

Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy

Przedmiotem wynalazku jest wysokotemperaturowy reaktor jądrowy z rdzeniem usypanym z kulistych elementów paliwowych.

5 Dotychczas znane są różne rozwiązania reaktorów jądrowych wykorzystujących zjawisko rozszczepienia jądra atomowego. Obecnie budowane i projektowane komercyjne reaktory jądrowe to tzw. reaktory trzeciej generacji. Charakteryzują się one tym, że przeprowadza się w nich kontrolowane przemiany jądrowe, które wykorzystuje się do wytwarzania energii. Najczęściej jako paliwo w reaktorach stosowany jest uran U-235 lub pluton Pu-239. W fazie projektów są również reaktory czwartej generacji,
10 w których kładzie się szczególny nacisk na zmniejszenie oddziaływania na środowisko oraz zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności ich pracy.

Opisy zgłoszeń patentowych [EP3564966A1](#) i [EP3564965A1](#) przedstawiają rozwiązania zespołu paliwowego dla reaktora jądrowego, których celem jest efektywne odprowadzanie ciepła z elementów paliwowych. Elementy paliwowe umieszczone są w integralnie połączonych ogniwach
15 w postaci kształtowanych rur, których osie podłużne pokrywają się z osiami podłużnymi elementów paliwowych. Rury te mają przekrój w kształcie sześciokąta foremnego i w pierwszym ze zgłoszeń ([EP3564966A1](#)) ich krawędzie są ugięte wzdłuż podłużnej osi ogniwa, a w drugim zgłoszeniu ([EP3564965A1](#)) krawędzie rur są nachylone w rzędach równoległych do jednej z głównych przekątnych sześciokąta. Takie kształty pozwalają na równomierny opływ elementów paliwowych przez czynnik
20 chłodzący i efektywny odbiór ciepła z tych elementów.

Opis zgłoszenia wzoru użytkowego [CN202563900U](#) przedstawia reaktor jądrowy określany przez twórców mianem piątej generacji, który wyposażony jest w złożę ze sferycznym paliwem uranowo-plutonowym. Wewnątrz obudowy znajduje się rdzeń reaktora w kształcie sfery połączony od góry ze zbiornikiem kulistych elementów paliwa uranowego oraz ze zbiornikiem kulistych elementów paliwa
25 plutonowego. Rury chłodzenia obiegu pierwotnego są rozmieszczone w obszarze środkowym rdzenia, a wymiennik ciepła obiegu wtórnego jest umieszczony między wewnętrzną a zewnętrzną obudową reaktora. Przestrzeń między wewnętrzną a zewnętrzną obudową wypełnia woda obiegu wtórnego. Warstwy izolacji termicznej są umieszczone pomiędzy wymiennikiem ciepła obiegu pierwotnego a zewnętrzną obudową reaktora oraz pomiędzy wymiennikiem ciepła obiegu wtórnego a zewnętrzną
30 obudową reaktora.

Opis zgłoszenia patentowego [US4642214A](#) przedstawia wysokotemperaturowy reaktor jądrowy posiadający kuliste elementy paliwowe, które rozmieszczone są wokół grafitowego rdzenia w postaci grafitowych kulek lub kolumny z kompaktowego grafitu.

Reaktor jądrowy składający się ze sferycznego rdzenia z kulistymi elementami paliwowymi,
35 w którym chłodziwo wpływa do środka rdzenia i wypływa promieniowo na zewnątrz sferycznego rdzenia ujawniony jest w opisie zgłoszenia patentowego [GB1055754A](#).

Elementy paliwowe w reaktorze jądrowym według opisu zgłoszenia patentowego [GB989168A](#) są tak połączone ze sobą, aby można je było „jak po sznurku” wprowadzać do rdzenia reaktora, przy

czym sąsiednie lub sparowane elementy paliwowe są sprzęgnięte, dzięki czemu można je pojedynczo wyjmować z rdzenia.

5 Konstrukcje reaktorów jądrowych, w których kuliste elementy paliwowe umieszczone są w pionowych rurach, przez które przepływa chłodziwo przedstawione są w opisach zgłoszeń patentowych [GB935130A](#) i [GB941825A](#). Rury mają zmienną średnicę, co wpływa na zmiany natężenia przepływającego przez te rury chłodziwa a to z kolei na utrzymywanie elementów paliwowych na
10 pożądaną wysokość. Elementy paliwowe mogą być również umieszczone w perforowanej sferycznej obudowie, przez którą swobodnie przepływa chłodziwo i odbiera od nich ciepło.

Opis patentowy [CN1296939C](#) prezentuje rozwiązanie złoża i sposób ułożenia kulistych
15 elementów paliwowych w gazowym wysokotemperaturowym reaktorze jądrowym. Kuliste elementy paliwowe są ułożone na grafitowych warstwach reflektora i są chłodzone strumieniem przepływającego helu.

Układ zasilania oraz układ obsługi i przechowywania kulistych elementów paliwowych reaktora
15 jądrowego chłodzonego gazem przedstawia opis zgłoszenia patentowego [US2012230458A1](#). Ujawniony układ jest skonfigurowany w taki sposób, że chłodzący gaz wpływa do reaktora zarówno przez doprowadzenie, jak i odprowadzenie elementów paliwowych ograniczając w ten sposób
20 przechodzenie gazu o wysokiej temperaturze z reaktora do układu odbierającego ciepło.

Rozwiązania systemów wyladowczych kulistych elementów paliwowych lub moderatorów
20 z reaktora jądrowego z granulowanym złożem przedstawiają opisy zgłoszeń patentowych [GB941108A](#) i [CA2437154A1](#). Z kolei opis zgłoszenia patentowego [DE3121379A1](#) ujawnia konstrukcję rury wyladowczej kulistych elementów paliwowych dla reaktora jądrowego chłodzonego gazem.

Celem wynalazku jest wysokotemperaturowy reaktor jądrowy ze złożem usypanym
25 ze sferycznych elementów paliwowych z oryginalnym układem chłodzenia. Charakteryzuje go niezawodność działania, bezpieczeństwo i odporność na typowe awarie mogące występować podczas pracy obecnie eksploatowanych reaktorów jądrowych. Cechuje go też zminimalizowane negatywne oddziaływanie na środowisko.

30 Przedmiotem wynalazku jest wysokotemperaturowy reaktor jądrowy składający się z obudowy reaktora z wlotem gazowego chłodziwa i wylotem gazowego chłodziwa oraz warstwą reflektora i rdzeniem reaktora, w którym znajdują się sferyczne elementy paliwowe i pręty kontrolne w prowadnicach oraz moderator w postaci sferycznych elementów grafitowych. Jego istotą jest to, że od wewnętrznej strony cylindrycznej obudowy reaktora z podstawami w kształcie stożka umieszczona jest warstwa reflektora, za którą znajduje się przestrzeń z przepływającym chłodziwem otaczająca rdzeń
35 reaktora i połączona z doprowadzeniem chłodziwa w dolnej podstawie reaktora i z odprowadzeniem chłodziwa w górnej podstawie reaktora. Rdzeń reaktora połączony jest z doprowadzeniem sferycznych elementów paliwowych w górnej podstawie reaktora i z odprowadzeniem sferycznych elementów paliwowych w dolnej podstawie reaktora. W osi rdzenia reaktora umieszczona jest cylindryczna pierwsza rura, w której znajduje się moderator. Pierwsza rura posiada perforowane ściany i w górnej

podstawie reaktora połączona jest z doprowadzeniem moderatora a w dolnej podstawie reaktora połączona jest z odprowadzeniem moderatora. Pierwsza rura połączona jest z odprowadzeniem sferycznych elementów paliwowych. Pierwsza rura w dolnej podstawie reaktora połączona jest z wlotem gazowego chłodziwa a w górnej podstawie reaktora połączona jest z wylotem gazowego chłodziwa.

5 Wewnątrz pierwszej rury znajduje się druga rura, której wlotowy koniec połączony jest z wlotem podgrzanego gazowego chłodziwa znajdującym się w górnej podstawie reaktora, a wylotowy koniec znajduje się w środkowej części pierwszej rury. Wokół pierwszej rury znajdują się sferyczne elementy paliwowe oraz symetrycznie rozmieszczone pręty kontrolne umieszczone w prowadnicach.

10 Wskazane jest gdy chłodziwo dostarczane do przestrzeni z przepływającym chłodziwem przez doprowadzenie chłodziwa jest w postaci gazowej.

Alternatywnie chłodziwo dostarczane do przestrzeni z przepływającym chłodziwem przez doprowadzenie chłodziwa jest w postaci ciekłej.

15 Korzystnym skutkiem zastosowania wynalazku jest bezpieczeństwo dla środowiska, które pozwala na lokalizację reaktora jądrowego będącego przedmiotem wynalazku praktycznie w każdym miejscu i dowolnym sąsiedztwie. Relatywnie małe są też koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Budowa tego typu reaktorów jest ekonomicznie uzasadniona, szczególnie w przypadku ich stosowania w małych układach generujących energię cieplną i elektryczną. Uzyskiwane wysokie temperatury chłodziwa na wylocie z rdzenia reaktora mogą być również wykorzystane w procesach gazyfikacji węgla, syntezy metanolu czy wytwarzania wodoru.

25 Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania jest uwidoczniony na schematycznym rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia wysokotemperaturowy reaktor jądrowy w widoku perspektywicznym z przekrojem, a Fig. 2 – przekrój wysokotemperaturowego reaktora jądrowego wzdłuż linii A-A.

30 Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy w przykładzie wykonania przedstawionym na rysunku składa się z cylindrycznej obudowy reaktora 1 z podstawami w kształcie stożka umieszczonej w wielowarstwowej - betonowej i stalowej osłonie biologicznej. Obudowa reaktora 1 ma średnicę 4 m i wysokość 6 m i wykonana jest ze stali o grubości 0,2 m. Od wewnętrznej strony obudowy reaktora 1 umieszczona jest warstwa reflektora 2 o grubości 0,8 m, która wykonana jest z grafitu o wysokiej czystości. Za warstwą reflektora 2 znajduje się szczelna przestrzeń z przepływającym chłodziwem 8 otaczająca rdzeń reaktora 3 i połączona z doprowadzeniem chłodziwa 8.1 w dolnej podstawie reaktora oraz z odprowadzeniem chłodziwa 8.2 w górnej podstawie reaktora. Zastosowane jest chłodziwo w postaci gazowej, którym jest dwutlenek węgla albo chłodziwo w postaci ciekłej, którym jest stopiony ołów. Rdzeń reaktora 3 połączony jest z doprowadzeniami 3.1 sferycznych elementów paliwowych 4 w górnej podstawie reaktora i z odprowadzeniem 3.2 sferycznych elementów paliwowych 4 w dolnej podstawie reaktora. W osi rdzenia reaktora 3 umieszczona jest cylindryczna pierwsza rura 9 o średnicy wewnętrznej 0,6 m i grubości ścianki 0,03 m. Rura ta w obrębie rdzenia reaktora 3 posiada perforowane ściany w postaci okrągłych otworów o średnicy 0,03 m i wykonana jest ze stopu żelaza z berylem.

Wewnątrz pierwszej rury 9 znajduje się moderator w postaci sferycznych elementów grafitowych 7 o średnicy 0,06 m. Elementy te oprócz grafitu zawierają sprasowany pirolityczny węgiel oraz wzmacniającą ceramiczną warstwę węgliku krzemu. Pierwsza rura 9 w górnej podstawie reaktora połączona jest z doprowadzeniem 9.1 moderatora, a w dolnej podstawie reaktora połączona jest z odprowadzeniem 9.2 moderatora. Rura ta w dolnej podstawie reaktora jest też połączona z odprowadzeniem 3.2 sferycznych elementów paliwowych 4 oraz z wlotem gazowego chłodziwa 9.3 a w górnej podstawie reaktora połączona jest z wylotem gazowego chłodziwa 9.4. Jako gazowe chłodziwo zastosowany jest hel, który jest gazem szlachetnym nie reagującym z materiałami konstrukcyjnymi reaktora i posiada relatywnie dużą przewodność cieplną. W pierwszej rurze 9 współśrodkowo umieszczona jest druga rura 10 o średnicy wewnętrznej 0,1 m i grubości ścianki 0,03 m. Rura ta wykonana jest ze stopu żelaza z berylem. Wlotowy koniec drugiej rury 10 połączony jest z wlotem podgrzanego chłodziwa 10.1 znajdującym się w górnej podstawie reaktora, a wylotowy koniec znajduje się w środkowej części pierwszej rury 9, która usytuowana jest w środku rdzenia reaktora 3. Podgrzany chłodziwem jest hel, który jako gazowe chłodziwo został nagrany w rdzeniu reaktora 3 i odprowadzony wylotem gazowego chłodziwa 9.4. W rdzeniu reaktora 3 wokół pierwszej rury 9 znajduje się ok. 150 000 sferycznych elementów paliwowych 4 o średnicy 0,06 m, a także symetrycznie rozmieszczone są pręty kontrolne 5 umieszczone w pionowych prowadnicach 6. Sferyczne elementy paliwowe 4 zawierają w swym składzie paliwa jądrowe typu TRISO i HTI-BISO. Paliwa te mają ok. 1 g uranu U-235 w formie dwutlenku uranu UO_2 i dwuwęgliku uranu UC_2 i podczas wypalania uwalniają do 30 razy mniej strontu Sr-90 niż inne paliwa. Prętami kontrolnymi 5 są pręty regulacyjne wykonane ze stopu srebra, indu i kadmu oraz pręty kompensacyjne i bezpieczeństwa zawierające węgiel boru. Pręty kontrolne 5 umieszczone są w prowadnicach 6 wykonanych ze stopu żelaza z berylem.

Działanie wysokotemperaturowego reaktora jądrowego przedstawionego w przykładzie wykonania polega na tym, że do odbioru ciepła generowanego przez znajdujące się w rdzeniu reaktora 3 sferyczne elementy paliwowe 4 na skutek zachodzących w nich reakcji rozszczepienia jąder izotopów uranu wykorzystuje się gazowe chłodziwo, którym jest nieaktywny chemicznie hel. Chłodziwo to o temperaturze 250 °C doprowadza się wlotem gazowego chłodziwa 9.3 w dolnej podstawie reaktora i w połączonej z tym wlotem pierwszej rurze 9 przepływa ku górze rdzenia reaktora 3. Po drodze gazowe chłodziwo przechodzi przez perforowane ściany pierwszej rury 9 do przestrzeni rdzenia reaktora 3, w której znajdują się sferyczne elementy paliwowe 4. Przechodzenie to jest wymuszane przez przeciwnie skierowany strumień podgrzanego gazowego chłodziwa, którym jest również hel uprzednio nagrany w rdzeniu reaktora 3 i odprowadzony wylotem gazowego chłodziwa 9.4. Część nagrzanego gazowego chłodziwa odprowadzana wylotem gazowego chłodziwa 9.4 jest wprowadzana z powrotem do reaktora poprzez wlot podgrzanego gazowego chłodziwa 10.1 oraz wlotowy koniec drugiej rury 10 znajdujący się w górnej podstawie reaktora, a wyprowadza się go wylotowym końcem drugiej rury 10 znajdującym się w środkowej części pierwszej rury 9. W rdzeniu reaktora 3 chłodziwo przepływa pomiędzy sferycznymi elementami paliwowymi 4 i odbiera od nich wytwarzane ciepło. Nagrzane do temperatury 950 °C gazowe chłodziwo w górnej części rdzenia reaktora 3 znajdującej się w górnej stożkowej podstawie reaktora wymuszonym strumieniem przepływa przez perforowane ściany

pierwszej rury 9 do jej środka i następnie jest ono odprowadzane wylotem gazowego chłodziwa 9.4. Do termicznej izolacji warstwy reflektora 2 a także do odbioru ciepła generowanego w rdzeniu reaktora 3 wykorzystuje się chłodziwo wprowadzane do otaczającej rdzeń reaktora 3 przestrzeni z przepływającym chłodziwem 8. Gdy stosuje się chłodziwo w postaci gazowej, którym jest dwutlenek węgla, to takie chłodziwo o temperaturze 250 °C wtłacza się do przestrzeni z przepływającym chłodziwem 8 z doprowadzenia chłodziwa 8.1 w dolnej podstawie reaktora. Chłodziwo to w przestrzeni z przepływającym chłodziwem 8 nagrzewa się do temperatury 800 °C i wyprowadza się go odprowadzeniem chłodziwa 8.2 w górnej podstawie reaktora. Gdy stosuje się chłodziwo w postaci ciekłej, którym jest stopiony ołów, to takie chłodziwo o temperaturze 350 °C wprowadza się do przestrzeni z przepływającym chłodziwem 8 z doprowadzenia chłodziwa 8.1 w dolnej podstawie reaktora. Chłodziwo to w przestrzeni z przepływającym chłodziwem 8 nagrzewa się do temperatury 850 °C i wyprowadza się go odprowadzeniem chłodziwa 8.2 w górnej podstawie reaktora. Sferyczne elementy paliwowe 4 dostarcza się w sposób ciągły do rdzenia reaktora 3 doprowadzeniami 3.1 w górnej podstawie reaktora i rozkłada się je równomiernie wokół pierwszej rury 9 znajdującej się w osi rdzenia reaktora 3. Sferyczne elementy paliwowe 4 w rdzeniu reaktora 3 generują ciepło i przemieszczają się grawitacyjnie w kierunku odprowadzenia 3.2 sferycznych elementów paliwowych 4 w dolnej podstawie reaktora. Każdy z tych elementów po średnio 8 miesięcznym okresie użytkowania jest jako wypalony odprowadzany poza reaktor. Moderator w postaci sferycznych elementów grafitowych 7 wprowadza się do pierwszej rury 9 doprowadzeniem 9.1 w górnej podstawie reaktora. W rurze tej moderator spełnia rolę spowalnicza neutronów i grawitacyjnie w sposób ciągły przemieszcza się w kierunku odprowadzenia 9.2 w dolnej podstawie reaktora. Przy normalnej pracy w stanie krytycznym gęstość mocy reaktora ma wartość 2,6 MW/m³ a poziom wypalenia sferycznych elementów paliwowych 4 wynosi ok. 150 GWd/tHM. Ciśnienie robocze w obiegu pierwotnym nie przekracza 1,3 MPa. Przy sterowaniu mocą reaktora odpowiednio opuszcza się albo podnosi pręty kontrolne 5 w prowadnicach 6. Zmieniane jest wówczas tempo łańcuchowych reakcji rozszczepienia jąder izotopu uranu-235 zachodzących w rdzeniu reaktora 3 na skutek zmiany ilości pochłanianych lub spowalnianych neutronów przez substancje, z których zbudowane są pręty kontrolne.

Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy będący przedmiotem wynalazku charakteryzuje się zmniejszonym oddziaływaniem na środowisko, zwiększonym bezpieczeństwem i niezawodnością działania. Osiągane maksymalne temperatury w rdzeniu reaktora 3 nie naruszają integralności stosowanego paliwa jądrowego. Niemożliwe jest też stopienie rdzenia reaktora 3. Przy odpowiednim nadzorze i przestrzeganiu reżimu technologicznego okres użytkowania tego wysokotemperaturowego reaktora można szacować w dziesiątkach lat. Końcowa radioaktywność reaktora nie powinna przekraczać tej, którą określa się dla obecnie stosowanych najbezpieczniejszych komercyjnych reaktorów.

RZECZNIK PATENTOWY

Maciej Nowicki
mgr inż. Maciej Nowicki
Nr wp. 3476

Wykaz oznaczeń:

- 1 – obudowa reaktora
- 2 – reflektor
- 3 – rdzeń reaktora
- 3.1 – doprowadzenie sferycznych elementów paliwowych
- 3.2 – odprowadzenie sferycznych elementów paliwowych
- 4 – sferyczny element paliwowy
- 5 – pręt kontrolny
- 6 – prowadnica
- 7 – sferyczny element grafitowy
- 8 – przestrzeń z przepływającym chłodziwem
- 8.1 – doprowadzenie chłodziwa
- 8.2 – odprowadzenie chłodziwa
- 9 – pierwsza rura
- 9.1 – doprowadzenie moderatora
- 9.2 – odprowadzenie moderatora
- 9.3 – wlot gazowego chłodziwa
- 9.4 – wylot gazowego chłodziwa
- 10 – druga rura
- 10.1 – wlot podgrzanego gazowego chłodziwa