

NAPĘD JĄDROWY OKRĘTÓW WOJENNYCH

Nuclear warship propulsion

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono napęd jądrowy stosowany w okrętach podwodnych i nawodnych. Omówiono związane z nim zalety dla tego typu jednostek pływających oraz przedstawiono trudności związane z ich demontażem.

Summary: Nuclear warship and submarine propulsion with systems are presented, together with, discussion on its advantages and dismantling process problems.

Słowa kluczowe: napęd jądrowy, reaktor wodno ciśnieniowy, paliwo Caramel.

Key words: nuclear propulsion, pressurized water reactor, Caramel fuel type.

Obserwowane zmiany klimatyczne wymuszają konieczność znacznego ograniczenia wykorzystywania paliw kopalnych we wszystkich dziedzinach gospodarki. Dotyczy to również bardzo rozwiniętego transportu morskiego, który w dalekiej przeszłości korzystał wyłącznie ze źródeł odnawialnych głównie wiatru. Pełny powrót do tego sposobu wykorzystania sił przyrody nie wydaje się możliwy. Pewną alternatywą ograniczenia zużycia paliw kopalnych w transporcie morskim może być powszechniejsze wykorzystanie napędu jądrowego. Wprawdzie dotychczasowe próby się nie powiodły, częściowo ze względów politycznych, częściowo z obawy przed energetyką jądrową co miało pośrednio wpływ na ekonomię transportu, ale ogromny postęp w technice reaktorowej pozwala przewidywać zmiany. Zaletą napędu jądrowego jest szczególnie małe zużycie paliwa. Energia uzyskana z kilograma paliwa uranowego odpowiada energii otrzymanej z 70 t węgla. Inną zaletą wykorzystywaną obecnie na okrętach wojennych jest możliwość bardzo długiego przebywania na morzu bez zawijania do portów. Napęd jądrowy jest obecnie stosowany na okrętach podwodnych i w pływających miastach – lotniskowcach mających kilka reaktorów jądrowych wykorzystywanych do napędu i produkcji energii elektrycznej. Jedynymi cywilnymi jednostkami z napędem jądrowym są lodołamacze, w których budowie specjalizuje się Rosja. Zgromadzone dotychczas doświadczenie w wykorzystaniu energii jądrowej do napędu jednostek pływających jest znaczne i bardzo ułatwi jego rozwój w przyszłości. Przewidywana jest nawet budowa podwodnej, szybkiej, energooszczęd-

nej floty transportowej nienarażonej na anomalie pogodowe, huragany, sztormy przeznaczonej dla ładunków specjalnych.

Geneza powstania napędu jądrowego na morzu

Po wejściu pierwszych okrętów podwodnych do służby, w czasie I wojny światowej stały się one jednym z kluczowych oręży wojny morskiej i podstawowym środkiem zwalczania celów morskich przeciwnika. Marynarka Wojenna Stanów Zjednoczonych od końca I wojny światowej poszukiwała najlepszego napędu dla łodzi podwodnych zwiększającego ich zasięg i czas przebywania pod wodą. Prowadzono badania przy wykorzystaniu najnowszych osiągnięć technologicznych. Podstawową barierą ograniczającą była konieczność używania silników spalinowych wymagających dostępu tlenu.

W latach trzydziestych XX wieku, Leo Szilard przedstawił teoretyczną możliwość wywołania samopodtrzymującej się reakcji jądrowej, stanowiącej źródło energii. Nasuwającym się w tym czasie zastosowaniem nowego źródła energii było wykorzystanie go przede wszystkim do celów wojskowych. Jedną z koncepcji jeszcze przed potwierdzeniem rozważań teoretycznych, była propozycja fizyka Rossa Gunna z laboratorium badawczego Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych (*Naval Research Laboratory – NRL*) zastosowanie nowego źródła energii do ewentualnego napędu okrętów szczególnie łodzi podwodnych. Potwierdzenie rozważań teoretycznych uzyskano dopiero po uruchomieniu pierwszego reaktora jądrowego przez Enrico Fermiego i Leo Szilar-
da w 1942 r.

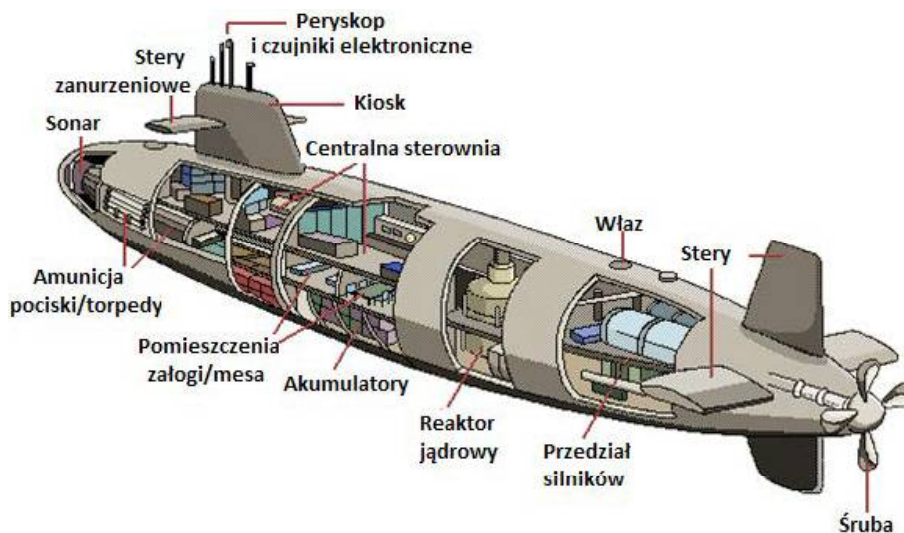
Propozycja Rossa Gunna zgłoszona w 1939 r. została po konsultacjach z Enrico Fermim i Leo Szilardem zaakceptowana i wstępne badania rozpoczęto już w 1940 r., przygotowując się do pozyskania odpowiedniego materiału jądrowego. W następnych latach naukowcy marynarki wojennej opracowali metody: separacji izotopów uranu za pomocą dyfuzji termicznej cieczy oraz produkcji fluorku uranu (UF_6). Obie te metody były niezbędne do produkcji uranu U^{235} i zostały wykorzystane do budowy bomby atomowej. Ze względu na absolutny priorytet projektu Manhattan prace nad ewentualnym napędem wykorzystującym energię jądrową na okrętach wojennych zostały zawieszono. Bezpośrednio po wojnie w 1946 r. Marynarka Wojenna rozpoczęła starania o uzyskanie środków na kontynuację zapoczątkowanego programu budowy napędu jądrowego dla okrętów podwodnych. Ostatecznie po wielu trudnościach biurokratycznych program budowy napędu jądrowego dla marynarki (*Naval Nuclear Propulsion Programme – NNPP*) został przyjęty w Stanach Zjednoczonych w 1948 r. i na zlecenie Komisji Energii Atomowej (*Atomic Energy Commission – AEC*) rozpoczęto prace badawcze. Miały być one ostatecznie prowadzone pod kierownictwem dwóch koncernów Westinghouse Electric Corporation i General Electric Company opracowujących niezależne koncepcje rozwiązań reaktorów jądrowych i sposobu realizacji napędu. Do rozwiązania powołano wiele nowych ośrodków badawczych. Podstawowy problem polegał na opracowaniu specjalnego niewielkiego gabarytowo reaktora jądrowego. W pierwszej koncepcji projektowano nawet jego umieszczenie na zewnątrz kadłuba. Innymi ważnymi problemami były: wybór moderatora neutronów i związanego z nim chłodzenia rdzenia, wzbogacenie uranu, konstrukcja bloków paliwowych, sposób wymiany paliwa i szereg wymagań dotyczących bezpieczeństwa, wyciszenia itd. Odebrane z rdzenia ciepło miało służyć do wytworzenia pary napędzającej turbinę parową. Brano pod uwagę trzy rodzaje chłodziwa: wodę, gaz i ciekły metal. Szybko zrezygnowano z gazu (helu). Powstały dwa projekty reaktor wodno ciśnieniowy (*Pressurized Water Reactor – PWR*) (Westinghouse) typ Mk I i reaktor chłodzony ciekłym sodem (General Electric) typ Mk A. Ostateczny wybór rodzaju reaktora miał nastąpić po sprawdzeniu prototypów w warunkach laboratoryjnych. Pierwszy okręt podwodny – **Nautilus** wszedł do służby w 1953 r. i był wyposażony w reaktor PWR. Konstrukcja reaktora była na tyle udana, że jej ulepszone wersje są stosowane prawie we wszystkich obecnie budowanych okrętach. Reaktor ten stał się rozwiązaniem modelowym dla reaktorów energetycznych. Chłodzenie za pomocą ciekłego sodu zastosowano na okręcie podwodnym typu **Seawolf**, który wszedł do służby w 1957 r., ale po próbach morskich reaktor zdemontowano.

Udane wprowadzenie napędu jądrowego na okrętach podwodnych spowodowało rewolucję techniczną

i rewolucję w taktycznym prowadzeniu działań wojennych. Rewolucja techniczna spowodowała ogromne zmiany w konstrukcji okrętów podwodnych, promieniując pośrednio na zmiany w technikach cywilnych. Do najważniejszych zmian w działaniach wojennych było całkowite wyeliminowanie konieczności częstego wynurzania w celu ładowania baterii pozwalających na działania w zanurzeniu, niewyobrażalne zwiększenie zasięgu i czasu przebywania w zanurzeniu, zwiększenie szybkości pod wodą i w wynurzeniu do 30 – 40 węzłów. Przykładem atrakcyjności wprowadzonych zmian może być podwodne opłynięcie świata trasą „wyznaczoną” przez Magellana przez **USS Triton** w ciągu 60 dni i 83 dniach zanurzenia.

Okręty podwodne, będąc w zanurzeniu około 500 m, są niewidoczne dla radarów samolotowych i satelitarnych systemów obserwacyjnych. Przepłynięcie pod lodem nad biegunem północnym przez okręt podwodny **Nautilus**, ten wyczyn powtarzany przez inne okręty Stanów Zjednoczonych i radzieckie zmienił zasadniczo doktryny wojenne obu państw. Wbudowanie małych reaktorów na okrętach podwodnych (niepotrzebne są np. magazyny paliwa) pozwoliło zaoszczędzić bardzo dużo miejsca wewnątrz okrętu, poprawiając warunki życiowe załogi. Na największym rosyjskim okręcie podwodnym **Akuła** (o długości 175 m prawie dwukrotnie dłuższym od **Nautilusa**) były baseny i sauna, sale kinowe. Wolną przestrzeń wykorzystano przede wszystkim do zmagazynowania nowego uzbrojenia głównie raketowego oraz na osłony bezpieczeństwa załogi żyjącej i nocującej przez ścianę z reaktorem jądrowym i głowicami. Problem braku osłon wystąpił na pierwszych rosyjskich okrętach podwodnych, które ze względów ekonomicznych i pośpiechu były całkowicie pozbawione osłon biologicznych. Ochrona przed promieniowaniem wykonana jest najczęściej w postaci płaszcza z ołowiu lub betonu otaczającego ze wszystkich stron reaktor. Oprócz tego stosowane są specjalnie opracowane materiały z tworzyw sztucznych (polietylen) i dodatkowo rozmieszcza się wokół reaktora zbiorniki z paliwem do silnika pomocniczego. Wokół rdzenia wewnątrz reaktora wbudowana jest osłona, która ma chronić stalową obudowę przed bombardowaniem neutronami powodującymi jej degradację. Stosowanie osłon zwiększa znacznie całkowity ciężar okrętu, są jednak niezbędne. Nie pozwalają na przedostanie się szkodliwych czynników poza chronione pomieszczenie.

Bardzo wysokie koszty budowy i eksploatacji okrętów z napędem jądrowym ograniczają ich dalszy rozwój w mniej zasobnych państwach. Dość istotną, niespodziewaną wadą, wynikającą ze stosowania napędu jądrowego jest konieczność wyciszenia pracy różnych elementów głównie pomp w systemie chłodzenia. Okręty te są głośniejsze niż okręty napędzane silnikami elektrycznymi.



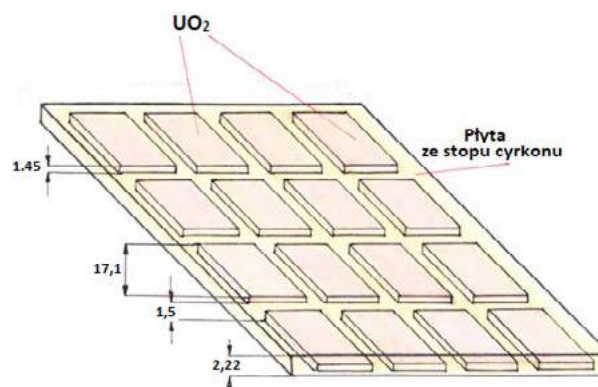
Rys. 1. Okręt podwodny Nautilus 1954 – 1980, Reaktor S2W o mocy 11 MW. Prędkość 22 w. W roku 1958 przełynął pod lodem biegun północny (według Ashokachakra.blogspot.com K. Rzymkowski)

Fig. 1. Nautilus 1954 – 1980 submarine 11 MW S2W reactor. Speed 22 knots. In 1958 it crossed the North Pole under ice (według Ashokachakra.blogspot.com K. Rzymkowski)

Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

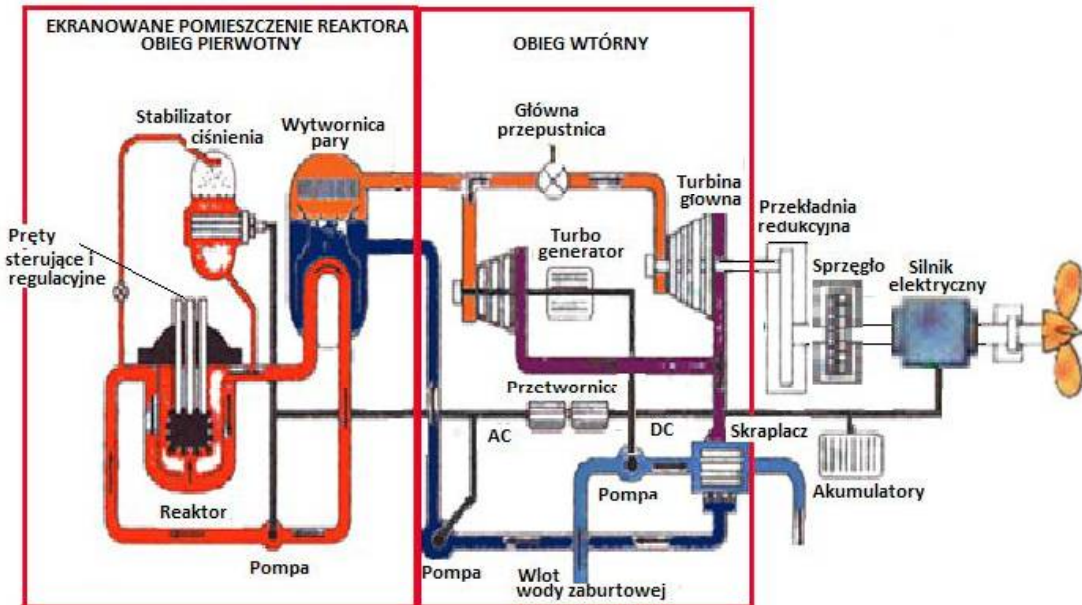
W siłowni okrętów z napędem jądrowym używa się jednej lub wielu turbin parowych. Siłownię parową zastosowano po raz pierwszy w 1997 r. na parowcu **Turbinia** – eksperymentalnym statku zbudowanym w 1894 r. w Newcastle upon Tyne przez Charlesa Parsonsa. Ponieważ źródłem ciepła jest reaktor jądrowy, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych zabezpieczeń przed promieniowaniem, co powoduje, że siłownia staje się bardzo ciężka, a ta ma decydujący wpływ na konstrukcję kadłuba. Aby nieco zniwelować tę wadę, umieszcza się siłownię blisko rufy, by skrócić długość wałów napędowych w ten sposób oszczędzając na całkowitej masie. Budowa siłowni jądrowej w okręcie podwodnym wymaga od konstruktorów, zintegrowania budowy wszystkich urządzeń siłowni ustawianych zwykle w osi pionowej ze względu na ograniczenia dostępnej przestrzeni. Szerokość (średnica) kadłuba wynosi około 10 m i zależy, oczywiście jak wszystko od typu okrętu. Decydujący wpływ na rozmiary fizyczne siłowni ma konstrukcja reaktora. Sam reaktor jest najczęściej walcem o średnicy około 1 m i wysokości 1,5 m, ale wszystkie ważne elementy (sterowanie prętami sterującymi i regulacyjnymi, wytwornice pary, stabilizator ciśnienia) są umieszczane nad nim. Najczęściej używanym typem reaktora jądrowego okrętowego jest reaktor wodny ciśnieniowy PWR. Paliwem jądrowym jest wzbogacony uran U^{235} (wzbogacenie – stosunek łącznej masy izotopów U^{233} i U^{235} do całkowitej masy uranu). Konstrukcja zestawów paliwowych jest różnorodna. W początkowo budowanych reaktorach przeważało rozwiązanie wykorzystywane do dzisiaj w reaktorach energetycznych – pastylki uranowe zamknięte w rurowych pojemnikach cyrkonowych łączo-

nych w zestawy kasetowe o przekroju kwadratowym. Konieczność oszczędności miejsca, trudność wymiany paliwa, szczególnie na okrętach podwodnych, w których wymiana wymagałaby demontażu fragmentu kadłuba, to wszystko wymusiło zmiany konstrukcyjne paliwa. Podstawowa zmiana polega na odejściu od kasetowej budowy paliwa zastąpionej płytami metaliczno – ceramicznymi zawierającymi UO_2 oraz stopami uran-aluminium, uran-cyrkon (15%, cyrkonu i 85% uranu o wzbogaceniu 93%). Paliwo typu *Caramel* używane we francuskich okrętach podwodnych to zatopione prostopadłościennie płytki UO_2 o grubości 1,45 mm i długości 17,1 mm oddalone od siebie o 1,5 mm w płycie wykonanej ze stopu cyrkonowego o grubości 2,22 mm. Nie podaje się żadnych innych informacji o konstrukcji ewentualnych modułów paliwowych.



Rys. 2. Paliwo typu Caramel używane we francuskich okrętach podwodnych składające się z gęsto upakowanych płytek niskowzbogaconego uranu zatopionych w stopie cyrkonowym (według Nonproliferation Review K. Rzymkowski)

Fig. 2. Caramel – type fuel used in French submarines, composed of densely packed enriched uranium tiles embedded in zirconium alloy (według Nonproliferation Review K. Rzymkowski)



Rys. 3. Siłownia okrętu podwodnego (K. Rzymkowski)

Fig. 3. Submarine power plant (K. Rzymkowski)

Wydaje się, że obecnie kasetowe konstrukcje zbudowane z cyrkonowych pojemników rurkowych nie są już używane w napędach morskich jednostek pływających.

Inną bardzo poważną zmianą w stosunku do rozwiązań klasycznych reaktorów PWR jest użycie paliwa o bardzo dużym wzbogaceniu. W pierwszych okrętach podwodnych powstałych w Stanach Zjednoczonych stosowano paliwo o wzbogaceniu 97,3%. W Wielkiej Brytanii korzystającej z doświadczeń amerykańskich stosuje się uran również o wzbogaceniu 97,3%. W Rosji stosowane wzbogacenie jest bardzo zróżnicowane. Pierwsze jednostki pracowały ze wzbogaceniem 20-21% później wprowadzono nowe reaktory wykorzystujące uran o wzbogaceniu 21-45%, a najnowsze używają uranu wzbogacony do 50-90%. We Francji na pierwszym okręcie podwodnym, budowanym według francuskiego projektu reaktor pracował z uranem o wzbogaceniu 90%. W następnych okrętach projektowane jest wzbogacenie tylko 7,5% i w przyszłości reaktory mają używać uranu o wzbogaceniu stosowanym w elektrowniach jądrowych tj. 4-5%. W Indyjskich okrętach podwodnych wykorzystywane są doświadczenia rosyjskie i stosowane jest wzbogacenie 20%. W okrętach CHRL wzbogacenie paliw zawiera się w granicach 3-5% podobnie jak w energetyce. Wymiana paliwa przy niskim wzbogaceniu odbywała się zwykle co 6 – 10 lat. Dalsze obniżanie wzbogacenia uranu do poziomu wzbogacenia w reaktorach energetycznych może skrócić ten czas od 1 roku – do 2 lat. Zwykle przy wysokim (90%) wzbogaceniu wymiana przewidywana jest co 30 – 40 lat, co odpowiada żywotności okrętu. By wydłużyć czas pomiędzy kolejnymi wymianami paliwa wprowadzane są do rdzenia

substancje (gadolin, kwas borowy w chłodziwie) pozwalające regulować reaktywność reaktora, stabilizując reakcję łańcuchową. W miarę wypalania się paliwa substancje te są usuwane.

W reaktorze wyzwolana jest bardzo duża ilość energii cieplnej, która jest przekazywana przez chłodziwo (w reaktorach PWR – wodę) pierwotnego obiegu c do wytwornicy pary. Woda w obiegu pierwotnym jest utrzymywana pod wysokim ciśnieniem, które jest regulowane automatycznie, co nie dopuszcza do jej wrzenia oraz przemiany w parę. Powstała w wytwornicy para w obiegu wtórnym napędza turbinę parową. Stosowane są dwa sposoby wykorzystania mocy z turbiny do napędu. W okrętach podwodnych i innych jednostkach wojennych amerykańskich, brytyjskich i rosyjskich moc na wał napędowy przenoszona jest przez przekładnie mechaniczne. W nowych konstrukcjach francuskich i chińskich turbina parowa napędza prądnicę, a powstała energia elektryczna napędza silnik poruszający wał napędowy.

W obiegu pierwotnym i obiegu wtórnym muszą pracować pompy dostosowane do potrzeb pracy kilku różnych systemów chłodzenia. W obiegu pierwotnym zapewniającym chłodzenie rdzenia i odbiór ciepła jest kilka pętli (2 – 4) z wytwornicami pary, z których każda musi posiadać własną pompę o znacznej wydajności, ponieważ wymagany jest duży przepływ wody wynikający z niedużej różnicy temperatur pomiędzy wodą wpływającą do wytwornicy a wypływającą z niej. W obiegu wtórnym pracują pompy przy znacznie niższych temperaturach. Pompy i ich ilość są główną przyczyną tego, że okręty podwodne z napędem jądrowym są głośniejsze od klasycznych. W okręcie konstrukcji amerykańskiej typu **Ohio** wykorzystano zjawisko zmia-

ny gęstości wody wraz z temperaturą, eliminując częściowo pompy, włączane w chwilach konieczności podwyższenia szybkości okrętu.

Źródłem hałasu jest również napędowa śruba okrętowa. Głównym źródłem hałasu wywoływanego przez śrubę jest zjawisko kawitacji powodujące powstawanie mikro pęcherzyków gazowych, których pękanie wywołuje hałas. Zjawisko to jest również powodem degradacji śruby. Opracowano szereg sposobów zmniejszenia kawitacji polegających na dobraniu odpowiedniego kształtu śruby i przygotowaniu jej powierzchni. W okrętach budowanych w latach osiemdziesiątych w Wielkiej Brytanii (typu *Trafalgar*) i w Stanach Zjednoczonych (typu *Seawolf*) śrubę okrętową zastąpiono pędnikiem wodnoodrzutowym zmniejszającym znacząco hałas. Jest on także wydajniejszy od śruby, ponieważ przy mniejszych wymiarach wytwarza taką samą siłę ciągu, jest ponadto łatwiejszy w budowie i odporniejszy na uszkodzenia. Ten rodzaj napędu jest również wprowadzany w rosyjskich okrętach podwodnych.

Do wykrywania i lokalizacji okrętów podwodnych wykorzystywane są różne techniki. Jedną z najdawniejszych i najskuteczniejszych jest poszukiwanie śladu dźwiękowego, dlatego konstruktorzy okrętów starają się obniżyć poziom generowanych szumów do jak najniższego poziomu, starając się jednocześnie zwiększyć czułość własnych sensorów. Przykładem tych starań są okręty amerykańskie typu *Seawolf*. Osiągnięto w nich najlepsze rezultaty w wyciszeniu szumów. System napędowy tych okrętów był dziesięciokrotnie cichszy w każdym zakresie prędkości niż system napędowy innych współczesnych konstrukcji i nieporównywalnie niższy od pierwszej generacji okrętów. Oprócz zmiany sposobu napędu wprowadzono zmiany w budowie kadłuba, redukując ilość wszelkich elementów mogących wywoływać zawirowania i pokrywając kadłub powłoką anechoiczną (*anechoic coatings*) nazywaną w literaturze, zabiegami specjalnymi (*Special Hull Treatments*). Zadaniem powłoki było wygłuszenie dźwięków z wnętrza okrętu i pochłanianie (tłumienie) fal dźwiękowych systemów tropiących okręt. Pomysł zastosowania takiej powłoki (porowatego kauczuku) powstał w czasie II wojny światowej i tą powłoką pokryte były niektóre niemieckie okręty, ale rezultaty nie były zadowalające. W nowoczesnych konstrukcjach okrętów podwodnych wprowadzane są materiały izolacyjne tłumiące drgania elementów siłowni, kontrolowane przez komputerowy system.

Prowadzone są badania nad innym bezgłośnym systemem napędu, wykorzystującym pole magnetyczne i elektryczne działające na strumień wody, wytwarzając siłę, powodującą jego wirowanie w kanale tworząc kierunkowy przepływ. Nowy napęd magnetohydrodynamiczny eliminuje używanie śruby i wału napędowego, przekładni napędu i innych związanych z nimi elemen-

tów mechanicznych. Jego parametry mogą być poprawione przy wykorzystaniu nadprzewodnictwa. Idea budowy takiego napędu powstała w latach sześćdziesiątych XX wieku na Uniwersytecie Kalifornijskim. Eksperymentalny model łodzi wykorzystującej ten napęd powstał w Japonii. Próby wykazały pewne dość istotne wady napędu np., wytwarzanie pęcherzyków wodoru w wyniku elektrolizy wody i korozję elektrod. Atrakcyjność rozwiązania pozwala przypuszczać, że badania będą trwały nadal.

Jak już wspomniano wszystkie obecnie budowane i używane okręty wojenne są wyposażone w reaktory wodne ciśnieniowe PWR. W początkowym okresie w ramach programu NNPP zaprojektowano w firmie General Electric reaktor chłodzony ciekłym metalem przy założeniu, że będzie on podobnie jak w reaktorze PWR, pracował na neutronach termicznych. Zamontowany na okręcie typu *Seawolf* reaktor chłodzony ciekłym sodem niemoderującym neutronów, jak woda, pracował z neutronami o wyższych energiach. Wymagało to wprowadzenia dodatkowego moderatora. Zaletą takiego rozwiązania była możliwość uzyskania wyższej sprawności energetycznej całości systemu przy jednoczesnym zmniejszeniu wymiarów rdzenia. Słabo spowolnione neutrony trudniej utrzymują reakcję łańcuchową, ponieważ zmniejsza się prawdopodobieństwo rozszczepienia, więc by było więcej neutronów, wzbogacenie musi być bardzo wysokie, co z kolei ma wpływ na częstotliwość wymiany paliwa. Poza tym sól reaguje bardzo gwałtownie z wodą i każda drobna nieszczelność może być przyczyną pożaru. Proponowano przesyłanie sodu w podwójnych rurach, między którymi miała być rtęć stanowiąca rodzaj izolatora dla sodu i jego detektora. Wykrycie sodu w rtęci sygnalizowało nieszczelności systemu. Zastosowanie rtęci znacznie zwiększało ciężar systemu chłodzenia, a ewentualne pary rtęci mogły być szkodliwe dla załogi. Sól ulega aktywacji i staje się radioaktywny, co wymaga dodatkowych zabezpieczeń szczególnie w czasie prac remontowych. Wspólną wadą wszystkich systemów chłodzonych ciekłym metalem (stosowane są metale o niskiej temperaturze topnienia) jest to, że w czasie postoju okrętu, gdy reaktor jest wyłączony, ciekły metal przechodzi do stanu stałego i dlatego konieczne jest stałe jego podgrzewanie. Zastygnięcie chłodziwa w systemie uniemożliwia ponowne uruchomienie reaktora. Właśnie było to powodem wycofania kilku okrętów z użytkowania. Po roku prób marynarka wojenna Stanów Zjednoczonych po poważnej awarii doświadczalnego okrętu zrezygnowała z tego rodzaju reaktorów. W Związku Radzieckim przeprowadzono eksperymenty z reaktorami chłodzonymi stopem ołowiu z bizmutem i mimo trudności użytkowano okręty z takimi reaktorami przez kilka lat, ostatecznie rezygnując z nich w 1981 r.

Reaktory chłodzone ciekłymi metalami bez dodatkowych moderatorów są reaktorami prędkimi. Ważny-

mi zaletami tych reaktorów dla marynarki wojennej jest ich wyższa wydajność cieplna i niższy ciężar, elastyczność zmiany mocy, cichsza praca całości systemu. Jednakże bardzo istotne wady jak rozbudowany system utrzymywania metalu chłodzącego w stanie ciekłym i związane z tym wysokie koszty konserwacji zdecydowały o ich eliminacji z jednostek wojskowych. Prowadzone są próby wykorzystania tego rodzaju reaktorów w energetyce, ale nie rokują na razie sukcesu, a niektóre z nich (reaktor Monju chłodzony sodem w Japonii) są demontowane.

Oprócz okrętów podwodnych z napędem jądrowym zbudowano łodzie podwodne przeznaczone do badań oceanograficznych, badań geologicznych, instalacji i konserwacji urządzeń podwodnych, poszukiwania i odzyskiwania zagubionych elementów katastrof nad wodami morskimi. Pierwsza powstała łódź podwodna w Stanach Zjednoczonych NR – 1 (nieformalna nazwa „*Nerwin*”), była najmniejszą jednostką podwodną z napędem jądrowym i była wyposażona w najmniejszy reaktor pracujący na jednostkach podwodnych. Łódź była obsługiwana przez nieliczną załogę. Kompletna załoga NR – 1 składała się 11 osób + 2 naukowców (przewidywany maksymalny okres zanurzenia 25 dni). Załoga przechodziła obowiązkowe szkolenie w zakresie obsługi reaktora. Łódź miała długość 45,7 m, szerokość 4,18 m, maksymalne testowane zanurzenie 910 m, maksymalna szybkość w zanurzeniu 4,5 węzła. Łódź była zbudowana w Groton (Connecticut) i wykorzystywana od czerwca 1967 r. do listopada 2008 r. Wyposażenie łodzi było przystosowane do wykonywania różnych zadań i obejmowało wysuwane koła dolne, trzy wizerniki widokowe, oświetlenie zewnętrzne, systemy telewizyjne i fotograficzne, pazur do odzyskiwania obiektu, manipulator, który można było wyposażyć w różne narzędzia do chwytania i cięcia, a także kosz roboczy do magazynowania odzyskanych obiektów i próbek, peryskop telewizyjny do obserwacji powierzchni morza, zaawansowaną elektronikę, komputery i systemy sonarowe do lokalizacji i identyfikacji obiektów oraz wspomaganie nawigacji.

Bogate wyposażenie łodzi pozwalało na opracowanie map dna oceanu, prądów morskich rozkładu temperatur wykorzystywanych do celów wojskowych i naukowych. Jednym z opublikowanych zadań było odnalezienie części samolotu F-14, zgubionego przez lotniskowiec, a także części promu kosmicznego *Challenger*.

W Związku Radzieckim w roku 1988 rozpoczęto budowę podobnej łodzi właściwie okrętu podwodnego AS-31 lub AS-12 (nieoficjalna żartobliwa nazwa *Łoszarik* wynikająca z konstrukcji kadłuba zbudowanego z elementów sferycznych i nawiązująca do bohatera filmów rysunkowych) przeznaczonej do celów badawczych i ratownictwa oraz specjalnych operacji wojskowych. Łódź była wyposażona w manipulatory, urządzenia do

oczyszczania dna morza oraz wysięgnik z kamerami. Przypuszcza się, że okręt ten jest przystosowany do działań dywersyjnych polegających na niszczeniu urządzeń podwodnych (kabli, rurociągów itp.). Konstrukcja kadłuba; ogranicza przestrzeń mieszkalną i wyposażenie, ale zapewnia zwiększoną wytrzymałość. Ze względu na trudności ekonomiczne budowę zakończono już w Rosji w 2003 r. Jego działaniami kieruje Główna Dyrekcja Badań Głębinowych. Długość okrętu wynosi około 60 m wykorzystywany jest tam reaktor PWR typu E-17, załogę stanowi 25 osób w stopniach oficerskich.

Podczas wykonywania pomiarów dna na rosyjskich wodach terytorialnych w lipcu 2019 r. na okręcie wybuchł pożar. Zginęło 14 osób. Przyczyną pożaru była awaria w przedziale akumulatorowym. Po naprawie okręt ma wrócić do służby.

Napęd jądrowy w okrętach nawodnych

Podstawową zaletą napędu jądrowego jest dla marynarki wojennej możliwość bardzo długiego przebywania okrętów na morzu bez konieczności częstego uzupełniania paliwa, co dla działań strategicznych ma ogromne znaczenie. Zaleta ta była główną przyczyną rozwoju floty podwodnej. We flocie nawodnej zaleta ta jest wykorzystywana przede wszystkim w lotniskowcach, zapewniając im możliwość pływania po wodach całego świata. W innych rodzajach okrętów niszczycielach, krążownikach, okrętach desantowych napęd jądrowy stosowany jest rzadziej i mimo doskonałego opanowania technologii budowy okrętów z takim napędem nie jest przewidywana zasadnicza zmiana w tym zakresie.

Idea wykorzystania napędu jądrowego w jednostkach nawodnych powstała równocześnie z koncepcją zastosowania go w okrętach podwodnych. Pierwszym okrętem nawodnym z napędem jądrowym był krążownik raketowy **Long Beach**. Jego budowa rozpoczęta w 1957 r. trwała 2 lata, a po kolejnych 2 latach rozpoczął służbę, która trwała do roku 1995. Jednocześnie z budową **Long Beach**, rozpoczęto budowę pierwszego lotniskowca z napędem jądrowym **Enterprise**, który również wszedł do służby w 1961 r. Kolejny okręt z napędem jądrowym krążownik **Bainbridge** oddano do użytku w 1962 r. Te trzy okręty utworzyły oddział specjalny do wykonania operacji *Operation Sea Orbit*, wykorzystując do tego tylko energię jądrową, polegającą na okrążeniu Ziemi bez zawijania do portów. Operacja trwała 65 dni. **Enterprise** zasilano 8 reaktorów typu PWR A2W powstałych w firmie Westinghouse. **Enterprise** miał długość 342 m, szybkość 30 węzłów i magazynował 66 samolotów. Był w służbie do końca 2012 r. Doświadczenie zdobyte w jego budowie, jak i doświadczenie eksploatacyjne wykorzystano do zaprojektowania podstawowego typu amerykańskich lotniskowców z napędem jądrowym, okrętów typu **Nimitz**.

Tabela 1 Okręty wojenne wykorzystujące napęd jądrowy (dane przybliżone)

Table 1 Nuclear warship number approximation

Typ okrętu	Stany Zjednoczona	Rosja	Wielka Brytania	Francja	Chiny	Indie
Lotniskowiec	10	-	-	1	1	-
Krażownik	4	4	-	-	-	-
Okręt podwodny	>60	>60	około 30	około 30	6	1

Pierwszy okręt tego typu został nazwany **Nimitz** na cześć admirała Chestera Nimitza, dowódcy floty na Pacyfiku w czasie II wojny światowej. Odtąd wszystkie okręty tego typu są nazywane nazwiskami prezydentów i wybitnych polityków. Ostatnim z tej serii 10 lotniskowców jest **George H. W. Bush**.

Podstawowe dane tych okrętów są podobne. Znaczne różnice występują w wyposażeniu elektronicznym. Całkowita długość okrętu wynosi 332,8 m. Początkowo maksymalna szerokość wnosila 76,8 m i została powiększona do 78,8 m, szybkość 30 węzłów (podawana oficjalnie), zasięg nieograniczony, załoga jest podzielona na marynarzy – 3300 osób i obsługę lotniczą – 3000 osób. Na okręcie może stacjonować 130 samolotów różnych typów. Napędem są dwa reaktory typu PWR A4W/ A1G zbudowane przez firmę Westinghouse o mocy 550 MWth. Pierwszą wymianę paliwa przewidziano po 20 latach użytkowania. W czasie pokoju rola lotniskowców ogranicza się do demonstracji siły i pełnienia roli ruchomej bazy lotniczej.

Obecnie na świecie pływa około 200 okrętów wykorzystujących energię jądrową reaktorów do napędu i wytwarzania energii elektrycznej.

Demontaż i unieszkodliwianie napędu jądrowego okrętów

Od chwili zwodowania pierwszego okrętu z napędem jądrowym minęło 66 lat i w tym czasie zbudowano bardzo wiele okrętów wykorzystujących ten rodzaj napędu. Zakładany czas eksploatacji okrętu wynosi 20-30 lat. Powstaje więc problem demontażu i unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych. Problem demontażu okrętu i sposób postępowania z wysoko aktywnym paliwem i materiałami promieniotwórczymi jest w każdym kraju odmienny. Pewne działania są podobne. W reaktorze znajduje się „gorące” (silnie promieniujące) paliwo i niektóre elementy obiegu pierwotnego mogą być aktywowane. Demontaż okrętu zaczyna się zwykle od usunięcia wypalonego paliwa z reaktora, usunięcia chłodziwa i usunięcia reaktora. Wycinana jest też część kadłuba, w której znajdował się reaktor. Wszystkie aktywowane i promieniotwórcze części są składowane w wydzielonym podziemnym składowisku. Wypalone paliwo jest po odpowiednich zabezpieczeniach składowane w przystosowanym do tego składowisku. Oczywiście wszystkie prace muszą być wykonywane w specjalizowanych stocznich. W Sta-

nach Zjednoczonych zdemontowano do 2017 r. w ten sposób 117 okrętów podwodnych. Ponieważ oczekiwanie na demontaż może się przedłużać, wycofane ze służby okręty szczególnie kadłub i reaktor znajdują się pod stałą kontrolą techniczną.

We Francji usuwane jest paliwo, a części promieniotwórcze są składowane w suchym doku, by po obniżeniu aktywności można było dokończyć demontaż.

W Wielkiej Brytanii system demontażu i unieszkodliwiania materiałów aktywnych pochodzących z jednostek pływających jest podobny i zakłada usuwanie wypalonego paliwa jądrowego i demontaż części radioaktywnych, a następnie składowanie „pustych” kadłubów okrętów i ich demontaż w krajowej stoczni prywatnej. Jednakże, gdy w roku 1980 wycofano 20 okrętów z eksploatacji, to demontaż pierwszej jednostki rozpoczęto dopiero w 2016 r. W pewnym momencie składowano w oczekiwaniu na rozpoczęcie prac demontażowych, więcej okrętów wycofanych z użytkowania, niż było aktywnych. Średni czas składowania okrętów do chwili wyładowania paliwa wynosił 9 lat.

Problemy z demontażem i składowaniem skażonych promieniotwórczo elementów okrętów podwodnych z napędem jądrowym, miała i ma Marynarka Wojenna Rosji. Wycofane ze służby okręty (około 130) stały zacumowane w portach wojennych. Niektóre z nich po 20 latach miały problemy z unoszeniem się na powierzchni. Zdemontowane reaktory i paliwo jądrowe, były niedostatecznie zabezpieczone i po zapełnieniu składowiska zaczęto zatapiać reaktory jądrowe (16) wraz z paliwem (6) w Morzu Karskim w pobliżu Nowej Ziemi. Powodem tego były trudności ekonomiczne. Po nawiązaniu współpracy międzynarodowej i uzyskaniu środków finansowych rozpoczęto systematyczny demontaż.

Prace demontażowe związane z unieszkodliwianiem materiałów promieniotwórczych tak złożonych i dużych obiektów, jakimi są okręty, wymaga bardzo dużych nakładów finansowych i jest długotrwałe.

Perspektywy rozwoju napędu jądrowego

Jak już wspomniano, były prowadzone próby szerokiego wykorzystania napędu jądrowego w marynarce handlowej i zbudowano cztery takie jednostki: **Savannah** w Stanach Zjednoczonych, **Otto Hahn** w Niemczech, **Siewmorput** w ZSRR, **Mutsu** w Japonii. Okazały się one jednak zbyt kosztowne w eksploatacji, wyma-

gały wysoko wykwalifikowanych załóg, dodatkowych kontroli. Jedynymi jednostkami „cywilnymi” z napędem jądrowym były i są lodolamacze opracowane i produkowane w Rosji (ZSRR). Pierwszym był lodolamacz **Lenin** z wodno ciśnieniowymi reaktorami pracującymi z niskowzbożonym (5%) uranem. Powstały później sze konstrukcje typu *Arktika*.

Powszechne dążenie do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, dążenie do usuwania zanieczyszczeń powietrza, mające na celu ograniczenie zmian klimatycznych wywołanych działalnością człowieka może powodować ponowne zwiększenie zainteresowania bezemisyjnymi źródłami energii. Sprzyja temu ogromne doświadczenie w budowie nowoczesnych bezpiecznych jądrowych reaktorów energetycznych i pojawiających się koncepcji małych reaktorów modułarnych wykorzystujących niskowzbożony uran. W żegludzie handlowej zaczynają dominować duże jednostki, takie jak kontenerowce, tankowce transportujące gaz, ropę, węgiel, chemikalia itp. wymagające znacznej energii do napędu i utrzymania pracy urządzeń statków.

Wiele przedsiębiorstw transportowych rozpoczęło badania opłacalności powrotu do napędu jądrowego statków handlowych. Starania rozpoczęła w 2009 r., jako jedna z pierwszych, chińska firma Cosco jednak awaria w Fukushima przerwała negocjacje z projektantem. Badania przeprowadzone w 2010 r. przez brytyjską firmę dotyczącą budowy tankowca LNG wykazały, że na pewnych trasach napęd jądrowy byłby bardzo atrakcyjny. Lloyds's z amerykańską firmą Hyperion Power Generation, brytyjskim BMT i operatorem greckim rozpoczęli w 2010 r. badania nad możliwością wykorzystania małego modularnego reaktora o mocy 70 MWth do napędu tankowca. Reaktor byłby reaktorem prędkim z chłodziwem metalicznym ołowiowo-bizmutowym. Czas pracy reaktora przewidziano na 25 lat. Rozpoczęto też wstępne prace unifikacyjne dotyczące certyfikowania statków z napędem jądrowym z wymaganiami dotyczącymi lądowych reaktorów energetycznych. Wyniki tych prac przedstawiono w 2014 r. Poza bardzo wstępnymi opracowaniami brak jest informacji o podjęciu wiążących decyzji.

Pewną nadzieję powrotu energii jądrowej do marynarki handlowej można również wiązać z doświadczeniami francuskiej marynarki wojennej planującej wykorzystanie na okrętach podwodnych reaktorów, w których wzbogacenie paliwa będzie niskie takie jak w reaktorach energetycznych. Szerokie zastosowanie takiego rozwiązania może znacznie ułatwić procesy legislacyjne i ułatwić akceptację społeczną dla wykorzystania energii jądrowej.

dr inż. Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa

Literatura:

- [1] Grzegorz Jeziński, *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, NT Warszawa 2016
- [2] Adam Rajewski, *Morskie napędy jądrowe*, Morza i Okręty Numer specjalny 1/2016 Warszawa
- [3] Nuclear-Powered Ships | Nuclear Submarines - World Nuclear ...
- [4] www.world-nuclear.org/...power-nuclear.../nuclear-powered-ships
- [5] Sławomir Kuźnicki, *Ewolucja Napędu Okrętów Podwodnych od Połowy XX Wieku*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej Rok XLVII NR 3 (166) 2006
- [6] Magdi Ragheb, *Nuclear Naval Propulsion*, DOI: 10.57772/19007 2011
- [7] Chunnyn Ma, Frank von Hippel, *Ending the Propulsion of Highly Enriched Uranium of Naval Reactors*, Thw Nonproliferation Review 2001 USS NIMITZ <http://pl.wikipedia.org>
- [8] Łukasz Pacholski, *Okręt podwodny USS Nautilus*, Dziennik Zbrojny 2011
- [9] *Okręt podwodny z napędem jądrowym*, <http://pl.wikipedia.org>
- [10] Anna Przybyszewska, *Reaktory jądrowe na okrętach podwodnych*, Energia jądrowa.pl 2014



NUTECH 2020

W poprzednim numerze PTJ ukazała się obszerna informacja na temat organizowanej w dniach 4-7 października w Warszawie międzynarodowej konferencji NUTECH 2020. W imieniu organizatorów zapraszamy do rejestracji uczestnictwa w konferencji na uruchomionej na początku roku stronie internetowej https://nutech2020.pl/registration_form.