

**Jakub Siemek\*, Stanisław Nagy\***

## **PODZIEMNE MAGAZYNY GAZU ZIEMNEGO W WYEKSPOATOWANYCH KOPALNIACH WĘGLA**

### **1. WSTĘP**

Gaz ziemny magazynowany jest zwykle w trzech podstawowych typach:

- 1) kawernach solnych,
- 2) warstwach zawodnionych („aquiferach”),
- 3) wyeksploatowanych złóżach gazu i ropy naftowej.

Magazynowanie gazu w wyrobiskach górniczych jest mniej powszechnym sposobem magazynowania gazu. Ważniejsze doświadczenia zagraniczne w zakresie magazynowania gazu w wyrobiskach lub komorach podziemnych dotyczą następujących odrębnych typów rozwiązań:

- specjalnie wydrążone komory podziemne o umocnionych ścianach (*lined rock caverns*, LRC) w skałach magmowych (Szwecja) lub w komorach wypłukanych w wysadach solnych – bez dodatkowych zabezpieczeń (Niemcy, USA);
- całe zaniechane kopalnie węglowe (USA, Belgia).

W wymienionych przypadkach różne są proporcje objętości gazu fizycznie gazu buforowego oraz gazu roboczego, będącego przedmiotem obrotu handlowego. W przypadku kopalń węgla kamiennego występuje inny dodatkowy typ gazu (pod względem jego roli w zbiorniku), a mianowicie gaz zasorbowany w substancji węglowej pozostawionej w kopalni.

### **2. ISTNIEJĄCE MAGAZYNY W ZANIECHANYCH KOPALNIACH: KOPALNIA LEYDEN (USA)**

Kopalnia Leyden położona na północny – zachód od centrum Denver (koło miejscowości Arvada) i jest – jak dotąd – jedyną byłą kopalnią węgla składującą gaz w USA (EPA, 1998). Kopalnia prowadziła eksploatację na głębokości 240÷260 m systemem filarowo-komorowym

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

w latach 1903–1950 i wyeksploatowała w tym czasie około 5,4 mln t węgla przy stopniu wykorzystania złoża sięgającym ok.35%. Szacuje się (EPA), że pozostawione resztki węgla stanowią ok. 10 mln t, a ich zdolność sorpcyjną – na ok. 100 mln m<sup>3</sup> gazu metanowego. Nadkład złoża stanowią piaskowce gęsto przewarstwione iłowcami oraz mułowce ponad formacją węglową – co uznaje się za dowód szczelności warstw nadkładowych, w spągu zaś wyeksploatowanych pokładów występują porowate zawadnione piaskowce. Całkowita pojemność zbiornika wynosi 85 mln m<sup>3</sup> włączając wody stojące i wolne przestrzenie, zaś robocza pojemność wynosi 62 mln m<sup>3</sup> gazu. Obecnie gaz jest wypuszczany do odbiorców przez ponad 100 dni w roku uzupełniając dobowe fluktuacje zapotrzebowania metropolii Denver i obsługując 20% ogólnego jej zużycia gazu. Zasilanie odbiorców gazem w zimne dni okresu zimowego osiąga szczytowo ponad 30 mln m<sup>3</sup>/dobę. Zbiornik pobiera gaz bezpośrednio z rurociągu tranzytowego o ciśnieniu 2,2÷4,8 MPa – co eliminuje potrzebę użycia w tym celu kompresorów. Korzystnie przedstawia się ekonomiczna strona omawianego zbiornika Leyden, operatorska firma zainwestowała w niego bowiem ogółem 18 mln USD, zaś wartość zbiornika sięga obecnie ok. 100 mln USD.

### 3. ISTNIEJĄCE MAGAZYNY W ZANIECHANYCH KOPALNIACH: KOPALNIE WĘGLOWE W BELGII

Dwa zespoły wyrobisk górniczych byłych kopalń Anderlues oraz Peronnes-lez-Binche zostały zaadaptowane na podziemne magazyny gazu (Moerman, 1982). Oba zbiorniki mają po ok. 8 mln m<sup>3</sup> objętości pustek podziemnych. Ciśnienie składowania jest efektywnie niskie i wynosi 1,8÷3,5 bara. Każdy ze zbiorników obejmuje kompleks wyrobisk podziemnych na głębokości ok. 600 m i 1000 m, pochodzący z poprzednio eksploatowanych w tym rejonie 6–7 małych kopalń. Każdy z wymienionych zbiorników udostępniony jest dwoma szybami, z których jeden służy do wprowadzania gazu do zbiornika, drugi zaś do wyprowadzania gazu do rurociągu odbiorczego.

Przy wyborze najodpowiedniejszych kopalń węglowych na przyszłe podziemne zbiorniki gazu kierowano się głównie stopniem **zawodnienia kopalń** oraz grubością i szczelnością nadkładu złoża. Rejon Anderlues został wybrany głównie ze względu na jego małe zawodnienie (do 8 m<sup>3</sup>/dobę) – co jest korzystne z następujących względów:

- niskie koszty energii na pompowanie wody oraz wymianę skorodowanych pomp oraz rur w systemie odwadniającym (ze względu na słone wody kopalniane),
- niewielka redukcja objętości pustek służących do składowania gazu,
- niewielki stopień zawilgocenia składowanego gazu (co wymaga osuszenia przed wysłaniem do odbiorców).

Charakterystyczną cechą podziemnych zbiorników gazu w wyrobiskach kopalń węgla w Belgii (rejon Anderlues – Binche) jest duży udział sorpcji – desorpcji gazu w węglu w ogólnej objętości składowanego gazu (Moerman, 1982, Kidybinski, Siemek, 2006). Ogólne oszacowanie stopnia wyeksploatowania węgla w pokładach uprzednio wybieranych przez kopalnie podziemne tego rejonu wynosi 40%, co oznacza, że 60% zasobów pozostało w złożach. Przy podanym wyżej przedziale ciśnień składowania gazu w zbiorniku Anderlues

objętość całkowita składowanego gazu wynosi 180÷200 mln m<sup>3</sup> z czego zaledwie ok.10% pustkach pogórnich, reszta zaś zaadsorbowana jest w węglu. Okres napełniania zbiornika trwa do 3 miesięcy.

Szczelność kopalnianych zbiorników gazu jest bieżąco monitorowana w czasie ich pracy, przez system czujników rozmieszczonych w specjalnie wykonanych płytkich otworach wiertniczych z powierzchni do zwierciadła wód gruntowych (na całym obszarze składowania), jak również czujników wokół szybów. Poza bezpośrednimi pomiarami z otworów tych regularnie pobiera się próbki wody i gazów – do analizy (Kidybiński, Siemek, 2006).

Doświadczenia światowe sugerują następujące kryteria wyboru likwidowanej kopalni węgla na podziemny zbiornik gazu :

- znaczna odległość od pracujących podziemnych kopalń,
- szczelne przykrycie zbiornika,
- preferencja dla kopalń suchych lub o małym dopływie wody.

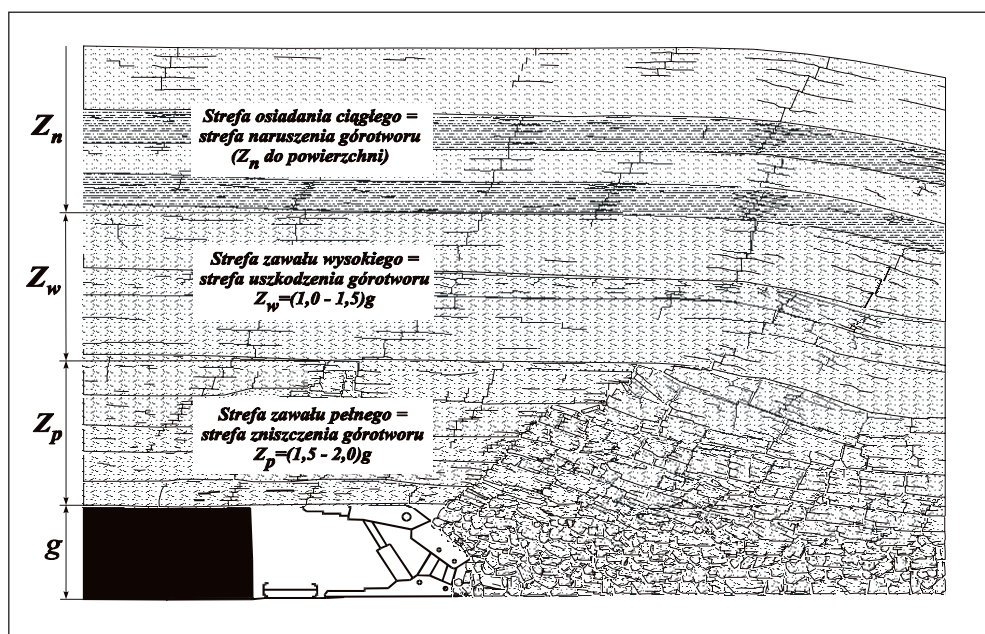
Skuteczne cykliczne magazynowanie gazu w zaniechanej kopalni węgla wymaga dobrania najbardziej do tego sprzyjających warunków, a w szczególności: nieprzepuszczalnego nadkładu, optymalnie – średniego zawodnienia kopalni, możliwie dużej objętości udostępnionego a nie wyeksploatowanego węgla, niewielkiej liczby wyrobisk udostępniających złożę z powierzchni – wymagających szczelnego podsadzenia oraz usytuowania obiektu w pobliżu zmasowanego kręgu odbiorców gazu o dużych sezonowych i dobowych wahaaniach zapotrzebowania. Próby i badania zbiornika – po uszczelnieniu szybów – realizuje się przy pomocy powietrza wtłaczanego kompresorami, a następnie obserwacji – w ciągu 1–2 miesięcy spadku ciśnienia powietrza w układzie. Z oczywistych względów ekonomicznych naciśnienie wtłoczonego powietrza w stosunku do ciśnienia atmosferycznego może być stosunkowo niewielkie.

Magazynowanie gazu w kopalni może wymagać przygotowania przed wysłaniem go do odbiorców, na przykład oddzielenia pary wodnej (przy pomocy obiegu glikolu), wzbogacenia propanem dla wyeliminowania adsorpcji wyższych węglowodorów na powierzchni węgla, a także wstępnego oszacowania potencjalnych strat gazu na wypełnienie PMG i „poduszkę gazową” (gaz buforowy).

Zasadniczymi wymaganiami stanowiącymi o przydatności struktury całej kopalni do budowy w niej zbiornika gazu lub paliw płynnych są (Kidybiński, Siemek, 2006):

- niewielki stopień naturalnego spękania górotworu karbońskiego, korzystne zaleganie warstw skalnych oraz dopuszczalny stopień uszkodzenia górotworu przez eksploatację górnictw;
- gruby, ciągły i nieprzepuszczalny nadkład warstw karbońskich bądź izolujący poziom wodonośny;
- brak połączeń z czynnymi kopalniami w sąsiedztwie;
- korzystne warunki hydrogeologiczne w otoczeniu zbiornika i niewielki dopływ wody do kopalni;
- duża spodziewana pojemność zbiornika (łącznie gazu wolnego w pustkach pogórnich i gazu zasorbowanego w resztkach węgla pozostawionych w kopalni).

Ocena stopnia naturalnego spękania górotworu jest punktem wyjścia do analizy przydatności całej struktury kopalni na podziemny magazyn gazu lub paliw płynnych. Ze względu na to, że największymi geologicznymi elementami nieciągłości górotworu są uskoki, którym zwykle towarzyszą strefy równoległych do nich spękań towarzyszących – głównym elementem analizy jest lokalna tektonika uskoku (Kidybiński, Siemek 2006). Naruszenie górotworu wyrobiskami eksploatacyjnymi jest drugim najistotniejszym czynnikiem oceny stopnia nieciągłości górotworu otaczającego potencjalny PMG. Powstawanie w górotworze pustek poeksploatacyjnych powoduje bowiem zmianę właściwości górotworu, w szczególności prowadzi to do powstania pseudociągłych i nieciągłych deformacji podbieranych warstw skalnych. Eksploatacja pokładu węgla prowadzi do powstania w górotworze stref o naruszonej strukturze pierwotnej takich jak strefa zawału pełnego, strefa zawału wysokiego, strefa pseudociągłego osiadania górotworu oraz strefa ruchów górotworu na zewnątrz dynamicznych i statycznych krawędzi eksploatacji (rys. 1). Zagadnienia te powinny być właściwie przeanalizowane pod kątem zapewnienia szczelności magazynu.



Rys. 1. Strefy zawałowe wokół wyrobiska ścianowego (Ropski, Znański 1965)

Łączna wysokość strefy zawałowej (zawał pełny i wysoki) wynosi w przybliżeniu trzykrotną wielkość wysokości ściany (grubości eksploatowanego złoże). Eksploatacja pokładu powoduje powstanie w górotworze pustek, których objętość jest proporcjonalna do ilości usuniętego węgla, zaś kształty są zależne od wielkości rozwinięcia eksploatacji. Ciągłość zalegania i niska przepuszczalność warstw izolacyjnych jest jednym z podstawowych problemów budowy niskociśnieniowych zbiorników gazu. W praktyce jedynie metody geofizyczne umożliwiają

wykonanie takich badań in situ na całym interesującym obszarze. Pozostałe techniki, np. otwory wiertnicze, stanowią informację jedynie punktową (Kidybiński, Siemek, 2006).

W przypadku magazynowania gazu w wyrobiskach górniczych w otoczeniu których znajduje się górotwór naturalnie nasycony wodą, ciśnienie magazynowanego gazu nie powinno przekraczać wartości tzw. ciśnienia przebiccia, które jest rzędu 65÷70 % ciśnienia hydrostatycznego, można przeto przyjąć za bezpieczną budowę zbiornika gazu w kopalni (o ciśnieniu ok. 0,5 MPa) jeśli strop zbiornika występuje nie płycej niż 75 m ppt, a miąższość izolujących iłów trzeciorzędowych wynosi przynajmniej 10 m, lub o ciśnieniu 1,0 MPa jeżeli strop zbiornika występuje na głębokości większej od 150 m a miąższość izolujących iłów przekracza 20 m. W warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zaprojektowanie zbiornika gazu wymaga więc precyzyjnego określenia spągu i stropu zalegania iłów mioceńskich. Brak strefy zawodnione wymusza utworzenie dodatkowej tzw. kurtyny wodnej nad projektowanym magazynem gazu. Lokalna ocena geologiczno-górnicza górotworu i wyrobisk potencjalnego PMG powinna odbywać się etapowo (tab.1). W rozważaniach szczelności górotworu należy brać pod uwagę jego szczelność w kierunku poziomym jak i szczelność w kierunku pionowym. Szczelność pozioma – rejon magazynu w kopalni węgla musi być oddalony od sąsiednich obszarów wydobywczych na taką odległość (lub oddzielona od nich odpowiedniej miąższości filarami), aby nie było między nimi połączenia gazo- lub hydrodynamicznego. Szczelność pionowa – utwory budujące warstwy nadkładu nad kopalnią powinny być szczelne tzn. nieprzepuszczalne lub bardzo słaboprzepuszczalne – warstwy te nie mogą być poprzesuwane, nie mogą w nich występować uskoki tektoniczne, musi być zabezpieczona szczelność górotworu pomiędzy magazynem gazu a powierzchnią terenu.

#### **4. TECHNOLOGIA PROCESU MAGAZYNOWANIA GAZU W WYROBISKACH GÓRNICZYCH**

Projektowanie i budowę PMG najogólniej można podzielić na dwa, różne metodologicznie etapy:

1. etap związany z hydrodynamiką i zjawiskami fizycznymi towarzyszącymi magazynowaniu gazu;
2. etap obejmujący wyposażenie magazynu w odwierty eksploatacyjne i infrastrukturę naziemną PMG, w tym:
  - konfigurację gazociągów zbiorczych i łączących,
  - separatory indywidualne i grupowe,
  - podgrzewacze gazu,
  - dehydratory i systemy iniekcji metanolu lub innych środków osuszających,
  - kompresory,
  - systemy pomiarowe i regulacyjne ciśnień i strumieni gazu, a także konstrukcję odwiertów i ich głowic,
  - systemy utylizacji i zagospodarowania solanki wydobywanej wraz z gazem.

**Tabela 1**

Etapy prac rozpoznawczych dla budowy PMG w całej kopalni węgla (Kidybiński, Siemek, 2006)

Okres realizacji PMG	Projektowanie	Infrastruktura	Identyfikacja wszystkich wyrobisk i otworów łączących PMG z powierzchnią ziemi oraz z sąsiednimi kopalniami
		Strefa spękań wokół wyrobisk	1. Ocena zasięgów stref spękań wokół wyrobisk łączących PMG z powierzchnią ziemi oraz z wyrobiskami innych kopalń – metodami analitycznymi
			2. Ocena możliwości istnienia połączeń między ww. wyrobiskami – metodami analitycznymi
			3. Wytypowanie wyrobisk do likwidacji oraz utrzymywania
		Naruszenie górotworu	1. Ocena stopnia rekonsolidacji zrobów (objętości pustek w zrobach) – metodami analitycznymi
			2. Ocena stanu naruszenia nadkładu i odsłoneń karbonu – metodami analitycznymi
	3. Ocena możliwości istnienia deformacji nieciągłych w rejonach uskoków tektonicznych – metodami geofizycznymi		
	Zagrożenia	1. Identyfikacja naturalnych zagrożeń występujących w obszarze i otoczeniu PMG	
		2. Ocena wpływu skutków zagrożeń na funkcjonalność PMG (stateczność obudowy, stan struktury skał, parametry magazynowane go gazu itp.) – metodami analitycznymi	
	Budowa	Infrastruktura	Ocena jakości likwidacji wyrobisk zbędnych metodami badawczo-pomiarowymi
		Strefa spękań wokół wyrobisk	Ocena szczelności utrzymywanych wyrobisk metodami badawczo-pomiarowym
		Naruszenie górotworu	1. Ocena szczelności nadkładu i odsłoneń karbonu metodami pomiarowymi
			2. Ocena szczelności rejonów uskoków tektonicznych metodami pomiarowymi
Zagrożenia	1. Ocena skuteczności likwidacji bądź izolacji źródeł zagrożenia wodnego, pożarowego i metanowego		
	2. Ocena skuteczności zabezpieczeń czynnych i biernych przed zagrożeniem sejsmicznym		
Eksploatacja	Wymogi ogólne	Okresowa ocena funkcjonalności PMG z punktu widzenia stanu środowiska	

Przy projektowaniu magazynów gazu w kawernach solnych, skalnych lub kopalniach węgla, istotną rolę odgrywają zmiany temperatury gazu i górotworu, wywoływane strumieniem gazu o znacznym natężeniu. Wpływa to w dużym stopniu na niebezpieczeństwo tworzenia się hydratów i ewentualnych przerw w eksploatacji (Siemek et al., 1995a, 1995b, Siemek et al. 1996, Moerman, 1982, Tek, 1987).

Przed podjęciem pełnych prac projektowych, niezbędnym jest rozstrzygnięcie wielu istotnych zagadnień, innymi słowy należy przeprowadzić studia i badania wstępne, określające w ogóle cele, możliwości i ewentualnie wielkość podziemnego magazynu gazu – tzw. studium wstępne. Studia te zwykle obejmują: zmiany temperaturowo-klimatyczne regionu, ocenę zapotrzebowania na gaz czyli oszacowanie wielkości rynku gazowego, wielkości ewentualnych rezerw strategicznych, lokalizację magazynu, pojemność i wydajność globalną PMG. Konieczne jest wykonanie wstępnej i pełnej oceny geologicznej, ocen stosunków wodnych w potencjalnej strukturze magazynowej, zebranie danych o ciśnieniach progowych, czyli ciśnieniach granicznych przewyższających ciśnienia kapilarne w warstwie stropowej, możliwościach wydajnościowych otworów. Przeważająca część studium wstępnego związana jest z problematyką zjawisk związanych jednak ze złożem i inżynierią złożową, generalnie zaś z określeniem pola hydrodynamicznego w warstwie magazynowej. Podstawowe problemy wiążące się z eksploatacją podziemnych magazynów gazu można podzielić na trzy zagadnienia wiążące się z: weryfikacją ilości gazu w PMG, wykrywaniem i prewencją dalekodystansowej migracji magazynowanego gazu w górotworze oraz utrzymaniem określonej wydajności PMG (Siemek et al. 1995, 1999a, 1999b).

Przedmiotem dalszych studiów projektowych powinny być obiekty, które pomyślnie przeszły wstępną kwalifikację geologiczną odnośnie odpowiedniej objętości geometrycznej, szczelności, głębokości zalegania oraz innych parametrów technicznych takich jak m.in.: wielkość ciśnień i wielkość objętości buforowej.

Podziemne magazynowanie gazu związane jest z szeregiem procesów takich jak m.in.:

- sprężanie gazu w czasie zatłaczania, jak też odbioru,
- redukcja ciśnienia,
- oczyszczanie gazu z zanieczyszczeń stałych i ciekłych,
- pomiar ilościowy gazu,
- nawanianie gazu.

Realizowane jest to poprzez:

- system pomiarowo-redukcyjny gazu,
- system przygotowania gazu do transportu,
- system powierzchniowych urządzeń do zatłaczania gazu.

## **5. POLSKIE PROJEKTY SKŁADOWANIA GAZU W LIKWIDOWANYCH KOPALNIACH WĘGLA**

Pierwszy kompleksowy program przystosowania całej likwidowanej kopalni węglowej na podziemny magazyn gazu opracowano i częściowo zrealizowano w latach 1995–2000 w kopalni „Nowa Ruda” i dotyczył on wyrobisk wykonanych w oddzielnym polu „Słupiec” (Cisek et al.

2001). Jako jedyne do tej pory polskie doświadczenie w omawianym zakresie przedsięwzięcie to zostanie poniżej krótko scharakteryzowane. Podstawowym jednak niedostatkim potencjalnego zbiornika „Słupiec” jest brak ciągłej i nieprzepuszczalnej pokrywy warstw geologicznych w nadkładzie karbonu, a także skomplikowana budowa górotworu i duże nachylenie warstw – co pozwala wątpić w możliwość skutecznej izolacji potencjalnego zbiornika przez wody podziemne, przez uzyskanie odpowiednio wysokiej wartości ich tzw. ciśnienia przebiccia.

Najbardziej korzystne warunki geologiczne do magazynowania gazu lub paliw płynnych w wyrobiskach i zrobach górniczych występują w kopalniach Silesia oraz Krupiński położone oddzielnie od innych kopalń w regionie zachodnim i południowo-zachodnim GZW. Obszar górniczy kopalni Silesia ma powierzchnię około 22 km<sup>2</sup>. Kopalnia Silesia jest kopalnią odosobnioną, a jej wyrobiska górnicze nie mają połączeń z wyrobiskami górniczymi innych kopalń. Najbliżej, tj. w odległości około 1,5 km na NEE od granic złoża KWK Silesia, położona jest KWK Brzeszcze.

## **6. EKONOMICZNA ANALIZA PORÓWNAWCZA UKŁADÓW MAGAZYNOWYCH W ZALEŻNOŚCI OD WYMAGANEJ SZCZELNOŚCI PRZY RÓŻNYCH CIŚNIENIACH MAGAZYNOWANIA**

Ocena ekonomiczna wybranych wariantów technicznych prowadzona jest według następującego schematu – szukana była cena za usługę magazynowania zapewniająca minimalną rentowność, dla której IRR jest równe stopie dyskontowej i wynosi co najmniej 12% zarówno dla kapitałów własnych, jak i całej inwestycji.

Przyjęto, że na cenę za usługę magazynowania składają się trzy elementy:

- 1) cena za rezerwację pojemności (stawka roczna),
- 2) cena za zatłaczanie gazu,
- 3) cena za odbiór gazu – równa cenie za zatłaczanie.

Proporcja pomiędzy ceną za rezerwację pojemności a ceną za zatłaczanie/odbiór uzyskana została poprzez podzielenie zdyskontowanych kosztów stałych przez zdyskontowane koszty zmienne za cały analizowany okres. Wszystkie analizowane warianty zapewniają wymaganą efektywność ekonomiczną (co wynika z przyjętych założeń).

Bardzo ważnym parametrem analizy jest całkowita cena jednostkowa usługi magazynowania przy założeniu wykorzystania całej zarezerwowanej pojemności czynnej. Odbiorca będzie skłonny zamawiać usługę magazynowania po najniższej możliwej cenie. Parametr ten powinien stanowić główne kryterium decyzyjne w analizach efektywności ekonomicznej inwestycji prowadzonych według zasady poszukiwania minimalnej ceny za usługę dla uzyskania założonej rentowności przedsięwzięcia.

Pojemności magazynowe do wykorzystania określono dla trzech wariantów ciśnieniowych – na podstawie doświadczeń amerykańskich i belgijskich. Podstawowym kryterium było ograniczenie maksymalnego ciśnienia roboczego do 75% ciśnienia hydrostatycznego. Przyjęto jako wariant bazowy magazyn niskociśnieniowy o ciśnieniu maksymalnym 10 bar i minimalnym 3 bary. Wariant ograniczony ciśnieniowo – maksymalne ciśnienie 7 bar



– minimalne ciśnienie 2 bary jest oznaczony jako II. Wariant III określono jako średniociśnieniowy: 17 bar – ciśnienie maksymalne i 10 bar- ciśnienie minimalne. Nie analizowano wariantu wysokociśnieniowego 30/10 bar. Wariant ten odrzucono z uwagi na możliwe ryzyko geologiczne.

## 7. METODYKA OCENY EFEKTYWNOŚCI EKONOMICZNEJ

Ocena efektywności ekonomicznej prowadzona jest w oparciu o następujące wskaźniki: wartość NPV (*Net Present Value* – wartość zaktualizowana netto) – jest to wartość bieżąca przyszłych strumieni pieniężnych generowanych przez projekt inwestycyjny.

Wskaźniki otrzymane dla kapitałów własnych wyrażają rentowność inwestycji z punktu widzenia kapitałów zainwestowanych przez właścicieli projektu. Wskaźniki dla całej inwestycji stanowią ocenę rentowności całkowitych nakładów inwestycyjnych (z kapitału własnego i z kredytu) i są brane pod uwagę przede wszystkim przez kredytodawców.

Pojemności magazynowe oszacowano na podstawie określonej objętości wyrobisk górniczych w KWK Silesia i KWK Krupiński. Wielkości te powiększono o pojemność metanu zaadsorbowaną w istniejących pokładach węglowych w kontakcie z istniejącymi wyrobiskami. Oszacowanie wykonano na podstawie prognozy danych amerykańskich (EPA, 1998) przy uwzględnieniu mniejszej pojemności sorpcyjnej polskich węgla.

Ocenę efektywności ekonomicznej przeprowadzono dla następujących wariantów technicznych:

- PMG Sielsia wariant 1 – pojemność czynna 200 mln m<sup>3</sup>, pojemność buf. 135 mln m<sup>3</sup>;
- PMG Sielsia wariant 2 – pojemność czynna 162 mln m<sup>3</sup>, pojemność buf. 71 mln m<sup>3</sup>;
- PMG Sielsia wariant 3 – pojemność czynna 200 mln m<sup>3</sup>, pojemność buf. 310 mln m<sup>3</sup>;
- PMG Krupiński wariant 1 – pojemność czynna 59 mln m<sup>3</sup>, pojemność buf. 24 mln m<sup>3</sup>;
- PMG Krupiński wariant 2 – pojemność czynna 43 mln m<sup>3</sup>, pojemność buf. 16 mln m<sup>3</sup>;
- PMG Krupiński wariant 3 – pojemność czynna 47 mln m<sup>3</sup>, pojemność buf. 83 mln m<sup>3</sup>.

Ocena ekonomiczna wybranych wariantów technicznych prowadzona jest według następującego schematu – **szukana jest cena za usługę magazynowania zapewniająca minimalną rentowność**, dla której IRR jest równe stopie dyskontowej i wynosi co najmniej 12% zarówno dla kapitałów własnych, jak i całej inwestycji,

Przyjęto, że na cenę za usługę magazynowania składają się trzy elementy:

- 1) cena za rezerwację pojemności (stawka roczna),
- 2) cena za zatłaczanie gazu,
- 3) cena za odbiór gazu – równa cenie za zatłaczanie.

Proporcja pomiędzy ceną za rezerwację pojemności a ceną za zatłaczanie/odbior uzyskana została poprzez podzielenie zdyskontowanych kosztów stałych przez zdyskontowane koszty zmienne za cały analizowany okres. Przyjęto 21-letni okres analizy obejmujący okres budowy i eksploatacji PMG. Obliczenia prowadzono w cenach stałych. Stopa dyskontowa przyjęta została na poziomie 12%. Dyskontowanie prowadzono na początek pierwszego roku.

Źródła finansowania inwestycji:

- Przyjęto dwa źródła finansowania przedsięwzięcia:

1) środki własne

2) kredyt.

Założono, że początkowy udział kredytu bankowego wyniesie 50% w finansowaniu nakładów inwestycyjnych.

- Oprocentowanie kredytu przyjęto w wysokości 8% w skali rocznej w ujęciu realnym. Raty kapitałowe i odsetki spłacane są na koniec roku. Okres karencji spłaty rat kapitałowych – 2 lata. W okresie budowy PMG odsetki od kredytu spłacane są z kapitałów własnych, tym samym nieznacznie wzrasta udział kapitałów własnych w finansowaniu inwestycji powyżej 50%. Czas spłaty kredytu dostosowano do prognozowanych przepływów środków pieniężnych z inwestycji. Łączny czas spłaty kredytu wyniesie 9 lat.

Szczegółowe wyniki analizy przedstawione są w tabelach obliczeniowych. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie głównych wskaźników dla wszystkich wariantów.

**Tabela 2**

Zbiornicze zestawienie głównych wyników analizy efektywności ekonomicznej budowy PMG Silesia i PMG Krupiński

Wariant	1	2	3	1	2	3
Parametr	PMG Silesia			PMG Krupiński		
Nakłady inwestycyjne [tys. zł]	110282	111965	145982	78795	77449	79891
NPV <sub>kap. wł.</sub> [tys. zł]	10039	9817	12168	6833	6772	6415
IRR <sub>kap. wł.</sub> [%]	14,5	14,4	14,3	14,3	14,4	14,2
Okr. zwr. zdysk. <sub>kap. wł.</sub> [lata]	13	13	13	13	13	13
Okr. zwr. niezdyk. <sub>kap. wł.</sub> [lata]	10	10	10	10	10	10
NPV <sub>cała inwest.</sub> [tys. zł]	997	664	780	94	122	139
IRR <sub>cała inwest.</sub> [%]	12,2	12,1	12,1	12	12	12
Okr. zwr. niezdyk. <sub>cała inwest.</sub> [lata]	9	9	9	9	9	9
<b>Oplata stała [zł/tys. m<sup>3</sup>]</b>	<b>84</b>	<b>108</b>	<b>111</b>	<b>208</b>	<b>284</b>	<b>263</b>
<b>Oplata zmienna [zł/tys. m<sup>3</sup>]</b>	<b>9</b>	<b>8,6</b>	<b>11,7</b>	<b>9,7</b>	<b>9,9</b>	<b>12</b>
<b>Calkowita cena jedn. [zł/tys. m<sup>3</sup>]*</b>	<b>102</b>	<b>125</b>	<b>134,4</b>	<b>227,4</b>	<b>303,8</b>	<b>286,9</b>

\* – przy pełnym wykorzystaniu magazynu

## 8. PODSUMOWANIE

- 1) Wszystkie analizowane warianty zapewniają wymaganą efektywność ekonomiczną (co wynika z przyjętych założeń).
- 2) Bardzo ważnym parametrem analizy jest całkowita cena jednostkowa usługi magazynowania przy założeniu wykorzystania całej zarezerwowanej pojemności czynnej. Odbiorca będzie skłonny zamawiać usługę magazynowania po najniższej możliwej cenie. Parametr ten powinien stanowić główne kryterium decyzyjne w analizach efektywności ekonomicznej inwestycji prowadzonych według zasady poszukiwania minimalnej ceny za usługę dla uzyskania założonej rentowności przedsięwzięcia.
- 3) PMG Silesia zapewnia rentowność przy niezbyt wysokiej cenie usługi magazynowania gazu, ponad dwukrotnie niższej niż cena usługi magazynowania w PMG Krupiński.
- 4) Warianty o podwyższonym ciśnieniu eksploatacji są generalnie droższe niż warianty podstawowe.
- 5) Możliwe jest obniżenie ceny usługi magazynowania przez:
  - dokładną kontrolę nakładów zapewniającą ewentualne ich obniżenie oraz zmniejszenie rezerwy „na nieprzewidziane wydatki inwestycyjne”;
  - uzyskanie umów na zakup usług magazynowych już na etapie projektowania przedsięwzięcia pozwalające na obniżenie ryzyka inwestycyjnego, tym samym zmniejszenie stopy dyskontowej z 12% na 10% (dodatkowo w połączeniu z kontrolą nakładów);
  - uzyskanie możliwości przyspieszenia odpisów amortyzacyjnych dla niektórych składników majątku, skutkujące obniżeniem obciążeń podatkowych w początkowym okresie eksploatacji;
  - obniżenie nakładów inwestycyjnych i kosztów operacyjnych dzięki rezygnacji z tłoczni w obiegach wysokich i niskich ciśnień.

## LITERATURA

- [1] Kaziuk H. i inni, 2003: *Ocena możliwości wykorzystania wyrobisk górniczych likwidowanych kopalń węgla kamiennego na podziemne magazyny gazu i paliw płynnych. Zad. G.5. Charakterystyka geologiczna i hydrogeologiczna wytypowanych wyrobisk rejonu I*. Praca finansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki wodnej, Gig Katowice
- [2] Bukowski P., Augustyniak I., 2003: *Ocena możliwości wykorzystania wyrobisk górniczych likwidowanych kopalń węgla kamiennego na podziemne magazyny gazu i paliw płynnych. Zad. G12: Charakterystyka geologiczna i hydrogeologiczna wytypowanych wyrobisk rejonu II*. Praca finansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki wodnej, Gig Katowice
- [3] EPA, 1998, Report 430-R-98-019: *Technical and Economical Assessment of Coal-bed Methane Storage In Abandoned Mine Workings*
- [4] PRG, 2004: Materiały niepublikowane Przedsiębiorstwa Robót Górniczych „Mysłowice” S.A.

- [5] PGNIG, 2004: Materiały niepublikowane – PGNIG S.A.
- [6] Cisek W., Dybciak A., Landsberg W. 2001: *Experiences from liquidation of abandoned Coal Mine „Nowa Ruda” in conversion of workings into underground gas storage.* Przegląd Górniczy. Nr 7–8 (in Polish).
- [7] EPA, 1998. Report 430-R-98-019: *Technical and Economical Assessment of Coal-bed Methane Storage In Abandoned Mine Workings*
- [8] Kidybiński A., Siemek J., (eds), 2006: *Underground gas storage in abandoned coal mines*, Cenral Mininig Institute, Katowice Poland (in Polish)
- [9] Moerman A., 1982. *Report on Gas Strage i Peronne-Lez-Binche*, Distrigaz S.A.
- [10] Nagy S. Rychlicki S., Siemek J, 2006: *Impact of inactive hard-coal mines processes in Silesian Coal Basin on greenhouse gases pollution.* Acta Geologica Polonica. Vol. 56 no. 2 p. 221–228.
- [11] Ropski S., Znanski J. 1965: Przegląd Górniczy, nr 10, Katowice (in Polish)
- [12] Siemek J, Nagy S, Rybicki C, 1999a: *Integrated management in Underground Gas Storage*, Proc. of 1st Technical Conf. Gas Storage, Krakow (in Polish)
- [13] Siemek J, Nagy S., Rybicki C, 1999b: *Design, management and exploitation of underground gas storages.* Proc. of 1st Technical Conf. Gas Storage, Krakow (in Polish)
- [14] Siemek J, Nagy S., Rybicki C., Stopa J., 1995: *Multivariant Simulation of UGS “Husów” Exploitation*, 6th Int . Conf. “New methods and technologies sin petroleum geology, drilling and oil exploitation.” AGH UST, D&OG Fac. Krakow, 22–23 June 1995
- [15] Siemek J., Nagy S. Rybicki C., 1996: *Model attitude to designing, modernization and management of underground gas storage.* XXXIV Gas Engineers Congress, Poland, 23–26 October 1996
- [16] Siemek J., Nagy S., Rybicki C., Stopa J., 1995: *Some Problems of Underground Gas Storages Designing in Poland.* Proc. of Sci & Technical Conf. „Podziemne Magazynowanie Gazu”, IGNIG Krakow SITPNiG, Fundacja EKOGAZ. (in Polish)
- [17] Tek M. R., 1987: *Underground Storages of Natural Gas.* Gulf Publish. Comp., Houston Texas