

## Wykorzystanie komercyjnego symulatora złożowego jako narzędzia wspomagającego w symulacji i analizie parametrów pracy podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej

The use of a commercially available reservoir simulator as a supporting tool in the simulation and analysis of parameters of underground gas storage in a salt cavern

Marcin Majkrzak

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono opracowaną metodykę oraz uzyskane wyniki modelowania umożliwiającego weryfikację potencjalnego wykorzystania określonych pakietów oprogramowania CMG (stanowiącego przykład komercyjnego symulatora złożowego) firmy Computer Modelling Group Ltd., jako narzędzia wspomagającego w symulacji i analizie zmian wybranych parametrów pracy podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej. W ramach realizacji zadania, przy użyciu pakietu Builder, podjęto próbę budowy modelu statycznego komory magazynowej – jako podstawowego elementu modelu symulacyjnego. Modelowanie dynamiczne, przeprowadzone z wykorzystaniem pakietu IMEX, obejmowało prace skoncentrowane na symulacji konwergencji komory, jako parametrze mającym kluczowy wpływ na efektywność eksploatacji podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej. Ze względu na duże rozmiary modelu statycznego zbudowanego w oparciu o rzeczywiste dane miąższości i wartości promienia ekwiwalentnego plastrów komory pochodzących z wykonanych pomiarów echometrycznych oraz ograniczeń systemowych oprogramowania, zdecydowano się na budowę uproszczonego (składającego się z mniejszej liczby komórek) modelu cylindrycznego – charakteryzującego się stałą wartością miąższości i promienia wyznaczonych plastrów. Przeprowadzona analiza możliwości symulacyjnych wykazała potrzebę utworzenia dodatkowego, wpisującego się w model cylindryczny „podmodelu”. Oznaczony w artykule jako model obliczeniowy, zbudowany na prostopadłościennym siatce „grid” stanowił podstawę dla stworzonego właściwego modelu geomechanicznego. Finalnie wykonanych zostało 24 symulacji obejmujących analizę 6 wybranych głębokości posadowienia stropu komory, po 4 warianty przyjętego minimalnego ciśnienia magazynowego gazu. Otrzymane wyniki – wartości przemieszczenia ścian, stropu i spągu komory w kierunku jej środka – stanowiły element wyjściowy dla określenia wielkości zmiany objętości magazynowej kawerny. Następnie wyznaczone wartości konwergencji przeliczono dla modelu cylindrycznego jako końcowego modelu symulacyjnego. Dodatkowym elementem przeprowadzonych symulacji było określenie optymalnej głębokości posadowienia komory, którą wyznaczono na podstawie analizy zmian konwergencji i wielkości poduszki gazowej.

Słowa kluczowe: podziemny magazyn gazu, konwergencja, modelowanie geomechaniczne, CMG.

**ABSTRACT:** The paper presents the developed methodology and the obtained results of modeling related to the verification of potential use of specific software packages from Computer Modeling Group Ltd. (commercial reservoir simulation software) as a support tool for simulation and analysis of changes in selected parameters of the underground gas store in a salt cavern. As a part of the task, with use of the Builder package, an attempt was made to build a static model of the salt cavern. Dynamic modeling (IMEX package) was focused on convergence as a parameter having a key impact on the efficiency of underground gas storage in the salt cavern. Due to the large size of the static model created based on original data (thickness and radius of equivalent chamber slices from echometric measurements) and restrictions of the software, it was decided to create a simplified cylindrical model (consisting of a smaller number of cells) characterized by constant values of thickness and radius of selected slices. Further analysis of the simulation possibilities led to the need to separate a calculation model – created on a rectangular grid for which the geomechanical model was created. In total, 24 simulations were made (six depths of the top level of cavern, four variants of the minimum required pressure of the stored gas). The values of walls, top and bottom layers' movements towards the center determined the base to specify the size of the change in the storage volume. The convergence values were calculated for the cylindrical model as the final simulation model. In addition, the optimal cavern foundation depth was determined based on the analyses of convergence changes and the size of the gas cushion.

Key words: underground gas storage, convergence, geomechanical modeling, CMG.

---

Autor do korespondencji: M. Majkrzak, e-mail: [marcin.majkrzak@inig.pl](mailto:marcin.majkrzak@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 02.03.2020 r. Zatwierdzono do druku: 03.08.2020 r.

## Wstęp

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o rozwoju państwa jest dostęp do nośników energii pierwotnej, wśród których trzecim w kolejności jest gaz ziemny (World Energy Council, 2016). Głównymi producentami i zarazem eksporterami gazu są Stany Zjednoczone i Rosja. Większość państw europejskich (w tym Polska) uzależniona jest od dostaw „błękitnego paliwa” z Federacji Rosyjskiej. Podejmowane próby dywersyfikacji są nadal w fazie rozwoju, przy czym coraz większy udział w krajowym imporcie ma tzw. kierunek zachodni i południowy oraz dostawy LNG (PGNiG SA). Podpisywane wieloletnie kontrakty na dostawę gazu wymuszają stały odbiór paliwa niezależnie od zapotrzebowania, co jest jednym z głównych powodów, dla których potrzeba magazynowania gazu ziemnego jest tak ogromna. Kolejnym, nie mniej ważnym aspektem, jest zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju w przypadku np. ograniczenia lub przerwania zakontraktowanych dostaw. Polska (jako członek Unii Europejskiej) zobowiązana jest do dostosowania swojego wewnętrznego systemu magazynowania i przesyłu gazu do wymogów wspólnotowych. Zgodnie z przyjętą przez UE definicją, bezpieczeństwo energetyczne należy rozumieć jako zdolność gazowego systemu przesyłowego do zapewnienia ciągłych i niezawodnych dostaw gazu do odbiorców na zasadach ekonomicznych oraz zdolność do stawiania czoła przerwom w dostawach gazu ziemnego (Kaliski et al., 2010). W celu spełnienia wskazanych powyżej wymogów należy stworzyć system magazynowania gazu ziemnego w ilościach zapewniających zachowanie płynności w dostępie do tego jakże ważnego nośnika energii. Może być on gromadzony w zbiornikach naziemnych lub w magazynach podziemnych. Ze względów ekonomicznych i warunków bezpieczeństwa podziemne magazynowanie gazu jest obecnie metodą najbardziej popularną, dlatego zarówno w Polsce, jak i na świecie realizowane są liczne projekty budowy nowych lub rozbudowy istniejących magazynów.

## Charakterystyka podziemnych magazynów gazu

Mianem podziemnego magazynu gazu określa się sztuczną akumulację gazu ziemnego lub innego (azotu, wodoru, powietrza) na znacznej głębokości poniżej poziomu terenu (kilkaset metrów i więcej), spełniającą określone warunki geologiczne (Szpunar i Budak, 2002). W każdym z typów magazynu zakumulowany gaz dzieli się na buforowy – mający na celu m.in. przeciwdziałanie naporowi wody czy zapobieganie zmianom objętości geometrycznej komór w pokładach soli, czyli konwergencji oraz czynny – stanowiący pojemność roboczą magazynu.

Najbardziej rozpowszechnionym typem struktur wykorzystywanych do budowy podziemnych magazynów gazu są wyeksploatowane (szczerpane) złoża. Związane jest to z istniejącą infrastrukturą do odbioru, jak i zatłaczania gazu, co znacznie obniża koszty projektu. Kluczowym z punktu widzenia powodzenia budowy magazynu jest wybór odpowiedniego momentu przerwania wydobycia ze złoża (Kaliski et al., 2010; Król i Kuśnierz, 2019). Budowę magazynów w warstwach wodonośnych prowadzi się najczęściej w przypadku braku możliwości utworzenia PMG w szczerpanych złożach lub tworzenia magazynów kawernowych w wysadach solnych, czy pokładach soli. Magazyny gazu w strukturach zawodnionych wymagają znacznie większej liczby odwiertów kontrolnych i obserwacyjnych potwierdzających szczelność magazynu – z tego względu koszty związane z ich budową są znacznie wyższe. Cechą wspólną podziemnych magazynów gazu w szczerpanych złożach i warstwach wodonośnych jest duża pojemność (zarówno czynna, jak i buforowa) oraz stabilny reżim zatłaczania i odbioru gazu (Karnkowski i Czapowski, 2007). Wyrobiska górnicze czy tzw. pustki skalne, stanowią najrzadziej wykorzystywany rodzaj struktur do budowy podziemnych magazynów gazu. Posiadają je nieliczne kraje, takie jak Niemcy, Szwecja, Wielka Brytania czy Australia. Wiąże się to z wysokimi kosztami budowy oraz prowadzenia monitoringu szczelności. Problemатyczny

**Tabela 1.** Podstawowe cechy magazynów gazu w kawernach solnych w porównaniu z magazynami w ośrodkach porowatych (Kunstman et al., 2009)

**Table 1.** Basic features of underground gas storage in salt caverns and porous media (Kunstman et al., 2009)

Kawerny solne	Ośrodki porowate
Wysoka i długotrwała wydajność poboru i zatłaczania gazu	Niska i zmniejszająca się w czasie wydajność poboru i zatłaczania gazu
Możliwość wielu cykli zatłaczania i poboru w ciągu roku	Zwykle możliwość jednego lub dwóch cykli zatłaczania i poboru w ciągu roku
Zwykle dłuższy czas budowy (czas ługowania kawerny)	Krótszy czas budowy w szczerpanych złożach gazu (część otworów istnieje)
Mała tzw. poduszka gazowa – zwykle około 20% objętości roboczej	Duża tzw. poduszka gazowa – do 100% i więcej objętości roboczej
Zwykle większy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę pojemności gazu w magazynie	Zwykle mniejszy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę pojemności gazu w magazynie
Znacznie mniejszy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę wydajności poboru gazu z magazynu	Znacznie większy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę wydajności poboru gazu z magazynu

jest również dobór odpowiednich wyrobisk spełniających wymagania bezpieczeństwa magazynowania gazu (Kaliski et al., 2010). Kolejnym typem podziemnych magazynów gazu są kawerny solne. Tego typu magazyny charakteryzują się możliwością bardzo szybkiego odbioru gazu oraz wykonania większej liczby cykli zatłaczania i odbioru w porównaniu do PMG w szcerpanych złożach i warstwach wodonośnych. Kawernowe magazyny gazu z uwagi na ekonomikę wykorzystywania stanowią „magazyny szczytowe”, mogące wyrównywać szczytowy popyt na paliwa w okresach godzinowych lub dziennych. Ich zaletą jest niski wymagany poziom gazu buforowego (poduszki gazowej) przy dużych możliwych do uzyskania pojemnościach magazynowych (Lankof et al., 2016; Szpunar i Budak, 2002). Te i inne cechy podziemnych magazynów gazu w kawernie solnej, w porównaniu do magazynów w warstwach porowatych, zestawiono w tabeli 1.

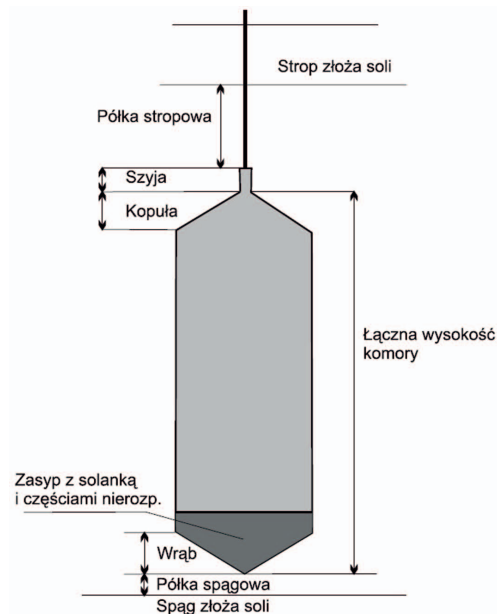
### Najważniejsze aspekty projektowania i budowy komory magazynowej

Z technologicznego punktu widzenia proces ługowania komory magazynowej rozpoczyna się wykonaniem (tradycyjnymi metodami wiertniczymi) otworu osiagającego głębokość spagu projektowanej komory. Dodatkowymi obostrzeniami nałożonymi na wykonywany odwiert eksploatacyjny są (Lankof et al., 2016):

- większa średnica wiercenia i zarurowania;
- zachowanie pionu otworu w strefie kawernowej;
- wysoki stopień szczelności techniczno-eksploatacyjnej kolumny rur oraz jej cementacji.

Powyższe warunki wiążą się z potrzebą orurowania i cementacji odwiertu w głębokości stropu przyszłej komory, a także zapuszczenia dwóch kolumn rur: jedna dla zatłaczania wody do komory, druga do odbioru powstałej solanki. W celu umożliwienia prawidłowego prowadzenia procesu ługowania, zabezpieczenia warstw nadległych (powyżej stropu planowanej komory) oraz utrzymania pożądanego kształtu (optymalnym z punktu widzenia stabilności komory jest kształt walca o elipsoidalnych zakończeniach górnej i dolnej podstawy lub kształt elipsoidy obrotowej) w przystropowe warstwy komory wprowadza się najczęściej olej solarowy lub azot, zabezpieczający przed niekontrolowanym rozługowaniem warstw solnych.

Wielkość komory, a więc jej objętość zależy od kształtu, wysokości oraz średnicy. Prawidłowe wyznaczenie tych parametrów jest ściśle powiązane z warunkami geologicznymi i geomechanicznymi złoża soli oraz ograniczone szeregiem wymogów, których spełnienie zapewnia osiągnięcie regularnego kształtu i długotrwałą stateczność komory (Ślizowski et al., 2011). Wyróżnić wśród nich należy (rys. 1):



Rys. 1. Schemat komory magazynowej gazu ziemnego (Ślizowski et al., 2011)

Fig. 1. Schematic diagram of underground gas storage in a salt cavern (Ślizowski et al., 2011)

- miąższość półki stropowej (minimum 30 metrów – związana z możliwością wykonania szczelnej i odpowiednio trwałej cementacji w stropie soli);
- miąższość półki spagowej (minimum 5 metrów);
- długość szyi (bosego otworu poszerzonego krótkotrwałym ługowaniem do średnicy rzędu 2 metrów) – minimalna długość to około 15 metrów;
- średnica komory nie powinna przekraczać 2/3 jej wysokości;
- wysokość kopuły zabezpieczającej przed wystąpieniem naprężeń rozciągających powinna wynosić ok. 1/3 średnicy,
- wysokość wrębu – dla gromadzenia się części nierozpuszczalnych powinna wynosić ok. 1/6 średnicy.

Odpowiednio dobrany zakres ciśnień roboczych w kawernie warunkuje prawidłową i długotrwałą eksploatację magazynu. Ich wielkość zależy głównie od głębokości posadowienia kawerny. Ciśnienie maksymalne  $P_{max}$  wyznacza się najczęściej dla głębokości buta kolumny rur eksploatacyjnych, jako najsłabszego punktu w komorze lub innego interwału górotworu solnego, jeśli posiadane dane wskazują na jego niższe parametry wytrzymałościowe. Dużo bardziej złożonym problemem jest wyznaczenie minimalnego ciśnienia roboczego  $P_{min}$ . Wiąże się to z tym, że jego wartość zależy nie tylko od głębokości posadowienia komory, ale również od parametrów wytrzymałościowych soli i szybkości jej pełzania oraz kształtu i wielkości kawerny. Kolejnymi czynnikami wpływającymi na wartość ciśnienia minimalnego może być dopuszczalna wielkość wyężenia materiału na ścianie komory, maksymalna wielkość dopuszczalnej konwergencji lub wymagana wielkość poduszki gazowej (Szpunar i Budak, 2002, 2005).

### Zjawisko konwergencji komory magazynowej

Sól charakteryzuje się plastyczno-sprężystymi właściwościami, przez co w wyniku oddziaływania na nią skał nadkładu występują wzrastające w miarę upływu czasu odkształcenia, określane mianem pełzania. Cecha ta wpływa negatywnie na wyługowaną w złożu soli komorę magazynową. W wyniku pełzania zachodzi zjawisko przemieszczania się soli ze ścian komory w kierunku jej wnętrza, czyli zaciskania się, co jednoznacznie wiąże się ze zmniejszeniem objętości magazynu. Czynniki wpływającymi na wielkość konwergencji komory magazynowej są m.in.:

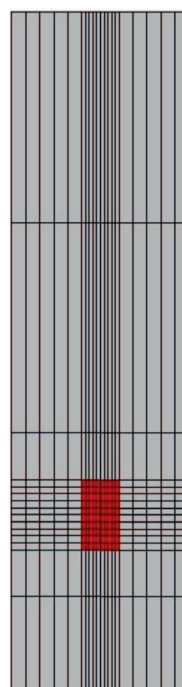
- średnia gęstość skał nadkładu;
- parametry wytrzymałościowe soli;
- głębokość zalegania stropu i spągu komory;
- parametry reologiczne górotworu solnego.

Zaznaczyć należy, że konwergencja jest całkowicie naturalnym i nieuniknionym zjawiskiem przy występujących zmianach ciśnienia gazu w komorze (cykle poboru i zatłaczania). Zarówno ze wzrostem głębokości posadowienia komory, jak i spadkiem wartości parametrów wytrzymałościowych soli, konwergencja będzie wzrastać. Jak wynika z praktyki, jedynym czynnikiem, którym można „sterować” w czasie eksploatacji komory jest ciśnienie zmagazynowanego w niej gazu. Na parametry mechaniczne i reologiczne górotworu operator nie ma wpływu, a wielkość naprężeń na ścianach komory oraz graniczna wartość wytrzymałości materiału, która określa warunki stabilności komory, również zależą od ciśnienia gazu w komorze (Budak i Szpunar, 2000; Szpunar i Budak, 2002, 2005; Król i Kuśnierz, 2019).

### Metodyka budowy modelu i analizy zmian wybranych parametrów

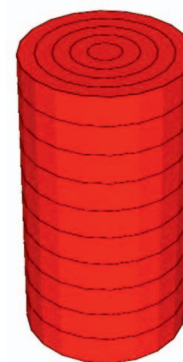
Modelowanie pracy magazynu gazu w kawernie solnej przy użyciu oprogramowania CMG wymaga specyficznego podejścia do analizowanego zagadnienia. W realizacji zadania wykorzystano pakiet Builder (stanowiący podstawowe, interaktywne, intuicyjne i łatwe w obsłudze narzędzie umożliwiające użytkownikowi szybką i skuteczną integrację wszystkich wymaganych danych do budowy modelu symulacyjnego) oraz pakiet IMEX (będący podstawowym narzędziem w modelowaniu pierwotnych i wtórnych procesów szczypania węglowodorów ze złóż konwencjonalnych i niekonwencjonalnych) (Advanced Compositional and GHG Reservoir Simulator, 2009). Adaptacja tego rodzaju oprogramowania do modelowania pracy kawern solnych stanowi ciekawą próbę rozszerzenia pakietu dostępnych narzędzi symulacyjnych.

Ze względu na złożoność modelu symulacyjnego zbudowanego na podstawie rzeczywistych danych (miąższości i promienia ekwiwalentnego plastrów wyznaczonych podczas pomiaru echometrycznego) zdecydowano o jego uproszczeniu poprzez zmniejszenie liczby plastrów i przyjęcie stałego promienia komory. W rezultacie otrzymano model składający się z 150 komórek, w tym 50 wchodzących w skład komory. Przekrój poprzeczny przez przykładowy model oraz obraz 3D komory magazynowej przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Parametry geometryczne oraz podstawowe dane, wymagane do przeprowadzenia symulacji zgodnie z wybranym wariantem, przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez cylindryczny model symulacyjny z komorą magazynową

Fig. 2. Cross section of the cylindrical simulation model



Rys. 3. Model 3D cylindrycznej komory magazynowej

Fig. 3. Schematic 3D model of a cylindrical storage cavern

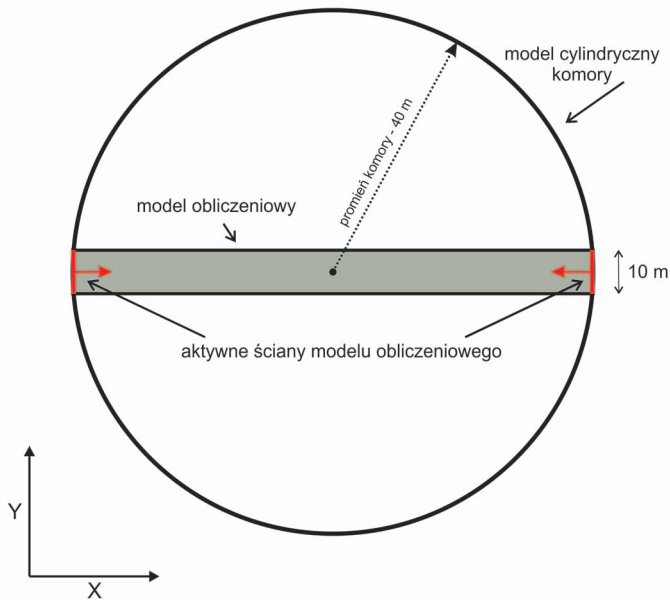
Tabela 2. Podstawowe parametry cylindrycznego modelu symulacyjnego z komorą magazynową

Table 2. Basic parameters of the cylindrical model with storage cavern

Parametr	Wartość
Ciśnienie dopuszczalne w bucie rur kolumny produkcyjnej ( $P_{max}$ )	15,3 [MPa]
Minimalne dopuszczalne ciśnienie w komorze ( $P_{min}$ )	5 [MPa]
Głębokość buta rur kolumny produkcyjnej (strop komory)	1000 [m]
Głębokość lustra solanki/spągu komory (spąg komory)	1150 [m]
Wysokość komory	150 [m]
Promień komory	40 [m]
Objętość komory	753 600 [m <sup>3</sup> ]
Średni moduł Younga dla soli	7845,32 [MPa]
Średni współczynnik Poisson'a dla soli	0,4 [-]
Średnia gęstość skał nadkładu	2050 [kg/m <sup>3</sup> ]



Głównym parametrem poddanym analizie była wielkość konwergencji komory w wyniku prowadzenia jej eksploatacji (cykle zatłaczania i poboru gazu). W celu wyznaczenia wielkości zmiany objętości roboczej należało określić wartość przemieszczenia punktu na powierzchni ściany komory w kierunku jej osi pionowej, a także wyniesienia spągu i obniżenia jej stropu. Wiązało się to z potrzebą wydzielenia podmodelu, określonego mianem „modelu obliczeniowego”, stanowiącego integralną część modelu cylindrycznego (rys. 2). Zdecydowano się na budowę modelu w formie prostokątnej siatki „grid”, co schematycznie przedstawiono na rysunku 4. Analizie przemieszczenia poddano „krótsze” ściany modelu (kolor czerwony) – zgodnie z przebiegiem osi X oraz powierzchnię stropu i spągu komory (zmiany w kierunku osi Z).

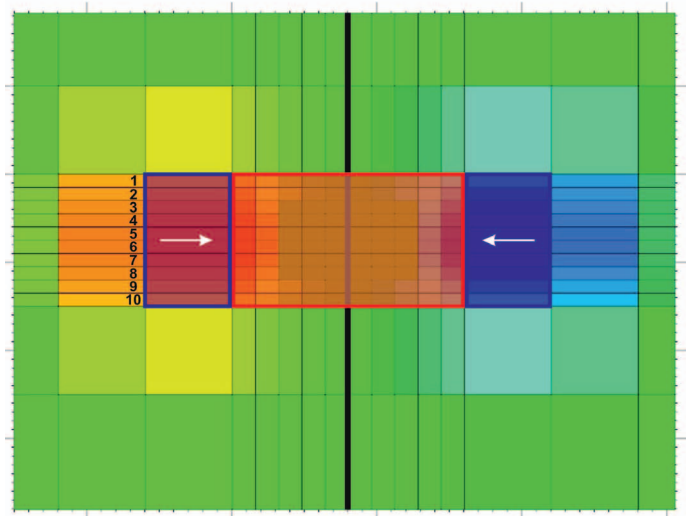


Rys. 4. Schematyczny rysunek modelu obliczeniowego (kolor szary) wpisujący się w model cylindryczny

Fig. 4. Schematic diagram of the calculation model (gray colour) that matches the cylindrical model

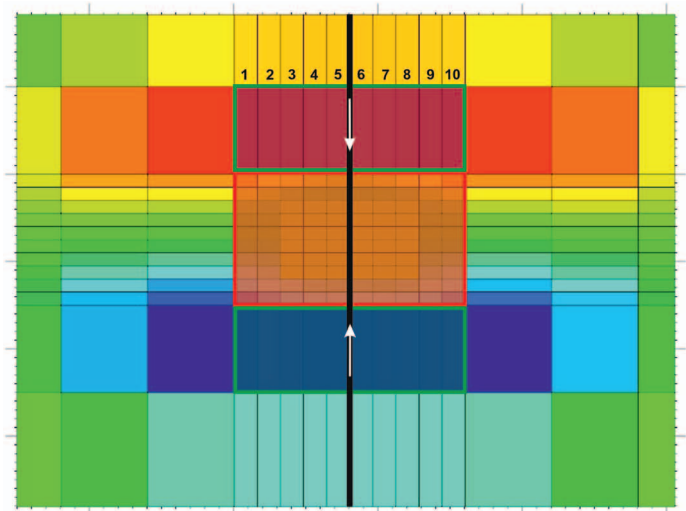
Uszczegółowioną metodykę wyznaczania wartości konwergencji, a więc stopnia przemieszczenia punktów na ścianie, stropie i spągu modelu obliczeniowego przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Kolejno kolorem czerwonym oznaczono komorę magazynową, granatowym – ściany boczne, zielonym – strop i spąg komory. W celu dokładniejszego określenia skali zmian w interwale zalegania kawerny (w obrębie formacji solnej) wyznaczono 10 warstw o stałej miąższości. Analogiczne zagęszczenie siatki grid wprowadzono w warstwie stropowej i spągowej, które podzielono również na 10 komórek o identycznych wymiarach, a ich przemieszczenie wzdłuż osi Z interpretowano jako składową zmiany objętości czynnej komory. Wartości przemieszczeń poszczególnych warstw i komórek przedstawiono kolejno w tabelach 3 i 4. Analiza uzyskanych

danych wskazuje, że dla obydwu ścian komory wartość przemieszczenia jest taka sama, a jego wielkość mieści się w zakresie od 0,0204 m do 0,0252 m. Najniższe wartości analizowany parametr osiągnął w przystropowej (0,0205 m) i przyspągowej (0,0204 m) warstwie modelu. Wzrost odnotowano w kierunku warstw środkowych (nr 5 i 6). Największe przemieszczenia zarówno stropu, jak i spągu komory odnotowano w bocznych sektorach modelu (komórki 1 i 10). W miarę przemieszczania się w kierunku osi pionowej wartość przemieszczenia maleje. Zaznaczyć należy, że odnotowane zmiany położenia punktów na stropie i spągu komory są mniejsze w porównaniu do przemieszczenia się ścian kawerny.



Rys. 5. Obraz 2D modelu obliczeniowego – końcowy etap symulacji – przemieszczenie punktu na powierzchni ścian bocznych

Fig. 5. 2D diagram of the calculation model – final stage of the simulation – point displacement on the surface of the side walls



Rys. 6. Obraz 2D modelu obliczeniowego – końcowy etap symulacji – przemieszczenie punktu w obrębie warstwy stropowej i spągowej

Fig. 6. 2D image of the calculation model – final stage of the simulation – point displacement on the top and bottom surface

**Tabela 3.** Przykładowe wielkości przemieszczenia punktu na ścianach modelu obliczeniowego komory magazynowej w płaszczyźnie X

**Table 3.** Exemplary values of the point displacement on the walls of the calculation model of the cavern in the X plane

Nr warstwy	Lewa strona modelu	Prawa strona modelu
	Przemieszczenie w kierunku osi pionowej modelu [m]	
1	0,0205	0,0205
2	0,0217	0,0217
3	0,0233	0,0233
4	0,0245	0,0245
5	0,0251	0,0251
6	0,0252	0,0252
7	0,0247	0,0247
8	0,0235	0,0235
9	0,0219	0,0219
10	0,0204	0,0204

**Tabela 4.** Przykładowe wartości przemieszczenia punktu na stropie i spągu modelu obliczeniowego komory magazynowej w płaszczyźnie Z

**Table 4.** Exemplary values of the point displacement on the top and bottom of the calculation model of the cavern in the Z plane

Nr komórki	Lewa strona modelu					Prawa strona modelu				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Obniżenie stropu [m]	0,0127	0,0125	0,0121	0,0118	0,0117	0,0117	0,0118	0,0120	0,0124	0,0127
Wyniesienie spągu [m]	0,0224	0,0222	0,0220	0,0219	0,0214	0,0217	0,0217	0,0219	0,0223	0,0224

Na podstawie wymiarów geometrycznych komory określono sumaryczną objętość magazynową modelu na początkowym etapie symulacji równą 120 000 m<sup>3</sup>. Składają się na nią objętości 10 poszczególnych warstw, które z kolei podzielone są na 10 komórek każda. Wymiary jednostkowej komórki wynoszą odpowiednio: x = 8 m, y = 10 m, z = 15 m. Wprowadzenie do obliczeń wyznaczonych wartości przemieszczenia ścian, spągu i stropu komory skutkuje zmianą wartości wymiarów geometrycznych określonych komórek wchodzących w skład komory. Chodzi tu o 2 zewnętrzne komórki każdej wyznaczonej warstwy – komórki przylegające do ścian komory (zmiana wymiaru w płaszczyźnie X) oraz warstwę stropową i spągową komory (zmiana miąższości warstw). Na podstawie sumarycznych wartości objętości – w początkowym i końcowym punkcie symulacji równej 119 830,26 m<sup>3</sup> – wyznaczono wielkość konwergencji modelu obliczeniowego na poziomie 1,42%.

Ostatni etap obejmował transfer opisanego sposobu wyznaczania wielkości konwergencji na model cylindryczny. W tym celu wykorzystano fakt, że „model obliczeniowy” stanowi integralną część modelu cylindrycznego, co stworzyło możliwość przyjęcia następujących założeń:

- wartość przemieszczenia punktu na ścianie komory w modelu

cylindrycznym (w obrębie miąższości danej warstwy) jest w każdym miejscu taka sama;

- wartość przemieszczenia punktu na ścianie komory w modelu cylindrycznym jest równa przemieszczeniu punktu wyznaczonego dla modelu obliczeniowego;
- wartość przemieszczenia stropu i spągu komory w modelu cylindrycznym jest równa wartości wyznaczonej dla „modelu obliczeniowego”.

Na podstawie sumarycznych wartości objętości (na początkowym i końcowym etapie symulacji) możliwe było wyznaczenie wielkości konwergencji komory dla modelu cylindrycznego.

### Wyniki symulacji

Zgodnie z opisaną metodyką budowy modelu i wyznaczania wartości wskazanego parametru podstawowe symulacje przeprowadzono na prostopadłościennym modelu obliczeniowym,

których wyniki wykorzystano w ewaluacji wielkości zmiany objętości roboczej modelu cylindrycznego. W tabeli 5 zestawiono ponownie wymiary geometryczne modeli symulacyjnych.

**Tabela 5.** Parametry geometryczne modeli symulacyjnych

**Table 5.** Simulation model geometry

Parametr	Model obliczeniowy	Model cylindryczny
Wysokość komory [m]	150	150
Szerokość komory (oś X)	80	–
Głębokość komory (oś Y)	10	–
Promień komory [m]	–	40
Objętość komory [m <sup>3</sup> ]	120 000	753 600

Jak wspomniano wcześniej, jedynym sterowalnym parametrem mogącym realnie wpływać na wielkość konwergencji jest ciśnienie magazynowanego gazu. Wartość ciśnienia, a zatem objętość gazu, jest uzależniona od wielu czynników, z których głównym jest głębokość posadowienia komory. To na jej podstawie określane jest maksymalne ciśnienie magazynowanego medium, na poziomie nie przekraczającym ciśnienia szczelnowania. W celu charakterystyki wpływu zmiany głębokości

**Tabela 6.** Zestawienie podstawowych danych dla 24 modeli symulacyjnych  
**Table 6.** Summary of basic data for 24 simulation models

Model	Parametr				
	Głębokość posadowienia stropu komory	$P_{max}$	$P_{min}$	Moduł Younga	Współczynnik Poisson'a
	[m p.p.t.]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1	700	10,7	A = 2 B = 3 C = 4 D = 5	7845,32	0,4
2	800	12,2			
3	900	13,7			
4	1000	15,3			
5	1100	16,8			
6	1200	18,3			

zalegania stropu komory na konwergencję wykonano 24 symulacje, których dane wejściowe zestawiono w tabeli 6.

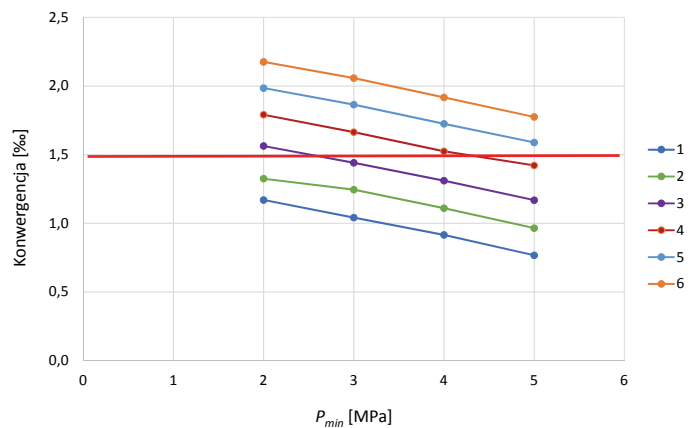
Symulacje przeprowadzono na modelu obliczeniowym w 6 wariantach głębokości posadowienia stropu komory, od 700 do 1200 metrów. Do obliczonego maksymalnego ciśnienia magazynowania gazu, wprowadzono współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 0,85, wyznaczając końcową wartość  $P_{max}$  dla każdego z modeli. W celu dokładniejszej charakterystyki analizowanego parametru symulacje przeprowadzono dla 4 wartości ciśnienia minimalnego  $P_{min}$  (A, B, C, D). Parametry geomechaniczne soli (moduł Younga, współczynnik Poisson'a) pozostały stałe dla każdego z modeli.

Wyniki modelowania zestawiono w tabeli 7 i na rysunku 7. Przyjęty czas symulowanej eksploatacji magazynu to 1 rok, w ciągu którego wykonano pobór gazu równy spadkowi ciśnienia z poziomu  $P_{max}$  do  $P_{min}$ . Przeprowadzona analiza wyników wskazuje na wzrost wielkości konwergencji wraz ze zwiększającą się głębokością zalegania komory, co jest zgodne z powszechnie przyjętymi założeniami budowy i eksploatacji KPMG. Osiągnięcie określonego w tabeli 6 ciśnienia

minimalnego również decyduje o końcowym poziomie zmian objętości magazynowej. Dla modeli z  $P_{min}$  w wariancie A (2 MPa) konwergencja jest najwyższa, dla modeli w wariancie D (5 MPa) – najniższa. Z porównania otrzymanych wartości pomiędzy 2 typami modeli wynika, że różnice pomiędzy nimi występują na 2 lub 3 miejscu po przecinku, co dowodzi poprawności przedstawionej metodyki wykorzystania danych wielkości przemieszczenia ścian, stropu i spągu komory „modelu obliczeniowego” w wyznaczeniu konwergencji modelu cylindrycznego.

Wzrost głębokości posadowienia komory wiąże się ze wzrostem wartości  $P_{max}$ , ale skutkuje również wyższym wymaganym ciśnieniem minimalnym  $P_{min}$ .

Z ekonomicznego punktu widzenia najlepszym wariantem pracy komory jest jej możliwie największa pojemność magazynowa



**Rys. 7.** Wykres zmian wartości konwergencji rocznej modelu obliczeniowego w zależności od przyjętej wartości ciśnienia minimalnego  $P_{min}$

**Fig. 7.** Graph of changes in the annual convergence value of the calculation model depending on the adopted minimum pressure value  $P_{min}$

**Tabela 7.** Wyniki symulacji wielkości konwergencji (w 24 wariantach) dla modelu obliczeniowego i modelu cylindrycznego

**Table 7.** Simulation convergence results (in 24 variants) for the calculation model and the cylindrical model

Model	A		B		C		D	
	K(o)	K(c)	K(o)	K(c)	K(o)	K(c)	K(o)	K(c)
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	1,170	1,163	1,041	1,028	0,916	0,898	0,767	0,742
2	1,325	1,312	1,245	1,239	1,110	1,100	0,965	0,949
3	1,563	1,570	1,441	1,443	1,310	1,307	1,169	1,160
4	1,791	1,807	1,664	1,674	1,525	1,531	1,422	1,423
5	1,985	2,008	1,865	1,882	1,725	1,737	1,589	1,596
6	2,176	2,206	2,058	2,082	1,917	1,937	1,775	1,789

Wielkość konwergencji dla: K(o) – „model obliczeniowy”; K(c) – model cylindryczny

przy najniższej objętości buforowej – poduszki gazowej. Na rysunku 7 czerwoną linią zaznaczono przyjęty (na potrzeby pracy) poziom maksymalnej dozwolonej rocznej konwergencji dla symulowanego magazynu równy 1,5‰. Przy tym założeniu, na podstawie analizy przebiegu krzywych zmian konwergencji, możliwe jest wskazanie najlepszego wariantu symulacyjnego. Interpretacja danych wskazuje, że dla modeli 1 i 2 (we wszystkich wariantach – A, B, C, D) uzyskana wielkość konwergencji mieści się poniżej dozwolonego poziomu. Jednoznacznie ocenić można również wyniki uzyskane dla modeli 5 i 6, dla których konwergencja (we wszystkich wariantach) przekracza wartość 1,5‰. W przypadku dwóch ostatnich modeli wyznaczone kryterium spełnione jest w zależności od przyjętego wariantu  $P_{min}$ . Dla modelu 4 wielkość rocznej konwergencji utrzymuje się poniżej wyznaczonego poziomu tylko w przypadku wariantu D ( $P_{min} = 5$  MPa). Model 3 spełnia postawiony warunek w przypadku wariantu B ( $P_{min} = 3$  MPa), C ( $P_{min} = 4$  MPa) i D ( $P_{min} = 5$  MPa).

Na podstawie powyższej analizy zawężono optymalną głębokość posadowienia komory magazynowej do parametrów z dwóch modeli: 3 i 4. Próbę określenia, który z wybranych wariantów jest optymalny z punktu widzenia objętości czynnej zmagazynowanego gazu podjęto w oparciu o analizę danych z tabeli 8, gdzie zestawiono informacje dotyczące całkowitej objętości magazynowej komory, wyeksploatowanej ilości gazu oraz objętości poduszki gazowej. Z interpretacji wyników wynika, że w przypadku modelu 4 (wariant D –  $P_{min} = 5$  MPa) objętość poduszki gazowej wynosi  $8,97e + 06$  m<sup>3</sup>. Z kolei dla modelu 3 objętości w zależności od wariantu wynoszą: wariant B – ( $P_{min} = 3$  MPa)  $3,78e + 06$  m<sup>3</sup>, wariant C – ( $P_{min} = 4$  MPa)  $5,22e + 06$  m<sup>3</sup>, wariant D – ( $P_{min} = 5$  MPa)  $6,79e + 06$  m<sup>3</sup>. Podsumowując, optymalna głębokość posadowienia stropu komory wynosi 900 m p.p.t. (model 3), przy utrzymywaniu minimalnego ciśnienia gazu w kawernie na poziomie  $P_{min} = 3$  MPa, czyli zgodnie z wariantem 3B – co potwierdza najniższa objętość poduszki magazynowej.

**Tabela 8.** Wybrane objętości gazu dla 3 i 4 modelu symulacyjnego  
**Table 8.** Selected gas volumes for the 3rd and 4th simulation model

Model	Objętość magazynowa	Objętość czynna	Objętość poduszki gazowej [m <sup>3</sup> ]
3A	2,25E + 07	2,01E + 07	2,44E + 06
3B		1,88E + 07	3,78E + 06
3C		1,73E + 07	5,22E + 06
3D		1,57E + 07	6,79E + 06
4A	2,75E + 07	2,28E + 07	4,70E + 06
4B		2,15E + 07	6,03E + 06
4C		2,00E + 07	7,50E + 06
4D		1,86E + 07	8,97E + 06

## Podsumowanie

Wyniki zaprezentowane w artykule stanowią wstępną weryfikację możliwości wykorzystania oprogramowania firmy Computer Modelling Group Ltd., jako narzędzia do symulacji procesu eksploatacji i analizy zmian wybranych parametrów podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej. Modelowania dynamiczne koncentrują się na symulacji zmian objętości magazynowej komory. W ramach realizacji projektu opracowano metodykę wyznaczania wielkości konwergencji dla przyjętego czasu eksploatacji magazynu. Wykonano 24 modele symulacyjne obejmujące 6 głębokości posadowienia stropu komory, po 4 warianty przyjętego minimalnego ciśnienia magazynowanego gazu. Na podstawie uzyskanych informacji i otrzymanych wyników wyznaczyć można następujące kluczowe elementy przeprowadzonych prac:

1. Wykonanie modelowania dynamicznego pracy komory wiąże się z koniecznością stworzenia modelu geomechanicznego kawerny magazynowej.
2. Realizacja prac wiązała się z budową uproszczonego statycznego modelu cylindrycznego komory (charakteryzującego się mniejszą liczbą plasterów o jednakowym promieniu), co miało na celu skrócenie czasu potrzebnego na przeprowadzenie symulacji i uniknięcie ewentualnych błędów metodycznych.
3. Analiza możliwości symulacyjnych oprogramowania doprowadziła do potrzeby budowy podmodelu, określonego w pracy mianem „modelu obliczeniowego”, wpisującego się w model cylindryczny.
4. Właściwe modelowanie geomechaniczne wykonano na prostopadłościennym modelu obliczeniowym.
5. Analizowanym parametrem była wielkość przemieszczenia się ścian oraz wyniesienia spągu i obniżenia stropu kawerny w kierunku jej środka.
6. Otrzymane wartości przemieszczenia poszczególnych punktów przekonwertowano na model cylindryczny, uzyskując w ten sposób wielkość konwergencji dla docelowego modelu komory magazynowej.
7. Dla przyjętego czasu symulacji eksploatacji magazynu (1 rok) przeprowadzona analiza wskazuje na wzrost poziomu konwergencji wraz ze zwiększającą się głębokością zalegania stopu komory. Zmiana wielkości ciśnienia minimalnego ( $P_{min}$ ) również determinuje zmiany objętości czynnej magazynu – im niższa wartość ciśnienia tym wyższa konwergencja.
8. Wykres zmian wartości konwergencji i przyjęta na potrzeby projektu graniczna, maksymalna dozwolona roczna wielkość na poziomie 1,5‰, pozwala wyznaczyć optymalną (z punktu widzenia eksploatacji magazynu) głębokość posadowienia komory. W celu wskazania najlepszego



wariantu (spośród modeli 3 i 4) przeprowadzono analizę objętości poduszki gazowej – ilości gazu pozostałego w kawernie po osiągnięciu ciśnienia minimalnego. Z symulacji wynika jednoznacznie, że eksploatacja komory będzie najbardziej efektywna przy posadowieniu jej na głębokości 900 m p.p.t., przy utrzymywaniu ciśnienia minimalnego na poziomie 3 MPa.

Realizacja pracy pozwoliła opracować metodykę budowy modeli statycznych oraz metodykę wyznaczania wielkości konwergencji dla cylindrycznego modelu kawerny solnej. Na tej podstawie możliwe jest, według autora, stworzenie modelu i przeprowadzenie symulacji pracy komory dla rzeczywistego i złożonego modelu komory magazynowej. Wydaje się, że zaproponowany sposób określania wielkości konwergencji komory w czasie jej eksploatacji może być jednym z istotnych elementów oceny perspektywiczności obszaru w aspekcie podziemnego magazynowania gazu, pozwalającym jednocześnie na uzupełnienie wiedzy na temat modelowania ośrodka geologicznego przy użyciu komercyjnych symulatorów.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Analiza parametrów pracy podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0069/SI/2019, nr archiwalny: DK-4100-0069/2019.

## Literatura

- Advanced Compositional and GHG Reservoir Simulator, 2009. Computer Modelling Group Ltd.
- Budak P., Szpunar T., 2000. Program symulacji pracy podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej. *Nafta-Gaz*, 9: 530–534.
- Kaliski M., Janusz P., Szurlej A., 2010. Podziemne magazyny gazu jako element krajowego systemu gazowego. *Nafta-Gaz*, 5: 325–332.
- Karnkowski P.H., Czapowski G., 2007. Underground hydrocarbons storages in Poland: actual investments and properties. *Przegląd Geologiczny*, 55(12/1): 1068–1074.
- Król K., Kuśnierz B., 2019. Bezzbiornikowe magazynowanie substancji w górotworze – techniczne i prawne aspekty działalności organów nadzoru górniczego. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 36(1): 5–17. DOI: 10.7494/drill.2019.36.1.5.
- Kunzman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K., 2009. Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Przegląd Geologiczny*, 57(9): 819–828.
- Lankof L., Polański K., Ślizowski J., Tomaszewska B., 2016. Possibility of energy storage in salt caverns. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 33(2): 405–415. DOI: 10.7494/drill.2016.33.2.405.
- PGNiG SA. [www.pgnig.pl](http://www.pgnig.pl) (dostęp: 10.09.2019).
- Szpunar T., Budak P., 2002. Konwergencja podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej oraz graniczne parametry eksploatacyjne komory magazynowej. *Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa*, 114: 1–45.
- Szpunar T., Budak P., 2005. Konwergencja podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej, w trójosiowym stanie naprężeń i odkształceń. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 128: 1–37.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., Lankof L., Serbin K., 2011. Analiza zmienności polskich pokładów soli kamiennej w aspekcie magazynowania gazu. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 28: 431–443.
- World Energy Council, 2016. World Energy Resources. <[www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org)> (dostęp: 30.09.2019).



Mgr inż. Marcin MAJKRZAK  
Asystent w Zakładzie Inżynierii Naftowej  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [marcin.majkrzak@inig.pl](mailto:marcin.majkrzak@inig.pl)