

Krzysztof GOSIEWSKI, Anna PAWLACZYK, Manfred JASCHIK

e-mail: k.gosiewski@iich.gliwice.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej PAN, Gliwice

Utylizacja metanu z powietrza wentylacyjnego kopalń węgla kamiennego w termicznym reaktorze rewersyjnym

Wstęp

Spalanie nisko stężonych mieszanek metanu z powietrzem, połączone z utylizacją ciepła reakcji, stanowi ważne zagadnienie dla przemysłu wydobywczego. Ogromne ilości metanu są uwalniane z szybów wentylacyjnych kopalń węgla kamiennego do atmosfery. Ten metan (tzw. VAM – *Ventilation Air Methane*) będąc cennym paliwem gazowym jest niepotrzebnie tracony, jednocześnie wzmacniając efekt cieplarniany. Szacuje się, że około 70% całkowitej ilości metanu uwalnianego podczas robót górniczych emitowane jest do atmosfery szybami wentylacyjnymi [1]. W kopalniach krajowych pojedynczy szyb uwalnia od 270 000 nawet do 1,4 miliona Nm^3/h mieszaniny powietrzno-metano-owej. Obniżenie tej emisji ma więc ważne znaczenie z punktu widzenia ekonomii, ochrony środowiska i energetyki.

Stężenie metanu w powietrzu wentylacyjnym kopalń jest niewielkie (zwykle poniżej 1% obj.). Wprawdzie teoretycznie powietrze wentylacyjne mogłoby zasilać kotły energetyczne dużej mocy, gdzie zawarty w nim metan zostałby spalony w wysokich temperaturach panujących w komorze spalania. Rzadko jednak takie rozwiązanie udaje się zastosować w praktyce. Natomiast utylizacja VAM poprzez utlenienie w zwykłym procesie spalania bez dodatkowego paliwa nie jest możliwa. Jednak taka mieszanina może być brana pod uwagę jako alternatywne paliwo do produkcji energii przy pomocy nowoczesnych np. rewersyjnych technologii spalania.

Urządzenia rewersyjne a utylizacja VAM

Ze względu na niską zawartość metanu w powietrzu wentylacyjnym kopalń, najbardziej obiecującym rozwiązaniem jego utylizacji wydaje się autotermiczne spalanie w reaktorach rewersyjnych. Reaktor rewersyjny FRR (*Flow Reversal Reactor*) to obiekt, w którym autotermiczną pracę uzyskuje się poprzez regeneracyjny odzysk ciepła reakcji, użytkowany cykliczną zmianą kierunku przepływu przez jego wypełnienie. Mogą to być reaktory katalityczne CFRR (*Catalytic Flow Reversal Reactor*), względnie podobne, lecz niekatalityczne reaktory TFRR (*Thermal Flow Reversal Reactor*), w których zachodzi homogeniczne spalanie termiczne.

Przeprowadzone w ramach Projektu Europejskiego [2] badania i symulacje reaktora CFRR pokazują, iż występować w nich mogą wysokie temperatury pracy dochodzące do 800°C , co nawet dla katalizatora paladowego np. $0,5\% \text{Pd}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ może prowadzić do jego dezaktywacji lub nawet zniszczenia. Trudne warunki pracy związane z silnie zapyłonym i wilgotnym gazem również mogą mieć wpływ na żywotność takiego katalizatora. Wobec tego ciekawą alternatywą jest niekatalityczne spalanie metanu na złożu inertnym w reaktorze TFRR [3].

Prace eksperymentalne

Obecnie w *Instytucie Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk* prowadzone są badania niekatalitycznego spalania metanu w TFRR umożliwiającym pracę przy natężeniu przepływu medium zasilającego wynoszącym około $400 \text{ m}^3/\text{h}$ (Rys. 1).

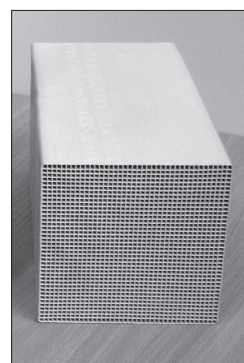
Reaktor zbudowany jest z dwóch sekcji połączonych ze sobą za pomocą tzw. łącznika umiejscowionego w ich górnej części, skąd istnieje możliwość odprowadzania gorącego strumienia do odzysku ciepła.

Każda z sekcji (zwanymi dalej: sekcją 1 i sekcją 2) ma wypełnienie w postaci ułożonych obok siebie, nie pokrytych katalizatorem, bloków



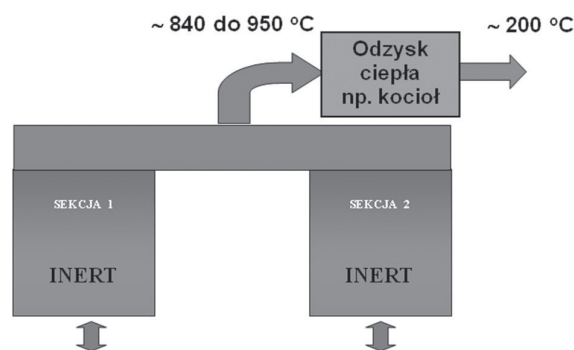
Rys. 1. Instalacja demonstracyjna reaktora rewersyjnego do niekatalitycznego spalania metanu

monolitycznych (Rys. 2). Bloki wykonane są z kordierytu. Duża liczba prostych i równoległych kanałów zapewnia niskie opory przepływu gazu przez wypełnienie.



Rys. 2. Blok monolitu

Zastosowane wypełnienie zwane inertem służy jako regenerator ciepła. Schemat omawianego reaktora TFRR przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat TFRR z możliwością odprowadzenia części gorącego gazu do utylizacji ciepła

Rozruch TFRR rozpoczyna się od nagrzania wypełnienia przy pomocy grzałek elektrycznych, do temperatury umożliwiającej zapoczątkowanie spalania. Do reaktora badawczego dostarczana jest mieszanina metan-powietrze, w której stężenie metanu odpowiada jego zawartości w powietrzu wentylacyjnym. Żądane stężenie uzyskuje się poprzez zmieszanie w odpowiednich proporcjach dwóch strumieni gazu ziemnego z sieci miejskiej oraz powietrza. Chłodna mieszanka gazowa wpływa do rozgrzanego złoża np. do sekcji 1 (Rys. 3), nagrzewa się a następnie spala. Reakcja spalania jest reakcją egzotermiczną stąd też temperatura w złożu wzrasta i formuje się tzw. fala cieplna, która ze względu na dużą pojemność cieplną złoża powoli przesuwa się zgodnie z kierunkiem przepływu medium. W tym samym czasie początkowa część złoża, wskutek konieczności oddawania ciepła do wpływającego zimnego gazu wlotowego, stopniowo wychładza się. By zapobiec wygaszeniu reakcji następuje zmiana kierunku przepływającego medium i proces się powtarza. Ze względu na cykliczną zmianę przepływu medium, FRR pracują w ciągłym stanie nieustalonym. Jednak po odpowiednio długim czasie w reaktorze ustala się pewien stan dynamiczny zwany cyklicznym stanem ustalonym CSS (*Cyclic Steady State*), w którym kształt przesuających się wzdłuż reaktora profili i składów nie ulega już dalszej zmianie. W ten sposób osiąga się bardzo dobre warunki autotermicznej pracy reaktora.

Ze względu na dużą pojemność cieplną urządzenia, czas potrzebny do uzyskania CSS jest zwykle długi. W związku z tym badania TFRR prowadzone były w sesjach 5-dniowych w ruchu ciągłym. Prezentowane wyniki (Tab. 1) uzyskano przy obciążeniu reaktora przepływem około 400 m³/h.

Tab. 1. Wyniki badań instalacji demonstracyjnej termicznego spalania metanu w niskich stężeniach

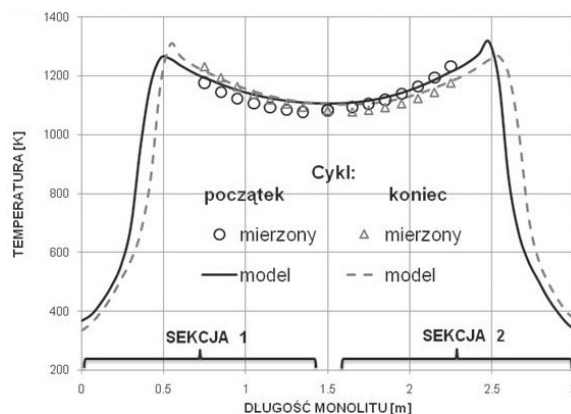
| Średnie natężenie przepływu medium | Udział gazu odprowadzanego | Wlotowe średnie stężenie metanu | Średnia temp. gazów odbieranych | Konwersja | Sprawność odzysku | Oczekiwany odzysk |
|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|
| m ³ /h | % | % obj. | °C | % | % | MW/(100 000 Nm ³ /h) |
| 409 | 17,1 | 1,03 | 950 | 96,1 | 50 | 5,1 |
| 397 | 9,9 | 0,77 | 908 | 96,1 | 36 | 2,8 |
| 398 | 3,6 | 0,53 | 884 | 96,2 | 19 | 1,0 |
| 399 | 2,3 | 0,43 | 865 | 90,7 | 14 | 0,6 |
| 400 | 0 | 0,35 | 855 | 85,7 | 0 | 0 |
| 406 | 0 | 0,22 | 839 | 86,4 | 0 | 0 |

Eksperymenty prowadzono przy różnych średnich stężeniach metanu (w zakresie 0,22–1,03% obj.) w mieszaninie zasilającej. Reaktor wyposażony był w komputerowy układ sterowania i wizualizacji pomiarów. W zależności od ilości składnika palnego przyjmowano różne długości cyklu. Dobór długości półcyklu podyktowany był dwoma kryteriami dotyczącymi zarówno żywotności zaworu rewersyjnego jak i stabilnej pracy TFRR. Stąd też czas trwania półcyklu rewersji powinien być jak najdłuższy by minimalizować ilość przełączeń zaworów, jednak na tyle krótki, by zapewnić autotermiczną pracę urządzenia bez oznak jego wygasania. W ten sposób eksperymentalnie wyznaczono czasy trwania półcyklu dla każdego z zadawanych stężeń. Przyjmowały one skrajne wartości 240 s dla stężenia CH₄ 1% obj., a dla stężenia CH₄ 0,22% obj. wartość 20 s. Całkowita konwersja metanu utrzymywała się na zadowalającym praktycznie poziomie. Wykazano, iż możliwa jest praca reaktora przy stężeniu metanu około 0,2 % obj. bez dodatkowego źródła energii z nieco niższą konwersją metanu sięgającą 86,4%.

Prowadzono również badania z odzyskiem ciepła. Eksperymenty wykazały, iż możliwa jest praca z wyprowadzeniem części gorącego strumienia nie powodując przy tym wygaszenia reaktora. Upust może być stosowany, gdy stężenie metanu w mieszaninie jest większe od 0,4% obj. W tab. 1 podano (dla różnych stężeń wlotowych metanu) maksy-

malny udział oraz średnie wartości temperatur odprowadzanych gazów. W gazach odlotowych z urządzenia nie stwierdzono nawet śladowych zawartości NO_x.

W trakcie eksperymentów mierzono również profile temperatur wzdłuż monolitu w sekcjach 1 oraz 2 za pomocą przesuwanych termopar płaszczowych o średnicy 3 mm. Termopary były umieszczone w osi wypełnienia monolitycznego. Profile mierzone były tylko w warunkach CSS. Profile te wykorzystywane są do weryfikacji modelu matematycznego TFRR. Jako przykład, na wykresie (Rys. 4) pokazano profile temperatur zmierzone w rzeczywistym reaktorze oraz uzyskane w symulacjach matematycznych reaktora dla stężenia metanu 1% obj.



Rys. 4. Porównanie profili temperatur zmierzonych i otrzymanych z modelu dla stężenia metanu ok. 1% obj.

Wnioski

Technologia TFRR pozwala niekatalitycznie spalać metan w niskich stężeniach (poniżej 1% obj.) uzyskując wysoką konwersję, w temperaturach nie powodujących tworzenia tlenków azotu.

Takie spalanie metanu pozwala uzyskiwać autotermię dla stężeń od ok. 0,2% obj., zaś powyżej 0,4% obj. możliwy jest również skuteczny odzysk ciepła reakcji, np. do produkcji pary wysokoprężnej lub energii elektrycznej.

Przy stężeniach ok. 1% obj. odzyskać można powyżej 5 MW mocy cieplnej w przeliczeniu na 100 000 Nm³/h powietrza wentylacyjnego.

Badania prowadzone były w stosunkowo niewielkiej instalacji demonstracyjnej, w której udział strat ciepła do otoczenia był znaczący. Można oczekiwać, że w instalacji przemysłowej wskaźniki powinny być lepsze niż wartości zamieszczone w tab. 1.

Oznaczenia

CFRR – *Catalytic Flow Reversal Reactor*/katalityczny reaktor rewersyjny,

FRR – *Flow Reversal Reactor*/reaktor rewersyjny,

TFRR – *Thermal Flow Reversal Reactor*/termiczny reaktor rewersyjny,

VAM – *Ventilation Air Methane*/metan w powietrzu wentylacyjnym

CSS – *Cyclic Steady State*/cykliczny stan ustalony.

LITERATURA

- [1] P. Krzystolik, J. Skiba: *Polityka Energetyczna* **12**, nr 2/2, 319 (2009).
- [2] European Union Project, Contract No. ICA2-CT-2000-10035, 2003.
- [3] K. Gosiewski, Y. Matros, K. Warmuzinski, M. Jaschik, M. Tanczyk: *Chem. Eng. Sci.*, **63** (2008).

Praca była finansowana przez MNiSW (Projekt Badawczy Rozwojowy Nr R 14 020 02). Reaktor wykonała Firma Innowacyjno Wdrożeniowa „Katalizator” z Krakowa, stosując w jego konstrukcji wiele własnych rozwiązań technicznych.