

Bogdan Filar, Tadeusz Kwilosz

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Szacowanie pojemności PMG utworzonych w sczerpanych złożach gazu w jednostkach energii

W prezentowanej pracy zaproponowano algorytm szacowania ilości gazu buforowego oraz pojemności czynnej PMG wyrażonej w jednostkach energii. Zaprezentowany algorytm opiera się na szacowaniu ilości gazu w jednostkach energii metodami statystycznymi i dotyczy podziemnych magazynów gazu utworzonych w sczerpanych złożach wysokometanowych. PMG tego typu zlokalizowane są na południu Polski. Opracowana metoda realizowana jest w trzech krokach. W pierwszym – oszacowaniu podlega gaz znajdujący się w buforze pierwotnym. W drugim kroku oszacowanie dotyczy gazu w buforze dotłoczonem. W trzecim – szacuje się ilość energii odpowiadającą pojemności czynnej PMG. Zaprezentowano wyniki oszacowania ilości gazu; zostały one zilustrowane na przykładzie teoretycznym, dla którego zaburzone dane zaczerpnięto z jednego PMG w Polsce.

Słowa kluczowe: metody statystyczne, oszacowanie energii gazu w PMG.

Estimation of UGS working volume created in depleted gas fields in energy units

The paper presents an algorithm for the estimation of the UGS cushion gas expressed in energy units. The presented algorithm is based on statistical methods and concentrates on gas storages developed in depleted high methane gas fields. These types of gas storages are located in the southern part of Poland. The method is implemented in three steps. The primary cushion gas is estimated in the first step. The second step concerns the estimation of the gas energy injected into the gas storage to enlarge cushion. The last third step estimates the amount of energy corresponding to the working volume of UGS. The estimation results are illustrated on the example of theoretical data which were created based on a real data taken from one of UGS located in Poland.

Key words: statistical methods, estimation of the gas energy in UGS.

Wprowadzenie

W związku z liberalizacją rynku gazowego oraz dostosowaniem go do standardów stosowanych w UE (*Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 715/2009 z dnia 13 lipca 2009 r. w sprawie warunków dostępu do sieci przesyłowych gazu ziemnego i uchylające rozporządzenie (WE) nr 1775/2005*), dokonane zostały zmiany w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) oraz w Regulaminie Świadczenia Usług Magazynowania (RŚUM) nakładające od 1 lipca 2012 r. obowiązek rejestrowania a także rozliczania ilości zatłaczanego i odbieranego do/z PMG gazu w jednostkach energii (kWh) [4]. Rejestrowanie i rozliczanie ilości gazu w jednostkach energii wiąże się z jego bilanso-

waniem – dopisywaniem i odejmowaniem do/od stanu PMG – również wyrażonym w jednostkach energii. Istnieje zatem potrzeba oszacowania ilości gazu znajdującego się w PMG (zarówno w części buforowej, jak i roboczej) w jednostkach energii. Część buforowa PMG związana jest, na ogół, z gazem rodzimym pozostałym po zakończeniu eksploatacji złoża. Część roboczą (pojemność czynną) stanowi gaz zatłaczany i odbierany w kolejnych cyklach pracy PMG.

Zastosowana strategia dotyczyć będzie postępowania z magazynami gazu utworzonymi w sczerpanych złożach gazu ziemnego zawierających tzw. gaz rodzimy wysokometanowy. Tego typu magazyny gazu znajdują się na południu Polski.

W pierwszej kolejności należy dokonać oszacowania (w jednostkach energii) ilości gazu pozostawionego w złożu po zakończeniu jego eksploatacji jako początkowej wielkości buforu przyszłego PMG. Często, w trakcie magazynowania gazu, dokonywane jest pomniejszenie lub powiększenie części buforowej magazynu poprzez decyzje administracyjne związane z przekwalifikowaniem części gazu znajdującego się w pojemności czynnej do pojemności buforowej lub na odwrót. W każdej z takich sytuacji należy dokonać oszacowania tak określonej ilości gazu w jednostkach energii i zaktualizować bilans obydwu części PMG. W kolejnych cyklach pracy PMG następuje zatłaczanie i odbieranie gazu do/z pojemności czynnej magazynu. W czasie tego procesu dochodzi do mieszania się gazu znajdującego się w części buforowej z gazem zaliczanym do pojemności czynnej. W przypadku istotnych różnic w kaloryczności gazu znajdującego się w obydwu częściach PMG może nastąpić zmiana zbilansowanej ilości energii zawartej w części buforowej przy

niezmienionym jego wolumenie. Należy sprawdzić, czy takie zjawisko wystąpiło i oszacować jego skalę. Przeprowadzenie tych obliczeń pozwoli na dokonanie tzw. bilansu otwarcia, polegającego na określeniu, ile gazu wyrażonego w jednostkach energii, przy danym wolumenie, znajduje się w buforze, a ile w pojemności czynnej w ustalonym z góry do tego celu dniu. Przy wyborze daty rozliczenia (otwarcia) należy uwzględnić dwa wymagania: (1) pojemność czynna powinna być maksymalnie szczerpana – najlepiej do zera, (2) po tym dniu należy rejestrować codobowe pomiary kaloryczności zatłaczanego i odbieranego gazu, co umożliwi bieżące bilansowanie gazu w PMG, zarówno w jednostkach objętościowych, jak i energetycznych. Do wyliczenia dobowej ilości zatłaczanego/odbieranego gazu w jednostkach energii potrzebna jest (zgodnie z zaleceniami zawartymi w IRiESP i RŚUM) ilość gazu w jednostkach objętości oraz średnia wartość ciepła spalania gazu suchego (*csgs*) wyliczona z pomiarów wykonanych w danym (rozliczeniowym) przedziale czasu.

Założenia ogólne zastosowanej metody szacowania ilości gazu

Proces oszacowania ilości gazu w PMG w jednostkach energii można podzielić na trzy etapy. W pierwszym – szacuje się ilość gazu pozostawionego w złożu po okresie jego eksploatacji. Stanowi ona zasadniczą część buforu PMG i nazywana jest często buforem pierwotnym.

W ramach oszacowania ilości gazu dla tego etapu należy dokonać przeglądu wszystkich analiz składu chemicznego gazu wykonanych w okresie eksploatacji złoża i na ich podstawie, dla każdej wykonanej analizy, wyliczyć wartość ciepła spalania gazu suchego, opierając się o normę PN-ISO 6967:2003. Obliczone wartości posłużą do wygenerowania statystycznego rozkładu prawdopodobieństwa, jakiemu podlegają pomiary *csgs* w okresie eksploatacji złoża. Jeżeli dysponujemy małą liczbą analiz gazu (mała statystyka – mniej niż 15 elementów), to lepiej posłużyć się rozkładem trójkątnym o parametrach: średnia arytmetyczna z wyliczonych wartości, wartość minimalna i maksymalna. Jeśli dysponujemy większą statystyką, można dokonać próby rozpoznania rozkładu, któremu podlega badana wielkość. W pierwszej kolejności można wykonać test normalności rozkładu (np. test W. Shapiro-Wilka). W przypadku braku potwierdzenia normalności rozkładu statystycznego należy posłużyć się metodami nieparametrycznymi.

Na podstawie znanej (oszacowanej i zatwierdzonej decyzją administracyjną) ilości gazu pozostawionego w złożu po zakończeniu eksploatacji w jednostkach objętościowych oraz znanych parametrów rozkładu prawdopodobieństwa wartości *csgs* (w przypadku zastosowania metod parametrycznych), dokonuje się oszacowania ilości gazu w jednostkach energii.

Mając rozkład trójkątny, wylicza się trzy wartości ilości gazu w jednostkach energii: wartość minimalną, wartość średnią (jako najbardziej prawdopodobną) i wartość maksymalną. Dysponując parametrem rozkładu dla *csgs* (a zatem jego dystrybucją), można wyliczyć dowolne fraktyle. W praktyce wylicza się fraktyle: L10, L50 i L90, które można interpretować następująco: z 10-procentowym prawdopodobieństwem ilość gazu w jednostkach energii jest nie większa niż L10, z 50-procentowym prawdopodobieństwem jest nie większa niż L50 i z 90-procentowym prawdopodobieństwem jest nie większa niż L90 [3]. Inaczej rzecz ujmując, z prawdopodobieństwem 80-procentowym ilość gazu wyrażona w jednostkach energii mieści się w przedziale od L10 do L90, a wartością najbardziej prawdopodobną jest L50.

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) oraz brak urządzeń sprężających – pracujących w fazie odbioru – zmuszały operatorów PMG do pozostawiania w magazynie sporych części gazu zatłoczonego w poprzednich fazach. W związku z tym istnieje nikkie prawdopodobieństwo tego, że występujące na granicy buforu 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.

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

Z tym procesem związany jest drugi etap naszej pracy, polegający na oszacowaniu ilości gazu w jednostkach energii związanej z partią gazu przypisanego do buforu. 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 związanej z eksploatacją magazynów gazu, wskutek doinwestowywania infrastruktury technicznej, poprawiały się warunki związane z określeniem parametrów pracy PMG, w tym – z rejestrowaniem składu gazu i ciepła spalania w fazie odbioru. W związku z tym przyjęto koncepcję opartą na oszacowaniu ilości gazu wyrażonej w jednostkach energii, związanej z pojemnością przypisaną omawianej części buforu, 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 tej części pojemności buforowej, a nawet ją przekraczano. Dysponując taką statystyką pomiarów, można zaobserwować dwa przypadki. Pierwszy – polegający 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 buforu. W drugim przypadku takiej zmienności się nie obserwuje i na podstawie dostępnej statystyki pomiarów można dokonać odpowiedniego oszacowania, analogicznie do buforu pierwotnego. W tym momencie dysponujemy oszacowaniem ilości gazu wyrażonej w jednostkach energii związanej z buforem pierwotnym oraz z tzw. buforem dotłoczoną.

Trzeci etap omawianego procesu będzie 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 wolumenu 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, należy wykonywać pomiary dobowych wartości wolumenu zatłaczanego lub odbieranego gazu oraz odpowiadających im wartości średniego ciepła spalania gazu.

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

Przykład zastosowania metody

Opracowaną metodę przetestowano na danych pochodzących z jednego z podziemnych magazynów gazu w Polsce. Ze względu na studialny, a nie aplikacyjny charakter opracowania oraz ograniczenia związane z poufnością danych zastrzeżonych przez operatora PMG, dobowe wartości pomiarów gazu w jednostkach wolumetrycznych oraz wartość pojemności buforowej zostały zaburzone.

Początkowa pojemność buforowa (gaz pozostawiony w złożu po zakończeniu jego eksploatacji) wynosiła 347 904 tys. m³.

Z okresu eksploatacji złoża zachowało się 26 analiz składu chemicznego gazu wykonanych w różnych okresach jego eksploatacji. Trzy spośród nich wyraźnie odbiegały od pozostałych pod względem oznaczonego składu gazu, więc zostały odrzucone. Na podstawie dostępnych analiz wyliczono odpowiadające im wartości *csgs*. Dla tak otrzymanej statystyki zastosowano test zgodności Shapiro-Wilka, w celu

sprawdzenia hipotezy, czy badana próba podlega rozkładowi normalnemu. Wyliczona wartość statystyki $W = 0,889$ jest większa od wartości krytycznej $W_{23}(0,01) = 0,881$. Stąd nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności próby z rozkładem normalnym. Tak otrzymana statystyka posłużyła do wyliczenia parametrów rozkładu normalnego estymującego rzeczywisty rozkład prawdopodobieństwa, któremu podlegają pomiary *csgs*. Parametry tego rozkładu to:

- średnia arytmetyczna = 39,607 MJ/m³,
- odchylenie standardowe = 0,156 MJ/m³.

Na podstawie parametrów rozkładu prawdopodobieństwa pomiarów *csgs* oraz ilości gazu w buforze wyrażonej w jednostkach wolumetrycznych, otrzymano rozkład oszacowanej ilości gazu w buforze w jednostkach energii. Parametry tego rozkładu to,

- średnia arytmetyczna = 3 827 620,373 tys. kWh,
- odchylenie standardowe = 15 692 tys. kWh.

Należy zwrócić uwagę na pewną niekonsekwencję w oznaczeniach jednostek. Ciepło spalania gazu suchego c_{sgs} wyrażone jest w $[MJ/m^3]$, a ilość gazu w jednostkach energii w $[tys. kWh]$. Spowodowane jest to, w dużej mierze, siłą przyzwyczajenia w branży, gdzie c_{sgs} wyliczane i podawane jest w $[MJ/m^3]$. W normie PN-ISO 6967:2003, na podstawie której dokonuje się obliczeń c_{sgs} , również używane są tego typu jednostki. Z kolei instrukcja IRiESP wymaga dokonywania rozliczeń ilości gazu w $[kWh]$.

Dystrybuantę rozkładu c_{sgs} zaprezentowano na rysunku 1, a dystrybuantę rozkładu ilości gazu buforowego w jednostkach energii na rysunku 2.

Odpowiednie fraktyle dla c_{sgs} wynoszą: $L_{10} = 39,407 MJ/m^3$, $L_{50} = 39,607 MJ/m^3$, $L_{90} = 39,807 MJ/m^3$, a dla ilości gazu buforowego w jednostkach energii: $L_{10} = 3\ 808\ 337 tys. kWh$, $L_{50} = 3\ 827\ 620 tys. kWh$, $L_{90} = 3\ 846\ 904 tys. kWh$.

W kolejnym kroku dokonano oszacowania energii gazu znajdującego się w tej części pojemności czynnej, którą przypisano do buforu, tworząc tzw. dotłoczoną część buforu. Dla badanego magazynu w 2009 roku decyzją administracyjną dokonano ostatniego przekwalifikowania części pojemności czynnej na gaz buforowy. Łącznie z partiami gazu przekwalifikowanymi w uprzednich okresach wolumen tej wielkości wyniósł 214 560 tys. m^3 gazu. Niestety, dopiero od kwietnia 2008 roku wykonywano regularnie (każdej doby) pomiary składu gazu (w tym c_{sgs}) w próbkach gazu zatłaczanego i odbieranego z magazynu. Dysponujemy zatem jedynie serią pomiarów c_{sgs} z próbek gazu pobranych w pierwszych dniach ostatniej fazy odbioru, która nastąpiła przed przepisaniem. Zakres pomiarów (liczba próbek) został tak dobrany, aby był reprezentatywny dla przepisanej partii gazu. Analizując przebieg zmierzonych wartości c_{sgs} w zależności od pojemności całkowitej V_c (rysunek 3), można zauważyć, że c_{sgs} rośnie wraz z jej spadkiem. Najlepsze wyniki interpolacji tego trendu uzyskano przy pomocy funkcji logarytmicznej postaci $c_{sgs}(V_c) = -0,2739 \ln(V_c) + 43,679$. Średniokwadratowy błąd dopasowania funkcji do pomiarów wyniósł $R^2 = 0,872$.

Aby oszacować tę część buforu w jednostkach energii E_b – która została przekwalifikowana z pojemności czynnej, należy dokonać ekstrapolacji dopasowanej funkcji do zakresu zmienności przepisanej pojemności czynnej w obrębie pojemności całkowitej magazynu gazu. Zakres ten zaczyna się od

stanu magazynu równego wielkości buforu pierwotnego $V_1 = 347\ 904 tys. m^3$, a kończy się na stanie magazynu po przepisanej części pojemności czynnej $V_2 = 562\ 464 tys. m^3$ ($347\ 904 tys. m^3 + 214\ 560 tys. m^3$). Szukaną wielkość E_b można otrzymać ze wzoru (1):

$$E_b = k \int_{V_1}^{V_2} (-0,2739 \ln(x) + 43,679) dx \quad (1)$$

gdzie:

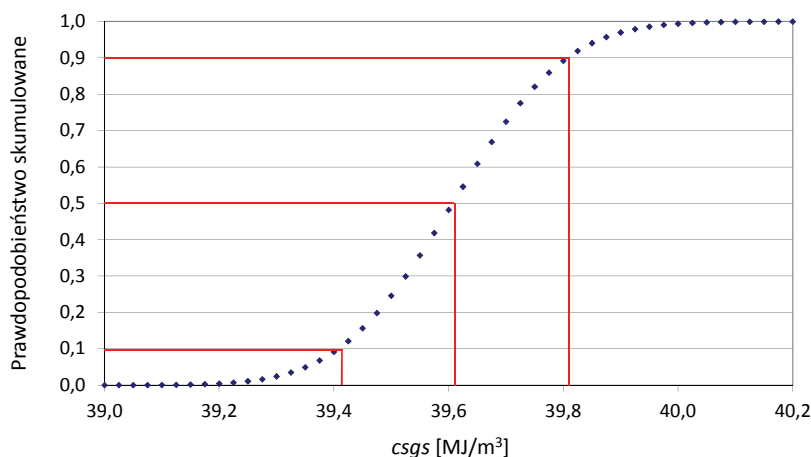
$$V_1 = 347\ 904 (tys. m^3),$$

$$V_2 = 562\ 464 (tys. m^3),$$

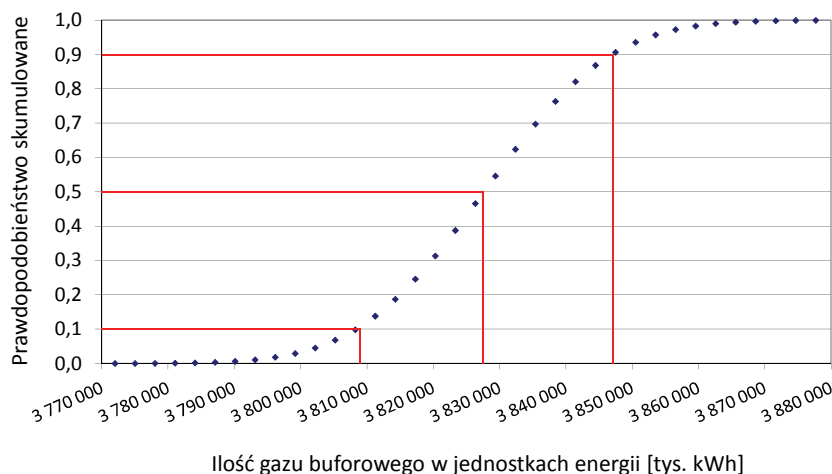
$k = 0,27777777$ – współczynnik dla zamiany jednostek energii.

Po dokonaniu odpowiednich obliczeń wyznaczone $E_b = 2\ 390\ 740 tys. kWh$. Jako miary niepewności tego oszacowania można użyć odchylenia standardowego obliczonego na podstawie serii pomiarów c_{sgs} , które przeskalowane do jednostek energii gazu wynosi 1 248 tys. kWh.

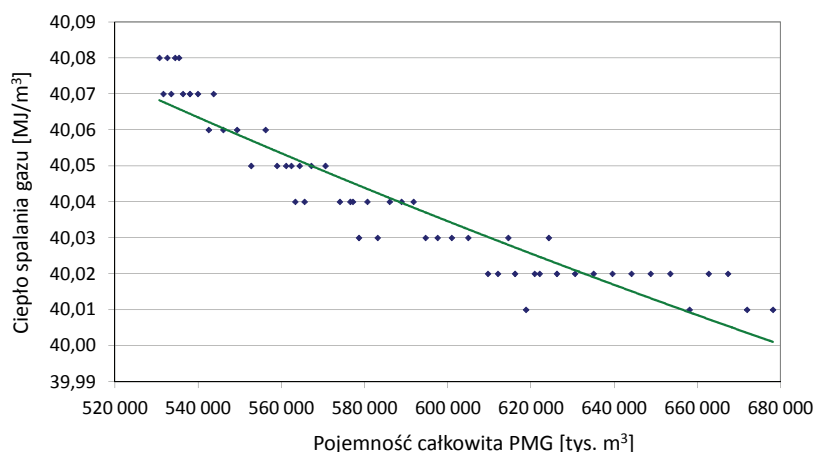
Ostatnim krokiem procedury jest oszacowanie energii gazu znajdującego się w pojemności czynnej. Aby je przeprowadzić, należy dokonać tzw. bilansu otwarcia, tzn. wyznaczyć



Rys. 1. Dystrybuanta rozkładu c_{sgs} dla gazu buforowego



Rys. 2. Dystrybuanta rozkładu ilości gazu buforowego w jednostkach energii



Rys. 3. Pomiary ciepła spalania dla próbek odbieranego gazu

datę, od której dobowe ilości odbieranego i zatłaczanego gazu będą odejmowane i dopisywane do stanu PMG, zarówno w jednostkach wolumetrycznych, jak i energetycznych. Dla opisywanego przykładu wybrano ostatni dzień należący do fazy odbioru gazu, w którym (po uwzględnieniu operacji przepisania gazu do buforu) pojemność czynna V_a była najmniejsza i wynosiła 42 162 tys. m³. Ponadto, wyboru punktu czasowego dokonano dla tej fazy odbioru gazu, dla której analizowano pomiary $csgs$ i dopasowano funkcję $csgs(V_c)$. Taki wybór ma następujące zalety:

- rozpoczęcie bilansowania następuje w tym samym okresie, co zakończenie budowy buforu,
- stan pojemności czynnej jest najmniejszy, co minimalizuje niepewność oszacowania energii dla gazu znajdującego się w tej partii złoża,

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 1, s. 3–7

Literatura

- [1] Collier R. S., Monash E., Hultquist P.: *Modeling natural gas reservoirs – a simple model*. SPE, October 1981.
- [2] Filar B., Kwilosz T.: *Opracowanie komputerowego programu służącego do inżynierskiej obsługi pracy podziemnych magazynów gazu na przykładzie PMG Brzeznicza*. Dokumentacja wewnętrzna INiG. Kraków-Krosno 1999.
- [3] Kwilosz T.: *Zastosowanie metody statystycznej do oszacowania*

- do oszacowania ilości gazu znajdującego się w pojemności czynnej w tym momencie czasowym można użyć wyznaczonej w poprzednim kroku funkcji $csgs(V_c)$, stosując wzór (2):

$$E_{Va} = k \int_{V_b}^{V_b+V_a} (-0,2739 \ln(x) + 43,679) dx \quad (2)$$

gdzie: V_b jest sumą wolumenu gazu z buforu pierwotnego i dotłoczonego.

Dokonując odpowiednich obliczeń dla $V_b = 562\,464$ tys. m³ i $V_b + V_a = 604\,626$ tys. m³, otrzymujemy $E_{Va} = 468\,965$ tys. kWh z odchyleniem standardowym równym 245 tys. kWh.

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

$$E_{Va}(n) = E_{Va} + k \sum_{i=1}^n csgs(n) * q_g(n) \quad (3)$$

Ograniczeniem stosowania tej formuły jest sytuacja, w której pojemność czynna podczas odbioru zostanie wyczerpana. Wówczas wielkość $E_{Va}(n)$ powinna pozostać równa zero, a odbierane ilości gazu, zarówno w jednostkach energii, jak i wolumetrycznych, powinny być odejmowane od wartości buforu.

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 210, nr 5, s. 345–351.



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny; kierownik Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



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