

Numeryczny model wykonywania predykcji zapotrzebowania na gaz odbierany z podziemnych magazynów gazu

Numerical model for predicting demand for gas received from underground gas storage facilities

Tadeusz Kwilosz, Bogdan Filar, Agnieszka Moska, Mariusz Miziołek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Zadaniem operatora systemu magazynowania gazu jest zarządzanie podziemnymi magazynami gazu. Do jego głównych zadań należy zapewnienie bezpieczeństwa funkcjonowania instalacji magazynowych^(*) i realizacji umów z użytkownikami tych instalacji oraz świadczenie usług magazynowania niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania systemu gazowego. Kolejnym ważnym zadaniem operatora systemu magazynowania gazu jest zarządzanie przepływami paliw gazowych kierowanych do instalacji magazynowej. Należy dodać też obowiązek informowania użytkowników systemu oraz operatorów innych systemów o warunkach świadczenia usług magazynowania paliw gazowych. W celu zapewnienia możliwości bezpiecznego realizowania usług magazynowych niezbędne jest wykonywanie wielodniowych predykcji mocy zatłaczania gazu do magazynu i odbioru gazu z magazynu na każdym etapie jego napełnienia. Przygotowywanie tak określonych predykcji możliwe jest przy użyciu numerycznych modeli takich jak: modele symulacyjne pracy magazynu gazu, modele numeryczne wykonane na podstawie charakterystyk pracy magazynu gazu. Wykorzystanie modelu pracy magazynu gazu opartego na charakterystykach jego pracy daje możliwość szybkiego wykonania predykcji mocy. W artykule zaprezentowano model numeryczny pracy magazynu gazu opracowany na podstawie charakterystyk mocy odbioru i zatłaczania gazu. Oprogramowanie modelu zostało wykonane przy użyciu języka programowania Python. Na tym etapie program był uruchamiany w środowisku programistycznym. Opracowany model został przetestowany na przykładowych zestawach danych. Wykonano dwie predykcje mocy odbioru gazu i dwie predykcje mocy zatłaczania gazu. Predykcje przygotowano przy założeniu eksploatacji magazynu gazu na jego wczesnym i zaawansowanym etapie napełnienia. Wszystkie predykcje dotyczyły 20-dniowego okresu pracy magazynu. W przypadku każdej z wykonanych predykcji zastosowano 6 wariantów zmiany ciśnienia w trakcie pracy magazynu gazu.

^(*) Instalacja magazynowa paliw gazowych to system służący do przechowywania paliw gazowych, obejmujący zarówno naziemne i podziemne zbiorniki, jak i magazyny w kawernach solnych czy szcerpanych złożach węglowodorów.

Słowa kluczowe: magazynowanie gazu, predykcje, modelowanie numeryczne.

ABSTRACT: The task of the gas storage system operator is to manage underground gas storage facilities. Its main tasks include ensuring the safe operation of storage installations^(*) and the implementation of agreements with users of these installations, as well as providing storage services necessary for the proper functioning of the gas system. Another important task of the gas storage operator is to manage the flows of gaseous fuels directed to the storage installation. It is also necessary to add the obligation to inform system users and operators of other systems about the conditions of providing gaseous fuel storage services. In order to ensure the safe provision of storage services, it is necessary to perform multi-day predictions of gas injection power into the storage facility and gas withdrawal power from the storage facility at each stage of its filling. Preparing such predictions is possible using numerical models, such as simulation models of gas storage operation and numerical models developed on the basis of the operating characteristics of a gas storage facility. The use of a gas storage operation model based on its operating enables rapid prediction of power. This article presents a numerical model of gas storage operation developed on the basis of gas withdrawal and injection power characteristics. The model software was developed using the Python programming language. At this stage, the program was run in a programming environment. The developed model was tested on sample data sets. Two predictions of gas withdrawal capacity and two predictions of gas injection power were made. The predictions were prepared assuming the operation of the gas storage facility was at an early and advanced stage of filling. All predictions concerned a 20-day period of storage operation. For each of the predictions made, 6 variants of pressure changes during the gas storage facility operation were used.

^(*)A gas storage installation is a system used to store gaseous fuels, including both above-ground and underground tanks, as well as storage facilities in salt caverns or depleted hydrocarbon reservoirs.

Keywords: gas storage, predictions, numerical modeling.

Autor do korespondencji: T. Kwilosz, e-mail: kwilosz@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 13.02.2025 r. Zatwierdzono do druku: 15.06.2026 r.

Wstęp

Zadaniem operatora systemu magazynowania (OSM) gazu jest świadczenie usług magazynowych dla klientów (zlecających usług magazynowania – ZUM). Do głównych zadań OSM należy:

- zapewnienie bezpieczeństwa funkcjonowania instalacji magazynowych i realizacji umów z użytkownikami tych instalacji;
- dysponowanie mocą instalacji magazynowych;
- świadczenie usług magazynowania niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania systemu gazowego;
- zarządzanie przepływami paliw gazowych kierowanych do instalacji magazynowych i z nich odbieranych oraz zapewnienie utrzymania parametrów jakościowych tych paliw;
- dostarczanie użytkownikom systemu oraz operatorom innych systemów informacji o warunkach świadczenia usług magazynowania paliw gazowych, w tym o współpracy z połączonymi systemami gazowymi (Gas Storage Poland – działalność, 2026).

Większość ww. zadań realizowana jest zgodnie z zawartymi pomiędzy OSM a ZUM umowami na usługi magazynowe. W celu zapewnienia możliwości bezpiecznego realizowania usług magazynowania paliwa gazowego niezbędne są kompetencje do wykonywania wielodniowych predykcji mocy zatłaczania i odbioru gazu do/z podziemnych magazynów gazu (PMG) na każdym etapie ich wypełniania (Malakootia i Azin, 2011; Agate i in., 2017; Brkić i in., 2021). Wykonywanie tak określonych predykcji możliwe jest przy użyciu numerycznych modeli takich jak:

- modele symulacyjne pracy PMG (Shin i Lee, 2011; Song i in., 2016);
- modele numeryczne wykonane na podstawie charakterystyk pracy PMG.

Pierwszy z wymienionych modeli, pomimo wysokiej wiarygodności prognozowania pracy magazynu (pod warunkiem prawidłowego skalibrowania modelu – dopasowania parametrów modelu w taki sposób, aby zminimalizować różnice wartości wyliczonych przez model i wartości zmierzonych w trakcie pracy PMG), jest niepraktyczny w codziennym użyciu. Spowodowane jest to koniecznością wykonania predykcji w krótkim czasie (do kilkunastu minut) w celu pilnego skorygowania zamówionej przez ZUM dobowej nominacji usługi magazynowej. Wykorzystanie modelu opartego na charakterystykach pracy PMG daje możliwość szybkiego wykonania predykcji pracy PMG. Taka predykcja w horyzoncie czasowym kilkunastu dni cechuje się podobnym – w porównaniu z modelowaniem symulacyjnym – stopniem dokładności. Nie bez znaczenia jest również łatwość korzystania z tak

zbudowanego modelu (w porównaniu z wykorzystywaniem modeli symulacyjnych).

Celem opisywanego zadania jest opracowanie numerycznego modelu i zaimplementowanie go do postaci programu komputerowego – w formie narzędzia do sprawnego korzystania z opracowanych wcześniej charakterystyk. Dotychczas wykonywane charakterystyki pracy PMG, ze względu na ich formę (tabele i/lub wykresy), są niewygodne w praktycznym zastosowaniu i mogą (w przypadku niewłaściwego interpretowania) stwarzać ryzyko popełniania błędów. Opracowanie narzędzia informatycznego na podstawie charakterystyk pracy PMG w znacznym stopniu eliminuje obie wymienione wady (Kuncir i in., 2003; Paliński, 2018; Tanbhir i in., 2024). Zastosowanie opracowanego oprogramowania pozwala na szybkie wykonanie predykcji mocy odbioru i zatłaczania gazu. Dodatkową zaletą opracowanego modelu (w porównaniu z korzystaniem z tabel i wykresów zawierających wartości dyskretyzowane) jest możliwość sterowania parametrami pracy PMG (stan magazynu i ciśnienie odbioru/ssania) w pełnej ciągłości parametrów (w ich dozwolonych granicach). Stało się to możliwe wskutek wprowadzenia ciągłych funkcji opisujących zmienność odpowiednich parametrów. Zaprezentowane wyniki predykcji odbioru i zatłaczania gazu zostały uzyskane na podstawie charakterystyk opracowanych dla testowego PMG. W związku z tym dane użyte do ich wykonania należy traktować jako dane przykładowe.

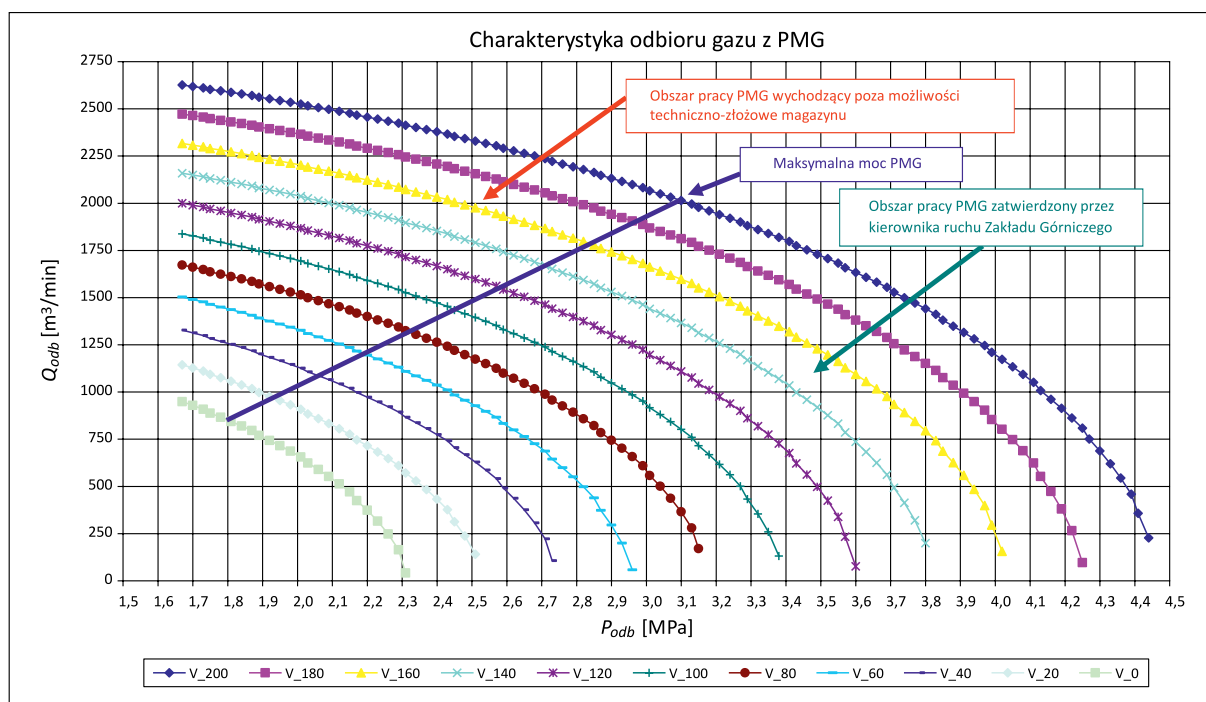
Oprogramowanie modelu powstało przy użyciu języka programowania Python. Na tym etapie program jest uruchamiany w środowisku programistycznym. W przypadku zainteresowania firmy Gas Storage Poland sp. z o.o., pełniącej rolę OSM, tym programem istnieje możliwość opracowania go w wersji skomercjalizowanej.

Charakterystyki odbioru i zatłaczania gazu do/z PMG

Charakterystyki pracy PMG wykonywane są na podstawie analizy mocy odbioru i zatłaczania gazu w danych warunkach techniczno-łożowych, do których należą: stan magazynu i odpowiadające mu ciśnienie odbioru/ssania. Charakterystyki mocy odbioru i zatłaczania zilustrowano na rysunkach 1 i 2.

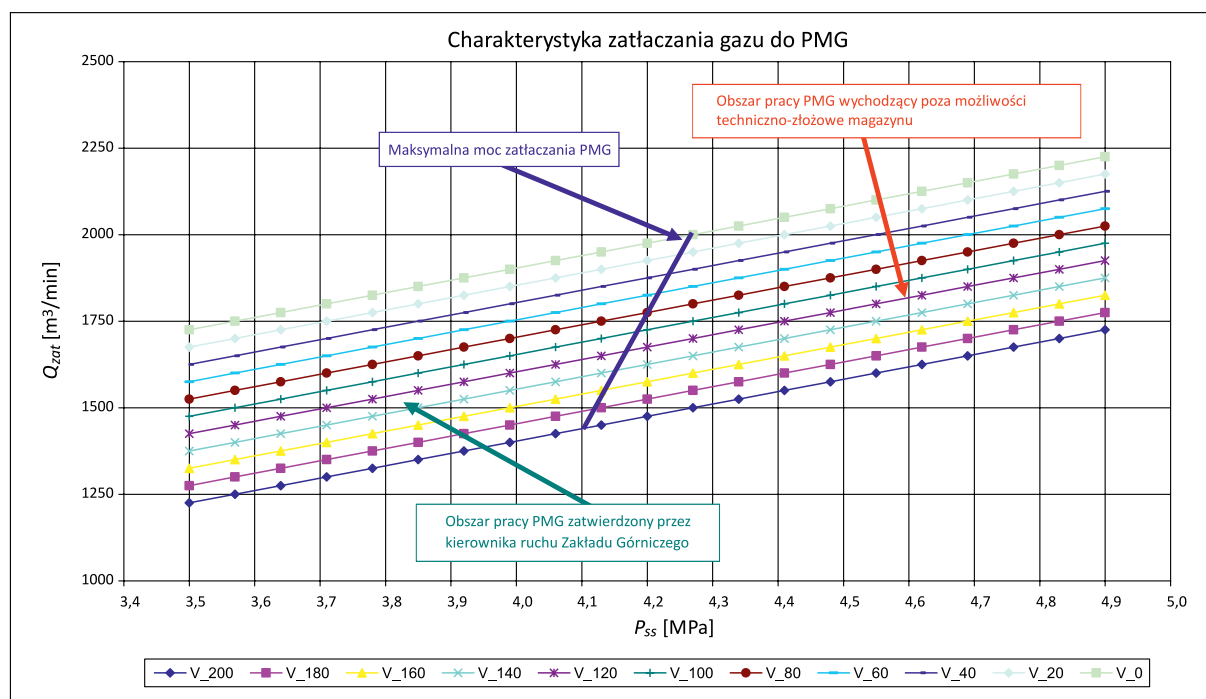
Zaprezentowane wykresy obrazują zależność mocy odbioru/zatłaczania gazu z/do PMG w zależności od ciśnienia odbioru, P_{odb} , lub ssania, P_{ss} . Poszczególne linie wykresów odnoszą się do kolejnych stanów magazynu (pojemności czynnej, V_a), począwszy od $V_a = 0$ do $V_a = 200$ mln m³, co 20 mln m³.

Moc odbioru/zatłaczania gazu: $Q_{odb}(V_a, P_{odb})$ dla odbioru i $Q_{zat}(V_a, P_{ss})$ dla zatłaczania jest funkcją dwóch zmiennych: stanu magazynu, V_a , oraz ciśnienia, P_{odb} , P_{ss} . Warto zauważyć,



Rysunek 1. Charakterystyka mocy odbioru gazu z PMG

Figure 1. Characteristics of gas collection capacity from UGS



Rysunek 2. Charakterystyka mocy załaczania gazu do PMG

Figure 2. Characteristics of gas injection capacity to UGS

że V_a posiada 10 wartości (w opisywanym przykładzie), więc jest bardziej parametrem niż zmienną. Dodatkowo wartości zobrazowane na krzywych V_a są również dyskretne (wyliczone dla ograniczonej liczby ciśnień).

Parametry pracy PMG (maksymalne moce odbioru) dla stanu magazynu:

(i) przed rozpoczęciem odbioru:

$$V_a = 200 \text{ mln m}^3, P_{odb} = 3,1 \text{ MPa}, Q_{\max} = 2006 \text{ m}^3/\text{min};$$

(ii) po zakończeniu odbioru:

$$V_a = 0 \text{ mln m}^3, P_{odb} = 1,8 \text{ MPa}, Q_{\max} = 853 \text{ m}^3/\text{min}.$$

Parametry pracy PMG (maksymalne moce załaczania) dla stanu magazynu:

(i) przed rozpoczęciem zatłaczania:

$$V_a = 0 \text{ mln m}^3, P_{ss} = 4,27 \text{ MPa}, Q_{\max} = 2000 \text{ m}^3/\text{min};$$

(ii) po zakończeniu zatłaczania:

$$V_a = 200 \text{ mln m}^3, P_{ss} = 4,1 \text{ MPa}, Q_{\max} = 1225 \text{ m}^3/\text{min}.$$

Zakres ciśnień ssania (P_{ss}): 3,5–4,27 MPa.

Model krótkoterminowego prognozowania odbioru i zatłaczania gazu

Opracowanie modelu wymagało zrealizowania następujących etapów:

- 1) interpolowania punktów każdej krzywej V_a wielomianem stopnia 5, co pozwoliło na uzyskanie ciągłych funkcji V_a zależnych od ciśnienia;
- 2) opracowania algorytmu interpolacji przestrzennej (w układzie $V_a, P_{odb}/P_{ss}$) funkcji $Q_{odb}(V_a, P_{odb})$ i $Q_{zat}(V_a, P_{ss})$, dzięki czemu obie funkcje zostały określone w oparciu o ciągłą zmienną V_a .

Wykonanie tych etapów pozwala na wyliczenie mocy odbioru/zatłaczania PMG w dowolnym punkcie (V_a, P_{odb}) lub (V_a, P_{ss}).

Linie wykresów rozdzielone są na dwa obszary:

- 1) obszar pracy PMG zatwierdzony przez kierownika ruchu zakładu górniczego;
- 2) obszar pracy PMG wykraczający poza możliwości techniczno-złożowe systemu magazynowania gazu.

Pierwszy obszar określa zakres parametrów złożowych (stan PMG oraz ciśnienie odbioru/ssania), dla których możliwa jest praca PMG. Zakres ten wyznaczony jest przez: możliwości złożowe PMG (McVay i Spiveya, 2001; Moradi, 2009; Filar i in., 2014), parametry pracy instalacji napowierzchniowej (zakres mocy systemów sprężających i osuszających) (Kwilosz, 2018), parametry pracy systemu gazowniczego (ciśnienie w punkcie zdawczo-odbiorczym, przepustowość gazociągów) (Danel i in., 2013; Moska, 2022). Wyliczenie mocy odbioru/zatłaczania dla parametrów znajdujących się w tym obszarze sprowadza się do wyliczenia wartości funkcji: $Q_{odb}(V_a, P_{odb})$ i $Q_{zat}(V_a, P_{ss})$.

Drugi z wymienionych obszarów określa zakres parametrów, w którym nie można realizować odbioru/zatłaczania gazu z/do PMG. Sposób wyliczenia prognozowanej mocy PMG, dla parametrów z tego obszaru, został opisany w dalszej części opracowania. Obydwa opisane obszary rozdziela odcinek (najczęściej linia łamana) wyznaczający punkty (V_a, P_{odb}) lub (V_a, P_{ss}) obszaru charakterystyki, dla których wyliczona moc odbioru/zatłaczania osiąga maksymalną wartość. Formalnie wymieniony odcinek (linia łamana) należy do obszaru pierwszego.

Kolejne etapy realizacji algorytmu predykcji mocy zatłaczania lub odbioru dla kolejnych n kroków (dni) dla danego zestawu parametrów (V_a, P_{odb}) lub (V_a, P_{ss}) i współczynnika zmiany ciśnienia λ są następujące:

- 1) Zdefiniowanie startowego zestawu parametrów ($V_{a,0}, P_{odb,0}$) lub ($V_{a,0}, P_{ss,0}$) oraz współczynnika zmiany ciśnienia λ . $\lambda = 1$ oznacza brak zmiany ciśnienia w kolejnych krokach predykcji. Na przykład: $\lambda = 0,96$ oznacza spadek ciśnienia o 4%, $\lambda = 1,04$ oznacza wzrost ciśnienia o 4% w każdym kolejnym kroku (dniu) predykcji.
- 2) Rozstrzygnięcie, w którym obszarze charakterystyki znajduje się punkt wyznaczony zestawem parametrów.
- 3) Jeżeli punkt (wyliczony w dowolnym kroku k predykcji) znajduje się w obszarze pierwszym:
 - wyliczana jest moc odbioru $Q_{odb}(V_{a,k}, P_{odb,k})$ dla odbioru lub $Q_{zat}(V_{a,k}, P_{ss,k})$ dla zatłaczania;
 - wyliczana jest kolejna wartość stanu magazynu: $V_{a,k+1} = V_{a,k} - Q_{odb}(V_{a,k}, P_{odb,k})$ dla odbioru lub $V_{a,k+1} = V_{a,k} + Q_{zat}(V_{a,k}, P_{ss,k})$ dla zatłaczania;
 - wyliczane jest ciśnienie odbioru $P_{odb,k+1} = P_{odb,k} \times \lambda$ dla odbioru lub $P_{ss,k+1} = P_{ss,k} \times \lambda$ dla zatłaczania;
 - następuje powrót do pkt 2 i proces ten powtarzany jest dla kolejnych kroków (dni) predykcji, aż do $k = n$.
- 4) Jeśli punkt (w dowolnym kroku predykcji) znajdzie się w obszarze drugim:
 - wyliczany jest nowy zestaw parametrów: ($V_{a,k}, P_{odb,max(k)}$) lub ($V_{a,k}, P_{ss,max(k)}$) znajdujący się na przecięciu krzywej $V_{a,k}$ z odcinkiem wyznaczającym parametry pracy PMG z maksymalną mocą;
 - wyliczana jest moc odbioru $Q(V_{a,k}, P_{odb,max(k)})$ dla odbioru lub $Q(V_{a,k}, P_{ss,max(k)})$ dla zatłaczania. Jest to maksymalna moc PMG dla danego stanu magazynu $V_{a,k}$;
 - wyliczany jest kolejny stan PMG: $V_{a,k+1} = V_{a,k} - Q_{odb}(V_{a,k}, P_{odb,max(k)})$ dla odbioru lub $V_{a,k+1} = V_{a,k} + Q_{zat}(V_{a,k}, P_{ss,max(k)})$ dla zatłaczania. W tym przypadku ciśnienie nie jest modyfikowane, kolejne wartości mocy odbioru lub zatłaczania obliczane są z maksymalną mocą pracy PMG dla kolejnych stanów magazynu $V_{a,k+1}, V_{a,k+2}, \dots, V_{a,n}$.

Przykłady zastosowania algorytmu dla testowego PMG

Przykład O1 – magazyn na wczesnym etapie odbioru pojemności czynnej

Predykcja odbioru gazu z PMG

Dane wejściowe:

- stan PMG: 165 000 tys. m³, liczba dni: $n = 20$.

Wariant O1,1 (parametry pracy PMG poza dozwolonym obszarem):

- ciśnienie odbioru: $P_{odb} = 2,6 \text{ MPa}$;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,0$.

Wariant O1,2 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie odbioru: $P_{odb} = 3,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 0,99$.

Wariant O1,3 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie odbioru: $P_{odb} = 3,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 0,995$.

Wariant O1,4 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie odbioru: $P_{odb} = 3,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,0$.

Wariant O1,5 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie odbioru: $P_{odb} = 3,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,002$.

Wariant O1,6 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

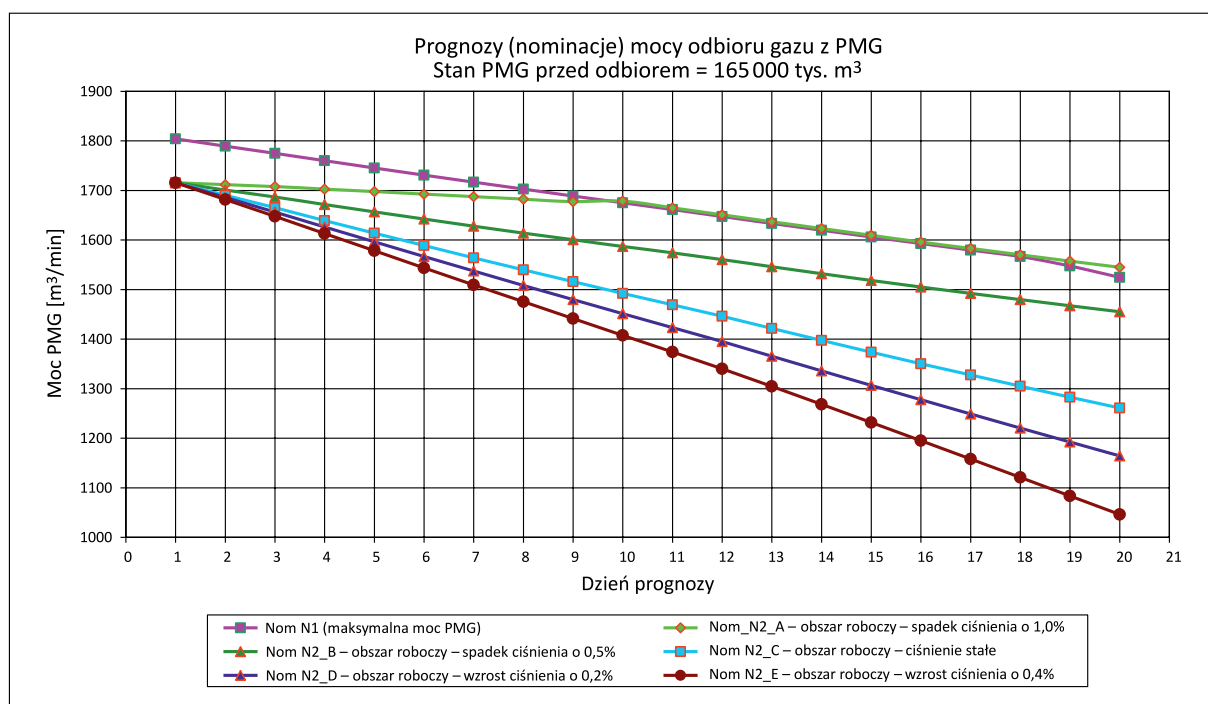
- ciśnienie odbioru: $P_{odb} = 3,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,002$.

Wyniki predykcji odbioru gazu zaprezentowano na rysunku 3, a odpowiadające im zmiany stanu PMG – na rysunku 4. Na rysunku 5 przedstawiono wolumen odebranego gazu dla poszczególnych wariantów.

Analizując wyniki zilustrowane na rysunku 3, można poczynić następujące spostrzeżenia:

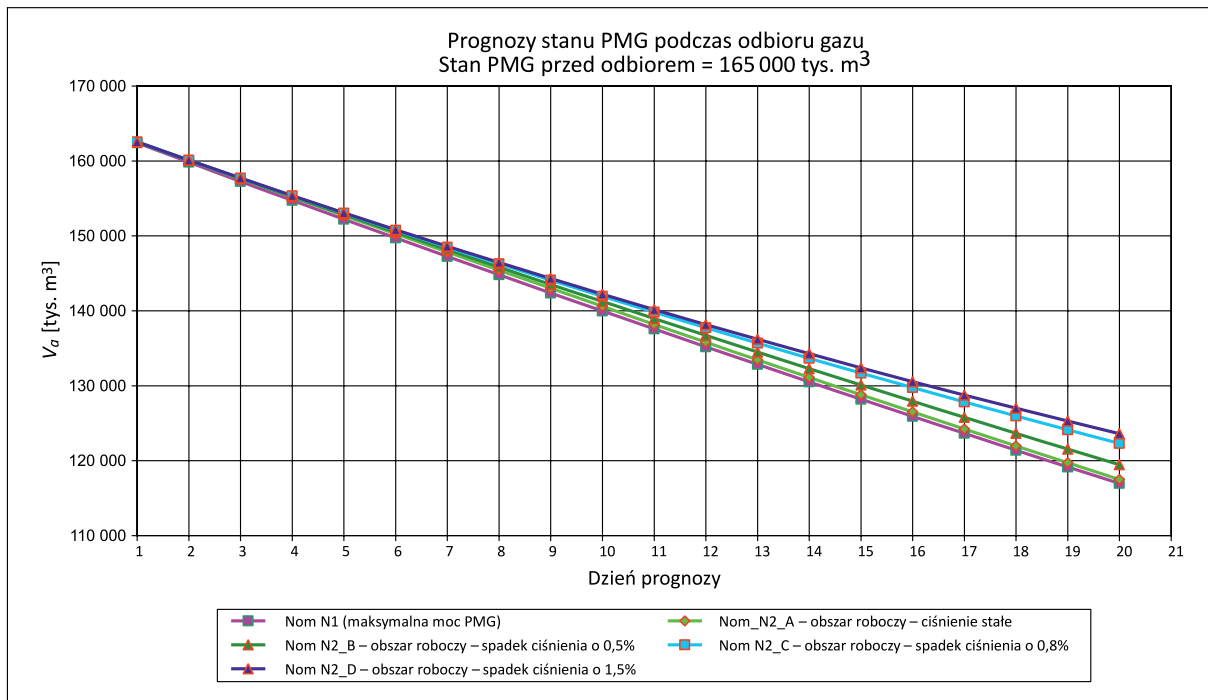
- 1) W wariantcie O1,1 magazyn odbierał przez cały okres prognozy z pełną mocą (linia Nom N1), gdyż początkowy zestaw parametrów znajdował się w obszarze zabronionym.

- 2) W wariantcie O1,2 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono spadek zmiany ciśnienia o 1,0% w każdym kolejnym dniu prognozy. Tak znaczny spadek ciśnienia odbioru w kolejnych dniach prognozy sprawił, że magazyn przez pierwsze 10 dni odbierał z minimalnym spadkiem mocy. W 10. dniu prognozy parametry pracy PMG znalazły się w obszarze zabronionym i przez kolejne dni (10–20) magazyn odbierał z pełną mocą (linia Nom N2_A).
- 3) W wariantcie O1,3 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono obniżenie ciśnienia odbioru o 0,5% w każdym kolejnym dniu prognozy. Magazyn przez wszystkie dni prognozy odbierał ze spadkiem mocy. Spadek mocy odbioru jest większy od spadku mocy w wariantcie O1,2. Wynika to z sukcesywnego zmniejszania tempa spadku ciśnienia odbioru.
- 4) W wariantcie O1,4 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono wydobyte ze stałym ciśnieniem odbioru. Magazyn przez wszystkie dni prognozy odbierał ze spadkiem mocy. Zwiększenie dynamiki spadku ciśnienia odbioru spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy odbioru w porównaniu ze spadkiem mocy w wariantcie O1,3.
- 5) W wariantcie O1,5 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono zwiększenie ciśnienia odbioru o 0,2% w każdym kolejnym dniu prognozy. Wzrost ciśnienia odbioru spowodował kolejny spadek mocy odbioru w kolejnych dniach prognozy.



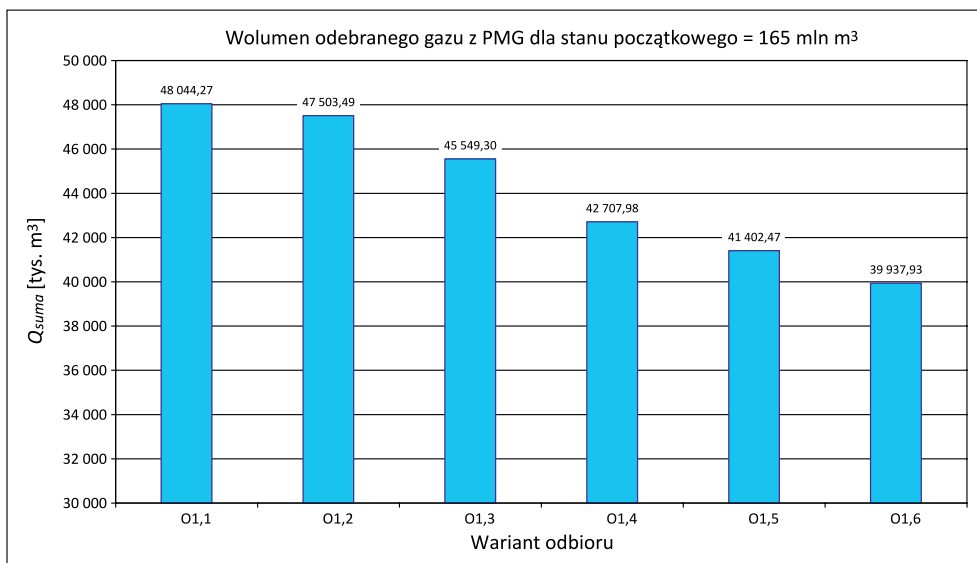
Rysunek 3. Prognozy mocy odbioru gazu z PMG dla przykładu O1

Figure 3. Forecasts of gas collection capacity from UGS for example O1



Rysunek 4. Prognozy stanu PMG podczas odbioru gazu dla przykładu O1

Figure 4. Forecasts of UGS status during gas collection for example O1



Rysunek 5. Wolumen odebranego gazu dla przykładu O1

Figure 5. Volume of received gas for example O1

6) W ostatnim z omawianych wariantów – O1,6 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono kolejne zwiększenie ciśnienia odbioru o 0,4% w każdym kolejnym dniu prognozy. Wzrost ciśnienia odbioru spowodował kolejny spadek mocy odbioru w kolejnych dniach prognozy. W tym wariantcie zanotowano największą dynamikę spadku ciśnienia.

Na rysunku 4 zobrazowano tempo spadku stanu PMG w poszczególnych wariantach prognozy. Najniższy poziom stanu magazynu (116 992 tys. m³) PMG osiągnął w ostatnim

dniu prognozy w wyniku zrealizowania wariantu O1,1, gdy magazyn odbierał z pełną mocą, a najwyższy poziom stanu magazynu (najmniej odebranego gazu) wystąpił po zrealizowaniu wariantu O1,6 (stan magazynu w 20. dniu: 125 062 tys. m³).

Na rysunku 5 zaprezentowano zmianę wolumenu odebranego gazu w zależności od wariantu odbioru. Najwięcej gazu (48 044 tys. m³) magazyn odebrał, gdy pracował z pełną mocą (wariant O1,1), a najmniej (39 938 tys. m³), gdy założono wydobycie z największym wzrostem ciśnienia (wariant O1,6).

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

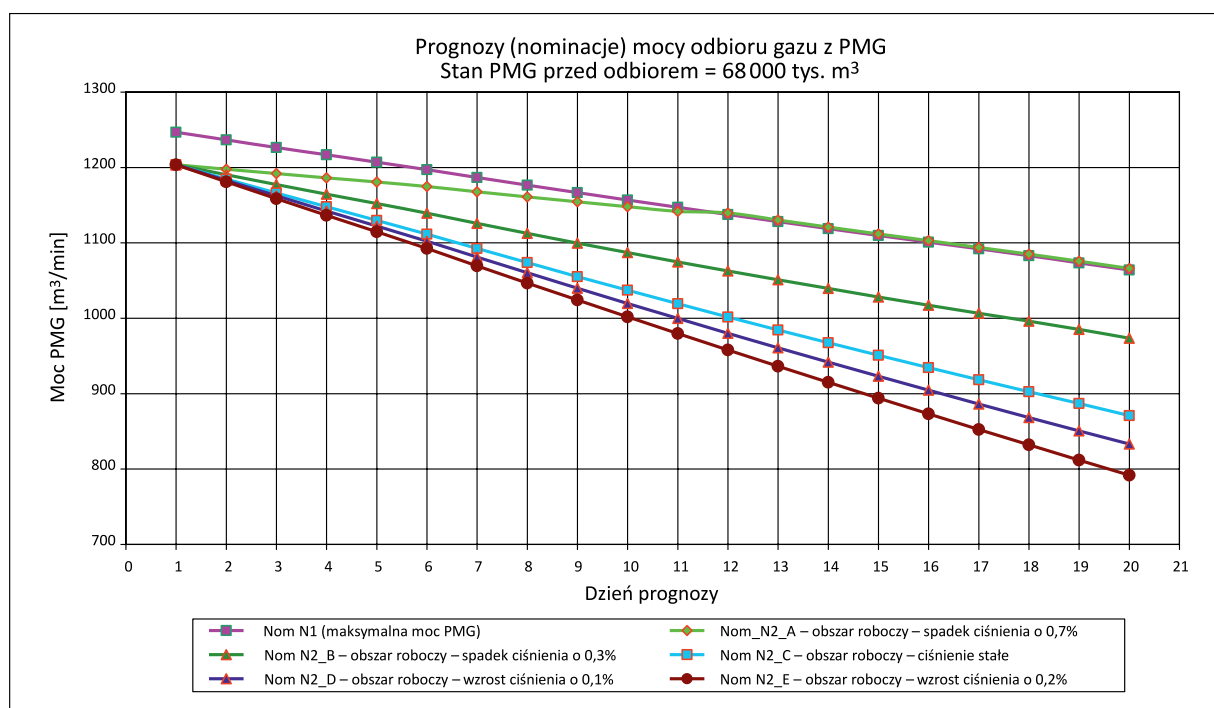
Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

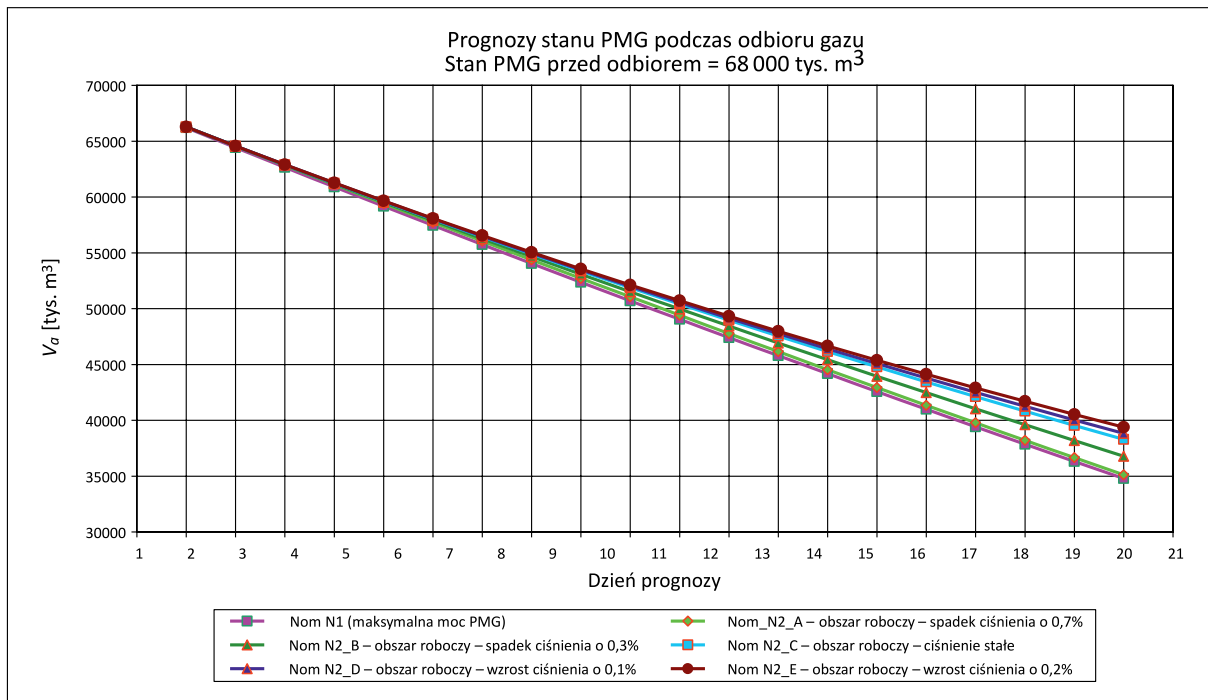
Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

Przykład O2 – magazyn na zaawansowanym etapie odbioru pojemności czynnej

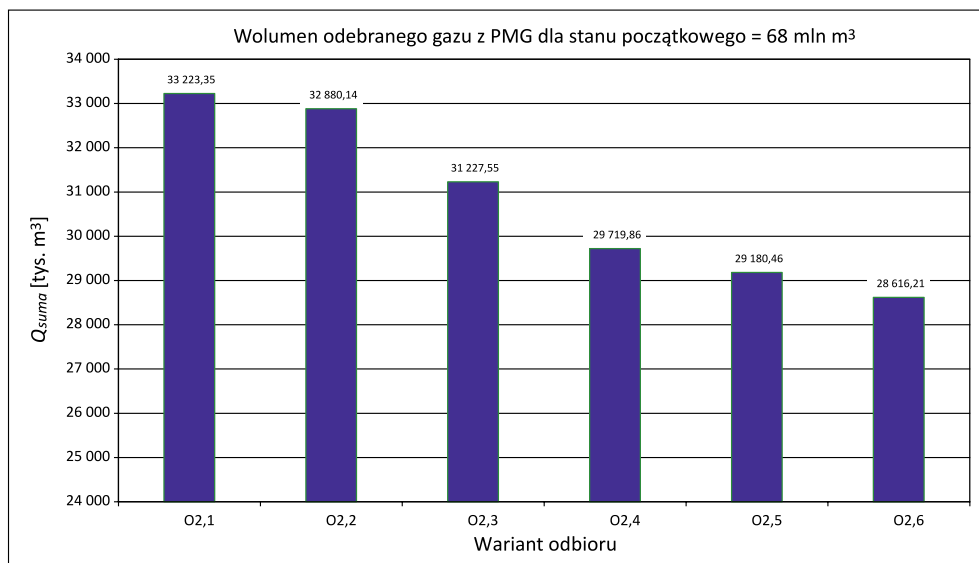


Rysunek 6. Prognozy mocy odbioru gazu z PMG dla przykładu O2

Figure 6. Forecasts of gas collection capacity from UGS for example O2



Rysunek 7. Prognozy stanu PMG podczas odbioru gazu dla przykładu O2
Figure 7. Forecasts of UGS status during gas collection for example O2



Rysunek 8. Wolumen odebranego gazu dla przykładu O2
Figure 8. Volume of gas received for example O2

- 4) W wariancie O1,4 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono wydobywanie ze stałym ciśnieniem odbioru. Magazyn przez wszystkie dni prognozy odbierał ze spadkiem mocy. Zwiększenie dynamiki spadku ciśnienia odbioru spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy odbioru w porównaniu ze spadkiem mocy w wariancie O1,3.
- 5) W wariancie O1,5 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono nieznaczne zwiększenie ciśnienia odbioru (o 0,1%) w każdym kolejnym dniu prognozy. Wzrost ciśnienia odbioru spowodował kolejny spadek mocy odbioru w kolejnych dniach prognozy.
- 6) W ostatnim z omawianych wariantów – O1,6 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono kolejne niewielkie zwiększenie ciśnienia odbioru, o 0,2%, w każdym kolejnym dniu prognozy. Wzrost ciśnienia odbioru spowodował kolejny spadek mocy odbioru w kolejnych dniach prognozy. W tym wariancie zanotowano największą dynamikę spadku ciśnienia.

Na rysunku 7 zobrazowano tempo spadku stanu PMG w poszczególnych wariantach prognozy. Najniższy poziom stanu magazynu (34 777 tys. m³) PMG osiągnął w ostatnim dniu prognozy w wyniku zrealizowania wariantu O2,1, gdy magazyn odbierał z pełną mocą, a najwyższy poziom stanu magazynu (najmniej odebranego gazu) wystąpił po zrealizowaniu wariantu O2,6 (stan magazynu w 20. dniu: 39 384 tys. m³).

Na rysunku 8 zaprezentowano zmianę wolumenu odebranego gazu w zależności od wariantu odbioru. Najwięcej gazu (33 223 tys. m³) magazyn odebrał, gdy pracował z pełną mocą (wariant O2,1), a najmniej (28 616 tys. m³), gdy założono wydobycie z największym wzrostem ciśnienia (wariant O2,6).

Przykład Z1 – magazyn na wczesnym etapie zatłaczania pojemności czynnej

Przykład zatłaczania gazu do PMG

Dane wejściowe:

- stan PMG: 60 000 tys. m³, liczba dni: $n = 20$.

Wariant Z1,1 (parametry pracy PMG poza dozwolonym obszarem):

- ciśnienie zatłaczania: $P_{ss} = 4,5$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,0$.

Wariant Z1,2 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zatłaczania: $P_{ss} = 4,05$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 0,998$.

Wariant Z1,3 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zatłaczania: $P_{ss} = 4,05$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 0,999$.

Wariant Z1,4 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zatłaczania: $P_{ss} = 4,05$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,0$.

Wariant Z1,5 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

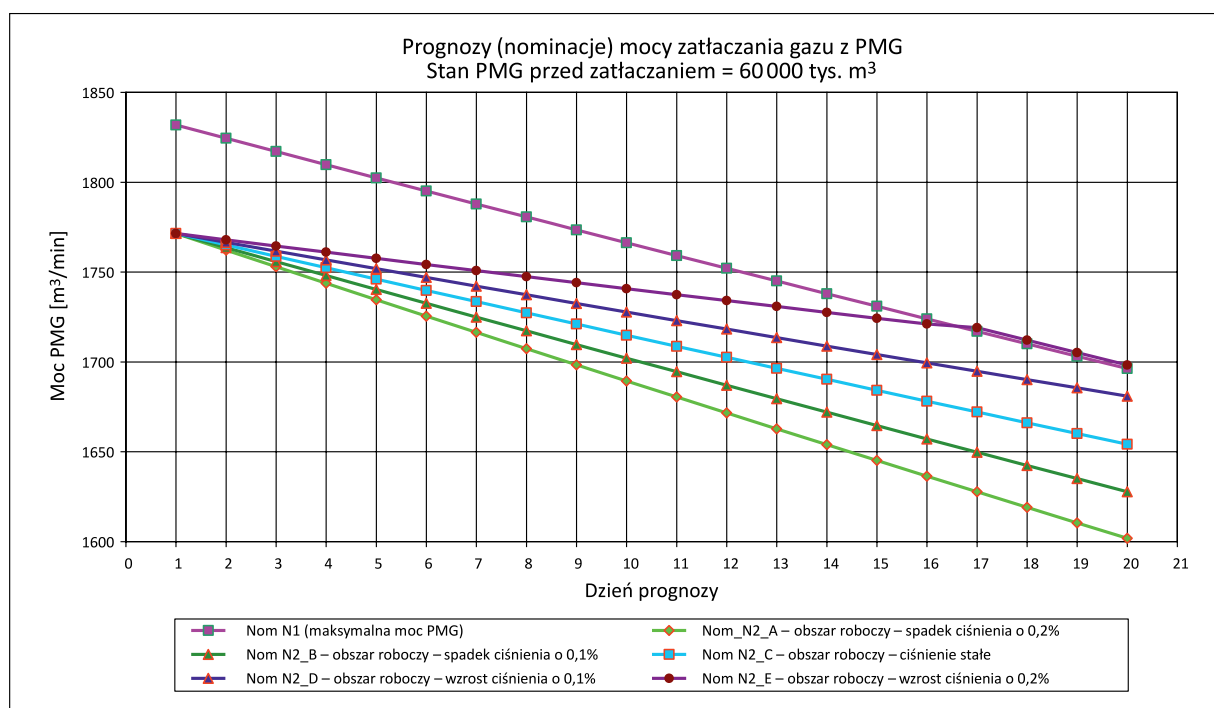
- ciśnienie zatłaczania: $P_{ss} = 4,05$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,001$.

Wariant Z1,6 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zatłaczania: $P_{ss} = 4,05$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,002$.

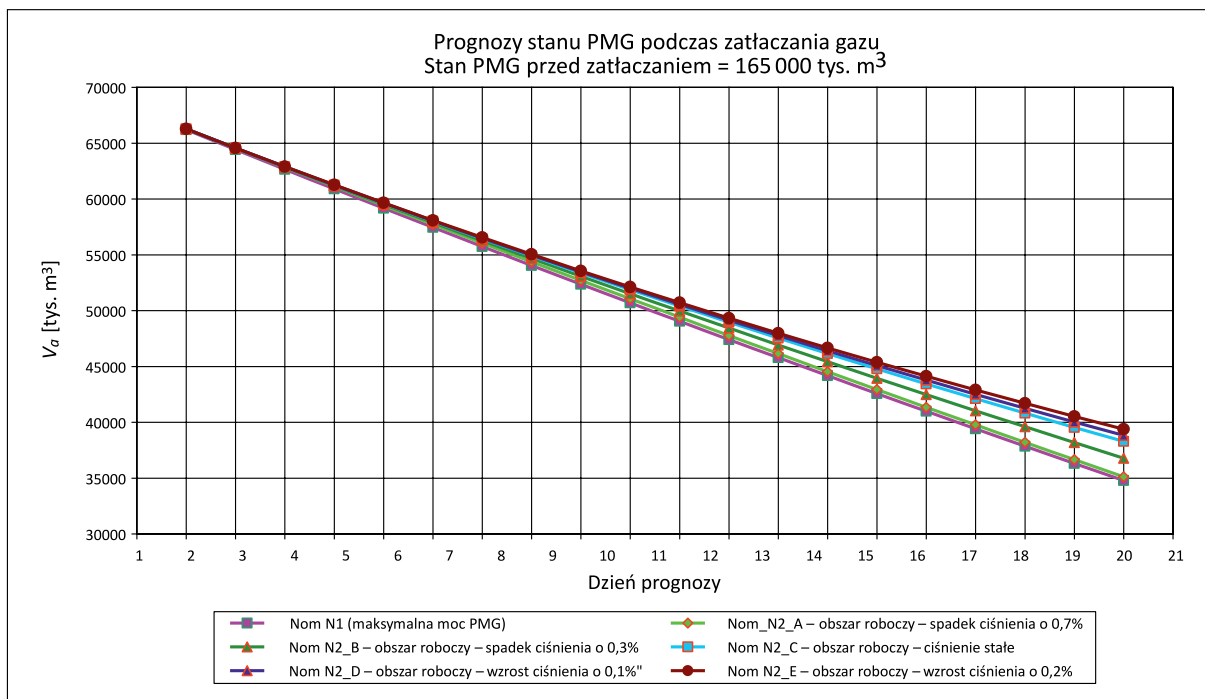
Wyniki predykcji zatłaczania gazu przedstawiono na rysunku 9, a odpowiadające im zmiany stanu PMG – na rysunku 10. Na rysunku 11 zaprezentowano wolumen zatłoczonego gazu dla poszczególnych wariantów. Analizując wyniki zobrazone na rysunku 9, można zauważyć następujące zależności:

- 1) W wariantcie Z1,1 magazyn zatłaczał przez cały okres prognozy z pełną mocą (linia Nom N1), gdyż początkowy zestaw parametrów znajdował się w obszarze zabronionym. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1832 m³/min do 1696 m³/min.
- 2) W wariantcie Z1,2 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono spadek ciśnienia o 0,2%

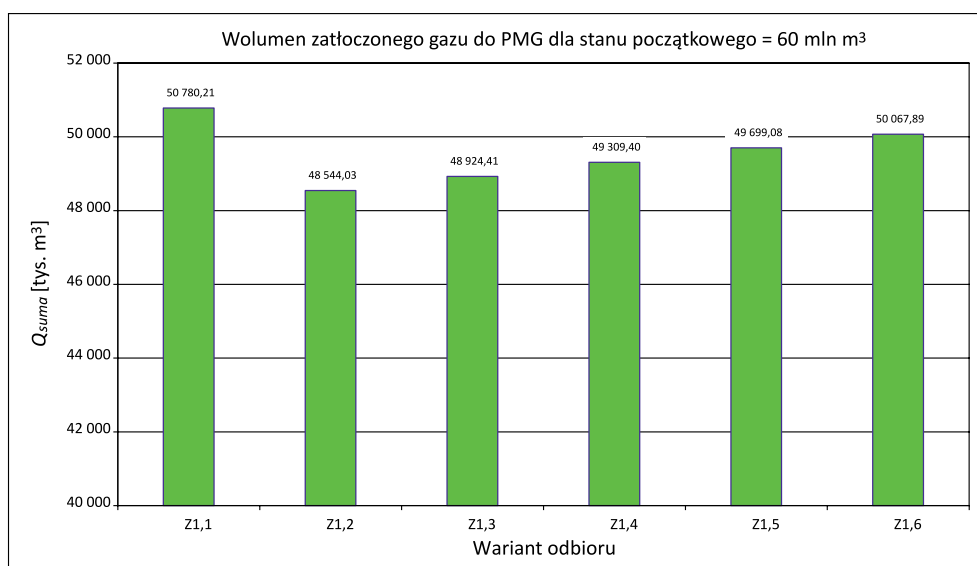


Rysunek 9. Prognozy mocy zatłaczania gazu do PMG dla przykładu Z1

Figure 9. Forecasts of gas injection capacity to UGS for example Z1



Rysunek 10. Prognozy stanu PMG podczas zatłaczania gazu dla przykładu Z1
 Figure 10. Forecasts of the UGS condition during gas injection for example Z1



Rysunek 11. Wolumen zatłoczonego gazu dla przykładu Z1
 Figure 11. Volume of injected gas for example Z1

przez cały okres prognozy. Magazyn przez wszystkie dni zatłaczał ze spadkiem mocy (linia Nom N2_A). Magazyn pracował w zakresie mocy od 1771 m³/min do 1602 m³/min. W tym wariantcie zanotowano największy spadek mocy zatłaczania.

3) W wariantcie Z1,3 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono niewielki spadek ciśnienia ssania (o 0,1%) w każdym kolejnym dniu prognozy. Magazyn przez wszystkie dni prognozy zatłaczał ze spadkiem mocy. Spadek mocy zatłaczania jest mniejszy

od spadku mocy w wariantcie Z1,2. Wynika to z sukcesywnego wzrostu ciśnienia ssania, co poprawia warunki pracy PMG. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1771 m³/min do 1627 m³/min.

4) W wariantcie Z1,4 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono stałą wartość ciśnienia w każdym kolejnym dniu prognozy. Magazyn przez wszystkie dni prognozy odbierał ze spadkiem mocy. Ustalenie spadku ciśnienia na stałym poziomie spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy odbioru w porównaniu

ze spadkiem mocy w wariancie Z1,3. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1771 m³/min do 1654 m³/min.

- 5) W wariancie Z1,5 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono niewielki wzrost ciśnienia ssania (o 0,1%) w każdym kolejnym dniu prognozy, co spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1771 m³/min do 1681 m³/min.
- 6) W wariancie Z1,6 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono kolejny niewielki wzrost ciśnienia ssania (o 0,2%) w każdym kolejnym dniu prognozy, co spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy. W tym wariancie prognozy magazyn przez pierwszych 17 dni odbierał ze spadkiem mocy zataczania. W 17. dniu prognozy parametry pracy PMG znalazły się w obszarze zabronionym i przez kolejne dni (17–20) magazyn zataczał z pełną mocą. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1771 m³/min do 1698 m³/min.

Na rysunku 11 zaprezentowano zmianę wolumenu zatłoczonego gazu w zależności od wariantu zataczania. Najwięcej gazu (50 780 tys. m³) magazyn zatłoczył, gdy pracował z pełną mocą (wariant Z1,1), a najmniej (48 544 tys. m³), gdy założono wydobycie z największym spadkiem ciśnienia (wariant Z1,6).

Przykład Z2 – magazyn na wczesnym etapie zataczania pojemności czynnej

Prognoza zataczania gazu do PMG

Dane wejściowe:

– stan PMG: 145 000 tys. m³, liczba dni: $n = 20$.

Wariant Z1,1 (parametry pracy PMG poza dozwolonym obszarem):

- ciśnienie zataczania: $P_{ss} = 4,5$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,0$.

Wariant Z1,2 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zataczania: $P_{ss} = 4,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 0,998$.

Wariant Z1,3 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zataczania: $P_{ss} = 4,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 0,999$.

Wariant Z1,4 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

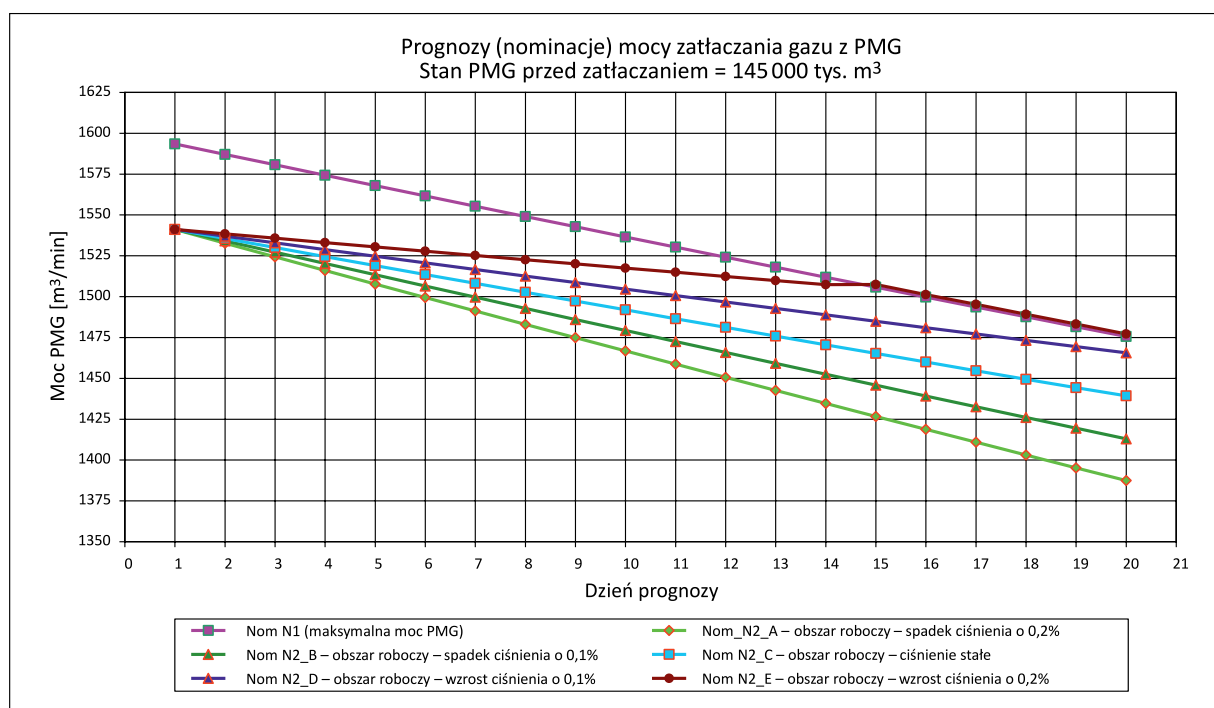
- ciśnienie zataczania: $P_{ss} = 4,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,0$.

Wariant Z1,5 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zataczania: $P_{ss} = 4,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,001$.

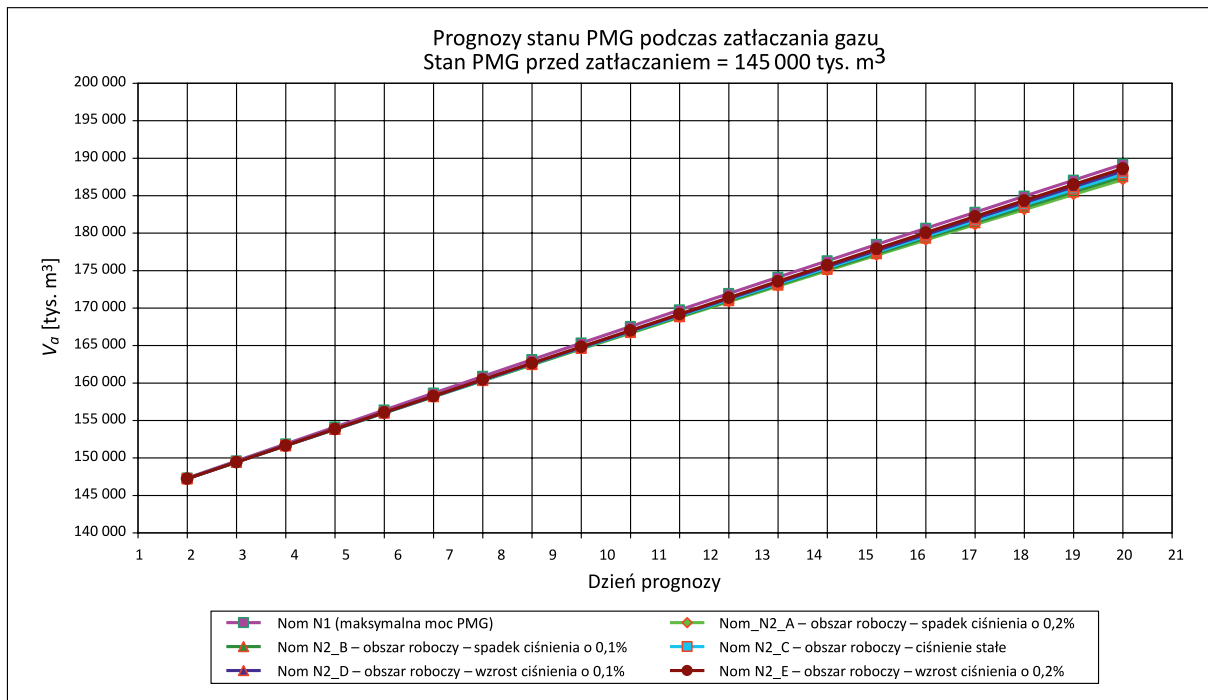
Wariant Z1,6 (parametry pracy PMG w obszarze dozwolonym):

- ciśnienie zataczania: $P_{ss} = 4,0$ MPa;
- współczynnik zmiany ciśnienia w kolejnych krokach: $\lambda = 1,002$.



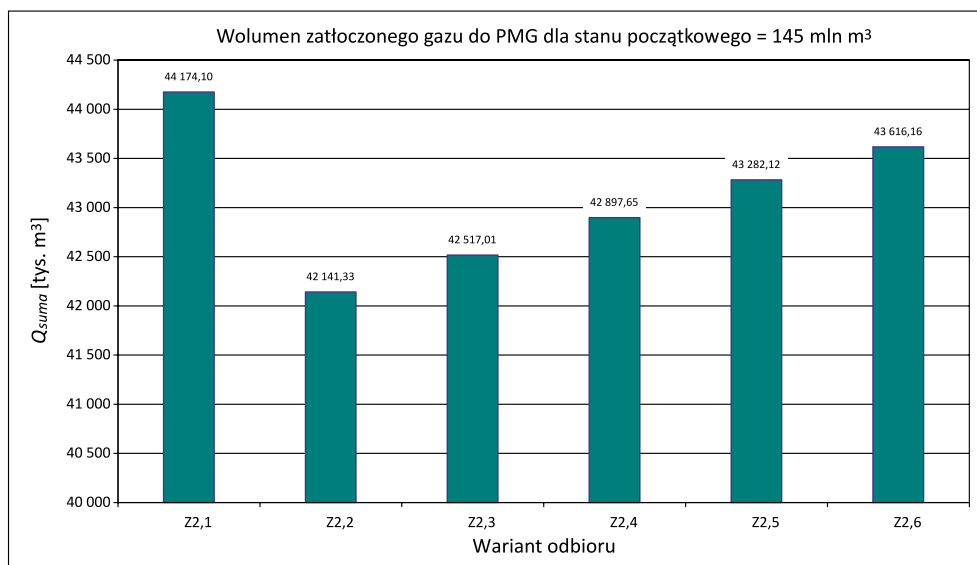
Rysunek 12. Prognozy mocy zataczania gazu do PMG dla przykładu Z2

Figure 12. Forecasts of gas injection capacity to UGS for example Z2



Rysunek 13. Prognozy stanu PMG podczas zatłaczania gazu dla przykładu Z2

Figure 13. Forecasts of UGS condition during gas injection for example Z2



Rysunek 14. Wolumen zatłoczonego gazu dla przykładu Z2

Figure 14. Volume of injected gas for example Z2

Wyniki predykcji zatłaczania gazu zaprezentowano na rysunku 12, a odpowiadające im zmiany stanu PMG – na rysunku 13. Na rysunku 14 przedstawiono wolumen zatłoczonego gazu dla poszczególnych wariantów. Analizując wyniki zobrazowane na rysunku 12, można poczynić następujące obserwacje:

1) W wariancie Z2,1 magazyn zatłaczał przez cały okres prognozy z pełną mocą (linia Nom N1), gdyż początkowy zestaw parametrów znajdował się w obszarze zabronionym. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1593 m³/min do 1476 m³/min.

- 2) W wariancie Z2,2 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono spadek ciśnienia o 0,2% przez cały okres prognozy. Magazyn przez wszystkie dni zatłaczał ze spadkiem mocy (linia Nom N2_A). Magazyn pracował w zakresie mocy od 1541 m³/min do 1387 m³/min. W tym wariancie zanotowano największy spadek mocy zatłaczania.
- 3) W wariancie Z2,3 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono niewielki spadek ciśnienia ssania (o 0,1%) w każdym kolejnym dniu

prognozy. Magazyn przez wszystkie dni prognozy zatłaczał ze spadkiem mocy. Spadek mocy zatłaczania jest mniejszy od spadku mocy w wariancie Z2,2. Wynika to z sukcesywnego wzrostu ciśnienia ssania, co poprawia warunki pracy PMG. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1541 m³/min do 1413 m³/min.

- 4) W wariancie Z2,4 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono stałą wartość ciśnienia w każdym kolejnym dniu prognozy. Magazyn przez wszystkie dni prognozy odbierał ze spadkiem mocy. Ustalenie spadku ciśnienia na stałym poziomie spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy odbioru w porównaniu ze spadkiem mocy w wariancie Z2,3. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1541 m³/min do 1439 m³/min.
- 5) W wariancie Z2,5 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono niewielki wzrost ciśnienia ssania (o 0,1%) w każdym kolejnym dniu prognozy, co spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1541 m³/min do 1466 m³/min.
- 6) W wariancie Z2,6 parametry początkowe znajdowały się w obszarze dozwolonym. Założono kolejny niewielki wzrost ciśnienia ssania (o 0,2%) w każdym kolejnym dniu prognozy, co spowodowało kolejne zmniejszenie tempa spadku mocy. W tym wariancie prognozy magazyn przez pierwszych 15 dni odbierał ze spadkiem mocy zataczania. W 15. dniu prognozy parametry pracy PMG znalazły się w obszarze zabronionym i przez kolejne dni (15–20) magazyn zatłaczał z pełną mocą. Magazyn pracował w zakresie mocy od 1541 m³/min do 1477 m³/min.

Na rysunku 13 zaprezentowano zmianę wolumenu zatłoczonego gazu w zależności od wariantu zatłaczania. Najwięcej gazu (44 174 tys. m³) magazyn zatłoczył, gdy pracował z pełną mocą (wariant Z2,1), a najmniej (42 141 tys. m³), gdy założono wydobycie z największym spadkiem ciśnienia (wariant Z2,6).

Wnioski

- Opracowany model krótkoterminowego prognozowania mocy odbioru i zatłaczania gazu do PMG może być pomocnym narzędziem służącym jako wsparcie dla służb dyspozytorskich OSM.
- Zaimplementowany algorytm w postaci programu komputerowego jest prosty w zastosowaniu i daje możliwość szybkiego wyznaczenia prognozowanych wielkości odbioru i zatłaczania gazu w dowolnym dniu pracy PMG.
- Zaprezentowane opracowanie jest kolejnym studium z cyklu tworzenia metod i programów inżynierskich do zarządzania pracą podziemnych magazynów gazu.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Numeryczny model wykonywania nominacji zapotrzebowania na gaz odbierany z podziemnych magazynów gazu* – praca INiG – PIB na zlecenie MEiN; nr zlecenia: 215/0031/24/01 nr archiwalny: DK-4100-17/2024/01.

Literatura

- Agate G., Colucci F., Guandalini R., Moia F., Pagotto R., Crosta G.B., 2017. A Numerical Modeling Approach to Investigate the Safety Aspects of the Gas Storage in a Deep Geological Reservoir. *Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy*: 29–31.
- Brkić V., Zelenika I., Mijić P., Medved I., 2021. Underground Gas Storage Process Optimisation with Respect to Reservoir Parameters and Production Equipment. *Energies*, 14: 4324. DOI: 10.3390/en14144324.
- Danel R., Otte L., Vancura V., Řepka M., 2013. Monitoring and balance of gas flow in underground gas storage. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6: 485–491. DOI: 10.1016/j.proeps.2013.01.063.
- Filar B., Miziołek M., Cicha-Szot R., Moska A., Kwilosz T., Szpunar T., 2014. Analiza możliwości zwiększenia pojemności czynnej podziemnych magazynów gazu w Polsce. *Nafta-Gaz*, 9: 571–580. DOI: 10.18668/ng.2024.09.05.
- Gas Storage Poland – działalność. <<https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/o-nas/#dzialalnosc>> (dostęp: 12.05.2025).
- Kuncir M., Chang J., Mansdorfer J., Dougherty E., 2003. Analysis and Optimal Design of Gas Storage Reservoirs. *Proceedings of the SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting, Pittsburgh, PA, USA*: 6–10. DOI: 10.2118/84822-MS.
- Kwilosz T., 2018. Algorytm prognozowania i optymalizacji kosztów sprężania gazu podczas eksploatacji PMG. *Nafta-Gaz*, 12: 938–943. DOI: 10.18668/NG.2018.12.08.
- Malakootia R., Azin R., 2011. The optimization of underground gas storage in a partially 21 depleted gas reservoir. *Petroleum Science and Technology*, 29(8): 824–836. DOI: 10.1080/10916460903486742.
- McVay D.A., Spivey J., 2001. Optimizing Gas-Storage Reservoir Performance. *SPE Reserv. Eval. Eng.*, 4: 173–178. DOI: 10.2118/28639-MS.
- Moradi B., 2009. Study of Gas Injection Effects on Rock and Fluid of a Gas Condensate Reservoir during Underground Gas Storage Process. *Proceedings of the Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Port of Spain, Trinidad and Tobago*: 14–15. DOI: 10.2118/121830-MS.
- Moska A., 2022. Różnicowanie się ciśnienia złożowego w PMG jako wskaźnik obecności niezidentyfikowanych elementów strukturalnych. *Nafta-Gaz*, 11: 805–814. DOI: 10.18668/NG.2022.11.04.
- Paliński A., 2018. Hurtownie danych i eksploracja danych w prognozowaniu popytu na gaz i usługi magazynowania gazu. *Nafta-Gaz*, 4: 283–289. DOI: 10.18668/NG.2018.04.04.
- Shin C.H., Lee J.H., 2011. A Numerical Study on the Compositional Variation and the Validity of Conversion of a Gas Condensate Reservoir into Underground Storage. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.*, 33: 1921–1932. DOI: 10.1080/15567036.2010.527906.
- Song X., Peng C., Li G., Wen K., 2016. A Probabilistic Model to Evaluate the Operation Reliability of the Underground System in Underground Gas Storage Transformed from Depleted Gas Reservoir. *Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand*, 14–16. DOI: 10.2523/IPTC-18664-MS.

Tanbhir A.A., Monir M.U., Hossain M.J., 2024. Underground natural gas storage. [W:] Rahimpour M.R., Makarem M.A., Meshksar M. (red.). *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and*

Applications. Volume 6: Natural Gas Transportation and Storage. Elsevier, Amsterdam: 125–146.



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: tadeusz.kwilosz@inig.pl



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



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



Mgr Mariusz MIZIOŁEK
 Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: mariusz.mizolek@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU PRZESYŁANIA I DYSTRYBUCJI GAZU

- badania wyrobów z polietylenu do budowy gazociągów, wodociągów oraz kanalizacji deszczowej i sanitarnej;
- badania systemów rurowych z tworzyw sztucznych do instalacji wody ciepłej i zimnej;
- badania armatury metalowej do sieci i instalacji gazowych oraz wodociągowych;
- badania armatury sanitarnej oraz do instalacji centralnego ogrzewania i solarnych;
- badania powłok ochronnych z tworzyw sztucznych na rurach i armaturze stalowej;
- ocena stopnia zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych;
- ocena stanu technicznego izolacji gazociągów stalowych metodami bezwykopowymi;
- badania nowych materiałów z tworzyw sztucznych do budowy gazociągów;
- badania systemów z PE pod kątem możliwości ich stosowania do przesyłania mieszaniny gazu ziemnego i wodoru;
- specjalistyczne szkolenia – szkolenie i kwalifikacja personelu zgrzewającego rury i kształtki z PE wg PN-EN 13067 w INiG-PIB jako Ośrodkiem Szkoleniowym i Egzaminacyjnym uznanym przez UDT-CERT.



Kierownik: mgr inż. Piotr Szewczyk Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
 Telefon: 12 617 74 42 Faks: 12 653 16 65 E-mail: piotr.szewczyk@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
 – Państwowy Instytut Badawczy