

Identyfikacja scenariuszy powstania awarii w procesie PZW metodą szybową

Identification of scenarios of failure occurrence in the UCG process by the use of shaft method



Dr inż. Alicja Krzemień*)



Dr inż. Adam Duda*)



Dr inż. Aleksandra Koteras*)

Treść: W artykule przedstawiono najważniejsze scenariusze powstania awarii w procesie podziemnego zgazowania węgla (proces PZW) metodą szybową. Opracowanie scenariuszy zostało poprzedzone identyfikacją zagrożeń występujących w trakcie normalnej pracy georeaktora oraz w stanie awaryjnym jego pracy. W tym celu dokonano przeglądu światowej literatury z tego zakresu oraz wykorzystano wiedzę zdobytą w ramach projektów HUGE i HUGE 2, jakie Główny Instytut Górnictwa prowadził w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, a także w ramach Projektu Strategicznego NCBiR pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”. Identyfikacja zagrożeń, czyli czynników niebezpiecznych i szkodliwych, które mają potencjał do generowania zdarzeń niebezpiecznych, pozwoliła na tworzenie scenariuszy wydarzeń możliwych do zaistnienia w trakcie prowadzenia podziemnego zgazowania metodą szybową, istotnych dla bezpiecznego funkcjonowania instalacji PZW.

Abstract: This paper presents the most important failure scenarios for the underground coal gasification process (UCG process) by use of the shaft method. In order to develop failure scenarios, hazards that may have the potential to generate dangerous events have been identified during normal operating conditions and failure conditions of a georeactor. For this identification the authors used information and knowledge gained from HUGE, HUGE 2 projects, as well as during the implementation of the Strategic Project of the National Research and Development Center called: “Development of coal gasification technology for high production of fuels and electricity”. The undertaken research allowed to develop possible failure scenarios during the UCG process by use of the shaft method, essential for safe operation of the UCG installation.

Słowa kluczowe:

podziemne zgazowanie węgla, ocena ryzyka instalacji przemysłowej, identyfikacja zagrożeń

Key words:

underground coal gasification, risk analysis of an industrial facility, hazard identification

1. Wprowadzenie

Wszystkie nowe technologie planowane do wdrożenia na skalę przemysłową powinny być badane ze szczególną starannością. Należy tutaj zwrócić uwagę na trudności, jakie pojawiają się na etapie analizy prowadzonych procesów, wynikające z braku danych historycznych, tj. dane o wcześniejszych incydentach, wypadkach oraz awariach. Stanowią one ważne źródło informacji na temat problemów, które mogłyby powstać w trakcie rozruchu, obsługi oraz zatrzymania badanej instalacji. Dlatego też tak ważne jest prowadzenie badań w kierunku analizy mechanizmu definiującego dany proces oraz zidentyfikowanie możliwych odchylenia od normalnej

pracy układu. Jedną z technologii, badanych i rozwijanych w obecnej chwili zarówno w Europie, jak i na świecie, jest technologia podziemnego zgazowania węgla (proces PZW), znana już od ponad wieku [10], ale dopiero teraz wdrażana na skalę przemysłową [22]. Zgazowanie węgla jest sposobem na rozszerzenie energetycznej bazy surowcowej przez wykorzystanie do procesu węgla „uwięzionych” w pokładach nienadających się do eksploatacji metodą klasyczną, a więc cienkich i zanieczyszczonych przerostami, a także pozostałości grubych pokładów węgla już niedostępnych dla eksploatacji [2,4,7,13,17]. Główną zaletą technologii podziemnego zgazowania węgla jest możliwość uzyskiwania gazu o wartości przemysłowej (tzw. syngazu) bezpośrednio w miejscu jego zalegania. Dzięki takiemu rozwiązaniu następuje znaczna redukcja kosztów pozyskania gazu, w stosunku do

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

technologii zgazowania prowadzonej na powierzchni, a oprócz tego możliwe jest bezpośrednie zagospodarowanie odpadów stałych pod ziemią oraz zmniejszenie nakładu prac w trakcie realizacji procesu [5]. Jednak proces PZW jest skomplikowany w realizacji ze względu na swoją wieloaspektowość, na którą wpływają warunki prowadzenia procesu pod ziemią jak i problemy związane z zagrożeniami środowiskowymi, jakie może generować technologia [3, 22] oraz potencjalne awarie procesowe bardzo trudne do usunięcia.

Ze względu na sposób udostępnienia złoża węgla do podziemnego zgazowania wyróżnia się dwie podstawowe metody, do których należą: metoda bezszybowa, zakładająca dostęp do pokładu węgla za pomocą otworów wiertniczych oraz metoda szybowa, gdzie udostępnienie pokładu węgla odbywa się za pomocą szybu lub upadkowej [4, 21]. Lokalizacja procesu PZW pod ziemią, zarówno w metodzie szybowej, jak i bezszybowej sprawia, że kontrola procesu zgazowania jest dużo bardziej skomplikowana i dużo mniej precyzyjna niż w przypadku naziemnego zgazowania węgla. Ze względów bezpieczeństwa w metodzie szybowej zabrania się przebywania ludzi pod ziemią, w pobliżu georeaktora, w trakcie prowadzenia eksperymentu. Choć możliwość taka technicznie istnieje, to jednak wysokie ryzyko, którego skutkiem może być utrata życia lub zdrowia pracowników, wyklucza taką ewentualność. Wobec braku bezpośredniego dostępu do procesu parametry takie jak szybkość dopływu wody, rozkład reagentów w strefie zgazowania, tempo przesuwania się kanału ogniowego, mogą być szacowane jedynie pośrednio poprzez pomiary temperatury oraz składu jakościowego i ilościowego gazu procesowego uzyskanego na wylocie produkcyjnym [3].

Identyfikacja możliwych scenariuszy wystąpienia awarii w procesie PZW metodą szybową została wykonana na podstawie obserwacji niebezpiecznych czynników procesu w trakcie normalnej pracy georeaktora oraz w jego stanie awaryjnym. W analizie uwzględniono informacje pochodzące z literatury problemu, a także wykorzystano doświadczenia uzyskane w projektach HUGE i HUGE2. Projekty te Główny Instytut Górnictwa prowadził w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w latach 2007–2014, w ramach Funduszu Badawczego Węgla i Stali [8, 20, 21]. Uwzględniono także ustalenia określone w Projekcie Strategicznym NCBiR pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” [12].

2. Identyfikacja zagrożeń w procesie PZW

Identyfikacja zagrożeń w procesie PZW została wykonana przy użyciu techniki HAZOP [9, 11, 14, 18, 19]. Ten etap obejmował analizę głównych czynników posiadających potencjalną zdolność do generowania zdarzeń niebezpiecznych skutkujących zniszczeniem systemu, jak również mających wpływ na środowisko. Uwzględniono wpływ czynników ludzkich generowanych przez personel przygotowujący i nadzorujący przebieg procesu. W badaniach wzięto pod uwagę czynniki zagrożeń wewnętrznych i zewnętrznych procesu PZW, tj. ciśnienie, temperatura, szybkość reakcji oraz czynniki otoczenia wpływające niekorzystnie na prawidłowy przebieg procesu, tj. ruchy górotworu, mechaniczne uszkodzenie instalacji, niekontrolowany dopływ wody do georeaktora i inne.

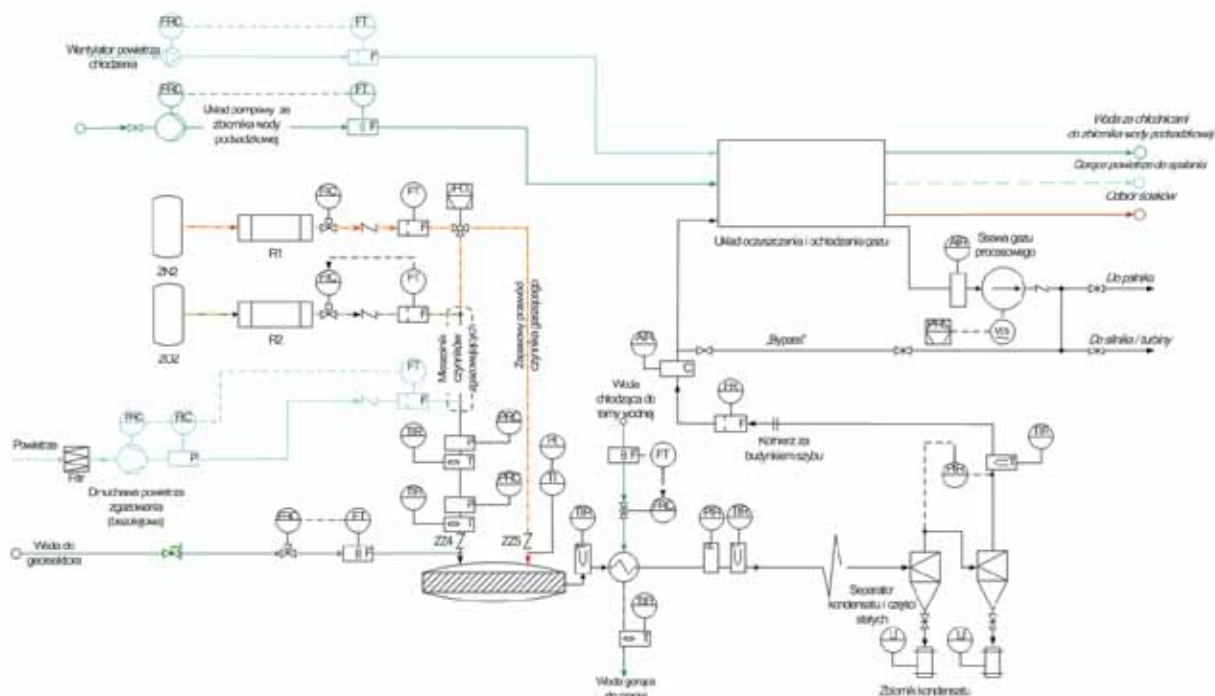
Z punktu widzenia oddziaływania proces PZW na środowisko jako bardzo prawdopodobne wymieniane są: możliwość zanieczyszczenia wód gruntowych oraz możliwe deformacje powierzchni. Według [3, 5] skala zjawiska osiadania terenu związanego z wpływem prowadzonego procesu PZW na skalę przemysłową jest podobna, jak przy tradycyjnej eksploatacji. Pustki po zgazowaniu i związane z tym procesy osiadania

terenu mogą mieć wpływ na zmianę stosunków wodnych, stabilność poziomów wodonośnych, jak również na obiekty infrastruktury powierzchniowej nad georeaktorem. W przypadku prowadzenia PZW metodą szybową wśród zagrożeń wystąpić może niebezpieczne oddziaływanie na obudowę oraz na sąsiadujące wyrobiska. Jako poważne zagrożenie wskazywana jest możliwość niebezpiecznego wpływu produktów procesu PZW na wody podziemne. W procesie podziemnego zgazowania węgla, oprócz pożądanego syngazu, produktami ubocznymi zgazowania są również liczne substancje chemiczne, m.in. związki aromatyczne, takie jak benzen, etylobenzen, ksyleny, fenole oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Proces zgazowania powodować może uwalnianie się metali ciężkich z popiołów powstających w trakcie prowadzenia procesu. Substancje migrując bez kontroli z georeaktora mogą być potencjalnym zagrożeniem dla innych elementów środowiska naturalnego [1]. Prowadzony w złożu proces zgazowania węgla powoduje nagrzewanie skał otaczających co skutkować może wzrostem przepuszczalności skał, zmianą ich własności czy też składu mineralnego. Może również powodować powstanie spękań i nieciągłości, stanowiących potencjalne drogi migracji zanieczyszczeń. Dane przytoczone przez Pembina Institute [15] w dwóch z 34 pilotażowych projektów PZW w Ameryce Północnej wskazują, że procesy PZW zanieczyściły wody podziemne, co wymagało podjęcia kosztownych i trudnych działań naprawczych. Z przytoczonych przykładów wynika, że ograniczenie wpływu zagrożeń musi być oparte na starannym doborze rejonu przewidywanej eksploatacji metodą PZW oraz na dokładnym kontrolowaniu stabilności czynników procesu i ciągłej analizie parametrów procesowych, głównie temperatury oraz składu gazów zasilających system.

Do tworzenia scenariuszy powstawania sytuacji awaryjnych wzięto pod uwagę informacje zawarte w schemacie technicznym instalacji, dane dotyczące urządzeń procesowych i dane uzyskiwane z czujników pomiarowych, sposób realizacji samego procesu i instalacji, a także wiedzę osób przygotowujących eksperyment PZW na terenie Polski. Pozwoliło to na systematyczne badanie poszczególnych elementów instalacji pod kątem powstania odchyłeń od założonych parametrów procesu oraz na analizę czy zidentyfikowane odchylenia mogą mieć negatywny wpływ na bezpieczne i efektywne prowadzenie procesu. Uproszczony schemat techniczny instalacji PZW dla metody szybowej został przedstawiony na rysunku 1.

W scenariuszach powstawania awarii przyjęto podział procesu podziemnego zgazowania węgla na trzy zasadnicze etapy. Etap tłoczenia czynnika zgazowującego do georeaktora lub czynnika inertyzującego w przypadku stanu awaryjnego georeaktora, etap zgazowania, aż do trzeciego etapu jakim jest podziemny przesył produktów zgazowania na powierzchnię. Pozwoliło to na systemową identyfikację zagrożeń mających potencjał wystarczający do generowania zdarzeń niebezpiecznych, tj. awarie lub wypadki (tabl. 1). Ustalono, że źródłem zagrożeń powstających w procesie PZW mogą być zarówno czynniki materiałowe, jak i czynniki mechaniczne związane z jakością użytych materiałów oraz sposobem wykonania instalacji i jej późniejszą obsługą. Uwzględniony został również wpływ czynników naturalnych związanych z ulokowaniem procesu pod ziemią, a także wpływ czynników wewnątrzprocesowych.

Identyfikacja zagrożeń pozwoliła na określenie listy potencjalnych przyczyn inicjujących ciągi zdarzeń niebezpiecznych, które w konsekwencji mogą doprowadzić do zatrzymania procesu. Lista możliwych zagrożeń stała się podstawą do określenia potencjalnych zdarzeń awaryjnych. Dla tych zdarzeń opracowano scenariusze ich rozwoju w procesie PZW metodą szybową.



Rys. 1. Uproszczony schemat techniczny instalacji PZW [16]
 Fig. 1. Simplified technical scheme of the UCG installation [16]

Tablica 1. Zidentyfikowane zagrożenia procesowe dla technologii PZW
 Table 1. Identified process hazards of the UCG technology

ETAP PROCESU	ZAGROŻENIA/ ODCHYLENIA W PROCESIE PZW	PRAWDOPODOBNA PRZYCZYNA
Tłoczenie czynnika zgazowującego/ inertyzującego do georeaktora	Zaburzenia w przepływie czynników zgazowujących	Awaria instalacji naziemnej podawania czynnika zgazowującego
	Zaburzenia w przepływie czynników inertyzujących	Niedrożność rurociągu
	Utrata szczelności rurociągu	Awaria instalacji naziemnej podawania azotu
		Niedrożność rurociągu
Zgazowanie w georeaktorze	Zmiany ciśnienia w rurociągu	Wada materiałowa/korozja
		Błąd montażu
		Uszkodzenie mechaniczne
		Ruchy górotworu
	Zmiany temperatury wewnątrz georeaktora	Awaria instalacji naziemnej podawania czynnika zgazowującego
		Zmniejszony dopływ czynnika zgazowującego w wyniku utraty szczelności rurociągu
		Złe zadane parametry procesu
		Niekontrolowany dopływ wody złożowej do georeaktora
	Zmiany składu gazu procesowego – powstanie atmosfery wybuchowej	Zbyt duża ilość czynnika zgazowującego
		Niedrożność układu odbioru produktów zgazowania lub jego awaria
		Przedostanie się powietrza z wyrobisk do georeaktora (wybuch, ruchy górotworu)
		Zbyt duża ilość czynnika zgazowującego
Zmiany ciśnienia w georeaktorze	Zbyt wolny odbiór produktów zgazowania	
	Awaria instalacji naziemnej podawania czynnika zgazowującego	
	Zmniejszony dopływ czynnika zgazowującego w wyniku utraty szczelności rurociągu	
	Złe zadane parametry procesu	
Brak szczelności georeaktora	Niedrożność rurociągu na odprowadzeniu	
	Awaria instalacji odbioru gazów na powierzchni	
	Utrata szczelności rurociągu na odprowadzeniu	
	Przerwanie ciągłości na skutek ruchów górotworu	
Podziemny przesył produktów zgazowania na powierzchnię (gaz i kondensat)	Zaburzenia w przepływie produktów zgazowania	Zawalenie się stropu georeaktora
		Brak szczelności połączeń na wlocie/wylocie do/z georeaktora
	Utrata szczelności rurociągu (możliwość powstania atmosfery wybuchowej)	Zakłócenia w przebiegu procesu w georeaktorze
		Niedrożność rurociągu
	Zmiany ciśnienia w rurociągu	Wada materiałowa/korozja
		Błąd montażu
	Zmiany temperatury w rurociągu	Uszkodzenie mechaniczne
		Ruchy górotworu

W tablicy 1 nie uwzględniono czynników i przyczyn zagrożeń związanych z naziemną infrastrukturą instalacji, takich jak np. awaria systemu podawania azotu, czy niedrożność lub przepełnienie pojemników odbierających produkty zgazowania na powierzchni.
 Table 1. does not include the factors and causes of surface infrastructure-related hazards, such as the failure of nitrogen feeding system or obstruction or overflow of the containers receiving the gasification products on the surface

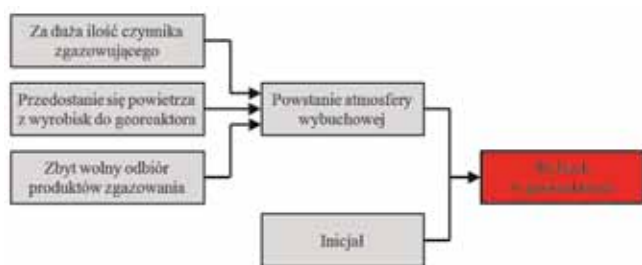
3. Przykłady scenariuszy powstania awarii w procesie PZW metodą szybową

Scenariusze możliwych zdarzeń/scenariusze awarii są oparte na logice intuicyjnej, a ich celem jest tworzenie list wydarzeń możliwych do zaistnienia w przyszłości, istotnych dla funkcjonowania danej instalacji/przedsięwzięcia [12]. W przypadku wystąpienia awarii w procesie PZW zdarzeniem końcowym typu lokalnego może być np. niedrożność rurociągu, uszkodzenie elementu infrastruktury systemu, rozszczelnienie instalacji lub wybuch w georeaktorze. Każde zdarzenie lokalne ma konsekwencje dla całego systemu (tzw. skutki globalne) i może prowadzić do czasowego zatrzymania procesu lub też do jego całkowitego zakończenia. Istotą tworzenia scenariuszy zdarzeń jest wyprzedzające identyfikowanie przyczyn ich możliwego zaistnienia, kierunków propagacji skutków, a także siły i oddziaływania na cały system, jak również określenia zdolności systemu na reagowanie na zmieniające się warunki. Aby móc zdefiniować mechanizmy powstania awarii, konieczne było określenie scenariuszy rozwoju zdarzeń inicjujących względem systemów bezpieczeństwa uwzględniających określone funkcje. Funkcje te stanowią odpowiedź obiektu na występujące zakłócenia w postaci zdarzenia inicjującego, np. spadek ilości tłoczonoego czynnika zgazowującego na wlocie do georeaktora (od zakładanej) może świadczyć o wypływie gazów do wyrobisk bezpośrednio związanych z georeaktorem.

Ze względu na obszerność zagadnienia omawianego w tym artykule, autorzy zdecydowali się na przedstawienie najważniejszych scenariuszy powstania awarii w procesie PZW prowadzonego metodą szybową. Kryterium wyboru scenariusza było najwyższe prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia w trakcie normalnej pracy układu oraz w okresie jego awaryjnego działania, a także wielkość skutków jakie może wywołać dane zdarzenie.

3.1. Scenariusz 1. Wybuch w georeaktorze

Aby doszło do aktywacji zagrożenia w tym scenariuszu niezbędne jest zaistnienie równocześnie dwóch czynników tj. powstanie atmosfery wybuchowej wewnątrz georeaktora oraz obecność inicjału (rys. 2).



Rys. 2. Sekwencja zdarzeń dla wybuchu w georeaktorze. S1
Fig. 2. Sequence of events for the explosion in the georeactor. S1

Analiza składu gazu otrzymanego z polskich węgli w procesie PZW wykazała, że dla uzyskanych średnich stężeń nie występuje atmosfera wybuchowa, bowiem niespełniona jest nierówności przedstawiona we wzorze 1.

$$O_2 \geq \frac{12 CH_4 + 6CO + 5(H_2 + C_2H_6)}{CH_4 + CO + H_2 + C_2H_6} \quad (1)$$

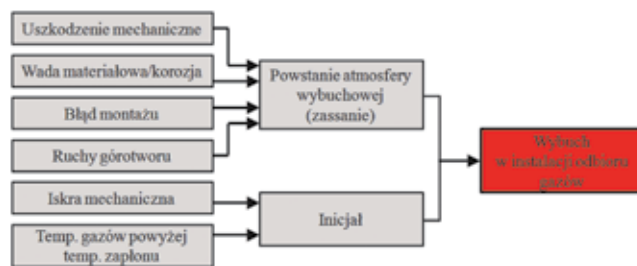
gdzie: O_2 , CH_4 , CO , H_2 , C_2H_6 – objętości procentowe gazów wybuchowych wchodzących w skład syngazu.

Prawdopodobieństwo wystąpienia atmosfery wybuchowej w normalnym stanie pracy georeaktora jest bardzo małe, natomiast prawdopodobieństwo wystąpienia efektywnego źródła zapłonu należy uznać jako wysokie zwłaszcza przy wylocie z georeaktora z uwagi na temperaturę gazów procesowych. W analizowanych eksperymentach PZW wynosiła ona co najmniej 500 °C. Jeżeli weźmiemy pod uwagę, że w trakcie procesu PZW może dojść do niekontrolowanego rozszczelnienia georeaktora, to wtedy musimy się liczyć z dodatkowym źródłem dopływu powietrza kopalnianego zawierającego co najmniej 20 % tlenu i dochodzi do spełnienia nierówności opisanej wzorem 1. W takiej sytuacji prawdopodobieństwo powstania wybuchu wzrośnie, gdyż temperatura gazów przy wylocie z georeaktora jest wystarczająca, aby doszło do inicjacji wybuchu. Dlatego kontrola zawartości tlenu powinna być prowadzona poprzez wykonywanie pomiarów stężeń gazów na wylocie z rurociągu odprowadzającego produkty zgazowania. W przypadku wzrostu stężeń tlenu konieczne jest przeprowadzenie regulacji procesu spalania, tak aby stężenia zmniejszyły się do 1 %. Jeżeli jest to niemożliwe, względy bezpieczeństwa wymagają przerwania procesu i podania gazu inertnego.

Inną przyczyną powstania atmosfery wybuchowej może być podawanie zbyt dużej ilości czynnika zgazowującego np. tlenu, który nie zostaje w pełni wykorzystany w procesie spalania. Jego obecność w georeaktorze zwiększa prawdopodobieństwo powstania wybuchu. Kolejną rozpatrywaną możliwością powstania wybuchu jest zbyt wolny odbiór produktów zgazowania spowodowany niedrożnością rurociągu odprowadzającego produkty zgazowania.

3.2. Scenariusz 2. Wybuch w rurociągu odprowadzającym gazy z georeaktora

Podobnie jak w poprzednim scenariuszu, aby doszło do aktywacji zagrożenia i wystąpienia zdarzenia wybuchu niezbędna jest równoczesna aktywność dwóch czynników, tj. powstanie atmosfery wybuchowej w rurociągu oraz wystąpienie inicjału (rys. 3).



Rys. 3. Sekwencja zdarzeń dla wybuchu w instalacji odbioru gazów. S2

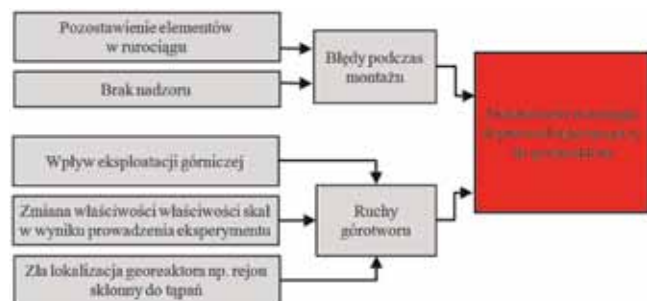
Fig. 3. Sequence of events for the explosion in the gas-receiving installation. S2

Do wybuchu w instalacji odbioru gazów działającej na podciśnieniu, może dojść w momencie rozszczelnienia rurociągu w wyniku, którego do instalacji przedostanie się powietrze kopalniane o zawartości około 20 % tlenu. Wielkość dopływu tlenu do rurociągu (uzależniona od rozmiarów uszkodzeń) będzie decydowała o spełnieniu warunku opisanego wzorem (1) i o możliwości powstania atmosfery wybuchowej wewnątrz rurociągu. Aby doszło do wybuchu, niezbędny jest także inicjał, którym w tym przypadku może być iskra mechaniczna towarzysząca powstaniu uszkodzenia lub też wysoka temperatura gazów, powyżej temperatury zapłonu składników mieszaniny gazów.

W scenariuszu S2 istnieje również możliwość wystąpienia wybuchu w wyrobisku na skutek amputacji, czyli całkowitego przerwania ciągłości rurociągu. Ilość wydostających się gazów z rurociągu najprawdopodobniej nie będzie wystarczająca do zaistnienia wybuchu (rurociąg pracuje na podciśnieniu).

3.3. Scenariusz 3. Niedrożność rurociągu doprowadzającego gazy do georeaktora

Aktywacja tego scenariusza jest możliwa w dwóch przypadkach. Pierwszy z nich związany jest z fazą budowy instalacji, gdy istnieje prawdopodobieństwo, że w skutek błędu ludzkiego dojdzie do złego połączenia elementów instalacji (błąd montażu) lub zatkania jej pozostawionymi przedmiotami w rurociągu. Drugi przypadek związany jest z zjawiskami naturalnymi, gdzie w trakcie procesu dochodzi do ruchu górotworu w taki sposób, że fragment instalacji zostaje „zaciśnięty” i staje się niedrożny (rys. 4).



Rys. 4. Sekwencja zdarzeń dla niedrożności rurociągu doprowadzającego gazy do georeaktora. S3
 Fig. 4. Sequence of events for obstruction of the pipeline supplying gas to the georeactor. S3

Prawdopodobieństwo zajścia pierwszego ze zdarzeń jest duże. W warunkach ruchowych kopalni nie trudno o pozostawienie w rurociągu elementów mogących doprowadzić do jego niedrożności/zatkania. W celu minimalizacji prawdopodobieństwa tego zdarzenia należy proces zabudowy rurociągów prowadzić pod ścisłym nadzorem, a ponadto przed rozpoczęciem procesu przeprowadzić próbę drożności/szczelności. Takie działania praktycznie wykluczają możliwość zatkania rurociągu doprowadzającego gaz z powodu błędów powstałych podczas montażu. Drugie zdarzenie mogące doprowadzić do niedrożności rurociągu to zaciśnięcie go w wyniku ruchów górotworu. Ponieważ jest to zjawisko, które może być nieobserwowalne i trudno przewidywalne wymagana będzie kontrola sejsmiczna rejonu przebiegu rurociągu oraz szybkie działania profilaktyczne.

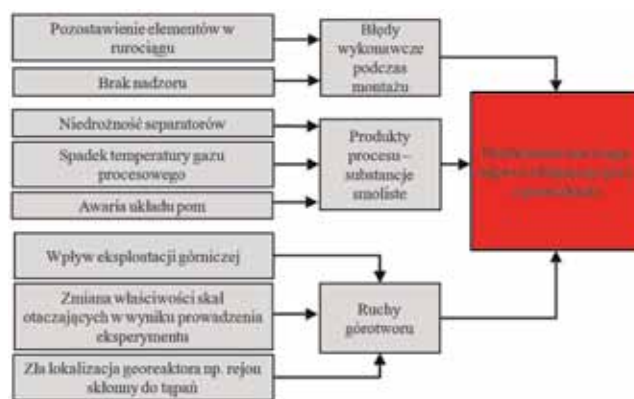
W obydwu przypadkach scenariusza S3 duże znaczenie prewencyjne ma zastosowanie modułowego łączenia elementów instalacji i wymiany uszkodzonego modułu. Konsekwencje niedrożności rurociągu zależne będą od tego jaki gaz płynie rurociągiem. Przy założeniu, że rurociągiem płynie powietrze, lub tlen – konsekwencje będą najmniejsze tj. wystąpi tylko zaburzenie procesu spowodowane brakiem dopływu środka zgazowującego, a w skrajnym przypadku (brak możliwości naprawy) zatrzymanie procesu. Gdy rurociągiem płynie azot, stosowany podczas procesu wygaszania georeaktora, i dojdzie do zatrzymania jego przepływu, może wystąpić utrata kontroli nad procesem. Zgodnie z zasadą nadmiarowości bezpieczeństwa wskazane będzie wykonanie drugiego rurociągu przeznaczonego na dostarczenie azotu.

Jeżeli jest to możliwe rurociąg ten powinien być poprowadzony trasą alternatywną do pozostałych rurociągów.

Podobne do opisanych scenariusze mogą wystąpić w przypadku awarii instalacji podawania gazów na powierzchni z niemal takim samym skutkiem dla systemu. Inny jednak będzie charakter konsekwencji dla ludzi i środowiska.

3.4. Scenariusz 4. Niedrożność rurociągu odprowadzającego gazy z georeaktora

Realizacja tego scenariusza jest możliwa w trzech przypadkach. Dwa z nich zostały opisane w scenariuszu S3. Trzecim jest niedrożność rurociągu przez smoliste produkty zgazowania (rys. 5).

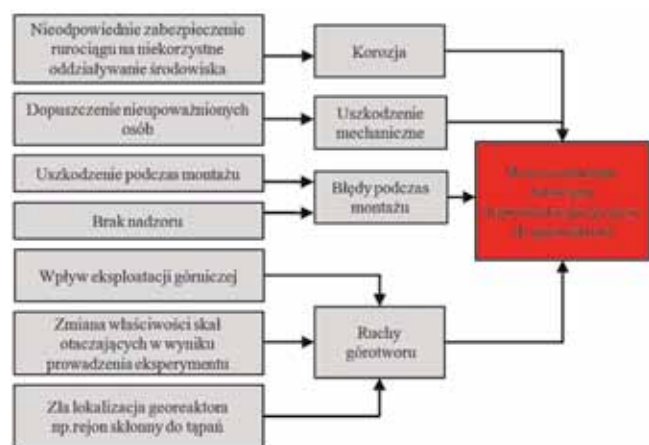


Rys. 5. Sekwencja zdarzeń dla niedrożności rurociągu odprowadzającego gazy z georeaktora. S4
 Fig. 5. Sequence of events for obstruction of the pipeline which carries away gases from the georeactor. S4

Prawdopodobieństwo zatkania rurociągu przez substancje smoliste zależy od dwóch czynników. Pierwszym czynnikiem jest spadek temperatury gazów procesowych, który może być spowodowany zakłóceniami związanymi z przebiegiem procesu (np. zakłócenia w dostawie czynnika zgazowującego, przedostawanie się wody do georeaktora). Drugim zakłócenia w odbiorze substancji smolistych spowodowane awarią pomp, zatkanie separatorów czy przepełnieniem zbiorników. Działaniami zapobiegającymi powstaniu tych zdarzeń są bieżąca kontrola procesu oraz zastosowanie dwóch układów pomp, z których jeden jest w stanie przejąć zadania odbioru kondensatu w przypadku awarii pierwszego. Niedrożność rurociągu odprowadzającego produkty zgazowania może doprowadzić do zatrzymania procesu lub spowodować rozszczelnienie tego rurociągu (scenariusz S6).

3.5. Scenariusz 5. Rozszczelnienie rurociągu doprowadzającego gazy do georeaktora

Aktywacja tego scenariusza jest możliwa w pięciu przypadkach. Pierwszy z nich związany jest z fazą budowy instalacji, gdy istnieje prawdopodobieństwo, że w skutek błędu ludzkiego dojdzie do złego połączenia elementów instalacji (błąd montażu). Drugi przypadek związany jest z zjawiskami naturalnymi, gdzie w trakcie procesu dochodzi do ruchu górotworu w taki sposób, że następuje osłabienie połączeń lub uszkodzenie powierzchni rurociągu. Trzeci przypadek związany jest uszkodzeniem mechanicznym elementów instalacji, czwarty z możliwością wystąpienia wady materiałowej w elementach użytych do budowy instalacji, a piąty z korozją (rys. 6).



Rys. 6. Sekwencja zdarzeń rozszczelnienia rurociągu doprowadzającego gazy do georeaktora. S5

Fig. 6. Sequence of events resulting from the unsealing of the pipeline supplying gases to the georeactor. S5

Decydujące znaczenie dla minimalizacji możliwości wystąpienia tego scenariusza ma przeciwdziałanie czynnikom najbardziej niekorzystnym w czasie budowy instalacji np. błędy montażu. W celu minimalizacji prawdopodobieństwa wystąpienia rozszczelnienia rurociągu należy proces zabudowy rurociągów prowadzić pod ścisłym nadzorem oraz przed rozpoczęciem procesu wykonać próbę szczelności. Drugie zjawisko mogące doprowadzić do rozszczelnienia rurociągu – ruch górotworu zostało opisane w scenariuszu S3.

Zdarzenia związane z wadą materiałową oraz korozją rurociągu zależą od prawidłowo przyjętych założeń projektowych i zastosowania właściwych materiałów o odpowiednich parametrach dostosowanych do panujących w wyrobiskach górniczych warunków i kontroli dostarczanych materiałów (atesty, certyfikaty). Zapobieganie zdarzeniom związanym z mechanicznym uszkodzeniem instalacji sprowadza się głównie do niedopuszczenia do przebywania w miejscu przebiegu instalacji osób nieupoważnionych, które poprzez swoje działanie mogą doprowadzić do uszkodzenia rurociągu.

Podobnie jak w scenariuszu S3 (nie drożność rurociągu doprowadzającego gazy) duże znaczenie ma zastosowanie modułowego łączenia elementów instalacji i wymiany uszkodzonego modułu.

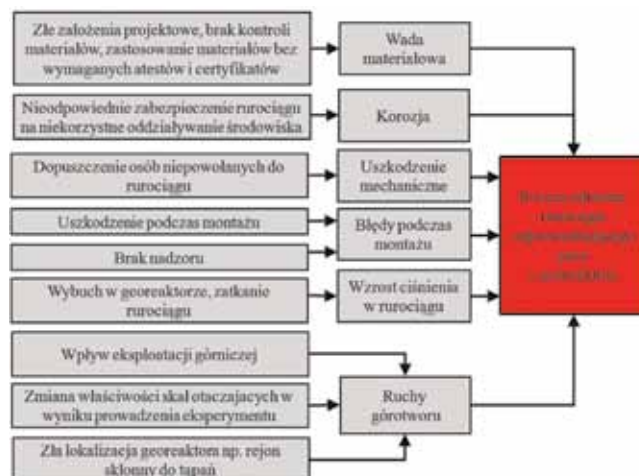
Konsekwencje braku szczelności rurociągu zależne są od rodzaju włączanego gazu.

Przy założeniu, że rurociągiem płynie powietrze – wystąpi zaburzenie procesu w skutek zmniejszenia ilości dostarczanego powietrza (spadek ciśnienia). Gdy rurociągiem będzie płynął tlen, nastąpi wyciek tlenu do wyrobisk, dojdzie do spadku efektywności procesu oraz wzrostu zagrożeń, np. samozapłonu węgla. Gdy rurociągiem popłynie azot podczas procesu wygaszania lub awarii może dojść do przerwania procesu gaszenia w skutek wypływu azotu do wyrobisk i zassania powietrza z miejsca nieszczelności. Skutki będą zależały od wielkości nieszczelności. Najgorszą sytuacją będzie amputacja rurociągu. Mając na uwadze bezpieczeństwo procesu zasadne jest wykonanie drugiego rurociągu z przeznaczeniem głównie na dostarczenie azotu. Jeżeli jest to możliwe rurociąg ten powinien być poprowadzony trasą alternatywną do pozostałych rurociągów.

3.6. Scenariusz 6. Rozszczelnienie rurociągu odprowadzającego gazy z georeaktora

Aktywacja tego scenariusza jest możliwa w sześciu niezależnych przypadkach. Pięć z nich zostało szczegółowo

opisanych w scenariuszu S5. Szóste zdarzenie jest właściwe dla zjawiska wybuchu w georeaktorze, który spowoduje wzrost ciśnienia w rurociągu (rys. 7).



Rys. 7. Sekwencja zdarzeń rozszczelnienia rurociągu odprowadzającego gazy z georeaktora. S6

Fig. 7. Sequence of events resulting from the unsealing of the pipeline which carries away the gases from the georeactor. S6

Do wzrostu ciśnienia w rurociągu może doprowadzić wybuch w georeaktorze lub niedrożność się rurociągu odprowadzającego produkty zgazowania. Opisane to zostało w scenariuszach S1 i S4. Podobnie jak w scenariuszu S2 – niedrożność rurociągu doprowadzającego gazy duże, znaczenie ma zastosowanie modułowego łączenia elementów instalacji i sposób wymiany uszkodzonego modułu. Ponieważ instalacja będzie pracować na podciśnieniu to w wyniku rozszczelnienia rurociągu dojdzie do zassania powietrza kopalnianego co spowoduje zmianę jego składu procentowego i może prowadzić do wybuchu w rurociągu (scenariusz S2).

Mając na uwadze specyfikę procesu nie można wykluczyć zagrożenia powstania atmosfery niezdanej do oddychania z uwagi na wysoką zawartość CO w gazie procesowym. Dla szybkiego wykrycia nieszczelności konieczne jest zastosowanie automatycznego systemu gazometrii. Dla zapewnienia bezpieczeństwa pracowników wymagane jest przestrzeganie zakazu przebywania pracowników w rejonie rurociągu odprowadzającego produkty zgazowania. Konieczne prace naprawcze powinny być prowadzone w trybie akcji ratowniczej przez ratowników górniczych.

4. Podsumowanie

Technologia podziemnego zgazowania węgla jest jeszcze technologią niekomercyjną, będącą w fazie badań. Kluczowym zagadnieniem dla bezpiecznego prowadzenia procesu jest dokładna i rzetelna analiza oraz ocena zagrożeń mogących wystąpić w poszczególnych etapach realizacji procesu. Analiza mechanizmu definiującego dany proces oraz identyfikacja wszelkich odchyleń od normalnej pracy układu, jest ważnym aspektem badań nad wdrożeniem technologii PZW. Biorąc pod uwagę specyfikę tej technologii oraz niewielką wiedzę praktyczną, a także ograniczony zbiór danych w obszarze awaryjności instalacji procesowych do PZW uzasadnione było prowadzenie obserwacji i analiz niezawodności procesu oraz oceny bezpieczeństwa instalacji pilotażowych. Zaproponowany w artykule sposób identyfikacji czynników

zagrożeń, pozwolił przedstawić sześć zasadniczych scenariuszy opisujących możliwość wystąpienia awarii procesowych PZW, z uwzględnieniem rodzajów przyczyn oraz ich wpływu na bezpieczeństwo procesowe. Scenariusze potencjalnych awarii uwzględniają możliwość ich zaistnienia w trakcie fazy stabilnej oraz w fazach odchyleniowych procesu. Scenariusze mogą być rozpatrywane i wykorzystywane w różnych etapach realizacji procesów PZW.

Praca została wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

Autorzy pragną serdecznie podziękować Panu Jerzemu Świądrowskiemu za współpracę i wsparcie merytoryczne przy realizacji zadań dotyczących analizy i oceny ryzyka podczas prowadzenia prób PZW.

Literatura:

1. *Baron R., Kabiesz J., Koterak A.*: Wybrane aspekty ryzyka środowiskowego związanego z procesem podziemnego zgazowania węgla [w]: „Zagrożenia i technologie” pod red. J. Kabiesz, 2013.
2. *Blinderman M.S., Anderson B.*: Underground coal gasification for power generation: Efficiency and CO₂ – emissions. Proc. 12th International Conference on Coal Science, Cairns, Australia, November 2-6, 2003; Paper No. 12C1
3. *Burton E., Friedmann J., Upadhye R.*: Best Practice in Underground Coal Gasification. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2006.
4. *Dziunikowski K.*: Eksploatacja węgla kamiennego sposobem podziemnego zgazowania. Monografia polskiego górnictwa węglowego 1968.
5. *Friedmann S. J.*: Carbon sequestration. Proc. Energy Symposium, Madison, WI, USA, 2006.
6. *Friedmann J., Burton E., Upadhye R.*: Underground Coal Gasification. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2007.
7. *Kapusta K., Stańczyk K.*: Uwarunkowania i ograniczenia rozwoju procesu podziemnego zgazowania węgla w Polsce. Przemysł Chemiczny 88/4, 2009.
8. *Kapusta K., Stańczyk K., Wiatowski M., & Chečko, J.* Environmental aspects of a field-scale underground coal gasification trial in a shallow coal seam at the Experimental Mine Barbara in Poland. Fuel, 113(0), 196-208. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.015>, 2013.
9. *Kletz T.*: HAZOP and HAZAN – *Identifying and Assessing Process Industry Hazards*, 4th edition, Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK, ISBN 1852954212, 1999
10. *Klimenko A.Y.*: Early ideas in underground coal gasification. Energies 2009.
11. *Markowski S. A.*: Zapobieganie stratom w przemyśle. Część III. Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. ISBN 83-87198-99-4, Łódź, 2000.
12. *Materiały KWK „Wieczorek”*: Wniosek o wydanie opinii w zakresie przyjętych rygorów w trakcie prowadzenia eksperymentalnej eksploatacji parceli pokładu 501 z zastosowaniem procesu podziemnego zgazowania węgla. Katowice, 2012.
13. *McCracken R.*: Mining without mines: UCG. Energ Econ 2008.
14. *Mcdonald D.*: Practical Hazops, Trips and Alarms. Newnes, Elsevier, ISBN 0750662743, 2004.
15. *Moorhouse J., Huot M., McCulloch M.*: Underground Coal Gasification: Environmental Risks and Benefits Pembina Institute, 2010.
16. *Mocek P., Gil I.*: Przesył gazu z podziemnego zgazowania węgla. Przegląd Górniczy, 02/2013, 2013
17. *Oliver T.*: Clean fossil-fuelled power generation Energy Policy 26, 2008.
18. Polska Norma PN-IEC 61882:2005 Badania zagrożeń i zdolności do działania (badania HAZOP) – przewodnik zastosowań, PKN, 2005.
19. Polska Norma PN-EN 31010:2010 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka, PKN, 2010.
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. PL ISSN 1429-6675, 2010
21. *Wiatowski M., Stańczyk K., Świądrowski J., Kapusta K., Cybulski K., Krause E., Grabowski J., Rogut J., Howanec N., Smoliński A.*: Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine “Barbara”. Fuel 99, 2012.
22. *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.



Zadanie Badawcze nr 3 pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

