

Analiza i ocena ryzyka dla procesu podziemnego zgazowania węgla na przykładzie KD „Barbara”

Evaluation of risk for the underground coal gasification process on the example of experimental mine “Barbara”



Dr inż. Alicja Krzemień*)



Dr inż. Adam Duda*)



Dr inż. Aleksandra Koteras*)

Treść: W artykule zaprezentowano wyniki analizy i oceny ryzyka procesowego podziemnej części instalacji zgazowania węgla, która była elementem poligonu doświadczalnego dla prowadzonego w 2013 roku, w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, eksperymentu podziemnego zgazowania węgla w ramach projektu HUGE2 (*Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe – Environmental and Safety Aspects*). W tym celu wykorzystano materiały i opracowania dotyczące eksperymentów realizowanych w ramach czystych technologii węglowych, udostępnione przez Główny Instytut Górnictwa (GIG) oraz informacje uzyskane z projektu HUGE (*Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe*) prowadzonego przez GIG w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w latach 2007÷2010. Identyfikacja zagrożeń, czyli czynników niebezpiecznych i szkodliwych, które mają potencjał do generowania zdarzeń niebezpiecznych, pozwoliła na zaproponowanie działań profilaktycznych, mających na celu redukcję ryzyka na etapie prowadzenia eksperymentu zgazowania. W artykule zaprezentowano również wyniki oceny ryzyka procesowego, ukierunkowanej na identyfikację możliwych błędów mogących doprowadzić do awarii systemu. Wprowadzone rozwiązania pozwoliły na opracowanie instrukcji bezpiecznego prowadzenia eksperymentu tak, aby poza prawidłowym przebiegiem próby podziemnego zgazowania, zapewnić ochronę zdrowia i życia osób biorących udział w eksperymencie. Zadanie to było tym trudniejsze, iż zarówno w kraju, jak i na świecie, brak jest doświadczeń w zakresie analizy i oceny ryzyka dla podobnych prób prowadzonych pod ziemią.

Abstract: This paper presents the results of evaluation of risk for the element of underground coal gasification system which was a part of the testing ground for the experiment of underground coal gasification, performed in 2013 in the testing mine “Barbara” in the framework of the HUGE2 (*Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe – Environmental and Safety Aspects*) project. Thus, it was necessary to use the references and elaborations on experiments performed on the basis of clean coal technologies, as well as to use information obtained from project HUGE (*Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe*) shared and led by the Central Mining Institute in the testing mine “Barbara” between 2007 and 2010. The identification of hazards, namely, the dangerous and destructive factors which may tend to generate hazardous events, allowed to propose preventive measures for the reduction of risk during an underground coal gasification experiment. This paper also presents the results of the process risk assessment directed on the identification of possible errors which may lead to system failure. The implemented solutions allowed to develop guidelines for safe conduction of experiments so that apart from the correct run of the underground gasification test, it was possible to ensure health and life protection of the people who participate in this experiment. This task was more difficult as both in Poland and worldwide there is little experience in the field of evaluation and assessment of risk for similar tests carried out underground.

Słowa kluczowe:

podziemne zgazowanie węgla, ocena ryzyka procesowego, identyfikacja awarii w procesie PZW

Key words:

underground coal gasification, assessment of process risk, identification of failure in the UCG process

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

1. Wprowadzenie

Technologia podziemnego zgazowania węgla (PZW) jest znana w świecie od ponad wieku [2,4,9,19] i od lat testowana w wielu różnych badaniach eksperymentalnych [1]. W latach 1975÷1996 w samych Stanach Zjednoczonych Ameryki przeprowadzono ponad 30 testów eksperymentalnych na węglu bitumicznym oraz węglu brunatnym. Wcześniej przez ponad 50 lat badania nad PZW prowadził Związek Radziecki, w tym badania terenowe, a nawet kilka projektów komercyjnych np. elektrownia w Angren (Uzbekistan). Od 1991 roku Chiny wykonały co najmniej kilkanaście testów oraz kilka projektów komercyjnych PZW. W latach 1992÷1999 w Hiszpanii prowadzono zgazowanie w głębokich pokładach węgla, następnie w Australii realizowano duży projekt podziemnego zgazowania (Chinchilla 2000÷2003), a od 2010 roku w Afryce Południowej produkuje się syngas metodą PZW dla elektrowni Majuba [1, 5]. W obecnej chwili w USA, Kanadzie, Afryce Południowej, Indiach, Australii, Nowej Zelandii i Chinach prowadzi się wiele komercyjnych projektów w różnych fazach rozwoju, od produkcji energii, przez paliwa płynne, czy syntetyczny gaz ziemny [1, 3].

PZW pozwala na bezpośrednie pozyskanie energii w miejscu zalegania węgla i przebiega analogicznie do technologii zgazowania węgla na powierzchni, jest jednak bardziej skomplikowane i trudniejsze w realizacji [4, 7]. Węgiel w trakcie procesu zgazowania jest utleniany przy użyciu jednego z czynników zgazowujących, jakim może być: powietrze, tlen, para wodna lub też ich mieszanina w odpowiednich proporcjach [3]. W rezultacie uzyskuje się gaz syntezowy (syngaz), którego głównymi składnikami są: H_2 , CO, CO_2 oraz CH_4 . Najważniejszym etapem PZW jest budowa georeaktora w górotworze, obejmującym wyrobiska górnicze oraz fragment pokładu węgla [10, 19]. Istnieje kilka sposobów inicjowania i kontrolowania procesu. Dwie podstawowe to metoda bezszybowa, zakładająca dostęp do pokładu węgla za pomocą otworów wiertniczych oraz metoda szybowa, gdzie udostępnienie pokładu węgla odbywa się za pomocą szybu lub upadowej [4, 22].

Wielu autorów sugeruje, że dalsze badania nad technologią PZW są konieczne, gdyż proces ten nie jest w obecnym stanie wiedzy i techniki tak kontrolowany jak proces naziemnego zgazowania węgla. Ważne parametry, takie jak szybkość napływu wody, rozkład reagentów w strefie zgazowania, tempo przesuwania się kanału ogniowego, mogą być szacowane jedynie poprzez pomiar temperatury oraz składu jakościowego i ilościowego gazu otrzymanego w procesie [1]. Zaletą technologii PZW jest jej lokalizacja pod ziemią, która wpływa na redukcję kosztów pozyskania gazu, zagospodarowanie odpadów stałych oraz zmniejszenie nakładu prac w trakcie realizacji procesu [6]. Niestety technologia ta ma również wady, tj. wspomniane już problemy z kontrolą przebiegu procesu [1], czy zagrożenia środowiskowe związane z możliwością przenikania produktów PZW do otoczenia i poziomów wodonośnych, a także skutków powierzchniowych w postaci deformacji powierzchni [1, 23]. Kolejny aspekt to zagrożenia procesowe związane z samą technologią, miejscem realizacji eksperymentu oraz warunkami infrastruktury naziemnej i podziemnej, szczególnie w przypadku czynnych kopalń węgla kamiennego [13].

2. Warunki prowadzenia eksperymentu podziemnego zgazowania węgla w KD „Barbara”

Kopalnia Doświadczalna „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa jest położona w północno-wschodniej części

Mikołowa na wzniesieniu między centrum miasta a dzielnicą Katowic – Podlesiem. Stanowiska badawcze do prowadzenia prób podziemnego zgazowania węgla, znajdujące się na terenie kopalni, wchodzi w skład części technologicznej Centrum Czystych Technologii Węglowych GIG (CCTW). Daje to możliwość prowadzenia eksperymentów PZW w warunkach in-situ, przy zapewnionym dostępie do naziemnego zaplecza laboratoryjnego, pozwalającego na monitoring oraz na jak najszybszą analizę prowadzonych doświadczeń. Ze względu na badawczy charakter prac, założono, że poszczególne stanowiska będą działały okresowo i nie w jednym czasie, a ilość i długość doświadczeń będzie ograniczona.

Wyrobiska podziemne Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w Mikołowie stanowią poligon doświadczalny pozwalający na przeprowadzanie badań dołowych ze szczególnym uwzględnieniem prowadzenia wybuchów metanu, pyłu węglowego, pyłów organicznych oraz eksperymentów podziemnego zgazowania węgla.

Sieć wentylacyjną kopalni tworzą dwa poziomy:

- poziom 30 metrów, na którym zlokalizowano próby podziemnego zgazowania węgla w pokładzie 310,
- poziom 46 metrów, na którym są dwie sztolnie doświadczalne od długości 400 metrów i 200 metrów do prowadzenia wybuchów podziemnych,
- szyb wdechowy „Barbara” zgłębiany do poziomu 46 metrów, którym powietrze świeże doprowadzane jest do obu poziomów kopalni 30 metrów i 46 metrów,
- szyb wentylacyjny ze stacją wentylatorów głównych na powierzchni o parametrach:
 - wydatek powietrza – $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{min}$,
 - spiętrzenie wentylatorów – $850 \text{ Pa} = 85 \text{ milimetra słupa wody}$,
- bezpośrednie połączenie z powierzchnią posiadają dwie sztolnie doświadczalne 200 metrów i 400 metrów.

Podczas wykonywania eksperymentalnych wybuchów w podziemnych sztolniach, produkty po wybuchach w wyniku wzrostu ciśnienia odprowadzane są w części tymi połączeniami na powierzchnię, a po włączeniu wentylatora głównego odprowadzane są szybem wentylacyjnym.

Sieć wentylacyjna kopalni posiada 4 połączenia z powierzchnią, jednakże szyb wdechowy „Barbara” i szyb wentylacyjny stanowią drogę ucieczkową z poziomu 30 metrów i 46 metrów. Połączenia chodników doświadczalnych 400 metrów i 200 metrów z powierzchnią nie stanowią drogi ucieczkowej. Sumaryczna długość wyrobisk podziemnych w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” wynosi 4500 metrów.

Wentylatory głównego przewietrzania zlokalizowane przy szybie wydechowym (wentylacyjnym) zostały zaprojektowane do stałego otworu równoznacznego. Sieć wyrobisk podziemnych na poziomie 30 metrów została rozbudowana o poligon doświadczalny, do podziemnego zgazowania węgla z pokładu 310. W 2010÷2011 roku wykonano około 500 metrów wyrobisk korytarzowych w pokładzie 310 dla poligonu „Czystych Technologii Węglowych” związanych z podziemnym zgazowaniem węgla. Z powierzchni do wyrobisk dołowych wykonano otwór o średnicy 300 mm orurowany dla odprowadzania produktów zgazowania na powierzchnię podczas prób podziemnego zgazowania węgla.

Wykonana sieć wyrobisk korytarzowych okonturowała parcele pokładu 310, w których prowadzone będą eksperymenty podziemnego zgazowania węgla w pokładzie 310. Wyrobiska korytarzowe przewietrzane są aktualnie wentylacją opływową, tworząc prostą sieć wentylacyjną pomiędzy szybem wdechowym „Barbara”, a szybem wentylacyjnym. Świeże powietrze od szybu „Barbara” prowadzone jest chodnikiem głównym na poziomie 30 metrów do wyrobisk poligonu podziemnego zgazowania węgla.

Przewietrzanie wyrobisk poligonu podziemnego zgazowania węgla odbywa się wznoszącymi prądami powietrza. Wyrobiska poligonu wykonane są zarówno po wzniosie pokładu 310 o nachyleniu 4 stopnie, jak i poziomo po rozciągłości pokładu 310. W warunkach nie prowadzenia eksperymentu podziemnego zgazowania węgla w pokładzie 310 rozplywy powietrza w bocznicach poligonu regulowane są tamami regulacyjnymi.

Wydatki powietrza przepływające aktualnie w wyrobiskach poligonu nie wymagają spełnienia jakichkolwiek warunków wentylacyjno-gazowych. Prowadzenie próby podziemnego zgazowania węgla w parceli pokładu 310 narzuca potrzebę zwiększenia wydatków przepływu powietrza w bocznicach wentylacyjnych związanych z prowadzonym eksperymentem.

Regulacja rozplywów powietrza w wyrobiskach związanych z poligonem podziemnego zgazowania węgla, wymusza w trakcie przebiegu procesu zgazowania prowadzenie zdalnej regulacji od strony wyrobisk doprowadzających świeże powietrze z poziomu 30 metrów. Ze względu na to, że sieć wentylacyjną kopalni Doświadczalnej „Barbara” charakteryzuje niewielki otwór równoznaczny, wentylator główny przewietrzający strukturę podziemną kopalni charakteryzuje się małym przedziałem wartości parametrów pracy tj. wydatku oraz spiętrzenia. Z tych względów parametry pracy wentylatora głównego przy szybie wydechowym nie stwarzają możliwości znacznego zwiększenia całkowitego wydatku powietrza na wentylatorze. Uwzględniając możliwość powstania stanu awaryjnego w procesie podziemnego zgazowania węgla i uwolnienia dużych objętości wodoru, tlenu węgla do wyrobisk wentylacyjnie związanych z georeaktorem, występują okoliczności, które mogą spowodować powstanie w wyrobiskach, na drodze odprowadzenia powietrza do szybu wentylacyjnego, atmosfery wybuchowej.

Ograniczone możliwości regulacji powietrza w wyrobiskach podziemnych wentylacyjnie związanych z georeaktorem wymusiły zaprojektowanie systemu ochrony wentylatora głównego na powierzchni przed atmosferą niebezpieczną (wybuchową). Zaprojektowano wielostopniową przepustnicę (trzy stany otwarcia: 33 %, 66 % i 100 %) na powierzchni pozwalającą na wielokrotne zwiększenie ucieczek powietrza świeżego do kanału wentylatora głównego. Wielostopniowa przepustnica jest regulowana z dyspozytorni Kopalni Doświadczalnej „Barbara”. Otwarcie przepustnicy ogranicza dopływ do wentylatora głównego powietrza o niebezpiecznym składzie, z rejonu georeaktora, przy jednoczesnym wielokrotnym doprowadzeniu przez otwartą przepustnicę powietrza atmosferycznego [11].

3. Ocena ryzyka procesowego związanego z częścią podziemną instalacji zgazowania węgla

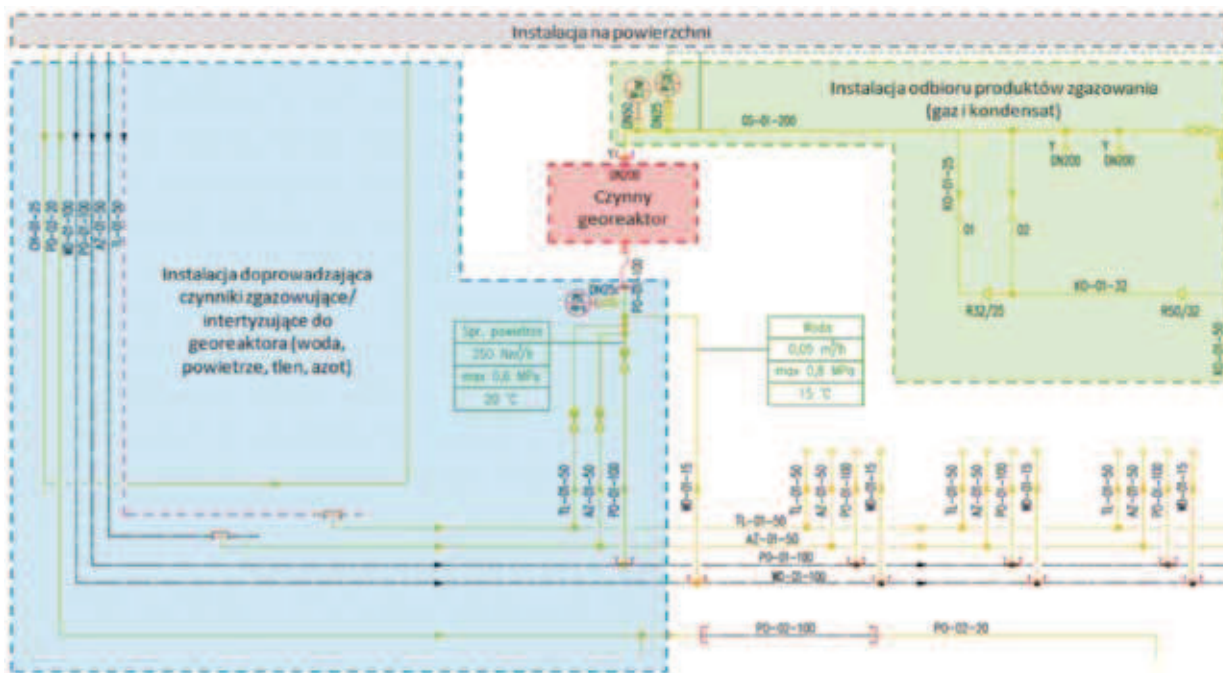
Ocena ryzyka procesowego została przeprowadzona dla części podziemnej instalacji zagazowania węgla w KD „Barbara”. Możliwość wystąpienia określonych skutków szacowana była przez ekspertów, przy użyciu dostępnej wiedzy na temat każdego z procesów. Analiza efektów fizycznych, każdego ze zdarzeń, polegała na określeniu skutków poszczególnych zagrożeń tj. toksyczności substancji, promieniowania cieplnego emitowanego podczas pożaru, naciśnienia powstającego w czasie wybuchu czy odłamków powstających w wyniku eksplozji. Dla ludzi skutki narażenia określano jako obrażenia, dla instalacji jako uszkodzenia, a dla środowiska jako zniszczenia.

3.1. Narzędzia wykorzystane do oceny ryzyka procesowego

Pierwszym narzędziem diagnostycznym wykorzystanym do analizy ryzyka była technika HAZOP, czyli studium zagrożeń i zdolności operacyjnych. HAZOP polega na systemowej identyfikacji potencjalnych zagrożeń i awarii oraz strat spowodowanych odchyleniami od normalnych, założonych warunków operacyjnych procesu. Dzięki tej metodzie możliwe było ustalenie odchyleń w funkcjonowaniu systemu, które w konsekwencji mogą prowadzić do powstania zagrożeń [8,14,15,16,17]. W trakcie wykonywania analizy wzięto pod uwagę informacje zawarte w schemacie technicznym instalacji (fragment schematu przedstawiono na rysunku 1), dane dotyczące urządzeń, czujników pomiarowych, opis samego procesu i instalacji, a także wiedzę osób przygotowujących eksperyment w KD „Barbara”. Pozwoliło to na systematyczne badanie poszczególnych części instalacji pod kątem powstania odchyleń od założonych parametrów procesu oraz na analizę czy zidentyfikowane odchylenia mogą mieć negatywny wpływ na bezpieczne i efektywne prowadzenie procesu. Cała instalacja podzielona została na małe odcinki nazywane węzłami, które stanowiły funkcjonalną całość. Każdy z węzłów był analizowany indywidualnie, niemniej jednak w kolejnym kroku uwzględniono możliwe interakcje pomiędzy poszczególnymi elementami systemu, tak aby nie ograniczać myślenia lateralnego w trakcie badania.

Dla identyfikacji mechanizmów powstawania ciągów zdarzeń awaryjnych wykorzystano scenariusze zdarzeń wypadkowych i awaryjnych, w których analizowano ciągi zdarzeń rozpoczynających się od zdarzeń inicjujących, aż do konkretnych skutków zagrożeń. Aby móc zdefiniować takie mechanizmy, konieczne było określenie rozwoju zdarzeń inicjujących względem systemów bezpieczeństwa spełniających określone funkcje. Funkcje te stanowią odpowiedź obiektu na występujące zakłócenia w postaci zdarzenia inicjującego np. spadek ilości tłoczonego czynnika zgazowującego na wlocie do georeaktora (od zakładanej) może świadczyć o wypływie gazów do wyrobisk bezpośrednio związanych z georeaktorem. Do tego celu wykorzystane zostały drzewa błędów FTA [14,17] oraz obliczenia dotyczące możliwości powstania atmosfery wybuchowej i/lub toksycznej [12].

Kolejnym etapem badania była ocena ryzyka z zastosowaniem metody FMEA (analiza rodzajów i skutków możliwych błędów), która jest techniką badania potencjalnych uszkodzeń poszczególnych elementów systemu technicznego (instalacji) [14,17]. FMEA pozwala także na określenie wpływu zidentyfikowanych awarii na sąsiednie elementy systemu, w tym przypadku na działanie poszczególnych elementów instalacji podziemnego zgazowania węgla. Analiza ta umożliwiła wskazanie krytycznych pod względem niezawodności obszarów systemu, a także na zaproponowanie modyfikacji, tak w samej instalacji, jak i w sposobie jej obsługi, dla zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w trakcie trwania eksperymentu PZW. W badaniu założono, że każda awaria systemu jest zdarzeniem niezależnym, dla którego należy poszukiwać informacji na temat rodzajów błędów jakie mogą powstać oraz wpłynąć na analizowany element systemu, a także możliwych skutków zaistnienia tych zdarzeń. Przy analizie technologii podziemnego zgazowania założono, że jest to proces złożony wymagający wyróżnienia funkcjonalnych podsystemów i ich badania w pierwszej fazie FMEA, a następnie osobnej oceny każdego elementu. Przyjęto, że źródłem awarii systemu może być zarówno sama technologia (proces produkcyjny), środki pomiarowo-kontrolne, maszyny i urządzenia, ale także środowisko naturalne (otoczenie), które wpływa na przebieg



Rys. 1. Fragment schematu technologiczno-pomiarowego części podziemnej dla procesu PZW w KD „Barbara” (opracowano na podstawie dokumentacji projektowej wykonanej przez „PRINT” Sp. z o.o.)

Fig. 1. Fragment of technological and measuring scheme of the underground element for UCG process in the testing mine “Barbara” [elaborated on the basis of the project documentation prepared by “PRINT” Sp. z o.o. (limited liability company)]

procesu, a także błędy ludzkie wynikające z obsługi danej technologii [13].

Dla oceny ryzyka zagrożeń w przestrzeniach, w których mogą wystąpić atmosfery wybuchowe przyjęto metodę jakościową, która składa się z analizy parametrów charakteryzujących ryzyko: powagi następstw wybuchu i prawdopodobieństwa ich wystąpienia zgodnie z metodologią projektu RASE [21]. Powaga następstw zaistnienia wybuchu określona została w kategoriach oddziaływania na ludzi i w kategoriach zniszczeń systemu. Natomiast prawdopodobieństwo wystąpienia wybuchu uzależniono od możliwości jednoczesnego wystąpienia atmosfery wybuchowej oraz efektywnego źródła zapłonu. Ocenę ryzyka związaneego z powstaniem atmosfery niezdanej do oddychania dokonano opierając się na metodologii zawartej w PN-N-18002 [18], a także na obliczeniach stężenia gazów w powietrzu kopalnianym w przypadku amputacji rurociągu, dla wszystkich trzech stanów otwarcia przepustnicy w układzie wentylacyjnym.

3.2. Identyfikacja zagrożeń związanych z podziemnym procesem zgazowania węgla

Przy identyfikacji zagrożeń, mogących zaistnieć w trakcie prowadzenia eksperymentu PZW, uwzględniono zdarzenia niebezpieczne mogące wystąpić podczas normalnej pracy georeaktora oraz w jego stanie awaryjnym. W tym celu wykorzystano materiały i opracowania dotyczące eksperymentów realizowanych w ramach czystych technologii węglowych, udostępnione przez Główny Instytut Górnictwa (GIG). Innym źródłem informacji były doświadczenia uzyskane z projektu HUGE prowadzonego przez GIG w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w latach 2007–2010 [20, 22].

Identyfikacja stanów eksploatacyjnych instalacji z punktu widzenia bezpieczeństwa została przeprowadzona przy użyciu techniki HAZOP [8, 14, 15, 16, 17]. Był to najważniejszy etap analizy, obejmujący ustalenie wszystkich czynników posiadających potencjalną możliwość powodzenia zagrożeń dla

samemu obiektu, jego personelu oraz otoczenia. W badaniu uwzględniono źródła zagrożeń wewnętrznych i zewnętrznych, tj. wada materiałowa wykorzystywanych elementów konstrukcyjnych, błąd montażu rurociągu doprowadzającego i odprowadzającego gazy z procesu, uszkodzenie mechaniczne elementów konstrukcyjnych podczas prac przygotowania eksperymentu oraz możliwe ruchy górotworu spowodowane eksplozją w georeaktorze lub w instalacji odprowadzającej produkty zgazowania. Fragment analizy ryzyka metodą HAZOP został przedstawiony w tabelicy 1.

Identyfikacja źródeł zagrożeń pozwoliła na określenie listy potencjalnych źródeł wpływu substancji niebezpiecznych oraz przyczyn sprawczych (zdarzenia inicjujące). Lista ta, zwana również listą zdarzeń wypadkowych stanowiących główne zagrożenia dla danego obiektu, była podstawą do wytypowania reprezentatywnych zdarzeń wypadkowych, które poddane zostały następnie opracowaniu modeli scenariuszy awaryjnych przy pomocy metody drzew błędów (FTA) [14, 17]. Metoda ta została zastosowana dla identyfikacji zdarzeń inicjujących sekwencję zdarzeń wypadkowych, tj. wybuch w georeaktorze powodujący wpływ gazów procesowych do wyrobisk bezpośrednio związanych z georeaktorem (rysunek 2), zniszczenie georeaktora – brak gwarancji bezpiecznego utrzymywania parametrów procesu zgazowania węgla, powstanie atmosfery wybuchowej oraz czynnika inicjującego.

3.3. Wyniki oceny ryzyka procesowego dla eksperymentu

Analiza i ocena ryzyka procesu PZW, wykonana przy pomocy opisanych w punkcie 3.1. narzędzi pozwoliła na zidentyfikowanie zagrożeń, które może generować prowadzony eksperyment dla środowiska oraz dla ludzi. W badaniach ustalono kluczowe dla bezpieczeństwa prowadzenia procesu aspekty, tak pod względem technicznym, jak i organizacyjnym. Sam proces podziemnego zgazowania podzielono na trzy

Tablica 1. Fragment analizy ryzyka metodą HAZOP dla instalacji podziemnego zgazowania węgla w KD „Barbara”
 Table 1. Fragment of risk assessment by the use of HAZOP method for the underground gasification system in the testing mine “Barbara”

Nr	Element /węzeł	Słowo kluczowe główne	Słowo kluczowe pomocnicze	Odczylenie	Prawdopodobne przyczyny	Skutki	Zabezpieczenia	Wymagane działania
1	RUROCIĄG KO-02	PRZEPLYW	NIE/BRAK	BRAK PRZEPLYWU W RUROCIĄGU ODPROWADZAJĄCYM KONDENSAT DO PALETOPOJEMNIKÓW	ZATKANIE RUROCIĄGU Z KONDENSATEM	ZATRZYMANIE PROCESU ODBIORU KONDENSATU, ZAKŁOCENIE W PRACESIE ZGAZOWANIA, PRZERWANIE PROCESU	UKŁAD POMP OWP-1, OWP-2, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU NA ZBIORNIKACH LIC/OWZ-1, LIC/OWZ-2, TLUMIKI PULSACJI, MIERNIKI CIŚNIENIA PI/OWP-1, PI/OWP-2, ZAWORY ZWROTNE, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU W PALETOPOJEMNIKACH LIA/W-1, LA/W-2	STALY MONITORING PROCESU, ANALIZA PRZELYWU I POZIOMU KONDENSATU W ZBIORNIKACH I PALETO -POJEMNIKACH
2	RUROCIĄG KO-02	PRZEPLYW	MNIEJ	OGRANICZONY PRZEPLYW W RUROCIĄGU ODPROWADZAJĄCYM KONDENSAT DO PALETOPOJEMNIKÓW	PRZYTKANIE RUROCIĄGU Z KONDENSATEM	ZAKŁOCENIE PROCESU ODBIORU KONDENSATU SKAZENIE WYROBISK KONDENSATEM , PRZEDSTANIE SIE, KONDENSATU DO SYSTEMU ODWADNIA -JĄCEGO WYROBISKA	UKŁAD POMP OWP-1, OWP-2, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU NA ZBIORNIKACH LIC/OWZ-1, LIC/OWZ-2, TLUMIKI PULSACJI, MIERNIKI CIŚNIENIA PI/OWP-1, PI/OWP-2, ZAWORY ZWROTNE, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU W PALETOPOJEMNIKACH LIA/W-1, LA/W-2	STALY MONITORING PROCESU, ANALIZA PRZELYWU I POZIOMU KONDENSATU W ZBIORNIKACH I PALETO -POJEMNIKACH, PRÓBA CIŚNIENIOWA
3	RUROCIĄG KO-02	PRZEPLYW	MNIEJ	OGRANICZONY PRZEPLYW W RUROCIĄGU ODPROWADZAJĄCYM KONDENSAT DO PALETOPOJEMNIKÓW	ROZSZCZELNIENIE RUROCIĄGU	SKAZENIE WYROBISK KONDENSATEM , PRZEDSTANIE SIE, KONDENSATU DO SYSTEMU ODWADNIA -JĄCEGO WYROBISKA	UKŁAD POMP OWP-1, OWP-2, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU NA ZBIORNIKACH LIC/OWZ-1, LIC/OWZ-2, TLUMIKI PULSACJI, MIERNIKI CIŚNIENIA PI/OWP-1, PI/OWP-2, ZAWORY ZWROTNE, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU W PALETOPOJEMNIKACH LIA/W-1, LA/W-2	STALY MONITORING PROCESU, ANALIZA PRZELYWU I POZIOMU KONDENSATU W ZBIORNIKACH I PALETO -POJEMNIKACH, PRÓBA CIŚNIENIOWA
4	RUROCIĄG KO-02	SZCZELNOŚĆ	MNIEJ	ROZSZCZELNIENIE RUROCIĄGU	WADA MATERIAŁOWA	SKAZENIE WYROBISK KONDENSATEM , PRZEDSTANIE SIE, KONDENSATU DO SYSTEMU ODWADNIA -JĄCEGO WYROBISKA	UKŁAD POMP OWP-1, OWP-2, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU NA ZBIORNIKACH LIC/OWZ-1, LIC/OWZ-2, TLUMIKI PULSACJI, MIERNIKI CIŚNIENIA PI/OWP-1, PI/OWP-2, ZAWORY ZWROTNE, MIERNIKI POZIOMU KONDENSATU W PALETOPOJEMNIKACH LIA/W-1, LA/W-2	STALY MONITORING PROCESU, ANALIZA PRZELYWU I POZIOMU KONDENSATU W ZBIORNIKACH I PALETO -POJEMNIKACH, PRÓBA CIŚNIENIOWA

Rurociąg KO-02- rurociąg odprowadzający kondensat (produkt zgazowania) z georeaktora



Rys. 2. Wyrobisko w obudowie betonowej w bezpośrednim sąsiedztwie georeaktora wraz z instalacją odprowadzającą gaz procesowy

Fig. 2. Excavation in concrete housing adjacent to the georeactor along with the system for discharging gas

zasadnicze etapy. Zaczynając od procesu tłoczenia czynnika zgazowującego do georeaktora (lub czynnika inertyzującego w przypadku stanu awaryjnego georeaktora), poprzez proces zgazowania, aż do trzeciego etapu, jakim jest podziemny przesył produktów zgazowania na powierzchnię (rysunek 1). Pozwoliło to na systematyczną identyfikację zagrożeń mających potencjał do generowania zdarzeń niebezpiecznych, tj. awarie lub wypadki. W następnej kolejności korzystając z metodologii FMEA dokonano szacowania ryzyka powstania awarii, poprzez ocenę potencjalnych przyczyn oraz skutków powstania każdego ze zdarzeń niebezpiecznych.

Ustalono, że zagrożenia powstające w procesie PZW mogą być spowodowane wadami materiałowymi użytych elementów lub nieprawidłowym ich montażem. Mogą być także generowane przez zachowanie samego górotworu, tutaj wzięto pod uwagę zagrożenia naturalne oraz wymieniane w licznej literaturze przedmiotu możliwości wystąpienia osiadania powierzchni terenu, zawalenia się stropu georeaktora, przenikaniu gazów przez warstwy nadkładu czy zanieczyszczeniu wód gruntowych [7, 23]. Nie zapomniano również o możliwej awarii instalacji podawania czynnika zgazowującego czy problemach przy odbiorze produktów zgazowania, takich jak przepełnienie zbiorników na kondensat (rys. 3), a także o bardzo istotnym wybuchu w samym georeaktorze i o jego konsekwencjach dla całego systemu. Uwzględniając powyższe, podjęto decyzję o wykorzystaniu istniejącego rurociągu jako alternatywnej drogi podawania gazu inertnego na wypadek awarii instalacji podawania gazów z powierzchni.

3.4. Redukcja i kontrola ryzyka procesu PZW

Każda ze stosowanych w trakcie oceny ryzyka metod pozwoliła na identyfikację możliwych zdarzeń niebezpiecznych na każdym etapie prowadzenia eksperymentu PZW. Dzięki temu możliwe było zaproponowanie działań mających na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa i skutków powstania awarii systemu. Wskazano elementy, które wymagają szczególnej uwagi podczas przygotowywania oraz prowadzenia procesu PZW. Działania te ukierunkowane były na poprawę bezpieczeństwa samego procesu, ale również na ochronę zdrowia i życia osób biorących udział w eksperymencie.

Dlatego też podjęto wiele działań technicznych skierowanych na redukcję i kontrolę ryzyka, a mianowicie:



Rys. 3. Zbiornik na kondensat z procesu PZW

Fig. 3. UCG process hot-well

- modułowe łączenie instalacji umożliwiające naprawę oraz wymianę uszkodzonych elementów,
- dobór elementów instalacji na etapie projektowania i wykonania uwzględniający eksperymentalny przebieg procesu oraz użycie materiałów zgodnych z normami, przepisami branżowymi, dokumentacją projektową i specyfikacją techniczną,
- przeprowadzenie próby szczelności,
- opracowanie instrukcji postępowania na wypadek wystąpienia awarii,
- stały monitoring procesu umożliwiający natychmiastowe porównanie ilości i składu mieszaniny gazów w georeaktorze i instalacji odprowadzającej produkty zgazowania, w celu zabezpieczenia przed powstaniem mieszaniny wybuchowej,
- system gazometrii automatycznej, przeciwdziałania przeniesienia wybuchu, system monitoringu parametrów czynnika,
- uniemożliwienie przebywania w rejonie instalacji osób do tego nieupoważnionych.

Podjęto także działania mające na celu obniżenie prawdopodobieństwa powstania atmosfery wybuchowej w georeaktorze, tj. przeprowadzenie próby szczelności instalacji, stały monitoring procesu poprzez zastosowanie odpowiednich czujników, opracowanie instrukcji postępowania w sytuacji wskazań świadczących o zakłóceniach w pracy instalacji, podanie azotu w przypadku utraty kontroli nad instalacją, zastosowanie reguły „dwóch par oczu” podczas monitoringu pracy instalacji. A także działania ograniczające możliwe skutki wybuchu w instalacji, tj.: brak pracowników w strefie instalacji w trakcie procesu zgazowania, stosowanie systemu gazometrii automatycznej oraz modułowe łączenie instalacji umożliwiające naprawę uszkodzonych elementów.

4. Podsumowanie

Analiza i ocena ryzyka procesowego dla eksperymentu PZW nie jest zadaniem łatwym. Głównie ze względu na brak zadowalających doświadczeń dla podobnych prób prowadzonych pod ziemią. Na każdym etapie badań konieczne było uwzględnienie zarówno aspektów technicznych, organizacyjnych, środowiskowych, ale również ludzkich, które w znaczący sposób miały wpływ na bezpieczne prowadzenie procesu PZW. Przeprowadzona analiza ryzyka procesowego pozwoliła na weryfikację instalacji już w trakcie jej projek-

towania, wykonywania, a w następnej kolejności na etapie jej eksploatacji. Działania te umożliwiły określenie słabych punktów systemu i zaproponowanie rozwiązań technicznych lub organizacyjnych mających na celu zmniejszenie ryzyka powstania awarii czy wypadku w trakcie prowadzenia eksperymentu. Należy zauważyć, że podejście to ma duże znaczenie dla bezpieczeństwa procesu PZW, dostarczając informacji i wiedzy niezbędnej dla dalszych badań nad zapewnieniem jak najwyższych standardów bezpiecznego prowadzenia eksperymentów podziemnego zgazowania.

Próby PZW pozwalają na poszerzenie wiedzy na temat jednej z bardziej obiecujących technologii pozyskiwania paliwa w miejscu zalegania złoża. Przy obecnym stanie wiedzy technologia PZW nie jest alternatywą dla konwencjonalnej eksploatacji węgla, głównie ze względu na wysokie koszty pozyskiwania energii w ten sposób. Nie można jednak zapomnieć, że podziemne zgazowanie węgla pozwala na wykorzystanie wąskich, niedostępnych dla standardowej eksploatacji pokładów lub też resztek poeksploatacyjnych, co stanowi główny atut tej metody. Dlatego dalsze badania nad technologią PZW są konieczne, a samo doskonalenie kontroli nad procesem pozwoli w przyszłości na upowszechnienie podziemnego zgazowania węgla jako czystego sposobu pozyskiwania gazu w samym złożu.

Literatura:

1. *Burton E., Friedmann J., Upadhye R.*: Best Practice in Underground Coal Gasification. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2006
2. *Dinis da Gama, C., Navarro Torres, V., Falcao Neves, A.P.*: Technological innovations on underground coal gasification and CO₂ sequestration. *Dyna*, Year 77, Nr 161, marzec 2010, pp.101÷108
3. DTI.: Review of the feasibility of underground coal gasification in the UK. DTI/Pub 04/1643, Didcot, Oxfordshire, Great Britain, 2005
4. *Dziunikowski K.*: Eksploatacja węgla kamiennego sposobem podziemnego zgazowania. Monografia polskiego górnictwa węglowego 1968; 534÷547
5. ESKOM www.eskom.co.za UCG-project background. Dostęp: 12.09.2013 r.
6. *Friedmann S.J.*: Carbon sequestration. Proc. 2006 Energy Symposium, Madison, WI, USA, 2006
7. *Kapusta K., Stańczyk K.*: Uwarunkowania i ograniczenia rozwoju procesu podziemnego zgazowania węgla w Polsce. *Przemysł Chemiczny* 88/4. 2009 str.331÷338
8. *Kletz T.*: HAZOP and HAZAN – Identifying and Assessing Process Industry Hazards, 4th edition, Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK, 1999 ISBN 1852954212
9. *Klimenko A.Y.*: Early ideas in underground coal gasification. *Energies* 2009;2. str.456÷476
10. *Konopko W., Drzewiecki J.*: Wybrane przykłady podziemnego zgazowania węgla. *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko*, kwartalnik, Nr 1/1/2011, str.135÷144.
11. *Krause E.*: Materiały KD1 dotyczące zagadnień wentylacyjnych w KD Barbara.
12. *Krause E., Szuścik J.*: Koncepcja podziemnego zgazowania węgla w obszarze górnictwem KHW S.A. KWK „Wieczorek” przy uwzględnieniu kryteriów górnictwo-geologicznych, techniczno-organizacyjnych oraz bezpieczeństwa procesowego.
13. *Krzemień A., Duda A., Koterias A.*: Wykorzystanie metody FMEA do oceny ryzyka procesowego na etapie projektowania instalacji zgazowania węgla w czynnej kopalni węgla kamiennego. Zagrożenia i technologie. Praca zbiorowa pod redakcją Józefa Kabiesza. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 2012. ISBN 978-83-61126-48-5
14. *Markowski S.A.*: Zapobieganie stratom w przemyśle. Część III. Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2000 ISBN 83-87198-99-4
15. *McDonald D.*: Practical Hazops, Trips and Alarms. Newnes, Elsevier 2004 ISBN 0750662743
16. Polska Norma PN-IEC 61882:2005 Badania zagrożeń i zdolności do działania (badania HAZOP) – przewodnik zastosowań
17. Polska Norma PN-EN 31010:2010 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka
18. Polska Norma PN-N-18002:2011 System zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego
19. *Rauk J.*: Optymalne wymiary generatora przy podziemnym zgazowaniu węgla powietrzem. *Prace GIG Komunikat* Nr 660, 1976.
20. *Stańczyk K., Dubiński J., Cybulski K., Wiatowski M., Świądrowski J., Kapusta K., Rogut J., Smoliński A., Krause E., Grabowski J.*: Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara. *Polityka Energetyczna*. Tom 13, Zeszyt 2., 2010. PL ISSN 1429÷6675
21. The RASE Project Explosive Atmosphere: Risk Assessment of Unit Operations and Equipment” EU Project. Methodology for the Risk Assessment of Unit Operations and Equipment for Use in Potentially Explosive Atmospheres EU Project No: SMT4-CT97-2169, March 2000
22. *Wiatowski M., Stańczyk K., Świądrowski J., Kapusta K., Cybulski K., Krause E., Grabowski J., Rogut J., Howaniec N., Smoliński A.*: Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine “Barbara”. *Fuel* 99, 2012. pp.170÷179
23. *Younger P.L.*: Hydrogeological and geomechanical aspects of underground coal gasification and its direct coupling to carbon capture and storage. *Mine Water Environ* 30, 2011. pp.127÷140