

DVJESTO GODINA BRODSKE PARNE PROPULZIJE (1807. – 2007.)

Two Hundred Years of Marine Steam Propulsion (1807 – 2007)

UDK 621.165“1807/2007“

Stručni članak

Professional paper

Sažetak

Rad je podsjetnik na dvjestotu godišnjicu prve uspješne uporabe parnog stroja za pogon broda. Prikazan je povijesni razvoj stapnoga parnog stroja, parne i plinske turbine i generatora pare te njihova uporaba na brodovima. Posebno su istaknuti povijesni brodovi "Clermont" (1807.), "Turbinia" (1894.) i "Nautilus" (1954.), koji su imali pionirsku ulogu u korištenju novim vrstama propulzije: stapnim parnim strojem, parnim turbinama i nuklearnim reaktorom. Opisan je i svojedobno najveći brod na svijetu "Titanic"; on ima važno mjesto u povijesti razvitka brodske parne propulzije. U radu je dan osvrt na povijesni razvoj brodskih generatora pare.

Ključne riječi: brodska parna propulzija, parni stroj, parna turbina, generator pare.

Summary

The paper is a reminder of two hundred years' use of steam engine for ship's propulsion. There has been described historical development of piston steam engine, steam and gas turbine, steam generator and their application aboard vessels. Special attention has been paid to historical vessels "Clermont" (1807), "Turbinia" (1894) and "Nautilus" (1954) which had pioneering role in usage of new types of propulsion: piston steam engine, steam turbine and nuclear power plant. The biggest vessel at that time i. e. "Titanic" has been described; she has an important place in the historical development of steam propulsion. The paper has described historical development of ship's steam generators.

Key words: ship's steam propulsion, steam engine, steam turbine, steam generator.

1. Uvod

Introduction

U želji da si približi svaki dio svijeta i da lakše transportira materijalna dobra, a putovanja učini bržima i ugodnijima, čovjek oduvijek traga za pouzdanijim i ekonomičnijim načinima transporta. Razvojem modernoga društva i sve većom potrebom za trgovinom i prijevozom putnika, bilo je očito da će jedrenjaci i plovidba s pomoću nepouzdanoga vjetro postupno biti zamijenjeni nekom novom vrstom propulzije koja neće biti ovisna o prirodnim utjecajima.

Jedan od najvažnijih izuma u povijesti čovječanstva bio je parni stroj, koji se potom postupno usavršavao. Francuz Denis Papin konstruirao je 1690. godine prvi parni cilindar; u njemu se stvarala para vrenjem vode u željeznom cilindru ispod stapa koji je dizala. Uštrcavanjem vode u cilindar para se kondenzirala, ispod stapa nastajao je vakuum, a tlak okolnoga zraka potiskivao je stap prema dolje. Budući da je atmosferski tlak bio glavni čimbenik rada, taj je stroj nazvan atmosferskim strojem. Deset godina poslije Englez Thomas Newcomen konstruirao je atmosferski parni stroj; on se najprije upotrebljavao za crpljenje vode iz rudnika. I u tome je stroju rad obavljan s pomoću tlaka okolnoga zraka. Para se proizvodila u kotlu, a nju je čovjek puštao u cilindar i uštrcavao je vodu pri svakom stapaju, tako što bi otvarao i zatvarao pipce.

Od 1768. pa do 1790. godine, usavršavajući Newcomenove strojeve, Englez James Watt postupno je konstruirao parni stroj s automatskim razvodom pare. Tek je 1788. godine izradio prototip sa svim glavnim elementima današnjega parnog stapnog stroja: dvoradnim cilindrom, stapom, automatskim razvodnikom pare, kondenzatorom, regulatorom i zamašnjakom. Pravocrtno se gibanje stapa nije pretvaralo u kružno s pomoću stapajice, križne glave, ojnice i koljenastog vratila kao danas, već tzv. balansirerom, posebnom konstrukcijom sa zupčanicima.

Prvi brod koji je pokusno plovio s parnim strojem bila je riječna brodica na kotače "Charlotte Dumas", koju je 1803. izgradio Englez Symington. Tek 20 godina poslije

* Mario Didović, diplomant stručnoga dodiplomskog studija brodstrojarstva na Sveučilištu u Dubrovniku

** mr. sc. Matko Bupić, v. pred. Sveučilišta u Dubrovniku, mentor

Wattova izuma parnog stroja, nakon mnogih pokušaja, našlo se zadovoljavajuće konstrukcijsko rješenje: Amerikanac Robert Fulton 1807. konstruirao je prvi komercijalni putnički brod, imenom "Clermont", pogonjen jednocilindričnim parnim strojem. Taj se događaj, od kojega je prošlo točno dvjesto godina, drži početkom brodske parne propulzije.

Nakon izuma parnoga stapnog stroja tehnika se počela naglo razvijati. Potkraj 19. stoljeća konstruirana je parna turbina, za što su zaslužni De Laval, Curtis, Parsons i Zoelly, a gotovo istodobno, zaslugama Ottoa, Diesela, Benza i Daimlera, konstruiran je i motor s unutrašnjim izgaranjem. Već početkom 20. stoljeća parna turbina postupno ulazi u uporabu. Razlog je tomu bio što je ona mogla razvijati velike snage zauzimajući pri tome mnogo manji obujam od parnoga stapnog stroja i zatim se zbog velike brzine vrtnje mogla izravno povezati s električnim generatorom relativno malih dimenzija.

Dvadesetih godina 20. stoljeća sve su se više počeli upotrebljavati dizelski motori za pogon srednjih i malih brodova, pa je izgledalo da će na tom području potpuno istisnuti parni stapni stroj. Međutim, neka dobra svojstva parnog stroja, a poglavito mogućnost korištenja ugljena kao energenta, usporavala su taj proces, pa se on nastavio usavršavati. Konstruktori parnih turbina, uočivši koje prednosti donosi velika brzina vrtnje, tridesetih godina 20. stoljeća počeli su graditi brzohodne parne stapne strojeve, tzv. parne motore. Konstruirali su ih prema motoru s unutrašnjim izgaranjem, u to vrijeme u konstrukcijskom pogledu već dobro riješenim.

Razvoj brodskih parnih turbina zapravo započinje 1883. godine kad je švedski inženjer Gustav Patrick de Laval patentirao prvu tehnički upotrebljivu parnu turbinu. To je bila jednostupanjska akcijska turbina; po njemu i

nazvana. Gotovo istodobno, 1884. godine, izgradio je Charles Parsons prvu reakcijsku turbinu, pa se po njemu takve turbine nazivaju Parsonove parne turbine. Poslije toga se parne turbine počinju brzo razvijati, gotovo dosegivši svojstva savršenog stroja, s golemim snagama od 500 i 800 MW, pa sve do više od 1.500 MW za kopnena postrojenja, dok su brodska parnoturbinska postrojenja ograničena na maksimalnu snagu od 60 MW po jedinici.

Tijekom vremena parne turbine, kao glavni propulzijski strojevi, uglavnom padaju u drugi plan u usporedbi s motorima s unutrašnjim izgaranjem zbog usavršavanja dizelskih motora, čime raste njihov efektivni stupanj iskoristivosti od 41 % 60-tih godina do današnjih oko 50 %, dok je efektivni stupanj iskoristivosti parnih turbina tek nešto viši od 30 %.

2. Početak brodske parne propulzije *The Advent of Ship's Steam Propulsion*

Parni stapni stroj po definiciji je toplinski stroj što pretvara toplinsku energiju vodene pare u mehaničku energiju. Osnovu parnom stroju kakav danas poznajemo dao je James Watt (1736.-1819.) tek 1788. godine. Njegov parni stroj, prikazan na slici 1., imao je sve karakteristike današnjega parnog stroja i radio je s pretlakom pare. Para se automatski razvodila i obavljala rad uz ekspanziju s obje strane stapa u cilindru. Parni kotao i kondenzator bili su odvojeni od stroja koji je imao zamašnjak i regulator, ali umjesto koljenastog vratila kao pogonskoga mehanizma Watt je upotrijebio posebnu konstrukciju sa zupčanicima, tzv. balansirer. Početkom 19. stoljeća stacionarni parni strojevi bili su golemih



Sl. 1. Wattov parni stroj iz 1788. godine [9]

Fig. 1. Watt's steam engine from 1788. [9]

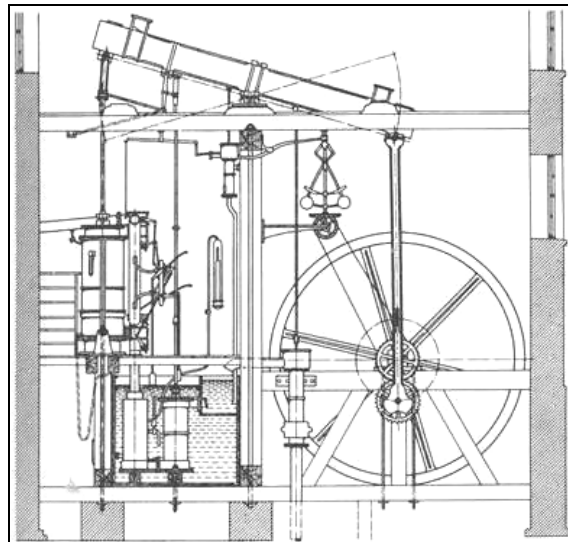
dimenzija. Jedan od Wattovih parnih strojeva, snage od 36 kW, imao je vanjske dimenzije 7 x 7 m. Strojevi takve veličine nisu bili prikladni za uporabu na vozilima. Watt je doduše želio izgraditi lokomotivu, ali je bio toliko zauzet proizvodnjom stacionarnih parnih strojeva, za kojima je bila velika potražnja, da nije ostvario svoj naum.

Na slici 2. vide se neka Wattova rješenja u njegovu parnom stroju. Na glavnom kolu sustav zupčanika obavljao je pretvorbu iz pravocrtnog u kružno gibanje, što danas radi koljenasto vratilo.

Odmah nakon Wattova pronalaska nastojao se upotrijebiti parni stroj i za pokretanje brodova, ali tek poslije mnogih pokušaja našlo se zadovoljavajuće konstrukcijsko rješenje. Robert Fulton 7. kolovoza 1807. obavio je prvo uspješno pokusno putovanje brodom "Clermont" prikazanim na slici 3. To je bio prvi parni brod napravljen u Americi i prvi uspješni komercijalni brod u svijetu, a pogonio ga je Wattov jednocilindrični parni stapni stroj snage od oko 14 kW (19 KS) s brzinom

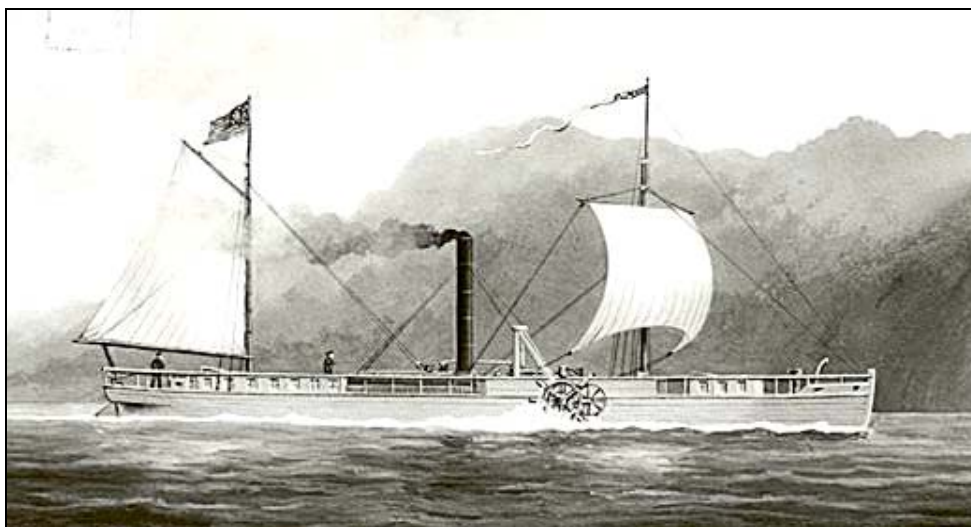
vrtnje od $0,33 \text{ s}^{-1}$. Brod je bio dug 41 m. Na prvomu putovanju 1807. plovio je rijekom Hudson od New Yorka do Albanyja i natrag, te je prevalio ukupan put od 385 km u vremenu od 62 sata. Na slici 4. prikazan je parni stroj Fultonova broda "Clermont". Glavni dijelovi toga parnog stroja bili su: cilindar (1), balansirer (2), zamašnjak (3), lopatično kolo broad (4), zupčani prijenos vrtnje na osovinu lopatičnog kola (5).

Drugi brod s parnom propulzijom poslije "Clermonta" bio je "Comet", izgrađen u Glasgou 1812. Potom su slijedili brodovi: "Richmond" (Glasgow, 1812.), "Margery" i "Thames" (Glasgow, 1813.), "Regent" (Rotherhithe, 1816.), "Sons of Commerce" (Blackfriars, 1817.), "London Engineer" (Blackfriars, 1818.), pa brodovi "Favourite", "Eclipse", "Venus", "Albion", "Dart", "Magnet" i mnogi drugi. Do sredine 19. stoljeća gradili su se parni strojevi s balansirerom, a tek od toga vremena s križnom glavom i koljenastim pogonskim mehanizmom, što je omogućilo zbijeniju konstrukciju i manje dimenzije stroja.



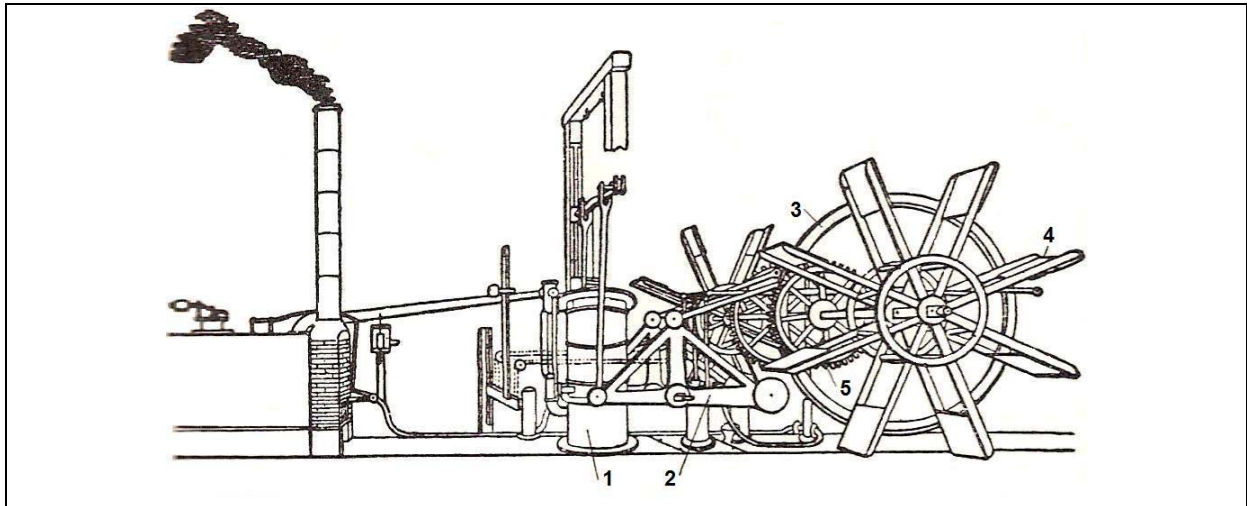
Sl. 2. Presjek Wattova parnog stroja [10]

Fig. 2. Section of Watt's steam engine [10]



Sl. 3. Fultonov parni brod "Clermont" [11]

Fig. 3. Fulton's steamer "Clermont" [11]



Sl. 4. Parni stroj Fultonova broda "Clermont" [11]
Fig. 4. Steam engine of Fulton's vessel "Clermont" [11]

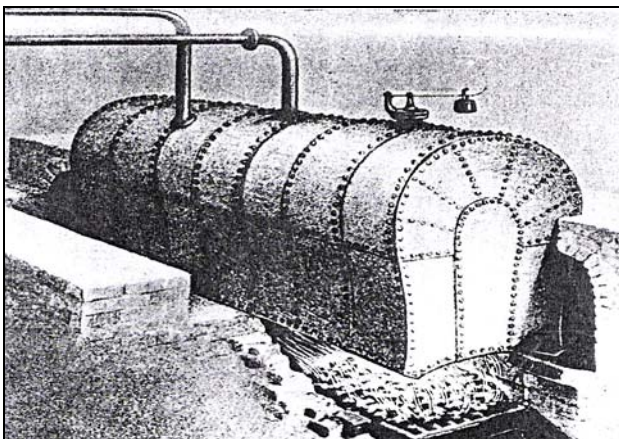
3. Razvoj generatora pare

The Development of Steam Generators

Generator pare dio je energetskegarnog parnog postrojenja u kojemu se toplina oslobođena izgaranjem goriva predaje vodi i pretvara je u vodenu paru koja na izlazu iz parnog kotla ima određen tlak i temperaturu. To je u početku razvitka bila grijana posuda djelomično napunjena vodom, pa odatle potječe uobičajeni naziv - parni kotao.

Prvi pravi parni kotao konstruirao je 1769. godine inženjer James Watt. Za razliku od dotadašnjih tlačnih posuda neprikladna oblika i građenih od neprikladnih materijala, s parnim cilindrom postavljenim neposredno na tlačnoj posudi, Watt je svoj parni kotao napravio od čelika s čeličnom plamenom cijevi i potpuno ga je odijelio od parnoga stroja (slika 5.). Prvi Wattov parni kotao proizvodio je paru od oko 0,035 MPa pretlaka koja je služila za pogon parnog stroja.

Paralelno s parnim strojevima razvijaju se i generatori pare, pa su već prvih godina 19. stoljeća proizvodili paru



Sl. 5. Wattov parni kotao [7]
Fig. 5. Watt's steam boiler [7]

s tlakom do 0,175 MPa. U Engleskoj je 1800. godine graditelj lokomotiva R. Trevithick konstruirao vrlo ekonomičan visokotlačni plamenocijevni kotao s tankim cijevima koje su jednim krajem bile spojene sa spremnikom vode. Oko 1820. godine pojavio se u Engleskoj cilindrični kotao s plamenim cijevima. Taj se kotao sljedećih pedesetak godina stalno razvijao, povećavajući broj plamenih cijevi, pa je potkraj 19. stoljeća postao najrašireniji tip vodoravnoga plamenocijevnog kotla. Prvi sekcijski vodocijevni kotao patentirao je 1825. godine J. Eve. Prvi vodocijevni kotao s kosim cijevima konstruirao je 1856. godine američki inženjer S. Wilcox, a 1877. godine izgradili su G. Babcock i S. Wilcox prvi sekcijski vodocijevni kotao s kosim cijevima. Tako su potkraj 19. stoljeća već postojali brojni tipovi plamenocijevnih, vodocijevnih i kombiniranih generatora pare. Konstruirana su i ložišta za tekuća goriva i ugljenu prašinu, ali se kao gorivo ipak još uvijek najviše upotrebljavao ugljen s ručnim loženjem na nepomičnu rešetku (ugljenom prašinom zabranjeno se koristiti u brodskim postrojenjima!). Sve su to uglavnom bili generatori pare s velikim sadržajem vode, a proizvodili su paru do oko 1,5 MPa tlaka i do 250 °C temperature. Za veće kapacitete gradili su se nizovi ili baterije generatora pare.

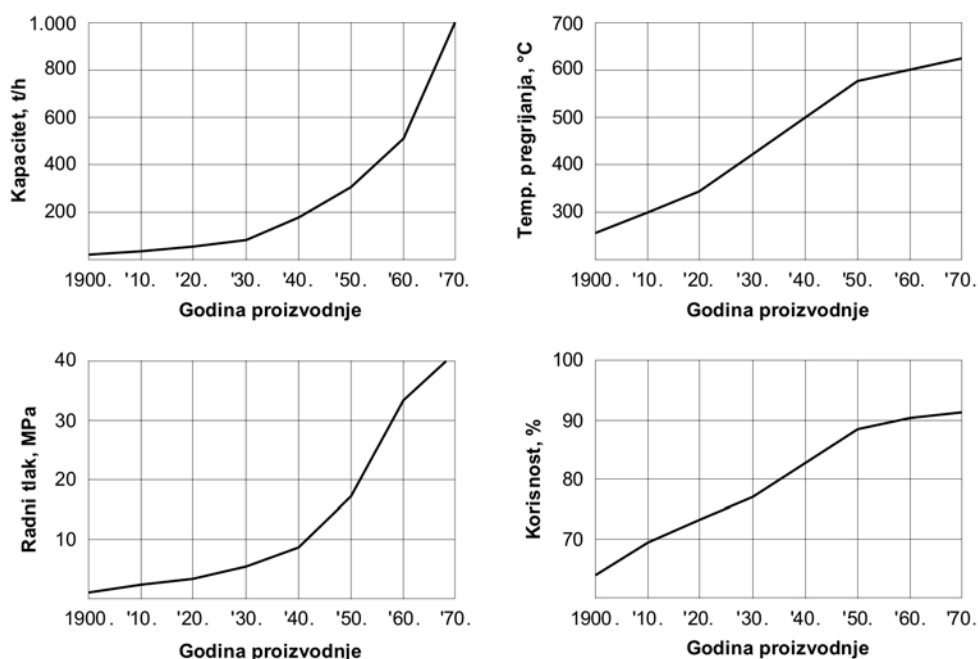
U razdoblju od 1900. do 1925. godine razvili su se sekcijski i strmocijevni kotlovi, pretežno na čvrsto gorivo koje je izgaralo u sloju na mehanički pokretanoj rešetki. Ti su kotlovi proizvodili paru tlaka do oko 4 MPa i temperature pregrijanja do 450 °C.

U sljedećoj etapi razvoja generatora pare od 1925. do 1950. godine uvedeno je uz izgaranje čvrstih goriva u sloju i izgaranje ugljene prašine u prostoru (za kopnena postrojenja), što je smanjilo volumensko opterećenje ložišta. Tlak proizvedene pare porastao je do 12,5 MPa, a temperatura pregrijane pare do 525 °C. Poslije 1950. godine grade se veliki parni kotlovi u bloku, to jest parni kotao i turbina čine jednu pogonsku jedinicu. Tlakovi pare penju se do više od 22,1 MPa (na brodovima do 10,5 MPa), a temperatura pregrijane pare ostaje 520 °C.

Potpuno nova etapa u razvoju generatora pare počinje uporabom nuklearnih reaktora u nuklearnim elektranama i u brodskim pogonskim postrojenjima. Više se ne može govoriti o klasičnom generatoru pare jer je generator pare postao samo izmjenjivač topline na koji se posredno prenosi toplina dobivena u reaktoru. Nuklearni reaktor sa sustavom izmjenjivača topline zamjenjuje klasični generator pare i čini primarni krug nuklearne elektrane ili nuklearnoga brodskog pogonskog postrojenja, dok ostali dio nuklearnih termopostrojenja, kao turbine, cjevovodi i drugo, ostaje u osnovi nepromijenjen.

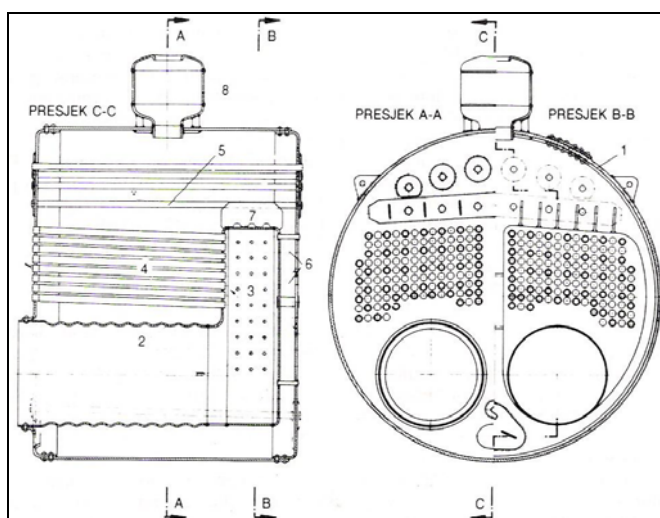
Razvoj generatora pare od 1900. do 1970. godina prikazan je na slici 6. prema razvoju karakterističnih veličina. Taj je razvoj nastavljen do danas.

Brodski generator pare datira još od davne 1807. godine, to jest od dana kad je za pogon broda "Clermont" prvi put poslužila vodena para. Prvi korak u razvoju brodskih generatora pare je škotski kotao; glavni su mu dijelovi prema oznakama na slici 7.: plašt bubnja (1), plamenica (2), skretna komora (3), dimne cijevi (4), kotve (5), sprežnjaci (6), ukrepe (7) i parni dom (8). Sve do Drugoga svjetskog rata škotski kotao bio je najčešće ugrađivani brodski generator pare. Prvi škotski kotlovi bili su izrađeni zakivanjem i uglavnom su loženi ugljenom, a poslije se prešlo na zavarene konstrukcije i loženje tekućim gorivom. Uporaba tekućih goriva omogućila je veće kapacitete zbog većih specifičnih opterećenja ogrjevnih površina, a zavarenom konstrukcijom dodatno je smanjena masa ugrađenih materijala, što je bilo danas važno za uporabu na brodovima.



Sl. 6. Razvoj generatora pare prema karakterističnim veličinama [7]

Fig. 6. The development of steam generators according to characteristic values [7]



Sl. 7. Škotski kotao [4]

Fig. 7. Scottish boiler [4]

Parametri pare proizvedene u kotlovima cilindričnih konstrukcija, kojima pripada i škotski kotao, uglavnom su odgovarali zahtjevima i potrebama parnih stapnih strojeva. Danas se samo kao pomoćnim kotlovima koristi izvedbama tipa tzv. *steam block*, koje imaju slične osnovne konstrukcijske elemente kao škotski kotao (plamenice, dimne cijevi i skretne komore).

Suvremeni su brodski propulzijski kotlovi vodocijevni s ložištem omeđenim ekranskim cijevima, u kojima se velik dio prijelaza topline ostvaruje radijacijom (> 50 %). Prostor kojim prolaze dimni plinovi također je omeđen ekranskim stijenkama. Suvremeni brodski propulzijski kotlovi nemaju vatrostalnih materijala. Loženje je stropno ili tangencijalno, s pomoću 3 - 4 plamenika (prije 6 - 9). Temperatura pregrijanja pare ne premašuje 520 °C radi materijala od kojega se izrađuju cijevi pregrijača. To je niskolegirani čelik s molibdenom i kromom, otporan na pojavu puzavosti. Čelik 10 Cr.Mo 4.4 (1,00 % kroma i 0,40 % molibdena) rabi se za izradbu početnih dijelova pregrijača, u kojima vladaju niže temperature, a čelik 13 Cr.Mo 9.10 (2,25 % kroma i 1,00 % molibdena) za više temperature koje vladaju u preostalim dijelovima pregrijačkih cijevi.

4. Razvoj toplinskih turbina

The Development of Heat Turbines

Toplinska je turbina stroj u kojemu se brojnim statorskim i rotorskim lopaticama kinetička energija strujanja radnog fluida (pare ili plina), nastala pretvorbom dijela njegove toplinske energije, pretvara u mehanički rad u obliku vrtnje rotora. Pretvorba toplinske u kinetičku energiju očituje se intenzivnim strujanjem, a praćena je naglim padom tlaka i temperature, te odgovarajućim povećanjem obujma radnoga fluida. Zbog kontinuiranog strujanja radnog fluida kroz turbinu, u nekim se jezicima turbina naziva i - strujnim strojem. Toplinske se turbine dijele na parne, u kojima se upotrebljavala vodena para, i plinske, na zagrijani zrak ili plinove izgaranja.

Iako su se izumi u kojima se iskorištavala kinetička energija pare ili plinova izgaranja pojavili već u 2. stoljeću, kao npr. Heronova kugla, toplinske se turbine počinju razvijati tek početkom 16. stoljeća. Godine 1629. talijanski fizičar, graditelj i liječnik G. de Branca predlaže napravu sličnu akcijskoj parnoj turbini. Mlaz iz sapnice udario je o lopaticu na obodu kola zamišljenoga po uzoru na podljevano mlinsko kolo. Vrtanjem kola dobiveni se mehanički rad prenosio zupčanim prijenosom i upotrebljavao za pokretanje stupe.

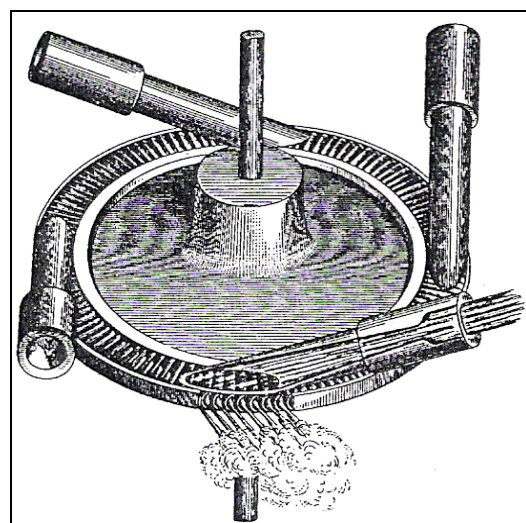
J. Barber je 1791. godine patentirao plinsku turbinu koja je pokretala mijeh za stlačivanje zraka za izgaranje, prije miješanja s plinovitim gorivom. Plinovi izgaranja strujali su kroz sapnice i pokretali su turbinsko kolo, a dobiveni rad služio je za pokretanje mijeha. Usprkos nedostatcima, taj se stroj može smatrati prototipom današnje plinske turbine.

Od 1831. godine W. Avery je u SAD-u izgradio pedesetak parnih turbina za pogon pila i strojeva za obradu drva, a jedna je čak ispitivana za pogon lokomotive. Sastojale su se od dvije križno spojene cijevi iz kojih je izlazila para kroz tangencijalne provrte na

krajevima, pa se taj primitivni rotor okretao zbog reakcije parnoga mlaza. Iako su te parne turbine imale termodinamičku korisnost jednaku tadašnjemu parnom stroju, malu specifičnu težinu i nisku cijenu, nestale su iz uporabe zbog otežane regulacije brzine vrtnje i učestalih kvarova.

Prvu industrijski upotrebljivu parnu turbinu patentirao je 1883. godine švedski inženjer Gustav Patrick de Laval (slika 8.). Posebnom konstrukcijom Lavalove sapnice omogućeno je ekspanzijsko strujanje pare brzinom većom od brzine zvuka. Svladavanje velikih sila zbog rotacije lopatica riješio je aksijalno ugrađenim lopaticama kojega spoj s obodom diska turbinskog kola nije bio opterećen na savijanje. Novina je bio i disk jednake čvrstoće. Sve je to omogućilo gradnju turbine snage od 5 kW, s dotad nezamislivom brzinom vrtnje od 435 s⁻¹ i iskorištenjem raspoloživoga toplinskog pada u jednom akcijskom kolu. Miran rad turbine zbog kontinuiranog nastrojavanja mlaza pare, mala specifična težina radnog dijela i temelja, bez dodatnih zamašnih masa, i mogućnost postizanja velikih jediničnih snaga – razlozi su zbog kojih je parna turbina u relativno kratkom vremenu naišla na široku uporabu.

Gotovo istodobno s pojavom Lavalove turbine, 1884. godine Charles Parsons u Engleskoj gradi parnu turbinu u kojoj se iskorištavanje većega toplinskog pada postiže ekspanzijom u nizu stupnjeva, i to podjednako u statorskim i u rotorskim lopaticama pojedinoga stupnja. Godine 1895. Curtis u SAD-u patentira i potom razvija kolo sa stupnjevanjem brzine, danas poznato kao Curtisovo kolo. Uz potpunu ekspanziju u sapnici i skretanje mlaza u prvom vijencu rotorskih lopatica, dodaje skretne lopaticu koje mlaz usmjeravaju na drugi vijenac rotorskih lopatica, što omogućuje iskorištavanje velikoga toplinskog pada u nekoliko (do tri) serijski ugrađenih kola – Curtisovih kola. Rateau u Francuskoj 1900. gradi akcijsku višestupanjsku turbinu s Curtisovim kolom i nizom akcijskih stupnjeva koje karakterizira jednak tlak ispred i iza vijenaca rotorskih lopatica zbog ekspanzije pare samo u statorskim lopaticama. Godine 1908. F. i B. Ljungström u Švedskoj grade prvu radijalnu turbinu s dva rotora koja se vrte u suprotnim smjerovima.



Sl. 8. De Lavalova parna turbina iz 1883. godine [2]

Fig. 8. De Laval steam turbine from 1883. [2]

Prvih trideset godina 20. stoljeća obilježava nagli porast uporabe parnih turbina građenih po uzoru na Lavalove i Parsonsove turbine i sve veće istiskivanje parnog stroja iz javnih električnih centrala u svijetu, posebno u novogradnjama. U razdoblju od 1893. do 1927. godine pušteno je u rad oko 5.000 Lavalovih turbina s po jednim turbinskim kolom. Godine 1906. izgrađena je turbina snage od 10.000 kW (General Electric, SAD), a potom 1913. snage od 25.000 kW (Parsons, Britanija), 1919. 60.000 kW (Westinghouse, SAD), 1921. također od 60.000 kW (AEG, Njemačka) i godine 1922. snage od 160.000 kW (Brown Boveri, Švicarska). Svjetska kriza tridesetih godina i izbijanje rata odgađaju daljnji rast jediničnih snaga do pedesetih godina 20. stoljeća.

Iako istodobno započeo, razvoj je plinskih turbina bio puno sporiji. Uzrok su tomu bile nedostatne tehnološke mogućnosti, nedostatak materijala otpornih na visoke temperature i nedovoljno dobra aerodinamička rješenja potrebna u gradnji kompresora i turbina. Tek 1903. godine C. Lemal i R. Armengaud konstruiraju prvu plinsku turbinu koja daje koristan rad. Trostupanjski kompresor tlačio je zrak u komoru za izgaranje tekućeg goriva. Uštrcavanjem vode temperatura se dimnih plinova snižavala do upotrebljive razine, a ekspanzija se zbivala u dvostupanjskoj akcijskoj turbini. Kako je postignuta termodinamička iskoristivost bila samo oko 3 %, što je bilo zadovoljavajuće u usporedbi s ostalim tadašnjim toplinskim strojevima, trebala su proteći još četiri desetljeća do široke uporabe plinskih turbina. U Mossovu se patentu (SAD, 1912.) za kompresiju i izgaranje, pa i dobivanje rada, upotrebljava postojeći stapni motor s unutrašnjim izgaranjem, iz kojega zbog ograničene duljine stapaja plinovi izgaranja izlaze pri višem tlaku od okolnoga i sa znatnim energetskim potencijalom. Dio toga, inače nepovratno izgubljenog energetskog potencijala, turbina pretvara u mehanički rad. S. A. Moss upotrebljava slobodnu turbinu za pogon puhalo, koja u cilindre motora komprimira zrak za izgaranje. Time se specifična snaga stapnog motora znatno povećava. Uporaba turbopuhala naglo se širi, najprije u zrakoplovima i u trkaćim automobilima, a danas posebno u brodskim dizelskim motorima.

Već 1925. godine Talijan M. Pescara predlaže kombinaciju plinske turbine i generatora plina sa slobodnim stapovima. Dvoradni cilindar dizelskoga motora s lebdećim stapovima i zračnim jastucima predstavlja zapravo kompresor i komoru za izgaranje s izbalansiranim vlastitim pogonom, a energija vrućih ispušnih plinova pokreće turbinu. Tek pedesetak godina poslije počinje široka praktična uporaba toga stroja za pogon brodova, lokomotiva i kompresora plinovodnih stanica. Mala specifična težina i povoljan odnos zakretnoga momenta i brzine vrtnje čine taj tip stroja povoljnijim od sporohodnoga dizelskog motora. No, zbog velike buke usisnih kompresorskih zaklopka i ograničene jedinične snage, te zbog pojave srednjohodnih motora velike specifične snage, propelera s promjenjivim usponom, hidrauličnih spojka i dizelsko-električnih pogona raznih tipova - takav se prijelazni tip uređaja izbacuje iz šire uporabe.

Široku praktičnu uporabnost u svojem primarnom obliku, plinska turbina dobiva 1939. godine. U Neuchatel, u Švicarskoj, gradi se podzemna električna centrala s plinskom turbinom kao izvor energije pri ratnim razaranjima. Brza spremnost za start i naglo opterećenje, male dimenzije, velika specifična snaga i niža cijena – glavne su njezine prednosti u usporedbi s drugim postrojenjima. Ratna zbivanja potiču u Engleskoj, Njemačkoj i SSSR-u snažan razvoj plinskoga turbinskog mlaznog motora u zrakoplovstvu, a najvažniji je patent Engleza F. Whittlea iz 1939. godine. Poslije Drugoga svjetskog rata plinski turbinski mlazni motor i trubopropelerni motor istisnuli su stapni motor iz zrakoplovne propulzije za veće jedinične snage motora.

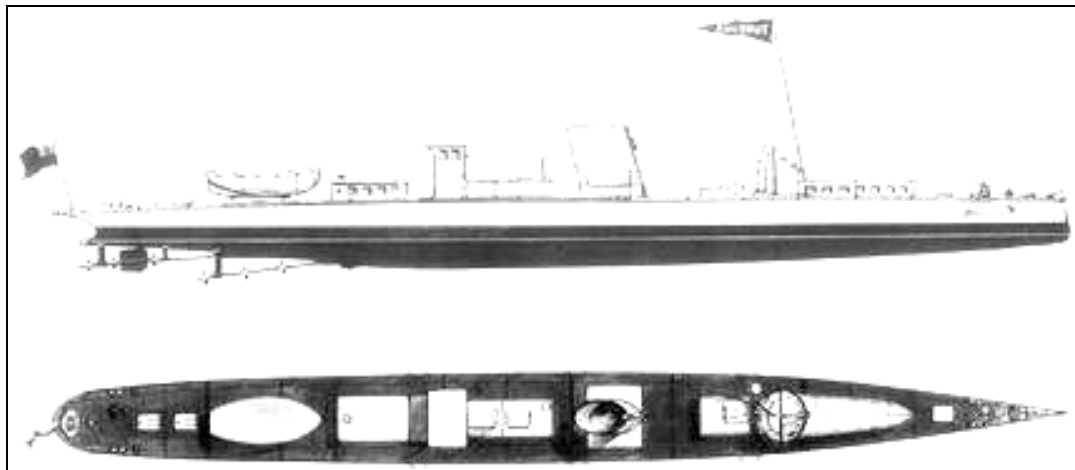
Krajem četrdesetih i početkom pedesetih godina grade se plinske turbine sa zatvorenim Ackeret-Kellerovim ciklusom i čistim zrakom kao radnom tvari. Usprkos djelotvornom pogonu s promjenjivim opterećenjima uz malu promjenu toplinske iskoristivosti, mogućnosti uporabe drugih radnih tvari, npr. helija u ciklusu s nuklearnim reaktorima - bile su vrlo ograničene. Grijač zraka kao dio plinskoturbinskoga agregata sa zatvorenim ciklusom bio je ne samo skup već je ograničavao temperature na ulazu u turbinu, pa su plinske turbine s otvorenim ciklusom istisnule agregate zatvorenoga ciklusa. Usavršavanje plinskoturbinskoga agregata sve do današnjih dana odvija se ovisno o tehnološkom razvoju hlađenih dijelova, poradi što viših temperatura na ulazu u turbinu, te kroz optimiziranje toplinskih shema radi povećanja termodinamičke iskoristivosti. Plinskoturbinski agregati prevladavaju u civilnom i ratnom zrakoplovstvu, služe i u elektranama za podmirenje vršnih opterećenja, te za pogon ratnih brodova uz kombinirane procese CODAG (dizelski motor i plinska turbina). Danas su parne i plinske turbine najzastupljeniji strojevi u području velikih jediničnih snaga.

Prva uporaba parne turbine za brodsku propulziju ostvarena je 1894. godine na brodu "Turbinia" (slika 9.). Izumivši parnu turbinu 1884. godine, Charles Parsons uvidio je njezin potencijal za pokretanje brodova, pa je 1893. pokrenuo tvrtku *Marine Steam Turbine Company* s još petoricom partnera. Da bi svijetu prezentirao svoju ideju o uporabi parnih turbina na brodovima, napravio je eksperimentalni brod "Turbinia", građen od čelika tvrtke "Brown and Hood". Porinuta je 2. kolovoza 1894. Usprkos uspjesima turbinskih motora, početni pokušaji s korištenjem jednim propelerskim vratilom bili su razočaravajući. Nakon istraživanja vezanih uz kavitaciju i gradeći prvi kavitacijski tunel, Parsons ugrađuje tri turbine s aksijalnim protokom koje su pogonile tri propelerska vratila. U pokusnim vožnjama, taj je sustav postigao maksimalnu brzinu od 34,5 čv. Najbolja demonstracija mogućnosti novoga broda bila je 26. lipnja 1897. kad je u Spitheadu organizirana proslava u čast kraljice Victorije, na kojoj je "Turbinia" pokazala svoju nadmoćnu brzinu u utrci s putničkim i teretnim brodovima, te uspješno umaknula mornaričkih patrolnim brodovima, dotad najbržim plovilima u Kraljevstvu. Nedugo nakon toga Kraljevska mornarica dala je izgraditi dva torpedna broda, HMS "Viper" i HMS "Cobra", opremljena s po dvije turbine, koji su bili porinuti 1899. godine.



Sl. 9. Parsonsov parnoturbinski brod "Turbinia" [9]

Fig. 9. Parson's gas turbine vessel "Turbinia" [9]



Sl. 10. Tlocrt i bokocrt "Turbinie" [10]

Fig. 10. Layout of "Turbinia" [10]

"Turbinia" je imala težinu od 44,5 tona, duljinu 31,6 m, gaz 0,9 m i postizala je brzinu od 34,5 čv (64 km/h). Postrojenje joj se sastojalo od tri trostupanjske aksijalne turbine od kojih je svaka pokretala vratilo duljine 3,8 m s *pitch*-propelerima promjera od 610 mm. Paru su proizvodila tri vodocijevna kotla (1,5 MW) ložena ugljenom, ogrjevne površine od 102 m². Danas se "Turbinia" nalazi u muzeju Discovery u Newcastleu u Engleskoj, dok se njezino originalno parnoturbinsko postrojenje čuva u londonskom Znanstvenom muzeju.

5. "Titanic" – nepotopivi brod

"Titanic" – Unsinkable Vessel

"Clermont" (1807.), "Turbinia" (1894.) i, poslije, "Nautilus" (1954.) povijesni su brodovi s pionirskom ulogom uporabe nove vrste propulzije: parnoga stapnog stroja, parne turbine i nuklearnog reaktora. Uz njih važno mjesto u povijesti razvitka brodske parne propulzije pripada brodu "Titanicu". Početak dvadesetog stoljeća

je vrijeme optimizma i napretka, praćeno povećanim transatlantskim prijevozom putnika, tereta i pošte. Brodarska tvrtka "Star Line" dogovara s brodograditeljskom tvrtkom "Harland & Wolff" iz Belfasta gradnju tri golega broda koji će postati najveći pokretni objekti što ih je čovjek ikad izgradio. Ta tri broda trebala su se zvati "Olympic", "Titanic" i "Gigantic" (zbog straha od izazivanja sudbine "Gigantic" je preimenovan u "Britannic"). Brodovi su trebali biti vizualno jednaki po veličini i strukturi, ali je "Titanicu" namijenjena sudbina prave zvijezde u kruni "Star Linea".

Kobilica za "Titanic" postavljena je 22. ožujka 1909. U idućih dvadeset šest mjeseci 17.000 radnika brodogradilišta "Harland & Wolff" radili su po 9 sati dnevno, šest dana u tjednu, da bi izgradili golem trup. Glavni brod "Star Linea" trebao je imati dvoradne parne motore, koji su bili pravilo za tadašnje putničke brodove, te parnu turbinu koja bi okretala središnji od tri propelera. Brod je također imao dvodno i sofisticirani sustav vodonepropusnih odjeljaka što su trebali pružiti potpunu sigurnost i osigurati nepotopivost broda. 31. svibnja

1911. završeno je nadgrađe moćnog "Titanica" pa je porinut u rijeku Lagan, za što su bile potrebne dvadeset dvije tone loja, ribljeg ulja i sapuna, nakon čega je otegljen na opremni dok, što je prikazano na slici 11.

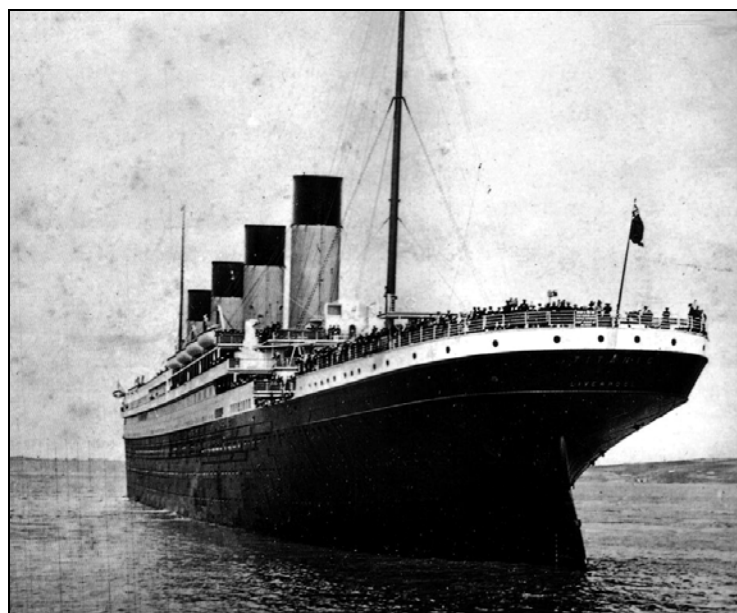
Poslu je prionulo tri tisuće drvodjelaca i strojara, električara i limara, vodoinstalatera i ličilaca, stručnjaka raznovrsnih profila i dizajnera za unutrašnjost broda, opremajući "Titanic" po najvišim standardima tadašnjega vremena. Konačno, 2. travnja 1912. brod je bio završen. Dobio je potvrdu plovnosti pa ga je tvrtka "Harland & Wolff" predala "Star Lineu" i parno čudo s tri vijka zaplovilo je u povijest. RMS "Titanic", poznat i kao SS "Titanic", imao je 9 paluba, bio je dugačak 269 m, a težio

je 46.000 tona. Bio je najveći putnički brod na svijetu u to doba. Na svoje prvo putovanje krenuo je iz Southamptona 10. travnja 1912. (slika 12.). U nedjelju, 14. travnja 1912. u 23,40 sati (po brodskom vremenu) "Titanic" udara u ledenu santu. Potonuo je nakon dva sata i četrdeset minuta, u 02,20. U tragediji, u kojoj je sudjelovalo svih 2.228 putnika i članova posade, poginulo je ili se utopilo u vodama ledenog Atlantika njih 1.523. To je izazvalo velik šok u cijelomu pomorskom i društvenom životu jer se vjerovalo da je "Titanic", kao spoj najnovijih tehnologija i materijala toga vremena, te iskusne posade, "nepotopivo čudo". Njegovu olupinu pronašli su Jean-Louis Michel i Robert Ballard 1985. godine.



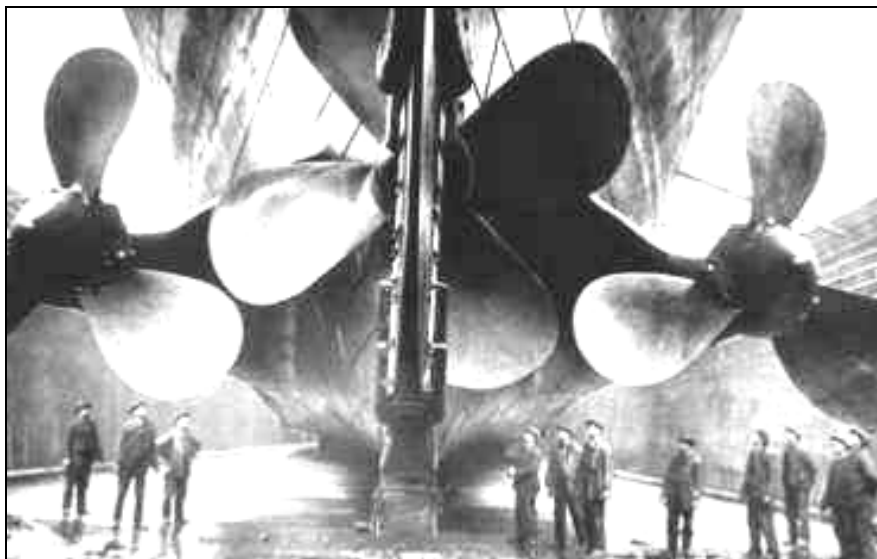
Sl. 11. "Titanic" i brod blizanac "Olympic" u brodogradilištu u Belfastu [12]

Fig. 11. "Titanic" and her sister ship "Olympic" in Belfast shipyard [12]



Sl. 12. "Titanic" pri isplavljenju iz Southamptona [12]

Fig. 12. "Titanic" on her departure from Southampton [12]



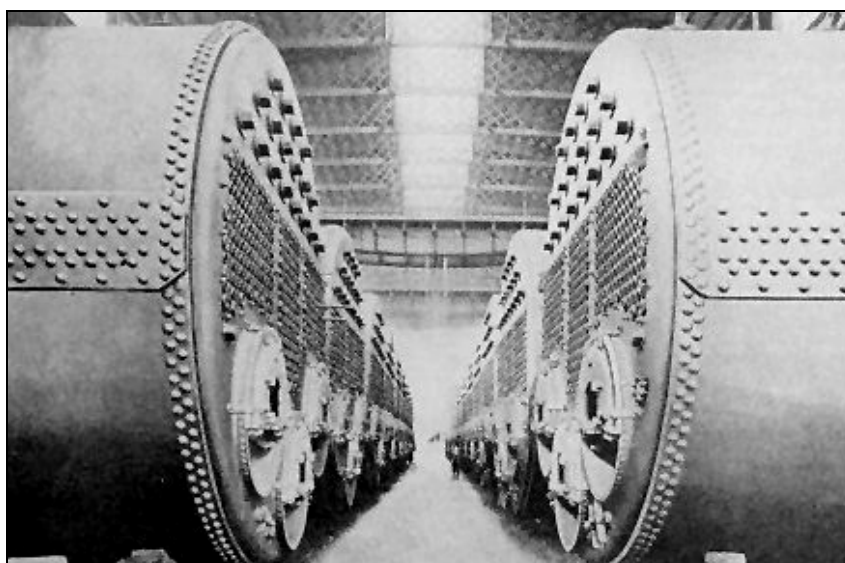
Sl. 13. Sustav propelera, dva bočna i središnji pogonjen parnom turbinom [12]

Fig. 13. The system of propellers, two side propelles and central one driven by means of gas turbine [12]

"Titanik" je imao tri brodska vijka (slika 13.) pogonjena dvama dvoradnim stapnim parnim strojevima s po četiri cilindra, svaki snage od 22.050 kW i $1,28 \text{ s}^{-1}$ i jednom niskotlačnom Parsonsovom turbinom, snage od 11.760 kW i $2,75 \text{ s}^{-1}$, koja je pogonila središnji vijak. Paru je osiguravalo 29 kotlova, 24 dvostrana i 5 jednostranih, smještene u 6 kotlovnica (slika 14.). Bilo je potrebno 6.000 tona ugljena za pokretanje broda preko Atlantika, od kojih je svaki kilogram ručno ubacivan lopatama u ložišta kotlova. Radnike koji su obavljali taj mukotrni posao nazivali su "crnom družinom". Da bi im rad bio uravnotežen, kotlovnice su bile opremljene posebnim

elektro-mehaničkim mjeracima vremena koji su se oglašavali svakih sedam minuta. U isto vrijeme na prednjoj strani kotlova postojao je brojčanik koji je prikazivao količinu svježega ugljena u svakom ložištu. Svaku kotlovnicu odvajala su masivna čelična brtvena vrata da bi se spriječio eventualni prodor vode u havariji.

Spomenik vrijednim i hrabrim strojarima koji su pokretali divovsko srce "Titanica", od kojih je većina potonula u pokušaju da ga održi na površini, otkriven je 1914. godine u East Parku u Southamptonu, pred više od 100.000 ljudi (slika 15.).



Sl. 14. Škotski kotlovi u jednoj od šest kotlovnica "Titanica" [12]

Fig. 14. Scottish boilers in one out of six boilers of Titanic [12]



Sl. 15. Spomenik strojarima: "Titanic's Engineers Memorial" u Southamptonu [12]

Fig. 15. "Titanic's Engineers Memorial" in Southampton [12]

6. Brodska nuklearna propulzija

Ship's Nuclear Propulsion

USS "Nautilus" (slika 16.) bila je prva nuklearno pokretana podmornica na svijetu i prvo plovilo koje je uspješno izvršilo podvodni prijelaz preko Sjevernog pola. Izgradnja "Nautilusa" bila je omogućena zbog uspješnog razvoja postrojenja nuklearne propulzije od skupine znanstvenika i inženjera Naval Reactor Brancha pod vodstvom Povjerenstva za atomsku energiju SAD-a, na čelu kojega je bio kapetan američke mornarice Hyman G. Rickover. U srpnju 1951., američki Kongres odobrio je izgradnju prve nuklearne podmornice na svijetu. Kobilicu je postavio predsjednik Harry S. Truman na navozu tvrtke Electric Boat Shipyard u Connecticutu 14. lipnja 1952. Poslije gotovo 18 mjeseci gradnje, "Nautilus" je porinut 21. siječnja 1954. u rijeku Thames. Tijekom idućih nekoliko godina srušio je sve dotadašnje rekorde brzine za podmornice i duljine plovidbe pod morem bez izranjanja.



Sl. 16. USS "Nautilus" – prva nuklearna podmornica na svijetu [13]

Fig. 16. USS "Nautilus" – first nuclear submarine in the world [13]

U svibnju 1959. "Nautilus" uplovljava u Mornaričko brodogradilište u Portsmouthu na prvi remont i zamjenu jezgre nuklearnoga goriva. Remont je završen u kolovozu 1960. i "Nautilus" je krenuo na novo uvježbavanje, te je potom otplovio prema Mediteranu, gdje se priključio američkoj Šestoj floti i postao prva nuklearna podmornica pod njezinim zapovjedništvom.

Tijekom idućih šest godina "Nautilus" sudjeluje u više vojnih vježba preplovivši više od 200.000 NM. U proljeće 1966. ponovno ulazi u knjige rekorda s 300.000 NM plovidbe pod morem. U proljeće 1979. isplovjava iz Grotona u Connecticutu na svoje posljednje putovanje. Uplovljava u Mornaričko brodogradilište Vallaejo u Californiji 26. svibnja 1979. Povučen je iz službe 3. ožujka 1980. nakon 25 godina službe i s više od pola milijuna preplovljenih NM.

Prvi civilni brod na nuklearni pogon bio je sovjetski ledolamac "Lenjin", koji je porinut 1958. Godine 1962. porinut je i prvi trgovački brod s nuklearnim pogonom NS "Savannah", američke proizvodnje. Za brodsku propulziju uglavnom se rabe reaktori tipa PWR – reaktori hlađeni vodom pod tlakom. Osim u vojne svrhe, nuklearna propulzija dosad nije znatnije korištena u brodogradnji, radi sigurnosti i zaštite okoliša.

7. Zaključak

Conclusion

Ovim radom želi se podsjetiti na dvostoljetni jubilej prve uspješne uporabe parnog stroja za brodski pogon. Rad je sinteza temeljnih povijesnih činjenica koje su kroz programe brodstrojarskog studija pomalo zapostavljene ili se jako malo spominju. Poboljšavajući Papinov (1690.) i Newcomenov (1700.) parni stroj, James Watt 1769. godine patentira svoj parni stroj, i 1788. godine uspio ga je konstruirati kakva danas poznajemo. Bio je to jedan od najvažnijih izuma kojim započinje doba industrijske

revolucije. Parni pogon uzrokovao je revoluciju i u kopnenom i u pomorskom prometu – prvo uspješno konstrukcijsko rješenje uporabe parnog stroja za pogon broda ostvario je Robert Fulton 1807. na brodu "Clermont", dakle prije točno 200 godina.

Stalna težnja za učinkovitijom pretvorbom toplinske energije u mehanički rad, nakon mnogih pokušaja (De Branca 1629., Barber 1791., Avery 1883.) dovodi do otkrića prve industrijski uporabljive parne turbine koju 1883. patentira Gustav Patrick de Laval. Gotovo istodobno, 1884. godine Charles Parsons i 1895. Charles Curtis patentiraju svaki svoju parnu turbinu, nakon čega započinje razdoblje njihova intenzivnog razvoja i industrijske uporabe. Prvu parnu turbinu za brodsku propulziju ostvario je sam Parsons 1894. godine na eksperimentalnom brodu "Turbinia".

Usporedno s uporabom i razvojem stapnih i turbinskih parnih strojeva za pogon brodova odvija se i razvoj brodskih generatora pare. Zahvaljujući razvoju tehnologije i poboljšanju svojstava materijala, u proteklih dvjesto godina brodski generatori pare doživjeli su neslućen razvoj u odnosu prema prvom škotskom kotlu korištenom za proizvodnju pare koja je napajala parni stroj na "Clermontu". Danas su to visokoučinkoviti toplinski uređaji, velikih kapaciteta, visoke pogonske sigurnosti i jednostavne konstrukcije, koje karakterizira potpuno ekranizirano ložište, stropni smještaj plamenika u ložištu i potpuno izgaranje uz niski koeficijent pretička zraka, poput npr. generatora pare tipa ESD-4.

Dok se parnim turbinama prije koristilo za propulziju velikih tankera za sirovu naftu, velikih kontejnerskih brodova i brodova za prijevoz ukapljenih plinova (LNG), danas je njihova uporaba uglavnom ograničena na pogon LNG-brodova.

Na suvremenim putničkim brodovima danas su kombinirana GES-postrojenja (engl. *gas-electric-steam*). Po dvije plinske turbine, razvijene od zrakoplovnih motora General Electric, svaka snage od oko 20 MW, pogone električni generator. Plinovi iz turbina idu u kotlove na ispušne plinove koji proizvode pregrijanu paru i para potom pogoni parnu turbinu. Ona daje oko 9 MW snage i također pogoni generator električne struje koja služi za elektromotorni pogon broskog vijka.

Literatura

References

- [1] M. Didović, *Dvjesto godina brodske parne propulzije (1807. – 2007.)*, diplomski rad, Pomorski odjel Sveučilišta u Dubrovniku, Dubrovnik, 2007.
- [2] Stodola, *Dampf und gas turbinen*, Verlag von J. Springer, Berlin, 1922
- [3] J. Guthrie, *A History of Marine Engineering*, Hutchinson Educational Ltd, London, 1971,
- [4] Z. Prelec, *Brodski generatori pare*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [5] J. Šretner, "Parni stroj, brodski", *Pomorska enciklopedija*, svezak 5., str. 703.-714., JLZ, Zagreb, 1960.
- [6] J. Šretner, "Brod, pogonska postrojenja", *Tehnička enciklopedija*, svezak 2., str. 328.-349., JLZ, Zagreb, 1966.
- [7] L. Kreuh, H. Požar, "Parni kotao (Generator pare)", *Tehnička enciklopedija*, svezak 10., str. 164.-202., JLZ "Miroslav Krleža", Zagreb, 1986.
- [8] Z. Guzović, M. Majcen, "Turbina, toplinska", *Tehnička enciklopedija*, svezak 13., str. 222.-254., LZ "Miroslav Krleža", Zagreb, 1997.
- [9] Wikipedia:
http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_revolution;
http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_engine;
http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Nautilus_%28SSN-571%29; <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbinia>,
 (svibanj 2007.)
- [10] University of Cambridge: http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/1950-1975/control_wattengine.html;
<http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/noflash/18751900/turbinia.html>, (svibanj 2007.)
- [11] University of Rochester: <http://www.history.rochester.edu/steam/thurston/fulton/index.html>, (svibanj 2007.)
- [12] RMS Titanic Inc.: <http://www.rmstitanic.net>, (svibanj 2007.)
- [13] U.S. Navy Submarine Force Museum: <http://www.usnautilus.org/index.html>, (svibanj 2007.)

Rukopis primljen: 4. 7. 2007.