

## Reaktor jądrowy chłodzony gazem

Przedmiotem wynalazku jest reaktor jądrowy chłodzony gazem z rdzeniem usypanym ze sferycznych 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 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  
15 ([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 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 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  
25 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 pożądanej wysokości. 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 reaktor jądrowy chłodzony gazem cechujący się konstrukcją rdzenia  
25 o kształcie zbliżonym do sfery, który wypełniony jest sferycznymi elementami paliwowymi i moderatorem w postaci kulistych elementów grafitowych. Reaktor ten posiada prosty układ chłodzenia i jest odporny na typowe awarie powodowane brakiem cyrkulacji chłodziwa albo utratą ciśnienia chłodziwa w reaktorze. Zminimalizowana jest w nim liczba układów zabezpieczających przed awarią i spełnia on restrykcyjne wymagania dotyczące bezpieczeństwa, zużycia paliwa jądrowego i gospodarowania radioaktywnymi odpadami.

30 Przedmiotem wynalazku jest reaktor jądrowy chłodzony gazem 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, pręty kontrolne oraz moderator w postaci kulistych elementów grafitowych. Jego istotą jest to, że na wewnętrznej stronie obudowy reaktora mającej kształt zbliżony do sfery umieszczona jest warstwa reflektora, za którą  
35 w kierunku środka reaktora znajduje się przestrzeń przepływu chłodziwa oddzielona perforowaną przegrodą od rdzenia reaktora ze złożem usypanym ze sferycznych elementów paliwowych. W rdzeniu reaktora znajdują się promieniowo ułożone pręty kontrolne umieszczone w prowadnicach przechodzących przez przestrzeń przepływu chłodziwa, warstwę reflektora i obudowę reaktora.

Prowadnice w obrębie rdzenia reaktora lub przestrzeni przepływu chłodziwa mają perforowaną powierzchnię i każda z nich na swoim końcu od zewnętrznej strony obudowy reaktora połączona jest z wlotem gazowego chłodziwa albo wylotem gazowego chłodziwa. Od górnej i dolnej strony reaktora w obudowie reaktora, warstwie reflektora i przestrzeni przepływu chłodziwa znajdują się pierwsze rury, które połączone są swoimi pierwszymi końcami z rdzeniem reaktora a drugimi końcami od zewnętrznej strony obudowy reaktora połączone są z wylotami gazowego chłodziwa albo wlotami gazowego chłodziwa i stanowią one odpowiednio doprowadzenie i odprowadzenie sferycznych elementów paliwowych. W pierwszych rurach umieszczone są drugie rury połączone swoimi pierwszymi końcami ze znajdującą się w środku rdzenia reaktora sferą wypełnioną moderatorem a drugimi końcami od zewnętrznej strony obudowy reaktora połączone są z odpowiednio doprowadzeniem i odprowadzeniem moderatora.

Korzystnym skutkiem zastosowania wynalazku jest znacznie większy stopień bezpieczeństwa jądrowego i radiologicznego oraz mniejsze negatywne oddziaływanie reaktora jądrowego na środowisko. Mniejsze są też koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, co przekłada się na niskie ceny produkowanej energii elektrycznej. Koszty te są szczególnie istotne w przypadku budowy małych, modułowych układów generujących energię. Uzyskiwane wysokie temperatury w rdzeniu reaktora mogą być wykorzystane do zasilania takich procesów technologicznych jak synteza metanolu, amoniaku czy kaprolaktanu.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania jest uwidoczniony na schematycznym rysunku, na którym poszczególne figury przedstawiają:

- Fig. 1 – reaktor jądrowy chłodzony gazem w widoku perspektywicznym z przekrojem w pierwszej odmianie wykonania,  
 Fig. 2 – reaktor jądrowy chłodzony gazem w widoku perspektywicznym z przekrojem w drugiej odmianie wykonania.

Reaktor jądrowy chłodzony gazem w pierwszej odmianie wykonania składa się ze stalowej sferycznej obudowy reaktora 1 o średnicy 4 m i grubości 0,2 m umieszczonej w betonowo-stalowej osłonie biologicznej. Na wewnętrznej stronie obudowy reaktora 1 ułożona jest warstwa reflektora 2 wykonana z bloków grafitu o wysokiej czystości i grubości 0,8 m. Za warstwą reflektora 2 w kierunku środka reaktora znajduje się 30 centymetrowa przestrzeń przepływu chłodziwa 2.1 oddzielona perforowaną przegrodą 2.2 od rdzenia reaktora 3 ze złożem usypanym ze sferycznych elementów paliwowych 4. Jako chłodziwo stosowany jest nieaktywny chemicznie hel posiadający relatywnie dużą przewodność cieplną. Perforowaną przegrodą 2.2 jest blacha ze stopu żelaza z berylem o grubości 0,05 m z okrągłymi otworami o średnicy 0,03 m. W rdzeniu reaktora 3 znajduje się ok. 100 tys. sferycznych elementów paliwowych 4 o średnicy 0.06 m. Składają się one ze sprasowanego ceramicznego paliwa jądrowego typu TRISO i zawierają ok. 1 g uranu U-235 w postaci dwutlenku uranu  $UO_2$  i dwuwęglu uranu  $UC_2$ . W rdzeniu reaktora 3 znajdują się także promieniowo ułożone pręty

kontrolne 5 umieszczone w prowadnicach 7, które przechodzą przez przestrzeń przepływu chłodziwa 2.1, warstwę reflektora 2 oraz obudowę reaktora 1 i osłonę biologiczną. Prętami kontrolnymi 5 są pręty regulacyjne wykonane ze stopu srebra, indu i kadmu oraz pręty kompensacyjne i bezpieczeństwa zawierające węglík boru. Prowadnice 7 w obrębie rdzenia reaktora 3 i przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 mają perforowaną powierzchnię i każda z nich na swoim końcu od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączona jest z wlotem gazowego chłodziwa 1.1. Wzdłuż pionowej średnicy reaktora zamontowane są w obudowie reaktora 1, warstwie reflektora 2 i przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 pierwsze rury 8.1, 8.2, które połączone są swoimi pierwszymi końcami z rdzeniem reaktora 3, a drugimi końcami od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączone są z wylotami gazowego chłodziwa 1.2. Rury te stanowią odpowiednio doprowadzenie i odprowadzenie sferycznych elementów paliwowych 4 do i z rdzenia reaktora 3. W pierwszych rurach 8.1, 8.2 umieszczone są współśrodkowo drugie rury 9.1, 9.2, które połączone są swoimi pierwszymi końcami ze znajdującą się w środku rdzenia reaktora 3 sferą 10 o średnicy 0,75 m i grubości 0,04 m wykonaną ze stopu żelaza z berylem. Sfera 10 wypełniona jest moderatorem w postaci kulistych elementów grafitowych 6 o średnicy 0,06 m zawierających także sprasowany pirolityczny węgiel i węglík krzemu. Drugie końce drugich rur 9.1, 9.2 od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączone są odpowiednio z doprowadzeniem i odprowadzeniem moderatora. Pierwsze rury 8.1, 8.2 i drugie rury 9.1, 9.2 wykonane są ze stopu żelaza z berylem.

Działanie reaktora jądrowego chłodzonego gazem w pierwszej odmianie wykonania polega na tym, że na skutek zachodzących reakcji rozszczepienia jąder izotopów uranu w sferycznych elementach paliwowych 4 generowane jest ciepło. Ciepło to jest odbierane przez gazowe chłodziwo, które o temperaturze 250 °C jest wprowadzane do reaktora poprzez wloty gazowego chłodziwa 1.1, które znajdują się na końcach prowadnic 7 prętów kontrolnych 5 od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1. Gazowe chłodziwo po wprowadzeniu do prowadnic 7 przemieszcza się wzdłuż nich i poprzez perforację dostaje się do przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 i opływa rdzeń reaktora 3 schładzając warstwę reflektora 2. Z przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 gazowe chłodziwo przedostaje się do rdzenia reaktora 3 poprzez perforowaną przegrodę 2.2. Chłodziwo jest także bezpośrednio doprowadzane do rdzenia reaktora 3 poprzez perforowaną powierzchnię prowadnic 7 w obrębie rdzenia reaktora 3. W rdzeniu reaktora 3 chłodziwo przechodząc pomiędzy sferycznymi elementami paliwowymi 4 odbiera od nich wytwarzane ciepło. Nagrzane chłodziwo o temperaturze 900 °C jest przez pierwsze rury 8.1, 8.2 i wyloty gazowego chłodziwa 1.2 w górnej i dolnej części reaktora odprowadzane na zewnątrz reaktora a następnie jest kierowane do wymiennika ciepła. Sferyczne elementy paliwowe 4 doprowadza się w sposób ciągły do rdzenia reaktora 3 pierwszą rurą 8.1 znajdującą się w górze reaktora. W rdzeniu reaktora 3 sferyczne elementy paliwowe 4 generują ciepło i grawitacyjnie przemieszczają się w jego dolne partie i po średnim 8-miesięcznym czasie ich użytkowania jako wypalone są pojedynczo odprowadzane pierwszą rurą 8.2 znajdującą się w dole reaktora. Moderator w postaci kulistych elementów grafitowych 6 doprowadza się do sfery 10 w środku rdzenia reaktora 3 drugą rurą 9.1 znajdującą się w górze reaktora. W sferze 10 kuliste elementy grafitowe 6 spełniają rolę spowalniaczy neutronów i pod wpływem siły grawitacji przemieszczają się w jej dolną część i są systematycznie

odprowadzane drugą rurą 9.2 znajdującą się w dole reaktora. Przy stabilnej pracy reaktora w stanie krytycznym gęstość mocy reaktora wynosi 2,6 MW/m<sup>3</sup>. Poziom wypalenia sferycznych elementów paliwowych 4 jest w zakresie 140–180 GWd/tHM, a ciśnienie robocze w obiegu pierwotnym wynosi 1,2 MPa. Przy sterowaniu mocą reaktora przesuwają się odpowiednio pręty kontrolne 5 w prowadnicach 7. Zmienia się wówczas tempo reakcji rozszczepienia zachodzących w rdzeniu reaktora 3 na skutek zmiany ilości pochłanianych lub spowalnianych neutronów przez substancje, z których zbudowane są pręty kontrolne.

Reaktor jądrowy chłodzony gazem w drugiej odmianie wykonania posiada prowadnice 7, które mają perforowaną powierzchnię tylko w obrębie rdzenia reaktora 3 i każda z nich na swoim końcu od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączona jest z wylotem gazowego chłodziwa 1.3. Pierwsze rury 8.1, 8.2, które połączone są pierwszymi końcami z rdzeniem reaktora 3 połączone są również poprzez swoją perforowaną powierzchnię z przestrzenią przepływu chłodziwa 2.1, a drugimi końcami od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączone są z wlotami gazowego chłodziwa 1.4.

Działanie reaktora jądrowego chłodzonego gazem w drugiej odmianie wykonania jest analogiczne i uzyskiwane są podobne parametry pracy jak w pierwszej odmianie. Różnica polega na tym, że gazowe chłodziwo doprowadzane jest do reaktora poprzez wloty gazowego chłodziwa 1.4 i pierwszymi rurami 8.1, 8.2 kierowane jest bezpośrednio do rdzenia reaktora 3. Jest też poprzez perforowaną powierzchnię pierwszych rur 8.1, 8.2 doprowadzane do przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 i opływa rdzeń reaktora 3 schładzając warstwę reflektora 2. Z przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 gazowe chłodziwo przedostaje się poprzez perforowaną przegrodę 2.2 do rdzenia reaktora 3. W rdzeniu reaktora 3 chłodziwo przechodząc pomiędzy sferycznymi elementami paliwowymi 4 odbiera od nich generowane ciepło, a następnie jest odprowadzane poprzez perforowaną powierzchnię prowadnic 7 prętów kontrolnych 5. W dalszej kolejności jest przez wyloty gazowego chłodziwa 1.3 odprowadzane poza reaktor i kierowane do wymiennika ciepła.

Reaktor jądrowy chłodzony gazem będący przedmiotem wynalazku może być uważany za bezpieczny dla środowiska. Osiągane maksymalne temperatury w rdzeniu reaktora 3 uniemożliwiają jego stopienie. Nie naruszana jest też strukturalna integralność stosowanego paliwa jądrowego. Czas pracy reaktora może być liczony w dziesięcioleciach, szczególnie gdy w przyszłości stosowane będzie efektywniejsze sferyczne paliwo jądrowe. Końcowa radioaktywność tego reaktora nie powinna przekraczać poziomu określanego dla obecnie najbezpieczniejszych komercyjnych reaktorów jądrowych.

RZECZNIK PATENTOWY

*Maciej Nowicki*  
mgr inż. Maciej Nowicki  
Nr wp. 3476

Wykaz oznaczeń:

- 1 – obudowa reaktora
- 1.1, 1.4 – wlot gazowego chłodziwa
- 1.2, 1.3 – wylot gazowego chłodziwa
- 2 – reflektor
- 2.1 – przestrzeń przepływu chłodziwa
- 2.2 – perforowana przegroda
- 3 – rdzeń reaktora
- 4 – sferyczny element paliwowy
- 5 – pręt kontrolny
- 6 – kulisty element grafitowy
- 7 – prowadnica
- 8.1, 8.2 – pierwsza rura
- 9.1, 9.2 – druga rura
- 10 – sfera