

Marcin LUTYŃSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA MODELOWA WYSOKOCIŚNIENIOWEGO SKŁADOWANIA CO₂ W WYBRANEJ PODZIEMNEJ NIECZYNNEJ KOPALNI

Streszczenie. W artykule zaprezentowano koncepcję wysokociśnieniowego składowania CO₂ w podziemnej kopalni węgla. Podano założenia i warunki realizacji koncepcji. Za pomocą programu CO₂-VR obliczono pojemność przykładowej kopalni, w której ciśnienie w zbiorniku jest wyższe od ciśnienia hydrostatycznego, zapobiegając przy tym zatopieniu kopalni.

EXPAMPLE OF A MODEL ANALISYS OF CO₂ HIGH PRESSURE STORAGE IN UNDERGROUND ABANDONED MINE

Summary. In the article the concept of CO₂ high pressure storage in abandoned coal mine is presented. Assumptions and conditions for model application are given. Using CO₂-VR simulator storage capacity for the mine where reservoir pressure is higher than the hydrostatic is calculated.

1. Wprowadzenie

Zgodnie z podpisanym przez Polskę w 1998 roku i ratyfikowanym w 2002 protokołem z Kyoto, Polska zobowiązała się zredukować emisję CO₂ w latach 2008-2012 o 6% w stosunku do roku bazowego 1988. Konsekwencją podpisania protokołu, a także akcesji do Unii Europejskiej jest przyłączenie się Polski do Europejskiego Systemu Handlu Emisjami, który umożliwi poszczególnym gałęziom przemysłu handlowanie uprawnieniami do emisji dwutlenku węgla. Wydane Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 grudnia 2005 r. w sprawie przyjęcia Krajowego Planu Rozdziału Upnień do emisji dwutlenku węgla na lata 2005-2007 oraz wykazu instalacji czasowo wykluczonych ze wspólnotowego systemu

handlu uprawnieniami do emisji w okresie od dnia 1 stycznia 2005 r. do dnia 31 grudnia 2007 r. określa szczegółowo całkowitą liczbę uprawnień do emisji dwutlenku węgla dla poszczególnych rodzajów instalacji objętych systemem, a także wykaz instalacji wraz z przyznaną dla nich średnioroczną liczbą uprawnień w okresie rozliczeniowym 2005-2007 r. Całkowita liczba uprawnień do emisji dwutlenku węgla na lata od 2005 do 2007 roku wynosi 717 300 000 t.

Znaczna część emisji CO₂ pochodzi ze spalania paliw kopalnych, a w szczególności dwutlenku węgla. Spośród różnych technologii redukcji emisji tego gazu interesujące wydaje się być wychwytywanie i podziemne składowanie CO₂ (tzw. sekwestracja CO₂). Jedną z koncepcji jest wysokociśnieniowe składowanie CO₂ w podziemnych kopalniach węgla kamiennego.

2. Kopalnia jako magazyn gazu

Koncepcja magazynowania gazu w zamkniętej kopalni została zrealizowana w Belgii i USA. Po uszczelnieniu szybów i wszelkich połączeń z powierzchnią, wykonaniu rurociągów kopalnie z powodzeniem służyły jako sezonowe zbiorniki gazu ziemnego, np. kopalnia Leyden niedaleko Denver w USA lub kopalnia Anderlus na północy Belgii.

Sekwestracja dwutlenku węgla w podziemnych kopalniach węgla kamiennego może być zrealizowana przy założeniu: szczelności składowiska gazu w długiej perspektywie czasowej, dużej pojemności składowiska gazu, niskich kosztów składowania gazu, bezpieczeństwa składowania.

Wszystkie powyższe warunki muszą być zrealizowane, aby można było rozważyć realizację projektu składowania CO₂ w podziemnej kopalni.

Jednakże, w przypadku zamkniętych kopalń należy się spodziewać trudności związanych z dopływem wód do wyrobisk, które w konsekwencji powodują podnoszenie zwierciadła wody i „wypychanie” gazu do góry poprzez szczeliny w górotworze, a także nieszczelności w izolacji z powierzchnią i ewentualnymi spękaniem, szczelinami lub uskokami w warstwach nadległych. Dodatkowo, można się spodziewać nieszczelności w izolacji wyrobisk udostępniających (sztolnie, szyby, dowiezchnie itp.), którymi gaz może migrować do atmosfery.

W przypadku kopalni zamienionej w podziemny magazyn gazu ziemnego ciągle pompowanie wód dołowych stanowi niewielki koszt magazynowania. Jednakże przy

założeniu długiego czasu składowania dwutlenku węgla oraz wymaganego niskiego kosztu obsługi składowiska pompowanie wód dołowych nie może być stosowane.

Koncepcja, która pozwala na ograniczenie napływu wód dołowych do kopalni oraz maksymalne wykorzystanie przestrzeni składowania, zakłada [2]:

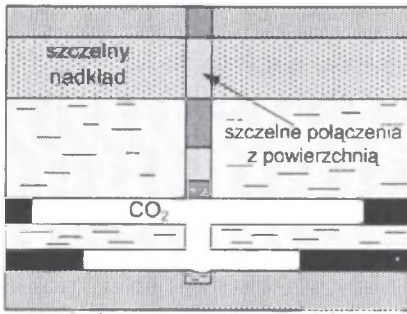
- absolutną **szelność nadkładu**, warstw spagowych oraz izolacji połączeń z powierzchnią,
- **przepuszczalność wyrobisk kopalni** w częściach przeznaczonych na zbiornik, nawet w rejonach zaciśniętych, wystarczająco dużą (>1000 darcy), aby traktować kopalnię jako jeden zbiornik. Przyjmuje się, że każdy poziom kopalni jest w równowadze (temperatura i ciśnienie są jednakowe na całym poziomie).

Fazy wypełniania kopalni, w założonym modelu, zostały przedstawione na rysunku 1. W pierwszej fazie (rys. 1a) kopalnia wypełniona jest w całości gazem. W kolejnej fazie (rys. 1b), ze względu na różnicę w ciśnieniu gazu w zbiorniku i hydrostatycznym w górotworze, następuje dopływ wody do wyrobisk kopalni. W efekcie podnoszenia się zwierciadła wody (rys. 1c) dwutlenek węgla zostaje sprężony i ciśnienie gazu może przewyższyć ciśnienie hydrostatyczne w górnej części kopalni. Z tego też powodu szyby i wszelkie połączenia z powierzchnią muszą być wystarczająco szczelne, aby wytrzymać ciśnienie większe o około 30% od ciśnienia hydrostatycznego.

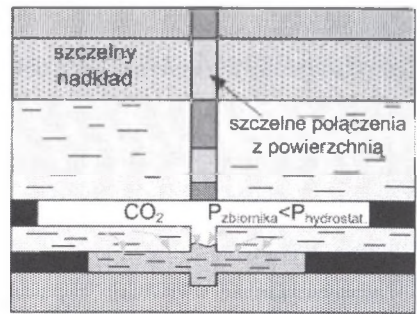
Później może następować migracja gazu do otaczających wyrobisk lub górotworu, do momentu, kiedy ciśnienie gazu będzie wyższe lub równe ciśnieniu hydrostatycznemu na każdym poziomie kopalni (rys. 1d). W ostatniej fazie następuje osiągnięcie stanu równowagi i w długiej perspektywie czasowej może nastąpić zupełne zatopienie kopalni (rys. 1e). Nie będzie to sprzeczne z założeniami, jeżeli nadkład i połączenia z powierzchnią pozostaną szczelne.

W celu oszacowania pojemności kopalni węgla kamiennego przeznaczonej do wysokociśnieniowego składowania CO₂ należy zidentyfikować:

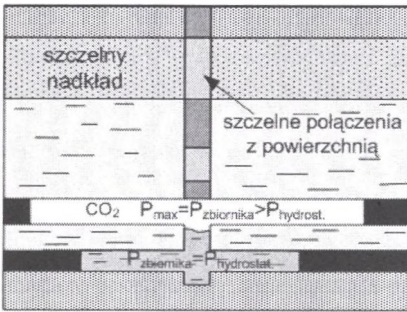
- kubaturę wyrobisk i głębokość eksploatacji na poszczególnych poziomach,
- porowatość gruzowiska zawałowego,
- stopień zaciśnięcia wyrobisk,
- stopień zawodnienia kopalni,
- kubaturę pozostawionych resztek węgla,



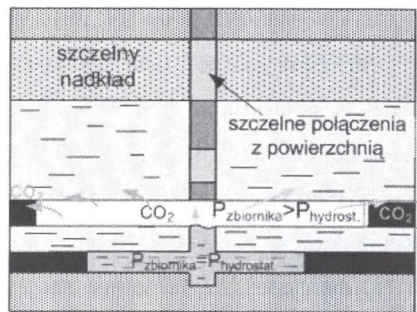
a) I faza – wyrobiska wypełnione w całości CO_2



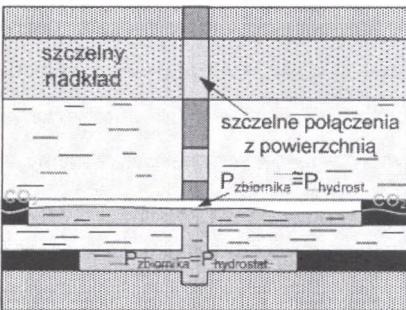
b) II faza – podnoszenie się zwierciadła wody



c) III faza – kompresja gazu



d) IV faza – ucieczka gazu do górotworu



e) V faza – stan równowagi

Rys. 1. Fazy wypełniania kopalni gazem
Fig. 1. Stages of mine filling with CO_2

- sorpcyjność węgla,
- skład chemiczny lub całkowitą zawartość substancji rozpuszczonych (TDS) wody dołowej.

Dokładne określenie wszystkich parametrów jest trudne i wynika m.in. z braku dokładnego rozpoznania geologicznego, niedostatecznej znajomości stopnia zaciśnięcia wyrobisk i zawodnienia kopalni oraz trudności w oszacowaniu kinetyki sorpcji gazu na węglu.

Do obliczenia pojemności magazynowej kopalni węgla kamiennego, rozkładu ciśnienia i gęstości wraz ze zmieniającą się głębokością służy pionowy symulator złożowy CO₂-VR autorstwa Krisa Piessensa z Belgijskiego Królewskiego Instytutu Nauk Przyrodniczych.

Program zakłada wysokociśnieniowy model składowania CO₂ opisany wcześniej. W przeciwieństwie do naturalnych zbiorników, które charakteryzują się dużą rozciągłością poziomą i stosunkowo niewielką wysokością, kopalnia jako podziemny zbiornik ma zazwyczaj kilka poziomów i dużą wysokość. Ponadto, przepuszczalność zrobów w kopalni, nawet jeżeli są zaciśnięte, jest znacznie większa niż skał zbiornikowych. Biorąc pod uwagę zmianę temperatury oraz ciśnienia wraz z głębokością, do modelowania tego typu zbiorników nie nadają się klasyczne założenia symulatorów złożowych, zakładające stałą gęstość płynu, który jest zatłaczany lub pobierany ze złoża, a także zmianę jego stanu skupienia aż do fazy nadkrytycznej.

Obliczenie ciśnienie i gęstości CO₂ następuje dla każdej komórki o zadanej wysokości (standardowo 20 m), która odpowiada danej głębokości kopalni. Obliczenia zaczynają się od podanego punktu (głębokości w kopalni), a następnie program oblicza gęstość i ciśnienie w komórkach powyżej i poniżej zgodnie z gradientem geotermicznym. Program wykonuje obliczenia wyłącznie statyczne, nie uwzględniając dynamiki płynów.

Skomplikowany układ przestrzenny kopalni został uproszczony do jednowymiarowego modelu, w którym kinetyka migracji gazu przez zroby nie jest brana pod uwagę (rys. 2).

Parametry dwutlenku węgla określane są za pomocą równania stanu Span'a&Wagnera [3]. Program zakłada, że gaz występujący w kopalni to czysty dwutlenek węgla, ponieważ równanie stanu użyte do obliczeń nie uwzględnia mieszanin gazów. Głównym zadaniem programu jest określenie profilu zmiany gęstości wraz z głębokością. W tym celu zakłada się liniowy przyrost temperatury równy gradientowi geotermicznemu górotworu. Gradient hydrostatyczny zmienia się liniowo, natomiast profile gęstości i ciśnienia CO₂ obliczane są za pomocą algorytmu rekursywnego ze względu na złożoność równania stanu.

Ponadto, program oblicza ilość rozpuszczonego CO₂ w wodzie, który zmienia się w zależności od temperatury wody, ciśnienia, a także zasolenia. Im wyższe zasolenie, tym mniejsza rozpuszczalność CO₂. Wzór ogólny, jaki zastosowano do obliczenia stężenia molalnego CO₂ w roztworze:

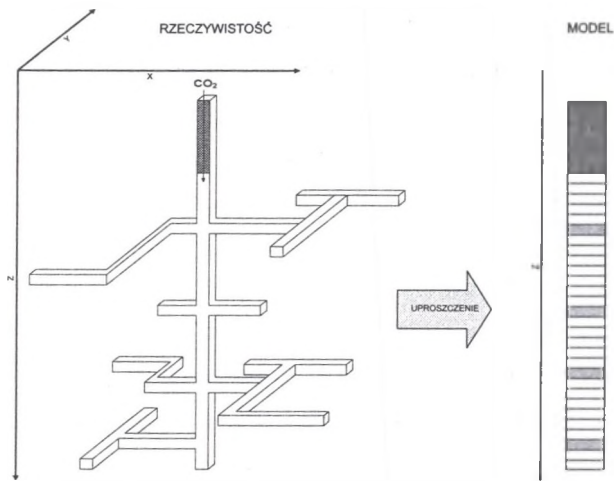
$$m = \frac{\Phi \cdot (P - p_w)}{K_H \cdot k_T \cdot k_s e^{\frac{v(P - p_w)}{RT}}}$$

gdzie:

m – stężenie molalne CO_2 w roztworze, $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$; Φ – współczynnik lotności gazu, - ; P – ciśnienie, MPa; P_w – ciśnienie cząstkowe wody, MPa; K_H – stała Henry’ego w warunkach normalnych (0,1 MPa i 25°C) i rozcieńczeniu nieskończenie wielkim = $2,64 \frac{\text{MPa} \cdot \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{CO}_2}}$;

k_T – współczynnik aktywności, poprawka K_H dla temperatury, k_s – współczynnik aktywności, poprawka K_H dla zasolenia, v – cząstkowa objętość molowa CO_2 , cm^3/mol ; R – stała gazowa,

$\frac{\text{MPa} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$; T – temperatura, K.



Rys. 2. Schemat uproszczenia układu przestrzennego kopalni do jednowymiarowego modelu
Fig. 2. Simplification of complex geometry of mine into one dimensional model

Znaczna ilość CO_2 może być sorbowana na pozostałych pokładach węgla, lecz ze względu na brak danych dotyczących pozostawionych resztek pokładów oraz sorpcyjności węgla, która zmienia się w zależności od typu węgla oraz wilgotności, sorpcja CO_2 na węglu została pominięta w obliczeniach.

3. Analiza modelowa składowania CO_2 w nieczynnej podziemnej kopalni

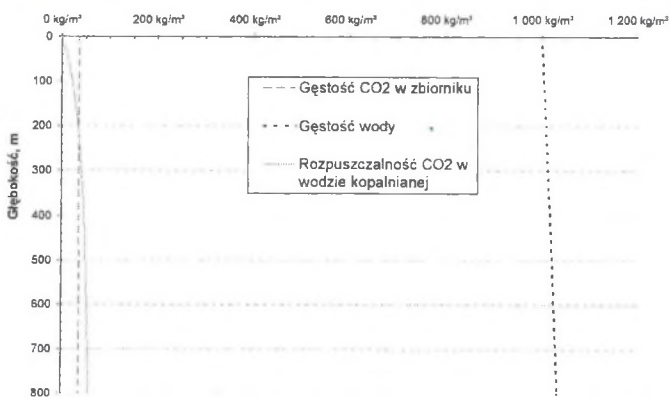
W celu zobrazowania rozkładu ciśnienia oraz obliczenia gęstości CO_2 w z zamkniętej kopalni najlepiej posłużyć się prostym przykładem, który częściowo został oparty na danych z kopalni „Nowa Ruda”[1]. Pod uwagę brano tylko objętość geometryczną wyrobisk typu kawernowego, wyrobisk eksploatacyjnych, zrobów poeksploatacyjnych i skał porowatych.

Pozostawione resztki pokładów węgla nie były brane pod uwagę ze względu na ograniczenia programu.

Podstawowe dane zastosowane w obliczeniach:

- Głębokość i objętość geometryczna poziomów przyjętych w analizie:
 - 160 – 260 m : 4 mln m³,
 - 300 – 400 m: 4 mln m³.
- Szacunkowa objętość geometryczna zbiornika: 8 mln m³.
- Uszczelnienie szybu do głębokości (korek szybowy): 180 m.
- Całkowita zawartość substancji rozpuszczonych (TDS): 5%.

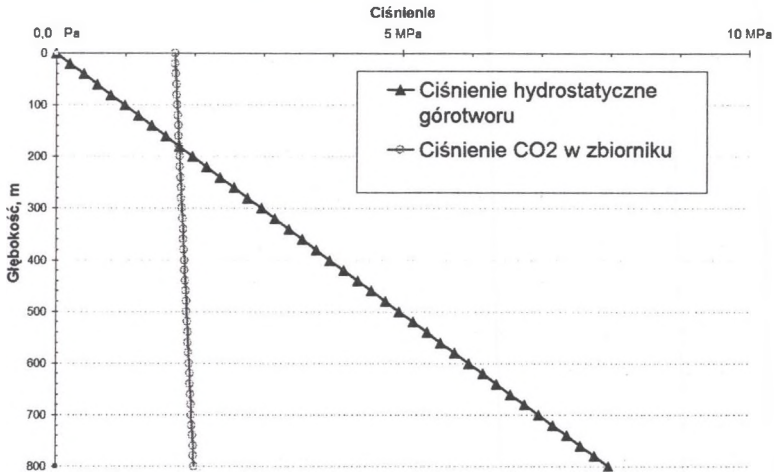
W pierwszym etapie program oblicza ilość zmagazynowanego gazu oraz rozkład gęstości wody oraz gazu wraz z głębokością dla maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia na głębokości korka szybowego w suchej kopalni. W obliczeniach przyjęto, że dopuszczalne ciśnienie dwutlenku węgla nie może przekroczyć ciśnienia hydrostatycznego na głębokości 180 m. Oznacza to, że maksymalne ciśnienie dopuszczalne w tym punkcie wynosi 1,8 MPa. Ilość CO₂ możliwego do zmagazynowania w kopalni wynosi około 294 000 t. Średnia gęstość CO₂ w zbiorniku wynosi 37 kg/m³. Dwutlenek węgla znajduje się w fazie gazowej, nie został osiągnięty punkt krytyczny. Profil zmiany gęstości CO₂, gęstości wody oraz rozpuszczalności CO₂ w wodzie kopalnianej przedstawiono na rys. 3. Rozpuszczalność CO₂ w wodzie dołowej jest wyższa niż gęstość gazu na danej głębokości. Oznacza to, że pojemność kopalni jest większa, jeśli kopalnia byłaby zatopiona, aniżeli gaz miałby być magazynowany w pustkach.



Rys. 3. Profil zmiany gęstości CO₂, gęstości wody oraz rozpuszczalności CO₂ w wodzie kopalnianej dla ciśnienia w zbiorniku 1,8 MPa

Fig. 3. Plot of CO₂ density and density of formation water compared to solubility of CO₂ in water (max. pressure at 180m = 1,8 MPa)

Rysunek 4 przedstawia profil zmiany ciśnienia hydrostatycznego oraz ciśnienia CO₂ w zbiorniku. Ciśnienie gazu powyżej przecięcia się prostych jest wyższe od ciśnienia hydrostatycznego, natomiast punkt, gdzie proste się przecinają, określa równowagę ciśnień. Powyżej tego punktu nastąpi migracja wody do zbiornika i powolne zatopienie kopalni w przypadku zaprzestania pompowania wód dołowych.



Rys. 4. Profil zmiany ciśnienia CO₂ w zbiorniku i ciśnienia hydrostatycznego górotworu wraz z głębokością (max. ciśnienie na głębokości 180 m = 1,8 MPa)

Fig. 4. Profile of CO₂ pressure in reservoir compared to hydrostatic pressure profile (max. pressure at 180m = 1,8MPa)

Aby zbiornik nie uległ zatopieniu, można z góry podać ilość CO₂, jaka powinna być docelowo składowana w zbiorniku, tak aby ciśnienie w zbiorniku było wyższe od ciśnienia hydrostatycznego i zbiornik nie uległ zatopieniu. Jedynym ograniczeniem w tym przypadku jest korek szybowy, który musi wytrzymać ciśnienie znacznie przewyższające 1,8 MPa podane w pierwotnym założeniu.

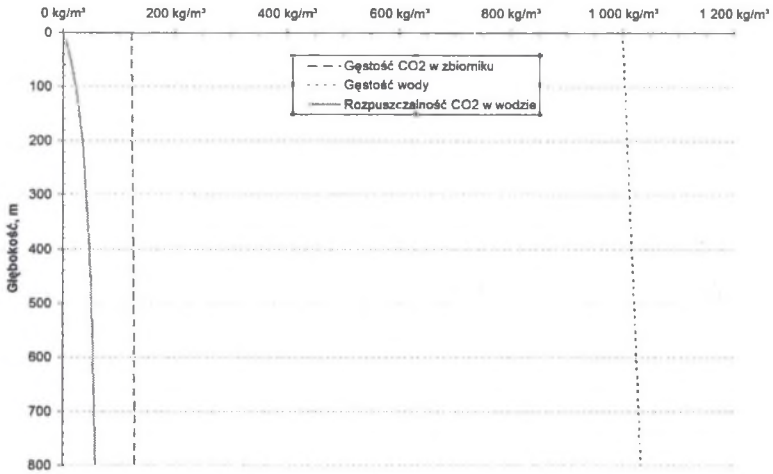
Przyjmując do obliczeń wartość docelową 1 mln t CO₂, uzyskano następujące wyniki:

- Ciśnienie gazu na głębokości 180 m (korka szybowego): 4,5 MPa (tj. 154,2% ciśnienia hydrostatycznego w tym punkcie),
- Średnia gęstość gazu w zbiorniku: 125 kg/m³ (faza gazowa).

Na rysunku 5 przedstawiono profil zmiany ciśnienia hydrostatycznego oraz ciśnienia CO₂ w zbiorniku. Ponieważ ciśnienie CO₂ do głębokości 500 m jest wyższe od ciśnienia hydrostatycznego, a wyrobiska kopalni zlokalizowane są do głębokości 400 m, oznacza to, że kopalnia będzie wypełniona w całości gazem i nie ulegnie zatopieniu.

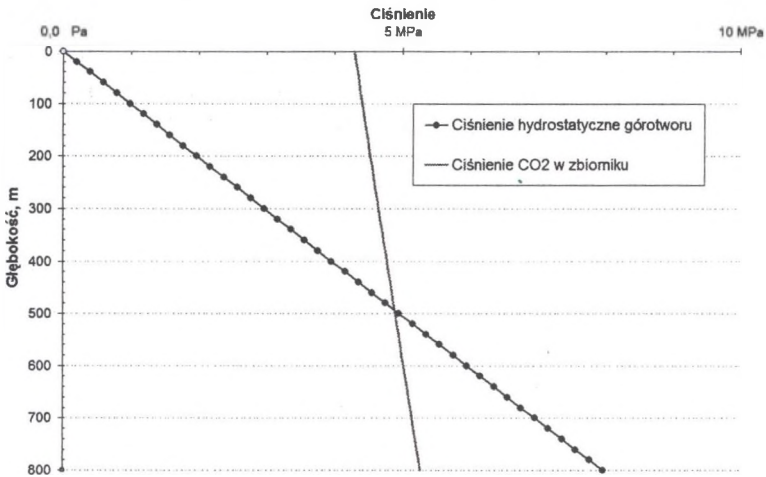
Na rysunku 5 przedstawiono profil zmiany gęstości CO₂, gęstości wody oraz rozpuszczalności CO₂ w wodzie kopalnianej. W rozpatrywanym przykładzie rozpuszczalność

CO₂ w wodzie kopalnianej jest mniejsza niż gęstość gazu w zbiorniku. Oznacza to, że pojemność zbiornika przy założonym ciśnieniu jest większa dla kopalni niezatopionej. Rysunku 6 przedstawia profil zmiany gęstości CO₂, gęstości wody oraz rozpuszczalności CO₂ w wodzie kopalnianej dla ciśnienia w zbiorniku na głębokości 180 m równego 4,5 MPa.



Rys. 5. Profil zmiany ciśnienia CO₂ w zbiorniku i ciśnienia hydrostatycznego górotworu dla ciśnienia w zbiorniku 4,5 MPa (maks. ciśnienie na głębokości 180 m = 4,5 MPa)

Fig. 5. Plot of CO₂ density and density of formation water compared to solubility of CO₂ in water (max. pressure at 180m = 4,5 MPa)



Rys. 6. Profil zmiany ciśnienia CO₂ w zbiorniku i ciśnienia hydrostatycznego górotworu wraz z głębokością (maks. ciśnienie na głębokości 180 m = 4,5 MPa)

Fig. 6. Profile of CO₂ pressure in reservoir compared to hydrostatic pressure profile (max. pressure at 180m = 4,5 MPa)

4. Wnioski

Koncepcja wysokociśnieniowego składowania CO₂ w nieczynnych kopalniach węgla kamiennego może być zrealizowana po spełnieniu podstawowych warunków, takich jak m.in. szczelność nadkładu i połączeń z powierzchnią. Wytrzymałe korki szybowe, które będą w stanie wytrzymać ciśnienia znacznie przekraczające ciśnienie hydrostatyczne w danym punkcie, są główną przeszkodą w implementacji tej technologii. Pojemność kopalni jako zbiornika gazu jest znaczna, co zostało udowodnione w obliczeniach, które nie brały pod uwagę sorpcyjności pozostałych pokładów węgla. Szacuje się, że pojemność pozostawionych resztek pokładów węglowych jest znacznie większa aniżeli pustek w kopalni. Dla przykładu, szacunkowa objętość resztek pokładów węglowych w kopalni „Nowa Ruda” wynosiłaby 13 mln m³, powiększając ponaddwukrotnie pojemność magazynową kopalni.

LITERATURA

1. Cisek W., Dybciak A., Landsberg W.: Przebieg i doświadczenia z likwidacji kopalni „Nowa Ruda” w aspekcie przekształcenia wyrobisk dołowych na potrzeby podziemnego magazynu gazu. Przegląd Górniczy Nr 7-8, Katowice 2001.
2. Piessens K., Dusar M. : The vertical reservoir simulator CO₂-VR. International Coal Bed Symposium Proceedings, paper nr 0347. Tuscaloosa 2003.
3. Span R., Wagner W.: A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple point temperature to 1100 K at pressures up to 8000 MPa. Journal of physical and chemical reference data. V.25, Gaithersburg 1996, p. 1509-1596.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Barbara Białecka