

JAROSŁAW ŚLIZOWSKI*, KAZIMIERZ URBAŃCZYK**,
KAROLINA SERBIN***

Numeryczna analiza konwergencji pola komór magazynowych gazu w wysadzie solnym

Wprowadzenie

Konwergencja komór magazynowych gazu ziemnego zależy głównie od trzech czynników: głębokości posadowienia komory, zakresu ciśnienia magazynowania gazu, w szczególności wartości minimalnej, oraz właściwości reologicznych górotworu w całym zasięgu oddziaływania komory. Pozostałe czynniki to temperatura (zależna od głębokości i procesów wymiany ciepła pomiędzy gazem i górotworem), kształt i wielkość komory oraz oddziaływanie komór sąsiednich. Złożoność zjawiska i brak precyzyjnych metod pomiaru *in-situ* sprawia, że określenie szybkości konwergencji jest bardzo trudne.

Problem nabiera szczególnego znaczenia w wysadzie solnym, w którym komory zlokalizowane są na różnych głębokościach, posiadają różne wymiary i kształty, a górotwór w ich otoczeniu nie jest jednorodny. W takiej sytuacji konwergencje poszczególnych komór są zróżnicowane, a sumaryczna konwergencja magazynu w znacznym stopniu zależy od scenariusza jego eksploatacji.

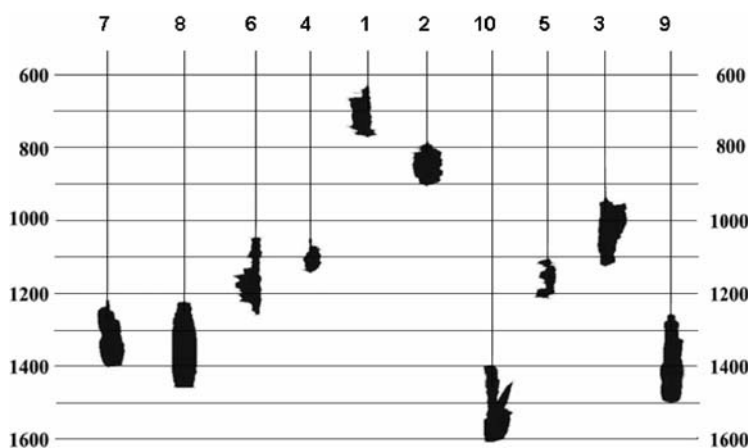
W pracy przeanalizowano sytuację analogiczną do występującej w wysadzie Mogilno, gdzie zlokalizowany jest jedyny polski magazyn gazu ziemnego w złożu soli kamiennej.

* Dr hab. inż., ** Dr, *** Mgr inż., Zakład Podziemnego Magazynowania i Składowania, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: slizow2@min-pan.krakow.pl

1. Lokalizacja komór w wysadzie Mogilno

W chwili obecnej magazyn gazu składa się z 10 komór rozmieszczonych w siatce trójkątnej o boku 250 m. Rysunek 1 przedstawia ich usytuowanie w przekroju pionowym, a numery komór są przypisane w zależności od głębokości komory od najpłytszej 1 do najgłębszej 10.

Jak widać komory zlokalizowane są w interwale głębokości 600 – 1600 m p.p.t. Objętość największej z nich wynosi 562 tys. m³ (pojemność 113,7 mln Nm³), a najmniejszej 182 tys. m³ (pojemność 17,4 mln Nm³). Tak duże zróżnicowanie głębokości posadowienia i pojemności magazynowej oraz nieregularny kształt niektórych komór związany jest z niejednorodnością soli w wysadzie Mogilno. W przypadku każdej komory po odwierceniu otworu wiertniczego i rozpoznaniu właściwości soli (chemicznych, ługowniczych i geomechanicznych) wybierano warstwę górotworu o najkorzystniejszych właściwościach. W znaczącej ilości przypadków już projektowany kształt komory znacznie odbiegał od zalecanego – z geomechanicznego punktu widzenia – kształtu kropłowego, a ostateczny kształt komory jest tylko w niektórych przypadkach zgodny z projektowanym.



Rys. 1. Głębokość posadowienia i kształt komór KPMG Mogilno (Urbańczyk, Gaska 2007)

Fig. 1. Location depth and shape of KPMG Mogilno caverns (Urbańczyk, Gaska 2007)

2. Oszacowanie konwergencji komór magazynowych

Dla określenia całkowitej konwergencji magazynu przy danym scenariuszu eksploatacji potrzebna jest znajomość szybkości konwergencji poszczególnych komór w zależności od ciśnienia magazynowanego gazu. Zależności takie najlepiej byłoby wyznaczyć, analizując rzeczywistą konwergencję poszczególnych komór, np. na podstawie ilości włożonego gazu czy pomiarów echometrycznych. W praktyce jednak okazało się to niemożliwe ze względu na

krótki czas funkcjonowania KPMG, zbyt małą dokładność pomiarów echometrycznych oraz niepowtarzalność (w kolejnych latach) cykli napełniania i opróżniania poszczególnych komór.

W niniejszej pracy szybkość konwergencji komór w zależności od ciśnienia gazu oszacowano teoretycznie, realizując cykl obliczeń numerycznych dla wzorcowej (cylindrycznej) komory, zakończonej sferycznymi sklepieniami (Ślizowski 2006; Ślizowski, Walaszczyk 2008), której środek zlokalizowany jest na różnych głębokościach. Rozważano 8 głębokości 750, 900, 1050, 1200, 1350, 1500, 1650, i 1800 m p.p.t.

We wszystkich przypadkach przyjęto podobny jakościowo, całkowicie teoretyczny, sposób obciążania modelu opisany szczegółowo w pracach Ślizowskiego i Urbańczyka (2003, 2007). Najpierw wyznaczono rozwiązanie dla komory wypełnionej solanką. Następnie symulowano proces stopniowego zmniejszania ciśnienia do wartości minimalnej i wzrost do wartości maksymalnej. Dla każdego z etapów symulacja przeprowadzona była dla okresu 2 lat i dla wszystkich komór przyjęto takie same właściwości reologiczne górotworu opisane prawem pełzania Nortona:

$$\frac{d\varepsilon_{ef}}{dt} = Ae^{Q/RT} \sigma_{ef}^n \quad (1)$$

Rozważano dwie wartości parametru $n = 4$ i $n = 5$, jak wykazują bowiem eksperymenty w tych granicach mieści się rzeczywista wartość współczynnika. Parametr Q/R ustalono na 5750 K, a wartość A przyjęto tak, by dla naprężeń efektywnych $\sigma_{ef} = 10$ MPa i temperatury 323 K szybkość pełzania wynosiła 0,02 %/dobę.

Obliczenia wykonano przy użyciu autorskiego programu Geosolk opartego na metodzie elementów skończonych (Ślizowski, Urbańczyk 2003).

Uzyskane w trakcie symulacji szybkości pełzania dla trzech wybranych głębokości posadowienia środka komory tj. 900, 1200 i 1500 m p.p.t. przedstawia rysunek 2.

Jak widać na zamieszczonych rysunkach w przypadku spadku ciśnienia szybkość konwergencji maleje, a w przypadku wzrostu narasta, mając tendencję do stabilizacji. Z punktu widzenia poszukiwanej funkcji opisującej szybkość konwergencji komory najistotniejsze są wartości na końcu analizowanych etapów, które zestawiono w tabeli 1.

Dane te posłużyły do określenia współczynników poszukiwanej funkcji, opisującej szybkość konwergencji w zależności od ciśnienia magazynowania. Przyjęto formułę analogiczną do prawa pełzania Nortona:

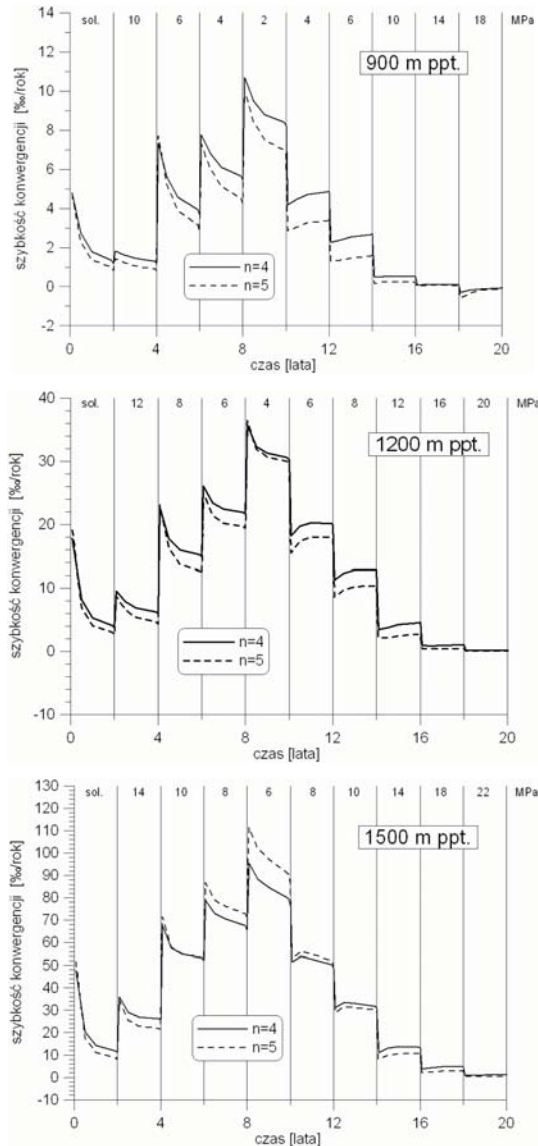
$$\frac{dV_{konw}}{dt} = Ae^{-Q^*/RT} (p_g - p_z)^{n^*} \quad (2)$$

gdzie:

- dV_{konw}/dt – szybkość konwergencji względnej,
- p_g – ciśnienie gazu,
- p_z – ciśnienie górotworu na głębokości środka komory.

Otrzymane wartości współczynników dla rozwiązań z $n = 4$ i $n = 5$ oraz dopasowanie łączne uwzględniające wszystkie rezultaty zawiera tabela 2.

Szybkości konwergencji, w zależności od różnicy pomiędzy ciśnieniem gazu a ciśnieniem górotworu, w temperaturach 303K i 333K zgodne z wyznaczonymi funkcjami przedstawiają rysunki 3a i 3b. Dodatkowo na rysunkach przedstawiono odpowiednie szybkości pełzania w zależności od naprężeń efektywnych zgodne z rozpatrywanymi wariantami prawa pełzania Nortona.



Rys. 2. Szybkości pełzania dla trzech głębokości posadowienia komory

Fig. 2. Creep rates at three cavern depths

TABELA 1

Szybkości konwergencji uzyskane na końcu etapów

TABLE 1

Convergence rates obtained at the end of stages of simulation

Głębokość środka komory		Szybkość konwergencji [%/rok]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
750	Ciśnienie	8,83	6	4	2	0	2	4	6	8	12
	$n = 4$	0,48	1,13	1,68	2,50	3,66	1,92	0,94	0,41	0,16	0,03
	$n = 5$	0,34	0,87	1,33	2,05	3,09	1,34	0,53	0,18	0,07	0,01
900	Ciśnienie	10,59	6	4	2	0	2	4	6	10	14
	$n = 4$	0,95	2,96	4,08	5,90	8,55	5,31	3,17	1,75	0,34	0,08
	$n = 5$	0,69	2,38	3,32	4,98	7,63	4,17	2,16	1,00	0,15	0,04
1 050	Ciśnienie	12,36	8	4	2	0	2	4	8	12	16
	$n = 4$	1,70	4,61	9,94	13,98	19,45	13,12	8,60	3,13	0,75	0,14
	$n = 5$	1,24	3,69	8,70	13,01	19,61	12,06	7,13	1,96	0,33	0,08
1 200	Ciśnienie	14,12	8	4	2	0	2	4	8	12	16
	$n = 4$	2,90	11,14	22,72	30,57	39,62	27,48	18,77	8,21	2,87	0,63
	$n = 5$	2,11	9,42	22,20	32,28	44,82	28,58	17,90	6,40	1,67	0,25
1 350	Ciśnienie	15,89	10	6	4	2	4	6	10	14	18
	$n = 4$	5,10	17,80	35,42	45,87	56,55	38,63	26,23	11,92	4,56	1,23
	$n = 5$	3,73	15,45	36,30	50,55	65,80	41,19	25,65	9,68	2,90	0,51
1 500	Ciśnienie	17,65	12	8	6	4	6	8	12	16	20
	$n = 4$	8,68	28,45	53,45	65,56	74,82	48,84	31,99	14,74	5,98	1,87
	$n = 5$	6,37	25,95	57,37	74,52	87,23	51,23	30,45	11,74	3,82	0,85
1 650	Ciśnienie	19,42	14	10	8	6	8	10	14	18	22
	$n = 4$	15,34	44,42	77,27	87,16	86,74	49,94	28,72	12,46	5,07	1,72
	$n = 5$	11,56	42,72	86,17	100,13	94,77	44,72	20,83	7,11	2,30	0,58
1 800	Ciśnienie	21,15	16	12	16	20	24				
	$n = 4$	25,58	67,04	104,81	48,92	21,38	8,04				
	$n = 5$	20,19	67,83	119,43	47,21	17,17	5,11				

Konsekwencją niższych wartości n^* i Q^*/R w porównaniu z odpowiadającymi im wartościami n i Q/R jest mniejszy rozrzut krzywych konwergencji niż krzywych pełzania. Można więc stwierdzić, że szybkość konwergencji komór nie jest wprost proporcjonalna do szybkości pełzania soli, co przyjmowano w niektórych publikacjach (Guarascio 1998).

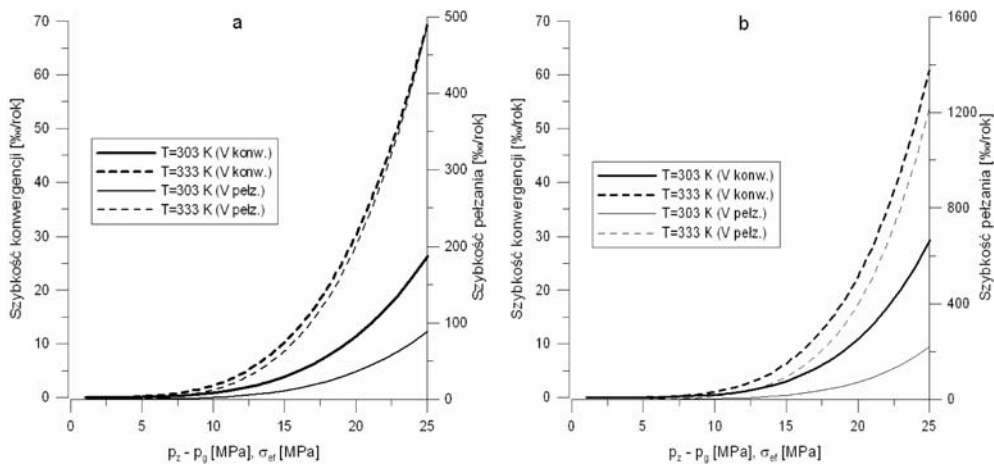
TABELA 2

Dopasowane parametry funkcji określonej wzorem (2)

TABLE 2

Fitted parameters of function described by formula (2)

Parametr	$n = 4$	$n = 5$	Łącznie
A^* [%/rok]	7,46	0,0626	0,6846
Q^*/R	3 267,1	2 468,8	2 867,9
n^*	3,74	4,44	4,09



Rys. 3. Zależność szybkości konwergencji od różnicy pomiędzy ciśnieniem gazu a ciśnieniem górotworu i szybkości pełzania od naprężeń efektywnych

a – dla prawa pełzania Nortona z $n = 4$, b – dla prawa pełzania Nortona z $n = 5$

Fig. 3. Convergence rate vs. pressure difference between gas pressure and rock massif pressure and creep rate vs. effective stress

a – for Norton creep law with $n = 4$, b – for Norton creep law with $n = 5$

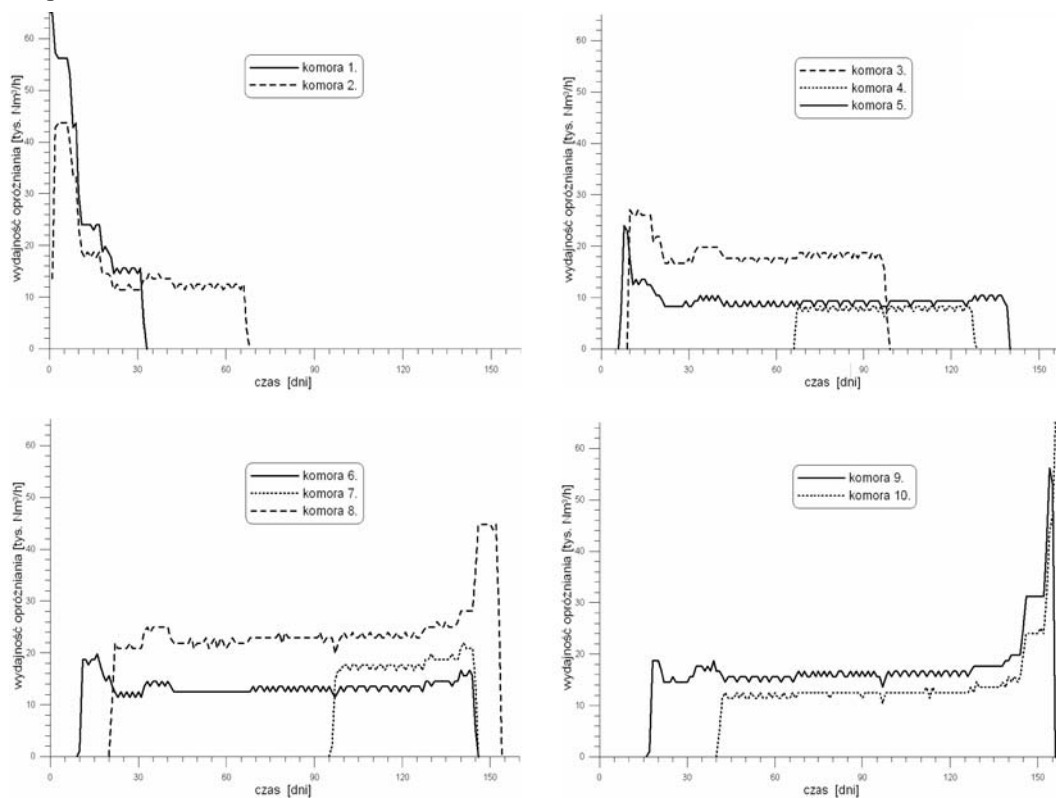
3. Minimalizacja konwergencji układu komór

Wyznaczoną funkcję opisującą konwergencję (dla wariantu łącznego) wykorzystano do wyznaczenia scenariusza eksploatacji, przy którym łączna konwergencja układu komór przedstawionych na rysunku 1 będzie najmniejsza.

W tym celu opracowano procedurę obliczeniową analizującą szybkość konwergencji. Danymi wejściowymi procedury są:

- głębokość posadowienia środków komór,
- objętości początkowe,
- dopasowanie wydajności poboru i zatłaczania.

Zgodnie z algorytmem analizowany okres poboru lub zatłaczania gazu do magazynów dzieli się na krótkie kroki czasowe. W każdym kroku wyznaczone są szybkości konwergencji i ubytki objętości wszystkich komór. Gaz pobierany jest z komory o najmniejszym ubytku objętości, a podczas zatłaczania odwrotnie. W przypadku, gdy wymagany pobór lub dostawa gazu są większe niż wydajność jednej komory, uruchamiana jest komora następna w kolejności. Rysunek 4 przedstawia kolejności włączania i wydajności poboru z poszczególnych komór w przypadku scenariusza zakładającego opróżnianie pełnego magazynu (ciśnienie gazu we wszystkich komorach ma wartość maksymalną) ze stałą szybkością 100 tys. Nm³/h. Jak widać na przedstawionych wykresach, nie zawsze kolejność uruchamiania poszczególnych komór i okres ich eksploatacji odpowiadają głębokości posadowienia.



Rys. 4. Czas eksploatacji i wydajności poboru gazu z poszczególnych komór w przypadku opróżniania pełnego magazynu ze stałą szybkością 100 tys. Nm³/h

Fig. 4. The time of operation and withdrawal rates from the caverns for discharging of the storage field with total rate 100,000 Sm³/h

Powyższy przykład jest całkowicie teoretyczny, jednak opracowaną procedurę obliczeniową można wykorzystać do oceny rzeczywistych scenariuszy napełniania i opróżniania magazynu.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania mają charakter teoretyczny zarówno w sensie przyjętych funkcji opisujących konwergencję komór jak i analizowanego scenariusza eksploatacji magazynu. Ciekawsze wyniki można byłoby osiągnąć, gdyby opracowane funkcje zostały zweryfikowane pomiarami konwergencji rzeczywistych komór. Na razie było to niemożliwe m.in. ze względu na zbyt krótki czas eksploatacji magazynu KPMG Mogilno.

Z całą pewnością problem konwergencji komór jest jeszcze bardziej złożony, gdyż nie tylko nie jest ona proporcjonalna do przyjętej szybkości pełzania górotworu, lecz również szybkość ta zależy od rodzaju soli. Przeprowadzone obliczenia wskazują że sumaryczna teoretyczna utrata objętości analizowanych dziesięciu komór wynosi 10–25 tys. m³ rocznie. Stosując opracowany algorytm można byłoby ją zmniejszyć o 1,5–4,5 tys. m³.

LITERATURA

- Guarascio M., (red.), 1998 – Guidelines for Safety Assessment of Salt Caverns. SMRI Fall Meeting 1998 Rome-Italy.
- Ślizowski J., 2006 – Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej. Studia, Rozprawy, Monografie nr 137. Wyd. IGSMiE.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., 2003 – Prognozowanie konwergencji względnej komory magazynowej gazu ziemnego przy zastosowaniu zaktualizowanego modelu górotworu solnego. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 19, z. 2, 43–56. Wyd. IGSMiE.
- Ślizowski J., Urbańczyk K. 2007 – Influence of effective stress on strain rate around the gas storing cavern 6th Conference on Mechanical Behavior of Salt – Hannover, Germany, 363–368.
- Ślizowski J., Walaszczuk J. 2008 – Long term stability evaluation of natural gas storage caverns. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 24, z. 4/1, 83–100. Wyd. IGSMiE.
- Urbańczyk K., Gąska K., 2007 – Exploitation of the gas storage cavern aided by computer simulation – Mogilno case study ATW SPE Workshop “Underground Gas Storage – Today and Tomorrow, Krakow, Poland.

NUMERYCZNA ANALIZA KONWERCENCJI POLA KOMÓR MAGAZYNOWYCH GAZU W WYSADZIE SOLNYM

Słowa kluczowe

Magazynowanie gazu, pełzanie górotworu solnego, minimalizacja konwergencji

Streszczenie

W artykule analizowany jest całkowity ubytek objętości pola komór magazynowych gazu w wysadzie solnym, w którym komory zlokalizowane są na różnych głębokościach oraz różnią się objętością i wartościami minimalnego i maksymalnego ciśnienia magazynowania. Konwergencje poszczególnych komór opisane są formułami, będącymi iloczynem funkcji potęgowej, której argumentem jest: różnica ciśnienia pierwotnego górotworu i ciśnieniem gazu w komorze oraz wykładniczej funkcji temperatury, analogicznie jak w prawie pełzania Nortona.

Współczynniki funkcji dopasowano na podstawie studium parametrycznego obejmującego: obliczenia metodą elementów skończonych dla 8 głębokości posadowienia komory (pomiędzy 750 i 1800 m p.p.t.) i kilku wartości ciśnienia magazynowanego gazu. Na obecnym etapie badań założono brak wzajemnego oddziaływania komór oraz przyjęto niezależność konwergencji względnej komory od jej objętości geometrycznej. Dopasowane współczynniki analizowanej funkcji są różne od współczynników przyjętych dla opisu prawa pełzania stacjonarnego Nortona.

Przedstawiony jest przykład harmonogramu eksploatacji magazynu, zapewniający minimalizację sumarycznej konwergencji komór w trakcie ich opróżniania i napełniania. Zgodnie z oczekiwaniem w pierwszej kolejności powinny zostać opróżniane komory położone najpłycej, w przypadku napełniania zaś odwrotnie. Występujące odstępstwa od tej reguły związane są z maksymalną dopuszczalną wydajnością poszczególnych komór, co również zostało uwzględnione w opracowanym algorytmie.

Przedstawione prace są pierwszym etapem badań prowadzonych w ramach grantu badawczo-rozwojowego nr R09 01 017 01. Ich celem jest opracowanie algorytmu sterującego pracą magazynu gazu w Mogilnie zapewniającego minimalizację jego konwergencji całkowitej.

NUMERICAL ANALYSES OF GAS STORAGE CAVERNS CONVERGENCE IN SALT DOME

Key words

Gas storage, creep rate of rock salt massif, minimization of convergence

Abstract

The paper presents analyses of the convergence of gas storage caverns placed in salt dome. The caverns are located at different depths which results in different values of minimum and maximum storage pressures and various total storage capacities of each cavern. The convergence of each cavern is described by formulas, which have the same shape as Norton creep law, i.e. power function of pressure difference (primary pressure in rock massif minus gas pressure in the cavern), multiplied the exponential function of temperature.

Coefficients of convergence function were fitted based on parametric study including: the finite elements method calculation for the 8 deep foundations of the cavern (between 750 and 1800 m b.s.) and several values of gas storage pressure. The fitted coefficients are different from those describing the stationary creep of salt. At the current stage of research no interaction between caverns and no influence of cavern geometric volume on its relative convergence is assumed.

An example of how the storage facility operation should be arranged to assure the minimal total convergence of storage caverns area during the withdrawing and injection processes are presented. Generally, as expected, the caverns located at lowest depth should be emptied at first place, in the case of injection the sequence should be opposite. The exceptions from this rule are connected with the maximum withdrawal rate from the individual caverns, which is also included in the developed algorithm.

Presented work is the first part of research program, aimed at developing of an algorithm to control the operation of KPMG Moglino gas storage facility to ensure a minimization of the total convergence. The work was carried out within Research and Development Project nr R09 01 017 01.

