

PŁYWAJĄCE ELEKTROWNIE JĄDROWE

Floating nuclear power plants

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W artykule przedstawiono elektrownie jądrowe budowane na statkach.

Abstract: The article discusses floating (floating nuclear power plant installed on the ships).

Słowa kluczowe: nuclear power plants, floating

Key words: elektrownie jądrowe, pływające

Wstęp

Od pewnego czasu na konferencjach naukowych prowadzona jest dyskusja na temat wykorzystania małych reaktorów jądrowych. Jednym z poruszanych zagadnień jest budowa pływających elektrowni jądrowych mogących dostarczać energię elektryczną w rejonach dostępnych jedynie drogą wodną.

Geneza powstania małych reaktorów

Od roku 1946, po zbudowaniu pierwszych bomb jądrowych, uruchomiono w Stanach Zjednoczonych liczne programy wojskowe poszukujące sposobów wykorzystania energii jądrowej w różnych zastosowaniach. Próbowano nawet wykorzystać reaktory na stopionych solach w silnikach bombowców (Main article: Aircraft Reactor Experiment np. wikipedia).

W 1954 r. rozpoczęto kolejny Wojskowy Program Jądrowy, którego celem było opracowanie małych wodnych reaktorów ciśnieniowych przeznaczonych do wytwarzania energii elektrycznej i celów grzewczych w trudno dostępnych obszarach głównie w odległych bazach wojskowych. Celem odrębnego programu jądrowego marynarki było opracowanie podobnych reaktorów dla łodzi podwodnych i napędu okrętów i statków transportowych. Pierwszy taki prototypowy mały reaktor SM-1 (*Stationary and Medium Size*) opracowany przez wojskowy zespół badawczy i zbudowany w Fort Belvoir nad rzeką Potomac w 1957 r. był wykorzystywany do celów szkoleniowych w wojskach lądowych, powietrznych i marynarce.

Pierwsza elektrownia jądrowa na barce

W sąsiedztwie tego ośrodka doświadczalnego zacumowano w roku 1966, pierwszą pływającą elektrownię jądrową MH-1A. Elektrownię umieszczono w kadłubie statku transportowego *Sturgis* (przed zmianą przeznaczenia *SS Charles H. Cugle*) typu Liberty produkowanego masowo w czasie

II wojny światowej. Ponieważ przewidywano, że będzie on w czasie pracy elektrowni stał przycumowany przy nadbrzeżu, ze względów ekonomicznych, usunięto silniki napędowe zyskując dodatkową przestrzeń. Budowę reaktora rozpoczęto w 1963 r. i uruchomiono go w styczniu 1967 r. Moc elektrowni wynosiła 10 MW. Paliwem w reaktorze był niskowzbożony uran (4-7%). Po pomyślnym przejściu badań eksploatacyjnych elektrownia została przeholowana do jeziora Gatun w Panamie latem 1968 r., gdzie wykorzystywano ją do zasilania urządzeń Kanału Panamskiego do 1975 r. W końcu 1976 r. rozpoczęto holowanie elektrowni do portu macierzystego wykonując po drodze remont w bazie wojskowej konieczny z powodu uszkodzeń powstałych w czasie sztormu. Ostatecznie *Sturgis* powrócił do Fort Belvoir w 1977 r., gdzie wyładowano paliwo, a następnie przeholowano go na rzekę James w pobliżu Fortu Eustis. W ciągu całego okresu pracy elektrowni dokonano pięciokrotnie wymiany paliwa w rdzeniu. Ostateczną likwidację elektrowni zaplanowano na 2014 r., ale wystąpiły znaczne opóźnienia i jej nie dokonano.



Fot. 1. *Sturgis MH-1A* w czasie testów przy nadbrzeżu Fort Belvoir (fot. US Army Corps of Engineers)

Photo.1. A *Sturgis MH-1A* during trainning on at Fort Belvior wharf (US Army Corps of Engineers)



Fot. 2. Sturgis MH-1A holowany w Panamie do miejsca postoju nad jeziorem Gatun (fot. US Army Corps of Engineers)
Photo. 2. Sturgis MH-1A in Panama towed to be moored at Gatun Lake (US Army Corps of Engineers)



Rys. 1. Planowane miejsca budowy i rozmieszczenia rosyjskich pływających elektrowni jądrowych (www.world-nuclear-news.org)
Fig. 1 Planned sites for the floating Russian power plants constructions

Elektrociepłownia jądrowa na barce, która może zaopatrzyć w energię elektryczną i ciepło 10-20 tys. miejscowość z dostępem do żeglownych zbiorników wodnych, znajdujących się w trudno dostępnym obszarze jest bardzo dobrym rozwiązaniem w pewnych przypadkach. Takich jak np. na wyspach, lub w obszarach arktycznych, gdzie dostęp w ciągu roku jest ograniczony i dowóz bądź dostarczanie kopalnych źródeł energii jest niemożliwe lub bardzo kosztowne. Wymiana paliwa w przemysłowych wodnych reaktorach ciśnieniowych jest zwykle przeprowadzana raz na dwa, trzy lata w granicach 20-30%. W prototypowej elektrowni MH-1A, intensywnie wykorzystywanej, wymieniano paliwo 5 razy w ciągu siedmiu lat eksploatacji. Tego rodzaju elektrociepłownia nie wymaga bardzo złożonej infrastruktury energetycznej na lądzie i dużej ilości personelu. Ze względu na niską emisyjność nie powoduje zmian w środowisku naturalnym.

Inne zastosowanie małych reaktorów

Najpowszechniejszym wykorzystaniem energii jądrowej do celów pokojowych jest produkcja energii elektrycznej. Próbowano, korzystając z bogatego doświadczenia stosowania napędu jądrowego na okrętach, zastosować analogiczne rozwiązania na frachtowcach. Zbudowano trzy takie jednostki *Savannah* w Stanach Zjednoczonych, *Otto Hahn* w Niemczech, *Siewmorput* w Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich, jednakże okazały się one zbyt kosztowne w eksploatacji, wymagały wysoko wykwalifikowanych załóg, dodatkowych kontroli i zaprzestano rozwijania tego kierunku wykorzystania energii jądrowej. W Japonii prowadzono prace badawcze budując statek *Mutsu*, ale również je przerwano. Jedynymi jednostkami „cywilnymi” z napędem jądrowym były i są lodołamacze opracowane i produkowane w Rosji (ZSRR). Pierwszym był lodołamacz *Lenin* z wodno-ciśnieniowymi reaktorami pracują-



Fot. 3. Projekt pływającej elektrowni jądrowej z urządzeniami nadbrzeżnymi według OKBM Afrikantow i Instytutu Badań i Rozwoju Atomenergoproekt z Niżnego Nowogrodu z dwoma reaktorami KLT-40S budowanej w stoczni w Petersburgu jako „Akademik Łomonosow” (fot. okbm.nnov.ru)

Photo. 3. A Project of floating nuclear power plant with on wharf equipment according to OJBM Afrikantow and Research and Development Institute and Development Institute Atomenergo from Nizhny Novogorod with two JCF 40S reactors under construction at St. Petersburg Shipyard to be name „Akademik Lomonosow” (Rosenergoatom – WNA)

cymi z niskowzbożonym (5%) uranem. Powstały późniejsze konstrukcje typu *Arktika*. Zebrano bardzo bogate doświadczenie w budowie niedużych reaktorów o mocy do 170 MW.

Pływające elektrownie

Zwiększone zainteresowanie w Rosji zasobami naturalnymi Arktyki, względy obronne otworzyły nowe perspektywy wykorzystania energii jądrowej, szczególnie budowy pływających elektrowni jądrowych. Bogate doświadczenie w budowie małych reaktorów daje pewność, że powstające konstrukcje będą niezawodne, bezpieczne i co bardzo ważne w większości już sprawdzone w eksploatacji. Modułowa konstrukcja reaktorów umożliwi szybszy montaż, dokładniejsze sprawdzanie poszczególnych elementów i zestawów modułowych.

Na początku 2000 r. Ministerstwo Energii Atomowej w Rosji podjęło decyzję budowy serii pływających elektrowni jądrowych. Przewidywana w Rosji seryjna produkcja pływających elektrowni pozwoliłaby obniżyć koszt produkcji od 25-30%.

Pierwotnie zakładano, że do roku 2015 zostanie wybudowanych siedem elektrowni. Pierwsza miała powstać w Siwierodwińsku koło Archangielska. Budowę barki *Akademik Łomonosow* rozpoczęto w 2007 r. w bazie łodzi podwodnych. Rok później budowę przeniesiono do stoczni w Petersburgu, w której miały powstać kolejne barki. Budowę kadłuba Akademika zakończono w czerwcu 2010 r. i w tymże roku został on zwodowany. Oddanie do użytku jest planowane w 2018 r. Budowa kolejnej pływającej elektrowni jest przewidywana w 2030 r.

W elektrowni wykorzystano dwa zmodyfikowane wodno-ciśnieniowe reaktory rosyjskiej konstrukcji typu KLT-40 stosowane w systemach napędowych lodołamaczy klasy *Tajmyr* pracujących obecnie w ujściach rzek syberyjskich. Zmodyfikowany reaktor KLT-40S ma moc 70 MW energii elektrycznej lub 300 MWth energii cieplnej wystarczającej do zasilania 200 tys. miasta. Energia może być też wykorzystana do odsalania wody morskiej. Wydajność odsalania wynosi 240 000 m³/dzień. Paliwem w reaktorze jest uran o wzbogaceniu 14%. Jest to istotna różnica w porównaniu z podobnymi reaktorami używanymi do napędów na okrętach gdzie wzbogacenie uranu wynosi zwykle ok. 90%. Czas „życia” reaktorów przewidziano na 40 lat. Co 12 lat elektrownia będzie odholowywana do stoczni w celu przeprowadzenia niezbędnych prac remontowych. Całkowita wymiana paliwa ma być dokonywana co 2-3 lata. Rdzeń reaktora zawiera 1273 kg uranu. W pływającej elektrowni znajdują się magazyny świeżego paliwa, magazyn paliwa wypalonego i przechowalniki odpadów radioaktywnych ciekłych i stałych. Magazynowanie wypalonego paliwa jest dwustopniowe. Bezpośrednio po wyjęciu z rdzenia jest ono schładzane w tzw. mokrym magazynie, by po ostudzeniu do odpowiedniej temperatury mogło być przeniesione do suchego przechowalnika, gdzie jest chłodzone powietrzem. Pozwala to na bezpieczne przechowywanie wypalonego paliwa przy zachowaniu niskich kosztów.

Długość barki na której znajduje się elektrownia licząc po pokładzie wynosi 140 m, szerokość 30 m, wysokość

burty 10 m, zanurzenie 5,6 m, wyporność 21000 t. Załoga elektrowni *Akademik Łomonosow* to 69 osób.

Bezpieczeństwo jądrowe, to osiągnięcie odpowiednich warunków eksploatacji, zapobieganie awariom i łagodzenie ich skutków, w wyniku czego zapewniona jest właściwa ochrona pracowników i ludności przed zagrożeniami wynikającymi z promieniowania jonizującego z obiektów jądrowych.

Ochrona i kontrola materiałów jądrowych

Specyficzny obiekt jakim jest pływająca elektrownia jądrowa wymaga dostosowania do obowiązujących regulacji prawnych krajowych i międzynarodowych. W Rosji, na użytkowanie pływających elektrowni jądrowych potrzebne jest wypełnienie wymogów krajowych przepisów bezpieczeństwa jądrowego, zaleceń Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA), przepisów Morskiego Rejestru Statków z napędem jądrowym, przepisów przemysłu stoczniowego, wymagań Międzynarodowej Organizacji Morskiej *International Maritime Organization* - specjalistyczna agencja ONZ odpowiedzialna za bezpieczeństwo transportu morskiego i zapobiegania zanieczyszczania morza przez statki). Powinny być też uwzględnione zalecenia dotyczące ochrony środowiska.

Odrębnym zagadnieniem jest wypełnienie zaleceń obowiązujących w przemysłowych elektrowniach jądrowych dotyczących systemu zabezpieczeń fizycznych (*safeguards*) wynikających z wypełnienia wymagań Międzynarodowego Traktatu o Nierozprzestrzenianiu Broni Jądrowej (*NPT - Non Proliferation Treaty*). Rosja (wraz z innymi potęgami nuklearnymi Wielka Brytania, Stany Zjednoczone, Francja, Chiny) jest gwarantem wypełnienia traktatu.



Fot. 4. Przenoszenie modułu reaktora KLT-40S (reaktor, wytwornice pary, pompy obiegu chłodzenia, stabilizatory ciśnienia) na barkę (fot. Rosenergoatom – WNA)

Photo.4. KLT – 40S reactor module (reaktor, steam generator, cooling circuit pump, pressure stabilizers) being transported onto a barque (Rosenergoatom – WNA)

Układ o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej nie dotyczy państw posiadających taką broń w czasie tworzenia systemu zabezpieczeń. Mogą one jednakże, zgłosić dobrowolnie materiały jądrowe lub obiekty jądrowe do kontroli przez MAEA na warunkach ogólnych Traktatu NPT (*Voluntary offer agree-*

ment – VOA - umowa o zabezpieczeniach dobrowolnych). Państwo może wycofać zgłoszone materiały jądrowe, jak i obiekty spod kontroli MAEA. Jednakże pewne działania np.: transfer materiałów jądrowych (głównie paliwa do elektrowni) do innych państw jest objęty kontrolą. Podstawowym zabezpieczeniem rosyjskich elektrowni pływających działających na terytorium Federacji Rosyjskiej jest państwowa własność obiektu, jego dokumentacji technicznej i produkcyjnej oraz organizacja rozbudowanego systemu kontroli. Dodatkowym zabezpieczeniem jest stosowanie niskowzbożonego paliwa uranowego nieprzydatnego do budowy jądrowych środków wybuchowych jak również przechowywanie świeżego i wypalonego paliwa wyłącznie na pokładzie barki elektrowni. W części lądowej elektrowni nie mogą być składowane żadne materiały jądrowe. W przypadku wykorzystywania elektrowni poza granicami kraju pozostaje ona zawsze pod jurysdykcją Federacji Rosyjskiej i może być obsługiwana wyłącznie przez rosyjskich specjalistów. Wymiana paliwa może być wykonywana w elektrowni, a wyładowanie wypalonego paliwa z czasowego przechowalnika na barce musi być dokonywana wyłącznie w przystosowanych do tego celu portach Federacji, do których elektrownia będzie odholowana. W czasie pracy elektrowni za granicą, za jej bezpieczeństwo odpowiada państwo w którym zainstalowana jest elektrownia łącznie z przestrzeganiem Traktatu NPT, jeśli jest ono jego sygnatariuszem. Warunki użytkowania elektrowni są wzorowane na przepisach dotyczących lodolamaczy z napędem jądrowym.

Ochrona fizyczna obiektu jądrowego obejmuje całość przedsięwzięć organizacyjnych i technicznych, mających na celu skuteczne zabezpieczenie materiałów jądrowych i obiektów jądrowych przed aktami terroru, dywersji, sabotażu i kradzieży.



Fot. 5. Wizja elektrowni pływającej na platformie (fot. MIT news Office)

Photo.5. A project of floating nuclear power plant on a platform (MIT news Office)

Ochrona fizyczna elektrowni pływającej jest bardziej złożona w porównaniu z ochroną elektrowni przemysłowych, ponieważ muszą współdziałać dwa odrębne systemy ochrony: dla części pływającej i części znajdującej się na lądzie. Ochrona barki musi uwzględniać zmieniające się warunki akwenu (np. przyprływy i odpływy, falowanie, prądy wodne, spływ kry), dostęp od strony wody na powierzchni i pod wodą w różnych warunkach pogodowych. Oczywiście stosowane są wszelkie dostępne sposoby monitoringu, systemy alarmowe, kontrole dostępu, zapory fizyczne. Na potrzeby każdej pływającej elektrowni, podobnie jak w elektrowniach przemysłowych są opracowywane indywidualnie procedury ochrony uwzględniające warunki cumowania.

Perspektywy rozwoju elektrowni pływających

Zainteresowanie kupnem lub wypożyczeniem elektrowni pływającej od Federacji Rosyjskiej zgłosiło wstępnie kilka państw w których występują niedobory słodkiej wody np. Malezja, Indonezja, Algieria, Namibia, Argentyna w celu odsalania wody morskiej.

Przewidywana użyteczność pływających elektrowni jądrowych spowodowała, że niektóre kraje (Chiny i Indonezja) będą opracowywać własne rozwiązania. Najbardziej zaawansowane prace są prowadzone w Chinach, gdzie planuje się rozpoczęcie budowy pierwszej chińskiej elektrowni pływającej, zbliżonej konstrukcyjnie do Akademika Łomonosowa w 2017 r. Według planów opublikowanych przez Chińską Narodową Komisję Rozwoju i Reform (*China's National Development and Reform Commission*) pierwsza elektrownia jądrowa powinna być uruchomiona w 2020 r. Źródłem energii elektrycznej, ciepła, będzie reaktor jądrowy ACPR50S o mocy 60 MW. Elektrociepłownia będzie mogła być również wykorzystywana do odsalania wody morskiej. Przewiduje się, że elektrownia będzie stabilnym i bezpiecznym źródłem energii wykorzystywanym przede wszystkim do eksploracji chińskich zasobów morskich, rozwoju ekonomicznej i silnej gospodarki morskiej. Projektowane są modyfikacje wersji reaktora jądrowego ACPR przeznaczone do wykorzystywania w trudno dostępnych rejonach górskich.

Zupełnie odmienną koncepcję budowy elektrowni pływających przedstawiło w kwietniu 2014 r. na sympozjum w Washingtonie dotyczącym Małych Reaktorów Modularnych, Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników z Instytutu Technologii w Massachusetts (*American Society of Mechanical Engineers, Massachusetts Institute of Technology*). Grupa naukowców i inżynierów zaproponowała zbudowanie pływającej elektrowni jądrowej na platformie podobnej do platform wiertniczych zakotwiczonej kilka mil od brzegu i połączonych z lądem kablem podwodnym. Z doświadczeń wiadomo, że nawet znaczne fale pływowe wywołane trzęsieniami ziemi są na głębokiej wodzie rozpraszane, co zmniejsza ryzyko podobnego zniszczenia obiektu jakie miało w miejsce w elektrowni w Fukushima. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest wykorzystanie dobrze opanowanych technologii budowy platform wiertniczych, sprawdzonych technologii wod-

nych reaktorów ciśnieniowych oraz łatwość konstrukcji systemów chłodzących, co może zapobiec stopieniu rdzenia lub uwolnienia materiałów radioaktywnych. Przedstawiona wstępna koncepcja elektrowni pływających z wykorzystaniem platform jest bardzo niepełna. Nie wspomniano w niej o sposobach składowania świeżego i wypalonego paliwa, sposobach wymiany paliwa (wyładowanie wypalonego paliwa z tymczasowych przechowalników) wymiany załogi, koniecznych przeglądach okresowych. Nie jest jasna również koncepcja ochrony fizycznej obiektu.

Dotychczas małe reaktory były wykorzystywane głównie jako elementy napędowe na okrętach, tzn. można uznać, że były wykorzystywane w celach militarnych. Wykorzystanie małych reaktorów do wytwarzania energii elektrycznej, ciepła dla zastosowań przemysłowych, ogrzewczych czy odsalania wody morskiej jest dość nową dziedziną i można się spodziewać, że ich cywilne przeznaczenie będzie się szybko rozwijać.

dr inż. Krzysztof Rzymowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Jądrowej,
Warszawa

Literatura:

- [1] Floating Nuclear Plants for Seawater Desalination, IAEA-ITEDOC-940 1995
- [2] KLT-40S, IAEA 2013
- [3] MH-1A en.wikipedia.org/wiki
- [4] Prospects of Floating Power Plants, JSC Concern Rosenergoatom, Directorate for floating nuclear power plant construction. www.rcrusia.com.ar/espanol/cooperation/pub1.pdf
- [5] I. A. Bylov, 6th INPRO Dialogue Forum on Global Nuclear Energy Sustainability: Licensing and Safety Issues for Small and Medium-sized Nuclear Power Reactors (SMRs) 29 July - 2 August 2013 IAEA Headquarters, Vienna
- [6] China plans a Floating Nuclear power Plant, www.forbes.com/.../china-builds-a-floating-nuclear-power-plant/
- [7] Akademik Łomonosow Floating Nuclear Power Plant, www.youtube.com/watch?v=YpZohKz5GKE
- [8] Akademik Łomonosow Floating Nuclear Power Plant, www.youtube.com/watch
- [9] Isolated Criticality. Russia's Floating Nuclear Power Plants, www.nti.org › Articles
- [10] Indonesian nuclear power proposals, Institute Nautilus for Security and Sustainability, nautilus.org
- [11] CGN's ACPR50S Project Approved by NDRC 2016-01-12, en.cgnpc.com.cn/n1017152/n1017227/.../content.ht...
- [12] David L. Chandler, *Floating Nuclear power plants could ride out tsunamis* MIT News, www.news.mit.edu 2014
- [13] Adam Rajewski, *Morskie napędy jądrowe*, Morza i Okręty Numer specjalny 1/2016 Warszawa