwu części bufora PMG. Kolejny etap omawianego procesu polegał na przeprowadzeniu tzw. bilansu otwarcia dla pojemności czynnej i bilansowania ilości gazu wyrażonego w jednostkach energii poprzez dodawanie i odejmowanie wartości wyliczonych na podstawie dobowych pomiarów objętości i ciepła spalania.

Odrębną kwestią jest oszacowanie niepewności u dla wszystkich trzech wyliczonych wartości. W treści całego artykułu pod pojęciem niepewności należy rozumieć niepewność standardową. Ze względu na wybór metod szacowania – jest to niepewność maksymalna.

Szacowanie ilości gazu w buforze pierwotnym w jednostkach energii

Obserwując strategię eksploatacji PMG w Polsce, można zauważyć, że w pierwszych rocznych cyklach pracy tych obiektów nie odbierano gazu zaliczanego do pojemności czynnej w stu procentach. Intensywne wyeksploatowanie złóż przeznaczonych do budowy magazynów gazu (szczególnie na południu kraju) zmuszało operatorów PMG do pozostawiania w magazynie sporych części gazu zatłoczonego w poprzednich fazach zatłaczania, w celu wytworzenia projektowanej wielkości bufora. W związku z tym istnieje nisko prawdopodobieństwo tego, że występujące na granicy bufora pierwotnego i pojemności czynnej partie gazu z obydwu części (które uległy zmieszaniu) zostały odebrane i opuściły magazyn. Można zatem założyć, że oszacowana na tym etapie ilość gazu, wyrażona w jednostkach energii i przypisana pojemności związanej z buforem pierwotnym, pozostała w PMG.

W ramach oszacowania ilości gazu w jednostkach energii dla bufora pierwotnego $E_{V_{bp}}$ dokonano przeglądu wszystkich analiz składu chemicznego gazu wykonanych w okresie eksploatacji złoża i na ich podstawie, dla każdej analizy, wyliczono wartość ciepła spalania gazu suchego, opierając się na normie PN-ISO 6967:2008. Obliczone wartości (po wcześniejszej ich ocenie) posłużyły do wygenerowania statystycznego rozkładu prawdopodobieństwa, jakiemu podlegają pomiary $csgs$ w okresie eksploatacji złoża. W tym celu dokonano próby rozpoznania rozkładu, któremu podlega badana wielkość. Naturalnym podejściem dla tego typu zjawisk masowych jest założenie, że wykonane pomiary podlegają statystycznemu rozkładowi zgodnemu z rozkładem normalnym. Aby to potwierdzić (lub wykluczyć), wykonano

test normalności rozkładu *W-Shapiro-Wilka*. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach (także dla prezentowanego przykładu PMG) wyliczone statystyki potwierdziły zasadność dopasowania wyników badań do rozkładu zgodnego z rozkładem normalnym.

Na podstawie znanej (oszacowanej i zatwierdzonej decyzją administracyjną) ilości gazu pozostawionego w złożu po zakończeniu eksploatacji w jednostkach objętościowych V_{bp} oraz znanych parametrów rozkładu prawdopodobieństwa wartości $csgs$ ($csgs_{sr}$ – średnia wartość ciepła spalania gazu suchego, $S(csgs_{sr})$ – odchylenie standardowe – parametrów rozkładu normalnego) dokonano oszacowania ilości gazu w jednostkach energii, posługując się wzorem:

$$E_{V_{bp}} = V_{bp} \cdot csgs_{sr} / k$$

gdzie: $k = 0,0036$ jest stałą wynikającą z przeliczenia jednostek ciepła spalania (MJ/m^3 na kWh/m^3).

W tym miejscu należało dokonać oszacowania niepewności $u(E_{V_{bp}})$ wyliczonej wartości $E_{V_{bp}}$. Na szacowaną wartość niepewności wpływ mają: niepewność związana z wyliczeniem kaloryczności gazu oraz niepewność związana z wyliczeniem zasobów geologicznych złoża i wielkości bufora pierwotnego, wyrażonych w jednostkach objętościowych. Dokonano analizy informacji (źródeł) mających wpływ na wartość szacowanej niepewności oraz wybór metody szacowania. W trakcie analizy danych związanych z wyznaczeniem kaloryczności gazu w złożu pierwotnym, dostępnych do realizacji oszacowania tej części bufora, natrafiono na pewne utrudnienia związane z:

- małą liczbą analiz gazu wykonanych w trakcie pracy złóż,
- małą precyzją wynikającą z oznaczania składników gazu (w wielu przypadkach oznaczono tylko węglowodory od CH_4 do C_4H_{10} , innych składników energetycznych w ogóle nie oznaczono),
- nieprecyzyjnymi pomiarami (niedokładne urządzenia pomiarowe), co sprawiło, że niektóre pomiary nienaturalnie odbiegały od pozostałych.

W przypadku oszacowania niepewności związanej z wyliczeniem wielkości bufora pierwotnego w jednostkach objętościowych należy się spodziewać niepewności wnoszonej w trakcie oszacowania pierwotnych zasobów geologicznych metodą bilansu masowego oraz niepewności związanej z wyliczeniem ilości wydobytego gazu ze złoża w trakcie jego eksploatacji [2].

Biorąc pod uwagę opisane wyżej uwarunkowania, wybrano mieszaną metodę obliczania niepewności. Tam, gdzie było to możliwe, zastosowano metodę typu A, polegającą na obliczeniach na drodze analizy statystycznej wyników pomiarów. W pozostałych przypadkach wykorzystano metodę typu B, czyli metodę obliczania innymi sposobami niż analiza statystyczna serii pomiarowej. Metoda ta oparta jest na wiedzy i naukowym osądzie eksperymentatora biorącego pod uwagę dostępne informacje (wiedza o przyrządach pomiarowych, specyfice wykonywanych pomiarów itp.).

W przypadku wykrycia pomiarów składu gazu wyraźnie odbiegających od pozostałych były one pomijane w dalszej analizie. W sytuacji pomiarów składu gazu, w których nie oznaczono węglowodorów powyżej butanu oraz innych składników energetycznych, gdzie dodatkowo suma objętościowa oznaczonych składników była poniżej 100%, istniało podejrzenie, że obliczone na ich podstawie wartości $csgs$ będą systematycznie zaniżane. W związku z tym określono, jaka jest korelacja wartości energetycznej pominiętych składników gazu z sumą objętościową składników oznaczonych dla typowego złoża wysokometanowego z południa Polski (w tym przypadku złoża Husów). Na tej podstawie obliczono brakujące wartości $csgs$ pochodzące od składników nieoznaczonych.

Dla rozpatrywanego w tym opracowaniu przykładowego PMG z okresu eksploatacji złoża dysponujemy 35 pomiarami składu gazu. Niestety dla niektórych próbek oznaczono objętości węglowodorów od CH_4 do C_4H_{10} . Dla pozostałych próbek zbadano korelację liniową pomiędzy objętością pierwszych czterech węglowodorów a kalorycznością reszty składników gazu. Dopasowano funkcję korelacyjną w postaci:

$$csgs_reszty(x) = -0,0497x + 5,0403$$

gdzie: $csgs_reszty$ to kaloryczność reszty składników gazu, a x jest procentem objętości pierwszych czterech węglowodorów.

Dokonano analizy wyników i stwierdzono, że $csgs$ dla 3 próbek odbiega istotnie od pozostałych. Próbki te pominięto w dalszej analizie. Dla pozostałych 32 próbek przeprowadzono test normalności rozkładu *W-Shapiro-Wilka*. Wyliczona wartość krytyczna testu $W = 0,977$ jest większa od wartości krytycznej $W_{32}(0,01) = 0,910$. Zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że wyniki pomiarów $csgs$ pochodzą z rozkładu normalnego. Obliczono parametry tego rozkładu $csgs_{sr} = 40,292 \text{ MJ/m}^3$ oraz $S(csgs_{sr}) = 0,466 \text{ MJ/m}^3$. Przyjmując $V_{bp} = 318\,100 \text{ tys. m}^3$, obliczono $E_{V_{bp}} = 3\,560\,245\,889 \text{ kWh}$.

Pierwszy składnik u_E obliczanej niepewności oszacowania ilości gazu $E_{V_{bp}}$ jest równy wyliczonemu odchyleniu standardowemu średniej:

$$u_E = S(csgs_{sr}) = 0,466 \text{ MJ/m}^3$$

Pozostaje oszacować drugi składnik U_V związany z niepewnością oszacowania bufora pierwotnego. Na tę wartość wpływ mają: niepewność oszacowania geologicznych zasobów złoża u_{V1} oraz niepewność oszacowania ilości wydobytego gazu w trakcie eksploatacji złoża u_{V2} . Zasoby geologiczne rozpatrywanego złoża zostały oszacowane metodą bilansu masowego i wynoszą $V_g = 4\,671\,200 \text{ tys. m}^3$. Złóże to pracowało w wolumetrycznym systemie energetycznym (bez aktywności akifera). Zgodnie z metodyką (bilansu masowego) szacowania zasobów dla tego typu złóż, zasoby geologiczne zostały oszacowane na podstawie korelacji liniowej narastających wartości wydobywania Q z wartościami pewnej funkcji V_{poz} , zwanej „zasobami pozornymi”, wyrażonej jako:

$$V_{poz}(Q, P_{ds}/z) = \frac{Q}{1 - \frac{P_{ds}/z}{P_{ds(0)}/z(0)}}$$

gdzie:

$P_{ds/z}$ – pseudociśnienie obliczone dla pomiarów średniego dennego ciśnienia złożowego odpowiadających odebranym wartościom Q ,

$P_{d(0)s/z(0)}$ – pseudociśnienie obliczone dla początkowego ciśnienia złożowego [1].

Wykres dla tej zależności został pokazany na rysunku 1. Miarą niepewności wyliczenia zasobów geologicznych V_g jest statystyka odchylenia punktów pomiarowych od odpowiadających im rzędnych punktów należących do prostej modelu. Najbardziej znaną miarą statystyczną jest, w tym przypadku, współczynnik determinacji R^2 , który wnosi 0,65. Współczynnik ten nie posiada wymiaru badanej wartości (jest bezwymiarowy) i z tego względu do oszacowania tego składnika niepewności użyto odchylenia składnika resztowego:

$$S_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 / (n - 2)} = 115\,238 \text{ tys. m}^3$$

gdzie:

y_i – wartość zmierzona,

y'_i – wartość z modelu.

Zatem $u_{V1} = S_e = 115\,238 \text{ tys. m}^3$.

Pozostaje w tym momencie wyliczyć drugi składnik niepewności oszacowania bufora pierwotnego, wynikający z niepewności oszacowania ilości wydobytego gazu w trakcie eksploatacji złoża u_{V2} . Czas eksploatacji rozpatrywanego złoża gazu wynosił 52 lata. Wydobyto w tym czasie 4 353 100 tys. m³ gazu. Z dokumentacji eksploatacji złoża wynika, że wydobyte raportowano rocznie z dokładnością $e_i = 100 \text{ tys. m}^3$. Można założyć, że niepewność oszacowania ilości wydobytego gazu $u_{V2} = 52 \cdot e_i = 5200 \text{ tys. m}^3$. Stąd niepewność oszacowania bufora pierwotnego wynosi:

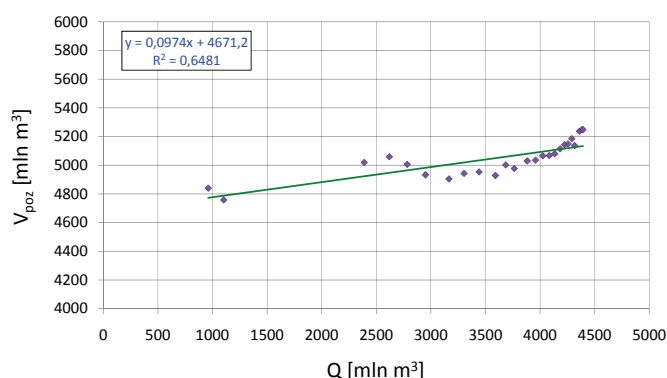
$$u_V = u_{V1} + u_{V2} = 114\,238 + 5200 = 119\,438 \text{ tys. m}^3$$

Ilość gazu w buforze pierwotnym, wyrażona w jednostkach energii, wyliczana jest poprzez pomnożenie dwóch wielkości niezależnych (objętości i ciepła spalania gazu) będących przedmiotem pomiaru bezpośredniego i obciążonych określonymi wartościami niepewności. Niepewność $u(E_{Vbp})$

tak wyliczonej wartości wyrażana jest przy pomocy wzoru na propagację błędu:

$$\begin{aligned} u(E_{Vbp}) &= (1/k) \sqrt{\left(\frac{\partial E_{Vbp}(V_{bp}, csgrs)}{\partial V_{bp}}\right)^2 (u_V)^2 + \left(\frac{\partial E_{Vbp}(V_{bp}, csgrs)}{\partial csgrs}\right)^2 (u_E)^2} = \\ &= (1/k) \sqrt{(csgrs_{sr})^2 (u_V)^2 + (V_{bp})^2 (u_E)^2} = \\ &= (1/k) \sqrt{(40,292)^2 (119\,438)^2 + (318\,100)^2 (0,446)^2} = \\ &= 1\,337\,375\,414 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Wyniki oszacowań badanych wielkości wraz z oszacowaniem niepewności dla tej części bufora zamieszczono w tabelcy 1.



Rys. 1. Zależność zasobów pozornych V_{poz} od ilości wydobytego gazu ze złoża Q

Tabela 1. Wyniki oszacowania ilości gazu (w jednostkach energii) w buforze pierwotnym rozpatrywanego PMG

Nazwa szacowanego parametru	Wartość	Jednostka
Liczba odwiertów	35	–
Ilość gazu w buforze pierwotnym (objętość)	318 100	tys. m ³
Ilość gazu w buforze pierwotnym (energia)	3 560 245 889	kWh
Niepewność oszacowania ciepła spalania gazu suchego	0,466	MJ/m ³
Niepewność oszacowania objętości gazu w buforze pierwotnym	119 438	tys. m ³
Niepewność oszacowania ilości energii gazu w buforze pierwotnym	1 337 375 414	kWh

Szacowanie ilości gazu w buforze dotłoczonym w jednostkach energii

Jak już wspomniano, w pierwszych rocznych cyklach pracy magazynu sukcesywnie pozostawiano w PMG część gazu znajdującego się w pojemności czynnej, zwiększając w ten sposób ciśnienie złożowe i poprawiając warunki pracy PMG. Etap ten nazywano budową bufora i często sankcjonowano zmianę przeznaczenia tak zgromadzonego gazu w formie przekwalifikowania jego części z pojemności czynnej do pojemności buforowej.

Z tym procesem związany jest drugi etap zastosowanej metody, polegający na oszacowaniu ilości gazu w jednostkach energii związanej z partią gazu przypisanego do bufora.

Trudność tego oszacowania stanowi fakt, że najczęściej nie ma dostatecznej ilości pomiarów składu gazu (lub pośrednio ciepła spalania gazu) w trakcie zatłaczania tej części PMG. W miarę upływu czasu związanego z eksploatacją magazynów gazu, wskutek doinwestowywania infrastruktury technicznej, poprawiały się warunki związane z opomiarowaniem parametrów pracy PMG, w tym – z rejestrowaniem składu gazu i ciepła spalania w fazie odbioru i zatłaczania. W związku z tym przyjęto koncepcję związaną z oszacowaniem ilości gazu wyrażonej w jednostkach energii, związaną z pojemnością przypisaną omawianej części bufora na podstawie

próbkowania ciepła spalania gazu pochodzącego z pomiarów wykonanych w tych momentach czasowych, gdy w końcowej fazie odbioru gazu z magazynu zbliżano się do pojemności buforowej. Dysponując taką statystyką pomiarów, można zaobserwować dwa przypadki. Pierwszy polega na tym, że występuje monotoniczna zmienność (trend) ciepła spalania gazu wraz ze zmniejszającym się stanem gazu w PMG. Wówczas, na podstawie odtworzonej funkcji tej zmienności (korelacji) i jej ekstrapolacji do stanu gazu w magazynie nieobjętym pomiarem, można dokonać oszacowania energii związanej z tą częścią bufora. W drugim przypadku takiej zmienności się nie obserwuje i na podstawie dostępnej statystyki pomiarów można przeprowadzić odpowiednie oszacowanie, analogicznie do bufora pierwotnego. W ten sposób dokonano dla każdego PMG dopasowania funkcji korelacyjnej postaci:

$$csgs(V_c) = a \cdot \ln(V_c) + b$$

gdzie:

$csgs$ – szacowana wartość ciepła spalania gazu suchego (MJ/m³),

V_c – pojemność całkowita PMG (tys. m³).

Funkcja ta wyraża, jaka jest statystyczna wartość $csgs$ dla danej pojemności całkowitej w zakresie V_p do V_k , gdzie V_p jest pojemnością całkowitą równą wartości bufora pierwotnego (zerowa wartość bufora dotłoczonego), a V_k – pojemnością całkowitą równą sumie pojemności w buforze pierwotnym i dotłoczonym. Łatwo zauważyć, że wielkość bufora doładowanego wynosi $V_k - V_p$. W celu wyliczenia wartości energetycznej $E_{V_{bd}}$ gazu znajdującego się w buforze dotłoczonym posłużono się wzorem:

$$E_{V_{bd}} = (1/k) \int_{V_p}^{V_k} (a \ln(x) + b) dx$$

gdzie: $k = 0,0036$ jest stałą.

W trakcie eksploatacji rozpatrywanego magazynu przepisano z pojemności czynnej do bufora 410 317,8 tys. m³ gazu. Ostatnia procedura przepisania gazu wykonana została 1 listopada 1996 r. Całkowita pojemność bufora (pierwotnego i przepisanego) wynosi aktualnie 728 417,8 tys. m³ gazu. Dobowe pomiary składu gazu rozpoczynają się 24 sierpnia 2008 r. W trakcie odbioru gazu 15 kwietnia 2012 r. osiągnięto najmniejszą wartość $V_a = 5 019, 441$ tys. m³. Na podstawie pomiarów $csgs$ poprzedzających ten dzień zbadano korelację pomiędzy pojemnością całkowitą i $csgs$. W wyniku dopasowania wyznaczono funkcję korelacyjną: $csgs(V_c) = -0,32385 \cdot \ln(V_c) + 44,786$. Wartość energetyczną bufora dotłoczonego, równą 4 619 583 302 kWh, obliczono ze wzoru:

$$E_{V_{bd}} = (1/0,0036) \int_{318100}^{728417,8} (-0,32385 \ln(x) + 44,78647) dx$$

Wyliczono również wartość średnią $csgs_{sr} = 40,531$ MJ/m³ z pomiarów użytych do analizy.

Miarą niepewności wyliczenia ciepła spalania gazu u_E jest statystyka odchylenia punktów pomiarowych od odpowiadających im rzędnych punktów należących do funkcji modelu. Podobnie jak we wcześniej opisywanym przypadku, do oszacowania tego składnika niepewności użyto odchylenia składnika resztowego:

$$S_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 / (n - 2)} = 0,339 \text{ MJ/m}^3$$

gdzie:

y_i – wartość zmierzona,

y'_i – wartość z modelu.

Zatem $u_E = S_e = 0,339$ MJ/m³.

Pozostaje w tym momencie wyliczyć drugi składnik niepewności oszacowania bufora dotłoczonego, wynikający z niepewności oszacowania ilości udziału wydobytego/zatłoczonego gazu w przepisanej części bufora u_V . Okres eksploatacji PMG w trakcie budowy tej części bufora wyniósł 5292 dni. Przepisano 410 317,8 tys. m³ gazu. Eksploatację prowadzono (przeciętnie) 30 odwiertami. Dobowe wartości zatłaczania/odbioru z odwiertu raportowano z dokładnością $e_i = 1$ m³. Można założyć, że niepewność oszacowania ilości przepisanego do bufora gazu $u_V = 5292 \cdot 30 \cdot e_i = 158,760$ tys. m³. Stąd niepewność oszacowania bufora pierwotnego wynosi $U_V = 158,760$ tys. m³.

Podobnie jak w poprzednim rozdziale niepewność $u(E_{V_{bd}})$ oszacowania ilości gazu w buforze dotłoczonym w jednostkach energii wyrażana jest przy pomocy wzoru na propagację błędów:

$$\begin{aligned} u(E_{V_{bd}}) &= (1/k) \sqrt{\left(\frac{\partial E_{V_{bd}}(V_{bd}, csgs)}{\partial V_{bd}}\right)^2 (u_V)^2 + \left(\frac{\partial E_{V_{bd}}(V_{bd}, csgs)}{\partial csgs}\right)^2 (u_E)^2} = \\ &= (1/k) \sqrt{(csgs_{sr})^2 (u_V)^2 + (V_{bd})^2 (u_E)^2} = \\ &= (1/k) \sqrt{(40,531)^2 (158760)^2 + (410317,8)^2 (0,339)^2} = \\ &= 38793436 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Wyniki oszacowań badanych wielkości wraz z oszacowaniem niepewności dla tej części bufora zamieszczono w tabelicy 2.

Tablica 2. Wyniki oszacowania ilości gazu (w jednostkach energii) w buforze dotłoczonem rozpatrywanego PMG

Nazwa szacowanego parametru	Wartość	Jednostka
Liczba odwiertów	35	-
Ilość gazu w buforze dotłoczonem (objętość)	410 317,8	tys. m ³
Ilość gazu w buforze dotłoczonem (energia)	4 619 583 302	kWh
Niepewność oszacowania ciepła spalania gazu suchego	0,339	MJ/m ³
Niepewność oszacowania objętości gazu w buforze dotłoczonem	158,760	tys. m ³
Niepewność oszacowania ilości energii gazu w buforze dotłoczonem	38 793 436	kWh

Szacowanie ilości gazu w pojemności czynnej w jednostkach energii

Trzeci etap omawianego procesu polegał na dokonaniu tzw. bilansu otwarcia dla pojemności czynnej i bilansowania ilości gazu wyrażonej w jednostkach energii, poprzez dodawanie i odejmowanie wartości wyliczonych na podstawie dobowych pomiarów objętości i ciepła spalania. Aby można było skutecznie (minimalizując niepewność uzyskanych wyników) przeprowadzić omawianą procedurę, muszą być spełnione następujące warunki:

- data dokonania bilansu otwarcia powinna być tak dobrana, aby pojemność czynna była jak najmniejsza, a najlepiej, aby była równa zero,
- w kolejnych dniach, począwszy od wyznaczonej daty, powinny być wykonywane pomiary dobowych wartości objętości zatłaczanego lub odbieranego gazu oraz odpowiadających im wartości średniego ciepła spalania gazu.

W przypadku, gdy w dniu wskazanym w bilansie otwarcia pojemność czynna nie będzie równa zero, należy oszacować jej wartość w jednostkach energii na podstawie średniej z wykonanych w tym czasie pomiarów ciepła spalania gazu.

Mając dobowe wielkości zatłaczania i odbioru gazu $q_g(i)$ w i -tym dniu od daty bilansu otwarcia oraz przypisane im uśrednione dobowo wartości z pomiarów $csgs(i)$, można wyliczyć ilość gazu znajdującego się w pojemności czynnej w jednostkach energii, stosując formułę:

$$E_{Va} = E_{Va}(0) + \sum_{i=1}^n csgs(i) \cdot q_g(i) / k$$

gdzie: $E_{Va}(0)$ jest oszacowaną wartością energii pojemności czynnej w dniu wyznaczającym bilans otwarcia (dzień 0).

Na datę oszacowana ilość gazu w pojemności czynnej w jednostkach energii, dla rozpatrywanego PMG, wybrano dzień 3 kwietnia 2014 r. Pojemność czynna PMG V_a wynosiła wtedy 250 874,21 tys. m³. Dniem osiągnięcia przez stan magazynu względnie małej (ale dodatniej) wartości był 15 kwietnia 2012 r. W tym dniu $V_a(0) = 5 019,441$ tys. m³ gazu. Był to ostatni dzień fazy odbioru gazu. Wartość

energetyczną dla tej objętości, równą 55 924 938 kWh, wyznaczono na podstawie średniej wartości ciepła spalania gazu, wyliczonej z ostatnich dni odbioru gazu $csgs_{sr} = 40,110$ MJ/m³, przy odchyleniu standardowym średniej $S(csgs_{sr}) = 0,130$ MJ/m³. Wartość energetyczną gazu w pojemności czynnej 3 kwietnia 2014 r. $E_{Va} = 875 925 472$ kWh obliczono, sumując $E_{Va}(0)$ i wartości wyliczone w kolejnych dniach na podstawie zmierzonych wielkości $csgs$ i dobowych objętości zatłaczania i odbioru gazu.

Niepewność oszacowania $E_{Va}(0)$ wyliczono przy pomocy różniczki zupełnej, przyjmując: niepewność oszacowania ciepła spalania gazu równą odchyleniu standardowemu średniej $u_{E(0)} = S(csgs_{sr}) = 0,130$ MJ/m³, niepewność oszacowania pojemności czynnej $u_{V(0)} = 3 \cdot 35 \cdot 0,001 = 0,105$ tys. m³ (ilość gazu pozostawionego w złożu równa trzem przeciętnym dobowym wydobycom, 35 odwiertów, dokładność oznaczania dobowego wydobywania przez odwiert równa 0,001 tys. m³).

$$\begin{aligned} u(E_{Va(0)}) &= (1/k) \sqrt{\left(\frac{\partial E_{Va(0)}(V_a, csgs)}{\partial V_a}\right)^2 (u_{V(0)})^2 + \left(\frac{\partial E_{Va(0)}(V_a, csgs)}{\partial csgs}\right)^2 (u_{E(0)})^2} = \\ &= (1/k) \sqrt{(csgs_{sr})^2 (u_{V(0)})^2 + (V_a(0))^2 (u_{E(0)})^2} = \\ &= (1/k) \sqrt{(40,110)^2 (0,015)^2 + (5015,441)^2 (0,130)^2} = \\ &= 181265 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Niepewność oszacowania dla drugiego członu formuły $\sum_{i=1}^n csgs(i) \cdot q_g(i) / k$ wyliczono, sumując niepewności dla każdego z n dni eksploatacji.

$$u(E_{Va(n)}) = (1/k) \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial E_{Va(i)}(V_a, csgs)}{\partial V_a}\right)^2 (u_{V(i)})^2 + \left(\frac{\partial E_{Va(i)}(V_a, csgs)}{\partial csgs}\right)^2 (u_{E(i)})^2 \right]} = 3671232 \text{ kWh}$$

Zatem: $u(E_{va}) = u(E_{va(0)}) + u(E_{va(n)}) = 181\,265 \text{ kWh} + 3\,671\,232 \text{ kWh} = 3\,671\,232 \text{ kWh}$.

Wyniki oszacowań badanych wielkości wraz z oceną niepewności dla pojemności czynnej zamieszczono w tabelicy 3.

Tablica 3. Wyniki oszacowania ilości gazu (w jednostkach energii) w pojemności czynnej rozpatrywanego PMG

Nazwa szacowanego parametru	Wartość	Jednostka
Liczba odwiertów	35	–
Ilość gazu w pojemności czynnej (objętość)	250 874,21	tys. m ³
Ilość gazu w pojemności czynnej (energia)	875 925 472	kWh
Niepewność oszacowania ilości energii gazu w pojemności czynnej	3 671 232	kWh

Podsumowanie

W ramach niniejszego opracowania dokonano przeglądu wszystkich dostępnych wyników pomiarów związanych z tematyką oznaczania składu gazu z próbek pobranych w trakcie eksploatacji złoża i pracy PMG. Określono na ich podstawie ciepło spalania gazu suchego.

Wynikiem końcowym wykonanej pracy było oszacowanie:

- ilości gazu zgromadzonego w buforze pierwotnym oraz w buforze dotłoczonym dla rozpatrywanego PMG,
- ilości gazu zgromadzonego w pojemności czynnej dla PMG w dniu dokonania rozliczenia,
- niepewności wyliczonych wartości pojemności energetycznych.

Zasadniczym, nasuwającym się w zakończeniu tego opracowania, wnioskiem jest niewspółmiernie duża (w porównaniu z analogicznymi wartościami wyliczonymi dla pozostałych części PMG) wartość oszacowanej niepewności wyznaczenia ilości gazu w jednostkach energii w buforze pierwotnym. Wynika to z niewielkiej liczby pomiarów składu gazu dla złoża w trakcie jego eksploatacji oraz znacznego rozrzutu wartości ciepła spalania obliczonych na podstawie tych pomiarów. Istnieje zatem potrzeba zastosowania bardziej zaawansowanych metod oszacowania ciepła spalania gazu w tej części PMG. Zastosowanie symulacyjnego modelowania pracy PMG może przyczynić się do rozwiązania tego problemu.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 10, s. 754–760

Artykuł nadesłano do Redakcji 17.11.2014 r. Zatwierdzono do druku 23.04.2015 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Oszacowanie wartości energetycznej wypełnienia pojemności czynnej PMG Wierzchowice, PMG Husów, PMG Strachocina, PMG Swarzów, PMG Brzeźnica i KPMG Mogilno* – praca INiG – PIB na zlecenie Operatora Systemu Magazynowania Sp. z o.o., nr zlecenia: 215/0800/13/05.

Literatura

- [1] Collier R. S., Monash E., Hultquist P.: *Modeling natural gas reservoirs – a simple model*. SPE, October 1981, pp. 521–525.
- [2] Kwilosz T., Filar B.: Zastosowanie metody statystycznej do prognozowania wydobywania gazu z PMG. Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 192–197.
- [3] Kwilosz T.: *Zastosowanie metody statystycznej do oszacowania zapasu strategicznego PMG, z uwzględnieniem niepewności wyznaczenia parametrów pracy systemu gazowniczego*. Nafta-Gaz 2011, nr 3, s. 192–197.
- [4] Rokosz W.: *Działalność magazynowania w ramach PGNiG SA, jako operatora systemu magazynowania dla gazu wysokometanowego*. Nafta-Gaz 2010, nr 5, s. 345–351.



Dr Tadeusz KWILOSZ
 Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu.
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: kwilosz@inig.pl