

Analiza warunków wentylacyjno-gazowych w trakcie prowadzenia próby podziemnego zgazowania metodą szybową

Analysis of gas and ventilation conditions during a test of underground gasification with the use of shaft method



Dr hab. inż. Eugeniusz Krause, prof. GIG*)



Dr inż. Alicja Krzemień*)

Treść: W niniejszym artykule przedstawiono analizę sytuacji wentylacyjno-gazowej, która powstała w wyniku rozszczelnienia reaktora podczas eksperymentu podziemnego zgazowania węgla w pokładzie 310 w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa (GIG). W wyniku procesu zgazowania węgla powstaje bogaty w wodór, a także tlenek węgla, gaz syntezowy, który odprowadzany jest z georeaktora na powierzchnię siecią rurociągów. W stanie awaryjnym istnieje możliwość wydostania się mieszaniny gazu procesowego z reaktora lub z rurociągu do czynnych wyrobisk sieci wentylacyjnej kopalni. Omówiono czynniki, które mogą doprowadzić do wypływu gazów z reaktora oraz określono możliwe scenariusze wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych, tj. zapalenie gazu procesowego lub wybuchu mieszaniny powietrzno-gazowej. Przeprowadzono obliczenia przy wykorzystaniu zmodyfikowanego równania Le Chateliera, pozwalającego na ocenę możliwości powstania warunków wystarczających do zaistnienia każdego z badanych zdarzeń krytycznych. Doświadczenia uzyskane w trakcie prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla w KD „Barbara” GIG mogą być wykorzystane na etapie przygotowania kolejnych prób PZW w kopalniach węgla kamiennego.

Abstract: This paper presents an analysis of gas and ventilation conditions which occurred due to depressurization of a georeactor during a test of underground coal gasification in coal seam no. 310 in the testing mine “Barbara” led by the Central Mining Institute (CMI). The underground gasification process generates hydrogen- and carbon oxide-rich syngas which is released by a network of pipelines onto the surface. In case of emergency, the process gas may escape from the georeactor of the pipeline into active excavations of the ventilation system of the mine. This paper also presents some factors which may cause an escape of gases from a georeactor and determines possible scenarios of hazardous events occurrence, e.g. ignition of process gas or explosion of air-gas mixture. Series of calculations were performed with the use of the modified Le Chatelier principle which allows to assess the possibility of creating conditions feasible for each of the tested critical events to occur. Experience obtained during the underground coal gasification process in the testing mine “Barbara” of the CMI may be applied in the preparation of successive UCG tests in hard coal mines.

Słowa kluczowe:

zgazowanie węgla pod ziemią, bezpieczeństwo procesu PZW, rozszczelnienie georeaktora, mieszanina powietrzno-gazowa

Key words:

underground coal gasification, safety of UCG process, georeactor depressurization, air-gas mixture

1. Wprowadzenie

Podziemne zagazowanie węgla (PZW) metodą szybową w kopalni czynnej lub likwidowanej niesie ze sobą wiele trudności związanych z zaprojektowaniem budowy i obsługi procesu, przy wykorzystaniu istniejących wyrobisk sieci wentylacyjnej kopalni. Technologia PZW jest znana i rozwijana już od początku ubiegłego wieku [4, 11].

Proces podziemnego zgazowania przebiega analogicznie do technologii zgazowania węgla na powierzchni, jest jednak bardziej złożony i generuje dodatkowe zagrożenia dla otaczającego go środowiska podziemnego [14]. Georeaktor tworząc wyrobiska górnicze, a także parcelę pokładu węgla, w której wykonywany jest otwór lub otwory technologiczne umożliwiające doprowadzenie czynników zgazowujących (tleny, powietrze, pary wodnej) oraz odprowadzenie gazu procesowego. Proces zgazowania rozpoczyna się od zapalenia węgla w pokładzie. Doprowadzenie czynnika zgazowującego powoduje rozwój procesu zgazowania i przemieszczanie się

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

frontu przebiegającego procesu zgodnie z kierunkiem przepływu gazu procesowego odprowadzanego na powierzchnię [3]. Niewątpliwym atutem tej technologii jest pozyskiwanie gazu procesowego bezpośrednio w miejscu zalegania złoża i możliwość zgazowywania cienkich pokładów węgla lub resztek niewyeksplotowanych pokładów. Kaloryczność gazu syntezowego, będącego produktem spalania węgla oraz jego skład, zależą przede wszystkim od rodzaju doprowadzanego czynnika zgazowującego, a także od typu węgla, w którym przebiega proces zgazowania.

Prowadzenie zgazowania w czynnej lub też w likwidowanej kopalni węgla kamiennego jest przedsięwzięciem trudnym i złożonym, przede wszystkim ze względu na samą technologię stosowaną na dużą skalę, ale także ze względu na jej dostosowanie do istniejącej podziemnej infrastruktury kopalni. Problemy, jakie pojawiają się na etapie przygotowania i analizy procesu PZW mogą wynikać z braku informacji dotyczących możliwych awarii, czy zakłóceń w pracy georeaktora oraz instalacji, zarówno na etapie jej rozruchu, obsługi czy zatrzymania procesu. Metoda szybowa zakłada udostępnienie georeaktora w pokładzie węgla wykonane za pomocą szybu lub upadowej [1, 10]. Przeprowadzenie prób podziemnego zgazowania w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w latach 2010 i 2013 [13, 17] ukierunkowane było na otrzymanie gazu procesowego o wysokiej zawartości wodoru. W Kopalni Doświadczalnej „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa zbudowano podziemną i naziemną instalację umożliwiającą prowadzenie prób zgazowania w skali półtechnicznej. Zrealizowany eksperyment pozwolił na określenie technicznych możliwości wpływu na skład gazu procesowego i przebieg procesu poprzez kontrolę podstawowych parametrów termodynamicznych prowadzenia procesu [3, 17].

Zgazowanie węgla przeprowadzone w 2013 roku zostało ukierunkowane na zagrożenia środowiskowe wynikające z realizacji procesu pod ziemią, takie jak zanieczyszczenie podziemnych zbiorników wodnych [12] oraz potencjalne wypływy wybuchowych i toksycznych gazów do górotworu w środowisku georeaktora. Wyniki tego eksperymentu stanowią podstawę publikacji obejmującej swym zakresem problemy i wyzwania gazowo-wentylacyjne związane z lokalizacją georeaktora w podziemiach kopalni węgla kamiennego. Prowadzenie procesu PZW w warunkach czynnej czy nawet zlikwidowanej kopalni jest procesem trudnym, głównie ze względu na konieczność zapewnienia pełnej kontroli nad sterownością procesu, w tym nad rozkładem reagentów w procesie zgazowania, prędkością przesuwania się frontu procesu w kanale ogniowym, wydatku migrującej wody, temperatury otaczających skał w trakcie procesu [2], a także składu powietrza w czynnych wyrobiskach w otoczeniu georeaktora.

2. Warunki prowadzenie próby podziemnego zgazowania węgla w KD „Barbara”

W sierpniu 2013 roku w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” na poziomie 30 metrów została przeprowadzona próba podziemnego zgazowania węgla. Georeaktor podziemnego zgazowania usytuowano w parceli pokładu 310, okonturowanej czynnymi wyrobiskami wykonanymi w latach 50. w obudowie murowo-betonowej. Na rysunku 1 przedstawiono wyrobisko w obudowie murowo-betonowej okonturowujące georeaktor od strony doprowadzenia świeżego powietrza, a w perspektywie widoczna jest wykonana tama izolacyjna z przepustem tamowym otwartym o średnicy $\varnothing 0,8$ m. W wyrobiskach okonturowujących georeaktor zabudowano

drugą tamę izolującą przeciwybuchową, która w przypadku powstania stanu awaryjnego umożliwiała przerwanie ciągłości przewietrzania i odizolowanie wyrobisk okonturowujących georeaktor od czynnych wentylacyjnie wyrobisk.



Rys. 1. Wyrobisko w obudowie murowej-betonowej okonturowujące georeaktor – od strony wlotu powietrza

Fig. 1. Excavation in brick lining surrounding the georeactor – from the side of the air inlet

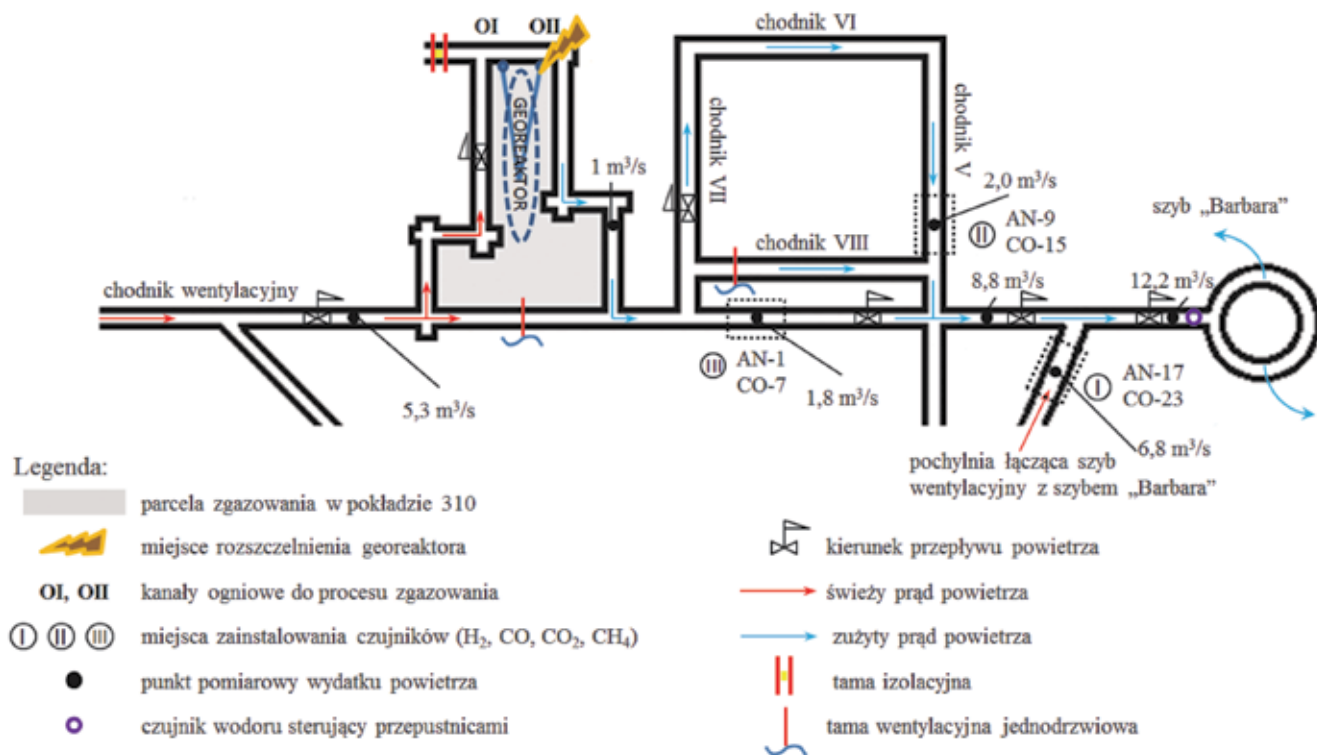
Z wyrobisk okonturowujących parcelę pokładu 310 przeznaczoną do przeprowadzenia próby podziemnego zgazowania węgla dla georeaktora wykonano dwa połączone kanały ogniowe OI i OII, których usytuowanie względem siebie było w kształcie litery „V” (rys. 2).

W kanale OI na kontakcie z obudową betonową wyrobiska wykonano betonową komorę do, której podawany był rurociągiem $\varnothing 0,15$ m tlen jako czynnik zgazowujący. Ocios chodnika w obudowie betonowej w miejscu zabudowy komory został oryglowany w celu niedopuszczenia do powstania rozszczelnienia ociosu wyrobiska. Wzmocnienie ryglami pionowymi i poziomymi ociosu wyrobiska w miejscu zabudowy komory, wykrczało poza założenia projektu, które nie przewidywały takiego zabezpieczenia. Gaz procesowy odprowadzany był na powierzchnię z kanału OII rurociągiem $\varnothing 0,2$ m.

Zapalenie węgla pokładu 310 w georeaktorze wykonano w oparciu o skonstruowany ładunek zapalający, którego zainicjowanie przeprowadzono zapalarką górniczą stosowaną w górnictwie podziemnym.

Wyrobiska okonturowujące parcelę pokładu 310 w obrębie georeaktora przewietrzane były wentylacją opływową, wydatki oraz kierunki powietrza w wyrobiskach wentylacyjnie związanych z georeaktorem przedstawiono na uproszczonym schemacie (rys. 2). Aby ograniczyć możliwość powstania strefy niebezpiecznych nagromadzeń gazów wybuchowych w wyrobiskach w przypadku niekontrolowanego ich przedostania się do czynnych wyrobisk z georeaktora lub instalacji odprowadzania gazu zastosowano następujące działania:

- Zaprojektowano lokalizację georeaktora w bliskiej odległości od szybu wentylacyjnego.
- Ograniczono wpływ pola potencjałów aerodynamicznych w czynnych wentylacyjnie wyrobiskach okonturowujących georeaktor poprzez odpowiedni dobór wydatków i kierunków przepływu powietrza.
- Zainstalowano system automatycznej aerometrii górniczej [15], obejmujący czujniki anemometrii i gazometrii automatycznie rozmieszczone wg schematu przedstawionego



Rys. 2. Usytuowanie georeaktora oraz stacji pomiarowych na wycinku uproszczonego schematu przestrzennego na poziomie 30 metrów w KD „Barbara” (opracowano na podstawie [7])

Fig. 2. Location of the georeactor and measurement stations in the section of a simplified spatial scheme at 30 m in the testing mine “Barbara” (elaborated on the basis of [7])

na rysunku 2. System ten pozwolił na prowadzenie bieżącej oceny przewietrzania wyrobisk okonturowujących georeaktor. Rozmieszczenie anemometrów poza wyrobiskami okonturowującymi georeaktor stworzyło możliwość dostępu do kontroli czujników oraz bieżące prowadzenie bilansu wentylacyjnego w wyrobiskach wentylacyjnie związanych z georeaktorem. Rejestracja wskazań czujników odbywała się u dyspozytora kopalni.

- Zainstalowano system poboru prób powietrza do analizy chromatograficznej za pośrednictwem linii węzowych zabudowanych w wyrobiskach w punktach pomiarowych I, II i III, do kontroli chromatograficznej na powierzchni,
- Dodatkowo w bezpośrednim sąsiedztwie wlotu powietrza do szybu wentylacyjnego na poziomie 30 metrów zabudowano czujnik rejestrujący zawartość wodoru. Czujnik ten sterował otwarciem przepustnic w kanale szybu wydechowego zwiększając wydatek powietrza świeżego z powierzchni przez wentylator główny obniżając stężenie wodoru w powietrzu odprowadzanym z poziomu 30 metrów do szybu wentylacyjnego oraz do wentylatora głównego.

Nadmienić należy, że usytuowanie georeaktora w sieci wentylacyjnej oraz układ czynnych wyrobisk związanych z georeaktorem stwarzają możliwość bezpośredniego odprowadzenia gazów procesowych do szybu wentylacyjnego. W warunkach rozszczelnienia górotworu w otoczeniu georeaktora lub awarii rurociągów odprowadzających gaz procesowy na powierzchnię przepustnice zabudowane w kanale wentylatora sterowane czujnikiem rejestrującym zawartość wodoru w szybie wentylacyjnym ograniczają niejako możliwość powstania wybuchu w stacji wentylatorowej na powierzchni.

3. Analiza i ocena sytuacji wentylacyjno-gazowej powstałej w trakcie prowadzenia eksperymentu podziemnego zgazowania

Przeprowadzona analiza i ocena sytuacji wentylacyjno-gazowej zakładała możliwość powstania stanów awaryjnych w czynnych wyrobiskach po rozszczelnieniu georeaktora, w razie uszkodzenia instalacji odbioru gazu procesowego, a także po niekontrolowanym przedostaniu się gazu procesowego do wyrobisk z otoczenia georeaktora. Pozwoliło to również na ocenę możliwości zapalenia lub wybuchu mieszaniny gazów procesowych z powietrzem kopalnianym, a także na identyfikację możliwych inicjatorów takich zdarzeń w warunkach kopalnianych [16].

W okresie eksperymentu PZW *in-situ* realizowanego w KD „Barbara” dokonano analizy prawie 500 próbek gazu procesowego z georeaktora – w trakcie zgazowania węgla oraz w okresie wygaszania generatora zgazowania. Umożliwiło to na monitoring przebiegu procesu oraz wskazanie momentu, w którym doszło do rozszczelnienia georeaktora. Spośród wszystkich próbek objętych analizą w niniejszej publikacji przedstawiono 5 reprezentujących trzy etapy procesu (tabl. 1), tj.:

- uruchomienie procesu zgazowania: próbka „a” gazu procesowego (4. godzina eksperymentu) i próbka „b” gazu procesowego (10. godzina eksperymentu),
- stabilna praca georeaktora: próbka „c” gazu procesowego (4. godzina eksperymentu) i próbka „d” gazu procesowego (97. godzina eksperymentu),
- rozszczelnienie georeaktora po wypaleniu się gazu procesowego: próbka „e” gazu procesowego (147. godzina eksperymentu).

W celu wyznaczenia minimalnej ilości tlenu w gazie procesowym, niezbędnej do zaistnienia wybuchu, przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem zmodyfikowanego wzoru Le Chateliera dla składników palnych zawartych w mieszaninie oraz dla składników palnych przy zawartości gazów niepalnych w mieszaninie ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$) [5, 6, 7, 8]. Dla określenia niebezpieczeństwa wybuchu mieszaniny gazowej – za Pawłowicz [9] – wykorzystano nierówność (1) – pełnienie warunku oznacza przekroczenie granicy alarmowej dla mieszaniny wybuchowej

$$\frac{c_{\text{CH}_4} \%_{\text{vol}}}{5} + \frac{c_{\text{CO}} \%_{\text{vol}}}{13} + \frac{c_{\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_6} \%_{\text{vol}}}{4} \geq 0.6 \quad (1)$$

gdzie:

$c_{\text{CH}_4} \%_{\text{vol}}$, $c_{\text{CO}} \%_{\text{vol}}$, $c_{\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_6} \%_{\text{vol}}$ – procent objętościowy gazu w mieszaninie (z pomiaru), $\%_{\text{vol}}$

Do zaistnienia zjawiska wybuchu niezbędna jest odpowiednia zawartość tlenu w mieszaninie gazowej. Jej minimalną wartość, $C_{\text{O}_2} \%_{\text{vol}}$, w mieszaninie gazów oblicza się z nierówności

$$C_{\text{O}_2} \geq \frac{12c_{\text{CH}_4} \%_{\text{vol}} + 6c_{\text{CO}} \%_{\text{vol}} + 5(c_{\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_6} \%_{\text{vol}})}{c_{\text{CH}_4} \%_{\text{vol}} + c_{\text{CO}} \%_{\text{vol}} + c_{\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_6} \%_{\text{vol}}} \quad (2)$$

Przeprowadzona ocena zagrożenia wybuchowego w próbkach gazu procesowego wykazała, że na początku eksperymentu, tj. w fazie uruchamiania georeaktora zawartość tlenu w gazie procesowym wynosząca 5,79 % była wystarczająca do zaistnienia wybuchu w rurociągu (próbka „a”). Należy jednak zauważyć, że okres uruchamiania (rozpalania) georeaktora charakteryzuje się dosyć intensywnym przebiegiem spalania węgla, co przy wydatku powietrza doprowadzanego do zainicjowania procesu zgazowania, nie spowoduje powstania temperatury o wartości umożliwiającej zapalenie gazu procesowego. Na etapie stabilnej pracy georeaktora, zarówno w samym reaktorze, jak i w rurociągu odprowadzającym produkty zgazowania, nie występowały dla zakładanych średnich stężeń gazów warunki wystarczające do zaistnienia wybuchu (wzór 2). Zawartość tlenu w gazie procesowym była niższa niż wartość wymagana do zaistnienia wybuchu. Należy jednak zauważyć, że sytuacja ta dotyczy mieszaniny gazów odprowadzanych rurociągiem na powierzchnię. Rozszczelnienie rurociągu może spowodować pojawienie się dodatkowego źródła dopływu powietrza kopalnianego zawierającego objętościowo około 20 % tlenu.

Prawdopodobieństwo wystąpienia atmosfery wybuchowej/palnej w stabilnym stanie pracy georeaktora jest bardzo małe, natomiast prawdopodobieństwo wystąpienia efektywnego źródła zapłonu należy uznać za wysokie, z uwagi na wysoką temperaturę gazów procesowych, która zgodnie z założeniami projektowymi wynosi powyżej 600 °C. Jeżeli w trakcie procesu zgazowania nastąpi rozszczelnienie georeaktora i przedostanie się do niego powietrze, wtedy prawdopodobieństwo powstania atmosfery wybuchowej w georeaktorze rośnie, gdyż temperatura gazów wewnątrz georeaktora jest wystarczająca do inicjacji zjawiska zapalenia i wybuchu mieszaniny gazów.

Możliwość powstania wybuchu/zapalenia gazu może także być spowodowana mniejszym wydatkiem gazu procesowego transportowanego rurociągiem na powierzchnię, od wydatku gazu procesowego produkowanego w georeaktorze. Taki stan spowoduje cofnięcie się gazu procesowego w georeaktorze, w kierunku doprowadzonych mediów (powietrze, tlen) przyczyniając się do wzrostu zawartości tlenu. Gaz procesowy po rozmieszczeniu się z doprowadzonym do georeaktora czynnikiem zgazującym spowoduje utworzenie się w georeaktorze pewnej objętości mieszaniny wybuchowej/palnej w bliskiej odległości od miejsca przebiegającego procesu zgazowania. W tej sytuacji inicjacja zapalenia się lub wybuchu mieszaniny gazu procesowego z czynnikiem zgazującym jest temperatura w georeaktorze powyżej temperatury zapłonu.

Istnieje również możliwość zapalenia się i/lub wybuchu gazu w instalacji transportującej gaz procesowy z georeaktora na powierzchnię. Do aktywacji tego scenariusza może dojść po rozszczelnieniu sieci rurociągów, które spowoduje przedostanie się powietrza kopalnianego, podwyższenia zawartości tlenu w gazie procesowym i powstania mieszaniny wybuchowej. Objętościowa ilość tlenu zasilającego gaz procesowy po rozszczelnieniu rurociągu (uzależniona od rozmiarów uszkodzeń) będzie decydowała o spełnieniu warunku opisanego wzorem (2) i o możliwości powstania atmosfery wybuchowej/palnej wewnątrz rurociągu.

Ostatnią z rozpatrywanych możliwych przyczyn zaistnienia zapalenia/wybuchu gazu w trakcie eksperymentu PZW jest rozszczelnienie georeaktora lub amputacja rurociągu powodująca całkowite przerwanie jego ciągłości. Możliwość powstania niebezpiecznych nagromadzeń gazu procesowego w wyrobisku sąsiadującym z georeaktorem może być wynikiem rozszczelnienia obmuru betonowego izolującego georeaktor, co w warunkach nadciśnienia w georeaktorze może spowodować wypływ gazu do wyrobisk okonturowujących

Tabela 1. Wyznaczenie minimalnej zawartości tlenu w mieszaninie gazowej niezbędnej do wybuchu mieszaniny gazów
Table 1. Minimal content of oxygen in the gas mixture necessary for the gas mixture explosion

Rodzaj parametru	próbka „a” % obj.	próbka „b” % obj.	próbka „c” % obj.	próbka „d” % obj.	próbka „e” % obj.	
Skład gazu	CO_2	13,49	14,31	17,14	16,89	16,35
	C_2H_6	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02
	H_2	22,79	38,83	32,95	36,92	4,20
	O_2	5,79	0,80	3,89	2,48	0,48
	N_2	38,88	3,79	17,12	10,31	72,58
	CH_4	2,20	1,51	1,36	1,24	0,90
	CO	17,80	40,54	27,22	31,85	5,46
Wybuchowość mieszaniny gazów produktów zgazowania w rurociągu odprowadzającym gaz procesowy (wzór 1)	7,52	13,14	10,61	11,94	1,66	
Minimalna zawartość tlenu w gazie procesowym niezbędna do zaistnienia wybuchu (wzór 2)	5,77	5,63	5,60	5,58	6,11	

georeaktor. Biorąc pod uwagę wydatek powietrza płynącego wyrobiskami okonturowującymi georeaktor na poziomie $1 \text{ m}^3/\text{s}$, co przy przekroju wyrobiska $5,6 \text{ m}^2$ daje prędkość przepływu powietrza $0,18 \text{ m/s}$, może to przyczynić się do powstania w tym wyrobisku przystropowych wybuchowych nagromadzeń gazu procesowego z powietrzem wentylacyjnym. Prędkość powietrza poniżej $0,3 \text{ m/s}$ w wyrobiskach okonturowujących georeaktor stwarza możliwość powstawania przystropowych nagromadzeń gazów wybuchowych. Ponadto wysoka temperatura gazu procesowego może spowodować mieszanie się gazu procesowego z powietrzem płynącym wyrobiskiem, powodując powstanie określonej objętości mieszaniny wybuchowej.

Jak już wcześniej wspomniano eksperyment podziemnego zgazowania węgla przeprowadzony został w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w 2013 roku. Zgazowanie węgla prowadzone było poprzez podawanie tlenu do kanału OI (rysunek 2). W okresie sześciu dni prowadzenia procesu zgazowania zawartość tlenu w gazie procesowym odprowadzanym z kanału OII mieściła się w przedziale $0,01 \pm 6,62 \%$, co świadczy o nie spełnieniu warunku opisanego wzorem (2) koniecznego do zaistnienia wybuchu/zapalenia gazu w rurociągu odprowadzającym gaz na powierzchnię, poza próbką „a” gazu procesowego, której analiza została omówiona wcześniej. Ponadto w tym czasie w wyrobiskach nie rejestrowano przekroczeń dopuszczalnych progowych stężeń gazów. Zarejestrowane niewielkie zmiany wskazań anemometrów automatycznego pomiaru prędkości powietrza w dniach pierwszym i drugim potwierdziły jedynie fakt przeprowadzonej regulacji rozplwów powietrza płynącego wyrobiskami na poziomie 30 m . W okresie od drugiego do szóstego dnia przebiegu procesu zgazowania, wyrobiska na poziomie 30 m wentylacyjnie związane z georeaktorem były przewietrzane stabilnie.

W okresie od drugiego do szóstego dnia zarejestrowane stężenia tlenu węgla w chodnikach, pod stropem wyrobisk wahały się w przedziale od 100 do 1400 ppm . Wydatek powietrza w ilości $1 \text{ m}^3/\text{s}$ płynącego wyrobiskami okonturowującymi georeaktor przy niewielkiej prędkości powietrza pod stropem wyrobiska był przyczyną powstawania nagromadzeń wybuchowego gazu procesowego migrującego przez nieszczelności otoczenia georeaktora do wyrobisk. Gaz ten zmieszany z powietrzem tworzył wybuchową mieszaninę powietrzno-gazową, dla której inicjałem wybuchu mógł być przemieszczający się z georeaktora płomień palącego się gazu procesowego lub z mniejszym prawdopodobieństwem samozapłon gazu procesowego o temperaturze powyżej $600 \text{ }^\circ\text{C}$ wypływającego przez stwierdzoną podczas penetracji wyrwę w obudowie betonowej.

W czasie przebiegu procesu wykonano 163 analizy chromatograficzne gazu procesowego odprowadzanego rurociągiem na powierzchnię. Wyniki pomiarów składu gazu procesowego wskazywały na występujące zmiany udziału objętościowego poszczególnych jego składników. W szóstym dniu zarejestrowano w kolejnych próbkach sukcesywnie obniżanie się zawartości wodoru w gazie procesowym z $34,34 \%$ do $14,33 \%$ oraz obniżanie się zawartości tlenu węgla z $20,62 \%$ do $11,9 \%$, przy jednoczesnym wzroście zawartości tlenu w gazie procesowym z $1,67 \%$ do $5,68 \%$. Stwierdzona zmiana stężeń gazów, w tym tlenu w gazie procesowym odprowadzanym z georeaktora, mogła świadczyć o powstaniu alternatywnej drogi przepływu czynnika zgazowującego wewnątrz georeaktora, tj. rozszczelnienia georeaktora na obmurzu wyrobiska, w kierunku kanału, z którego odbierany był gaz procesowy. Zmiany w bilansie składu gazu procesowego odprowadzanego na powierzchnię były sygnałem wskazującym na powstanie stanu awaryjnego, tj. rozszczelnienie się georeaktora lub alternatywnie utratę szczelności sieci rurociągów odprowadzających

gaz procesowy. Analiza zarejestrowanych wskazań anemometrii automatycznej podczas prowadzenia przez sześć dni eksperymentu nie wskazała na występowanie zaburzeń w wyrobiskach wentylacyjnie związanych z georeaktorem.

W siódmym dniu wskazania anemometrii automatycznej zarejestrowały zmiany wartości prędkości powietrza na anemometrach AN-1 i AN-9 (rys. 2), które mogły być przyczyną wzrostu ciśnienia powietrza w wyrobiskach. Zarejestrowane wzrosty prędkości powietrza, a następnie powrót do stanu wyjściowego można wiązać z wypaleniem lub wybuchem gazu procesowego w wyrobiskach okonturowujących georeaktor. Skład gazu procesowego oraz zmiany rejestrowane anemometrią automatyczną przyczyniły się do podjęcia decyzji o przerwaniu procesu, tj. podaniu gazu inertnego (azotu). Po 24 godzinach inertyzacji azotem georeaktora w ósmym dniu podjęto decyzję o kontroli wyrobisk dołowych ukierunkowanej na ustalenie przyczyn i okoliczności zmian zarejestrowanych w dniu siódmym. Dla zwiększenia stabilności przewietrzania wyrobisk okonturowujących georeaktor dokonano regulacji na służbie zlokalizowanej w pochylni, w sąsiedztwie szybu wdechowego. Dla przeprowadzenia analizy zaistniałego zdarzenia znaczenie miały wskazania zarejestrowane przez czujniki CO-metrii automatycznej CO-7 i CO-15 (rys. 2). Wzrost stężenia tlenu węgla w powietrzu kopalnianym zarejestrowany przez czujniki w punktach pomiarowych I, II i III (rys. 2), potwierdził migrację gazu procesowego do wyrobisk okonturowujących georeaktor w wyniku rozszczelnienia górotworu w otoczeniu georeaktora.

Uwzględniając powyższe oraz wzrost zawartości tlenu w gazie procesowym w szóstym dniu przebiegu procesu zdecydowano o zatrzymaniu procesu i podaniu azotu do georeaktora. Obniżenie stężenia tlenu węgla w wyrobiskach okonturowujących georeaktor po podaniu azotu było potwierdzeniem szczelinowej migracji gazów pomiędzy georeaktorem a wyrobiskami okonturowującymi georeaktor.

W ósmym dniu przeprowadzono pierwszą kontrolę wyrobisk dołowych. Ze względu na wysokie stężenia tlenu węgla w wyrobisku w bezpośrednim sąsiedztwie georeaktora, niemożliwe było przeprowadzenie kontroli wszystkich wyrobisk okonturowujących georeaktor. Inertyzacja azotem przestrzeni georeaktora powodowała migrację wysokich stężeń tlenu węgla do wyrobisk. Fakt rozszczelnienia górotworu w obrębie georeaktora oraz ciśnienie podawanego azotu były przyczyną wynoszenia produktów pirolizy z georeaktora. W dziewiątym dniu przeprowadzono kolejną kontrolę, która pozwoliła na dokonanie oględzin wyrobisk bezpośrednio związanych z georeaktorem. W obudowie betonowej w ociosie wyrobiska stwierdzono pęknięcie w obmurzu oraz otwór o średnicy $0,2 \text{ m}$ w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca podawania mediów do georeaktora. Otwór ten umożliwił niepożądaną migrację gazu procesowego z georeaktora do wyrobisk oraz mieszanie się gazu procesowego z powietrzem wentylacyjnym.

Zaburzone prędkości przepływu powietrza w wyrobiskach wentylacyjnie związanych z georeaktorem rejestrowane anemometrią automatyczną AN-1 i AN-9 (rys. 2) były konsekwencją wypaleń gazu procesowego pod stropem w bezpośrednim sąsiedztwie otworu w obmurzu betonowym wyrobiska okonturowującego georeaktor.

Dla określenia przyczyn rozszczelnienia się georeaktora, po całkowitym jego wychłodzeniu azotem oraz obniżeniu temperatury otoczenia georeaktora do temperatury pierwotnej górotworu podjęto decyzję o udostępnieniu wnętrza georeaktora wykonanym wyrobiskiem. Wykonane wyrobisko na wysokości kanału OI pozwoliło stwierdzić, iż proces zgazowania przebiegał w sąsiedztwie tego kanału od miejsca zapalenia węgla z pokładu 310 w kierunku ociosu wyrobiska okonturowującego georeaktor (rys. 3). Rozszczelnienie betonowej

komory łączącej kanał OI z rurociągiem, którym podawany był tlen, było wynikiem przybliżenia się strefy procesu zgazowania do obudowy betonowej wyrobiska (cofanie się procesu w kierunku rurociągu z czynnikiem zgazowującym), a następnie jej rozszczelnienia pod wpływem wysokiej temperatury. Taki kierunek zgazowania był wynikiem podawania do georeaktora tylko tlenu jako medium zgazowującego. Kierunek zgazowania tlenem był inny niż kierunek zgazowania pokładu powietrzem w 2010 roku.



Rys. 3. Widok ociosu wyrobiska okonturowującego reaktor wraz z wlotem do kanału OI, po zatrzymaniu procesu zgazowania i wychłodzeniu reaktora

Fig. 3. View of the side of work surrounding the reactor along with the inlet to OI channel after stopping the coal gasification process and cooling of the reactor

4. Podsumowanie

Projektowanie procesu podziemnego zgazowania węgla metodą szybową wymaga spełnienia kryteriów dotyczących prawidłowej lokalizacji georeaktora, w tym jego przestrzennego usytuowania w złożu węglowym i w sieci wentylacyjnej kopalni, a także zapewnienia stabilnej pracy georeaktora poprzez możliwość pełnego sterowania procesem. W trakcie prowadzenia procesu niezbędny jest prawidłowy monitoring parametrów podziemnego zgazowania węgla w wyrobiskach oraz utrzymanie właściwego składu gazu procesowego. Kontrola tych parametrów pozwala na szybkie reagowanie w razie powstania stanów awaryjnych, takich jak np. opisane w niniejszym artykule rozszczelnienie georeaktora.

Kluczowym zagadnieniem dla bezpiecznego prowadzenia procesu PZW jest dokładna i rzetelna analiza oraz ocena zagrożeń mogących wystąpić w poszczególnych etapach realizacji procesu, pozwalająca na opracowanie instrukcji postępowania na wypadek wystąpienia awarii lub stanu krytycznego.

Literatura:

1. *Dziunikowski, K.*: Eksploatacja węgla kamiennego sposobem podziemnego zgazowania. In M. Borecki & W. Strzeszowski (Eds.), *Systemy eksploatacji węgla kamiennego. Monografia polskiego górnictwa węglowego*. 1968 (pp. 534÷547). Katowice: Śląsk. Główny Instytut Górnictwa.
2. *Janoszek, T., Sygala, A., & Bukowska, M.*: CFD simulation of temperature variation in carboniferous rock strata during UCG. *Journal of Sustainable Mining*, 12(4), 34÷44. doi:10.7424/jsm130406 2013.
3. *Kapusta, K., & Stańczyk, K.*: Development conditions and limitations of the underground coal gasification in Poland. *Chemical Review*, 88/4, 2009 331÷338.
4. *Klimenko, A. Y.*: Early ideas in underground coal gasification and their evolution. *Energies*, 2(2), 456÷476 2009.
5. *Kondo, S., Takizawa, K., Takahashi, A., & Tokuhashi, K.*: Extended Le Chatelier's formula and nitrogen dilution effect on the flammability limits. *Fire Safety Journal*, 41(5), 406-417. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.03.002 2006a
6. *Kondo, S., Takizawa, K., Takahashi, A., & Tokuhashi, K.*: Extended Le Chatelier's formula for carbon dioxide dilution effect on flammability limits. *Journal of Hazardous Materials*, 138(1), 1-8. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.035 2006b
7. *Krause E., Krzemień A., Smoliński A.*: Analysis and assessment of a critical event during an underground coal gasification experiment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33(0), 173÷182. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2014.12.2014, 2015.
8. *Le Chatelier, H., & Boudouard, O.*: On the flammable limits of gas mixtures. *Process Safety Progress*, 24(1), 3-5. doi: 10.1002/prs.10062 2005
9. *Pawłowicz, D., & Czechowicz, J.*: Metody określania wybuchowości gazów i czasu trwania pożaru we francuskich kopalniach gazowych. *Wiadomości górnicze*, 5, 147÷151 1968.
10. *Rauk, J.*: Optymalne wymiary generatora przy podziemnym zgazowaniu węgla powietrzem *Prace GIG Komunikat Nr 660* 1976.
11. *Siemens, C. W.*: XXXIII.-On the regenerative gas furnace as applied to the manufacture of cast steel. [10.1039/JS8682100279]. *Journal of the Chemical Society*, 21(0), 279÷310. doi: 10.1039/js8682100279 1868.
12. *Smoliński A., Stańczyk K., Kapusta K., Howaniec N.*: UCG process induced water contamination – chemometric study of the ex-situ UCG wastewater experimental data, *Water, Air & Soil Pollution*, Volume 223, Issue 9, Page 5745÷5758 2012.
13. *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*, 13(2), 423÷433 2010.
14. *Stańczyk K., Kapusta K., Wiatowski M., Świądrowski J., Smoliński A., Rogut J.*: Experimental simulation of hard coal underground gasification for hydrogen production, *Fuel*, 91, 40÷50 2012.
15. *Trenczek S.*: Automatyczna aerometria górnicza dla kontroli zagrożeń aerologicznych. *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, nr 3, 2005 s. 11÷20.
16. *Trenczek S.*: Inicjaly zapłonu metanu w aspekcie poziomu zagrożenia metanowego. *Przeгляд Górnicy* 2007, nr 3, 2007 s. 39÷44.
17. *Wiatowski, M., Stańczyk, K., Świądrowski, J., Kapusta, K., Cybulski, K., Krause, E., Smoliński, A.*: Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine "Barbara". *Fuel*, 99, 170÷179 2012.