

## Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony gazem

Przedmiotem wynalazku jest wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony gazem z rdzeniem wypełnionym sferycznymi elementami paliwowymi.

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, 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 ([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 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, 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.

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 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 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 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 przechodzenie gazu o wysokiej temperaturze z reaktora do układu odbierającego ciepło.

Rozwiązania systemów wyładowczych kulistych elementów paliwowych lub moderatorów z reaktora jądrowego z granulowanym złożem przedstawiają opisy zgłoszeń patentowych GB941108A i CA2437154A1. Z kolei opis zgłoszenia patentowego DE3121379A1 ujawnia konstrukcję rury wyładowczej kulistych elementów paliwowych dla reaktora jądrowego chłodzonego gazem.

Celem wynalazku jest wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony gazem, który można zakwalifikować do czwartej generacji. Reaktor ten charakteryzuje się zwiększonym bezpieczeństwem, niezawodnością wytwarzania energii oraz zmniejszonym oddziaływaniem na środowisko. Specjalna konstrukcja i zastosowane sferyczne elementy paliwowe a także niekonwencjonalny układ chłodzenia czynią go odpornym na awarie spowodowane np. brakiem cyrkulacji chłodziwa czy utratą ciśnienia chłodziwa w reaktorze. Wyeliminowana jest też potrzeba stosowania wielu układów zabezpieczających przed awarią. W przypadku nadzwyczajnych zdarzeń ograniczone są ich negatywne skutki.

Przedmiotem wynalazku jest wysokotemperaturowy 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 i pręty kontrolne. Jego istotą jest to, że w cylindrycznej obudowie reaktora z podstawami w kształcie stożka i wlotem gazowego chłodziwa w dolnej podstawie oraz otworem w górnej podstawie umieszczona jest warstwa reflektora, po której wewnętrznej stronie znajduje się przestrzeń przepływu chłodziwa połączona z wlotem gazowego chłodziwa i oddzielona perforowaną przegrodą od rdzenia reaktora wypełnionego sferycznymi elementami paliwowymi i z promieniowo ułożonymi prętami kontrolnymi umieszczonymi w prowadnicach przechodzących przez przestrzeń przepływu chłodziwa, warstwę

reflektora i obudowę reaktora. W górnej podstawie obudowy reaktora znajdują się przewody doprowadzające sferyczne elementy paliwowe do rdzenia reaktora. Pierwszy przewód doprowadzający połączony jest z zasobnikiem niewypalonych sferycznych elementów paliwowych, a drugi przewód doprowadzający połączony jest z zasobnikiem częściowo wypalonych sferycznych elementów paliwowych. W dolnej podstawie obudowy reaktora znajduje się otwór odprowadzający sferyczne elementy paliwowe z rdzenia reaktora.

W odmianie wynalazku otworem w górnej podstawie obudowy reaktora jest wylot gazowego chłodziwa, zaś prowadnice w obrębie rdzenia reaktora i przestrzeni przepływu chłodziwa mają perforowaną powierzchnię i każda z nich jednym końcem, od zewnętrznej strony obudowy reaktora, połączona jest z doprowadzeniem gazowego chłodziwa a drugim końcem połączona jest z perforowanym kolektorem wlotowym chłodziwa znajdującym się w środku rdzenia reaktora.

Alternatywnie otworem w górnej podstawie obudowy reaktora jest wlot gazowego chłodziwa, zaś prowadnice w obrębie rdzenia reaktora mają perforowaną powierzchnię i każda z nich jednym końcem, od zewnętrznej strony obudowy reaktora, połączona jest z odprowadzeniem gazowego chłodziwa a drugim końcem połączona jest z perforowanym kolektorem wylotowym chłodziwa znajdującym się w środku rdzenia reaktora.

Korzystnym skutkiem zastosowania wynalazku są relatywnie małe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Jest to szczególnie ważne w przypadku budowy małych, modułowych układów generujących energię składających się z wysokotemperaturowego reaktora jądrowego zestawionego z wytwornicą pary lub turbiną gazową. Wysoka temperatura chłodziwa na wylocie z rdzenia reaktora może być wykorzystana do zasilania takich procesów technologicznych jak gazyfikacja węgla albo wytwarzanie wodoru.

Przedmiot wynalazku w odmianach wykonania uwidoczniiony jest na schematycznym rysunku, na którym poszczególne figury przedstawiają:

Fig. 1 – widok perspektywiczny z przekrojem wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem w pierwszej odmianie wykonania,

Fig. 2 – przekrój wzdłuż linii A-A wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem w pierwszej odmianie wykonania z Fig. 1,

Fig. 3 – widok perspektywiczny z przekrojem wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem w drugiej odmianie wykonania,

Fig. 4 – przekrój wzdłuż linii B-B wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem w drugiej odmianie wykonania z Fig. 3.

Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony gazem w pierwszej odmianie wykonania przedstawionej na rysunku składa się z cylindrycznej obudowy reaktora 1 z podstawami w kształcie stożka, która umieszczona jest w betonowo-stalowej osłonie biologicznej. Obudowa reaktora 1 ma średnicę 4,3 m i wysokość 4 m i wykonana jest ze stali o grubości 0,2 m. W dolnej podstawie obudowy reaktora 1 umieszczony jest wlot gazowego chłodziwa 1.1, a w górnej podstawie znajduje się otwór 1.2, który jest wylotem gazowego chłodziwa. Jako chłodziwo stosowany jest nieaktywny chemicznie hel. Na wewnętrznej stronie obudowy reaktora 1 umieszczona jest warstwa reflektora 2 o grubości 0,8 m, która wykonana jest z bloków grafitu o wysokiej czystości. Za warstwą reflektora 2 w kierunku środka reaktora znajduje się przestrzeń przepływu chłodziwa 2.1 o szerokości 0,3 m, która połączona jest z wlotem gazowego chłodziwa 1.1 i oddzielona perforowaną przegrodą 2.2 od rdzenia reaktora 3. Perforowana przegroda 2.2 jest w postaci ciągnionej siatki o grubości 0,04 m i kwadratowych oczkach 0,03x0,03 m i wykonana jest ze stopu żelaza z berylem. Rdzeń reaktora 3 ze złożem usypanym wypełnia ok. 100 000 sferycznych elementów paliwowych 4.1, 4.2 o średnicy 6 cm. Składają się one ze sprasowanego ceramicznego paliwa jądrowego typu TRISO-BISO i zawierają ok. 1 g uranu U-235 w postaci dwutlenku uranu  $\text{UO}_2$  i dwuwęglu uranu  $\text{UC}_2$ . Zawierają one także paliworodny tor Th-232 w postaci dwutlenku toru  $\text{ThO}_2$ . Wewnątrz rdzenia reaktora 3 ułożone są promieniowo pręty kontrolne 5, którymi są wykonane ze stopu srebra, indu i kadmu pręty regulacyjne oraz zawierające węglík boru pręty kompensacyjne i bezpieczeństwa. Pręty kontrolne 5 umieszczone są w prowadnicach 6 przechodzących przez przestrzeń przepływu chłodziwa 2.1, warstwę reflektora 2 oraz obudowę reaktora 1 i osłonę biologiczną. Prowadnice 6 w obrębie rdzenia reaktora 3 i przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 mają perforowaną powierzchnię. Każda z prowadnic 6 jednym końcem od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączona jest z doprowadzeniem gazowego chłodziwa a drugim końcem połączona jest z perforowanym kolektorem wlotowym chłodziwa 8.1 znajdującym się w środku rdzenia reaktora 3. Prowadnice 6 i kolektor wlotowy chłodziwa 8.1 wykonane są ze stopu żelaza z berylem. W górnej podstawie obudowy reaktora 1 znajdują się wykonane ze stopu żelaza z berylem przewody doprowadzające 7.1, 7.2 sferyczne elementy paliwowe 4.1, 4.2 do rdzenia reaktora 3. Pierwszy przewód doprowadzający 7.1 połączony jest z zasobnikiem niewypalonych sferycznych elementów paliwowych 4.1, a drugi przewód doprowadzający 7.2 połączony jest z zasobnikiem częściowo wypalonych sferycznych elementów paliwowych 4.2. W dolnej podstawie obudowy reaktora 1 znajduje się otwór odprowadzający 7.3 sferyczne elementy paliwowe 4.1, 4.2 z rdzenia reaktora 3.

Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony gazem w drugiej odmianie wykonania posiada budowę analogiczną jak w pierwszej odmianie wykonania z tym, że w górnej podstawie obudowy reaktora 1 znajduje się otwór 1.2, który jest wlotem gazowego chłodziwa. Prowadnice 6 mają perforowaną powierzchnię tylko w obrębie rdzenia reaktora 3 i każda z nich jednym końcem od zewnętrznej strony obudowy reaktora 1 połączona jest z odprowadzeniem gazowego chłodziwa a drugim końcem połączona jest z perforowanym kolektorem wylotowym chłodziwa 8.2 znajdującym się w środku rdzenia reaktora 3.

Działanie wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem w pierwszej odmianie wykonania polega na tym, że umieszczone w rdzeniu reaktora 3 sferyczne elementy paliwowe 4.1, 4.2 na skutek zachodzących w nich reakcji rozszczepienia jąder izotopów uranu generują ciepło. Odbiór tego ciepła realizuje się za pomocą gazowego chłodziwa, które doprowadza się do reaktora poprzez wlot gazowego chłodziwa 1.1 w dolnej podstawie obudowy reaktora 1. Za wlotem gazowego chłodziwa 1.1 najpierw kieruje się je do przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1, w której opływa rdzeń reaktora 3 schładzając warstwę reflektora 2 i z której chłodziwo przedostaje się poprzez perforowaną przegrodę 2.2 do rdzenia reaktora 3. Chłodziwo do przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1 podaje się również poprzez perforowaną powierzchnię prowadnic 6 prętów kontrolnych 5, do których to prowadnic dostarcza się je z doprowadzenia gazowego chłodziwa na zewnętrznej stronie obudowy reaktora 1. Chłodziwo do rdzenia reaktora 3 doprowadza się także bezpośrednio poprzez perforowaną powierzchnię prowadnic 6 jak również poprzez połączony z nimi perforowany kolektor wlotowy chłodziwa 8.1 znajdujący się w środku rdzenia reaktora 3. W rdzeniu reaktora 3 chłodziwo przepływa pomiędzy sferycznymi elementami paliwowymi 4.1, 4.2 i odbiera od nich wytwarzane ciepło. Nagrzane chłodziwo odprowadza się przez otwór 1.2 w górnej podstawie obudowy reaktora 1 będący wylotem gazowego chłodziwa i kieruje się do wymiennika ciepła. Sferyczne elementy paliwowe 4.1, 4.2 dostarcza się w sposób ciągły do rdzenia reaktora 3 z ich pojemników za pomocą przewodów doprowadzających 7.1, 7.2 znajdujących się w górnej podstawie obudowy reaktora 1. Aby równomiernie rozłożyć paliwo w rdzeniu reaktora 3 i utrzymywać jego termiczną jednorodność pierwszy przewód doprowadzający 7.1 dostarcza niewypalone sferyczne elementy paliwowe 4.1 do brzegowej części rdzenia reaktora 3, a drugi przewód doprowadzający 7.2 dostarcza częściowo wypalone sferyczne elementy paliwowe 4.2 do środkowej części rdzenia reaktora 3. Te ostatnie są elementami recyrkulowanymi i zakwalifikowane zostały do ponownego użytkowania i generowania ciepła. W rdzeniu reaktora 3 sferyczne elementy paliwowe 4.1, 4.2 przemieszczają się pod wpływem siły grawitacji w kierunku otworu odprowadzającego 7.3 znajdującego się w dolnej podstawie obudowy reaktora 1. Poszczególne sferyczne elementy paliwowe 4.1, 4.2 odprowadzane są poza reaktor po średnim okresie ich użytkowania wynoszącym ok. osiem miesięcy i są poddawane klasyfikacji według stopnia ich wypalenia. Wypalone są kierowane do przechowalnika a następnie do zakładu przerobu wypalonych elementów paliwowych. Częściowo wypalone są zawracane do reaktora. W stanie krytycznym przy stabilnej pracy reaktora chłodziwo na wlocie gazowego chłodziwa 1.1 ma temperaturę 270 °C a na wylocie gazowego chłodziwa przez otwór 1.2 ma temperaturę 950 °C. Ciśnienie robocze w obiegu pierwotnym wynosi 1,1 MPa. Dzięki odporności zastosowanych elementów paliwowych na stopień poziom ich wypalenia może osiągać wartość 160 GWd/tHM. Gęstość mocy reaktora wynosi 2,5 MW/m<sup>3</sup>. Sterowanie mocą reaktora realizuje się poprzez odpowiednie przesuwanie prętów kontrolnych 5 w prowadnicach 6 znajdujących się w rdzeniu reaktora 3. Szybkość zachodzących reakcji jądrowych kontroluje się wówczas dzięki zmianom pochłaniania lub spowalniania neutronów przez substancje, z których zbudowane są pręty kontrolne.

Działanie wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem w drugiej odmianie wykonania polega na tym, że gazowe chłodziwo doprowadza się do reaktora poprzez wlot gazowego chłodziwa 1.1 w dolnej podstawie obudowy reaktora 1 oraz przez otwór 1.2 w górnej podstawie obudowy reaktora 1 będący wlotem gazowego chłodziwa. Doprowadzane chłodziwo kieruje się najpierw do 5 przestrzeni przepływu chłodziwa 2.1, w której opływa rdzeń reaktora 3 schładzając warstwę reflektora 2. Z tej przestrzeni chłodziwo przedostaje się poprzez perforowaną przegrodę 2.2 do rdzenia reaktora 3. W rdzeniu reaktora 3 chłodziwo przechodząc pomiędzy sferycznymi elementami paliwowymi 4.1, 4.2 odbiera od nich wytwarzane ciepło. Nagrzane chłodziwo odprowadza się poprzez perforowany kolektor 10 wylotowy chłodziwa 8.2 znajdujący się w środku rdzenia reaktora 3 oraz perforowaną powierzchnię prowadnic 6 prętów kontrolnych 5 i dalej przez odprowadzenia gazowego chłodziwa poza reaktor skąd chłodziwo kieruje się do wymiennika ciepła.

Wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony gazem będący przedmiotem wynalazku może być uważany za bezpieczny i bezawaryjny. Osiągane maksymalne temperatury w rdzeniu reaktora 3 uniemożliwiają jego stopienie. Nie jest naruszana strukturalna integralność stosowanego paliwa 15 jądrowego. Można założyć, że reaktor będzie wydajnie użytkowany przez wiele dziesiątek lat, szczególnie gdy stosowane będzie efektywniejsze sferyczne paliwo jądrowe. Końcowa radioaktywność tego reaktora nie powinna przekraczać poziomu określonego dla obecnie użytkowanych najbezpieczniejszych komercyjnych reaktorów jądrowych.

RZECZNIK PATENTOWY

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

Wykaz oznaczeń:

- 1 – obudowa reaktora
- 1.1 – wlot gazowego chłodziwa
- 1.2 – otwór w górnej podstawie obudowy reaktora
- 2 – reflektor
- 2.1 – przestrzeń przepływu chłodziwa
- 2.2 – perforowana przegroda
- 3 – rdzeń reaktora
- 4.1 – niewypalony sferyczny element paliwowy
- 4.2 – częściowo wypalony sferyczny element paliwowy
- 5 – pręt kontrolny
- 6 – prowadnica
- 7.1 – pierwszy przewód doprowadzający sferyczne elementy paliwowe
- 7.2 – drugi przewód doprowadzający sferyczne elementy paliwowe
- 7.3 – otwór odprowadzający sferyczne elementy paliwowe
- 8.1 – kolektor wlotowy chłodziwa
- 8.2 – kolektor wylotowy chłodziwa