

Franciszek PLEWA, Zdzisław MYSLEK, Grzegorz STROZIK  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WYKORZYSTANIE NATURALNYCH I SZTUCZNYCH BARIER IZOLACYJNYCH W PROJEKTOWANIU PODZIEMNYCH SKŁADOWISK ODPADÓW

**Streszczenie.** W artykule omówiono wybrane problemy wykorzystania podziemnych wyrobisk górniczych jako miejsc składowania odpadów. Scharakteryzowano warunki jakie powinna spełniać naturalna bariera izolacyjna którą stanowi górotwór oraz sztuczne bariery izolacyjne dla skutecznego i długotrwałego izolowania odpadów od środowiska. Szczególną uwagę poświęcono analizie możliwości składowania odpadów w wyrobiskach likwidowanych kopalń węgla kamiennego.

## THE USE OF NATURAL AND ARTIFICIAL BARRIERS BY DESIGN UNDERGROUND WASTE DEPOSITORIES

**Summary.** The paper describes some selected problems related to usage of underground workings as waste repositories. The requirements for the natural isolating barrier (rock mass) and artificial isolating barriers have been discussed from the point of effective and long term isolating of waste from the environment. A special attention has been given to the analysis of possibilities of waste storage in underground workings of coal mines assigned to liquidation.

### 1. Wstęp

Wobec ograniczeń technologicznych bądź ekonomicznych możliwości zastosowania innych form unieszkodliwiania odpadów, ich składowanie pozostaje głównym sposobem ich zagospodarowania. Różne rodzaje odpadów wymagają określonego stopnia izolacji i zróżnicowanego czasu jej trwania (trwałości bariery izolacyjnej). W składowisku odpady izolowane są od środowiska wielostopniowym systemem barier. Bariery są to fizyczne

przeszkody uniemożliwiające przenikanie uwalniających się substancji szkodliwych do biosfery, a mówiąc ściślej, opóźniające i spowalniające ich migrację.

Charakterystyka bariery izolacyjnej składowiska musi uwzględniać zarówno sposób składowania odpadów, jak i ich własności, spośród których do najważniejszych należy zaliczyć:

- stan skupienia,
- skład chemiczny,
- własności chemiczne i fizyczne, np. rozpuszczalność, rozmywalność,
- toksyczność,
- czas rozkładu substancji szkodliwych,
- zdolność współreagowania z otaczającym środowiskiem,
- zdolność substancji szkodliwych do migracji itp.

Warunki izolowania odpadów w składowisku powinny być określone indywidualnie, w zależności od rodzaju i sposobu składowania odpadów oraz warunków otoczenia składowiska. Ciężar izolacji odpadów w składowisku spoczywać może na:

- barierach sztucznych (forma odpadów, pojemniki, opakowania itp.); wtedy własności izolacyjne środowiska skalnego są drugorzędne,
- barierach naturalnych, wtedy podstawowego znaczenia nabierają własności izolacyjne środowiska skalnego,
- zarówno na barierach naturalnych, jak i sztucznych, wtedy istotny jest efekt współdziałania barier, a własności środowiska skalnego stanowią istotny czynnik izolacji.

Podstawowym zadaniem, jakie spełniać mają bariery izolacyjne, jest uniemożliwienie niekontrolowanego rozprzestrzeniania się szkodliwych substancji w stopniu stanowiącym zagrożenie dla środowiska. Żadna bariera, zarówno sztuczna, jak i naturalna, nie zapewni trwałej izolacji odpadów w dłuższej perspektywie czasowej. Należy raczej dążyć do zagwarantowania na tyle powolnego rozprzestrzeniania się substancji szkodliwych i ich powrotu do naturalnego obiegu materii w przyrodzie, aby ich uwalnianie do środowiska następowało w akceptowalnych stężeniach, tzn. takich, w których nie wykazują one własności toksycznych ani nie stanowią zagrożenia dla środowiska. Zlokalizowane na powierzchni lub co najwyżej w wyrobiskach odkrywkowych składowiska w znikomym stopniu wykorzystują naturalną barierę izolacyjną, jaką stanowią masy skalne tworzące górotwór.

## 2. Podziemne składowanie odpadów

We wszelkiego rodzaju powierzchniowych składowiskach odpadów jedynie sztuczne bariery izolacyjne chronią środowisko przed wydostawaniem się szkodliwych substancji ze składowiska. W zależności od przyjętych norm ochrony środowiska i stopnia zagrożenia związanego z przechowywaniem danego rodzaju odpadów projektuje się złożone systemy barier składające się nawet z kilkunastu warstw. Mimo bardzo wysokich kosztów budowy takich składowisk i tak nie są one w stanie zagwarantować bezpieczeństwa w skali czasu porównywalnej z czasem geologicznym. Przyjmuje się, że nawet dobrze uszczelnione składowisko powierzchniowe wymagać będzie uzdrowienia już po 100 latach.

Alternatywą dla składowisk powierzchniowych jest składowanie odpadów w głębi górotworu. Koncepcja podziemnego składowania odpadów opiera się zasadniczo na idei wykorzystania skał skorupy ziemskiej jako naturalnej bariery oddzielającej szkodliwe substancje deponowane w składowisku od biosfery.

Barierą naturalną podziemnego składowiska odpadów jest górotwór, w jakim wykonano wyrobiska. Skuteczność tej bariery zależy od warunków górotworu, w którym wykonano składowisko. Należy wyraźnie podkreślić, że czas działania prawidłowo dobranej bariery naturalnej jest o rzędy wielkości dłuższy od czasu działania jakiegokolwiek bariery sztucznej. Zadaniem barier izolujących jest spełnianie następujących funkcji:

- opóźnienie czasu dotarcia wód podziemnych do odpadów,
- spowolnienie uwalniania substancji szkodliwych,
- odprowadzanie energii cieplnej, np. w przypadku odpadów radioaktywnych.

Właściwie prowadzone składowanie podziemne eliminuje zagrożenia ekologiczne w czasie geologicznym rzędu  $10^6$  lat.

Za wykorzystaniem zbędnych wyrobisk górniczych do składowania odpadów przemawia wiele względów, spośród których można między innymi wymienić:

- składowiska nie zajmują powierzchni terenu, ich obecność nie wpływa negatywnie na ekologiczną, ekonomiczną ani estetyczną wartość terenu,
- wypełnienie pustek poeksploatacyjnych i zbędnych wyrobisk zmniejsza zakres ewentualnych zjawisk destrukcyjnych związanych ze szkodami górniczymi,

- wyrobiska podziemne posiadają ograniczony kontakt ze środowiskiem (w praktyce tylko przez główne wyrobiska udostępniające, sztolnie lub szyby), te nieliczne drogi dostępu do składowiska mogą zostać w stosunkowo prosty sposób trwale odcięte izolując całe składowisko od środowiska,
- wyrobiska podziemne czynnych bądź przeznaczonych do likwidacji kopalń posiadają odpowiednią infrastrukturę techniczną umożliwiającą przeprowadzenie prac adaptacyjnych, a następnie procesu składowania i końcowej izolacji zgromadzonych odpadów.

W zależności od warunków panujących w górotworze oraz rodzaju odpadów, jakie mają być w nim składowane, istnieje możliwość doboru odpowiednich rozwiązań w zakresie techniki składowania odpadów i sposobów ich dodatkowej izolacji, czyli ogólnie – zespołu sztucznych barier izolacyjnych, na który mogą się składać między innymi:

- postać, w jakiej odpady są składowane, np. zestalona mieszanina z udziałem substancji utrudniających wypłukiwanie czynników szkodliwych,
- opakowanie odpadów (pojemniki stalowe, dodatkowe wykładziny i materiały wypełniające),
- wypełnienie wolnych przestrzeni między pojemnikami a calizną wyrobiska (otworu), w którym są one zdeponowane; może to być np. rodzaj podsadzki samozestalającej,
- tamy, wykładziny, zamknięcia itd.

Optymalne warunki lokalizacji składowiska zapewniające skuteczność naturalnej bariery izolującej, to między innymi:

- duża odległość pionowa między składowiskiem a najbliższym poziomem wodonośnym,
- minimalny pionowy przepływ wód w górotworze,
- duża miąższość i rozciągłość skał o niskiej przepuszczalności,
- występowanie warstw skalnych o własnościach sorpcyjnych i buforujących.

Z punktu widzenia geochemicznego korzystne jest, aby w warstwie izolującej składowisko odpadów występowały zwarte warstwy gliny lub ily. Minerale te charakteryzują się niską przepuszczalnością i wysokimi zdolnościami adsorpcyjnymi. Gliny i ily charakteryzują się także własnościami buforowymi, szczególnie gliny o charakterze węglanowym, np. margle, zapewniają neutralizację i pochłanianie m.in. metali ciężkich z kwaśnych roztworów.

Głównym czynnikiem zagrażającym izolacji składowiska podziemnego są wody podziemne. W wyniku ich kontaktu ze zgromadzonymi odpadami, niebezpieczne substancje

mogą być wynoszone poza jego granice, migrować na znaczne odległości, wywoływać skażenie poziomów wodonośnych, a w konsekwencji całej biosfery. Stąd też, w zależności od stopnia wymaganej izolacji w składowisku podziemnym, własności środowiska skalnego powinny uniemożliwiać, ograniczać lub opóźniać migrację wód do składowiska oraz dalszy transport składowanych substancji do otaczających kompleksów skalnych. W przypadku kopalń węgla kamiennego dopływ wód do wyrobisk podziemnych jest nieunikniony i może być powstrzymany lub ograniczony jedynie poprzez odwadnianie. Po zamknięciu kopalni i zaprzestaniu odwadniania należy się liczyć ze stosunkowo szybkim zatopieniem wyrobisk podziemnych. Zatem w podziemnym składowisku odpadów zlokalizowanym w zruszonym górotworze karbońskim mogą być składowane jedynie takie odpady, które nie będą uwalniały do wód podziemnych substancji szkodliwych w nadmiernych dawkach lub możliwość przenikania takich substancji z odpadów do wód zostanie odpowiednio ograniczona za pomocą dodatkowych sztucznych barier izolacyjnych.

### 3. Górotwór jako bariera izolująca składowisko odpadów

Górotwór stanowi barierę zapobiegającą przedostaniu się szkodliwych substancji ze składowiska odpadów do środowiska człowieka. Własności górotworu mają decydujący wpływ na to, czy i jakie odpady mogą być w bezpieczny dla środowiska sposób składowane w jego wnętrzu. Z punktu widzenia możliwości składowania odpadów, do ważniejszych własności górotworu należą stosunki wodne w jego wnętrzu (lokalizacja poziomów wodonośnych względem miejsc składowania odpadów) oraz czynniki decydujące o możliwości izolacji odpadów od warstw wodonośnych: mikro- i makrotektonika, porowatość skał, wodoprzepuszczalność.

Istotne znaczenie mają także własności geomechaniczne górotworu, zwłaszcza w przypadku składowania odpadów w komorach i wyrobiskach w trwałej obudowie.

Ocena możliwości wykorzystania wyrobisk podziemnych kopalń węgla kamiennego do składowania odpadów wymaga przeprowadzenia szerokiego zakresu badań i analiz dotyczących przede wszystkim:

- rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych górotworu jako podstawy dla prac projektowych i analiz,



- wykonania projektu wyrobisk przeznaczonych do składowania odpadów i sposobów ich zamknięcia po wprowadzeniu do nich odpadów,
- opracowania modelu i wykonanie symulacji mechanicznych obciążeń górotworu i procesów rozprzestrzeniania się odpadów,
- ocena systemu składowiska ostatecznego pod kątem spełnienia postawionych wymagań.

Własności górotworu będą w pewien sposób determinowały wybór rodzajów odpadów do składowania w jego wnętrzu. Przykładowo, możliwość swobodnej migracji wód podziemnych uniemożliwia składowanie odpadów niebezpiecznych. Wody mogą wypłukiwać związki szkodliwe z odpadów, wywoływać reakcje chemiczne, w wyniku których powstaną inne niebezpieczne substancje skażające, reagujące z górotworem lub powietrzem bądź wynoszone w odciekach. Z drugiej jednak strony za pomocą odpowiednich technologii można takie odpady utwardzić i uodpornić na działanie wody.

Odpady przeznaczone do składowania pod ziemią muszą spełniać wiele kryteriów, w zależności od warunków górotworu oraz dostępnych metod i technologii składowania odpadów. Przykładowo, żużle hutnicze i skruszone skały płonne mogą być lokowane przy użyciu technologii podsadzki hydraulicznej (z zamkniętym obiegiem wody podsadzkowej), podczas gdy odpady drobnofrakcyjne, takie jak popioły lotne, powinny być lokowane w formie mieszaniny wiążącej wodę transportową.

Wprowadzanie odpadów do wnętrza ziemi wymaga zastosowania odpowiednio dobranych technologii przygotowania odpadów do podziemnego składowania, lokowania w wyrobiskach górniczych oraz końcowego odizolowania. Największe znaczenie mają tutaj technologie górnicze, począwszy od drążenia i utrzymania wyrobisk aż do technologii ich wypełniania i izolowania. Będą to najczęściej typowe technologie górnicze zaadaptowane do celu innego niż wybieranie kopaliny.

#### **4. Składowanie odpadów w kopalniach węgla kamiennego**

Górnictwo węglowe wytwarza rocznie ponad 100 mln m<sup>3</sup> pustek poeksploatacyjnych, część z nich jest na bieżąco likwidowana, jednak potencjalnie około 40 mln m<sup>3</sup> pustek rocznie może być wykorzystana do składowania odpadów. Duże możliwości składowania

podziemnego odpadów stwarza likwidacja części kopalń, w których do składowania odpadów można wykorzystać główne wyrobiska oraz istniejącą infrastrukturę transportową. Znaczna część pustek poeksploatacyjnych znajduje się w rejonach górotworu o znacznie naruszonej strukturze, dlatego górotwór w tym przypadku nie stanowi szczelnej bariery izolacyjnej dla składowanych odpadów.

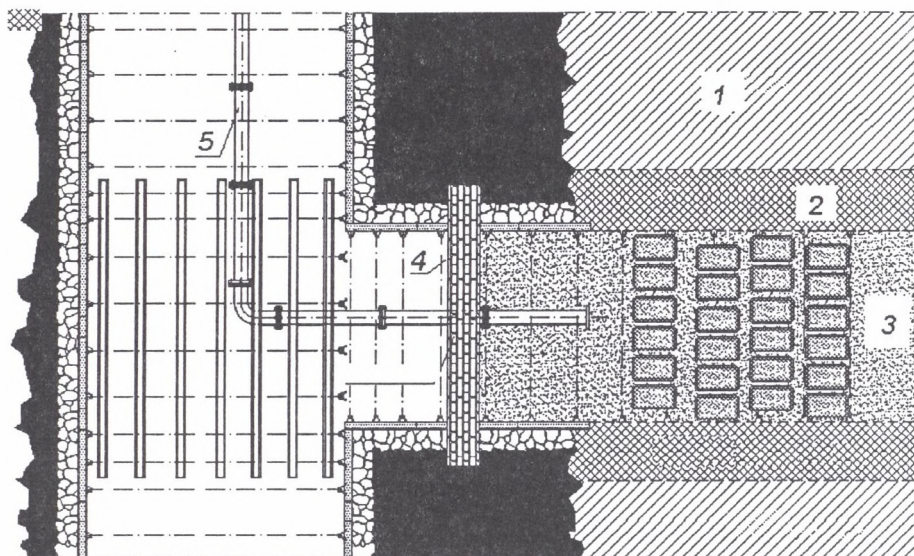
Ze względu na słabe własności izolujące górotworu w wyeksploatowanych złożach karbońskich oraz duże objętości dostępnych pustek kopalnie węgla kamiennego stwarzają dogodne warunki do lokowania w nich przede wszystkim masowych odpadów przemysłowych (zwłaszcza powęglowych i elektrownianych), których możliwości składowania na powierzchni stają się coraz bardziej ograniczone, a których uciążliwość dla środowiska wynika w większym stopniu z ich nagromadzonych ilości, a nie własności fizycznych lub chemicznych.

Należy jednak mieć na uwadze, że zwłaszcza w kopalniach ulegających likwidacji, do składowania odpadów mogą być wykorzystane główne wyrobiska udostępniające (poziomowe), wydrążone w zwięzłych skałach w stosunkowo mało naruszonej górotworze filarów szybowych i ochronnych i wyposażone w trwałą obudowę murową. Wyrobiska takie mogą stanowić miejsca składowania odpadów o większym stopniu uciążliwości dla środowiska (choć zapewne nie *stricto* niebezpiecznych).

Odpady o podwyższonej uciążliwości mogą być składowane w likwidowanych wyrobiskach górniczych kopalń w odpowiednio dobranych pojemnikach. Pojemniki na odpady sypkie w rodzaju worków typu „big bag” lub beczki stalowe mogą być w bezpieczny sposób transportowane istniejącymi środkami transportu kopalnianego i układane w docelowym wyrobisku. Po wypełnieniu wyrobiska odpadami i jego otamowaniu, wolne przestrzenie między pojemnikami a ociosem wypełnia się mieszaniną samozestalającą odporną na działanie wód podziemnych.

Przykładowy sposób składowania odpadów w wyrobisku kopalnianym przedstawiono na rys. 1.

Z punktu widzenia podziemnego składowania odpadów, podlegające likwidacji kopalnie węgla kamiennego oferują do dyspozycji znaczną objętość pustek stanowiących potencjalną kubaturę składowania odpadów oraz infrastrukturę techniczną umożliwiającą przygotowanie wybranych wyrobisk do wprowadzenia odpadów, ulokowanie w nich odpadów oraz ich ostateczne odizolowanie.



Rys. 1. Składowanie odpadów w wyrobisku chodnikowym w kopalni węgla kamiennego  
 (1) – skały otaczające, (2) dodatkowa warstwa izolacyjna wokół wyrobiska,  
 (3) chodnik z ułożonymi pojemnikami wypełniony podsadzką samozestalającej, (4) tama izolacyjna, (5) rurociąg do transportu podsadzki samozestalającej

Fig. 1. Deposition of waste in a working of underground coal mine  
 1 - surrounding rock mass, 2 - additional isolation layer around the gate, 3 - a working space with tanks filled with stabilised backfill, 4 - isolating dam, 5 - transportation pipeline for stabilised backfill

Typowa kopalnia węgla kamiennego posiada sieć wyrobisk udostępniających (przekopy, przecznice, komory) wydrążonych w skałach niewęglowych, w trwałej obudowie, z których część przebiega w obrębie filarów szybowych, a więc w górotworze stosunkowo najmniej naruszonym robotami górniczymi. W starych kopalniach, rozbudowywanych przez dziesięciolecia prowadzonej eksploatacji, wyrobiska takie znajdują się przeważnie na trzech – czterech poziomach, a ich sumaryczna długość wynosi kilkadziesiąt kilometrów.

Dostęp do wyrobisk stanowiących potencjalne miejsca składowania odpadów zapewnia zwykle kilka szybów, wyposażonych w klatki umożliwiające przewóz załogi i wozów. Prawie wszystkie główne wyrobiska kopalniane posiadają torowiska i trakcję elektryczną umożliwiającą względnie tani transport odpadów i materiałów do miejsc składowania. Kopalnie posiadają czynne systemy wentylacyjne o dużej wydajności przewietrzania, wynikającej z wymogów prowadzenia eksploatacji, często w polach metanowych. Ich wydajność powinna więc być wystarczająca do prowadzenia składowiska odpadów. W wyrobiskach kopalnianych dostępna jest energia elektryczna, sprężone powietrze oraz woda



(rurociąg p.poż. znajduje się w każdym wyrobisku). Kopalnie posiadają szereg maszyn i urządzeń, które mogą być wykorzystane do prowadzenia składowania odpadów: wozy i lokomotywy, przenośniki, ładowarki itp. W zakresie infrastruktury powierzchniowej kopalnie dysponują bocznkami kolejowymi i drogami dojazdowymi umożliwiającymi transport ładunków masowych. Ponadto posiadają w dyspozycji znaczne powierzchnie magazynowe, place składowe wraz z urządzeniami przeładunkowymi.

## 5. Podsumowanie

Wyrobiska kopalń węgla kamiennego zapewniają możliwość bezpiecznego dla środowiska składowania określonych rodzajów odpadów. Z uwagi na to, że górotwór karboński nie zapewnia tak dobrej szczelności bariery izolacyjnej, jak np. wysady solne czy masywy skal magmowych, w zbędnych wyrobiskach kopalń węgla kamiennego mogą być składowane bezzbiornikowo odpady uciążliwe, zwłaszcza masowe. Natomiast w sposób zbiornikowy mogą być składowane odpady niebezpieczne pod warunkiem stworzenia odpowiednich sztucznych barier izolacyjnych.

Wykorzystanie wyrobisk podziemnych kopalń węgla kamiennego do składowania odpadów wymaga przeprowadzenia następujących działań:

- rozpoznanie warunków geologicznych i hydrogeologicznych górotworu jako podstawy dla prac projektowych i analiz,
- wykonanie projektu wyrobisk przeznaczonych do składowania odpadów i sposobów ich zamknięcia po wprowadzeniu do nich odpadów,
- opracowanie modelu i wykonanie symulacji mechanicznych obciążeń górotworu i procesów rozprzestrzeniania się odpadów,
- ocena systemu składowiska ostatecznego pod kątem spełnienia wymagań.

Prowadzone analizy możliwości wykorzystania wyrobisk podziemnych do składowania odpadów wykazują, że optymalne warunki zapewniają wyrobiska korytarzowe, komorowe i wyrobiska pionowe, tj. szyby i szybiki.

O możliwości wykorzystania wyrobisk podziemnych na składowiska odpadów decyduje między innymi możliwość uzyskania maksymalnego ograniczenia wymywania (wynoszenia z wodą) substancji szkodliwych, ponieważ w trakcie wykonywania wyrobisk podziemnych

zostaje naruszona równowaga stanu naprężenia w górotworze, co może z kolei doprowadzić do przekroczenia wytrzymałości skał i powstania stref zwiększonych odkształceń i spękań.

Celem dokładnego określenia zakresu spękań górotworu wokół wyrobisk komorowych i korytarzowych należy przeprowadzić bardzo dobre rozpoznanie własności skał otaczających poprzez przeprowadzenie badań laboratoryjnych i badań *in situ*.

Istnieją cztery koncepcje składowania odpadów w wyrobiskach kopalni:

- bezzbiornikowe składowanie odpadów z transportem mechanicznym odpadów z powierzchni do miejsc składowania,
- bezzbiornikowe składowanie odpadów z transportem hydraulicznym odpadów z powierzchni do miejsc składowania,
- zbiornikowe składowanie odpadów w wyrobiskach górniczych,
- zbiornikowe składowanie odpadów w otworach wielkośrednicowych wierconych z wyrobisk chodnikowych.

W dyskusji nad możliwościami wykorzystania podziemnych wyrobisk górniczych do składowania odpadów należy mieć na uwadze, że odpad, który nie zostanie zdeponowany pod ziemią, trafi na składowisko powierzchniowe, którego bariery izolujące od środowiska, przy realnych wielkościach nakładów na ich stworzenie, są nieporównywalnie słabsze niż w składowisku podziemnym.

## LITERATURA

1. Palarski J.: Kryteria zagospodarowania odpadów przemysłowych w kopalniach, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 3/4, 1992.
2. Palarski J.: Składowanie odpadów w wyrobiskach górniczych, Eko-profil, nr 1, 1996.
3. Palarski J.: Likwidacja podziemnego zakładu górniczego, Wiadomości Górnicze, nr 6, 1997.

4. Palarski J., Plewa F: Perspektywy gospodarczego wykorzystania i składowania odpadów w kopalniach podziemnych”, referat na posiedzeniu Komisji Górnictwa PAN, Katowice 1999.

Recenzent: Dr inż. Tadeusz Bromek

### **Abstract**

The paper describes some selected problems related to usage of underground workings as waste repositories. The requirements for the natural isolating barrier (rock mass) and artificial isolating barriers have been discussed from the point of effective and long term isolating of waste from the environment. A special attention has been given to the analysis of possibilities of waste storage in underground workings of coal mines assigned to liquidation. As an example a technology of preparation of a working for the needs of waste deposition has been described (Fig. 1). Also a spectrum of potentially possible technologies of waste deposition in mines has been shown.