

Wzrost zainteresowania małymi elektrowniami jądrowymi

Autor: dr Grzegorz Jezierski

(„Energia Gigawat” – 12/2005)

Reaktory jądrowe o małej mocy, a więc i mniejsze pod względem konstrukcyjnym, stanowią doskonale źródło energii dla potrzeb wojska, szczególnie jeśli mogą być przenoszone z miejsca na miejsce. Armia amerykańska od samego początku rozwoju energetyki jądrowej wykazywała duże zainteresowanie elektrowniami niewielkich rozmiarów. Z początkiem 1953 r., kiedy to w rejonie północnego koła podbiegunowego zainstalowano dziesiątki bezzałogowych stacji radarowych w celu stałego śledzenia ewentualnego ataku powietrznego ze strony Związku Radzieckiego, problemem stało się ciągle, uciążliwe dostarczanie paliwa do ich siłowni Diesla. Stąd też armia amerykańska była bardzo zainteresowana wykorzystaniem energii jądrowej do zasilania tychże stacji.

W ramach porozumienia zawartego pomiędzy Komisją Energii Atomowej (AEC) a Korpusem Wojsk Inżynieryjnych (United States Army Corps of Engineers, USACE), uruchomiono program rozwoju małych reaktorów jądrowych na potrzeby wojska, tzw. Army Nuclear Power Program (ANPP). Na zlecenie dowódcy wojsk inżynieryjnych gen. Samuela Sturgisa opracowano w Oak Ridge (Tennessee) pod kierunkiem Alfreda Bocha, konstrukcję małego reaktora wojskowego. Prototyp tego reaktora, z przeznaczeniem głównie dla celów szkoleniowych SM-1 o mocy 2 MW_e, uruchomiono w kwietniu 1957 r., a więc kilka miesięcy wcześniej niż pierwszą dużą elektrownię jądrową w Shippingport (Pensylwania) w Forcie Belvoir (Virginia), zaledwie 18 mil od Białego Domu. Dostawcą reaktora SM-1, podobnie zresztą jak i dwóch kolejnych, była firma Alco Products (dawna American Locomotive Company) z Schenectady (stan Nowy Jork). Warto podkreślić, iż była to wówczas jedyna w świecie firma, której pracowały jednocześnie trzy elektrownie jądrowe (SM-1, SM-1A i PM-2A).

W 1962 r. w Forcie Greeley w pobliżu miasta Delta Junction na Alasce uruchomiono kolejny reaktor SM-1A o mocy elektrycznej 2 MW oraz dostarczający ciepło w ilości 17,1 t pary na godzinę. Reaktor SM-1 pracował do 1972 r., a SM-1A do 1973 r. Były to jeszcze reaktory stacjonarne, ale już wkrótce pojawiły się reaktory przewoźne (mobilne). Pierwszy w świecie reaktor przewoźny to PM-2A o mocy 2 MW_e, uruchomiony w lutym 1961 r. w bazie wojskowej Camp Century, ok. 240 km od Thule na Grenlandii. Montaż tego reaktora wykonało pod kierunkiem jednego oficera 18 przeszkolonych specjalistów w ciągu 77 dni. Z kolei w bazie Sundance (Wyoming) w 1962 r. Amerykańskie Siły Powietrzne (U.S. Air Force) uruchomiły reaktor PM-1 o mocy 1,25 MW_e, dostarczony przez firmę The Martin Company (później znana jako Martin-Marietta, a obecnie jako Lockheed-Martin). Reaktor ten służył do zasilania m.in. stacji radarowej ukierunkowanej na wykrywanie pocisków nadlatujących od strony bieguna północnego, a wystrzelonych ze Związku Radzieckiego. Również w bazie McMurdo na Antarktydzie amerykańska marynarka wojenna (U.S. Navy) uruchomiła reaktor PM-3A, zwany popularnie „Nukey Poo”, o mocy początkowo 1,5 MW_e, a później 1,75 MW_e. Reaktor został tak zaprojektowany, by mógł być dostarczony na miejsce samolotem transportowym, aczkolwiek w tym przypadku został dowieziony na miejsce drogą morską, tj. statkiem USS Arneb. Reaktor PM-3A uruchomiono w trzy miesiące po dostarczeniu go na miejsce. W latach 1962-1972 wyprodukował on 78 mln kWh energii elektrycznej, a ciepło odpadowe wykorzystywane było z kolei do odsalania wody morskiej.

Ciekawym wykorzystaniem reaktora jądrowego MH-1A o mocy 10 MW_e było zainstalowanie go na zmodyfikowanym statku Sturgis typu Liberty. Statek ten zacumowany w strefie Kanału Panamskiego dostarczał energię elektryczną w latach 1968-1975 (okres kiedy Stany Zjednoczone prowadziły wojnę w Wietnamie), umożliwiając tym samym przepływanie przez kanał 2500 statków rocznie więcej niż zwykle. W 1976 r. statek Sturgis po zakończeniu misji został odholowany z Kanału Panamskiego do James River Fleet.

Nie powiodły się natomiast próby zbudowania małej, zwartej elektrowni, tj. reaktora sprzężonego bezpośrednio z turbozespołem, typ ML-1. Miał to być unikalny „reaktor w walizce”, moderowany wodą i chłodzony azotem. W celu zminimalizowania masy i objętości reaktora zaprojektowano układ chłodzenia przy użyciu azotu pod ciśnieniem 0,9 MPa. Temperatura azotu na wlocie do reaktora wynosiła 425 st. C, a na wylocie 650 st. C, przy czym odległość fizyczna między wlotem i wylotem wynosiła zaledwie 60 cm. Ponadto ograniczono nieco osłony (również w celu zmniejszenia masy przy transporcie), tak że strefa wyłączona dla ludzi wynosiła 150 m. Całość elektrowni mieściła się w sześciu kontenerach i ważyła 44 t, co dawało możliwość transportu nie tylko koleją, ale również samolotem transportowym. Reaktor zaprojektowany na 300 kW_e osiągnął moc zaledwie 140 kW_e i niestety pracował tylko kilkadziesiąt godzin. W 1963 r. elektrownia ML-1 została ostatecznie zamknięta.

Uwzględniając kolejny reaktor wojskowy SL-1 uruchomiony w celach szkoleniowych (dla przyszłych załóg elektrowni wojskowych) w styczniu 1961 r. w ośrodku badawczym INEL (Idaho National Engineering Laboratory w stanie Idaho), ogółem w ramach programu ANPP zbudowano i uruchomiono osiem reaktorów. Należy wyjaśnić, iż we wszystkich wyżej wymienionych przypadkach związanych z zamknięciem elektrowni, paliwo jądrowe zostało z nich usunięte, pozostała część technologiczna zdekontaminowana i częściowo zdemontowana.

Również w Związku Radzieckim zaprojektowano i uruchomiono na przełomie lat 1950/60 mobilne reaktory jądrowe, służące do zasilania w energię miejsc znacznie oddalonych od sieci. Ich przeznaczeniem było dostarczanie energii elektrycznej oraz ciepła w mało zaludnionych okręgach dalekiej północy. W 1961 r. rozpoczęto w Obnińsku eksploatację eksperymentalnej ruchomej elektrowni jądrowej TES-3 (Transportnaja ElektroStancja wersja nr 3) o mocy 1,5 MW_e. Zastosowano w niej reaktor z moderatorem oraz chłodzeniem wodnym pod ciśnieniem. Konstrukcja siłowni składała się z czterech dużych segmentów, które można było transportować na czterech platformach samochodowych lub jednym wagonie kolejowym. Jej zaletą było głównie to, że dla jej eksploatacji nie potrzeba było żadnych budynków. TES-3 była też traktowana jako wojskowa elektrownia ruchoma. Na bazie doświadczeń z TES-3, która pracowała do 1966 r., skonstruowano i uruchomiono następny rodzaj małej przewoźnej siłowni jądrowej ARBUS (Arkticzeskaja Reaktornaja Błoczna Ustanowka) o mocy 750 kW_e. Jako moderatora oraz chłodziwa w obiegu pierwotnym użyto tutaj cieczy organicznej, tj. oleju napędowego. Całość urządzeń ARBUSA stanowiła masę 360 t. W 1965 r. uruchomiono kolejną pilotową siłownię jądrową VC-50 o większej mocy, tj. 50 MW_e.

Aktualnie po wielu latach przerwy zarówno w Stanach Zjednoczonych, jak i w Federacji Rosyjskiej wznowiono prace nad nowymi rozwiązaniami małych reaktorów mobilnych określanymi jako SMR (Small Modular Reactor). Słowo modularny oznacza, iż reaktory te są wytwarzane fabrycznie jako moduły możliwe do transportowania, które składa się na placu budowy. Wymienić tutaj należy zaawansowane już prace prowadzone w Argonne National

Laboratory nad reaktorem STAR-LM (Secure Transportable Autonomous Reactor - Liquid Metal) o mocy 300-400 MW_{th}, czy jego odmianą do wytwarzania wodoru - STAR-H2 oraz na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley nad reaktorem ENHS (Encapsulated Nuclear Heat Source). Ostatnio trzy amerykańskie laboratoria tj. Lawrence Livermore, Los Alamos i wyżej wspomniane już Argonne zaprojektowały modułowy reaktor o nazwie SSTAR (small, sealed, transportable, autonomous reactor) co oznacza mały, zamknięty, przewoźny i autonomiczny reaktor. W reaktorze SSTAR paliwo jądrowe, ciekłe chłodziwo, jak i wytwornica pary zostały umieszczone wewnątrz zabezpieczającej obudowy, z możliwością bezpośredniego przyłączenia rurociągów do turbozespołu. Reaktor ten o mocy 10 do 100 MW_e i zakładanym czasie pracy bez przeładunku paliwa – 30 lat, to reaktor na neutrony prężkie, chłodzony ciekłym ołowiem. Właśnie z uwagi na wymagany długi czas pracy bez przeładunku paliwa, reaktor ten został zaprojektowany jako reaktor powielający, tj. wytwarzający podczas eksploatacji dodatkowo paliwo jądrowe, którym staje się Pu-239 z nierozszczepialnego U-238. Zastosowanie jako chłodziwa ciekłego metalu daje z kolei możliwość wykorzystania pompy elektromagnetycznej, tj. pompy pozbawionej jakichkolwiek części ruchomych. Całkowite wymiary tego reaktora to: długość ok. 15 m, średnica 3 m, masa nie przekracza 500 t (wersja 10 MW_e mniej niż 200 t), co umożliwia jego transport drogą morską lub lądową. Z uwagi na wysoką temperaturę pracy chłodziwa (ok. 800 st. C) może on być wykorzystywany także do produkcji wodoru. Amerykański Departament Energii przewiduje uruchomienie prototypu reaktora SSTAR ok. 2015 r.

Wszystkie wyżej wspomniane to reaktory bardzo zaawansowane technologicznie, również bezpieczniejsze i ekonomiczniejsze i zaliczane do reaktorów IV generacji.

Warto też przybliżyć nowy projekt rosyjskiej modułowej elektrowni jądrowej o nazwie Angstrom. Została ona zaprojektowana na bazie doświadczeń z reaktorami napędowymi do okrętów podwodnych. Elektrownia ta może być dostarczona w gotowych do montażu modułach (9 do 12 sztuk) i transportowana samolotem lub koleją. Może być również zamontowana na stałe na kolejowej platformie. Jest przewidziana do pracy w trudniejszych warunkach, tj. w strefie o podwyższonej sejsmiczności, w suchym klimacie oraz w zakresie temperatur otoczenia od -60 do +40 st. C. Może ona dostarczać energię elektryczną o mocy 6 MW_e oraz energię cieplną do 14 MW_{th}, jak również może być wykorzystana do odsalania wody morskiej ze zdolnością ok. 445 m sześć. na godzinę.

Głównym źródłem ciepła jest reaktor prężki, chłodzony ciekłym metalem, tj. stopem bizmutu i ołowiu (eutektyką Bi - 56% i Pb - 44%). Eutektyka ma szereg korzystnych właściwości jako chłodziwo reaktorowe, m.in. niską temperaturę topnienia (125 st. C), a wysoką temperaturę wrzenia (1670 st. C). Rdzeń reaktora ma średnicę zaledwie 79 cm, wysokość 70 cm, co przy mocy termicznej rdzenia 30 MW daje gęstość mocy 87 MW/m sześć. Ciepło z reaktora dostarczane jest do dwóch wytwornic pary (para o ciśnieniu 3,5 MPa i temperaturze 435 st. C), z których każda zasila niezależny turbozespół. Warto zaznaczyć, iż chłodzenie kondensatu odbywa się w obiegu zamkniętym, przy użyciu powietrza, stąd nie istnieje konieczność zewnętrznego źródła wody do chłodzenia. Masa całej elektrowni wynosi 60 do 220 t, w zależności od opcji i zewnętrznych warunków chłodzenia. Wymagany obszar pod zabudowę to 3,5 ha, natomiast strefa ochronna wokół elektrowni wynosi 1 km. Elektrownia Angstrom została przewidziana do pracy przy wykorzystaniu 8 tys. godzin rocznie. Przeładunek paliwa odbywa się raz na 10–15 lat. Jej obsługę stanowi 26 pracowników. Koszt produkcji energii elektrycznej ma wynieść 8 centów za kWh, energii cieplnej 24 centy za 1 GJ, a koszt odsalania wody morskiej odpowiednio 90 centów za 1m sześć. Końcowa cena takiej modułowej elektrowni szacowana jest na 26 mln USD i odpowiednio 33 mln USD z

wyposażeniem do odsalania wody morskiej.

Jeśli chodzi o aktualne rozwiązania rosyjskie w zakresie reaktorów mobilnych, to poza wyżej opisanym reaktorem Angstrom, skupiają się one głównie nad budową tzw. pływających elektrowni (elektrociepłowni) jądrowych o mocy 60 MW_e, na bazie reaktorów KLT-40, jakie stosowano w lodolamaczach i okrętach podwodnych. Byłyby one przeznaczone do zasilania przymorskich rejonów północno-wschodniej Rosji, oddalonych od sieci elektroenergetycznych czy ciepłowniczych, jak również do odsalania wody morskiej. Łącznie planuje się budowę 33 takich elektrowni w ciągu najbliższych 10–15 lat. Należy zauważyć, iż w rejonie koła podbiegunowego zamieszkuje w Federacji Rosyjskiej ok. 20 mln ludności. Przykładowe dane takiej pływającej elektrowni to: długość 150 m, szerokość 30 m, głębokość zanurzenia 4,5 m, projektowany czas eksploatacji 40 lat, czas pomiędzy przeładunkami paliwa 6 lat, personel 60 osób, szacunkowy koszt 109 milionów USD. Jako że jednostka ta nie jest wyposażona we własny napęd musi zostać doholowana na miejsce postoju (pracy) przez inny statek. Koszt produkowanej energii elektrycznej ocenia się na 10 centów/kWh, co w tamtych warunkach geograficznych jest ceną bardzo niską. Pierwsza taka pływająca elektrociepłownia ma być uruchomiona w porcie Pewek na Półwyspie Czukotka. Pływającymi elektrowniami (elektrociepłowniami) zainteresowane są także inne kraje, jak np. Chiny, Indonezja i Filipiny.

Z kolei japoński instytut Central Research Institute of Electric Power Industry (JCRIEPI) opracował projekt małej modułowej elektrowni jądrowej pod nazwą 4S „nuclear battery” (4S oznacza Super-Safe, Small i Simple, tzn. bardzo bezpieczny, mały i o nieskomplikowanej budowie). Konstrukcja tej elektrowni ma umożliwić transport jej modułów przy użyciu helikoptera. Reaktor jądrowy 4S to reaktor chłodzony ciekłym sodem o zakładanym czasie pracy bez przeładunku paliwa prawie 30 lat. Przewidywane są dwie wersje tego reaktora, tj. o mocy 10 i 50 MW_e. Japońska firma Toshiba Corporation (największy producent urządzeń dla energetyki jądrowej w Japonii) zamierza na swój koszt (25 mln USD) uruchomić demonstracyjną elektrownię 4S o mocy 10 MW_e w 2012 r. w miejscowości Galena nad rzeką Jukon, na północ od Anchorage na Alasce.

Mieszkańcy Galeny (750 osób) żyją w wyjątkowo trudnych warunkach klimatycznych - temperatura zimą spada do -50 st. C, do tego dochodzi brak światła dziennego podczas krótkich dni zimowych. Aktualnie mieszkańcy Galeny korzystają z energii elektrycznej wytwarzanej przez sześć generatorów Diesla (4300 kW). Jednakże z uwagi na kosztowny transport paliwa dostarczanego rzeką Jukon (w czasie gdy nie jest ona skuta lodem) płacą oni za prąd trzykrotnie więcej, niż wynosi średnia cena energii elektrycznej w Stanach Zjednoczonych. Przewiduje się iż koszt energii elektrycznej z reaktora 4S wyniesie 6 centów/kWh.

Myśli się również o budowie tzw. minireaktorów (czy mikroreaktorów) przewidzianych w przyszłości do zasilania stacji mieszkalnych na Marsie czy lokalizowanych w piwnicach bloków mieszkalnych tutaj na Ziemi. Przykładem takiego rozwiązania może być opracowany również w Japonii przez Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) minireaktor „Rapid-L”. Reaktor ten o mocy 200 kW_e i małych wymiarach (średnica 2 m, wysokość 6,5 m), chłodzony jest ciekłym sodem, a do sterowania mocą wykorzystuje ciekły lit Li-6 (czyli zamiast prętów sterujących mamy pasywny układ sterowania), co czyni go bezpiecznym. Wymiany paliwa dokonuje się po 10 latach eksploatacji.

Jak widać z powyższego krótkiego przeglądu, po 30-40 latach zastoju nastąpił wzrost zainteresowania małymi elektrowniami jądrowymi w wielu państwach świata.