



Pomiary temperatury w procesie podziemnego zgazowania węgla

Temperature measurements in the underground coal gasification process

Mgr inż. Ewa Lisiecka *)

Treść: Proces podziemnego zgazowania węgla (PZW), pozwala na pozyskanie gazu o własnościach użytkowych bezpośrednio w złożu węglowym, *in situ*. Istotnym czynnikiem wpływającym na skład i kaloryczność otrzymanego gazu są warunki termodynamiczne panujące w georeaktorze, w tym temperatura. Kontrola i sterowanie warunkami temperaturowymi, w jakich przebiega proces pozwolą na uzyskanie gazu procesowego o pożądanych własnościach użytkowych, dla konkretnych zastosowań i przyczynią się do wykorzystania procesu PZW na skalę przemysłową. W związku z tym, na całym świecie, prowadzone są prace badawcze nad rozwojem urządzeń i metod pomiaru temperatury w georeaktorze. W niniejszym artykule przedstawiono efekty badań literaturowych, dotyczących monitoringu temperatury w procesie PZW, pokrótce opisano dotychczas wykorzystywane przyrządy i metody pomiarowe, takie jak: pirometry optyczne, termopary, światłowodowe czujniki rozłożone, termometrię izotopową, wyznaczanie temperatury na podstawie określania stopnia pęcznienia skały stropowej, pomiaru koncentracji radonu oraz symulacji komputerowej. Detekcja temperatury realizowana była w reaktorach *in situ* (w warunkach naturalnego pokładu węglowego) oraz *ex situ* (w reaktorach powierzchniowych symulujących pokład węglowy). Wykonany przegląd literaturowy stanowi punkt wyjścia dla opracowania, autorskiej metody i urządzenia do pomiaru temperatury w procesie PZW.

Abstract: The underground coal gasification process (UCG) is used to obtain a gaseous product of functional properties directly from the coal deposit *in situ*. The main parameter that affects the gas composition and heat value are thermodynamic conditions in the georeactor, for instance the temperature. Operation and control of temperature conditions, in which the process is performed, allow to obtain the process gas with the desired properties for specific application. Thus, it will be possible to use this process on an industrial scale. Therefore, all over the world, there is a need for the development of novel methods and equipment for detecting temperature in the UCG process. This paper presents the effect of a review of various methods and equipment applied for temperature measurements in the georeactor through different research. It shows a brief description of devices and methods of measurements, such as: optical pyrometers, thermocouples, distributed optical fiber temperature sensors, isotope thermometry, determination of temperature based on the degree of caprock swelling, radon concentration measurement or computer simulation. Furthermore, temperature detection was carried out *in situ* (in natural coal seam) and *ex situ* (in reactor which simulates natural coal seam) reactors. This review of literature is a starting point to develop the author's method and device for measuring the temperature in the UCG process.

Słowa kluczowe:

podziemne zgazowanie węgla, pomiary temperatury, temperatura w georeaktorze

Key words:

underground coal gasification, temperature measurements, temperature in the georeactor

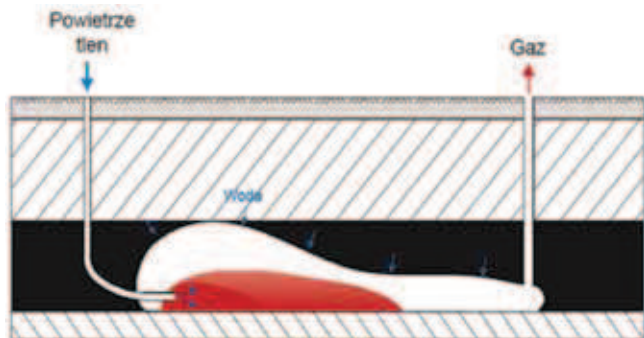
1. Wprowadzenie

Podziemne zgazowanie węgla (PZW), jest obecnie rozpatrywane jako alternatywny sposób pozyskiwania energii z węgla, w stosunku do tradycyjnych technik górniczych. Proces ten pozwoli na eksploatację pokładów resztkowych, pozabilansowych lub tych, których wydobywanie w sposób konwencjonalny jest nieopłacalne ekonomicznie lub niewykonalne, ze względów bezpieczeństwa prowadzenia prac górniczych. W połączeniu z technologią CCS (*Carbon Capture and Storage*), pozwoli także na ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery [6].

Proces PZW polega na konwersji węgla do gazu o własnościach użytkowych, bezpośrednio w złożu, *in situ* (rys. 1). Otworem zasilającym do zapalonego pokładu doprowadzany jest czynnik zgazowujący, najczęściej powietrze, tlen, para wodna, dwutlenek węgla lub ich mieszanin. Produktem zachodzących w pokładzie egzotermicznych i endotermicznych reakcji chemicznych jest gaz procesowy, którego główne składniki, to: tlenek i dwutlenek węgla, wodór, metan, a także w zależności od stosowanego czynnika zgazowującego, para wodna, tlen i azot. W procesie powstają także produkty uboczne: koks, żużel, popiół oraz substancje smoliste [19, 22]. Uzyskany gaz generatorowy otworem odprowadzającym jest transportowany na powierzchnię, gdzie może zostać wykorzystany do produkcji energii elektrycznej, ciepła, wodoru (dla energetyki) lub surowców dla przemysłu chemicznego

*) Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie w zakresie Czystych Technologii Węglowych, Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

(synteza amoniaku, metanolu, paliwa płynne, SNG – *substitute natural gas*). Skład i wartość opałowa gazu procesowego zależą od czynników geologicznych pokładu, jakości węgla w złożu i zastosowanej technologii zgazowania [17], w tym także od warunków termodynamicznych w jakich przebiega proces. Kontrola i sterowanie parametrami procesu PZW pozwolą na otrzymanie gazu o pożądanych właściwościach, poprawią bezpieczeństwo i ograniczą niekorzystne oddziaływanie procesu na środowisko.



Rys. 1. Schemat podziemnego zgazowania węgla [17]
Fig. 1. Scheme of underground coal gasification [17]

Wyróżnić można dwa sposoby przygotowania reaktora podziemnego zgazowania węgla: szybowy i bezszybowy. W sposobie szybowym wykorzystywana jest już istniejąca infrastruktura górnicza, a czynnik zagazowujący i produkty procesu dostarczane są do zgazowywanego złoża chodnikami i szybami kopalnianymi. W metodzie bezszybowej, wykorzystuje się technologię wiercen kierunkowych CRIP (*continuous retraction injection point*), w celu udostępnienia pokładu dla transportu czynnika zgazowującego i produktów procesu. Sposób przygotowania georeaktora warunkuje jego dostępność dla rozmieszczenia w nim lub w jego otoczeniu czujników pomiarowych, a także determinuje możliwość prowadzenia prac badawczych w trakcie i po zakończeniu procesu.

2. Pomiar temperatury w procesie PZW

Z chemicznego i termodynamicznego punktu widzenia proces podziemnego zgazowania węgla przebiega analogicznie do zgazowania w reaktorach naziemnych. Termodynamika zachodzących w procesie reakcji chemicznych i równowaga między endotermicznymi i egzotermicznymi reakcjami, warunkują wydajność i efektywność wytwarzania gazu procesowego, jego kaloryczność i skład oraz ilość produkowanych substancji smolistych i stopień konwersji węgla. Kluczowym parametrem warunkującym przebieg reakcji chemicznych w procesie PZW jest temperatura [2, 11, 17, 21]. Pomiar temperatury *in situ* umożliwi wnioskowanie o przebiegających pod powierzchnią zjawisk fizykochemicznych, kontrolę i sterowanie procesem oraz walidację istniejących modeli matematycznych, dotyczących rozkładu temperatury w georeaktorze.

Przeprowadzone badania literaturowe, wykazały, że konieczne są prace nad rozwojem, szeroko rozumianego, monitoringu procesu PZW, w tym także systemów detekcyjnych, umożliwiających pomiary temperatury. Dużym problemem przy projektowaniu systemu kontrolno-pomiarowego, stanowi dobór odpowiednich czujników i metod pomiarowych. Związane jest to ze szczególnym, trudnym środowiskiem pomiarowym: zamknięta przestrzeń reaktora pod ziemią, wysoka temperatura procesu do około 2000 °C, pomiary prowadzone w sposób ciągły przez długi okres czasu,

w obecności atmosfery gazowej, w tym gazów palnych oraz ubocznych produktów zgazowania podziemnego.

Odpowiedni dobór czujników, dostosowanych do warunków, w jakich prowadzony jest proces, pozwoli na jego monitoring i umożliwi, wytwarzanie gazu o pożądanych właściwościach użytkowych.

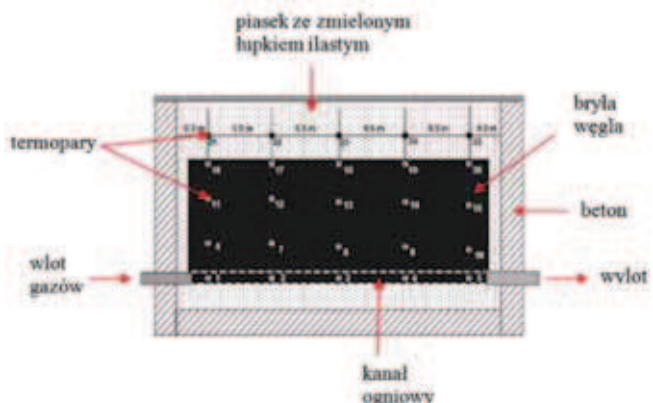
Dotychczasowe dane dotyczące warunków temperatury panujących w reaktorze podziemnego zgazowania węgla, pochodzą z wcześniejszych eksperymentów przeprowadzanych w skali laboratoryjnej, reaktorach *ex situ*, doświadczalnych i pilotażowych próbach PZW oraz z symulacji komputerowych procesu.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono dotychczas stosowane metody pomiaru temperatury procesu zgazowania węgla w reaktorze podziemnym.

2.1. Pomiary w reaktorze *ex situ*

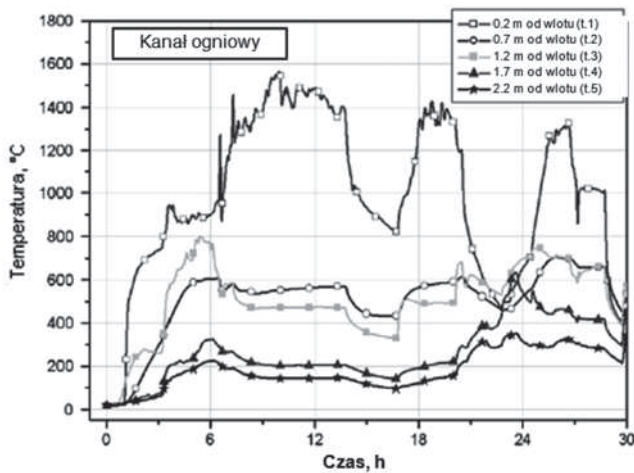
Reaktor *ex situ* pozwala na symulację procesu zgazowania węgla w warunkach zbliżonych do naturalnie występujących w złożu węglowym. Możliwe jest prowadzenie procesu w caliznie węglowej i odtworzenie warunków skalnych w otoczeniu złoża. Budowa reaktora umożliwia pomiar rozkładu temperatury w kanale ogniowym, jak również, w różnej odległości od niego, za pomocą termopar (rys. 2). Termopary są stykowymi przyrządami pomiarowymi mierzącymi temperaturę bezpośrednio w miejscu kontaktu spoiny pomiarowej z ośrodkiem badanym. Wymiana ciepła, w tym przypadku, zachodzi na skutek przewodnictwa i konwekcji. Zasada działania tych przyrządów termometrycznych polega na przepływie prądu elektrycznego w zamkniętym obwodzie składającym się z dwóch różnych metali, pod warunkiem, że miejsca ich styku znajdują się w różnych temperaturach. Jedna ze spoin stanowi spoinę pomiarową, a druga spoinę odniesienia, która utrzymywana jest w stałej temperaturze. Wytworzony sygnał prądowy jest proporcjonalny do różnicy temperatury między złączami. W zależności od zakresu temperatury spoiny pomiarowe wykonywane są z różnych metali oraz umieszczane w osłonach dostosowanych do warunków, w jakich przebiega pomiar [14].

Doświadczenia w reaktorze *ex situ* prowadzone były w wielu ośrodkach badawczych, w tym również w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach [10, 20, 26]. W prowadzonych doświadczeniach nad zgazowaniem węgla kamiennego w reaktorze *ex situ* Stańczyk i inni [20] uzyskali wartości temperatury w kanale ogniowym i w różnej odległości od niego (rys. 3). Maksymalna temperatura procesu według uzyskanych danych pomiarowych nie przekraczała 1500 °C.



Rys. 2. Rozmieszczenie termopar w reaktorze *ex situ* podczas zgazowania węgla kamiennego [20]

Fig. 2. Arrangement of thermocouples in *ex situ* reactor during gasification of hard coal [20]

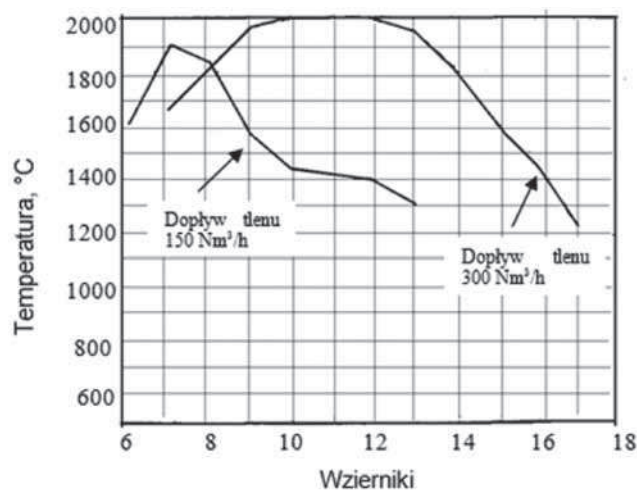


Rys. 3. Temperatura w kanale ogniowym podczas zgazowania węgla kamiennego w reaktorze *ex situ* [20]

Fig. 3. Temperature in the flue during gasification of hard coal in the *ex situ* reactor [20]

Innym sposobem pomiaru temperatury w reaktorze *ex situ* było wykorzystanie pirometru optycznego, który zaliczany jest do bezstykowych urządzeń pomiarowych. Temperatura wyznaczana jest w oparciu o pomiar mocy promieniowania emitowanego przez źródło, która jest funkcją temperatury [14]. Pomiaru mogą być realizowane, w tym przypadku na odległość, bez konieczności umieszczenia czujników pomiarowych wewnątrz reaktora. Konieczne jest natomiast, zapewnienie możliwości obserwacji procesu przez układ optyczny pirometru.

Aby możliwa była detekcja warunków temperaturowych bezkontaktowo, zbudowano gazogenerator, który zaopatrzony był we wzierniki, służące m.in. do pomiaru temperatury za pomocą pirometru optycznego, w różnych punktach reaktora [7]. Uzyskane tym sposobem dane pomiarowe, wskazują, że temperatura w kanale ogniowym może dochodzić do 2000 °C, w zależności od szybkości podawania tlenu (rys. 4).



Rys. 4. Temperatura rejestrowana przez pirometr w reaktorze *ex situ* podczas zgazowania węgla kamiennego dla dwóch prędkości podawania tlenu [7]

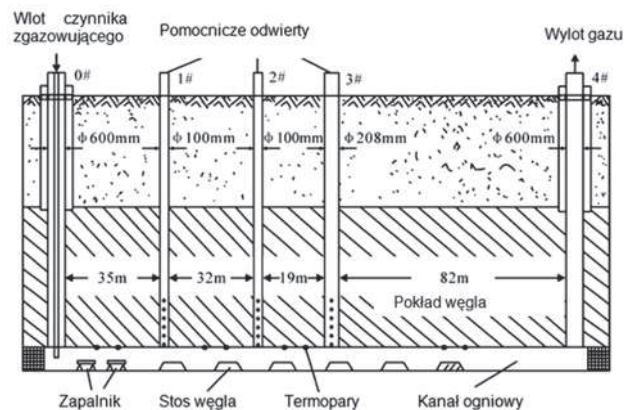
Fig. 4. Temperature measured by the pyrometer in the *ex situ* reactor during hard coal gasification for two oxygen feed rates [7]

2.2. Pomiary w reaktorze *in situ*

Reaktor *in situ* stanowi naturalny pokład węglowy z doprowadzonym do niego czynnikiem zgazowującym oraz możliwością odprowadzenia gazu procesowego. Jego budowa w dużej mierze zależna jest od naturalnych warunków geologicznych złoża. Umieszczenie czujników termometrycznych w jego wnętrzu, a więc i pomiar temperatury jest zatem ograniczony. Jednakże, w trakcie dotychczasowych eksperymentów nad procesem PZW, podjęto próby określenia temperatury procesu za pomocą różnych metod.

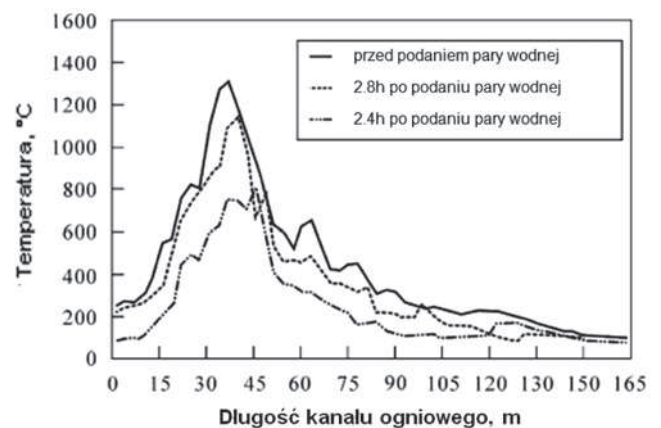
2.2.1. Termopary

Jak wspomniano w rozdziale 3.1 termopary są stykowymi przyrządami termometrycznymi, za ich pomocą temperatura mierzona jest punktowo, w miejscu, w którym umieszczony został czujnik. Przyrządy te stosowane były w wielu próbach PZW [1, 3, 5, 8, 16, 28]. W celu wykonania pomiarów we wnętrzu reaktora, przygotowywane były specjalne odwierty sięgające zgazowywanego pokładu. W odwiertach tych umieszczano na różnej głębokości termopary (rys. 5), dzięki czemu możliwe było określenie rozkładu temperatury w poszczególnych warstwach skalnych nad zgazowywanym pokładem i w kanale ogniowym. Liczba punktów pomiarowych w kanale ogniowym zależna była od liczby wykonanych odwiertów.



Rys. 5. Rozmieszczenie termopar w reaktorze *in situ* [28]

Fig. 5. Arrangement of thermocouples in the *in situ* reactor [28]



Rys. 6. Temperatura w kanale ogniowym 64 dni po podpaleniu pokładu [28]

Fig. 6. Temperature in the flue 64 days after ignition [28]

W próbie podziemnego zgazowania węgla przeprowadzonej przez Yang i inni [28], maksymalna temperatura procesu wynosiła około 1400 °C (rys. 6). Czynnikiem zgazowującym w procesie było powietrze i para wodna.

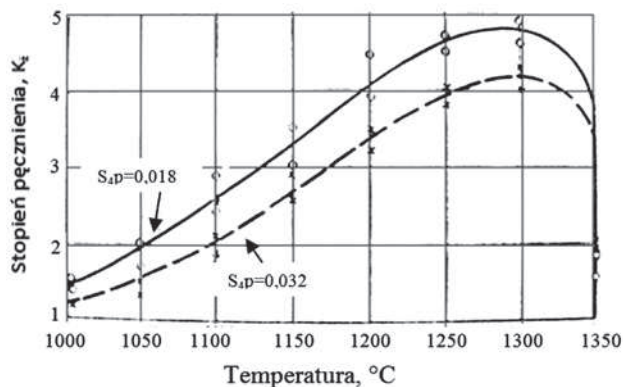
Stosowane czujniki miały zasadniczą wadę, ulegały przepaleniu w wyniku długotrwałego oddziaływania na nie wysokiej temperatury, co powodowało brak możliwości prowadzenia dalszych pomiarów [1]. Ich wskazania mogły być również błędne na skutek dryftu charakterystyki kalibracyjnej termopary lub zakłóceń wymiany ciepła między ośrodkiem a złączem pomiarowym termopary, które spowodowane były reakcjami chemicznymi zachodzącymi na powierzchni osłony i w materiałach złącza.

2.2.2. Pomiary z wykorzystaniem stopnia pęcznienia skały stropowej

Inną metodę określenia temperatury w georeaktorze opracował Rauk [18]. Pod wpływem oddziaływania na skały spągowe i stropowe wysokiej temperatury i atmosfery gazowej, ulegają one odkształceniom mechanicznym oraz zmieniają swoje własności fizykochemiczne, takie jak: barwa, odparowanie wody, odgazowanie, pęcznienie i topienie się, aż do momentu powstania litego szkła. Główną ideą metody pomiarowej było określenie temperatury w reaktorze podziemnego zgazowania węgla, na podstawie stopnia pęcznienia skał stropowych, czyli zmiany stosunku objętości skały spęczniałej, do objętości pierwotnej. Metoda ta wymaga udostępnienia pokładu, w którym prowadzony był proces, za pomocą prac górniczych, w celu pobrania próbek ze skał otaczających georeaktor. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych wyznaczono stopień pęcznienia skały w funkcji temperatury dla łupku ilastego (rys. 7), a następnie na podstawie badań stopnia pęcznienia skał, których próbki pobrano z georeaktora po zakończeniu procesu zgazowania, określono temperaturę panującą w miejscu poboru próbek. Górny zakres mierzonej temperatury, w tej metodzie, wynosił około 1300 °C, powyżej tej wartości łupki ulega topieniu i kończy się faza pęcznienia skały, a więc wyznaczenie wyższych temperatur tą metodą jest niemożliwe.

Wykorzystując opracowaną metodę, przeanalizowano próbki pochodzące z 6 georeaktorów i określono temperaturę procesu. Temperatura ta wynosiła od 1050 °C do 1250 °C¹.

Analiza stopnia pęcznienia skały stropowej pozwala na określenie rozkładu temperatury wzdłuż kanału ogniowego, po zakończeniu procesu. W tym przypadku nie ma możliwości wykonywania pomiarów *in situ*.



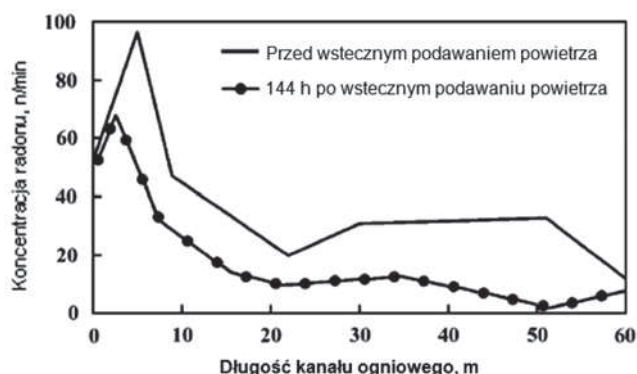
Rys. 7. Stopień pęcznienia skały stropowej pod obciążeniem² [18]
Fig. 7. Caprock swelling under load [18]

¹ Próbki pochodziły z różnych odległości od początku kanału generatorowego.

² Badania prowadzone były na pięciu seriach próbek, z obciążeniem i bez. Seria 4 (S4)

2.2.3. Pomiary z wykorzystaniem radioaktywnego radonu

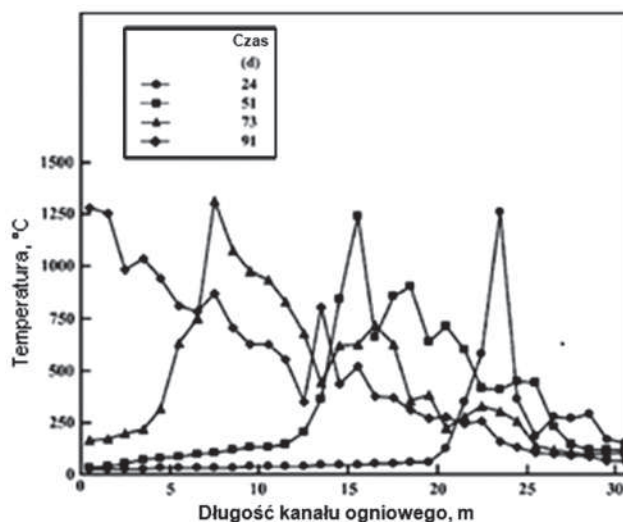
Radon ²²²Rn jest naturalnym izotopem promieniotwórczym występującym w skorupie ziemskiej. Jego ekshalacja z gruntu jest zależna od wielu czynników, w tym także od temperatury. Koncentracja radonu na powierzchni jest odzwierciedleniem warunków temperaturowych panujących pod powierzchnią. Wraz ze wzrostem temperatury współczynnik emanacji³, a tym samym ekshalacji⁴, rośnie. Pomiary temperatury w procesie PZW, w oparciu o pomiar koncentracji radonu ²²²Rn, na powierzchni, wzdłuż kanału ogniowego (rys. 8), prowadzone były głównie w eksperymentach w Chinach [25, 27, 28].



Rys. 8. Koncentracja radonu ²²²Rn wzdłuż kanału ogniowego [28]
Fig. 8. Concentration of radon ²²²Rn along the flue [28]

Szybkość migracji radonu w skorupie ziemskiej zależy od rodzaju skał, a jego detekcja, na powierzchni, uzależniona jest od czasu potrzebnego na migrację radonu z głębszych warstw skalnych na powierzchnię. Jego maksimum koncentracji, na powierzchni, jest więc przesunięte w czasie, w stosunku do maksymalnej temperatury pod powierzchnią.

Stosując technikę pomiaru temperatury z wykorzystaniem radioaktywnego radonu, autorzy publikacji [27] otrzymali rozkład temperatury wzdłuż kanału ogniowego (rys. 9). Maksymalna temperatura procesu wynosiła ok. 1300 °C.



Rys. 9. Temperatura w kanale ogniowym w różnych dniach prowadzenia procesu [27]

Fig. 9. Temperature in the flue on different days of the process [27]

³ emanacja – uwalnianie się atomów radonu z ziaren gleby, czy skał do przestrzeni międzyziarnowej.

⁴ ekshalacja – proces wydostawania się radonu z gruntu lub innych ośrodków do atmosfery.

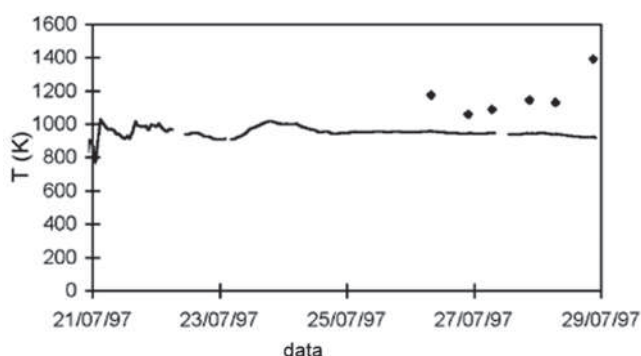
2.2.4. Termometria izotopowa

Inny sposób określania temperatury w georeaktorze opracowali naukowcy z Belgii i Francji [4]. Ilość odmian izotopowych pierwiastkowego węgla w cząsteczkach różnych związków chemicznych może ulegać zmianie pod wpływem zachodzących zjawisk i procesów fizykochemicznych. Na podstawie zmiany stosunku stabilnych izotopów węgla ¹³C i ¹²C w tlenku i dwutlenku węgla, wchodzących w skład gazu procesowego, pod wpływem zachodzących reakcji chemicznych, w których te związki biorą udział oraz przy założeniu równowagowych warunków termodynamicznych wyznaczano temperaturę procesu PZW. Zdefiniowano współczynnik frakcjonowania izotopowego $\epsilon_{ij}(T)$, który dla ciśnienia poniżej 1 GPa, jest funkcją tylko temperatury

$$\epsilon_{ij}(T) = \delta_i - \delta_j \tag{1}$$

gdzie δ_{ij} odnoszą się do wymiany izotopów tego samego pierwiastka między dwoma molekułami ij . Delta izotopowa jest wprost proporcjonalna do koncentracji izotopu i może być użyta zamiast absolutnej koncentracji w bilansie izotopowym. Pomiar ilości danego izotopu w związku chemicznym realizowane były za pomocą spektrometru mas. Aby możliwe było wyznaczenie temperatury na podstawie wzoru 1, konieczna jest także weryfikacja bilansu masy i izotopowego bilansu masy w każdej strefie reaktora i w reaktorze jako całości. Wyznaczenie temperatury w powyższy sposób możliwe jest przy założeniu, że rozmieszczenie izotopów w związkach chemicznych podlega statystycznym prawom termodynamiki i zaniedbywane są stany poza stanem równowagowym. Konieczne są również założenia dotyczące układu stref w reaktorze i charakteru reakcji w nich zachodzących, tak aby możliwe było stworzenie modelu termodynamicznego opisującego zachodzące procesy.

Autorzy pracy [4] wyznaczyli temperaturę procesu PZW w oparciu o budowę modeli reakcji chemicznych zachodzących w georeaktorze i termometrię izotopową (rys. 10). Uzyskane wartości temperatury procesu różnią się, co spowodowane jest przyjętymi uproszczeniami i założeniami modeli. Temperatura procesu wyznaczona na podstawie modelu reakcji chemicznych, wynosi około 1000 K, około 700 °C, natomiast na podstawie termometrii izotopowej, maksymalna temperatura dochodziła do 1400 K, około 1100 °C.



Rys. 10. Temperatura procesu PZW, (-) – na podstawie modelu reakcji chemicznych, (♦) – na podstawie termometrii izotopowej [4]

Fig. 10. Temperature of the UCG process, (-) – based on chemical reaction model, (♦) – based on isotope thermometry [4]

2.2.5. Światłowodowe czujniki rozłożone

Autorzy artykułu [23], proponują zastosowanie światłowodowego czujnika rozłożonego do detekcji temperatury (DTS

– *distributed optical fiber temperature sensor*) w procesie PZW. Czujniki te wykorzystują w swoim działaniu zjawisko rozpraszania Ramana, które polega na zmianie częstotliwości promieniowania wzbudzającego w wyniku nieelastycznego oddziaływania padającego fotonu z cząsteczkami materiału światłowodu. W widmie promieniowania rozproszonego pojawiają się fotony o częstotliwości mniejszej (rozpraszanie Ramana pasmo stokesowskie), większej (rozpraszanie Ramana pasmo antystokesowskie) i takiej samej (rozpraszanie Rayleigha), jak częstotliwość promieniowania wzbudzającego. W czujnikach tych rejestrowany jest stosunek natężenia promieniowania wstecznego rozpraszania – natężenia promieniowania pasma stokesowego i antystokesowego. Temperatura wyznaczana jest z zależności

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \left[\ln \left(\frac{\Phi_a(T)/\Phi_s(T)}{\Phi_a(T_0)/\Phi_s(T_0)} \right) \right] \tag{2}$$

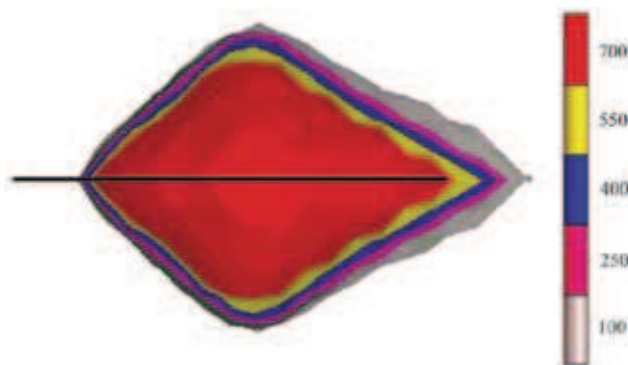
gdzie:

- $\Phi_a(T)$ – strumień fotonów pasma antystokesowego, fotony/s,
- $\Phi_s(T)$ – strumień fotonów pasma stokerowego, fotony/s,
- h – stała Plancka, J·s,
- k – stała Boltzmannna, J/K,
- $\Delta\nu$ – zmiana częstotliwości w stosunku do promieniowania wzbudzającego, Hz.

Jako układ detekcyjny, wykorzystano optyczny reflektometr w dziedzinie czasu OTDR (ang. *Optical Time-Domain Reflectometry*), który pozwala na wyznaczenie odległości, w której nastąpił wzrost temperatury. Metoda ta umożliwia zatem wyznaczenie rozkładu przestrzennego wielkości mierzonej, w czasie rzeczywistym i w sposób ciągły, a przetwarzanie wielkości mierzonej ma miejsce na całej długości światłowodu, w którym nie tylko propagowana jest fala świetlna, ale stanowi on także, ośrodek detekcyjny [9]. Problemem dla tego rodzaju czujników jest odporność termiczna materiałów na osłony, włókna światłowodowe muszą zostać umieszczone bezpośrednio w strefie oddziaływania wysokiej temperatury. W literaturze brak jest danych na temat wartości temperatury procesu PZW uzyskanych tą metodą.

2.2.6 Symulacje komputerowe

Eksperymenty procesu PZW są czasochłonne i kosztowne, dlatego wykorzystując dane pomiarowe z wcześniej przeprowadzonych doświadczalnych prób procesu, zarówno w skali laboratoryjnej, jak i pilotażowej, opracowywane są modele matematyczne zjawisk fizykochemicznych zachodzących pod powierzchnią, w tym rozkładu temperatury w georeaktorze. Przygotowane modele stanowią podstawę symulacji kompu-



Rys. 11. Temperatura w kawernie w trakcie procesu podziemnego zgazowania węgla, efekt symulacji [15]

Fig. 11. Temperature in the cavity during the UCG process, simulation effect [15]

terowych procesu, które pozwalają w przybliżonym stopniu analizować proces, przewidzieć jego przebieg i wykonalność w danych warunkach hydro-geologicznych złoża węglowego, sposób budowy instalacji i georeaktora, a także skład chemiczny i wartość opałową gazu procesowego przy założonych parametrach wejściowych [12, 13, 15, 24]. Wyznaczony w ten sposób rozkład temperatury (rys. 11) odnosi się do konkretnie przyjętych założeń oraz parametrów modelu. Każde odstępstwo od nich, może powodować niezgodność modelu z rzeczywistym charakterem zachodzących zjawisk, a tym samym błędne wyniki symulacji.

3. Podsumowanie

W artykule wskazano temperaturę, jako jeden z kluczowych parametrów procesu podziemnego zgazowania węgla, który determinuje skład i kaloryczność otrzymanego gazu procesowego, dokonano przeglądu dotychczas stosowanych metod i urządzeń pomiarowych dedykowanych pomiarom temperatury w georeaktorze oraz zaprezentowano uzyskane tymi sposobami wyniki pomiarów. Różnorodność stosowanej aparatury pomiarowej świadczy o ciągłym poszukiwaniu i konieczności opracowania nowych metod i urządzeń, które spełnią wymogi procesu PZW i umożliwią kontrolę temperatury procesu, w sposób ciągły i w czasie rzeczywistym. Wszystkie stosowane do tej pory metody, posiadają wady, które w różnym stopniu wpływają na wyniki uzyskanych pomiarów, wśród nich wyróżnić należy: przepalanie się termopar, brak możliwości prowadzenia pomiarów *in situ*, ograniczony dostęp do wnętrza reaktora, trudności w weryfikacji teoretycznych modeli opisujących zjawiska termodynamiczne i reakcje chemiczne zachodzące w georeaktorze, niewystarczająca odporność materiałów, z których wykonano elementy urządzenia, na działanie wysokiej temperatury. Na podstawie wykonanego przeglądu literaturowego stwierdzono, że system detekcji temperatury w procesie PZW powinien:

- umożliwiać pomiary temperatury do 2000 °C – taka była najwyższa temperatura wskazana przez pirometr,
- rejestrować dane pomiarowe z zamkniętej przestrzeni georeaktora,
- wykazywać odporność urządzenia lub jego elementów na oddziaływanie wysokiej temperatury i atmosfery utleniającej i/lub redukcyjnej, w tym na obecność gazów palnych,
- pracować w sposób ciągły, *in situ*, przez długi czas,
- w warunkach kopalnianych, spełniać wymagania stawiane urządzeniom iskrobezpiecznym.

Przegląd stosowanych do tej pory metod detekcji temperatury w georeaktorze, stanowi punkt wyjścia do opracowania autorskiej metody i urządzenia do pomiaru temperatury spełniającego wymagania procesu PZW.

Literatura

1. *Aiman W.R. i inni*: The Hoe Creek II field experiment on underground coal gasification preliminary results, DOE Report, No. UCRL-80592; CONF-780417-8, U.S. 1978.
2. *Bhutto A. W., Bazmi A. A., Zahedi G.*: Underground coal gasification: From fundamentals to applications. Progress in Energy and Combustion Science 2013, Vol. 30.
3. *Brandenburg Ch. F. i inni*: Interpretation of chemical and physical measurements from an *in situ* coal gasification experiment. 50th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, 1975.
4. *Brasseur A. i inni*: Carbon stable isotope analysis as a tool for trading temperature during the El Tremedal underground coal gasification at great depth. Fuel 2002, Vol. 81.
5. *Campbell G. G.*: Underground coal gasification at Hanna, Wyoming. Thermal power conference, Washington State University, October, 1975.
6. *Couch G. R.*: Underground coal gasification. IEA Clean Coal Centre, ISBN 978-92-9029-471-9, July 2009.
7. *Dziunikowski K.*: Doświadczenia nad podziemnym zgazowaniem węgla w laboratoryjnym gazogeneratorze powierzchniowym. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Stalinogród, Wyd. Górnictwo-Hutnicze 1956, Seria A, Komunikat nr 182.
8. *Hill R. W. i inni*: Results of the Centralia Underground Coal Gasification Field Test. 10th Annual Underground Coal Gasification Symposium, August 12-15, Williamsburg, 1984.
9. *Kaczmarek Z.*: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Warszawa, Agenda Wydawnicza PAK 2006.
10. *Kostúr K., Blišťanová M.*: The research of underground coal gasification in laboratory conditions. Petroleum & Coal 2009, Vol. 51, No. 1.
11. *Lee S., Speight J. G., Loyalka S. K.*: Handbook of Alternative Fuel Technologies. CRC Press. March 2007.
12. *Liang Ch. i inni*: A back analysis of the temperature field in the combustion volume space during underground coal gasification. Mining Science and Technology (China) 2011, Vol. 21.
13. *Luo Y., Coertzen M., Dumble S.*: Comparison of UCG cavity growth CFD model predictions. 7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CRISO, Melbourne, Australia, December 2009.
14. *Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.*: Termometria. Przyrząd i metody. Łódź, Wyd. Politechniki Łódzkiej 1998.
15. *Nouroszieh H. i inni*: Simulation Study of Underground Coal Gasification in Alberta Reservoirs: Geological Structure and Process Modeling. Energy and Fuels 2010, Vol. 24.
16. *Olness D. U.*: The underground coal gasification station at Lisichansk. Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-52572, wrzesień, 1978.
17. *Palarski J.*: Pozyskiwanie metodami niekonwencjonalnymi energii z pozabilansowych pokładów węgla z uwzględnieniem ograniczenia emisji CO₂. Górnictwo i Geologia 2010, Tom 5, Zeszyt 1.
18. *Rauk J.*: Określanie temperatur w generatorach podziemnych na podstawie pomiaru stopnia pęcznienia skały stropowej. Przegląd Górniczy 1969, Nr 2.
19. *Staćzyk K.*: Czyste technologie użytkowania węgla. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 2008.
20. *Staćzyk K. i inni*: Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in pilot scale *ex situ* reactor for underground gasification. Fuel 2011, Vol. 90.
21. *Taba L. E. i inni*: The effect of temperature on various parameter in coal, biomass and CO-gasification: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012, Vol. 16.
22. *Tomeczek J.*: Zgazowanie Węgla. Gliwice, Wyd. Pol. Śl. 1991.
23. *Wang J. i inni*: Distributed Optical Fiber Temperature Sensor Applied in Underground Coal Gasification System. IEEE 2010.
24. *Yang L.*: Study of the model experiment of blinding-hole UCG. Fuel Processing Technology 2003, Vol. 82.
25. *Yang L., Liang J., Yu Li.*: Clean coal technology – Study on the pilot Project experiment of underground coal gasification. Energy 2003, Vol. 28.
26. *Yang L.*: Study on the model experiment and numerical simulation for underground coal gasification. Fuel 2004, Vol. 83.
27. *Yang L. i inni*: Experimental Study of Shaftless Underground Gasification in Thin High-Angle Coal Seams. Energy and Fuels 2007, Vol. 21.
28. *Yang L. i inni*: Field test of large scale hydrogen manufacturing from underground coal gasification (UCG). International Journal of Hydrogen Energy 2008, Vol. 33.