

radnih procesa traje duže vremena (iskop, zidanje, betoniranje), pa se kumulativnim registriranjem utrošenog vremena i količine radova pogreške smanjuju. Omjer utrošenog vremena i količine radova daje orientacijske norme koje služe za provjeru postojećih normi.

Normiranje utroška materijala. Normom utroška materijala određuje se potrebna količina materijala za jedinicu proizvoda određene kvalitete i dimenzija. Osim količina koje se neposredno normiraju, u normu se uračunavaju otpaci i gubici materijala (npr. kod sjećenja betonskih pločica, drvene građe, zidnih pločica i sl.). Neki se materijali prerađuju u poluproizvode (npr. beton, mort, asfalt i sl.). Za njih se određuje norma utroška pojedinih materijala. Posebno se određuje norma utroška pojedinih materijala u finalnom proizvodu (npr. količina morta za 1 m² zida od opeke).

Prilikom normiranja utvrđuje se način rada, mjeri se utrošak materijala i količina otpadaka, utvrđuje se dozvoljeno rasipanje i mjeri se količina proizvoda. Norma utroška materijala N_m određuje se iz izraza

$$N_m = \frac{M}{Q}, \quad (7)$$

gdje je M količina ugrađenog materijala s dozvoljenim otpadom i rasipanjem, a Q količina proizvoda.

Za normiranje utroška materijala moguća je primjena proizvodne, eksperimentalno-laboratorijske i računsko-analitičke metode, te metode tehničke evidencije.

Proizvodna metoda sastoji se u mjerenu utrošku materijala i količine proizvoda tokom rada na gradilištu ili pogonu tokom jedne ili više smjena. Mjeri se neposredno ugrađeni materijal i otpaci. Mjereno otpadaka često je dosta složeno. Ta se metoda

Tablica 3

GRUPE MATERIJALA I METODE NORMIRANJA UTROŠKA MATERIJALA

Grupa materijala	Imenovanje grupe materijala	Primjeri osnovnih materijala	Metode normiranja
I	Elementi i konstrukcije rađeni u radionicama bez preradbe pri montaži	Veliki betonski blokovi, stolarija, građevne konstrukcije, sanitarni predmeti	Računsko-analitička
II	Dužinski materijali	Drvene grede, daske i sl., tračnice, profilirani čelici, armirani čelici, cijevi	Računsko-analitička i proizvodna
III	Pločasti materijali	Limovi, ploče i pločice, parket, staklo, pregradne ploče itd.	Računsko-analitička i proizvodna
IV	U rolama	Ljepenka, juta, tapeće	Računsko-analitička i proizvodna
V	Sipki i prašnasti	Cement, vapno, gips, pijesak, šljunk, troska i sl.	Proizvodna i laboratorijska
VI	Betonske smjese i mortovi	Betonske mješavine, mortovi za zidanje, za žbuku itd.	Proizvodna i laboratorijska
VII	Kamen nepravilna oblika	Kamen za zidanje, za pločnike i sl.	Proizvodna i laboratorijska
VIII	Kamen pravilna oblika	Opeka, betonski i keramički blokovi i sl.	Računsko-analitička i proizvodna
IX	Žitki sastavi i ljeplila	Firnisi, boje, lakovi, izolacijski premazi, bitumen i dr.	Proizvodna i laboratorijska
X	Komadni materijali	Čavli, vijci, spojnice i sl.	Proizvodna i računsko-analitička
XI	Materijali za zavarivanje	Elektrode, acetilen, kiseline i sl.	Proizvodna, laboratorijska i rač-analitička
XII	Inventarni elementi za višekratnu upotrebu	Elementi za oplate, skele, podupore i sl.	Proizvodna

uglavnom primjenjuje kad upotrijebljeni materijali tokom pre-radbe, obradbe i ugradnje mijenjaju oblik (npr. sjećenje opeke, obradba kamena, rezanje drvene građe, betonskog željeza, stakla i sl.). Istodobno se provjerava tehnološki postupak sa svrhom da se smanji količina otpadaka. Da bi se dobili pouzdani podaci, radni proces mora biti dobro organiziran i konstrukcija mora imati više sličnih građevnih elemenata.

Eksperimentalno-laboratorijska metoda služi za određivanje utroška materijala za poluproizvode kao što je beton, mort i sl., od kojih se izrađuju probna tijela (uzorci) za ispitivanje njihovih svojstava (čvrstoća, elastičnost, vodopropusnost i sl.) koja ovise o svojstvima upotrijebljenih materijala i njihovu omjeru. Utrošak materijala za izradbu uzorka povećava se za dopuštena rasipanja na gradilištu.

Računsko-analitička metoda sastoji se u proračunu utroška materijala za elemente konstrukcije kao što su montažni blokovi, čelične i drvene konstrukcije, kolosijeci i sl.

Metoda tehničke evidencije osniva se na mjerenu materijala prije početka rada i preostalog materijala nakon dovršenog rada. Pri tom treba uračunati i dopremljeni materijal u toku smjene ili dana. Ako se još izmjeri količina proizvoda u istom vremenskom razdoblju, dobiva se osnova za određivanje norme utroška materijala. Ta je metoda najmanje točna, pa se primjenjuje za radove manjeg obujma i za provjeru postojećih normi.

Za neke radove u građevinarstvu može se upotrijebiti nekoliko metoda za određivanje normi utroška materijala (tabl. 3), već prema vrsti materijala.

LIT.: G. Dressel, Die Arbeitsstudie in Baubetrieb. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1961. — H. Hilf, Nauka o radu (prijevod). Otokar Keršovani, Rijeka 1963. — R. Barnes, Studij pokreta i vremena (prijevod). Panorama, Zagreb 1964. — I. A. Petrov, Техническое нормирование и сметное дело в строительстве. Издательство литературы по строительству, Москва 1964. — U. Popović, Normiranje u građevinarstvu. Prosveta, Novi Sad 1967. — J. Ulle, Verlustquellenforschung auf Baustellen. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1970. — D. Taboršák, Studij rada. Tehnička knjiga, Zagreb 1970. — S. Filipković, Industriska ergonomija (prijevod). Institut jugoslovenske i inostrane dokumentacije zaštite na radu, Niš 1974. — D. Spranz, Arbeitszeiten im Baubetrieb. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1975. — J. Klepac, Proučavanje rada u građevinarstvu. Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb 1982.

J. Klepac

NUKLEARNA ENERGETSKA POSTROJENJA, postrojenja za iskorištenje toplinske energije dobivene raspadom (fisijom) atomskih jezgara urana i plutonija (v. *Nuklearna energija*; v. *Nuklearno gorivo*). Ta se toplinska energija može iskoristiti nakon pretvorbe u mehaničku energiju za prizvodnju električne energije ili za propulziju, odnosno neposredno za tehnološke procese i grijanje. Toplinska energija pretvara se u mehaničku energiju u načelu na isti način kao u konvencionalnim energetskim postrojenjima (v. *Elektrane*, TE 3, str. 547; v. *Turbine*) jednim od pogodnih kružnih termičkih procesa (v. *Termodinamika*).

TIPOVI NUKLEARNIH ENERGETSKIH POSTROJENJA

Nuklearna energetska postrojenja mogu se razvrstati prema različitim kriterijima. Najčešće se razvrstavaju prema tipovima nuklearnih reaktora (v. *Nuklearni reaktori*), dok je s gledišta iskorištavanja proizvedene topline najprikladnije takva postrojenja, odnosno reaktore, klasificirati prema vrstama rashladnih sredstava (hladiila) kojima se odvodi toplina proizvedena u reaktoru. Prema rashladnom sredstvu razlikuju se reaktori hlađeni vodom pod tlakom, kipućom vodom, plinom i rastaljenim metalom. Osim o rashladnom sredstvu, izvedba postrojenja i potrebni pomoći sustavi ovise o izvedbi reaktora, materijalu moderatora itd. Prema toj klasifikaciji danas su u pogonu ili se grade sljedeći tipovi nuklearnih energetskih postrojenja: a) postrojenja s reaktorima hlađenima vodom pod tlakom: 1) reaktor hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom (reaktor tipa PWR, Pressurized Water Reactor, ili u sovjetskoj literaturi reaktor tipa VVR, водо-водянй реактор), 2) reaktor

hlađen i moderiran teškom vodom pod tlakom (HWR, Heavy Water Reactor); *b) postrojenja s reaktorima hlađenima kipućom vodom:* 1) reaktor hlađen i moderiran kipućom običnom vodom (BWR, Boiling Water Reactor), 2) reaktor hlađen kipućom običnom vodom i moderiran teškom vodom (SGHWR, Steam Generating Heavy Water Reactor), 3) reaktor hlađen kipućom običnom vodom i moderiran grafitom (LWGR, Light Water Graphite Reactor); *c) postrojenja s reaktorima hlađenima plinom:* 1) reaktor hlađen plinom i moderiran grafitom, tzv. prva generacija takvih reaktora (GCR, Gas Cooled Reactor), 2) usavršeni reaktor hlađen plinom i moderiran grafitom, tzv. druga generacija (AGR, Advanced Gas Reactor), 3) visokotemperaturni reaktor hlađen plinom i moderiran grafitom (HTGR, High Temperature Gas Reactor), 4) oplodni reaktor hlađen plinom (GBR, Gas Breeder Reactor); *d) postrojenja s reaktorima hlađenima tekućim metalima:* 1) oplodni reaktor s brzim neutronima hlađen tekućim metalima (LMFBR, Liquid Metal Fast Breeder Reactor).

Većini navedenih reaktora potreban je obogaćeni uran ili plutonij kao nuklearno gorivo. Jedino u reaktorima hlađenima i moderiranim teškom vodom (HWR) i u reaktorima prve generacije hlađenima plinom i moderiranim grafitom (GCR) može se upotrijebiti i prirodni uran kao gorivo.

Osim navedenih, ispitivano je još nekoliko tipova reaktora s gledišta prikladnosti za njihovu upotrebu u energetskim postrojenjima. To su: *a)* reaktori s organskim moderatorom (OMR, Organic Moderated Reactor), *b)* reaktori hlađeni rastaljenim solima (MSR, Molten Salt Reactor), *c)* reaktori hlađeni plinom i moderirani teškom vodom (GCHWR, Gas Cooled Heavy Water Reactor). Spomenuti reaktori, pa i neki drugi tipovi koji nisu spomenuti, nemaju danas praktičnog značenja. Pri ispitivanju mnogih prototipnih postrojenja pojavile su se, naime, neočekivane poteškoće (radijacijsko oštećenje materijala, korozija, pogonska nestabilnost i sl.).

Ekonomičnost nuklearnih postrojenja veoma je utjecala na dalju gradnju nekih tipova reaktora. Tipičan su primjer reaktori prve generacije hlađeni plinom i moderirani grafitom (GCR), koji se više ne grade.

U prvim godinama razvoja nuklearne energetike eksperimentiralo se s mnogim tipovima reaktora (v. *Nuklearni reaktori*). Poslije je, međutim, znatno smanjen broj tipova koji su imali neke izgledne za praktičnu upotrebu, koja ovisi o troškovima gradnje, sigurnosti u pogonu, jednostavnosti u upravljanju i održavanju. Razvoj reaktorskog tipa od zamisli do komercijalne eksploatacije vrlo je skup i dug, a uspješnost može biti osigurana samo angažiranjem velikih istraživačkih i industrijskih potencijala. Osim toga, tek neki tipovi reaktora omogućuju standardizaciju projekta i komponenata, a ta standardizacija osigurava brzu i relativno jeftinu gradnju postrojenja. Zbog svega toga samo se nekoliko tipova nuklearnih reaktora gradi u većem broju (tabl. 1).

Visokotemperaturni plinom hlađeni reaktori (HTGR) i oplodni reaktori s brzim neutronima hlađeni tekućim metalima

(LMFBR) smatraju se danas tipovima reaktora koji imaju najveće potencijalne mogućnosti daljeg razvoja.

Vjerojatno je, međutim, da će se osim najrasprostranjениjih i perspektivnih tipova reaktora (osim prve generacije plinom hlađenih reaktora) u nekim zemljama i dalje graditi drugi tipovi (tabl. 2) koji su u tim zemljama razvijeni i koji imaju zadovoljavajuće pogonske karakteristike. To u prvom redu vrijedi za drugu generaciju plinom hlađenih reaktora (AGR), za grafitom moderirane lakovodne reaktore (LWGR) i, možda, za reaktore hlađene običnom vodom i moderirane teškom vodom (SGHWR).

Tablica 2
PREGLED NUKLEARNIH REAKTORA U ELEKTRANAMA
(STANJE U KOLOVOZU 1983)

Zemlja	Nuklearne elektrane u pogonu			Nuklearne elektrane u gradnji		
	Broj reaktora	Tip	Snaga na pragu MW	Broj reaktora	Tip	Snaga na pragu MW
Argentina	1	HWR	320	2	HWR	1 291
Austrija	—	—	—	1	BWR	695
Belgija	6	PWR	3464	2	PWR	2012
Brazil	1	PWR	626	2	PWR	2490
Bugarska	4	VVR	1 620	1	VVR	1 000
Čehoslovačka	2	VVR	762	14	VVR	7 618
Filipini	—	—	—	1	PWR	620
Finska	2	BWR VVR	1 320 880	—	—	—
Francuska	5	GCR	2 228	1 26	LMFBR PWR	1 200 28 410
	1	GCHWR	70			
	1	LMFBR	233			
Indija	2	BWR HWR	400 413	6	HWR	1 320
	2	PWR	—			
Italija	1	GCR	150	2 2	BWR PWR	1 964 1 844
	1	BWR	875			
	1	PWR	260			
Japan	1	GCR	159	9 5 1	BWR PWR LMFBR	8 852 4 511 280
	11	BWR	8 262			
	12	PWR	8 020			
	1	SGHWR	150			
Jugoslavija	1	PWR	632	—	—	—
Južnoafrička Republika	—	—	—	2	PWR	1 842
Kanada	11 1	HWR SGHWR	5 984 250	12	HWR	8 588
Koreja (Južna)	1	PWR	564	7 1	PWR HWR	6 017 625
Kuba	—	—	—	1	VVR	408
Mađarska	1	VVR	440	3	VVR	1 320
Meksiko	—	—	—	2	BWR	1 308
Nizozemska	1 1	BWR PWR	50 450	—	—	—
Njemačka DR	5	VVR	1 512	2	VVR	880
SR Njemačka	7	PWR	6 609	17 4 1 1	PWR BWR HTGR LMFBR	20 118 5 048 296 295
	5	BWR	3 170			
	1	HWR	52			
	1	HTGR	13			
	1	LMFBR	17			
Pakistan	1	HWR	125	1	PWR	864
Poljska	—	—	—	2	VVR	930
Rumunjska	—	—	—	2	VVR HWR	408 1 258

Tablica 1
RASPROSTRANJENOST POJEDINIH TIPOVA NUKLEARNIH ELEKTRANA
(STANJE U KOLOVOZU 1983)

Tip nuklearne elektrane	Nuklearne elektrane u pogonu		Nuklearne elektrane u gradnji	
	Broj reaktora	Ukupna snaga MW	Broj reaktora	Ukupna snaga MW
PWR	121	102 140	121	129 451
VVR	25	11 369	33	20 444
BWR	66	50 194	44	44 886
HWR	16	6 894	23	13 082
GCR	34	7 144	—	—
AGR	7	3 377	8	4 914
LWGR	17	7 999	4	5 000
GCHWR	1	70	—	—
SGHWR	3	492	—	—
LMFBR	7	1 424	3	1 775
HTGR	2	343	1	296

NUKLEARNA ENERGETSKA POSTROJENJA

Zemlja	Nuklearne elektrane u pogonu			Nuklearne elektrane u gradnji		
	Broj reaktora	Tip	Snaga na pragu MW	Broj reaktora	Tip	Snaga na pragu MW
SAD	51 30 1	PWR BWR HTGR	43769 27519 330	46 20	PWR BWR	51375 21177
SSSR	11 1 17 4	VVR BWR LWGR LMFBR	6155 50 7999 974	9 4	VVR LWGR	7880 5000
Španjolska	1 3 1	GCR PWR BWR	480 1954 440	8 3	PWR BWR	7534 2790
Švedska	3 7	PWR BWR	2630 4700	2	BWR	2110
Švicarska	3 1	PWR BWR	1620 320	1	BWR	942
Tajvan	4	BWR	3088	2	PWR	1814
Velika Britanija	26 7 1 1	GCR AGR SGHWR LMFBR	4127 3377 92 200	8	AGR	4914

Nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim običnom vodom pod tlakom (PWR)

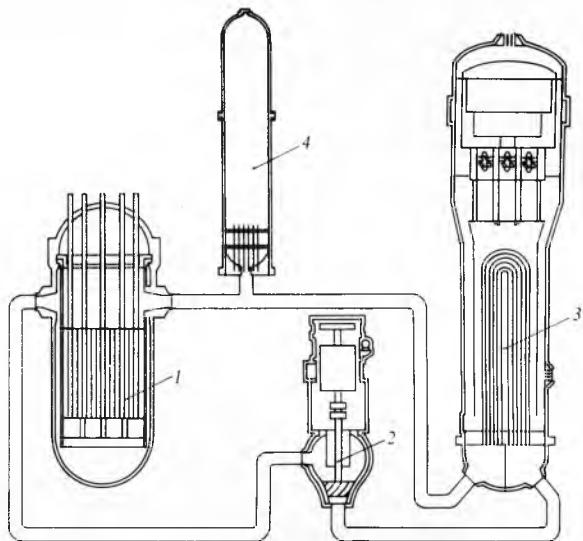
Najviše elektrana koje su danas u pogonu i gradnji ima reaktore hlađene i moderirane običnom vodom pod tlakom (tabl. 1).

Takvi tipovi nuklearnih elektrana, u zapadnoj varijanti, razvijeni su u SAD (Westinghouse), a kasnije su licencije za projektiranje i izradbu komponenata opreme preuzele evropska i japanska poduzeća. Nakon dugog razvojnog puta standardizirane su takve elektrane, pa se danas grade tri veličine reaktora sa snagama na pragu elektrane od 600, 900 i 1200 MW (v. *Elektrane*, TE 3, str. 547). Svakom primarnom rashladnom krugu odgovara snaga na pragu elektrane od ~300 MW. Nuklearna elektrana Krško takav je tip elektrane; ima dva primarna rashladna kruga i snagu na pragu od 632 MW.

Isti tip reaktora razvijen je i u SSSR pod nazivom VVR. Prva nuklearna elektrana s takvim reaktorom imala je snagu

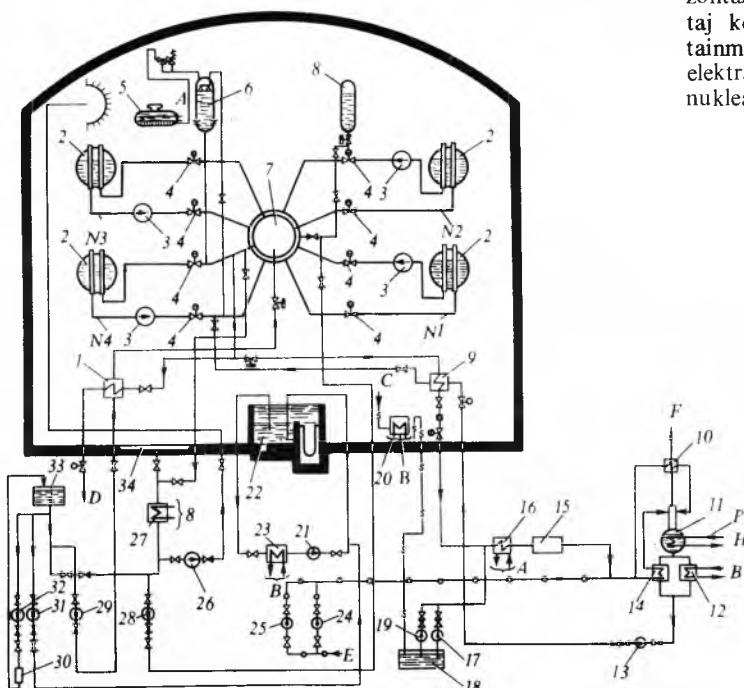
na pragu od 210 MW. Daljim razvojem (od 1971) snaga je povećana na 440 MW, i ta je snaga standardizirana. Više takvih elektrana gradi se u SSSR i u istočnoevropskim zemljama.

Dva odvojena rashladna kruga osnovna su karakteristika tega tipa nuklearnih elektrana. U primarnom krugu kruži voda pod tlakom tjerana cirkulacijskim pumpama kroz reaktor i parogenerator. Voda u reaktoru preuzima topljinu proizvedenu u nuklearnom gorivu, a u parogeneratoru predaje tu toplinu vodi sekundarnog kruga koja se ugrijava i isparuje. Komponente su primarnog kruga: nuklearni reaktor, parogenerator, primarne cirkulacijske pumpe, tlačni spremnik za održavanje tlaka i cjevovodi koji povezuju sve te komponente (sl. 1).



Sl. 1. Primarni krug nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim običnom vodom pod tlakom (PWR). 1 reaktor, 2 cirkulacijska pumpa, 3 parogenerator, 4 tlačni spremnik

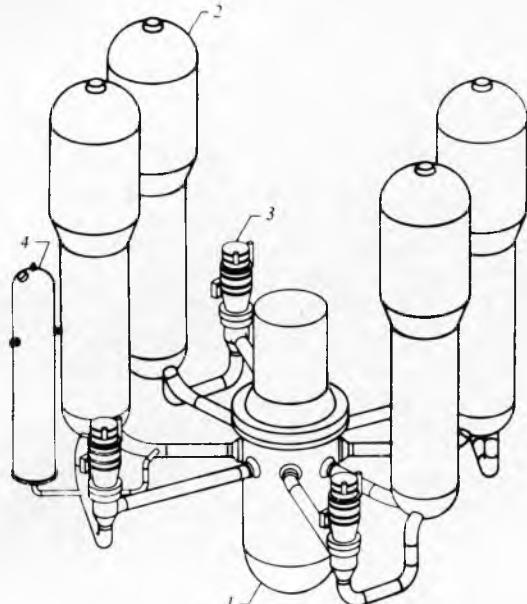
Osnovna je razlika između reaktorskih postrojenja s vodom pod tlakom razvijenih u SSSR (VVR) i SAD (PWR) u smještaju i izvedbi komponenata primarnog kruga. Nuklearne elektrane tipa PWR imaju vertikalne, a one tipa VVR horizontalne parogeneratore smještene tangencijalno oko reaktora. Nuklearna elektrana VVR snage 440 MW ima šest primarnih krušova i šest horizontalnih parogeneratora. Smještaj tolikih horizontalnih parogeneratora zahtjeva veliki prostor i otežava smještaj komponenta primarnog kruga u sigurnosnu štit (containment). U posljednje vrijeme razvijena je u SSSR nuklearna elektrana s reaktorom tipa VVR snage od 1000 MW (sl. 2). Ta nuklearna elektrana ima četiri primarna kruga s horizontalnim



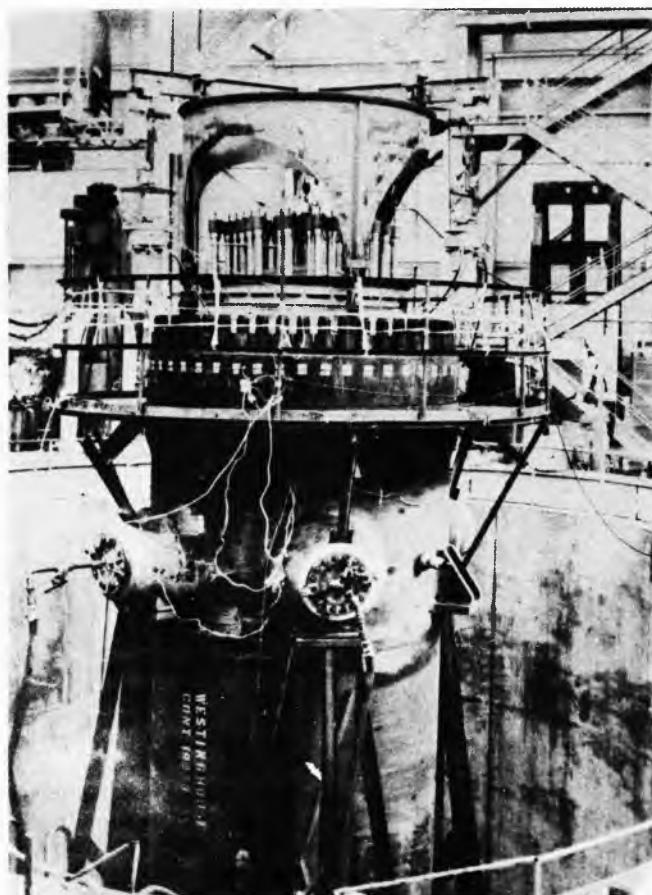
Sl. 2. Shema reaktorskog postrojenja nuklearne elektrane VVR 1000 MW. 1 izmjenjivač topline za otopinom borne kiseline, 2 parogenerator, 3 pumpa primarnog kruga, 4 ventil u primarnom krugu, 5 rasterna posuda tlačnog spremnika, 6 tlačni spremnik, 7 reaktor, 8 rezervoar s otopinom borne kiseline, 9 regenerativni izmjenjivač topline, 10 hladnjak pare iz otopljinjivača, 11 otopljinjivač, 12 hladnjak dodatne vode primarnog kruga, 13 pumpa za dodatnu vodu, 14 hladnjak dodatne vode primarnog kruga, 15 uređaj za deminerjalizaciju ispuštenе vode iz primarnog kruga, 16 hladnjak, 17 i 19 drenažne pumpe, 18 rezervoar drenažne vode primarnog kruga, 20 hladnjak drenažne vode primarnog kruga, 21 pumpa u rashladnom sustavu bazena za gorivo, 22 bazeni za odzračeno gorivo, 23 hladnjak, 24 i 25 glavna i pomoćna pumpa za dodavanje deminerjalizirane vode u primarni krug, 26 pumpa za napajanje prskalica u sigurnosnom štitu, 27 hladnjak sustava za odvođenje zaostale topline, 28 pumpa sustava za odvođenje zaostale topline i zaštitno hlađenje jezgre, 29 pumpa za ubrizgavanje otopine borne kiseline u reaktorsku jezgru, 30 filteri u sustavu za recirkulaciju borne kiseline, 31 pumpa za punjenje bazena za odzračeno gorivo, 32 pumpa za recirkulaciju otopine borne kiseline, 33 rezervoar s otopinom borne kiseline, 34 rezervoar zaštitnog štita, A rashladna voda u zatvorenom krugu, B sirova voda, C drenažna primarni rashladni krugovi reaktora

parogeneratorima. Paralelno se proučava mogućnost ugradivanja vertikalnih parogeneratora, koji bi omogućili kompaktniju izvedbu reaktorskog postrojenja i lakši smještaj komponenata unutar sigurnosnog štita.

Prostorni raspored komponenata primarnog kruga u nuklearnoj elektrani s reaktorom tipa PWR (sl. 3) pokazuje simetričan smještaj tih komponenata oko reaktora. Posuda za održavanje tlaka i kompenzaciju volumena (tlačni spremnik) zajednička je za sve primarne krugove u reaktorskem postrojenju.

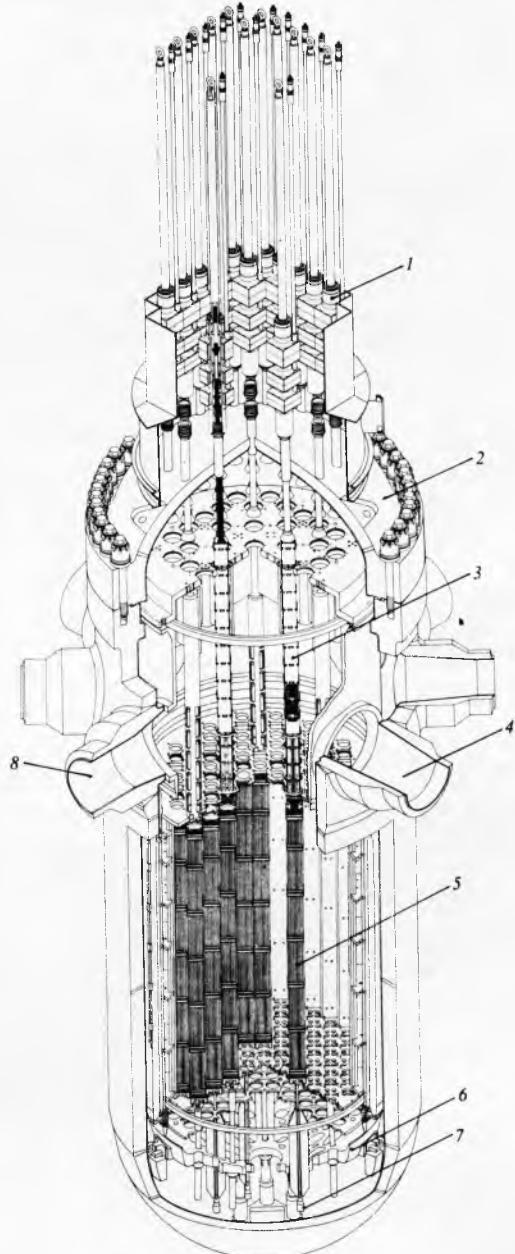


Sl. 3. Prostorni raspored osnovnih komponenata reaktorskog postrojenja nuklearne elektrane tipa PWR. 1 reaktor, 2 parogeneratori, 3 pumpe, 4 tlačni spremnik



Sl. 5. Ispitivanje reaktorske posude nuklearne elektrane Krško u tvornici

Nuklearni reaktor. Posuda nuklearnog reaktora (sl. 4) cilindričnog je oblika. Sastoji se od donjeg dijela i poklopca, koji su spojeni vijcima. Na bočnoj su strani posude priključci za izlazne i ulazne cjevovode svakoga primarnog kruga. Prodori za vodilice regulacijskih šipki nalaze se na gornjoj, a prodori za vodilice neutronskih detektorova na donjoj strani reaktorske posude. Posuda mora biti projektirana prema propisima (npr. u SAD propisi ASME), a za radni tlak i temperaturu rashladnog sredstva.



Sl. 4. Reaktorska posuda reaktora PWR s reaktorskom jezgrom. 1 mehanizmi za pogon regulacijskih šipki, 2 poklopac reaktorske posude, 3 vodilice regulacijskih šipki, 4 izlaz rashladnog sredstva, 5 gorivi element, 6 donja potpora jezgre, 7 neutronski detektori, 8 ulaz rashladnog sredstva

Unutar reaktorske posude smještena je nosiva posuda reaktorske jezgre. Ona je ovješena o reaktorsku posudu, što omogućuje slobodnu dilataciju zbog promjene temperature. Osim što nosi jezgru, unutrašnja posuda usmjeruje strujanje rashladnog sredstva kroz jezgru. To sredstvo nakon ulaska u reaktorskiju posudu struji prema dolje u prstenastom prostoru između objiju posuda, a zatim ulazi kroz donje otvore na unutrašnjoj posudi i struji prema gore kroz jezgru reaktora.

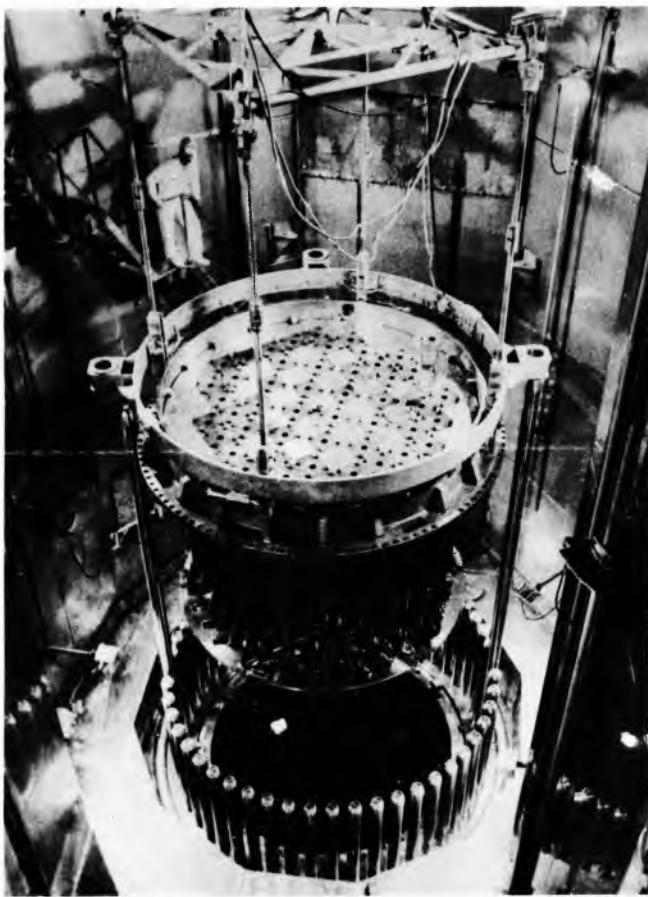
Prije ulaska u jezgru rashladno sredstvo hlađi unutrašnju stijenkou reaktorske posude. Čelične ploče, koje su sastavni dio unutrašnje posude, štite reaktorskou posudu od neutronskog zračenja.

Srednje brzine strujanja vode kroz reaktorskou jezgru iznose $4,1 \dots 5,5$ m/s, već prema snazi reaktora i njegovoj konstrukciji, dok je tlak vode ~ 15 MPa. Unutrašnji promjer reaktorske posude ovisi o snazi nuklearne elektrane i iznosi:

snaga nuklearne elektrane (MW)	600	900	1200
približni unutrašnji promjer reaktorske posude (m)	3,3	4,0	4,4

Reaktorskou posuda s poklopcom visoka je $11 \dots 13$ m.

Posuda je od slabo legiranog čelika (sadrži mangan, molibden i nikal). Na unutrašnjoj strani posude navaren je sloj nerđajućeg čelika debljine ~ 5 mm. Debljina stijenke cilindričnog dijela posude, već prema promjeru i tlaku, iznosi $150 \dots 250$ mm (u NE Krško 165 mm). Cilindrični dio posude izrađuje se horizontalnim zavarivanjem kovanih prstenastih segmenata. Pri izradbi, ispitivanju (sl. 5) i montaži reaktorske posude (sl. 6) treba zadovoljiti vrlo stroge propise i postupke.

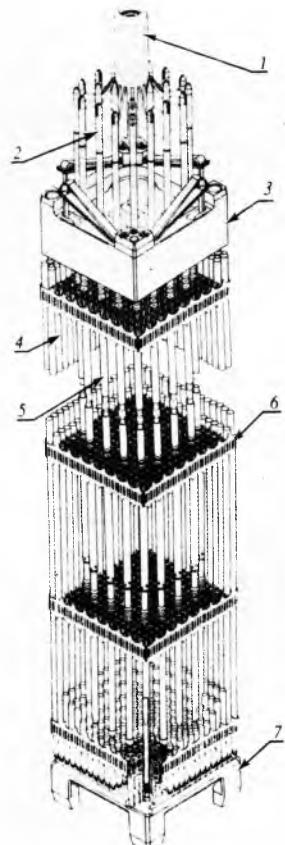


Sl. 6. Montaža gornjeg dijela unutrašnje posude reaktora

Gorivi elementi vodom hlađenih i moderiranih reaktora složeni su mehanički sklopovi (sl. 7). Osnovni su sastavni dijelovi gorivog elementa nosač gorivih šipki (tzv. skelet gorivog elementa) i gorive šipke koje se ulažu u taj nosač. Nosač gorivih šipki sadrži gornji i donji zaglavak, elastične rešetke i potporne cijevi koje ih povezuju. Cijevi nosača gorivih šipki ujedno su i vodilice regulacijskih šipki reaktora. U novijim nuklearnim elektranama gorivi elementi sadrže $21 \dots 24$ potporne cijevi i $7 \dots 8$ elastičnih rešetaka. Gorive šipke su cijevi izrađene od slitine kojoj je osnovni sastavni dio cirkonij (komercijalni naziv slitine je Zircaloy), promjera

~ 10 mm, debljine stijenke $\sim 0,6$ mm. Cijevi su napunjene tabletama uran-oksida (UO_2). Tablete imaju $92 \dots 95\%$ teorijske gustoće. Nakon što je napunjena tabletama, a prije zatvaranja, goriva se šipka puni helijem pod tlakom radi poboljšanja prijelaza topline i mehaničkih svojstava. Tablete uran-oksida visoke su ~ 13 mm, a precizno su brušene nakon sinteriranja, tako da zazor između tablete i cijevi iznosi tek $\sim 0,15$ mm. Gornje su plohe tableta blago konkavne da bi se smanjilo širenje povisjenjem temperature. Elastične rešetke nosača gorivih šipki, izrađene od Inconela (slitina nikla), podržavaju gorive šipke radi sprečavanja njihova izvijanja. Podržavanje je potrebno zbog njihove velike duljine ($3 \dots 3,5$ m) i malog promjera. Gorivi elementi reaktora s vodom pod tlakom imaju 15×15 , 16×16 i 17×17 pozicija u elastičnoj kvadratnoj rešetki. U posljednje vrijeme ne izvode se reaktori sa 15×15 pozicija zbog prevelike specifične snage po jedinici duljine gorive šipke. Gorivi element tipa 16×16 primjenjuje se u nuklearnim elektranama snage 600 MW (takov gorivi element ima reaktor NE Krško), a gorivi element tipa 17×17 za nuklearne elektrane snage 900 i 1200 MW. Nosač gorivih elemenata tipa 16×16 sadrži potpornu cijev (20 za vođenje regulacijskih šipki, a jednu za vođenje neutronskog detektoru) i 235 gorivih šipki. Gorivi elementi tipa 17×17 imaju 25 potpornih cijevi i 264 gorive šipke. Pojedini gorivi elementi mogu sadržavati i manje gorivih šipki ako se u njima nalaze šipke s neutronskim apsorberima ili neutronskim izvorima.

Nuklearne elektrane s vodom hlađenim i vodom moderiranim reaktorima snage 600, 900 i 1200 MW imaju 121, 157, odnosno 193 gorive šipke.

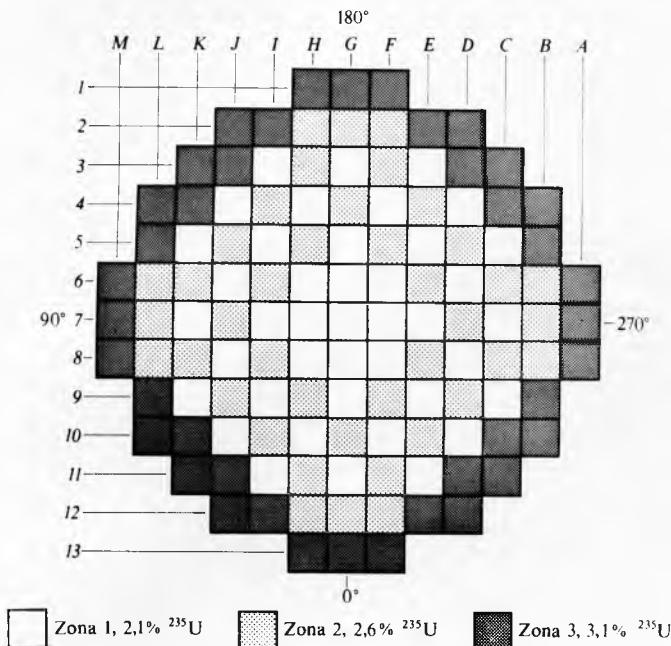


Sl. 7. Gorivi element reaktora hlađenog i moderiranog vodom pod tlakom. 1 sklop regulacijskih šipki, 2 regulacijska šipka, 3 gornji zaglavak, 4 goriva šipka, 5 cijevi vodilice regulacijskih šipki, 6 elastična rešetka, 7 donji zaglavak

Radi ravnomjernije raspodjele neutronskog toka u reaktoru gorivi elementi s najvišim sadržajem fisijskog materijala smještaju se na periferiju jezgre, a oni s najnižim sadržajem tog materijala u njezino središte. U svežejoj jezgri to se postiže stupnjevanjem obogaćenja goriva, tako da je gorivo s najvećim obogaćenjem na periferiji jezgre, a ono s najnižim obogaćenjem u njezinu središtu. U toku pogona reaktora, nakon što je postignuto ravnotežno izgaranje, gorivo s najnižim stupnjem

izgaranja ulaze se na periferiju jezgre, a zatim se sukcesivno pomiče prema njezinu središtu.

Nuklearna elektrana Krško ima jezgru reaktora podijeljenu u 3 zone (sl. 8). Sadržaj ^{235}U u tim zonama svježe jezgre iznosi 2,1%, 2,6% i 3,1%.



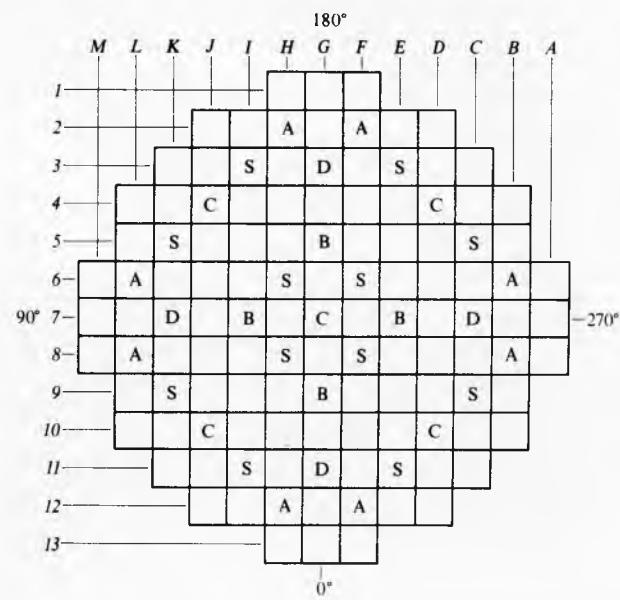
Sl. 8. Presjek kroz reaktorsku jezgru u nuklearnoj elektrani Krško

Regulacija snage. Snaga nuklearne elektrane regulira se regulacijskim šipkama. Šipke su izrađene od slitine koja sadrži 80% srebra, 15% indija i 5% kadmija. Unutar jednoga gorivog elementa ima 20 ili 24 regulacijskih šipki mehanički povezanih na gornjem kraju u regulacijski sklop koji se podiže i spušta pomoću magnetske dizalice smještene iznad reaktorske posude. Dizalica ima tri elektromagneta za prihvatanje i podizanje regulacijskog sklopa, od kojih je jedan pokretan, a dva su nepokretna. Sukcesivnim magnetiziranjem elektromagneta sklop se diskontinuirano podiže i spušta u koracima od ~ 16 mm. Prosječna brzina kretanja regulacijskog sklopa automatski se prilagođuje u granicama $3,4\cdots 19$ mm/s, a trajanje je pomaka sklopa za jedan korak uvijek jednako. Ako prestane dovod električne energije, elektromagneti otpuštaju regulacijske sklopove i oni djelovanjem svoje težine padaju u jezgru. Regulacijski sklopovi električki su povezani u regulacijske grupe, pa se svi sklopovi koji pripadaju istoj regulacijskoj grupi kreću istodobno. Reaktori hlađeni i moderirani vodom pod tlakom obično imaju 4 regulacijske grupe (A, B, C, D). U NE Krško navedene regulacijske grupe imaju po 8, 4, 5, odnosno 4 regulacijska sklopa (sl. 9).

Osim regulacijskih sklopova postoji i sklopovi za brzo gašenje (brzo smanjenje raspada jezgara) reaktora, koji su za vrijeme pogona izvučeni iz jezgre (u NE Krško ima 12 takvih sklopova raspoređenih po presjeku jezgre (sl. 9)). Kad je potrebno brzo gašenje reaktora, sklopovi se spuštaju u reaktor. Automatsko brzo gašenje reaktora predviđa se u sljedećim prilikama: previsok neutronski tok (tok se mjeri u tri razine), prevelika brzina promjene neutronskog toka, prevelika razlika temperatura rashladnog sredstva u jezgri, premalen protok rashladnog sredstva kroz reaktor, prenizak napon ili preniska frekvencija mreže, previsok ili prenizak tlak u primarnom krugu, previsoka razina vode u tlačnom spremniku, ispad turbine iz pogona, aktiviranje sustava za zaštitno hlađenje jezgre.

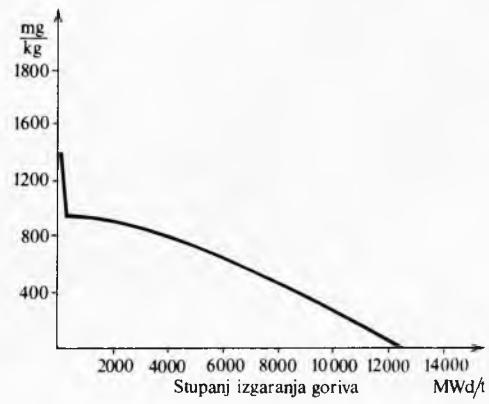
Kad je reaktor u pogonu, najpovoljnija je raspodjela neutronskog toka ako su regulacijske šipke izvučene iz jezgre. Ako se, za neko opterećenje reaktora, regulacijske šipke nalaze djelomično unutar jezgre, smanjuje se neutronski tok u

gornjem, a povećava u donjem dijelu jezgre. Lokalno je povećanje neutronskog toka nepovoljno zbog lokalnog pregrijavanja i nejednolikog izgaranja nuklearnog goriva.



Sl. 9. Raspored regulacijskih sklopova koji sačinjavaju regulacijske grupe A, B, C i D i raspored sklopova za brzo gašenje reaktora (S) u reaktoru NE Krško

U reaktoru hlađenom i moderiranom vodom pod tlakom reaktivnost se regulira, osim regulacijskim šipkama, i dodavanjem borne kiseline (H_3BO_3) vodi koja cirkulira kroz reaktor. Bor djeluje kao neutronski apsorber koji je jednoliko raspodijeljen u jezgri. Otopinom borne kiseline u vodi moguće je kompenzirati višak reaktivnosti reaktora i pri izvučenim regulacijskim šipkama. Pogon se vodi tako da je koncentracija borne kiseline u jezgri najviša kad je u reaktoru svježe gorivo. Ona se postepeno smanjuje s izgaranjem goriva (sl. 10).



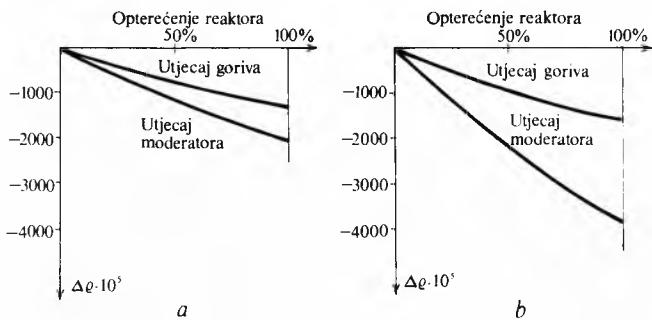
Sl. 10. Promjena masenog udjela bora (mg H_3BO_3 u kg vode) u reaktorskom rashladnom sredstvu prema stupnju izgaranja goriva

Reaktivnost reaktora (v. *Nuklearni reaktori*) mijenja se s promjenom temperature u reaktoru i sa stupnjem izgaranja goriva. Utjecaj promjene temperature moderatora i goriva na reaktivnost određuje se tzv. temperaturnim koeficijentima reaktivnosti. U reaktorima s vodom pod tlakom ti koeficijenti imaju uvijek negativnu vrijednost, što znači da se s povremenjem temperature u reaktoru smanjuje raspoloživi višak reaktivnosti. Negativni temperaturni koeficijent reaktivnosti smanjuje opasnost od nekontroliranog povećanja temperature i snage reaktora, te je zbog toga bitan za sigurnost i stabilnost rada nuklearnog energetskog postrojenja.

Negativni temperaturni koeficijent reaktivnosti moderatora pojavljuje se sa smanjenjem gustoće vode u reaktoru zbog njezina zagrijavanja. Smanjenjem gustoće vode smanjuje se i omjer mase moderatora i mase urana u jezgri, što u nedovoljno moderiranom sustavu negativno utječe na reaktivnost. Kad je u vodi otopljena borna kiselina, smanjenjem mase vode u jezgri smanjuje se i količina bora u jezgri. Zbog smanjene količine bora u jezgri povećava se reaktivnost, što znači da se utjecaji promjene gustoće vode i smanjene količine bora u jezgri djelomično kompenziraju. Ako je koncentracija bora u jezgri visoka (jezgra sa svježim gorivom), temperaturni koeficijent reaktivnosti moderatora može postati pozitivan.

Temperaturni koeficijent reaktivnosti goriva uvijek je negativan. Takvu vrijednost ima taj temperaturni koeficijet zbog povećanja rezonantne apsorpcije neutrona u gorivu pri povišenju njegove temperature, koje nastaje proširenjem energetskog intervala rezonantne apsorpcije. Temperatura reaktora mijenja se s njegovim opterećenjem, te je moguće definirati i koeficijent promjene reaktivnosti reaktora kao funkciju opterećenja.

Reaktivnost se brže mijenja s promjenom opterećenja kad je gorivo u jezgri istrošeno nego kad se u reaktoru nalazi svježe gorivo (sl. 11), pogotovo zbog različite koncentracije bora u jezgri.



Sl. 11. Ovisnost reaktivnosti reaktora ($\Delta\rho$) o njegovu opterećenju. a) svježe gorivo b) istrošeno gorivo

Prosječne promjene koeficijenta reaktivnosti vodom hlađenih i moderiranih reaktora s promjenom opterećenja iznose:

$$\text{svježa jezgra} \quad \frac{\Delta\rho}{\Delta P} = -14 \cdot 10^{-5} \dots -15 \cdot 10^{-5},$$

$$\text{istrošena jezgra} \quad \frac{\Delta\rho}{\Delta P} = -20 \cdot 10^{-5} \dots -21 \cdot 10^{-5}.$$

Smanjenje nepovoljnog utjecaja visoke koncentracije bora na koeficijent reaktivnosti reaktora sa svježom jezgrom postiže se ugradnjom tzv. sagorljivih apsorbera u jezgru. Sagorljivi apsorberi su šipke od borosilikatnog stakla koje se ugrađuju u svježu jezgru i koje se vade iz reaktora prilikom prve izmjene goriva.

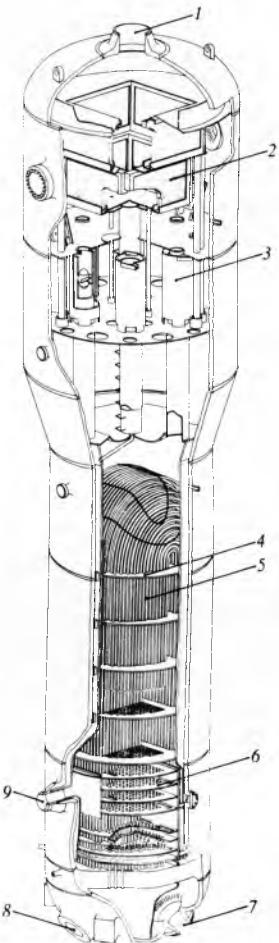
Parogenerator (sl. 12) je izmjenjivač topline u kojemu reaktorsko rashladno sredstvo predaje dio svoje energije vodi, odnosno pari u sekundarnom krugu nuklearne elektrane.

U nuklearnim elektranama s reaktorom tipa PWR parogenerator je vertikalni i sastoji se od dva osnovna dijela: isparivača s cijevnim snopom i parnog prostora u kojemu su separatori i sušionici pare. Izvedba parogeneratora za takav tip nuklearnih elektrana danas je skoro potpuno tipizirana.

Parogenerator je visok ~ 20 m, promjer u zoni isparivača iznosi $\sim 3,5$ m, a u zoni separatora $\sim 4,5$ m. Parogenerator je težak ~ 320 t.

Rashladno sredstvo iz reaktora ulazi u dio donje komore parogeneratora, prolazi kroz cijevi savijene u snopu i izlazi kroz drugi dio donje komore. Ogrjevna površina jednog od tipičnih parogeneratora iznosi ~ 4800 m², ostvarena je sa ~ 4700

U-cijevi, od Inconela (slitina na osnovi nikla), promjera ~ 22 mm. Protok rashladnog sredstva kroz parogenerator iznosi ~ 16000 t/h uz srednji tlak od ~ 16 MPa. Na sekundarnoj strani parogeneratora nastaje ~ 1700 t/h suho zasićene pare tlaka 6,6 MPa i maksimalne vlažnosti od 0,25%. Pojna voda, koja u parogeneratoru isparuje, ulazi u parogenerator iznad cijevnog snopa. U nekim izvedbama parogeneratora pojna voda ulazi u donji dio. Tada dio ogrjevne površine služi za predgrijavanje pojne vode.



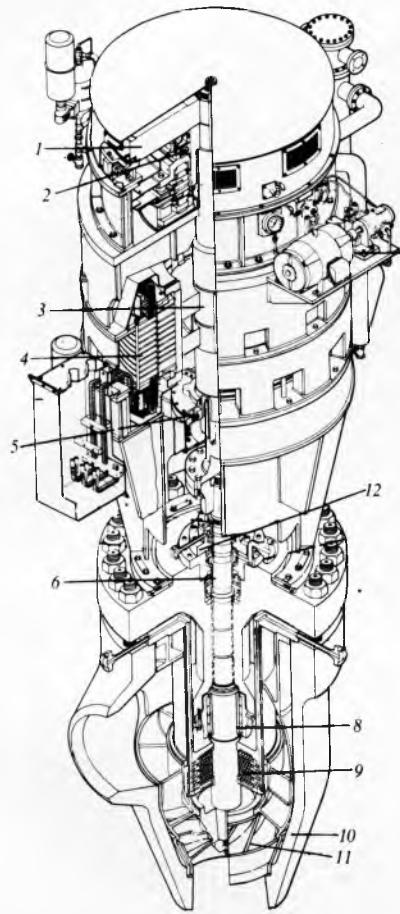
Sl. 12. Parogenerator. 1 izlaz pare, 2 sušionik pare, 3 separator vlage, 4 potporu cijevnog snopa, 5 cijevni snop, 6 predgrijaći pojne vode, 7 ulaz rashladnog sredstva reaktora, 8 izlaz rashladnog sredstva reaktora, 9 ulaz pojne vode

Plašt parogeneratora izrađen je od čelika. Donje komore su platinirane nerđajućim čelikom. Cijevni zid parogeneratora izведен je od niskolegiranog čelika, a ploha cijevnog zida, koja je u dodiru s rashladnim sredstvom reaktora, platinirana je Inconelom. Cijevi parogeneratora pričvršćene su za cijevni zid uvaljivanjem i zavarivanjem. Separatori vlage su centrifugalnog tipa. Smješteni su iznad cijevnog snopa u parogeneratoru gdje se nalaze i sušionici pare, što omogućuje da se sadržaj vlage u izlaznoj pari ograniči ne veoma mali iznos (0,25%). U parogeneratoru ugrađeno je i ograničavalo protoka pare. Ono spričava prekomjerno isparivanje ako se ošteti parovod koji odvodi paru iz parogeneratora u turbinu.

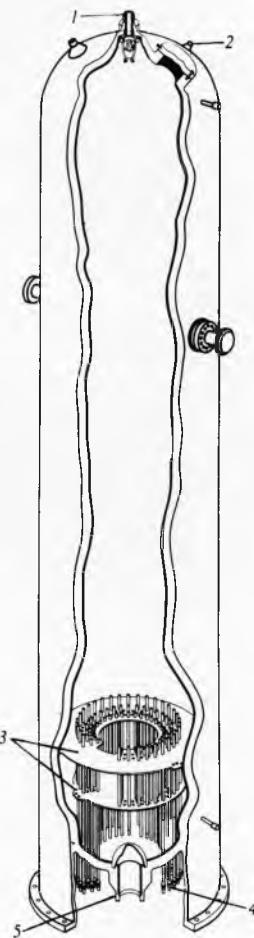
Cirkulacijska pumpa reaktorskoga rashladnog sredstva. Za cirkulaciju reaktorskoga rashladnog sredstva u primarnom krugu služi vertikalna jednostepena cirkulacijska pumpa (sl. 13) gonjena asinhronim motorom. Za novija nuklearna postrojenja razmatranog tipa cirkulacijske se pumpe grade za protok od ~ 6 m³/s, razliku tlaka od $\sim 0,9$ MPa i snagu motora od $\sim 5,5$ MW. Visina pumpe s motorom iznosi $7 \dots 8$ m, a masa ~ 90 t. Kućište pumpe je kovan. Priključci se vare na primarne cjevovode. Motor pumpe zajedno s njezinom osovinom i proplerom pričvršćuje se prirubnicom za kućište.

Specifičnost je izvedbe takve pumpe osobito u načinu brtvenja na osovinu. U izvedbi pumpe za reaktorsko rashladno sredstvo treba poštivati sljedeće principe: a) potrebno je spriječiti svako propuštanje reaktorskog rashladnog sredstva uz osovinu pumpe zbog mogućnosti kontaminacije i b) potrebno je spriječiti ulaz bilo kakvih materijala za podmazivanje u reaktorsko rashladno sredstvo.

To se postiže na sljedeći način: a) sve brtvene površine podmazuju se vodom i b) brtvene se plohe tlače prečišćenom vodom koja je pod tlakom višim od tlaka reaktorskog rashladnog sredstva.



Sl. 13. Cirkulacijska pumpa reaktorskog rashladnog sredstva. 1 zamašnjak, 2 gornji radikalni ležaj, 3 osovina motora, 4 stator motor, 5 donji radikalni ležaj, 6 osovina pumpe, 7 pumpa za ulje, 8 ležaj pumpe, 9 hladnjak, 10 kućište pumpe, 11 rotor pumpe, 12 brtve na osovinu



Sl. 14. Tlačni spremnik. 1 prskalica, 2 sigurnosni ventil, 3 držaci grijala, 4 električna grijala, 5 priključak na primarni krug

Promjenom opterećenja reaktora mijenja se, zbog promjene temperature rashladnog sredstva, i razina vode u tlačnom spremniku. Reguliranjem snage grijala i količine uštrcane vode u parni prostor moguće je uz svaku razinu vode u tlačnom spremniku održavati željeni tlak.

Sigurnosni štit (containment). Osnovne komponente primarnog kruga nuklearne elektrane i dio komponenata reaktorskog pomoćnog postrojenja smješteni su unutar cilindrične zaštitne posude, odnosno unutar sigurnosnog štita.

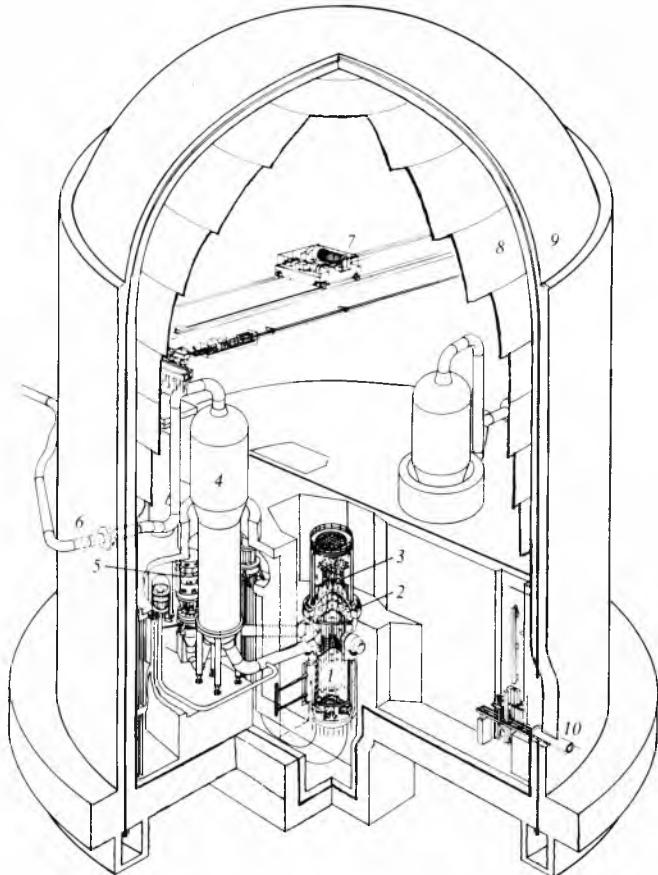
Sigurnosni štit je predviđen da zadrži vodenu paru i plinovite fizijske proizvode pri lomu neke od komponenata primarnog kruga nuklearne elektrane. Osnova je za projektiranje sigurnosnog štita i sigurnosnih sustava pretpostavka da se može slomiti jedan od cjevovoda primarnog kruga. S obzirom da se u primarnom krugu nalazi voda pod visokim tlakom i na visokoj temperaturi ($\sim 16 \text{ MPa}$ i $\sim 600 \text{ K}$), pri oštećenju u primarnom krugu, zbog sniženja tlaka, voda naglo isparuje. Tako nastala para ispunja prostor unutar sigurnosnog štita, pa tlak u tom prostoru može narasti do $\sim 0,4 \text{ MPa}$. Sigurnosni štit je projektiran da izdrži takvo povišenje tlaka, a u njemu se nalaze i prskalice kojima se dovodi hladna borirana voda s dodatkom NaOH u prostor unutar sigurnosnog štita, što omogućuje brzo smanjenje tlaka kondenziranjem pare. Svi otvori (vrata za ulaz osoblja i dopremu uređaja) kroz stijene sigurnosnog štita moraju biti hermetički zatvoreni. Za ulaz osoblja i dopremu materijala u prostor unutar sigurnosnog štita služi posebni prolaz s medukomorom za izjednačenje tlaka. Unutar sigurnosnog štita stalno se održava podtlak s obzirom na okoliš. Tako je osigurano da pri pojavi propusnosti sigurnosnog štita ne prođu u okoliš kontamirani plinovi i pare.

Sigurnosni štit izvodi se kao armiranobetonska konstrukcija, čelična konstrukcija ili kao njihova kombinacija. Nuklearna elektrana Krško ima čelični sigurnosni štit promjera

Brtvenjem protutlakom treba da se pusti prodiranje čiste vode u reaktorsko rashladno sredstvo i tako spriječiti propuštanje kontaminirane vode kroz brtve uz osovinu pumpe. Uštrcana hladna demineralizirana voda hlađi i podmazuje ležaje i brtvene plohe. Potrebna količina te vode iznosi $\sim 0,5 \text{ L/s}$. Brtvenje na osovinu ostvaruje se trostepenim brtvama s drenažom vode između njih. Propuštanje brtvi iznosi (polazeći od brtve na strani rashladnog sredstva): 190, 3 i $0,05 \text{ cm}^3/\text{s}$. Pumpa ima u donjem dijelu poseban hladnjak koji štiti donji ležaj pumpe i brtvene plohe od pregrijavanja.

Tlačni spremnik (sl. 14) je posuda priključena na primarni krug nuklearne elektrane sa svrhom da u njemu održava potreban tlak i da kompenzira promjenu obujma reaktorskog rashladnog sredstva zbog promjena temperature. To je zatvorena cilindrična posuda obujma od $\sim 40 \text{ m}^3$, u kojoj su električna grijala snage $1\text{--}1,5 \text{ MW}$. Spremnik je djelomično ispunjen vodom, a djelomično vodenom parom. Reguliranjem struje grijala mijenja se isparena količina vode, a time i tlak u parnom prostoru spremnika, koji se prenosi i na cijeli primarni krug nuklearne elektrane. Na vrhu spremnika nalazi se prskalica, kroz koju se može uštrcati voda iz rashladnog kruga reaktora u parni prostor i time, zbog kondenzacije pare, smanjiti tlak. Tlačni spremnik ima rasteretne i sigurnosne ventile.

~32 m i visine ~71 m. Stijenke u cilindričnom dijelu debele su ~38 mm. Smještaj komponenata primarnog kruga nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim vodom pod tlakom unutar sigurnosnog štita mora omogućiti kompaktnost izvedbe, pristupačnost za održavanje i dekontaminaciju (sl. 15). Montaža komponenata primarnog kruga na potpornu konstrukciju (sl. 16) zahtijeva specifične postupke.



Sl. 15. Smještaj komponenata primarnog kruga nuklearne elektrane tipa PWR unutar zaštitnog štita. 1 jezgra reaktora, 2 reaktorska posuda, 3 pogoni mehanizma regulacijskih šipki, 4 parogenerator, 5 cirkulacijska pumpa, 6 glavni parovod, 7 polarni kran, 8 čelični sigurnosni štit, 9 armiranabetonска zgrada, 10 kanal za prolaz goriva

Pomoći sustavi reaktora jesu sustavi koji nisu u neposrednoj vezi s iskorištenjem proizvedene toplinske energije, ali koji su bitni za sigurnost reaktora i njegovo ispravno i sigurno funkcioniranje.

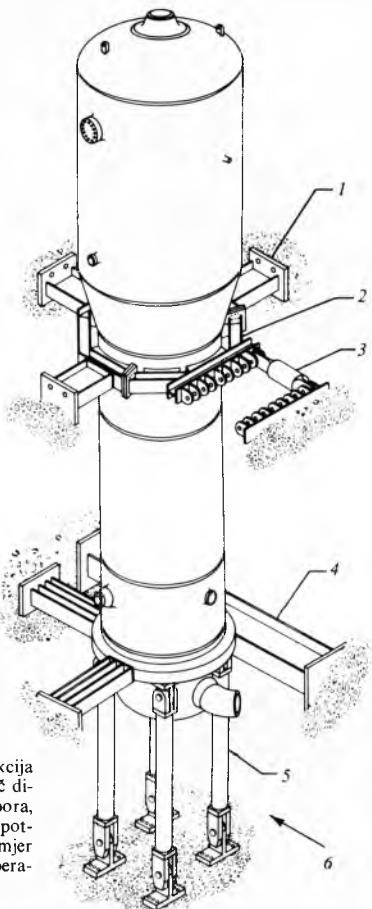
Osnovni su pomoći sustavi reaktora hlađenog i moderiranog vodom pod tlakom: sustav za odvod zaostale topline, sustav volumne i kemijske kontrole, sustav za zaštitno hlađenje jezgre, sustav za hlađenje nuklearnih komponenata i sustav za prskanje sigurnosnog štita.

Sustav za odvod zaostale topline. Po prestanku lančane reakcije u nuklearnom gorivu se i dalje proizvodi energija u prvom redu zbog raspada jezgara djelovanjem zakašnjelih neutrona i radioaktivnim raspadom produkata raspada jezgara ^{235}U i ^{239}Pu . Za reaktore s vodom pod tlakom tipične su vrijednosti proizvedene snage nakon obustave reaktora koji je radio s maksimalnom snagom prije obustave:

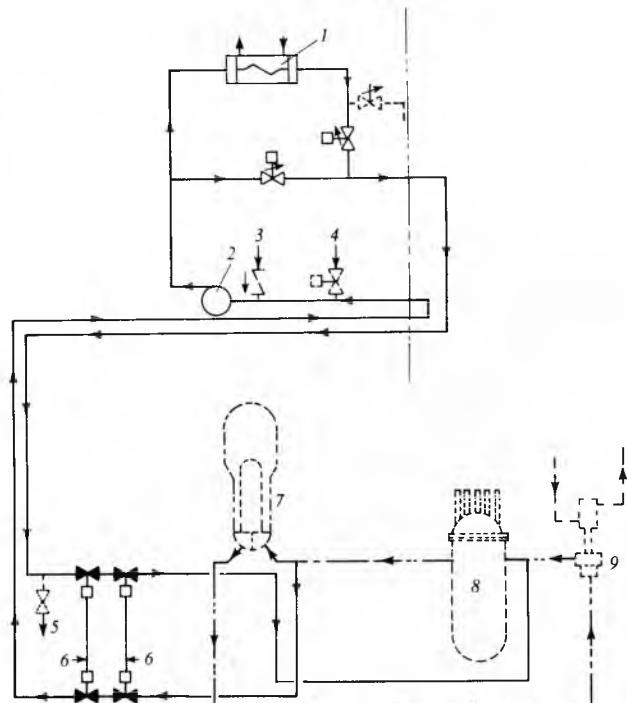
vrijeme nakon obustave reaktora	1 s	60 s	0,5 h	1 h	8 h	24 h	48 h
postotak od maksimalne snage	6,0	4,5	2,0	1,6	0,6	0,5	0,4

Reaktor nakon obustave treba i dalje hladiti kako bi se sprječilo pregrijavanje, pa i oštećenje gorivih elemenata. Neko-

liko prvih sati nakon obustave pogona reaktor se hlađi cirkulacijom rashladnog sredstva kroz parogeneratore. Oko 4 sata nakon obustave pogona stavlja se u pogon sustav za odvod zaostale topline. Taj je sustav priključen na reaktor paralelno osnovnom rashladnom krugu. Dio rashladnog sredstva nakon



Sl. 16. Potporna konstrukcija parogeneratora. 1 ograničavač dilatacije, 2 gornja bočna potpora, 3 amortizeri, 4 donja bočna potpora, 5 nosivi stupovi, 6 smjer dilatacije zbog promjene temperature



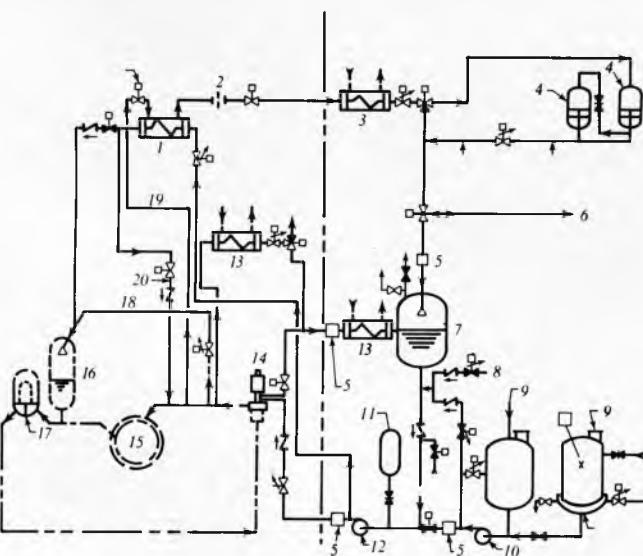
Sl. 17. Sustav za odvod zaostale topline. 1 izmjenjivač topline, 2 pumpa, 3 priključak na rezervoar borirane vode, 4 priključak za recirkulaciju, 5 priključak na sustav za zaštitno hlađenje jezgre, 6 ventili za spoj s primarnim rashladnim krugom, 7 parogenerator, 8 reaktor, 9 cirkulacijska pumpa reaktorskog rashladnog sredstva

izlaza iz reaktora oduzima se iz primarnog kruga, potiskuje pumpama kroz izmjenjivač topline, u kojem se hlađi, i враћa u primarni krug na ulazu u reaktor (sl. 17). Sustav za odvod zaostale topline ima obično dva jednaka rashladna kruga, od kojih je jedan dovoljan za puni rashladni učin. Regulaciju intenziteta hlađenja moguće je postići premoštenjem izmjenjivača topline. Sustav za odvod zaostale topline dimenzioniran je za tlak koji je $\sim 1/4$ nominalnog radnog tlaka u reaktoru, te se on smije priključiti na primarni krug tek nakon što tlak padne na spomenutu vrijednost.

Osim za hlađenje obustavljenog reaktora, sustav za odvod zaostale topline ima druge funkcije, kako u normalnom pogonu, tako i za zaštitu reaktora od kvara na primarnom rashladnom sustavu. To su sljedeće funkcije: punjenje i pražnjenje bazena za odzraćeno gorivo, potapanje jezgre reaktora pumpanjem borirane vode iz spremnika, recirkulacija borirane vode kroz jezgru reaktora priključkom upoone strane pumpi na dno sigurnosnog štita i stvaranje dovoljnog tlaka na upojnoj strani visokotlačnih pumpi za zaštitno hlađenje jezgre kad je potrebno te pumpe uključiti u krug recirkulacije.

Sustav volumne i kemijske kontrole za reaktore hlađene vodom pod tlakom ima sljedeću namjenu: a) osigurati potreban obujam reaktorskog rashladnog sredstva u primarnom krugu kako bi se razina vode u tlačnom spremniku održavala na visini potreboj za normalni pogon ($\sim 60\%$ od volumena spremnika ispunjeno vodom, a ostatak vodenom parom), b) omogućiti održavanje čistoće reaktorskog rashladnog sredstva kontinuiranom demineralizacijom vode primarnog kruga, c) osigurati demineraliziranu vodu za brtvenje i podmazivanje ležaja cirkulacijskih pumpi primarnog kruga i d) održavati tlak u primarnom krugu kada se pojave manja propuštanja. Tada sustav služi kao potpora sustavu za zaštitno hlađenje jezgre.

Voda se iz primarnog kruga odvodi u sustav volumne i kemijske kontrole preko regulacijskih ventila (sl. 18). Vodi odvedenoj iz primarnog kruga treba smanjiti tlak i temperaturu od $\sim 16 \text{ MPa}$ i $\sim 550 \text{ K}$ na $\sim 2,5 \text{ MPa}$ i $\sim 300 \text{ K}$, da bi se mogla propustiti kroz ionske izmjenjivače radi demineralizacije. Prvi stupanj hlađenja ostvaruje se u regenerativnim izmjenjivačima topline, a drugi u izmjenjivačima topline koji su priključeni na sustav za hlađenje nuklearnih komponenata. Poslije svakog stupnja hlađenja smanjuje se tlak prigušivanjem. Othlađena voda smanjenog tlaka može se propustiti kroz kationske



Sl. 18. Sustav volumne i kemijske kontrole. 1 regenerativni izmjenjivač topline, 2 prigušivač, 3 dodatni hlađnjak, 4 ionski izmjenjivači, 5 filter, 6 priključak na rezervoar reaktorskoga rashladnog sredstva, 7 rezervoar za volumne kontrole, 8 dodavanje demineralizirane vode, 9 rezervoar s bornom kiselinom, 10 pumpa za bornu kiselinu, 11 posuda za dodavanje kemikalija za regulaciju pH, 12 visokotlačna pumpa, 13 izmjenjivač topline za dodatno ispušteno rashladno sredstvo reaktora, 14 pumpa primarnog kruga, 15 reaktor, 16 tlačni spremnik, 17 parogenerator, 18 priključak na prskalicu tlačnog spremnika, 19 ispuštanje vode iz primarnog kruga, 20 vraćanje vode u primarni krug

i miješane ionske izmjenjivače (v. *Izmjena iona*, TE 6, str. 576). Normalno u pogonu rade samo miješani ionski izmjenjivači. Oni uklanaju iz vode koroziske i fisijske proizvode. Potrebno ih je regenerirati kad omjer dekontaminacije postane manji od 10. Kationski ionski izmjenjivači upotrebljavaju se tek kada iz vode treba izdvojiti litij koji se dodaje radi povećanja vrijednosti pH. Sustav je dimenzioniran da omogući prolaz ukupnoga reaktorskoga rashladnog sredstva kroz ionske izmjenjivače za ~ 20 sati. Kad voda na ulazu u filtre ionskih izmjenjivača ima previsoku temperaturu (više od 300 K), automatski se otvara obilazni cjevovod koji odvodi vodu u rezervoar volumne kontrole.

Koncentracija bora u primarnom krugu regulira se prema potreboj brzini promjene koncentracije.

Brze promjene koncentracije (dnevno-noćni ciklus promjene opterećenja elektrane) ostvaruju se specijalnim ionskim izmjenjivačima za termičku regeneraciju bora. Takvi ionski izmjenjivači imaju svojstvo vezivanja bora s obzirom na temperaturu: pri nižoj temperaturi, naime, vežu bor, a pri višoj ga ispuštaju.

Spora i kontinuirana promjena koncentracije bora u rashladnom sredstvu reaktora provodi se boriranjem i razrjeđivanjem. Kad se voda borira, dodaje se rashladnom sredstvu voda s većom koncentracijom bora uz istodobno oduzimanje jednakе količine vode koja ima nižu koncentraciju bora. Da se postigne razrjeđenje, primjenjuje se obratni postupak. Kad je istrošena reaktorska jezgra, u reaktoru je mala koncentracija bora (sl. 10), pa kapacitet rezervoara za reaktorsko rashladno sredstvo i sustav za tretiranje ispuštene vode ograničuju mogućnost daljeg smanjivanja koncentracije bora u rashladnom sredstvu reaktora.

Nakon filtriranja i demineralizacije ispuštena voda iz primarnog kruga ulazi u rezervoar volumne kontrole. Prostor iznad razine vode u tom rezervoaru ispunjen je vodikom da se smanji koncentracija slobodnog kisika u sustavu.

Smanjenje korozije u primarnom krugu postiže se održavanjem pH-vrijednosti u rashladnom sredstvu reaktora na $\sim 9,0$ (dodavanjem LiOH ili hidrazina).

Voda se vraća u primarni krug visokotlačnim pumpama koje tlače na nešto viši tlak od tlaka u reaktoru. Voda prolazi kroz regenerativni izmjenjivač topline u kojem se dogrijava ispuštenom vodom iz primarnog kruga. Visokotlačna pumpa dobavlja i vodu potrebu za hlađenje i podmazivanje ležaja i brtvi primarnih cirkulacijskih pumpi.

Ako se pojavi manje propuštanje reaktorskoga rashladnog sredstva iz primarnog kruga i postepeni gubitak tlaka u tom krugu, visokotlačne pumpe sustava za volumnu i kemijsku kontrolu (svaka kapaciteta od $\sim 15 \text{ m}^3/\text{h}$) dobavljaju vodu u primarni krug i time održavaju tlak, ili barem smanjuju brzinu smanjenja tlaka.

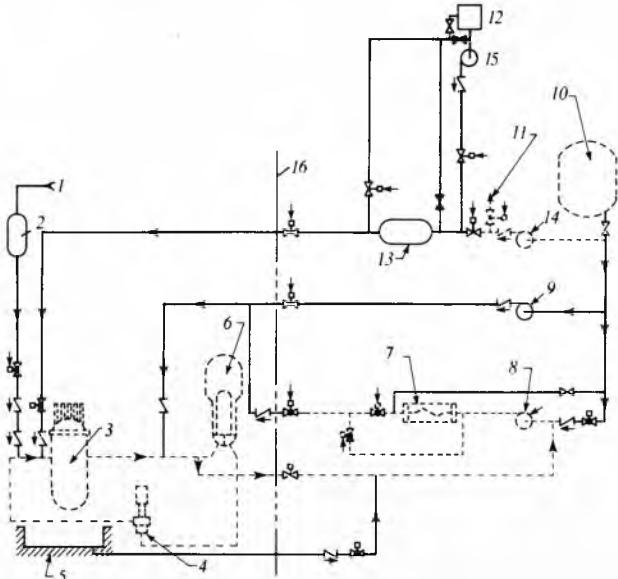
Sustav za zaštitno hlađenje reaktorske jezgre osnovni je sigurnosni sustav reaktora hlađenog i moderiranog vodom pod tlakom. Sustav je predviđen za dodatno hlađenje reaktorske jezgre kad je zbog kvara na osnovnom rashladnom sustavu (kvar može biti na primarnom ili sekundarnom rashladnom krugu) bitno smanjena mogućnost normalnog hlađenja jezgre. Pregrijavanje jezgre zbog smanjenog hlađenja može oštetiti gorive elemente, pa će zbog toga fisijski proizvodi prodrijeti u rashladni sustav.

Zaštitno hlađenje jezgre (sl. 19) osigurava se: a) ubrizgavanjem borirane vode iz rezervoara borirane vode, b) brzim boriranjem jezgre dovođenjem borirane vode pumpama sustava za volumnu i kemijsku kontrolu, c) ubrizgavanjem borirane vode u jezgru pumpama zaštitnog sustava i d) potapanjem jezgre pumpama sustava za odvod zaostale topline.

U rezervoarima se nalazi borirana voda s većim masenim udjelom bora nego u reaktorskoj jezgri (0,2%). Svaki primarni rashladni krug ima svoj rezervoar borirane vode. Volumen svih rezervoara približno je jednak volumenu reaktorske jezgre. Iznad vode u rezervoarima nalazi se dušik pod tlakom od $\sim 5 \text{ MPa}$. Rezervoari su preko povratnih ventila i uvijek otvorenih ventila za odvajanje povezani s primarnim rashladnim krugom reaktora. Ako nastane veći lom na nekom od pri-

marnih cjevovoda, tlak reaktorskog rashladnog sredstva naglo će pasti. Kad tlak padne na iznos manji od tlaka u rezervoarima (kad je lom većih razmjera, za to je potrebno ~ 10 s), djelovanje tlaka duška ubrizgat će boriranu vodu iz rezervoara u ulazni (hladniji) dio cjevovoda primarnoga rashladnog kruga.

Male pukotine u primarnom krugu (do ~ 9 mm ekvivalentnog promjera), kroz koje ne istječe više vode od ~ 8 L/s, ne zahtijevaju naglu obustavu reaktora. Takvi se gubici mogu nadoknaditi ubrizgavanjem vode visokotlačnim pumpama sustava za volumnu i kemijsku kontrolu, uz normalnu obustavu pogona reaktora.



Sl. 19. Sustav za zaštitno hlađenje reaktorske jezgre. 1 dušak pod tlakom, 2 rezervoar, 3 reaktorska posuda, 4 pumpa primarnog kruga, 5 rezervoar sigurnosnog štita, 6 parogenerator, 7 izmjjenjivač topline sustava za odvođenje zaostale topline, 8 pumpa sustava za odvod zaostale topline, 9 pumpa zaštitnog sustava, 10 rezervoar za boriranu vodu, 11 priključak na rashladni krug u normalnom pogonu, 12 rezervoar borne kiseline, 13 rezervoar s boriranim vodom visoke koncentracije, 14 visokotlačna pumpa sustava volumne i kemijske kontrole, 15 pumpa za recirkulaciju koncentrirane otopine borne kiseline, 16 granica sigurnosnog štita

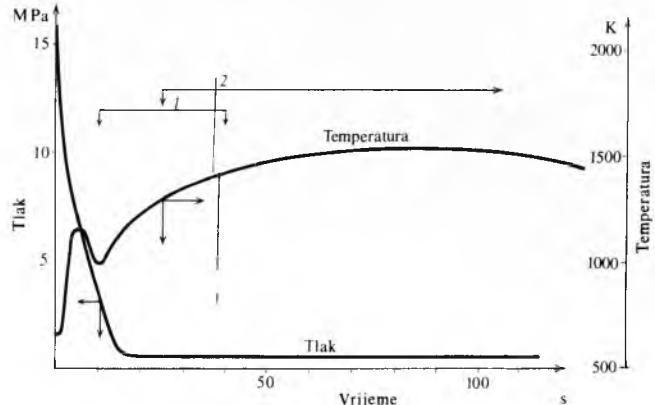
Komponente sustava za zaštitno hlađenje jezgre projektirane su za sljedeće tlakove (u postocima od srednjeg tlaka u primarnom krugu); visokotlačne pumpe sustava volumne i kemijske kontrole 125%, pumpe zaštitnog sustava 70%, rezervoari borirane vode 30%, pumpe sustava za odvod zaostale topline 8%.

Analize djelovanja sustava za zaštitno hlađenje jezgre nakon većih lomova na primarnim cjevovodima provode se uz dvije pretpostavke: a) oštećenja na primarnom cjevovodu kad ekvivalentni promjer nastalog otvora iznosi 75 mm ili manje i b) oštećenja na primarnom cjevovodu kad nastaju otvori veći od navedenih, i to sve do graničnog odreza primarnog cjevovoda prije njegova ulaska u reaktor (tada je površina kroz koju istječe reaktorsko rashladno sredstvo jednaka dvostrukom presjeku primarnog cjevovoda, jer treba računati da kroz nastali odrez istječe rashladno sredstvo i iz reaktora i iz parogeneratora). Lomovi drugih komponenata primarnog kruga (reaktorske posude, parogeneratora, pumpa) mnogo manje su vjerojatni od lomova cjevovoda, te se prema prihvaćenim kriterijima ne uzimaju u obzir.

Kad se pojavi manja prskotina na primarnom krugu (pretpostavka a), tlak pada sporije, te se u prvo vrijeme jezgra štiti ubrizgavanjem vode visokotlačnim pumpama i pumpama zaštitnog sustava. Rezervoari počinju djelovati kasnije (nekoliko stotina sekundi nakon loma).

Nakon većih oštećenja (pretpostavka b) tlak u primarnom krugu padne ispod tlaka u rezervoaru za ~ 10 s, a za manje od 20 s izjednačuje se s tlakom okoliša. Uz tako nagli gubitak tlaka za hlađenje jezgre veoma su djelotvorni rezervoari i niskotlačne pumpe za potapanje jezgre (sl. 20).

Kad je za zaštitno hlađenje jezgre potrebno da rade sve pumpe koje dobavljaju vodu za takvo hlađenje, one se automatski priključuju na rezervoar borirane vode (s koncentracijom bora od ~ 2 g/L), koji ima volumen 10 puta veći od volumena reaktorskog rashladnog sredstava u primarnom krugu. Pumpe se sukcesivno, automatski stavljuju u pogon prema promjeni tlaka. Omjer učina niskotlačnih pumpi, učina pumpi zaštitnog sustava i učina visokotlačnih pumpi približno iznosi 100:20:5.



Sl. 20. Promjena tlaka reaktorskog rashladnog sredstva i najviše temperature na površini gorivih elemenata nakon maksimalno mogućeg loma primarnog cjevovoda. 1 praznjenje rezervoara, 2 rad pumpi za zaštitno hlađenje jezgre

Visokotlačne pumpe sustava za volumnu i kemijsku kontrolu imaju, osim toga, zadatak da u okviru zaštitnog hlađenja jezgre osiguraju i dodatno boriranje jezgre otopinom borne kiseline vrlo visoke koncentracije. To se provodi automatskim priključenjem tlačne strane tih pumpi na posebni rezervoar u kojemu je borna voda s masenim udjelom bora od $\sim 2,1\%$. Pumpe potiskuju sadržaj tog rezervoara u reaktorsko jezgro. Takav postupak boriranja jezgre primjenjuje se i kad se ošteći jedan od glavnih parovoda. Tada tlak u primarnom krugu ostaje visok, a potrebno je brzo i sigurno obustaviti reaktor.

Nakon približno 30 minuta pogona s punim učinom pumpe za zaštitno hlađenje jezgre ispraznit će veći dio rezervoara borirane vode. Nakon toga ostaju u pogonu samo niskotlačne pumpe sustava za odvod zaostale topline, koje crpe vodu s dna prostora sigurnosnog štita kamo se sva voda slijeva kroz oštećeni dio primarnog cjevovoda.

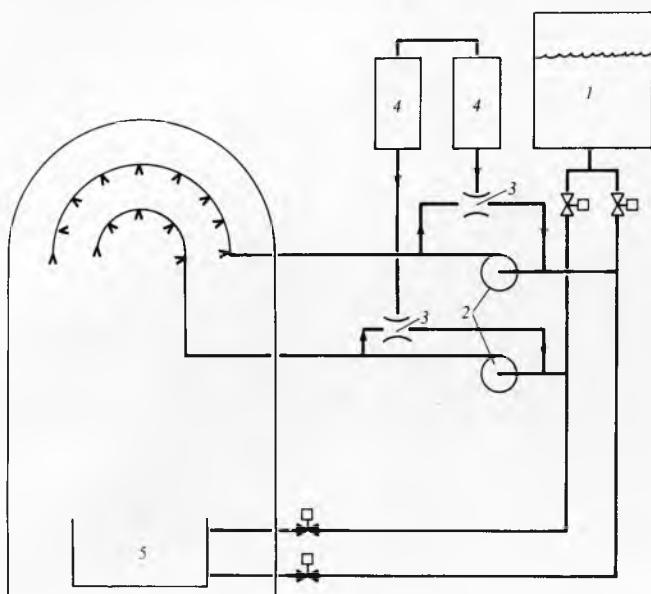
Sustav za zaštitno hlađenje jezgre sprečava da nakon loma primarnog cjevovoda temperatura na površini gorivih šipki naraste iznad 1500 K. Uz tu temperaturu moguće je sačuvati gorive elemente neoštećene i tako onemogućiti ispuštanje fizijskih proizvoda u rashladni sustav. Sustav za zaštitno hlađenje jezgre mora ostati sposoban za funkciju u svim uvjetima pogona nuklearne elektrane. Zbog toga se komponente i uređaji za upravljanje udvostručuju, da bi, i kad je neka komponenta nesposobna, sustav ostao sposoban za izvršenje svoje funkcije.

Sustav za zaštitno hlađenje jezgre automatski djeluje: a) kad se pojavi povišeni tlak u prostoru unutar sigurnosnog štita uz istodobno smanjenje tlaka u primarnom rashladnom krugu reaktora i b) kad se pojavi povišeni protok pare uz istodobno smanjenje tlaka u parovodu, ili uz istodobnu pojavu razlike tlakova u parovodima koji odvode paru iz različitih parogeneratora. Razlika tlakova indicira oštećenje jednog od glavnih parovoda.

Sustav za hlađenje nuklearnih komponenata. Komponente reaktorskog postrojenja hlađe se demineraliziranim vodom koja cirkulira u zatvorenom krugu. Potrebno je hlađiti izmjenjivač topline i pumpe u pomoćnim sustavima reaktora, te pumpe u primarnom rashladnom krugu. Zatvoreni sustav hlađenja one-moguće je prodror radioaktivnih materijala iz hlađenih komponenata u okoliš, a dopušta da se održava zahtijevana kvaliteta vode za hlađenje. Sustav se sastoji iz izmjenjivača topline hlađenih sirovom vodom i pumpi koje razvode vodu do komponenata koje treba hlađiti. Rad toga sustava bitan je za sigurnost reaktora u normalnom pogonu i nakon obustave po-

gona. Zbog toga komponente sustava, vanjski izvori hlađenja i napajanje električnom energijom moraju biti izvedeni prema propisima za postizanje nuklearne sigurnosti.

Sustav za prskanje sigurnosnog štita. Ako se pojavi veći lom na primarnom cjevovodu, prostor unutar sigurnosnog štita ispunit će se vodenom parom za nekoliko desetaka sekunda, a unutrašnji će tlak narasti do $\sim 0,4$ MPa. Zbog oštećenih gorivih elemenata (računa se obično sa $0,5\cdots 1\%$ oštećenih gori-



Sl. 21. Sustav za prskanje sigurnosnog štita. 1 rezervoar s boriranom vodom, 2 pumpe za napajanje prskalica, 3 pumpe za dodavanje otopine NaOH, 4 posuda s otopinom NaOH, 5 dno sigurnosnog štita

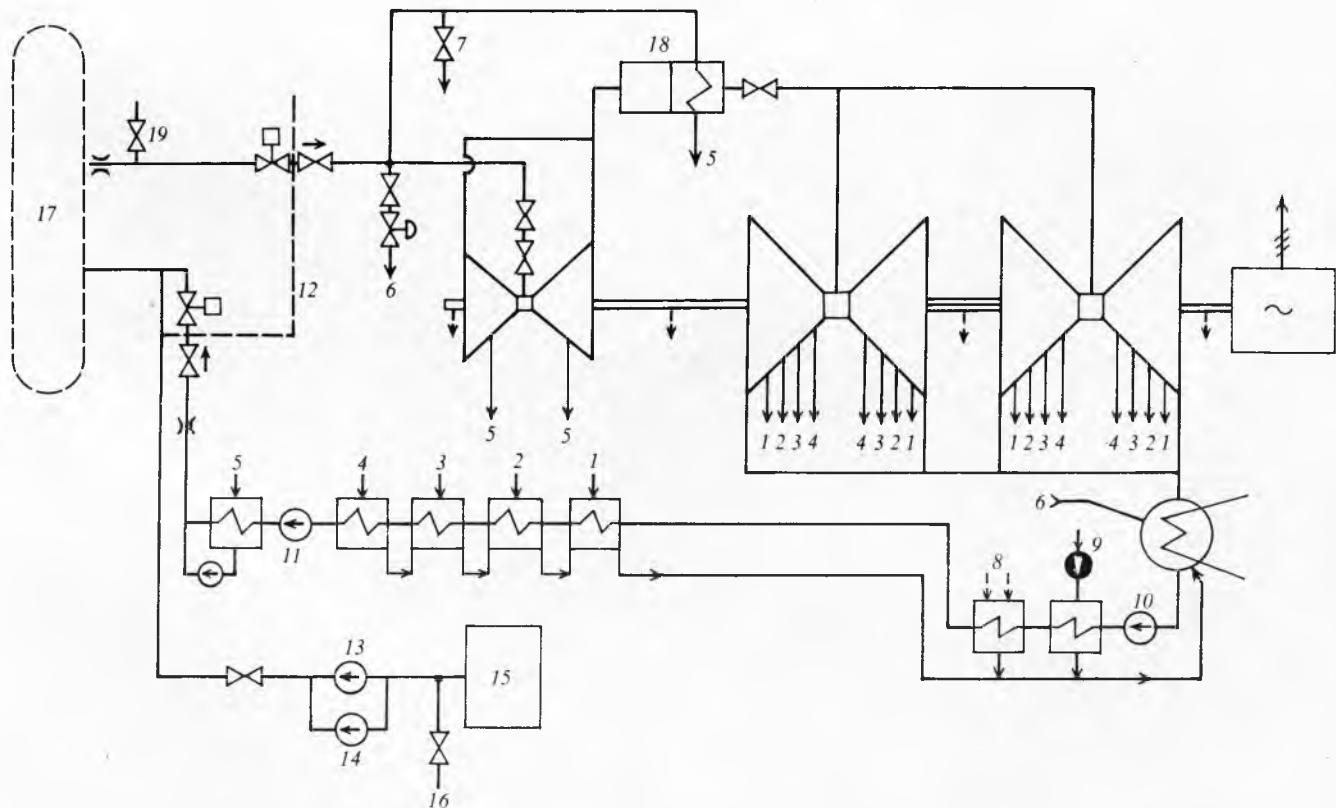
vihi šipki) zajedno s parom izlaze i fisijski proizvodi. Među fisijskim proizvodima ^{131}I osobito je važan zbog utjecaja na okoliš.

Brzo sniženje tlaka pare unutar sigurnosnog štita postiže se ubrizgavanjem vode ugradenim prskalicama (sl. 21) koje napajaju dvije paralelno spojene pumpe učina po $\sim 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Pumpe crpe vodu iz velikog rezervoara za boriranu vodu ili sa dna prostora unutar sigurnosnog štita. Smanjenjem tlaka u tom prostoru smanjuje se i propuštanje pare i plinova u okoliš. Vodi za prskanje dodaje se natrij-hidroksid (NaOH) radi povišenja pH -vrijednosti na $8,5 \dots 9,0$, čime se smanjuje korozija i vezuje jod. Vezivanjem joda smanjuje se mogućnost ispuštanja joda u okoliš jer se ne može potpuno eliminirati propusnost sigurnosnog štita. U analizama sigurnosti nuklearnog energetskog postrojenja računa se s propuštanjem sigurnosnog štita od $0,1 \dots 0,2\%$ volumena prostora obuhvaćenog tim štitom na dan.

Sekundarni krug nuklearne elektrane (sl. 22) sličan je postrojenju konvencionalne termoelektrane. Sekundarni krug nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim vodom pod tlakom ima ipak sljedeće specifičnosti:

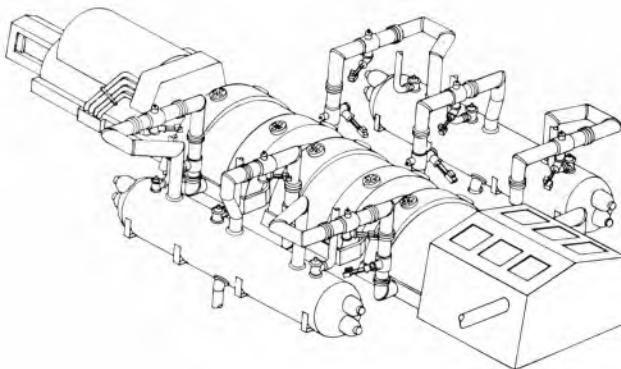
a) radni medij je zasićena para relativno niskog tlaka (6...7 MPa). Takva para zahtijeva veliki protočni presjek i stvara poteškoće zbog kondenzacije pare tokom ekspanzije u turbini. Vlažnost pare u turbinu smanjuje se separiranjem vlage u toku ekspanzije. Veliki protočni presjek traži velike presjeke parovoda i turbine (sl. 23), a osobito njezina niskotlačnog dijela. Duljina zadnjih lopatica u turbinu iznosi 1100...1200 mm. Zbog navedenog dimenzije turbinu u nuklearnim elektranama veće su nego u konvencionalnim termoelektranama iste snage;

b) regulacija turbine povezana je s regulacijom reaktora. Ako se naglo rastereti generator (npr. isklapanjem sklopke), brzozaporni ventili zatvaraju dovod pare u visokotlačni i niskotlačni dio turbine. Proizvedena svježa para tada se iz parogeneratora obilaznim cjevovodom odvodi neposredno u kondenzator. Nuklearni reaktor može stabilno raditi i s malim opte-



Sl. 22. Sekundarni krug nuklearne elektrane, 1, 2, 3, 4 niskotlačni regenerativni zagrijači, 5 visokotlačni regenerativni zagrijač, 6 obilazni cjevovod svježe pare, 7 napajanje turbine za pogon pomoćne napojne pumpe, 8 kondenzator brtvene pare, 9 kondenzator ejektora, 10 pumpa kondenzata, 11 pojna pumpa, 12 granica sigurnosnog štita, 13 i 14 pomoćne pojne pumpe na elektromotorni i turbinski pogon, 15 rezervoar kondenzata, 16 dovod sirove vode, 17 parogenerator, 18 separator vlage i pregrijač pare, 19 rasterleni i sigurnosni ventili

rečenjem. Nakon isklapanja spojenih prekidača s mrežom nuklearna elektrana može ostati u pogonu napajajući samo svoj vlastiti potrošak, tj. svoje pomoćne pogone. Takvo rješenje predviđeno je u NE Krško;



Sl. 23. Turbogenerator sa separatorima vlage i pregrijačima pare

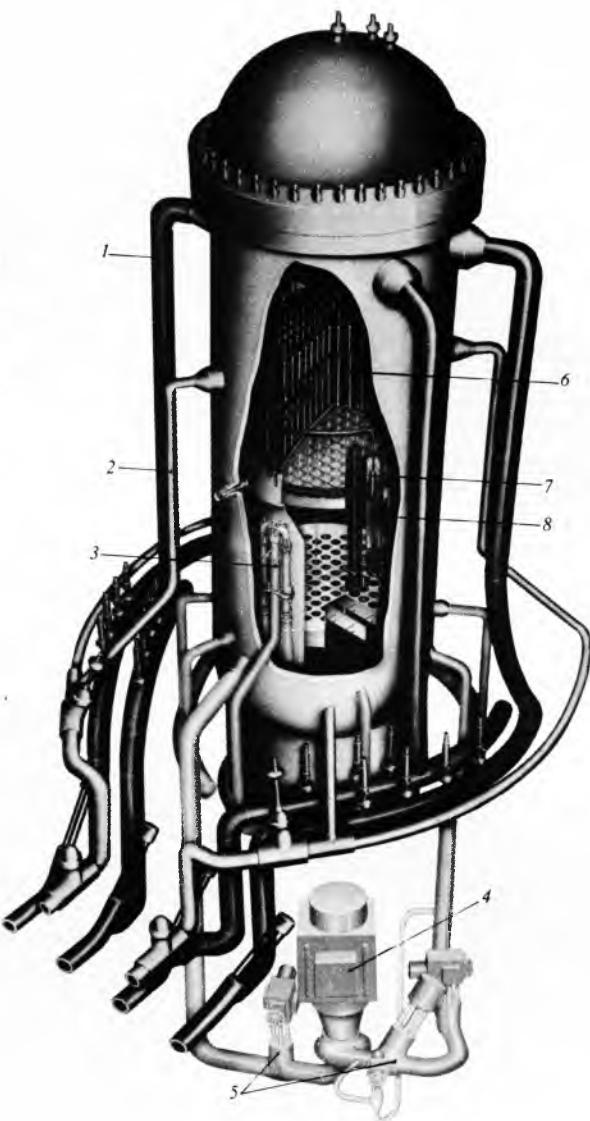
c) ako se ošteti cjevovod za napajanje parogeneratora ili ako prestane raditi pojna pumpa, predviđeno je rezervno hlađenje parogeneratora pomoćnim rashladnim krugom, koji ima paralelno spojene pumpe pogonjene elektromotorom i parnom turbinom. Parna turbina za pogon pomoćne pojne pumpe napaja se parom iz parogeneratora, što osigurava pogon i kad nema dovoda energije iz električne mreže. Pomoćni rashladni krug dobavlja u parogenerator vodu iz rezervoara kondenzata, a u nuždi i sirovu vodu. Pomoćni rashladni krug automatski se stavlja u pogon kad se pojavlji kvar na osnovnom pojnom sustavu parogeneratora.

Nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim kipućom vodom (BWR)

Reaktor hlađen i moderiran kipućom vodom ujedinjuje funkcije primarnog kruga nuklearne elektrane u reaktorskoj posudi. U reaktorskoj jezgri pojna voda isparuje, a zasićena para iz reaktorske posude neposredno se odvodi u turbinu. Taj tip nuklearnog reaktora omogućuje izvedbu neposrednog kružnog procesa voda—para, bez posredovanja parogeneratora, pa je takvo nuklearno energetsko postrojenje kompaktnije. Reaktori s kipućom vodom, trebaju manju snagu za pumpanje rashladnog sredstva reaktora nego reaktori s vodom pod tlakom, jer je u reaktoru s kipućom vodom razlika entalpija rashladnog sredstva na ulazu i izlazu iz reaktorske jezgre mnogo veća.

Isparivanje vode u reaktoru zahtijeva posebna rješenja i uređaje u reaktorskom postrojenju i u ostalim dijelovima nuklearne elektrane. U reaktoru s kipućom vodom mora se osigurati recirkulacija vode, separacija vlage i sušenje pare u reaktorskoj posudi. Reaktorska posuda, zbog toga, ima velike dimenzije i težinu (visina iznosi ~20 m, promjer ~6,5 m, a težina ~700...800 t). Reaktorska posuda mora se najčešće spajati na gradilištu, jer je prevelika za transport. Separatori vlage (obično centrifugalne izvedbe) i sušionici pare moraju biti smješteni iznad reaktorske jezgre. Prije izmjene goriva treba te dijelove izvaditi iz reaktorske posude kako bi se omogućio pristup reaktorskoj jezgri. Takav smještaj separatora vlage i sušionika pare onemogućuje smještaj vodilica i kućišta regulacijskih sklopova u gornji dio posude (kao u reaktoru s vodom pod tlakom), te se svi dijelovi regulacijskih mehanizama nalaze ispod reaktorske jezgre.

Jedan je od bitnih uređaja u reaktoru s kipućom vodom sustav za recirkulaciju vode u jezgri. Recirkulacijom se povećava proizvedena snaga u jezgri reaktora, jer se odvođenjem proizvedene pare povećava reaktivnost. Mijenjanjem količine vode u recirkulaciji moguće je znatno mijenjati snagu reaktora bez pomaka regulacijskih šipki (u granicama od $\pm 35\%$ oko trenutnog opterećenja). Voda se ponovno dovodi u jezgru ili cirkulacijskim pumpama koje su smještene izvan reaktorske

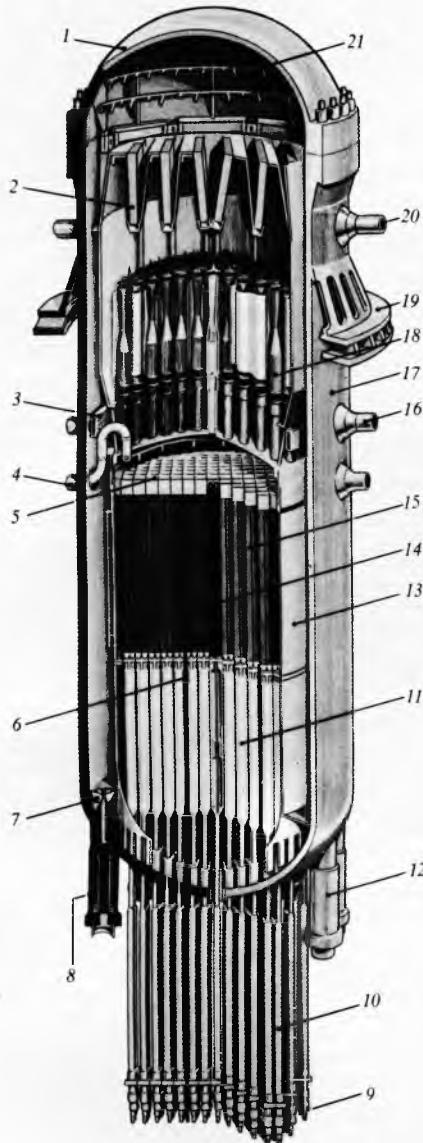


Sl. 24. Postrojenje nuklearnog reaktora hlađenog i moderiranog kipućom vodom s vanjskim recirkulacijskim krugom za recirkulaciju. 1 izlaz pare, 2 ulaz pojne vode, 3 pumpa za vodu, 4 pumpa za recirkulaciju vode, 5 ventil za regulaciju protoka u krugu recirkulacije, 6 separatori vlage, 7 gorivi elementi, 8 regulacijski sklop

posude i napajaju pumpe unutar reaktorske posude (izvedba General Electric, SAD, sl. 24), ili unutrašnjim cirkulacijskim pumpama s propelerima u reaktorskoj posudi, a pogonskim motorima izvan nje (izvedba ASEA-Atom, Švedska i AEG, SR Njemačka, sl. 25). Remont unutrašnjih pumpa omogućen je rastavljanjem osovine pumpi od pogonskih motora i izvlačenjem pumpi iz reaktorske posude a da se prije toga ne mora ispuštiti voda iz reaktorske posude (sl. 26).

Omjer količine vode u recirkulaciji i količine isparene vode iznosi 6...8. Tlak u posudi reaktora iznosi ~7 MPa. On je, dakle, mnogo niži nego u reaktoru s vodom pod tlakom. Debljina stijenke posude iznosi ~150 mm. Temperatura je napojne vode obično ~480 K, a količina proizvedene pare u reaktoru 1,5...1,6 kg/s po MW snage reaktora.

Gorivi elementi reaktora s kipućom vodom sastavljeni su od snopa šipki u kvadratnoj rešetki sa 7×7 ili 8×8 položaja. Promjer gorivih šipki iznosi ~12 mm. Šipke se sastoje od cijevi izrađenih od cirokonija, koje su ispunjene tabletama uran-oksida (UO_2). Duljina aktivnog dijela gorivog elementa kod jednog reaktora ovog tipa iznosi 3700 mm. Gorivi elementi su smješteni u pojedinačne kutije (kasete) (sl. 27). Reaktor s kipućom vodom snage 1000 MW sadrži oko 700 takvih gorivih elemenata u kojima se nalazi ~124 t urana.



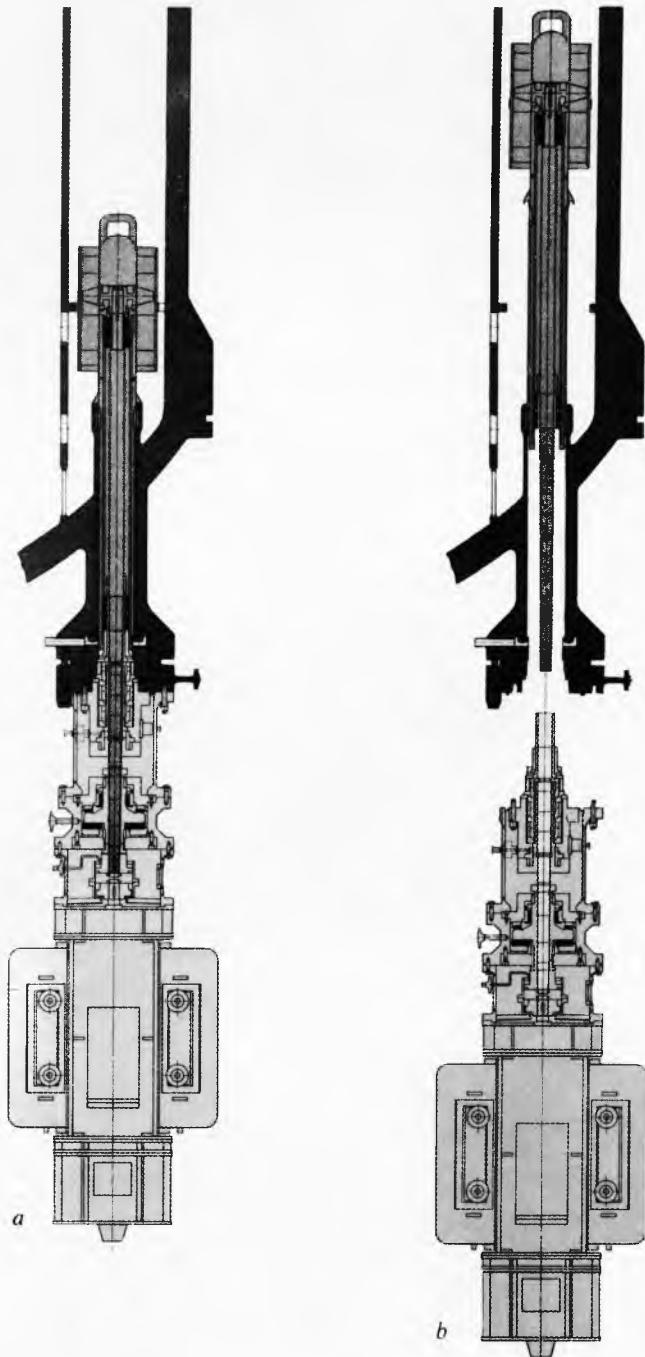
Sl. 25. Postrojenje nuklearnog reaktora hlađenog i moderiranog kipućom vodom s unutrašnjim kružnim tokom za recirkulaciju. 1 poklopac reaktorske posude, 2 sušionik pare, 3 razdjelnik pojne vode, 4 priključak za pomoćno napajanje reaktora, 5 gornja rešetka jezgre, 6 neutronski detektor, 7 propeler cirkulacijske pumpe, 8 kućište motora pumpe, 9 pogon regulacijskih šipki, 10, 11 vodilice regulacijskih sklopova, 12 cirkulacijska pumpa, 13 posuda moderatora, 14 regulacijski sklop, 15 gorivi element, 16 ulaz pojne vode, 17 reaktorska posuda, 18 separator vlage, 19 potorna prirubnica, 20 izlaz pare, 21 prskalice za hlađenje pare

U prostoru između četiri kutije gorivih elemenata prolazi regulacijski sklop koji ima horizontalni presjek u obliku križa. Kutije gorivih elemenata služe i kao vodilice regulacijskih sklopova. Regulacijski sklop je čelična konstrukcija mase ~170 kg, koja ima horizontalne ili vertikalne prorvte ispunjene bor-karbidom (B_4C). Regulacijski skloovi u reaktoru s kipućom vodom moraju osigurati veću rezervu negativne reaktivnosti nego što je to potrebno u reaktoru s vodom pod tlakom, jer neposredni rashladni krug reaktora ne omoguće upotrebu borne kiseline u reaktorskoj vodi. Reaktorska voda mora, naime, biti čista demineralizirana voda. Potrebnu rezervu negativne reaktivnosti kad je reaktorska jezgra svježa moguće je osigurati upotrebom izgorivih apsorbera. U reaktorima s kipućom vodom kao izgorivi apsorber upotrebljava se gadolinij-oksid (Gd_2O_3). Regulacijski sklopovi ulaze odozdo u jezgru, što je povoljno s gledišta kontrole reaktivnosti. U donjem je dijelu jezgre, naime, gustoća proizvedene snage veća zbog boljeg moderatorskog djelovanja vode, jer je sadržaj pare u donjem dijelu jezgre niži nego u gornjem (sl. 28).

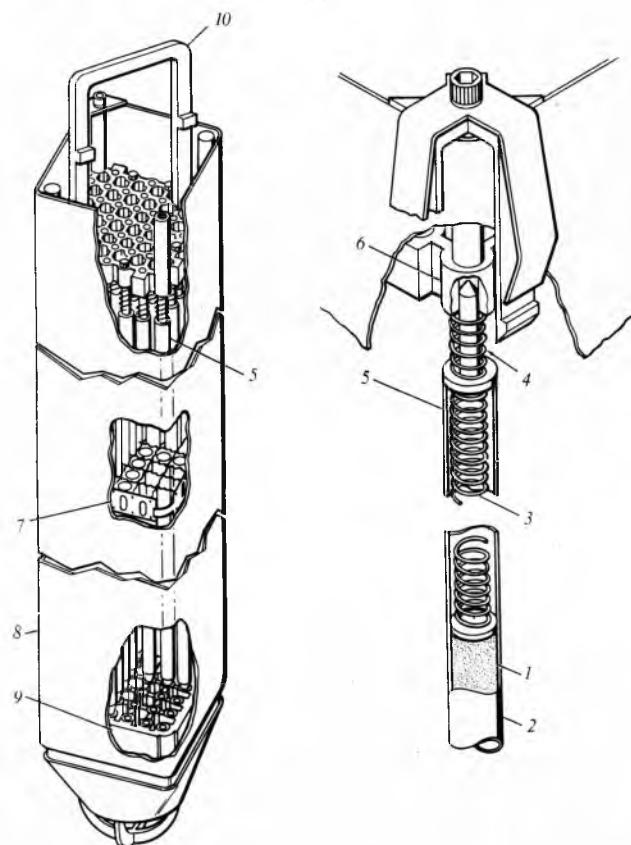
Za pogon regulacijskih sklopova služe dva pogonska sredstva. U normalnom pogonu skloovi se pokreću pomoću elektromotora (sl. 29). Brzina podizanja i spuštanja regulacijskih sklopova iznosi ~15 mm/s. Za naglo obustavljanje reaktora predviđen je hidraulički pogon. Rezervoari s vodom pod stalnim su tlakom dušika. Električnim signalom ventili se na tim rezervoarima otvaraju i voda iz rezervoara potiskuje regula-

cijске sklopove u reaktorsku jezgru silom koja je ~10 puta veća od njihove težine.

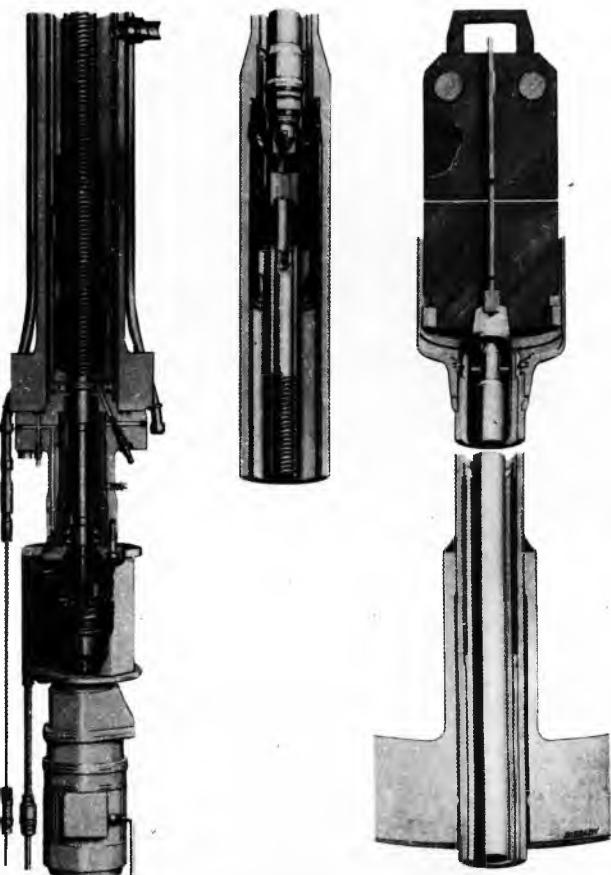
Reaktor s kipućom vodom ima negativni temperaturni koeficijent reaktivnosti. Najniži (po apsolutnoj vrijednosti) negativni temperaturni koeficijent reaktivnosti koji dozvoljava stabilan rad reaktora s obzirom na regulaciju snage i prigušenje oscilacija zbog djelovanja ksenona iznosi $\sim -0,015 \Delta\theta/\Delta P$. Negativni temperaturni koeficijent reaktora potječe od djelovanja temperature goriva i djelovanja šupljina u moderatoru — kipućoj vodi zbog pojave mjehurića pare. I povišenje temperature goriva i povećanje broja mjehurića pare u vodi povećava negativnost temperaturnog koeficijenta. Stabilan pogon reaktora osiguran je ako omjer volumena pare i volumena vode u jezgri nije veći od 0,2–0,3. Omjer stvarnog i kritičnoga specifičnog opterećenja jezgre reaktora s kipućom vodom (zbog sigurnosti rada reaktora) ne može biti veći od 0,5–0,6.



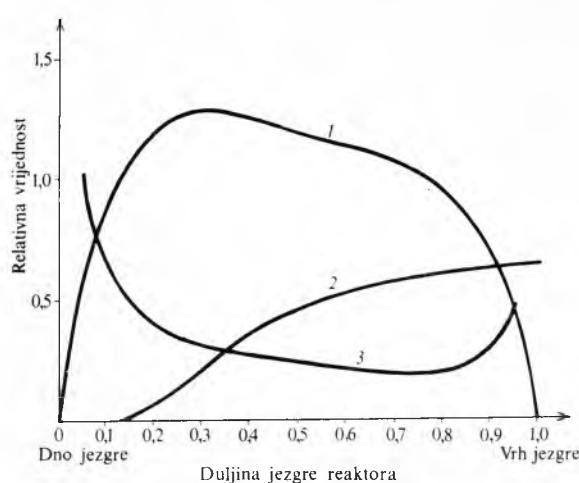
Sl. 26. Unutrašnja cirkulacijska pumpa reaktora hlađenog i moderiranog kipućom vodom. a) položaj pumpe u normalnom pogonu, b) pumpa u izvučenom položaju



Sl. 27. Gorivi element reaktora hladenog i moderiranog kipućom vodom.
1 tablet UO_2 , 2 goriva šipka, 3 pero za potiskivanje tableta UO_2 , 4 pero za elastično povezivanje gorivih šipki s nosivom konstrukcijom, 5 obloga gorive šipke, 6 gornja potporna ploča, 7 elastična rešetka, 8 kutija gorivog elemenata, 9 donja potporna ploča, 10 ručica za podizanje gorivog elementa

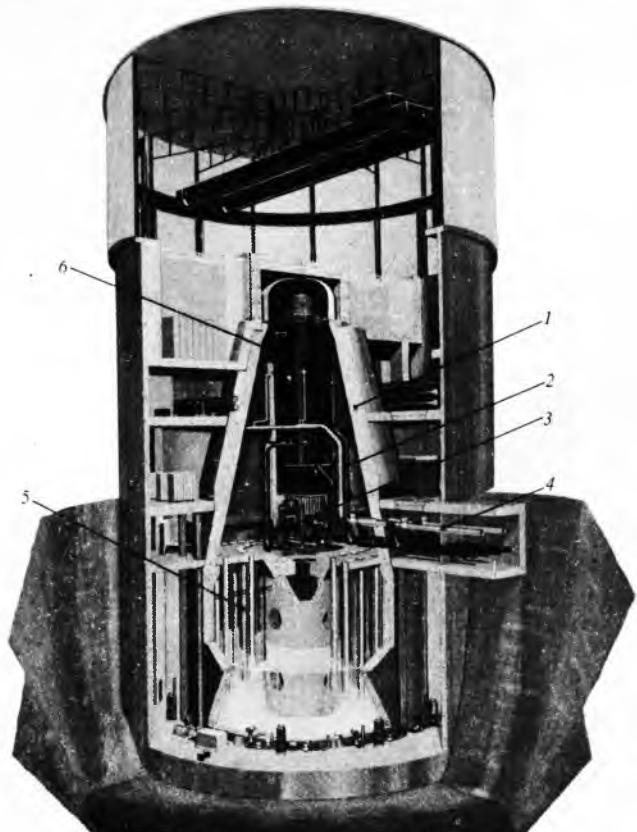


Sl. 29. Regulacijski sklop s pogonskim uređajima reaktora hladenog i moderiranog kipućom vodom

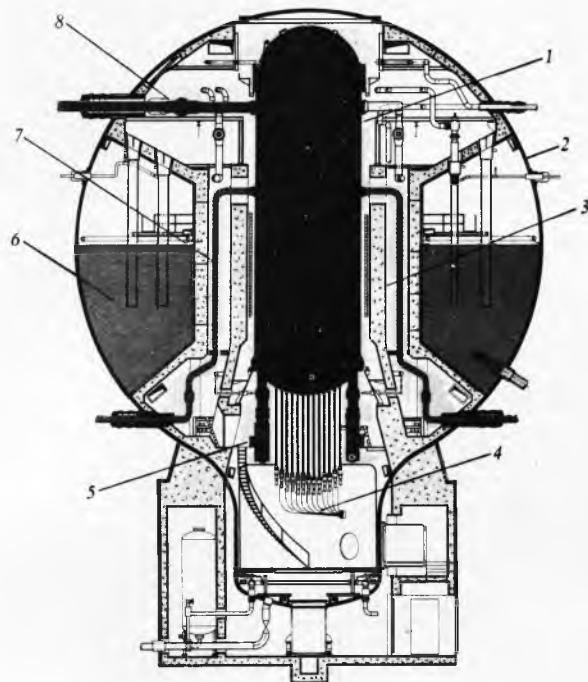


Sl. 28. Raspodjela proizvedene snage, sadržaja pare u vodi i kritičnoga toplinskog toka uzduž jezgre reaktora hladenog i moderiranog kipućom vodom. 1 relativna snaga, 2 sadržaj pare, 3 kritični toplinski tok

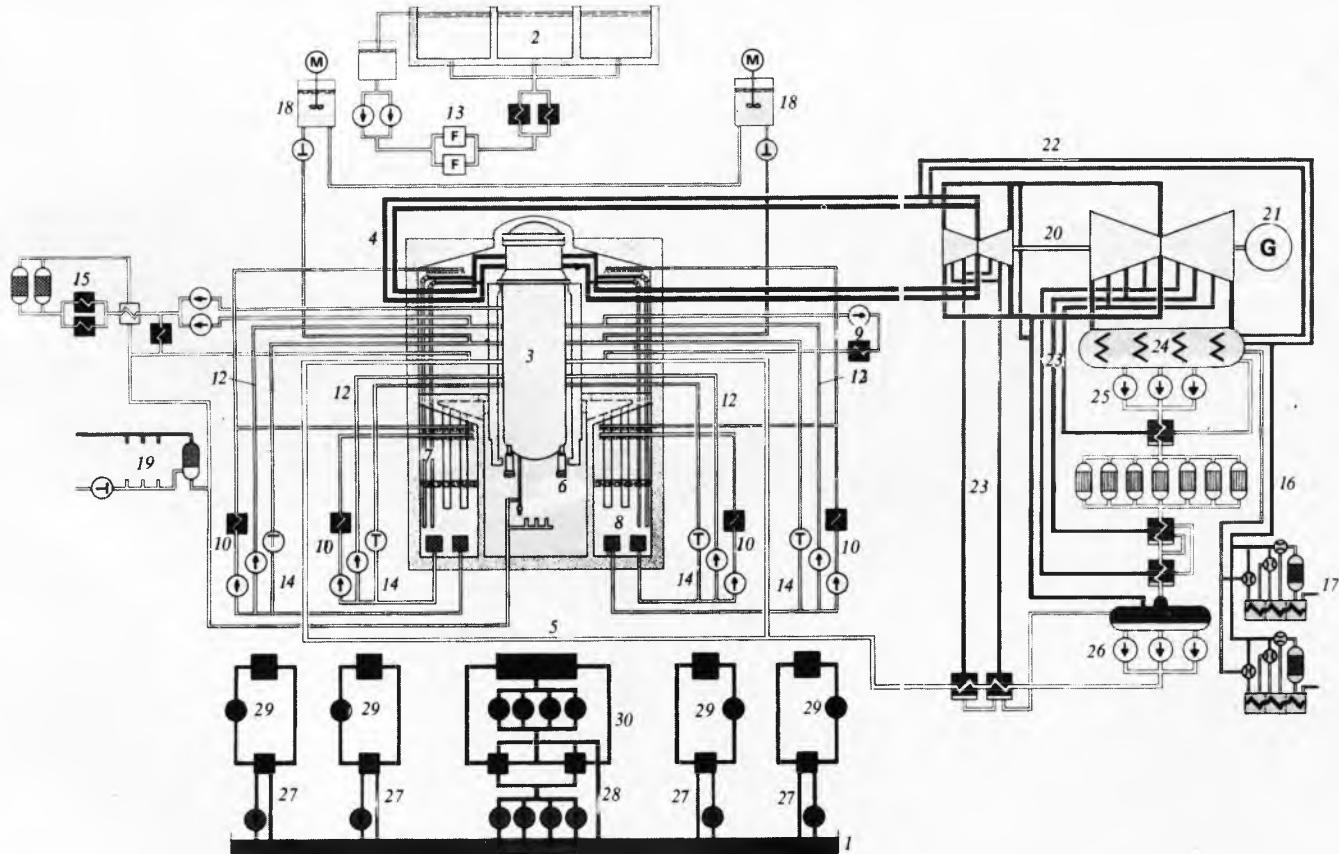
Zaštita okoliša pri lomu cjevova koji ulaze u reaktorsku posudu (pojni cjevovodi, recirkulacijski cjevovodi, parovodi) postiže se smještajem reaktorskog postrojenja u sigurnosni štit. Zbog kompaktnije izvedbe reaktorskog postrojenja dimenzije su toga štita za reaktor s kipućom vodom mnogo manje nego za reaktor s vodom pod tlakom. Izvedbe sigurnosnog štita i uređaja za reaktore s kipućom vodom međusobno se prilično razlikuju (sl. 30 i 31). Zbog ekspanzije pare nakon loma cjevova ili zbog otvaranja rasteretnih ventila koji izoliraju sigurnosni štit pri lomu parovoda raste tlak u prostoru unutar



Sl. 30. Sigurnosni štit s reaktorskom zgradom za reaktor hladen i moderiran kipućom vodom i vanjskim recirkulacijskim krugom. 1 sigurnosni štit, 2 parovod, 3 pumpa za recirkulaciju, 4 cjevovod za pojnu vodu, 5 komora za kondenzaciju pare, 6 reaktorska posuda



Sl. 31. Kuglasti čelični sigurnosni štit reaktora s kipućom vodom i unutrašnjim recirkulacijskim krugom. 1 reaktorska posuda, 2 sigurnosni štit, 3 biološki štit, 4 instrumentacija reaktorske jezgre, 5 pumpa za recirkulaciju, 6 komora za kondenzaciju pare, 7 cjevovod pojne vode, 8 parovod



Sl. 32. Principijelna shema nuklearnog energetskog postrojenja s reaktorom hlađenim i moderiranim kipućom vodom 1 rashladna voda, 2 bazeni za odraženo gorivo, 3 posuda reaktora, 4 parovodi, 5 cjevovod za pojnu vodu, 6 pumpe za recirkulaciju, 7 cjevi za kondenzaciju pare, 8 bazeni za kondenzaciju pare u sigurnosnom štitu, 9 sustav za odvođenje zaostale topline, 10 sustav za prskanje sigurnosnog štitu, 12 niskotlačni sustav za zaštitno hlađenje jezgre, 13 sustav za hlađenje i pročišćivanje bazena za odraženo gorivo, 14 visokotlačne pumpe za zaštitno hlađenje jezgre, 15 sustav za demineralizaciju reaktorske vode, 16 sustav za demineralizaciju kondenzata, 17 sustav za tretiranje plinovitih radioaktivnih otpadaka, 18 sustav za uštrcavanje otopine bora u jezgru, 19 sustav za hidrauličko pokretanje regulacijskih sklopova, 20 turbina, 21 generator, 22 obilazni parovod, 23 sustav za regenerativno zagrijavanje pojne vode, 24 kondenzator, 25 pumpe za kondenzat, 26 pojne pumpe, 27, 28 rashladna voda sustava za hlađenje nuklearnih komponenata, 29, 30 sustav za hlađenje nuklearnih komponenata.

sigurnosnog štitu. Tlak pare smanjuje se njezinom kondenzacijom u kondenzacijskim komorama (bazenima s vodom) unutar sigurnosnog štitu. Dodatno smanjenje tlaka postiže se prskanjem vode u parni prostor.

Pomoći sustavi reaktora hlađenog i moderiranog kipućom vodom (sl. 32) mogu se svrstati u dvije grupe: pomoći pogoni potrebni za normalni pogon reaktora i pomoći pogoni za zaštitu postrojenja u kvaru.

Pomoći pogoni potrebni za normalan pogon reaktora jesu: a) sustav za odvođenje zaostale topline iz reaktora, b) sustav za pročišćivanje reaktorskog rashladnog sredstva, c) sustav za pročišćivanje vode iz bazena za nuklearno gorivo, d) sustav za hlađenje nuklearnih komponenata i e) sustav za tretiranje radioaktivnih otpadaka.

Pomoći pogoni za zaštitu reaktorskog postrojenja u kvaru jesu: a) sustav za brzo boriranje reaktora, b) visokotlačni sustav za uštrcavanje vode u jezgru, c) niskotlačni sustav za potapanje jezgre, d) sustav za hlađenje sigurnosnog štitu i e) sustav za izolaciju sigurnosnog štitu. Rad pomoći sustava koji služe za sigurnost reaktora osiguran je izvedbom s neovisnim komponentama koje su smještene u posebnim prostorijama. Potpuno iskorišćivanje kapaciteta postrojenja osigurano je i kad se pokvari bilo koja od komponenata.

Sustav za odvod zaostale topline sastoji se od dva neovisna rashladna kruga, od kojih svaki ima pumpu za recirkulaciju vode i izmenjivač topline. Izmenjivač je hlađen u zatvorenom rashladnom krugu sustava za hlađenje nuklearnih komponenata. Paralelno s jednim od rashladnih krugova za dovođenje zaostale topline spojen je sustav za pročišćivanje reaktorske vode. Prije ulaska u ionske izmenjivačke filtre voda se hlađi u dva stupnja: regenerativnim izmenjivačem topline i paralelno spo-

jenim hladnjacima priključenim na sustav za hlađenje nuklearnih komponenata.

Bazeni za odzračeno nuklearno gorivo hlađe se recirkulacijom vode iz bazena preko filtra i izmjjenjivača topline. Hlađenje bazena osigurava odvođenje topline koja se oslobađa radioaktivnim raspadom odzračenog goriva.

Sve komponente reaktorskog postrojenja koje su u dodiru s rashladnim sredstvom reaktora hlađe se vodom sustava za hlađenje nuklearnih komponenata koja cirkulira u zatvorenom krugu. Toplina akumulirana u tom sustavu predaje se preko izmjjenjivača topline sirovoj vodi. Sirova voda za hlađenje mora biti osigurana u svim uvjetima, jer je to jedan od osnovnih zahtjeva za sigurnost reaktorskog postrojenja.

Sustav za tretiranje radioaktivnih otpadaka uključuje preradbu krutih, tekućih i plinovitih otpadaka. Za reaktor s kipućom vodom posebno su važni plinoviti radioaktivni otpaci. Najveći je izvor tih otpadaka (među kojima je najviše izotopa kriptona i ksenona) kondenzator turbine u koji oni dospijevaju zajedno s vodenom parom. Plinoviti fizijski proizvodi, koje ejektori sišu iz kondenzatora, vode se u sustav za tretiranje plinovitih radioaktivnih otpadaka. Količina radioaktivnih otpadaka mnogo ovisi o broju oštećenih obloga gorivih elemenata. Obično se računa sa 0,5% oštećenih obloga.

Sustav za zaštitno hlađenje reaktorske jezgre i brzo obustavljanje pogona reaktora služi da zaštiti gorive elemente kad se smanji tlak u reaktorskoj posudi zbog loma na nekom od priključnih cjevovoda. Kad se ošteći cjevovod, voda naglo ispari i para ispunjuje prostor unutar sigurnosnog štita. Tamo se nalaze bazeni za kondenzaciju u koje se kroz cijevi za kondenzaciju odvodi para, pa se tako smanjuje unutrašnji tlak.

Visokotlačne pumpe za brzo boriranje jezgre uštrcavaju, djelovanjem automatskog uređaja, otopinu natrij-pentaborata u prostor ispod reaktorske jezgre. Otopina sadrži dovoljno apsorbera da osigura sigurno i brzo gašenje reaktora i pri izvučenim regulacijskim sklopovima.

Voda za zaštitno hlađenje jezgre i za polijevanje sigurnosnog štita, kad se ošteći neki dio reaktorskog postrojenja, nalazi se u kondenzacijskim bazenima unutar sigurnosnog štita. Iz tih bazena crpe vodu četiri grupe, svaka po tri pumpe, koje imaju neovisno i odvojeno osigurano napajanje električnom energijom iz mreže i iz dizelskih agregata u elektrani. Svaka je grupa pumpi i prostorno odvojena od ostalih grupa, kako kvar na jednoj pumpi ne bi utjecao na funkcionalnost drugih grupa i kako bi bio omogućen nesmetani remont. U svakoj grupi pumpi postoje visokotlačna i niskotlačna pumpa za hlađenje jezgre i pumpa za napajanje prskalica u sigurnosnom štitu. Voda za prskanje kruži i hlađi se preko sustava za hlađenje nuklearnih komponenata. Pumpe za prskanje i hlađenje sigurnosnog štita djeluju i kad je potrebno izolirati sigurnosni štit. Taj štit treba izolirati kad se ošteći jedan od parovoda između reaktora i turbine. Brzopozorni ventili zatvaraju odvod pare u parovode izvan sigurnosnog štita, pa se ona preko rasteretnih ventila i cijevi za kondenzaciju odvodi u kondenzacijske bazene unutar sigurnosnog štita. Postoje reaktori s kipućom vodom koji imaju manje pumpi u pomoćnim sustavima jer se funkcije pojedinih sustava kombiniraju. Princip osiguranja funkcionalnosti sustava pri oštećenju bilo koje komponente, koji zahtijeva neovisno napajanje energijom i prostorno odvajanje komponenata, mora biti sačuvan u svakoj izvedbi.

Turbogeneratorsko postrojenje dobiva iz reaktora zasićenu paru tlaka $\sim 7 \text{ MPa}$. Turbina se obično sastoji od visokotlačnog i nekoliko niskotlačnih dvostrukih kućišta (v. *Turbine, parne*). Vlažnost pare u procesu ekspanzije smanjuje se ugradnjem separatora vlage i zagrijaća pare između visokotlačnog i niskotlačnog dijela turbine. Zbog neposredne veze između reaktora i turbine postoji mogućnost unošenja u turbinu, zajedno s parom, radioaktivnih fisijskih i korozijskih proizvoda. Tako se turbina, osobito njezin visokotlačni dio, kontaminira, što je potrebno uzeti u obzir i u pogonu, a pogotovo za vrijeme remonta. Voda se iz kondenzatora turbine vraća u reaktor i zbog toga treba održavati kvalitetu vode na razini koja je propisana za rashladno sredstvo reaktora. Korozijski proizvodi u vodi ili nečistoće zbog propusnosti kondenzatora mogu uzrokovati teškoće u pogonu zbog aktivacije tih sastojaka i zbog utjecaja na materijale u reaktoru. Zbog toga se sav kondenat pročišćuje ionskim izmjjenjivačima.

Ako je potrebno obustaviti pogon turbine, svježa se para odvodi neposredno u kondenzator preko obilaznih parovoda.

Iz nuklearne elektrane s reaktorom s kipućom vodom nije dopušteno ispuštanje pare u atmosferu.

Nuklearne elektrane kanalskog tipa s reaktorom hlađenim kipućom vodom

Osim nuklearnih elektrana s reaktorima hlađenim i moderiranim kipućom vodom (BWR), gradene su i nuklearne elektrane s reaktorima koji su hlađeni kipućom vodom, ali s drugim moderatorima i u drugoj izvedbi.

Do danas je izgrađeno nekoliko nuklearnih energetskih postrojenja s reaktorima hlađenima kipućom vodom i moderiranim grafitom ili teškom vodom. Prvi tip takvih reaktora s grafitom kao moderatorom (LWGR) razvijen je i građen u SSSR, a drugi tip s reaktorima moderiranim teškom vodom (SGHWR) građen je u Velikoj Britaniji i Kanadi. Ta dva tipa reaktora nemaju reaktorskog posudu pod tlakom reaktorskoga rashladnog sredstva, jer stlačeno rashladno sredstvo struji kroz tlačne cijevi koje prolaze kroz jezgru reaktora. Izvedba je tih reaktora slična izvedbi kanadskih teškovodnih reaktora, o kojima će još biti riječi.

Nuklearne elektrane s reaktorom moderiranim grafitom i hlađenim kipućom vodom (LWGR). Takvi reaktori razvijeni su u SSSR u nekoliko etapa. Razvoj nuklearnih elektrana s grafitom kao moderatorom započeo je gradnjom prve nuklearne elektrane u Obninsku kraj Moskve (snaga 5 MW, u pogonu od 1954. god.), nastavljen je gradnjom nuklearnih elektrana u Bjelojarsku (snaga 100 i 200 MW), te gradnjom niza nuklearnih elektrana snage 1000 MW (tip RBMK 1000). Prva takva elektrana izgrađena je kod Lenjingrada.

Reaktor nuklearne elektrane snage 1000 MW smješten je u betonskoj zgradi dimenzija $21,6 \times 21,6 \times 25,5 \text{ m}$. Betonska zgrada služi kao potpora čeličnoj posudi moderatora i kao biološka zaštita. Jezgra reaktora izgrađena je od grafitnih blokova poprečnog presjeka $220 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$. Grafitni blokovi imaju vertikalne provrte u koje se ulažu tlačne cijevi od slitine cirkonija i niobija promjera 88 mm i sa stijenkama od $\sim 4 \text{ mm}$. U reaktoru ima 1700 tlačnih cijevi. Svaka cijev sadrži po dva koaksijalno smještena goriva elemenata i kroz nju struji rashladno sredstvo za hlađenje tih elemenata. Duljina je gorivog elemenata $\sim 3,5 \text{ m}$, tako da je aktivni dio jezgre reaktora visok $\sim 7 \text{ m}$. Gorivi element sastavljen je od 18 gorivih šipki. Gorive šipke su cijevi od cirkonija, promjera $\sim 13 \text{ mm}$, a ispunjene su tabletama od uran-oksida (oko 2% ^{235}U). Kipuća voda cirkulira kroz reaktorsko postrojenje u dva paralelna kruga, od kojih se svaki sastoji od dva separatora pare, četiri cirkulacijske pumpe s cjevovodima i kolektorima.

Separatori pare vrlo su veliki: promjer $\sim 2,3 \text{ m}$, duljina $\sim 30 \text{ m}$. Pumpe su gornjene elektromotorima snage $\sim 5,5 \text{ MW}$, a projektirane su za protok od $\sim 7000 \text{ m}^3/\text{h}$. Separatori su smješteni u posebnoj prostoriji na višoj razini od reaktorskog jezgre. Izlaz iz svake tlačne cijevi reaktora spojen je neposredno na separator pare. Srednji sadržaj pare u smjesi pare i vode na izlazu iz reaktora iznosi $\sim 17\%$. U separatorima pare iz smjesi se odvaja $\sim 3800 \text{ t/h}$ suhozasičene pare tlaka od $\sim 7 \text{ MPa}$.

Para se odvodi u dvije turbine snage po 500 MW. Turbine su jednoosovinske i dvaprotočne, duge $\sim 40 \text{ m}$. Svaka turbina se sastoji iz jednoga visokotlačnog kućišta i četiri niskotlačna kućišta. Nakon ekspanzije u visokotlačnom dijelu turbine para se odvodi u separator vlage i u međupregrijač.

Sav kondenzat se mora prije povratka u reaktor pročistiti u ionskim izmjjenjivačima.

U reaktorima kanalskog tipa koji su hlađeni kipućom vodom postoji mogućnost pregrijanja pare u reaktoru. Ta je mogućnost ostvarena u nuklearnoj elektrani u Bjelojarsku u kojoj se proizvodi pregrijana para tlaka 10 MPa i temperature 773 K . Para se pregrijava vraćanjem suhozasičene pare iz separatora u reaktor, gdje se u posebnim kanalima pregrijava, a zatim se kao pregrijana para odvodi u turbinu.

Reaktori kanalskog tipa omogućuju pristup do pojedinih gorivih elemenata radi izmjene goriva i kad je reaktor u pogonu. Zbog toga takva reaktorska postrojenja imaju posebne strojeve za takvu izmjenju goriva.

Nuklearne elektrane s reaktorom moderiranim teškom vodom i hlađenim kipućom vodom (SGHWR). Prototip je nuklearna elektrana snage 100 MW koja je u pogonu u Winfrithu (Velika Britanija) od 1968. godine.

Reaktor je u posudi moderatora sa ~ 33000 kg teške vode. Teška se voda cirkuliranjem u vanjskom rashladnom krugu održava na potrebnoj čistoći i na temperaturi od ~ 350 K. U posudi moderatora koja ima promjer od $\sim 3,7$ m i visinu od 4 m ima 104 vertikalna kanala promjera ~ 180 mm, kroz koje prolaze tlačne cijevi vanjskog promjera 130 mm i sa stijenkama od ~ 5 mm. U tlačnim cijevima se nalaze gorivi elementi. Svaki sadrži 36 gorivih šipki promjera $\sim 14,5$ mm. Gorive šipke su cijevi od slitine cirkonija ispunjene tabletama uran-oksida (obogaćenje urana 2,2%). Reaktor sadrži ~ 21 t urana. Visina aktivnog dijela reaktorske jezgre iznosi ~ 3600 mm.

Unutar tlačnih cijevi cirkulira mješavina vode i pare pod tlakom od $\sim 6,8$ MPa. Sadržaj je pare u mješavini vode i pare na izlazu iz jezgre $\sim 11\%$. Ta se mješavina odvodi iz reaktora u separatore pare, iz kojih suhozasićena para odlazi u turbinu, a voda se pumpama preko ulaznih kolektora vraća u reaktor. Separatori su smješteni u posebnim prostorijama na višoj razini od reaktorske jezgre. Reaktorsko postrojenje ima dva paralelna recirkulacijska kruga koji imaju po dvije paralelne cirkulacijske pumpe i jedan separator pare.

U turbinu se odvodi maksimalno ~ 540 t/h suhozasićene pare. Između visokotlačnog i niskotlačnog dijela turbine nalazi se separator vlage i pregrijač pare.

Nuklearna elektrana sličnih karakteristika je u pogonu u Kanadi od 1972. god. (NE Gentilly, snage 250 MW).

Nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim teškom vodom (HWR)

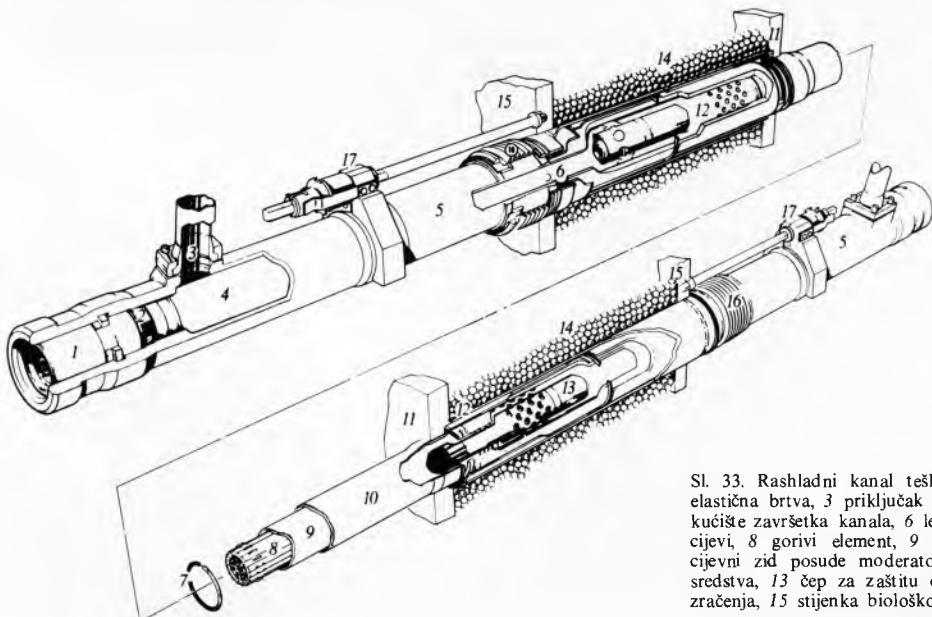
Nuklearne elektrane s teškovodnim reaktorima u osnovi su slične nuklearnim elektranama s reaktorima koji su hlađeni i moderirani običnom vodom pod tlakom, s razlikom da je u primarnom krugu obična voda zamijenjena teškom vodom. Upotreba teške vode za hlađenje i moderiranje reaktora omogućuje da se kao nuklearno gorivo upotrijebi prirodni uran, što nije moguće s reaktorima s običnom vodom (v. *Nuklearni reaktori*).

Nuklearna energetska postrojenja s teškovodnim reaktorima izvode se u dvije verzije: reaktori s cijevima pod tlakom i reaktori s posudom pod tlakom. Reaktore s cijevima pod tlakom razvila je Kanadska atomska komisija (AECL, Atomic Energy of Canada Limited). Ta je izvedba mnogo raširenija od izvedbe s posudom pod tlakom koja je razvijena u SR Njemačkoj (KWU, Kraftwerkunion).

Teškovodni reaktor s cijevima pod tlakom sastoji se od posude moderatora i cijevi koje prolaze kroz tu posudu. U cijevima se nalazi nuklearno gorivo i kroz njih cirkulira rashladno sredstvo reaktora (teška voda). U posudi moderatora, oko cijevi, nalazi se moderator (teška voda) pod približno atmosferskim tlakom i na niskoj temperaturi (~ 320 K). Rashladno sredstvo reaktora pod mnogo većim je tlakom i na višoj temperaturi (~ 11 MPa, 560 K).

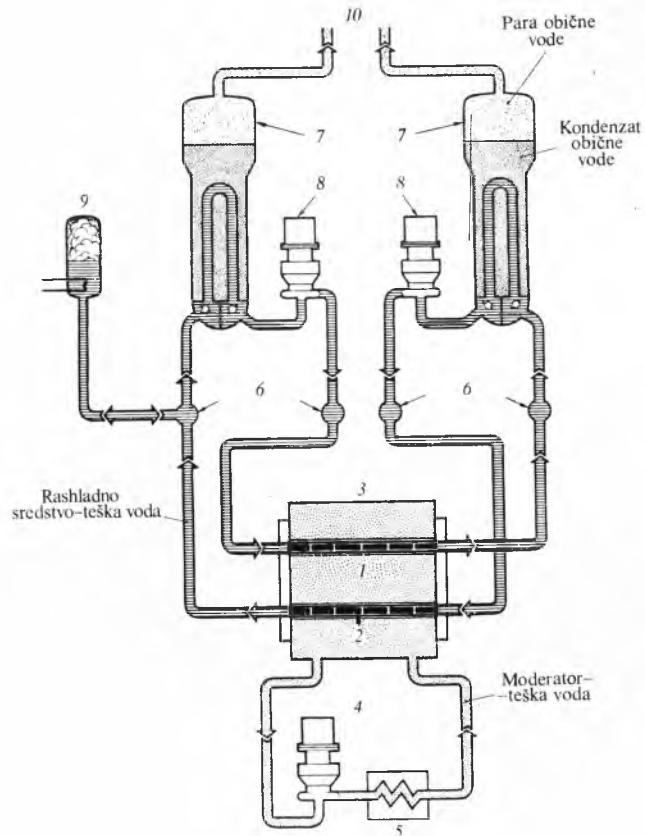
Posuda moderatora je cilindrična s ravnim paralelnim čeonim plohama. U čone plohe uvaljane su cijevi, koje su sastavni dijelovi posude moderatora. Koncentrično kroz njih prolaze cijevi pod tlakom reaktorskoga rashladnog sredstva (sl. 33). Plašti i čone stijenke posude moderatora izvedeni su od nerđajućeg čelika. Cijevi koje prolaze kroz jezgru moraju biti izrađene od slitine cirkonija radi manje apsorpcije neutrona. Posuda moderatora za nuklearnu elektranu snage 600 MW ima promjer od $\sim 7,5$ m i duljinu od ~ 6 m. U čone plohe uvaljano je 380 cijevi s unutrašnjim promjerom ~ 130 mm. Posuda moderatora ugrađuje se horizontalno, što omogućuje pristup do jednog i drugog cijevnog zida radi izmjene goriva. Tlak unutar posude moderatora neovisan je o tlaku reaktorskoga rashladnog sredstva, što veoma olakšava izradbu posude velikih dimenzija. Tlačne cijevi imaju unutrašnji promjer od ~ 100 mm i debljinu stijenke 4..4,5 mm. Tlačne cijevi izvedene su od jednakog materijala kao i cijevi posude moderatora (cirkonij sa $\sim 2,5\%$ niobija). Prstenasti zazor između cijevi posude moderatora i tlačnih cijevi ispunjen je plinom da bi se termički izoliralo reaktorsko rashladno sredstvo od moderatora.

U reaktorskom postrojenju teška voda cirkulira u dva odvojena rashladna kruga: u jednome je reaktorsko rashladno sredstvo, a u drugome moderator (sl. 34). Reaktorsko rashladno sredstvo cirkulira kroz tlačne cijevi. Radi postizavanja povoljnije raspodjele temperature u reaktoru smjer je strujanja rashladnog sredstva u susjednim rashladnim kanalima suprotan. Na izlazu iz tlačnih cijevi rashladno sredstvo se skuplja u izlazne kolektore, prolazi kroz parogeneratore i pumpe primarnog kruga, te se preko ulaznih kolektora ponovno raspodjeljuje na tlačne cijevi. Prosječni protok teške vode kroz tlačnu cijev iznosi ~ 20 kg/s, uz prosječnu brzinu strujanja od ~ 9 m/s. Temperatura rashladnog sredstva u primarnom krugu mijenja se od 540..580 K. Moderator, koji se nalazi u posudi moderatora, cirkulira u rashladnom krugu moderatora. Rashladni krug sastoji se od hladnjaka moderatora i cirkulacijske pumpe. Neovisni rashladni krug moderatora omogućuje održavanje potrebne temperature i čistoće moderatora, što je važno za regulaciju reaktivnosti reaktora.



Sl. 33. Rashladni kanal teškovodnog reaktora, 1 zatvarač tlačne cijevi 2 elastična brtva, 3 priključak za rashladno sredstvo, 4 cijev za centriranje, 5 kućište završetka kanala, 6 ležaj završetka kanala, 7 odstojnik za centriranje cijevi, 8 gorivi element, 9 tlačna cijev, 10 cijev posude moderatora, 11 cijevni zid posude moderatora, 12 perforirana cijev za prolaz rashladnog sredstva, 13 čep za zaštitu od zračenja, 14 metalne kuglice za zaštitu od zračenja, 15 stijenka biološkog štita, 16 kompenzacija termičke dilatacije, 17 uređaj za pozicioniranje

Tlačne cijevi (sl. 33) sadrže gorive elemente, priključke za ulaz i izlaz rashladnog sredstva, mehaničke zatvarače i čepove za zaštitu od zračenja. Tlačne se cijevi brtve elastičnim metalnim brtvama koje pod tlakom rashladnog sredstva naliježu uz fino obradene metalne površine. Pouzdano brtvenje vrlo je važno za pogon teškovodnih reaktora. Tlačne cijevi otvaraju i zatvaraju strojevi za izmjenu goriva s daljinskim upravljanjem, pri čemu se mora što je više moguće smanjiti gubitak teške vode.

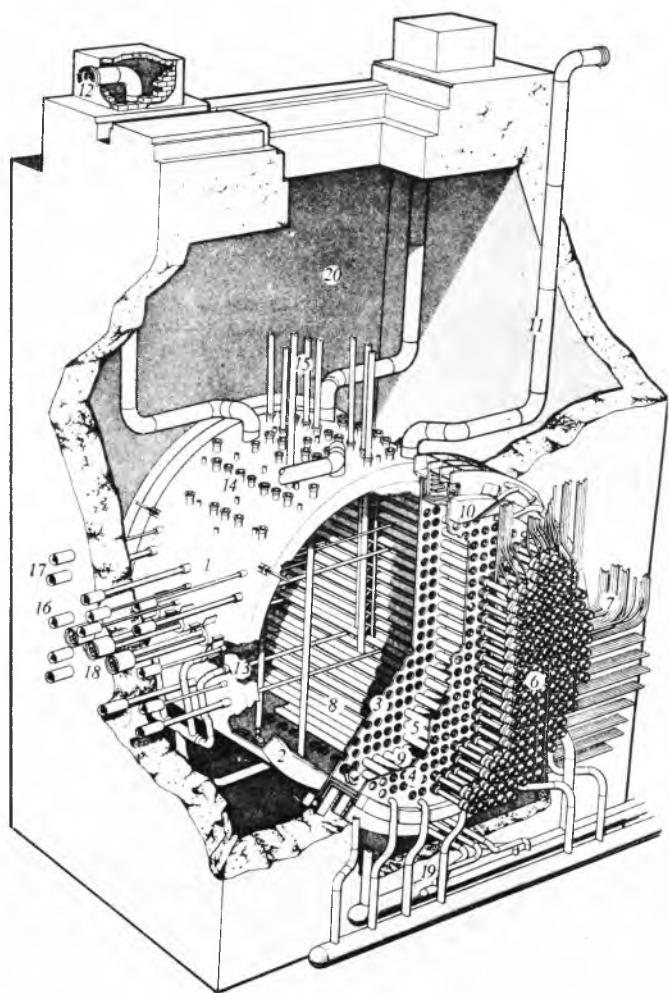


Sl. 34. Principijelna shema hlađenja reaktorskog postrojenja s teškovodnim reaktorom i cijevima pod tlakom. 1 reaktor, 2 gorivo, 3 posuda moderatora, 4 pumpa za moderator, 5 hladnjak moderatora, 6 kolektori, 7 parogeneratori, 8 cirkulacijske pumpe reaktorskoga rashladnog sredstva, 9 tlačni spremnik, 10 odvod pare

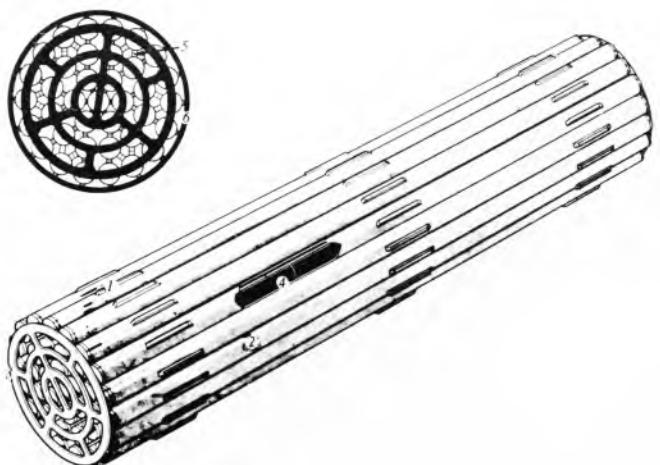
Nuklearno gorivo u teškovodnom reaktoru nalazi se unutar horizontalnih tlačnih cijevi, a regulacijski sklopovi kreću se vertikalno između cijevi posude moderatora, tj. okomito na tlačne cijevi. Vodilice neutronskih detektoru ulaze u posudu moderatora s njezine bočne strane (sl. 35). Regulacija oblika i razine neutronskog toka u teškovodnom reaktoru provodi se: a) šipkama od nerđajućeg čelika (za prilagodjivanje raspodjele neutronskog toka i kompenzaciju zatrovanja ksenonom), b) regulacijskim sklopovima koji sadrže komore s lakom vodom (laka voda služi kao apsorber neutrona i njezina se količina može mijenjati u svakoj komori), c) regulacijskim sklopovima s jakim apsorberom (kadmij) i d) otapanjem bora u teškoj vodi (kao kompenzacija dugoročnim promjenama reaktivnosti zbog izgaranja goriva).

Pogon se reaktora može obustaviti ili spuštanjem apsorcijskih šipki u reaktor ili uštrcavanjem otopine gadolinij-nitrita u moderator.

Regulacijom reaktora upravlja elektroničko računalo na osnovi informacija dobivenih od ~30 neutronskih detektoru. Neovisni neutronski detektori daju signale u jedan i drugi sustav za zaustavljanje reaktora. Gorivi element teškovodnog reaktora (sl. 36) snop je od 37 gorivih šipki. Promjer je snopa ~100 mm (sto odgovara unutrašnjem promjeru tlačne cijevi), a njegova duljina ~500 mm. Promjer gorivih šipki, koje su ispunjene tabletama prirodnog uran-oksida, iznosi ~12 mm. Masa je

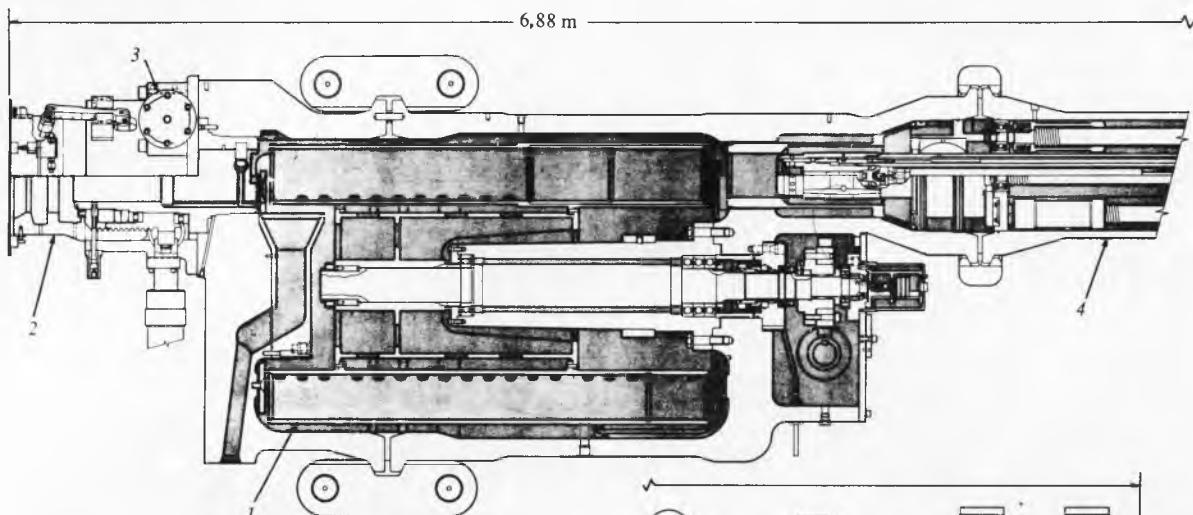


Sl. 35. Postrojenje s teškovodnim reaktorom s cijevima pod tlakom. 1 posuda moderatora, 2 prsten za ukrućenje, 3 cijevni zid posude moderatora, 4 cijevni zid biološke zaštite, 5 vodilice tlačnih cijevi, 6 završeci tlačnih cijevi, 7 cijevi za rashladno sredstvo reaktora, 8 cijevi posude moderatora, 9 prostor ispunjen čeličnim kuglicama radi biološke zaštite, 10 prirubnica, 11 odušne cijevi, 12 membranski zatvarači koji se lome pri povećanom tlaku u posudi moderatora, 13 ulaz moderatora, 14 vodilice regulacijskih šipki, 15 regulacijske šipke, 16 detektori neutronskog toka, 17 cjevovodi za ubrizgavanje tekućeg apsorbera, 18 priključci za hlađenje ionizacijskih komora, 19 sustav za hlađenje biološke zaštite, 20 zaštitni sloj obične vode iznad reaktora

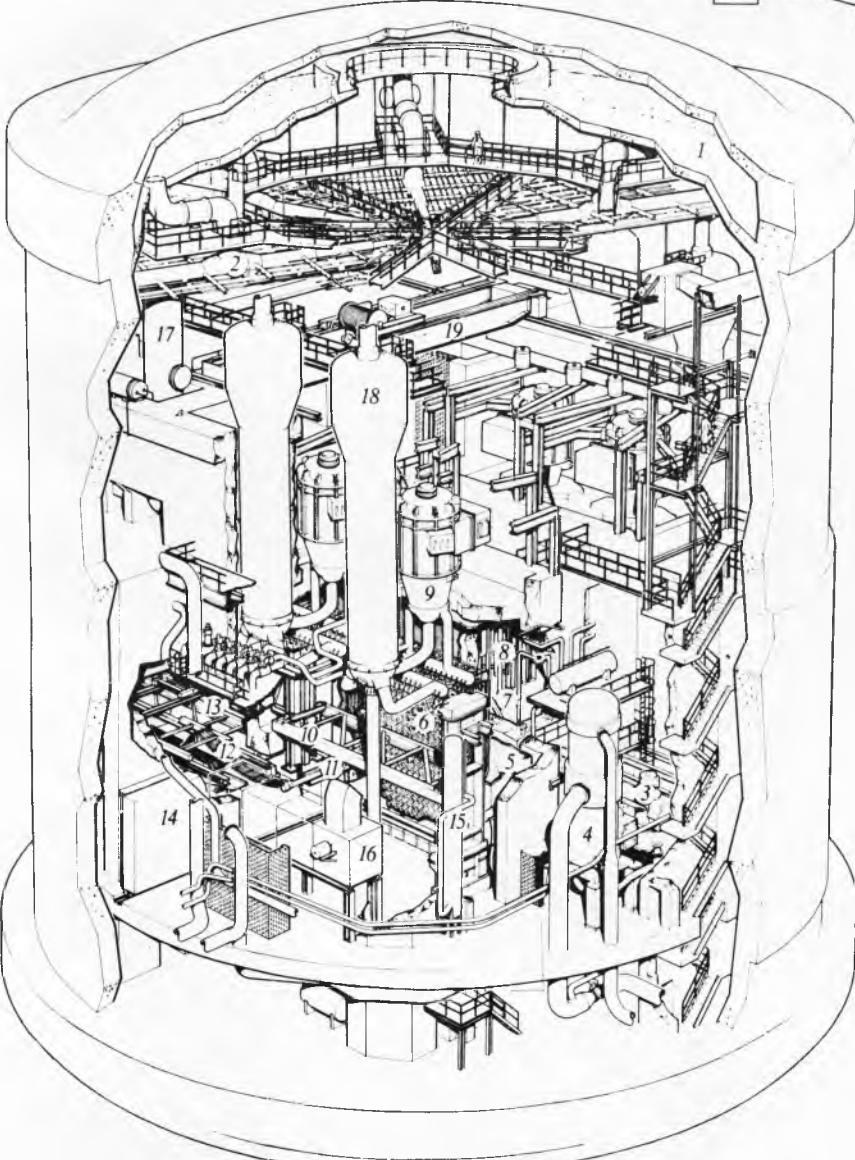


Sl. 36. Gorivi element teškovodnog reaktora. 1 odstojnik, 2 obloga gorive šipke, 3 čeona potporna ploča, 4 tabletu UO_2 , 5 odstojnici gorivih šipki, 6 stijenka tlačne cijevi

urana u gorivom elementu ~19 kg. U svakoj tlačnoj cijevi teškovodnog reaktora za nuklearnu elektranu snage 600 MW nalazi se 12 gorivih elemenata.



Sl. 37. Glava stroja za kontinuiranu izmjenu goriva u teškovodnom reaktoru. 1 skladišta goriva, 2 uređaj za spajanje s tlačnom cijevi, 3 separatori, 4 pogonski uređaj za pomicanje gorivih elemenata u tlačnoj cijevi



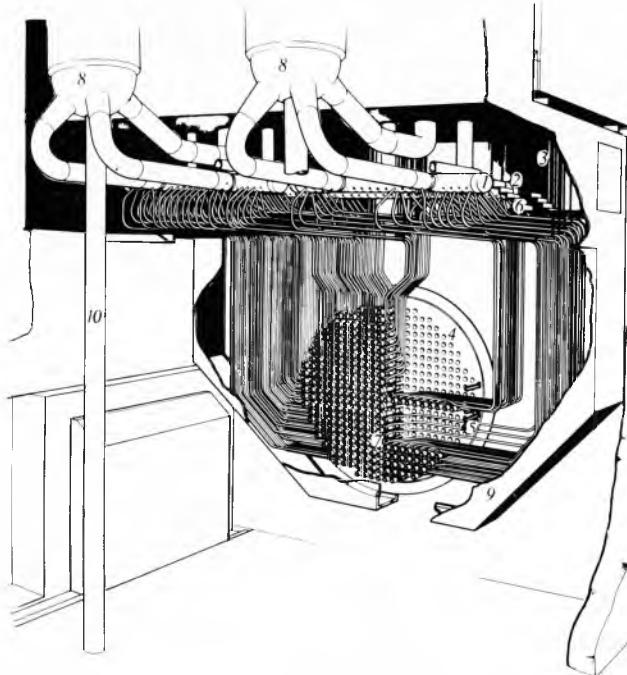
Sl. 38. Smještaj postrojenja s teškovodnim reaktorom.
1 rezervoar vode za polijevanje sigurnosnog štita,
2 ventili sustava za polijevanje sigurnosnog štita,
3 pumpa moderatora, 4 hladnjak moderatora, 5 kontrolni
uredaji sustava napajanja reaktora, 6 čeona
strana reaktora, 7 reaktor, 8 regulacijski mehanizmi,
9 cirkulacijske pumpe primarnog kruga, 10 most
stroja za izmjenu goriva, 11 kolica stroja za izmjenu
goriva, 12 kabeli stroja za izmjenu goriva, 13 prostor
za održavanje stroja za izmjenu goriva, 14 zaštitna
vrata prostorija za održavanje, 15 rezervoar vode za
hladenje biološkog štita, 16 uređaj za kondiciranje
zraka u reaktorskoj zgradbi, 17 tlačni spremnik,
18 parogenerator, 19 kran

Reaktori s prirodnim uranom imaju mali ugrađeni višak reaktivnosti, pa zbog toga treba izmjenu goriva provoditi kontinuirano u toku pogona reaktora. Gorivo se izmjenjuje dvama strojevima koji rade sinhronizirano priključeni na oba kraja istog rashladnog kanala (sl. 37). Prije izmjene goriva tlak teške vode unutar strojeva izjednačuje se s tlakom u tlačnoj cijevi. Izjednačenje tlaka je uvjet za otvaranje tlačne cijevi. Strojevi se priključuju na krajeve tlačnih cijevi, otvaraju ih, izvlače zatvarače i čepove za zaštitu od zračenja. Jedan stroj gura svježe gorive elemente u tlačnu cijev, a drugi, na suprotnom kraju tlačne cijevi, prihvata odzraćene gorive elemente i smješta ih u svoje interno skladište. Po završetku rada strojevi vraćaju čepove i zatvarače tlačnih cijevi u njihove početne položaje te smanjenjem unutrašnjeg tlaka osiguravaju brtvenje zatvorene tlačne cijevi. Kontinuirani pogon reaktora traži u prosjeku dnevno izmjenu ~15 gorivih elemenata.

Postrojenje je primarnog kruga nuklearne elektrane smješteno u sigurnosni štit (sl. 38). On je obično cilindrična armiranobetonска gradevina dimenzionirana za unutrašnji tlak od ~0,23 MPa. Ispod kupole nalazi se rezervoar s običnom vodom, koja služi za polijevanje sigurnosnog štit-a i za zaštitno hlađenje jezgre ako se ošteći neka od primarnih komponenata.

Promjer je sigurnosnog štit-a ~40 m, a debljina armiranobetonskog zida ~1 m. Sigurnosne analize za taj tip reaktora obično se provode uz pretpostavku da sigurnosni štit propušta manje od 0,5% njegova volumena na dan.

Izvedba je primarnog kruga nuklearne elektrane s teškovodnim reaktorom, zbog odvojenog napajanja svakog rashladnog kanala u reaktoru, dosta složena (sl. 39). Parogeneratori (sl. 40) slični su parogeneratorima u nuklearnim elektranama s reaktorima koji su hlađeni i moderirani običnom vodom pod tlakom. Nuklearna elektrana s teškovodnim reaktorom snage 600 MW ima 4 vertikalna parogeneratora.



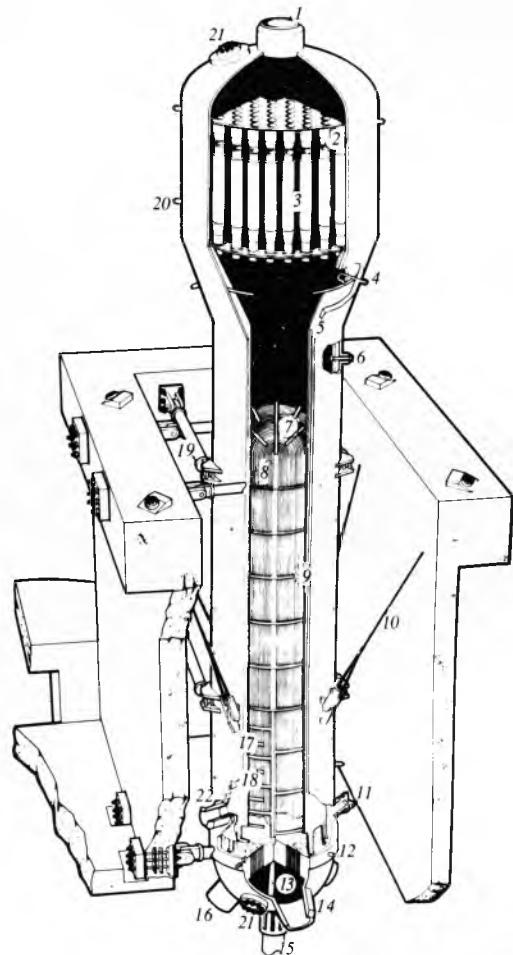
Sl. 39. Dio primarnoga rashladnog kruga teškovodnog reaktora. 1 izlazni kolektor, 2 ulazni kolektor, 3 nosači cijevi, 4 cijevni zid biološke zaštite, 5 potpore cijevi, 6 platforma za održavanje, 7 završeci tlačnih cijevi, 8 parogeneratori, 9 pregrada za izolaciju, 10 potpora parogeneratora

Cirkulacijske pumpe primarnog kruga jednostepene su vertikalne centrifugalne pumpe. Pumpe su gonjenje asinhronim elektromotorima potpuno zatvorenog tipa sa zamašnjakom.

Principijelna tehnička shema reaktorskog postrojenja (sl. 41) obuhvaća, osim osnovnog primarnog rashladnog kruga, i sljedeće pomoćne sustave: a) sustav za odvođenje zaostale topline, b) sustav za reguliranje tlaka u primarnom krugu,

c) sustav za dodavanje, oduzimanje i pročišćivanje teške vode, d) sustav za zaštitno hlađenje jezgre, e) sustav za hlađenje moderatora, f) sustav za cirkulaciju inertnog plina (helij), g) sustav za ubrizgavanje apsorbera u moderator i h) sustav za hlađenje biološkog štit-a. Svi spomenuti sustavi, osim onih za zaštitno hlađenje jezgre i ubrizgavanje apsorbera u moderator, služe za normalni pogon elektrane.

Sustav za odvođenje zaostale topline sličan je prema svojoj funkciji analognim sustavima u postrojenjima s reaktorom hlađenim vodom. Sustav se sastoji od dva rashladna kruga, svaki s pumpom i izmjenjivačem topline. Teška se voda na izlazu iz reaktora hlađi i ponovno vraća u njegov ulazni kolektor. Osnovni je rashladni krug reaktora sposoban da odvede prirodnom konvekcijom dio zaostale topline nakon obustave pogona.



Sl. 40. Parogenerator nuklearne elektrane s teškovodnim reaktorom. 1 izlaz pare, 2 sekundarni separatori vlage, 3 primarni separatori vlage, 4 dodatno napajanje, 5 kućište parogeneratora, 6 dodatno napajanje, 7 potpore cijevnog snopa, 8 cijevni snopovi, 9 horizontalne pregrade, 10 kabeli za učvršćenje, 11 otvor za inspekciju, 12 otvor za odmuljivanje, 13 razdjelnik, 14 priključak za ulaz teške vode, 15 temeljna potpora parogeneratora, 16 priključak za izlaz teške vode, 17 pregrade predgrijivača, 18 predgrijivač, 19 bočna potpora parogeneratora, 20 kontrola razine vode, 21 ulaz za održavanje, 22 ulaz pojne vode

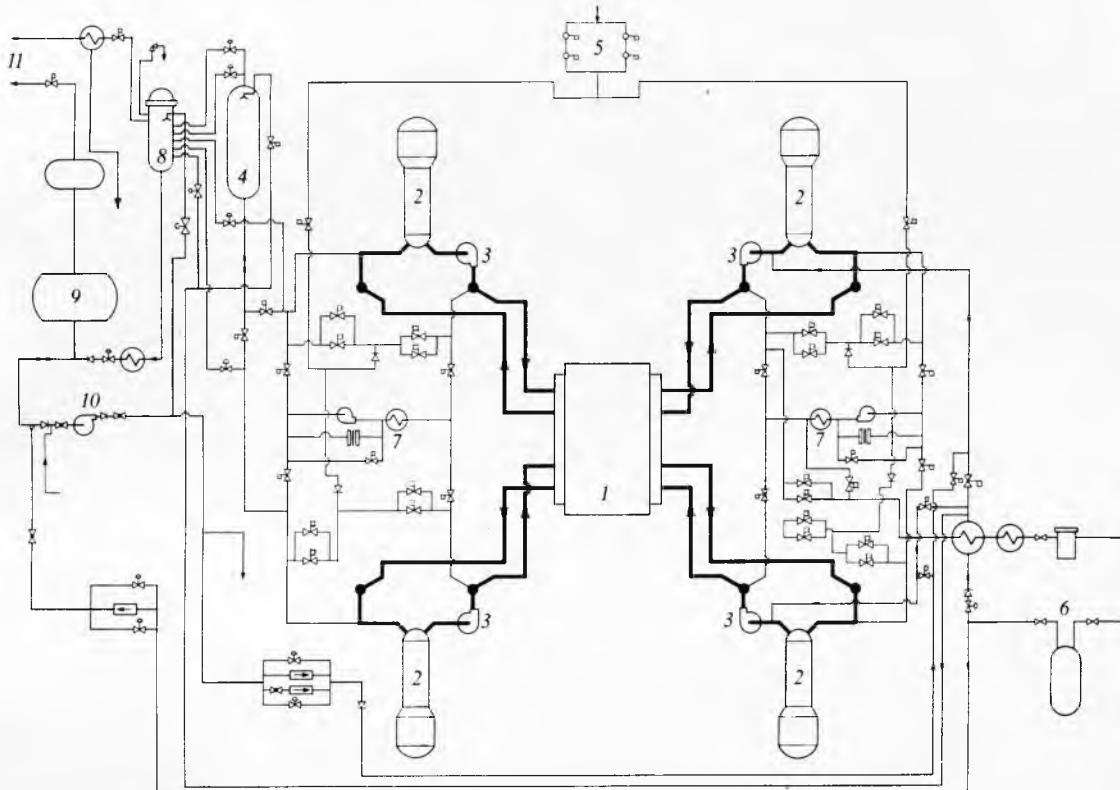
Sustav za reguliranje tlaka djeluje na istom principu kao u postrojenju s reaktorom koji je hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom. Reguliranjem tlaka pare u parnom prostoru tlačnog spremnika regulira se i tlak u primarnom rashladnom krugu reaktora. Tlak pare teške vode raste s povećanjem opterećenja električnih grijala, a smanjuje se ubrizgavanjem teške vode u parni prostor. Tlačni spremnik kompenzira ujedno i promjene volumena teške vode u primarnom krugu zbog promjene temperature.

Dio teške vode iz primarnog kruga i rashladnog kruga moderatora kontinuirano se propušta kroz sustav za pročišćivanje. Sustav se sastoji od hladnjaka i ionskih izmjenjivača. Pročišćena teška voda odvodi se u rezervoar teške vode ili se ponovno vraća u primarni krug reaktora.

Moderator se hlađi cirkulacijom u dva paralelna rashladna kruga, svaki s pumpom učina od $\sim 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ i izmjenjivačem topline. Toplina koja prelazi na moderator iznosi 5–6% od topline proizvedene u reaktoru. Iznad razine moderatora cirkulira inertni plin (helij) kojim se odvode nastali praskavi plin i para teške vode.

Reaktorsko postrojenje s teškovodnim reaktorom za nuklearnu elektranu snage 600 MW sadrži $\sim 470 \text{ t}$ teške vode, od čega u sustavu moderatora $\sim 260 \text{ t}$, u rashladnom krugu reaktora $\sim 200 \text{ t}$, a ostatak u sustavu za izmjenu goriva.

Teškovodni reaktor s posodom pod tlakom. Prototip nuklearne elektrane s reaktorom koji je hlađen i moderiran teškom vodom s posodom pod tlakom izgrađen je u SR Njemačkoj, u nuklearnom centru u Karlsruheu. To je elektrana snage 57 MW, a u pogonu je od 1966. god. U Argentini je 1974. god. stavljena u pogon nuklearna elektrana istog tipa snage 345 MW (NE Atucha I). U Argentini se gradi (od 1979. god.) nukle-



Sl. 41. Principijelna shema reaktorskog postrojenja u nuklearnoj elektrani s teškovodnim reaktorom. 1 reaktor, 2 parogeneratori, 3 pumpe primarnog kruga, 4 tlačni spremnik, 5 sustav za zaštitno hlađenje jezgre, 6 sustav za čišćenje teške vode, 7 sustav za odvođenje zaostale topline, 8 kondenzator—otpiljivač, 9 rezervoar teške vode, 10 pojne pumpe za tešku vodu, 11 odvođenje otpadnih plinova

Voda sustava za zaštitno hlađenje jezgre (obična voda) nalazi se u velikom rezervoaru u kupoli sigurnosnog štita (volumen $\sim 2500 \text{ m}^3$). Voda se iz rezervoara odvodi preko ventila, koji se automatski otvaraju nakon što je primljen signal od mjernih i zaštitnih uređaja, do kolektora u primarnom rashladnom krugu reaktora. Visinska razlika između kupole sigurnosnog štita i reaktora osigurava dovoljan tlak vode ($\sim 0,24 \text{ MPa}$). Sustav počinje djelovati kada, zbog loma jedne od komponenta, tlak u primarnom krugu padne na $\sim 0,06 \text{ MPa}$. U tim prilikama osiguran je dotok vode u jezgru od $\sim 4,5 \text{ t/s}$. Kad razina vode u rezervoaru dostigne najnižu dopuštenu granicu, stavljuju se automatski u pogon pumpe za recirkulaciju koje crpe vodu sa dna sigurnosnog štita. Sustavi za zaštitno hlađenje jezgre projektiraju se uz zahtjev da se zaštite gorivi elementi od pregrijavanja kad izostane normalno hlađenje reaktora. Voda iz rezervoara u kupoli sigurnosnog štita služi i za prskanje toga štita radi kondenzacije pare, čime se smanjuje unutrašnji tlak.

Sekundarni krug nuklearne elektrane s teškovodnim reaktorom u osnovi je jednak onome u nuklearnoj elektrani s reaktorom koji je hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom. U parogeneratorima se proizvodi zasićena para sa $\sim 0,25\%$ vlage. Tlak je pare u takvim elektranama $\sim 4,5 \text{ MPa}$. Turbina ima visokotlačni i niskotlačni dio, između kojih se nalazi separator vlage i zagrijač pare.

arna elektrana s teškovodnim reaktorom u posudi pod tlakom snage 700 MW (NE Atucha II).

Reaktorsko postrojenje u takvoj nuklearnoj elektrani slično je postrojenju s običnom vodom pod tlakom. Postrojenje se sastoji od reaktora, dva parogeneratora, dvije cirkulacijske pumpe, tlačnog spremnika, cjevovoda i pomoćnih sustava. Postrojenje je smješteno u kuglastom sigurnosnom štitu.

Teška voda što služi kao moderator nalazi se u posudi moderatora koja je smještena u tlačnoj posudi reaktora. Moderator cirkulira u vanjskom rashladnom krugu, pa se održava na temperaturi $\sim 440 \text{ K}$. Rashladno sredstvo (također teška voda) ulazi u reaktor s temperaturom od $\sim 550 \text{ K}$. To sredstvo, pod tlakom od $11,5 \text{ MPa}$, struji prema dolje u prstenastom prostoru između posude moderatora i tlačne posude reaktora, a zatim prema gore kroz cijevi koje prolaze kroz posudu moderatora, a u kojima se nalaze gorivi elementi.

Tlak u posudi moderatora održava se na istoj razini kao u rashladnom sustavu reaktora, što se osigurava spojem za izjednačenje tlakova. Temperatura je moderatora u pogonu za $120\text{--}170 \text{ K}$ niža od temperature rashladnog sredstva, što je potrebno da se postigne veća reaktivnost jezgre. Toplina moderatora (10% od topline koja se predaje parogeneratorima), iskorišćuje se za zagrijavanje pojne vode u zadnjem regenerativnom zagrijivaču. Mogućnost miješanja moderatora i rashladnog sredstva, zbog toga što su oba fluida pod jednakim tlakom,

veoma pojednostavljuje izvedbu pomoćnih reaktorskih sustava, jer oni mogu biti zajednički za rashladno sredstvo i moderator.

Teška voda koja služi kao moderator može se, zbog visokog tlaka i niže temperature, neposredno upotrijebiti i za zaštitno hlađenje reaktorske jezgre. Sustav za odvođenje zaostale topline izvodi se s dodatnim hlađenjem moderatora u posebnom rashladnom krugu.

Jezgra teškovodnog reaktora s prirodnim uranom, za istu snagu reaktora, veća je od jezgre reaktora koji je hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom. Zbog toga i volumen reaktorske tlačne posude mora biti veći. Reaktorska posuda nuklearne elektrane s teškovodnim reaktorom snage 700 MW visoka je $\sim 14,2$ m, unutrašnjeg promjera $\sim 7,4$ m i sa stijenkama od ~ 280 mm. Masa donjeg dijela je 670 t, a poklopca ~ 295 t. Zbog velikih dimenzija i velike težine veoma se teško izrađuju i transportiraju.

Reaktor ima 451 gorivi element, a svaki je dug više od 5 m. Gorivo je prirodni uran-oksid. Jezgra reaktora sadrži ~ 85 t urana.

Snaga reaktora može se regulirati regulacijskim šipkama, temperaturom moderatora i promjenom koncentracije bora u teškoj vodi. Za održavanje reaktivnosti jezgre potrebno je u prosjeku mijenjati 1,8 gorivih elemenata na dan. Za izmjenu goriva služi stroj koji se kreće po gornjoj platformi reaktora. Regulacijske šipke koso ulaze u jezgru, što olakšava manipulaciju s gorivom. U parogeneratorima se proizvodi suhozasićena para pod tlakom do $\sim 5,5$ MPa. Sekundarni krug elektrane slično je izведен kao u nuklearnoj elektrani s reaktorom hlađenim i moderiranim običnom vodom pod tlakom.

Nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim plinom

Medu plinom hlađenim reaktorima najrašireniji su reaktori moderirani grafitom. Plinom hlađeni i grafitom moderirani reaktori bili su veoma važni za razvoj nuklearne energetike, pogotovo u Velikoj Britaniji i Francuskoj. Takvi reaktori su bili među prvima koji su upotrijebljeni za proizvodnju većih količina električne energije. Razvili su se iz reaktora koji su bili namijenjeni za proizvodnju plutonija, pa su te prve nuklearne elektrane imale dvostruku namjeru: proizvodnju plutonija i proizvodnju električne energije.

Plinom hlađeni i grafitom moderirani reaktori razvijali su se u tri etape: a) reaktori s gorivom od prirodnoga metalnog urana i oblogom od legure magnezija (tip GCR, Magnox ili grafitni reaktori prve generacije), b) usavršeni plinom hlađeni reaktori (tip AGR ili grafitni reaktori druge generacije) i c) visokotemperaturni plinom hlađeni reaktori (tip HTGR).

Nuklearne elektrane s plinom hlađenim i grafitom moderiranim reaktorom i gorivom od prirodnog urana (GCR). Najviše nuklearnih elektrana s reaktorom toga tipa izgradeno je u Velikoj Britaniji, gdje je prva nuklearna elektrana takva tipa (Calder Hall) u pogonu još od 1956. godine.

Jezgra reaktora sastoji se od grafitnih blokova u koje se ulažu gorivi elementi. Blokovi grafitnog moderatora precizno su mehanički obrađeni i međusobno ukljinjeni tako da mogu slijediti promjene dimenzija zbog promjene temperature. Grafitna jezgra ima ekvivalentni promjer $12\cdots17$ m i visinu $8\cdots9$ m. U grafitnom moderatoru izrađeni su vertikalni rashladni kanali promjera od ~ 100 mm. U provrti kojih ima $3000\cdots6000$, već prema snazi reaktora, ulažu se gorivi elementi, a kroz razmak između elemenata i stijenke provrta struji plin za hlađenje jezgre. Masa graftita u jezgri reaktora iznosi $2000\cdots3000$ t, a urana $200\cdots300$ t.

Gorivi elementi su šipke od prirodnog metalnog urana promjera ~ 30 mm. Šipke su uložene u oblogu od legure magnezija (komercijalni je naziv legure Magnox, pa se reaktori često spominju kao Magnox reaktori). Obloga ima rebra radi poboljšanja prijelaza topline i odstojnike koji podržavaju gorive elemente u središtu rashladnog kanala. U svakom rashladnom kanalu ima $8\cdots10$ koaksijalno smještenih gorivih elemenata. Snaga reaktora regulira se apsorpcijskim šipkama od čelika s visokim postotkom bora. U reaktoru ima ~ 100 takvih šipki.

Jezgra reaktora smještena je u cilindričnoj ili kuglastoj posudi od čelika ili armiranog betona.

Posljednja i najveća britanska nuklearna elektrana toga tipa (NE Wylfa) ima dva reaktora termičke snage po 1875 MW. Svaki reaktor smješten je u armiranobetonsku kuglastu posudu promjera od ~ 29 m. Prva serija reaktora imala je čelične posude, najprije cilindrične, a kasnije kuglaste, promjera $15\cdots20$ m sa stijenkama do 100 mm.

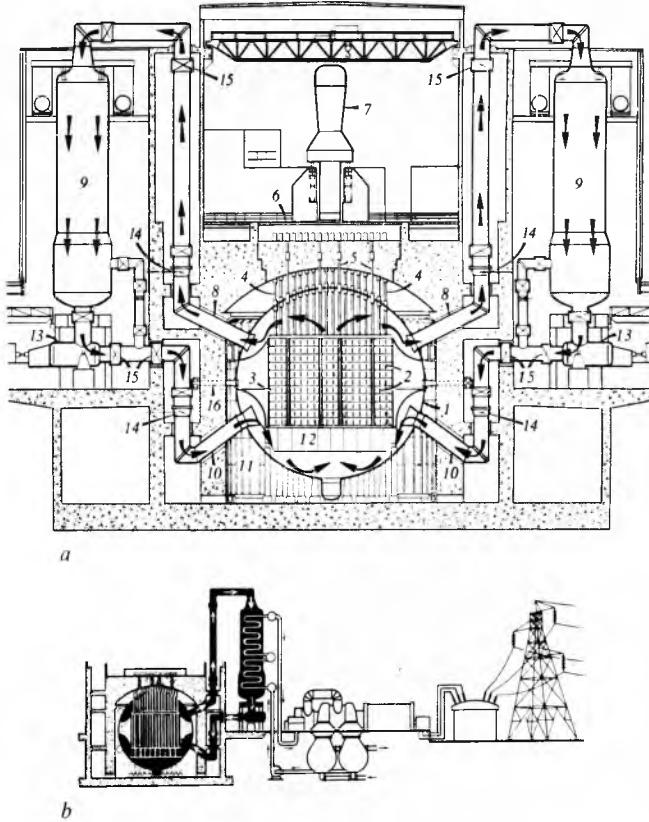
Tlok plina (CO_2) sukcesivno se povećava s razvojem plinom hlađenih reaktora. U nuklearnoj elektrani Berkeley (1962) tlak plina iznosi 1 MPa, a u nuklearnoj elektrani Wylfa (1971) 2,8 MPa.

Plin cirkulira kroz parogeneratorate u kojima predaje toplinu vodi, odnosno pari (sl. 42). Temperatura je plina na ulazu u reaktor $430\cdots520$ K, a na izlazu iz reaktora $620\cdots780$ K. Izlaznu temperaturu plina ograničuje dozvoljena temperatura obloge gorivih elemenata. Cirkulaciju plina u primarnom krugu osiguravaju plinska puhalja: 4 \cdots 8 puhalja po reaktoru s pogonskim motorima snage $2,5\cdots14,5$ MW.

Budući da se upotrebljava prirodni uran kao nuklearno gorivo, potrebitno je kontinuirano mijenjati gorivo u toku pogona reaktora zbog malog viška reaktivnosti u jezgri. Za izmjenu goriva služe masivni strojevi (masa stroja zajedno s nosivim mostom iznosa 300 t) koji se kreću po gornjoj platformi reaktora.

Termička snaga izvedenih plinom hlađenih reaktora iznosi $150\cdots1800$ MW. Temperatura je pare proizvedene u parogeneratoru $620\cdots670$ K, a njezin tlak do 10 MPa. Radi poboljšanja termičkog iskorištenja u kružnom procesu u parogeneratorima se proizvodi i para nižeg tlaka ($0,5\cdots5$ MPa), koja ima približno istu temperaturu kao i para višeg tlaka.

Kružni je proces voda–para u nuklearnim elektranama s plinom hlađenim reaktorima u osnovi identičan kružnom pro-



Sl. 42. Presjek kroz postrojenje plinom hlađenog i grafitom moderiranog reaktora s prirodnim uranom (a), i shematski prikaz nuklearne elektrane s takvim tipom reaktora (b). 1 posuda reaktora, 2 gorivi elementi, 3 grafitni moderator, 4 cijevi za izmjenu goriva, 5 vodilice regulacijskih šipki, 6 gornja platforma reaktora, 7 stroj za izmjenu goriva, 8 izlaz plina iz reaktora, 9 parogenerator, 10 ulaz plina u reaktor, 11 termalni štit, 12 potorna konstrukcija jezgre, 13 plinska puhalja, 14 glavni ventili, 15 kompenzatori ter malne ekspanzije, 16 detekcija oštećenih gorivih elemenata. Strelice označuju smjer protoka plina

cesu u konvencionalnim termoelektranama. Nuklearne elektrane s plinom hlađenim reaktorima i prirodnim uranom gradile su se u razdoblju od 1950. do 1970. god. U Velikoj Britaniji izgrađeno je 26 nuklearnih elektrana s reaktorima toga tipa ukupne električne snage od ~ 5200 MW. U Francuskoj je izgrađeno 7 takvih elektrana ukupne snage ~ 2100 MW. Po jedna elektrana takva tipa izgrađene su u Italiji i Japanu.

Sve te nuklearne elektrane rade vrlo pouzdano, ali zbog visokih troškova gradnje nisu danas ekonomski konkurentne drugim tipovima nuklearnih elektrana. Visoki troškovi gradnje uzrokovani su velikom količinom materijala u jezgri i velikim površinama potrebnim za prijelaz topline od plina na vodu, odnosno paru. Iz navedenog razloga takve se nuklearne elektrane danas više ne grade. Posljednja elektrana takva tipa stavljenja je u pogon 1972. godine.

Nuklearne elektrane s usavršenim plinom hlađenim reaktorom (AGR). Usavršeni plinom hlađeni reaktor razvijen je u Velikoj Britaniji s ciljem da se izgradi reaktor koji će biti ekonomičniji od plinom hlađenog reaktora s prirodnim uranom. U usavršenom plinom hlađenom reaktoru (tabl. 3), zamijenjeno je gorivo, pa se umjesto prirodnoga metalnog urana upotrebljava uran-oksid od obogaćenog urana (obogaćenje iznosi 1,5...2,5%).

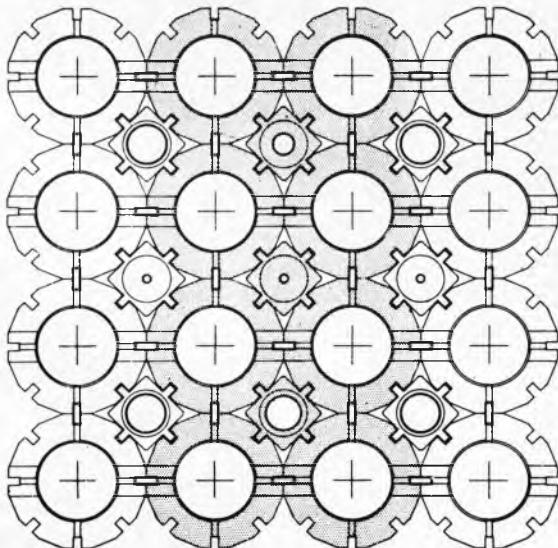
Tablica 3

POBOLJŠANJE PARAMETARA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI S USAVRŠENIM REAKTOROM HLAĐENIM PLINOM

	Plinom hlađeni reaktori s prirodnim uranom	Usavršeni plinom hlađeni reaktori s obogaćenim uranom
Tlak rashladnog sredstva u reaktoru	1,0...2,8 MPa	3,4...4,3 MPa
Maksimalna temperatura rashladnog sredstva	680 K	920 K
Tlak proizvedene pare	10 MPa	17 MPa
Temperatura proizvedene pare	660 K	820 K
Iskoristivost kružnog procesa	~33%	~42%

Tom zamjenom goriva postiže se: a) smanjenje dimenzija reaktorske jezgre zbog manje kritične mase goriva (v. *Nuklearni reaktori*), b) povećanje tlaka plina (CO_2) zbog manjeg promjera reaktorske posude i c) upotreba nerđajućeg čelika za oblogu gorivih elemenata umjesto magnesijskih slitina.

Upotreba nerđajućeg čelika za izradbu obloga gorivih elemenata omogućuje znatno povišenje temperature površine go-

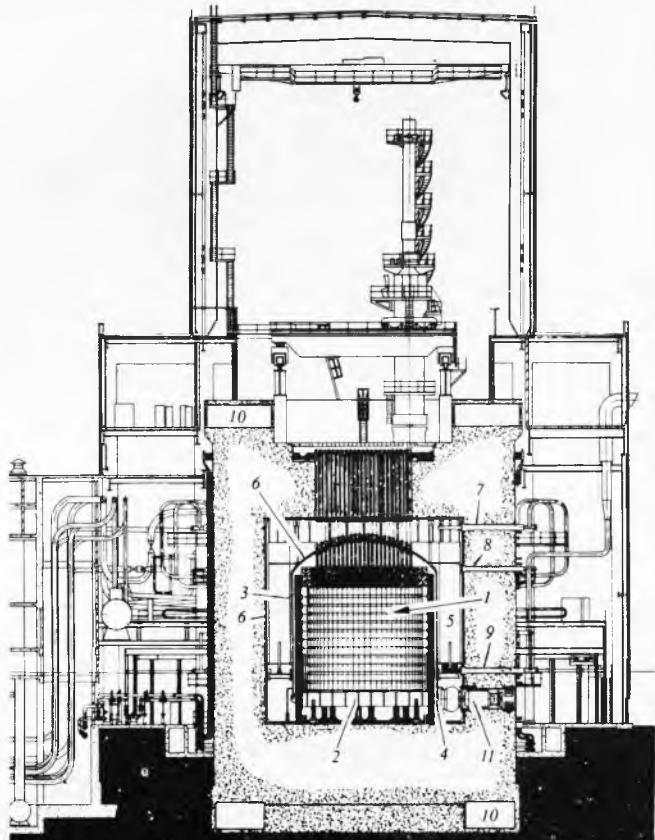


Sl. 43. Horizontalni presjek blokova grafitnog moderatora s prvima za gorive elemente i regulacijske šipke u jezgri usavršenog plinom hlađenog reaktora (AGR)

rivih elemenata. Prirodni uran, naime, ne dozvoljava upotrebu nerđajućeg čelika u jezgri, jer taj materijal ima visoki apsorcijski presjek za spore neutrone.

Jezgra reaktora (sl. 43) sastoji se od mehanički obrađenih grafitnih blokova koji su međusobno ukljinjeni tako da je osigurano njihovo relativno toplinsko rastezanje. U prvoravnim grafitnim blokovima ulazi se gorivi elementi i regulacijske šipke.

Gorivi elementi sastoje se od snopova po 36 gorivih šipki, duljine ~ 1 m. Gorive šipke su od cijevi od nerđajućeg čelika promjera ~ 15 mm, a ispunjene su tabletama uran-oksida. Promjer je gorivog elementa ~ 240 mm. U svakom rashladnom kanalu nalazi se po 8 koaksijalno smještenih gorivih elemenata. Izmjena goriva i u usavršenom plinom hlađenom reaktoru provodi se u toku pogona. Obogaćeni uran dozvoljava duže razdoblje rada reaktora bez izmjene goriva. Stroj za izmjenu goriva kreće se po gornjoj platformi reaktora (sl. 44).



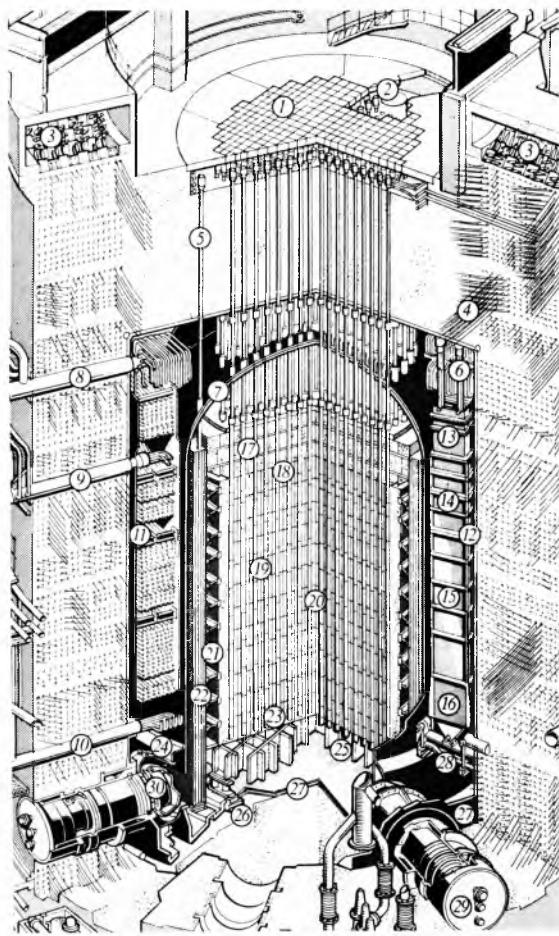
Sl. 44. Postrojenje usavršenog plinom hlađenog reaktora. 1 jezgra reaktora, 2 potpori jezgre, 3 usmjerivač protoka plina, 4 izlazni kanal plinskog puhalja, 5 parogenerator, 6 termička izolacija, 7 ulaz pare na medupregrijavanje, 8 izlaz svježe pare, 9 ulaz pojne vode, 10 prostor za zatezanje kabela za prednje prezentacije betona, 11 plinska puhalja

Usavršeni plinom hlađeni reaktori izvode se u tzv. integralnoj izvedbi. Reaktorska jezgra i parogeneratori, naime, smještaju se u zajedničku posudu od prenapregnutog betona. Reaktorsko postrojenje nuklearne elektrane Hinkley Point B (snage 2×625 MW) primjer je takve izvedbe (sl. 45). Cijevni registri parogeneratora montiraju se oko reaktorske jezgre, u prstenastom prostoru između jezgre i betonske posude. Unutrašnja cirkulacija plina (CO_2) osigurava se plinskim puhalima, kojima su pogonski motori pristupačni s vanjske strane posude. U osnovi je betonska posuda reaktorskog postrojenja parni kotao, u koji ulazi napojna voda i iz kojeg izlazi pregrijana para. Betonska posuda ima promjer 20 m, visinu 18 m, debljinu bočnog zida 3,8 m, debljinu donjeg i gornjeg zida 6 m. Prednost je integralne izvedbe u tome što betonska posuda zamjenjuje reaktorsku posudu, primarne cjevovode, plašteve parogeneratora i biološki štit reaktora.

Sekundarni krug nuklearnih elektrana s usavršenim plinom hlađenim reaktorom sličan je toplinskom kružnom procesu

NUKLEARNA ENERGETSKA POSTROJENJA

u konvencionalnim termoelektranama. Nakon ekspanzije u visokotlačnom dijelu turbine para se vraća u parogenerator na međupregrijavanje radi povećanja termičkog stupnja djelovanja i smanjenja vlage na kraju ekspanzije (v. *Elektrane*, TE 3, str. 564).



Sl. 45. Presjek usavršenog plinom hlađenog reaktora. 1 radna platforma reaktora, 2 otvor za inspekciju, 3 prostor za zatezanje kabela za prednaprezanje betona, 4 kabeli za prednaprezanje, 5 cijev za detektor neutronskog toka, 6 nosač međupregrijivača, 7 izlaz plina, 8 ulaz pare za međupregrijavanje, 9 izlaz pregrijane pare, 10 ulaz pojne vode, 11, 12 parogenerator, 13 međupregrijivač, 14 pregrijač, 15 isparivač, 16 zagrijavač pojne vode, 17 neutronski štit, 18 gornji reflektor, 19 grafitna jezgra, 20 rashladni kanali, 21 učvršćenje jezgre, 22 zaštitni zid parogeneratora, 23 donji reflektor, 24 izlazni kanal plinskog puhalja, 25 nosiva konstrukcija jezgre, 26 potpora reaktora, 27 termička izolacija, 28 potpora parogeneratora, 29 plinski puhalo, 30 kućište plinskog puhalja

Nuklearne elektrane s usavršenim plinom hlađenim reaktorom do sada su građene i dalje se grade jedino u Velikoj Britaniji.

Nuklearne elektrane s visokotemperaturnim plinom hlađenim reaktorom (HTGR) još su u razvoju i najviši su domet u tehnologiji plinom hlađenih i grafitom moderiranih reaktora. Osnovne karakteristike visokotemperaturnih plinom hlađenih reaktora: a) povišenje temperature u jezgri iznad vrijednosti koje su postignute u usavršenim plinom hlađenim reaktorima, b) upotreba helija kao reaktorskoga rashladnog sredstva, c) upotreba grafsita za obloge gorivih elemenata i d) mogućnost primjene gorivog ciklusa s torijem.

Zbog visoke temperature u jezgri reaktora ugljik-dioksid nije primjenljiv kao rashladno sredstvo reaktora, jer taj plin na temperaturi višoj od 1000 K postaje kemijski nestabilan. Kao rashladno sredstvo u visokotemperaturnim plinom hlađenim reaktorima upotrebljava se helij koji ima dobra termička svojstva, te povoljnu kemijsku i nuklearnu stabilnost.

Gorivi elementi visokotemperaturnih plinom hlađenih reaktora izrađuju se od grafitnih blokova, obično heksagonalnog

oblika, s provrtima koji su ispunjeni uran-karbidom ili torij-karbidom i provrtima kroz koje struji rashladno sredstvo reaktora.

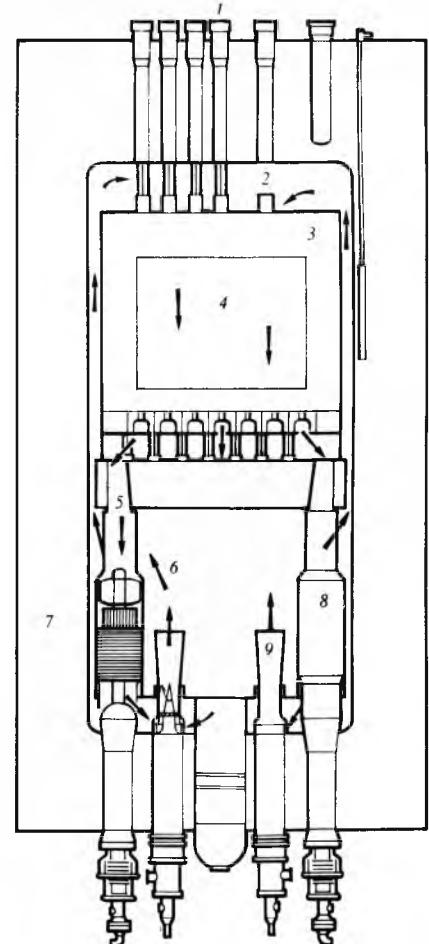
Visokotemperaturni reaktor ima povoljan faktor konverzije (v. *Nuklearni reaktori*), jer nema metalnih dijelova u jezgri koji povećavaju parazitnu apsorpciju neutrona. Ekonomija gorivog ciklusa može se poboljšati upotrebom torija i recikliranjem nastalog ^{233}U .

Do danas je u pogonu ili u gradnji nekoliko nuklearnih elektrana s visokotemperaturnim plinom hlađenim reaktorima, koje imaju ulogu prototipnih postrojenja (tabl. 4).

Tablica 4
KARAKTERISTIKE NEKIH NUKLEARNIH ELEKTRANA S VISOKOTEMPERATURNIM REAKTORIMA KOJI SE HLADE PLINOM

		Peach Bottom	Fort St. Vrain	Projektne studije velikih elektrana
Snaga elektrane	MW	40	330	770
Termička snaga reaktora	MW	115	832	2000
Iskoristivost	%	34,6	39,2	39,0
Maks. temperatura rashladnog sredstva	K	1021	1060	1040
Materijal posude reaktora		čelik	beton	beton
Snaga plinskog puhalja	MW	$2 \times 1,47$	4×4	4×10
Parametri pare	MPa/K	10/810	16,8/810	16,8/810
				16,8/810

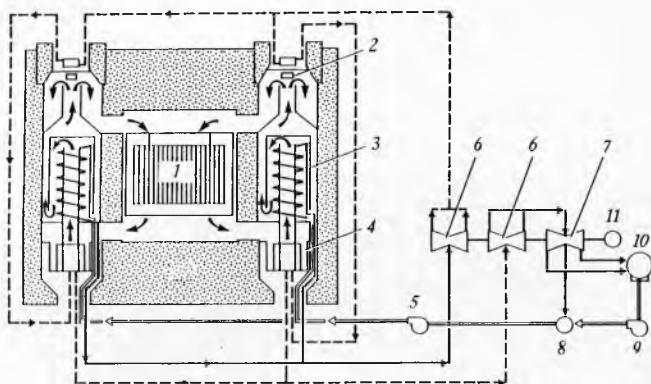
U SR Njemačkoj je izgrađena eksperimentalna nuklearna elektrana s visokotemperaturnim reaktorom snage 15 MW. Gorivo tog reaktora jesu grafitne kuglice promjera ~60 mm s dodatkom uran-karbida. Reaktor sadrži ~100000 kuglica. Kuglice s istrošenim gorivom izlaze na donjoj strani reaktora, dok se



Sl. 46. Shematski prikaz reaktorskog postrojenja nuklearne elektrane Fort St. Vrain. 1 cijevi za izmjenu goriva, 2 regulacijske šipke, 3 reflektor, 4 jezgra reaktora, 5 vruci helij, 6 ohlađeni helij, 7 posuda reaktora od prednapregnutog betona, 8 parogenerator, 9 plinski puhalo

u gornju stranu sipaju kuglice sa svježim gorivom. Između kuglica struji helij prosječne temperature $\sim 1200\text{ K}$ pod tlakom od $\sim 1,1\text{ MPa}$.

Reaktorska postrojenja u nuklearnim elektranama s visokotemperaturnim reaktorima grade se u integralnoj izvedbi. Reaktori s parogeneratorima i plinskim puhalima (4...6 po reaktoru) montiraju se unutar armiranobetonske posude. U nuklearnoj elektrani Fort St. Vrain reaktor je smješten iznad parogeneratora (sl. 46). U većim nuklearnim elektranama takva tipa predviđeno je da se parogeneratori smjesti oko reaktora (sl. 47).



Sl. 47. Principijelna shema nuklearne elektrane snage 1160 MW s visokotemperaturnim plinom hlađenim reaktorom. 1 jezgra reaktora, 2 plinsko puhalo, 3 parogenerator, 4 medupregrijivač, 5 pojna pumpa, 6 visokotlačni dio turbine, 7 niskotlačni dio turbine, 8 regenerativni zagrijivači, 9 pumpa kondenzata, 10 kondenzator, 11 generator

za njihov dalji razvoj. Visokotemperaturni reaktor, nadalje, pruža mogućnost ostvarivanja neposrednoga kružnog procesa s plinom bez posredovanja pare, što omogućuje zamjenu parne turbine plinskom.

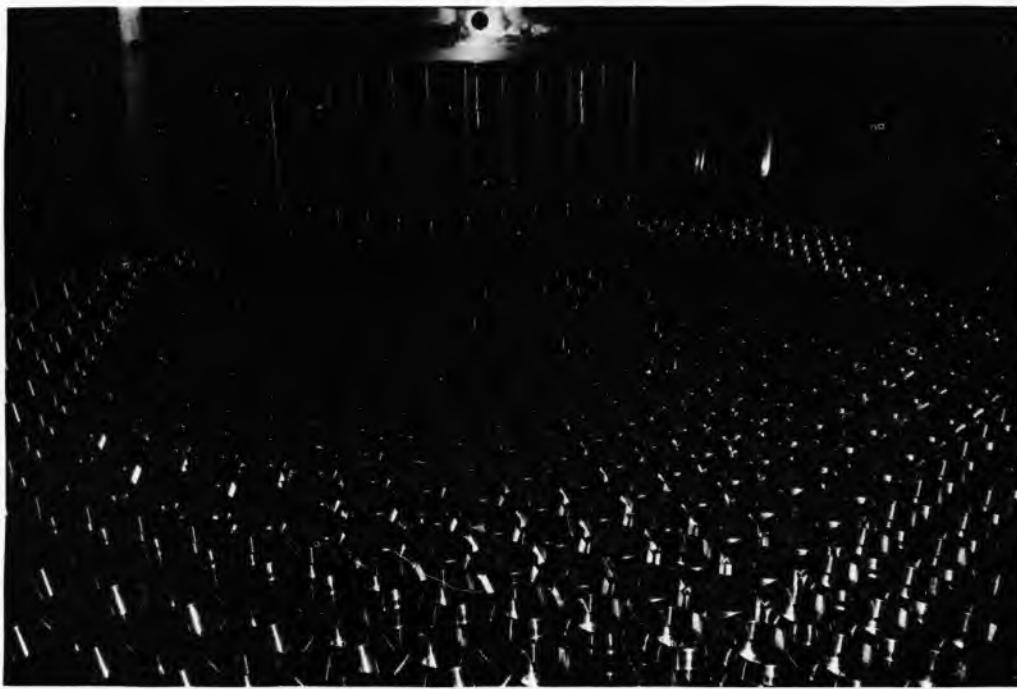
Nuklearne elektrane s brzim oplodnjim reaktorima

Nuklearne elektrane s brzim oplodnjim reaktorima (v. *Nuklearni reaktori*) u razvoju su u više industrijskih zemalja (Francuska, SR Njemačka, SSSR, Velika Britanija, SAD, Japan). Razvoj takvih reaktora bitan je za racionalno iskorišćivanje rezerva nuklearnih goriva, čime se veoma povećavaju energetske rezerve svijeta.

Jezgra brzog reaktora sastoji se od fizijskog materijala, oplodnog materijala i rashladnog sredstva, ali u jezgri nema moderatora. Jezgra je vrlo kompaktna s velikom specifičnom proizvodnjom topline, te se mora intenzivno hladiti. Specifična proizvodnja topline u jezgri brzog reaktora iznosi do 550 kW/dm^3 (u lakovodnom reaktoru $\sim 100\text{ kW/dm}^3$, a u Magnox reaktoru samo $\sim 1\text{ kW/dm}^3$). Tekući metal (natrij ili slitina natrij-kalij) pogodno je sredstvo za hlađenje jezgre.

U jezgri reaktora (sl. 48) aktivni je fizijski materijal, smješta plotonij-oksida i uran-oksida (obogaćenje urana $\sim 15\%$), i oplodni materijal (uran-oksid od osiromašenog urana), koji okružuje fizijski materijal. Gorivi element brzog reaktora (sl. 49) složene je konstrukcije jer sadrži šipke fizijskog i oplodnog materijala te kanale za prolaz natrija.

Višestruka je prednost upotrebe natrija kao rashladnog sredstva brzog reaktora. Natrij ima visoku temperaturu ključanja (1166 K), što dopušta postizanje visokih temperatura u jezgri a da nije potrebno povlačenje tlaka. Niski tlak rastavljenog natrija pojednostavljuje izvedbu komponenata reaktor-

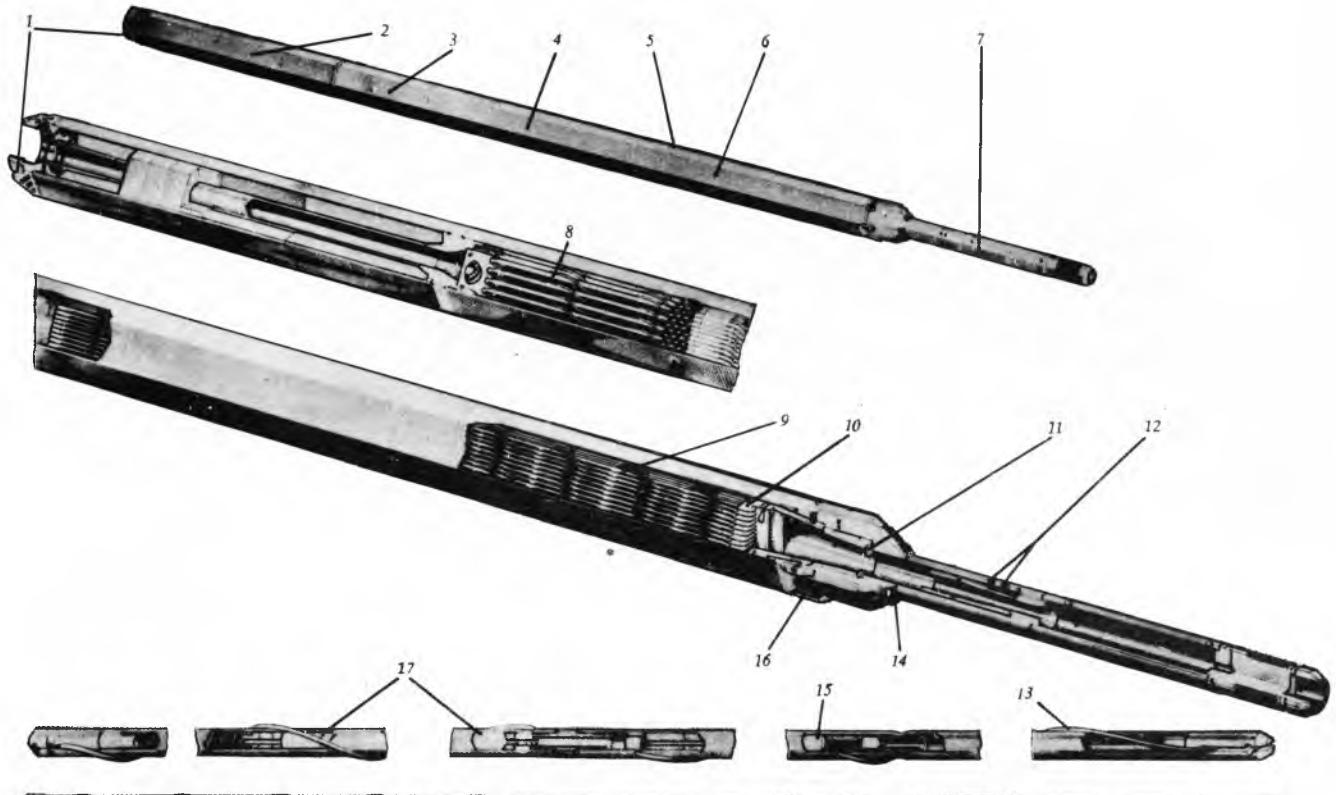


Sl. 48. Jezgra brzog oplodnjog reaktora u nuklearnoj elektrani Phenix (Francuska) snage 250 MW

U parogeneratorima se hlađenjem helija proizvodi para s parametrima koji su slični kao u suvremenim konvencionalnim termoelektranama. Sekundarni krug elektrane izведен je kao u termoelektranama s medupregrijavanjem pare.

Visoke temperature plina u reaktoru omogućuju iskorišćivanje toplinske energije ne samo za proizvodnju električne energije već i u industrijskim procesima za proizvodnju, odnosno oplemenjivanje konvencionalnih goriva (proizvodnja vodika termičkom disocijacijom vode, rasplinjivanje ugljena). Potencijalna primjena visokotemperaturnih reaktora i povoljne karakteristike njihova gorivog ciklusa daju dobru perspektivu

skog postrojenja i smanjuje gubitak natrija iz sustava pri lomu neke od komponenata. Natrij ima odlična svojstva za odvođenje topline i zahtijeva relativno malu snagu za pumpanje. Natrij intenzivno veže neke kemijske elemente. To je svojstvo natrija povoljno jer, npr. pri lomu obloge gorivog elementa, fizijski proizvodi (^{131}I , ^{137}Cs i dr.) ostaju vezani u natriju. Natrij ima dovoljno veliku atomsku masu, pa bitnije ne utječe na usporavanje neutrona (v. *Nuklearni reaktori*). Nepovoljno je svojstvo natrija dosta visoka temperatura taljenja (372 K), što zahtijeva zagrijavanje sustava prije stavljanja u pogon nuklearne elektrane. Nepovoljno je svojstvo natrija

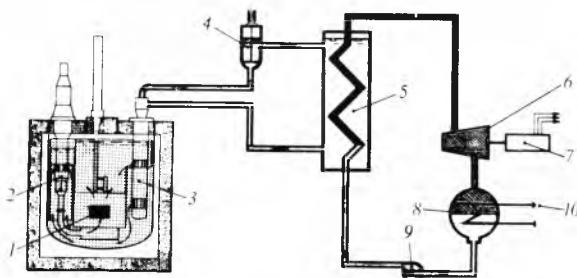


Sl. 49. Gorivi element brzog oplodnog reaktora u nuklearnoj elektrani Phenix. 1 vodilica mehanizma za izmjenu goriva, 2 gornji neutronski štit, 3 oplodni materijal, 4 fizijski materijal, 5 heksagonalna obloga, 6 oplodni materijal, 7 podnože gorivog elementa, 8 38 šipki s oplodnim materijalom, 9 217 šipki s fizijskim materijalom, 10 potpore gorivih šipki, 11 prigušnica, 12 ulaz natrija, 13 spiralni odstojnik, 14 sferni ležaj, 15 tabletta osirošašenog UO_2 , 16 utori za pozicioniranje, 17 tablette smješene UO_2 i PuO_2 .

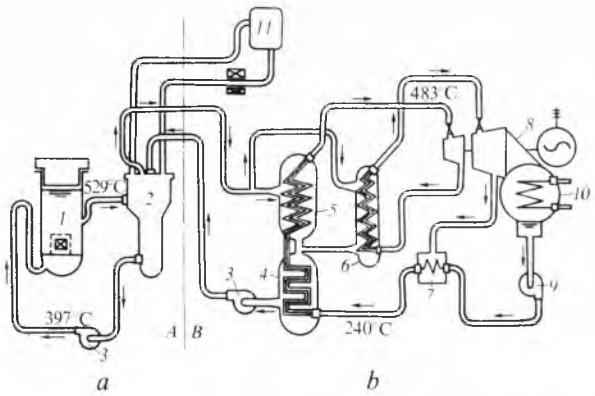
i njegova aktivacija prolazom kroz reaktorsku jezgru. Nastaje, naime, izotop ^{24}Na koji se raspada uz emisiju beta-zračenja i gama-zračenja. Dobra je okolnost što je vrijeme poluraspađa aktiviranog natrija kratko (15 h), pa se najveći dio radioaktivnosti gubi kroz nekoliko dana. Radioaktivnost natrija ograničuje pristup do reaktorskih komponenata u toku pogona reaktora. Natrij burno kemijski reagira u dodiru s vodom. Termička veza između rashladnog sredstva reaktora (aktivirani natrij) i kružnog procesa voda—para ostvaruje se posredovanjem zatvorenog sekundarnog kružnog toka neaktiviranog natrija. U reaktoru se, radi sprečavanja oksidacije natrija, iznad razine rastaljenog natrija nalazi inertni plin (argon ili helij).

Nuklearne elektrane s brzim oplodnim reaktorima grade se u dvije izvedbe: a) integralna izvedba (sl. 50), u kojoj je cijeli primarni krug s radioaktivnim natrijem, s pumpom i primarnim izmjenjivačem topline, smješten u reaktorskoj posudi, i b) odvojena izvedba (sl. 51), u kojoj je samo reaktorska jezgra smještena u reaktorsku posudu, a ostale komponente izvan nje.

Pregled kroz reaktorsko postrojenje nuklearne elektrane Phenix (sl. 52) (Francuska), u integralnoj izvedbi, pokazuje



Sl. 50. Principijelna shema nuklearne elektrane s brzim oplodnim reaktorom u integralnoj izvedbi. 1 jezgra reaktora, 2 primarna pumpa natrija, 3 primarni izmjenjivač topline natrij–natrij, 4 sekundarna pumpa natrija, 5 parogenerator, 6 turbina, 7 generator, 8 kondenzator, 9 pojava pumpa, 10 rashladni krug kondenzatora.



Sl. 51. Principijelna shema nuklearne elektrane s brzim oplodnim reaktorom u odvojenoj izvedbi. 1 reaktor, 2 primari izmjenjivač topline natrij–natrij, 3 primarna i sekundarna pumpa za natrij, 4 parogenerator, 5 pregrijač, 6 medupregrijač, 7 regenerativni predgrijač, 8 turboagregat, 9 pumpa kondenzata, 10 kondenzator, 11 hladnjak, A primarno postrojenje, B sekundarno postrojenje.

smještaj komponenata postrojenja unutar reaktorske posude. Integralna i odvojena izvedba reaktorskog postrojenja imaju i prednosti i nedostatke, pa se nuklearne elektrane s brzim oplodnim reaktorima grade u obje izvedbe (tabl. 5).

Sigurnost rada nuklearne elektrane s brzim reaktorom bitno ovisi o temperaturnom koeficijentu reaktivnosti nuklearnog goriva. Kad se upotrebljavaju oksidi urana i plutonija, temperaturni koeficijent reaktivnosti uvek je negativan. Jezgra brzog reaktora ostaje kritična i bez rashladnog sredstava, te treba poduzeti sve moguće da reaktor ne ostane bez hlađenja. Topljenjem jezgre, zbog pregrijavanja goriva, pojavljuje se tzv. sekundarna kritičnost. Vjerljatnost gubitka rashladnog sredstva smanjuje se rigoroznim postupcima za kontrolu kvalitete opreme i radova, te posebnim konstrukcijskim rješenjima npr. reaktor-

Tablica 5
Karakteristike nuklearnih elektrana s brzim oplodnim reaktorom

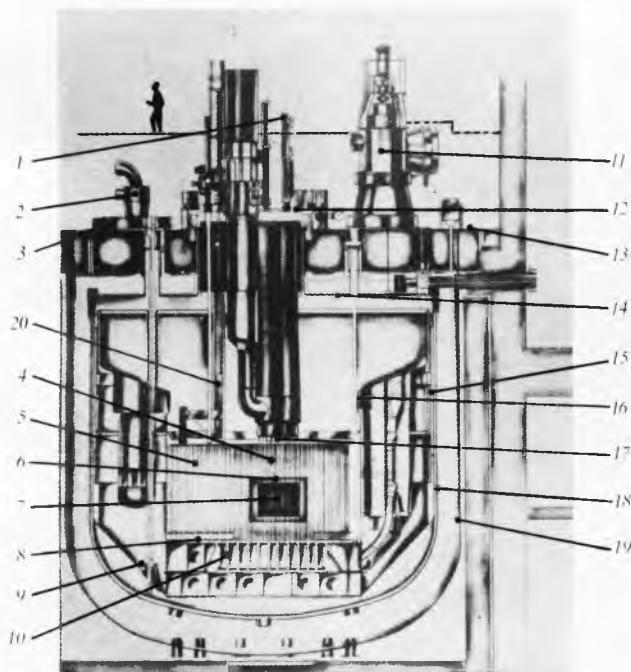
	<i>Phoenix</i> (Franc.)	<i>SNR-300</i> (SR Nj.)	<i>Monju</i> (Japan)	<i>PFR</i> (V. Brit)	<i>GRBR</i> (SAD)	<i>BN-350</i> (SSSR)	<i>BN-600</i> (SSSR)	<i>Super Phenix</i> (Franc.)	<i>SNR-2</i> (SR Nj.)	<i>CDFR-1</i> (V. Brit.)	<i>BN-1600</i> (SSSR)
Električna snaga MW	250	312	300	250	350	360	600	1200	1300	1250	1600
Termička snaga MW	568	762	714	612	975	1000	1470	3000	3420	3230	4200
Iskoristivost (%)	44,0	40,9	42,0	40,9	35,9	35,0	40,8	40,0	38,0	38,7	38,1
Izvedba reaktorskog postrojenja	integr.	odvojena	odvojena	integr.	odvojena	odvojena	integr.	integr.	odvojena	integr.	integr.
Broj primarnih rashladnih krugova	3	3	3	3	3	6	3	4	4	6	4
Broj sekundarnih rashladnih krugova	3	3	3	3	3	6	3	4	4	8	4
Broj primarnih pumpa	3	3	3	3	3	6	3	4	4	6	4
Broj primarnih izmjenjivača topline	6	9	6	3	3	12	9	8	8	*	*
Temperatura natrija u jezgri ulaz/izlaz K	658/825	650/819	670/802	667/823	661/808	573/773	653/823	668/818	663/813	643/813	623/823
Temperatura pare K	783	768	756	786	735	708	778	760	763	759	*
Tlok pare MPa	16,8	16,0	12,5	12,8	10,0	4,9	14,2	21,0	17,2	16,0	14,2
Temperatura pojne vode K	519	525	513	548	505	431	513	508	523	503	*
Reaktorska posuda promjer/visina m	11,8/12	6,7/15	7/18	12,2/15,2	6,2/18,2	6,0/11,9	12,8/12,6	21/17,3	15,0/—	23,5/22,5	18,3/18
Volumen reaktorske jezgre m ³	1,29	2,36	2,34	1,54	2,63	2,08	2,50	10,12	12,91	6,61	8,81
Masa goriva u jezgri t	UO ₂ 3,8	PuO ₂ 0,8	4,2 1,5	5,2 0,9	3,1 *	7,3 —	8,5 —	30,6 6,31	*	16 4	*
Srednja gustoća snage u jezgri kW/dm ³	406	290	300	380	380	430	550	285	*	*	*
Faktor oplodnje	1,16	1,0	1,2	1,2	1,23	1,4 ¹	1,3 ¹	1,18	1,17...1,35	1,25	1,4 ¹
Godina ulaska u pogon	1974.	1983.	1986.	1977.	1973.	—	1980.	1983.	*	*	*

¹ pri upotrebi smjese UO₂ i PuO₂; ¹ kod upotrebe goriva UO₂ + PuO₂; * podatak nije dostupan

ske posude dvostrukih stijenki). Dijelovi opreme u dodiru s natrijem izrađuju se od nerđajućeg čelika.

Karakteristični dijelovi opreme brzih oplodnih reaktora vide se na sl. 53 do 55.

U SAD, SSSR i SR Njemačkoj eksperimentira se i sa drugim vrstama rashladnog sredstva za brze reaktore. Smatra se da je perspektivan plinom hlađeni brzi reaktor s helijem kao rashladnim sredstvom. Takvi reaktori bili bi neposredni nastav-



Sl. 52. Presjek kroz reaktorsko postrojenje nuklearne elektrane Phenix (Francuska). 1 pogon regulacijskih šipki, 2 primarni izmjenjivač topline, 3 detektor propuštanja, 4 gornji neutronski štit, 5 bočni neutronski štit, 6 oplodni materijal, 7 jezgra reaktora, 8 bočna potpora, 9 konačni dio posude, 10 potpornoj konstrukcija jezgre, 11 zakretni čep, 12 ploča, 13 poklopac posude, 14 poklopac posude reaktora, 15 osnovna posuda, 16 primarna posuda, 17 poklopac jezgre, 18 posuda dvostrukih stijenki, 19 primarni sigurnosni štit, 20 mehanizam za manipulaciju gorivom

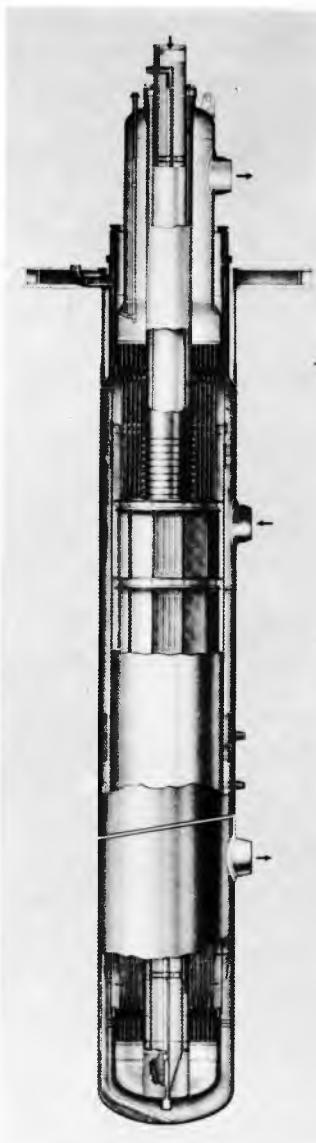


Sl. 53. Cijevni snop izmjenjivača topline natrij-natrij u nuklearnoj elektrani SNR-300

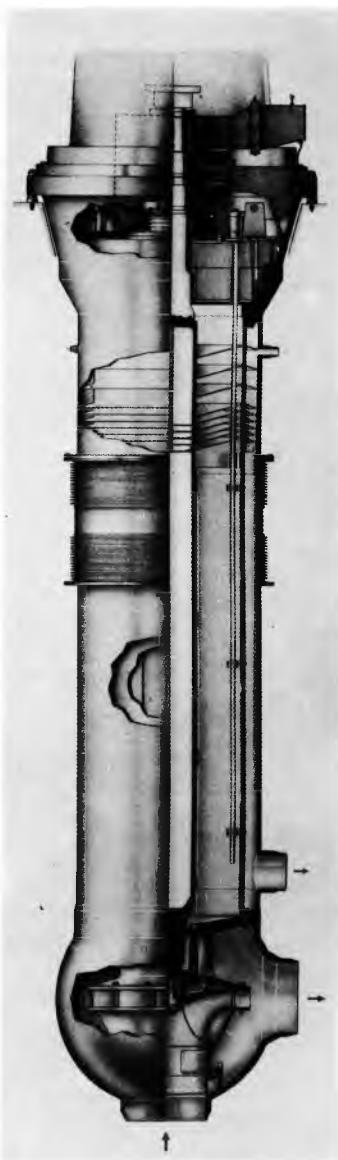
vak razvoja visokotemperaturnih plinom hlađenih reaktora. Plin ne omogućuje postizanje visoke specifične snage u jezgri reaktora kao tekući metali, ali, zbog dobrih nuklearnih svojstava helija (mali apsorpcijski presjek), takvi reaktori mogu imati visoki faktor oplodnje (~1,45).

Moguće je u principu izgraditi brzi oplodni reaktor i s običnom vodom kao rashladnim sredstvom. U SAD se eksperimentira s takvim reaktorom u prije dvadesetak godina izgrađenom reaktorskom postrojenju NE Shippingport, u kojem je reaktorska jezgra lakovodnog reaktora zamijenjena jezгрom brzog reaktora.

Neovisno o uspjehu tih eksperimentata, nedvojbeno je da će brzi oplodni reaktori hlađeni natrijem zadržati u dogledno vrijeme vodeću ulogu u gradnji nuklearnih elektrana s brzim reaktorima.



Sl. 54. Izmjenjivač topline natrij-natrij u nuklearnoj elektrani SNR-300 (SR, Njemačka). Primarni protok/sekundarni protok 392/362 kg/s, primarna temperatura ulaz/izlaz 819/648 K, sekundarna temperatura ulaz/izlaz 793/608 K, tlak primarni/sekundarni 1,14/1,20 MPa, duljina/promjer 11,6/1,4 m. Materijal plašta i cijevi: nerđajući čelik



Sl. 55. Primarna pumpa za natrij nuklearne elektrane SNR-300. Učin 5300 m³/h, radna temperatura 819 K, snaga na osovini 2200 kW, visina kućišta 7,8 m, promjer kućišta 1,36 m. Materijal: nerđajući čelik

Nuklearna energetska postrojenja za pogon brodova

Nuklearna energija na današnjem stupnju razvoja može se iskoristiti za propulziju brodova i podmornica. Prednost upotrebe nuklearne energije za propulziju jest osiguranje duge plovidbe bez izmjene goriva, odnosno mali težinski utrošak goriva po jedinici proizvedene pogonske energije. Nadalje, nuklearno gorivo proizvodi energiju bez utroška kisika. To je osobito važno za podmornice kojima nuklearno gorivo omogućuje dugu plovidbu u zaronjenom stanju.

Osnovne poteškoće u primjeni nuklearnog pogona brodova jesu: osiguranje posade i okoliša od nuklearnog zračenja, primjena posebnih postupaka pri havariji broda, te pravna regulativa ulaska i boravka takvih brodova u lukama. Pogonska snaga potrebna za pogon broda iznosi

$$P = CD^{2/3}v^3, \quad (1)$$

gdje je C koeficijent koji raste s brzinom broda, D deplasman broda, a v brzina.

Kvaliteta prijevoza brodom ovisi o dva faktora: brzini broda i udaljenosti koju brod može prijeći s jednim punjenjem goriva. Za plovidbu između dviju luka (npr. prekoceanska plovidba) limitirana je brzina da se preveliki dio deplasmana broda ne bi utrošio za utevar goriva. Brodovi na nuklearni pogon imaju prednost pred brodovima na konvencionalni pogon, jer težina nuklearnog goriva raste mnogo sporije od težine klasičnog

goriva s povećanjem snage i brzine broda. Težina broda na nuklearni pogon veća je od težine broda iste nosivosti na konvencionalni pogon, u prvom redu zbog težine biološkog štita. Nuklearni pogon ima prednost za pogon velikih brodova koji su predviđeni za duga putovanja i od kojih se traži velika brzina plovidbe. To su veliki putnički brodovi, veliki tankeri i brodovi za rasut teret.

Za nuklearni pogon brodova najpodesniji je reaktor s vodom pod tlakom. Takvi su reaktori kompaktni i stabilni u pogonu, neovisni o kretanju i lJuljanju broda. U sekundarnom krugu toplinska energija proizvedena u reaktoru predaje se vodi, odnosno vodenoj pari. Parom se tjeera parna turbina koja predaje svoju energiju brodskoj osovini neposredno preko zupčanika, ili posredno proizvodnjom električne energije kad elektromotor tjeera brodsku osovinu.

Do danas je izgrađeno, ne računajući plovila za vojne potrebe (o podmornicama s nuklearnim pogonom v. *Podmornice*), pet brodova na nuklearni pogon (tabl. 6). Sve te brodove može se smatrati prototipovima.

Jedan je od osnovnih problema pri projektiranju broda na nuklearni pogon izbor najboljega biološkog štita. Na brodu se biološki štit ne može uspješno riješiti betonskim štitom zbog njegova velikog volumena i nepovoljnih mehaničkih svojstava. Zbog toga se biološki štit izvodi od tankova napunjениh vodom i s više slojeva od polietilena, olova i željeza. Reaktorsko postrojenje mora se tako smjestiti na brodu da se

Tablica 6
OSNOVNE KARAKTERISTIKE BRODOVA NA NUKLEARNI POGON

Ime broda	Snaga na osovini MW	Termička snaga reaktora MW	Deplasman t	Rashladno sredstvo reaktora		Para		Moguće trajanje plovidbe bez izmjene goriva
				Tlak MPa	Uzlazna/izlazna temperatura K	Tlak MPa	Temperatura K	
Lenjin Arktika	33 ¹	2 × 90 ²	16000	20	598/521	2,7	583	1 godina *
Savannah	56	*	19300	*	*	*	*	
Otto Hahn	16,5	76	22000	14	571/540	3,3	513	800 dana
Mutsu	8,3	38	26000	6,2	551/540	2,8	541	500 dana
	7,5	36	10400	11	558/544	3,8	519	*

¹ elektromotorni prijenos; ² treći reaktor snage 90 MW nalazi se u rezervi; * podatak nije dostupan

osigura maksimalna sigurnost toga postrojenja pri havariji. Reaktorsko postrojenje na brodu Savannah (sl. 56) sastoje se od reaktora i dva rashladna kruga. U svakom je rashladnom krugu horizontalni parogeneratori s odvojenim parnim bubenjem i dvije paralelne cirkulacijske pumpe (sl. 57). Reaktorska posuda je visoka ~ 8 m, ima promjer ~ 2,5 m, a stijenke od 150 mm. Reaktorska jezgra sadrži 164 gorivih šipki s čeličnim oblogom i 21 regulacijsku šipku. Srednje je obogaćenje urana 4,4%. Početno je punjenje 312 kg ^{235}U (~ 7100 t urana), a prosječni odgor 7325 MWd/t. Brod može bez izmjene goriva ploviti ~ 300000 nautičkih milja.

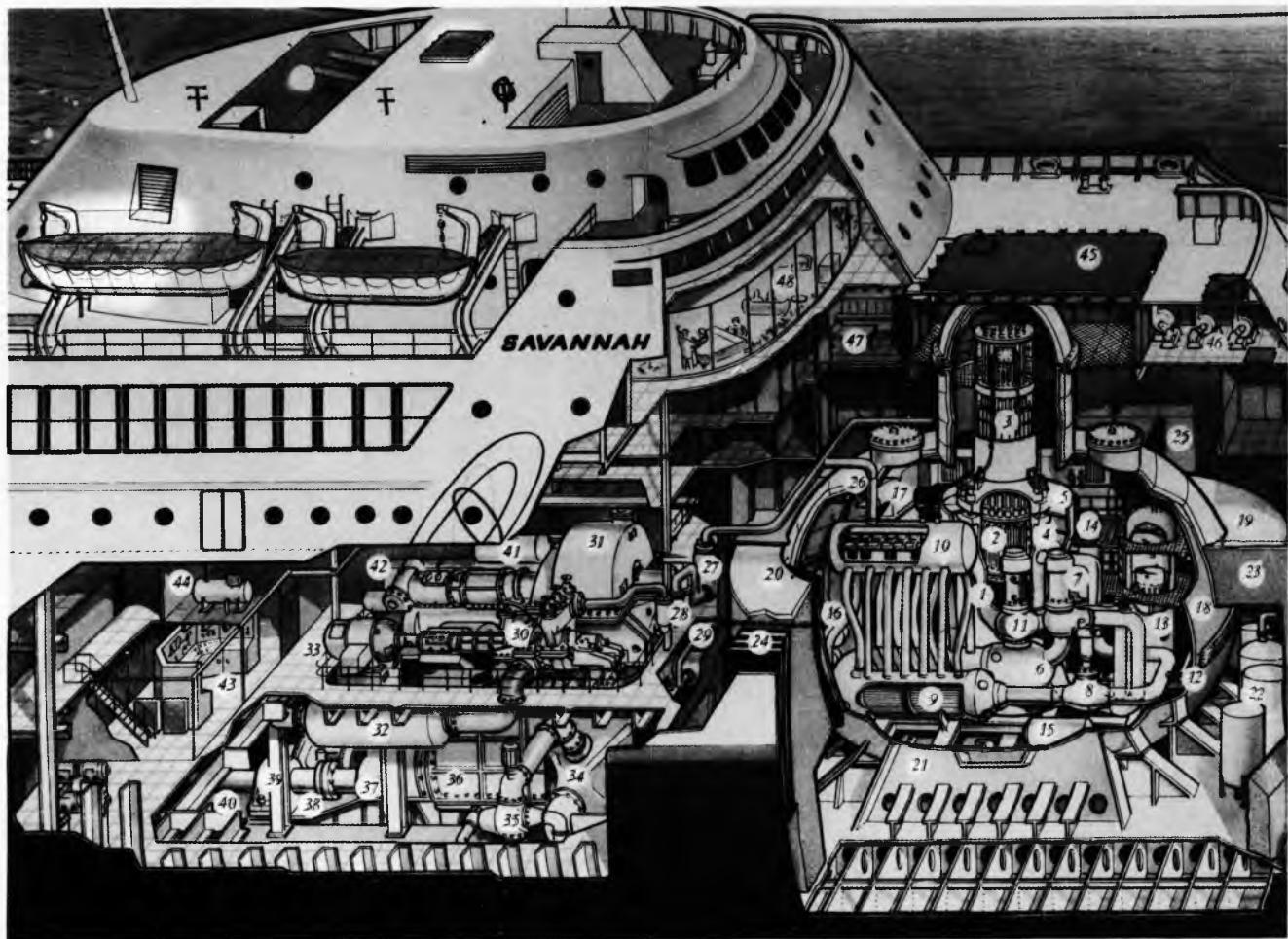
Reaktor je okružen primarnim biološkim štitom. Ta se zaštita sastoje od čeličnih rezervoara prstenastog presjeka, visine

~ 5 m, koji su ispunjeni vodom. Debljina je vodenog sloja oko rezervoara 0,84 m. Rezervoari su okruženi olovnom pločom debljine 50–100 mm.

Cijelo je reaktorsko postrojenje smješteno unutar čeličnog sigurnosnog štita promjera ~ 10 m i visine 15 m, sa stijenkama od 60–100 mm. Oko sigurnosnog štita je sekundarna biološka zaštita od polietilena, olovnih ploča i baritnog betona.

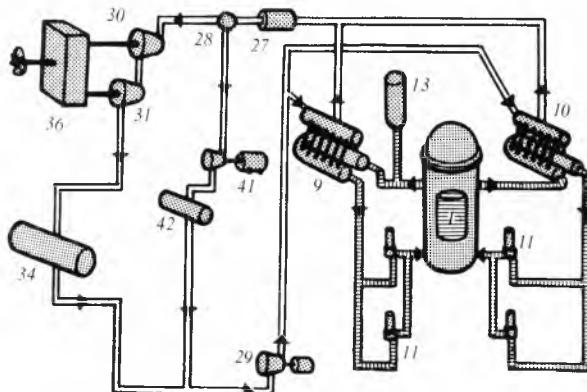
Turbina ima visokotlačno i niskotlačno kućište između kojih je separator vlage. Zupčanikom je spojena s pogonskom osovom. Dva kućna agregata priključena na svežu paru proizvode električnu energiju.

Brod na nuklearni pogon Otto Hahn, izgrađen u SR Njemačkoj (sl. 58), ima nešto drukčije reaktorsko postrojenje.



Sl. 56. Nuklearno energetsko postrojenje na brodu Savannah. 1 jezgra reaktora, 2 regulacijske šipke, 3 pogon regulacijskih šipki, 4 reaktorska posuda, 5 biološki štit obložen olovom, 6 ulaz rashladnog sredstva u reaktor, 7 izlaz rashladnog sredstva iz reaktora, 8 ventil, 9 parogenerator (2), 10 parni bubanj, 11 primarne pumpe, 12 spoj na posudu za regulaciju tlaka, 13 posuda za regulaciju tlaka, 14 rezervoar kondenzata, 15 pumpa za drenažu, 16 hladnjak, 17 cijevi hladnjaka, 18 čelični sigurnosni štit, 19 olovni štit, 20 polietilenski štit, 21 potpora sigurnosnog štita, 22 postrojenje za pripremu vode, 23 betonski štit, 24 slojevita zaštita, 25 stabilizatori, 26 glavni parovod, 27 separator vlage, 28 regulacijski ventil, 29 pojne pumpe, 30 visokotlačni dio turbine, 31 niskotlačni dio turbine, 32 separator vlage, 33 pomoći motor, 34 glavni kondenzator, 35 pumpa za kondenzat, 36 zupčani prijenos, 37 ležaj, 38 spojka, 39 ležaj pogonske osovine, 40 pogonska osovina, 41 kučni turbogenerator (2), 42 pomoći kondenzator, 43 komandna prostorija, 44 zagrijivač vode, 45 poklopac, 46 ventilatori, 47 pomoćne prostorije, 48 prostorije za putnike

To je postrojenje integralnog tipa. Reaktorska jezgra, cijevni registri parogeneratora i cirkulacijske pumpe smještene su unutar reaktorske posude.



Sl. 57. Principijelna shema pogonskog postrojenja na nuklearni pogon na brodu Savannah. Oznake komponenata opreme odgovaraju oznakama na sl. 56.



Sl. 58. Brod na nuklearni pogon Otto Hahn

TERMIČKI PROCESI U NUKLEARNOJ ELEKTRANI

S termodinamičkog gledišta nuklearni reaktor je naprava u kojoj se energija nuklearnih fisija pretvara u toplinsku energiju. Ako reaktor radi u stacionarnom režimu, mora odvedena toplina biti jednaka proizvedenoj toplini. Toplina se iz reaktora odvodi pokretnim fluidom, tekućim ili plinovitim rashladnim sredstvom reaktora.

U jezgru reaktora proizvodi se toplina i predaje rashladnom sredstvu koje struji kroz reaktor, te se prolazom kroz jezgru reaktora zagrije od temperature T_{hi} na temperaturu T_{hu} . Toplinska se bilanca reaktora, izražena proizvedenom toplinom Q_r po vremenu, dakle snagom, može prikazati izrazom

$$Q_r = W \int_{T_{hu}}^{T_{hi}} c_p(T) dT \quad (2)$$

gdje je W maseni protok, a $c_p(T)$ specifični toplinski kapacitet sredstva, ili izrazom

$$Q_r = W(h_i - h_u), \quad (3)$$

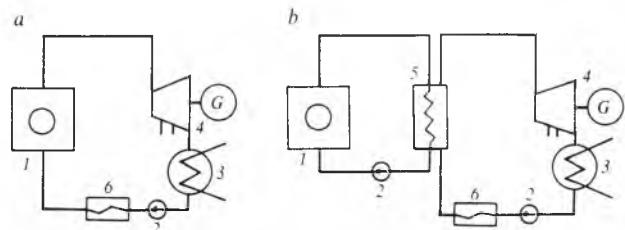
gdje su h_i i h_u entalpije rashladnog sredstva na izlazu i na ulazu u reaktor. U reaktoru s kipućom vodom najveći se dio protoka rashladnog sredstva recirkulira, tj. nakon prolaza kroz reaktor ponovno se uvodi u njega. U stacionarnom stanju dio rashladnog sredstva koje se ponovno uvodi u reaktor ne preuzima toplinu iz reaktorske jezgre. U takvu se reaktoru specifična entalpija rashladnog sredstva na izlazu iz reaktora dobiva iz relacije

$$h_i = h_u + \int_{T_{hu}}^{T_{hs}} c_p(T) dt + h_e \quad (4)$$

gdje je T_{hs} temperatura zasićenja, a h_e entalpija isparivanja rashladnog sredstva.

Toplinska energija proizvedena u nuklearnom reaktoru upotrebljava se u nuklearnoj elektrani za dobivanje mehaničke energije koja se dalje transformira u električnu energiju. Mehanička energija dobiva se direktnim ili indirektnim kružnim procesom (sl. 59). U direktnom procesu rashladno sredstvo reaktora neposredno odvodi u parnu ili plinsku turbinu, a u indirektnom procesu rashladno sredstvo kruži kroz reaktor i izmjenjivač topline (parogenerator) u kojem predaje toplinu sekundarnom rashladnom sredstvu koje se nakon zagrijavanja i isparivanja odvodi u parnu turbinu. Direktni kružni proces ostvaren je u postrojenjima s reaktorom s kipućom vodom (BWR), a pokušava se primijeniti u postrojenjima s reaktorom s visokotemperaturnim plinom (HTGR). Upotreboom ostalih tipova reaktora ostvaruje se indirektni kružni proces

Rashladno sredstvo reaktora može biti tekućina (obična voda, teška voda, rastaljeni metal) ili plin (ugljik-dioksid, helij), a sekundarno je rashladno sredstvo uvijek para, odnosno voda.



Sl. 59. Principijelne sheme nuklearnih elektrana s direktnim i indirektnim kružnim procesom. a) direktni kružni proces, b) indirektni kružni proces. 1 reaktor, 2 pumpa, 3 kondenzator, 4 turboagregat, 5 parogenerator, 6 regenerativni zagrijivači

Kružni proces u nuklearnom energetskom postrojenju, kao i svaki kružni proces (v. *Termodynamika*), radi između dvije temperature. Gornja temperaturna razina određena je temperaturom reaktorskoga rashladnog sredstva u indirektnom procesu odnosno temperaturom površine gorivih elemenata u direktnom procesu. Donju temperaturnu granicu određuje temperatura rashladne vode koja se dovodi u kondenzator parne turbine, odnosno temperatura okolišnog zraka ako je plinska turbina pogonski stroj.

Ovisnost snage na pragu nuklearne elektrane o snazi nuklearnog reaktora. Snaga koju dobivaju parogeneratori u nuklearnom energetskom postrojenju veća je od snage koju reaktor predaje rashladnom sredstvu, jer rashladno sredstvo preuzima i dio snage od cirkulacijskih pumpi. Ako se sa $Q_p = W \Delta h_p$ označi snaga koju cirkulacijske pumpe predaju rashladnom sredstvu (Δh_p je povećanje entalpije rashladnog sredstva pumpanjem), snaga koja se dovodi u parogenerator iznosi

$$Q_{pg} = Q_r + Q_p = W(h_i - h_u + \Delta h_p). \quad (5)$$

Snaga koju pumpe predaju rashladnom sredstvu relativno je malena, pa povećanje entalpije rashladnog sredstva djelovanjem cirkulacijskih pumpi iznosi manje od 1% (u NE Krško 0,56%) za reaktore hlađene vodom, a za reaktore hlađene plinom 4...5%.

Iskoristivost na pragu nuklearne elektrane može se izraziti relacijom

$$\eta = \frac{(Q_r + Q_p)\eta_{pg}\eta_{ter}\eta_i\eta_m\eta_g - Q_{vp}}{Q_r} = \frac{Q_i}{Q_r}, \quad (6)$$

gdje je η_{pg} stupanj djelovanja parogeneratora, η_{ter} termički stupanj djelovanja kružnog procesa, η_i unutrašnji stupanj djelovanja turbine, η_m mehanički stupanj djelovanja turbine, η_g stupanj djelovanja generatora, a Q_{vp} snaga potrebna za pomoćne pogone (vlastiti pogon elektrane). Vrijednosti stupnjeva djelovanja η_{pg} , η_m i η_g obično iznose 0,98...0,99. Unutrašnji

stupanj djelovanja parne turbine η_i ovisi o izvedbi turbine, ali i o vlažnosti pare x prema relaciji

$$\eta_{ix} = \eta_{io}x \quad (7)$$

gdje je η_{io} unutrašnji stupanj djelovanja za suhozasićenu paru.

Termički stupanj djelovanja kružnog procesa ovisi o vrsti kružnog procesa te o tlaku i temperaturi vode i pare u procesu. U nuklearnim elektranama η_{ter} obično je $0,3 \dots 0,45$. Na vlastitu potrošnju u nuklearnoj elektrani obično se troši $\sim 5\%$ snage (u NE Krško 4,8%). Nuklearne elektrane s plinom hlađenim reaktorom troše veću snagu za vlastitu potrošnju nego one s reaktorom hlađenim vodom, zbog veće snage potrebne za cirkulaciju rashladnog sredstva reaktora. Smanjenje snage nuklearne elektrane zbog vlastite potrošnje moguće je uzeti u obzir faktorom $\eta_{vp} \approx 0,95$. Ako se, osim toga, prihvati da vrijedi

$$\left(1 + \frac{Q_p}{Q_r}\right)\eta_{pg} \approx 1, \quad (8)$$

dobiva se za iskoristivost na pragu nuklearne elektrane

$$\eta = \eta_{ter}\eta_i\eta_m\eta_g\eta_{vp}. \quad (9)$$

Iskoristivost nuklearne elektrane, kojom je određen omjer između snage na pragu i snage reaktora, iznosi $0,25 \dots 0,4$ (u NE Krško 0,32). Dakle, oko trećine termičke snage reaktora transformira se u električnu energiju, a dvije trećine odvode se rashladnom vodom iz kondenzatora u okoliš. Najveći utjecaj na iskoristivost nuklearne elektrane ima termički stupanj djelovanja kružnog procesa o kojemu će još biti riječi.

Snaga potrebna za cirkulaciju rashladnog sredstva reaktora mnogo utječe na iskoristivost nuklearnog energetskog postrojenja. Povećani prototok rashladnog sredstva kroz reaktor, s jedne strane, povećava izlaznu snagu i stupanj djelovanja kružnog procesa, a, s druge strane, zahtijeva povećanu snagu za cirkulaciju rashladnog sredstva, pa je jedan od elemenata za optimalizaciju projekta primarnog kruga nuklearne elektrane određivanje optimalne snage za osiguranje kružnog toka rashladnog sredstva.

Snaga nuklearnog reaktora može se prikazati, ako se računa da specifična toplina nije ovisna o temperaturi, i izrazom

$$Q_r = Wc_p(T_{hi} - T_{hu}). \quad (10)$$

Budući da je snaga potrebna za cirkulaciju rashladnog sredstva proporcionalna trećoj potenciji protoka W , za snagu na pragu elektrane može se napisati

$$P = aW - bW^3, \quad (11)$$

gdje je prvi član snaga reaktora koja je proporcionalna protoku, prema (10), uz zadano razliku temperatura i zadano rashladno sredstvo, a b konstanta. Snaga P na pragu elektrane postiže maksimalnu vrijednost kad je

$$aW = \frac{1}{3}bW^3, \quad (12)$$

Što znači da će se dobiti maksimalna snaga na pragu ako se za cirkulaciju rashladnog sredstva troši trećina snage reaktora.

U praksi se, međutim, snaga za cirkulaciju ograničuje na mnogo niže vrijednosti iz sljedećih razloga: a) o snazi reaktora i toplinskog koeficijenta vodljivosti goriva ovisi razlika temperatura unutar gorivih elemenata, pa se snaga reaktora ne smije povećavati iznad vrijednosti koju dozvoljava ta temperaturna razlika, b) s povećanjem brzine strujanja rashladnog sredstva u reaktoru povećava se erozija, korozija i vibracije opreme primarnog kruga i gorivih elemenata i c) prekomjerno povećanje brzine strujanja rashladnog sredstva veoma poskupljuje opremu primarnog kruga.

Snaga za cirkulaciju rashladnog sredstva ovisi o svojstvima toga sredstva. Ta se snaga može prikazati izrazom $P_p = kv^3\varrho$, gdje je k konstanta, v brzina strujanja, a ϱ gustoća rashladnog sredstva. Brzina je, osim toga, uz konstantni presjek obrnuto

proporcionalna specifičnoj toplini c_p i gustoći ϱ , pa se za snagu P_p dobiva

$$P_p = \frac{k_p}{c_p^3 \varrho^2}, \quad (13)$$

gdje je k_p konstanta. Prema tome, uz istu snagu reaktora plinovita rashladna sredstva traže veću snagu za cirkulaciju, jer takva rashladna sredstva imaju niže vrijednosti c_p i ϱ nego tekućine.

Brzina strujanja reaktorskog rashladnoga sredstva obično se ograničuje na sljedeće vrijednosti: do 12 m/s za tekuća, a do 80 m/s za plinovita rashladna sredstva.

Određenu snagu reaktora moguće je postići i uz ograničenu snagu za cirkulaciju reaktorskog rashladnog sredstva ako se dozvoli veća razlika između ulazne temperature rashladnog sredstva u reaktor i izlazne temperature iz reaktora. Povećanje te razlike moguće je postići samo smanjenjem ulazne temperature rashladnog sredstva, jer je izlazna temperatura diktirana dozvoljenim zagrijavanjem gorivih elemenata. Veće temperaturne razlike u reaktoru povećavaju termička naprezanja u njegovim konstrukcijskim elementima i smanjuju termički stupanj djelovanja kružnog procesa (zbog niže srednje temperature reaktorskog rashladnog sredstva u parogeneratoru). U reaktorima hlađenim vodom temperaturne razlike rashladnog sredstva u reaktoru iznose $20 \dots 40$ K (u NE Krško 37 K). Plinom hlađeni reaktori, zbog potrebne velike snage za cirkulaciju rashladnog sredstva, imaju mnogo veće razlike između ulazne i izlazne temperature ($200 \dots 400$ K). Potrebna snaga za cirkulaciju rashladnog sredstva u plinom hlađenom reaktoru smanjuje se, osim povećanjem spomenutih temperaturnih razlika, velikim presjecima kanala za strujanje rashladnog sredstva radi smanjenja otpora strujanju i primjenom puhalih velike snage.

Termički kružni procesi u nuklearnim elektranama uneškoliko se razlikuju od procesa u konvencionalnim termoelektranama. Te se razlike pojavljuju zbog toga što reaktorska jezgra radi u termičkim uvjetima koji se razlikuju od uvjeta u ložištu parnog kotla. Može se, naime, smatrati da je parni kotao energetski ekvivalent reaktorske jezgre. Zbog svojstava nuklearnog goriva u reaktorskoj se jezgri postižu mnogo niže temperature od onih u ložištima parnih kotlova. Osim toga, izbor reaktorskog rashladnog sredstva ograničen je na materijale koji su prema svojim nuklearno-fizikalnim svojstvima kompatibilni s materijalima u jezgri u uvjetima rada pojedinih reaktorskih tipova.

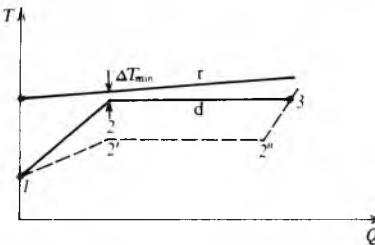
Već prema svojstvima reaktorskog rashladnog sredstva i djelatne tvari koja se dovodi turbini te načinu predaje topline djelatnom sredstvu kružnog procesa, razlikuju se kružni procesi sa zasićenom i pregrijanom parom, te kružni procesi s plinovima.

Kružni procesi sa zasićenom parom danas se primjenjuju u nuklearnim elektranama s reaktorima hlađenima vodom (običnom ili teškom) u direktnom ili indirektnom kružnom procesu. Direktni kružni proces izvodi se u nuklearnim elektranama s reaktorima hlađenim kipućom vodom (BWR), a indirektni u nuklearnim elektranama s reaktorima koji su hlađeni vodom pod tlakom (PWR).

U direktnom kružnom procesu vodena se para iz nuklearnog reaktora neposredno odvodi u turbinu, a u indirektnom rashladno sredstvo reaktora predaje toplinu vodi, odnosno pari (djelatnoj tvari) posredovanjem izmjenjivača topline, odnosno parogeneratora (sl. 59b). U indirektnom procesu reaktorsko rashladno sredstvo fizički je odvojeno od djelatne tvari u kružnom procesu. U nuklearnim elektranama s reaktorom hlađenim teškom vodom primjenjuje se indirektni kružni proces, a rade na istom principu kao i nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim vodom pod tlakom. Bilo je pokušaja da se i za reaktore hlađene teškom vodom primijeni direktni kružni proces, ali bez većeg uspjeha.

Osnovni su razlozi za upotrebu zasićene pare kao djelatne tvari u postrojenjima s reaktorima hlađenima vodom: a) relativno niske temperature, pri kojima se dovodi toplina u kruž-

ni proces ($520\cdots600$ K); takve su temperature uvjetovane dozvoljenim temperaturama gorivih elemenata, a, u indirektnom procesu, i tlakom reaktorskog rashladnog sredstva i b) malo povišenje temperature rashladnog sredstva pri prolazu kroz reaktor ($20\cdots40$ K). Promjene temperature reaktorskog rashladnog sredstva i djelatne tvari u kružnom procesu mogu se prikazati TQ -dijagramom (sl. 60), gdje je T temperatura, a Q predana, odnosno preuzet a toplina. U tom dijagramu vidi se promjena temperature reaktorskog rashladnog sredstva pri prolazu kroz cijevi parogeneratora i promjena temperature djelatne tvari (1—2—3). Od 1—2 je područje zagrijavanja do temperature ključanja, a od 2—3 područje isparivanja pri konstantnoj temperaturi. Najmanja temperaturna razlika ΔT_{\min} ovisi o koeficijentu prijelaza topline u parogeneratoru, a obično iznosi $10\cdots15$ K.

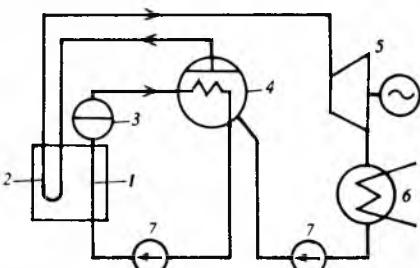


Sl. 60. TQ -dijagram reaktorskog rashladnog sredstva (r) i djelatne tvari (d) u parogeneratoru u kružnom procesu sa zasićenom parom

U načelu nema zapreke da se u postrojenjima s reaktorima hlađenima vodom ostvari kružni proces s pregrijanom parom (crtkana linija na sl. 60). Takav bi proces morao raditi s nižim tlakom (1—2'—2''—3) i nižom iskoristivosti. Najmanji gubici zbog nepovratljivosti, naime, dobivaju se kad su najmanje razlike prosječnih temperatura reaktorskog rashladnog sredstva i djelatne tvari u parogeneratoru, a manje razlike temperatura postižu se procesom sa zasićenom parom.

U mnogim nuklearnim elektranama danas se najčešće primjenjuje kružni proces sa zasićenom parom. Bilo je, međutim, dosta pokušaja da se u nuklearnim elektranama s vodom hlađenima reaktorima ostvari kružni proces s pregrijanom parom. To se nije nastojalo postići sniženjem tlaka pare, nego dodatnim pregrijavanjem. U prvima pokušajima suhozasićena para iz reaktora pregrijavala se u konvencionalnim kotlovskim postrojenjima. Takav pogon ostvaren je u američkoj nuklearnoj elektrani Indian Point, što je kasnije napušteno zbog složenog pogona i posebnih sigurnosnih problema (radioaktivna para u kotlu). Naknadna istraživanja bila su usmjerena na pregrijavanje pare u nuklearnom reaktoru, pomoću posebnih gorivih elemenata i posebnih rashladnih kanala. Pregrijavanje pare u reaktoru ostvareno je u nekoliko eksperimentalnih postrojenja u SAD i SSSR. Širo primjenu je našlo u SSSR u nuklearnim elektranama tzv. kanalskog tipa, odnosno tipa NE Bjelojarsk (sl. 61).

U kružnim procesima sa zasićenom parom relativno niskog tlaka, kakvi se primjenjuju u nuklearnim elektranama s vodom hlađenima reaktorima, pojavljuju se specifični problemi: a) zbog



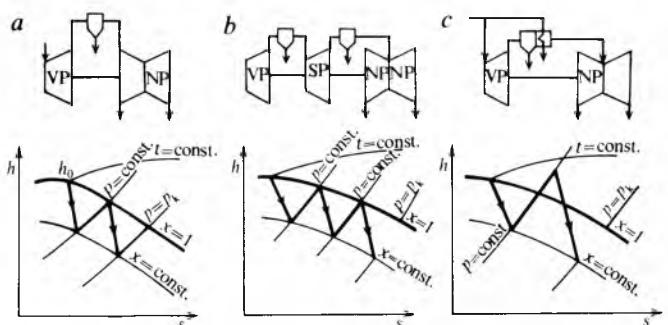
Sl. 61. Principijelna shema nuklearne elektrane s pregrijanjem pare u reaktoru. 1 rashladni kanali reaktora za isparivanje rashladnog sredstva, 2 rashladni kanali za pregrijavanje pare, 3 separator, 4 parogenerator, 5 turboagregat, 6 kondenzator, 7 pumpa

relativno male razlike entalpija u kružnom procesu i velikoga specifičnog volumena pare i b) zbog visokog postotka vlage pri kraju ekspanzije u turbinu.

U nuklearnim elektranama s procesom sa zasićenom parom tlak i temperatura pare na ulazu u turbinu iznosi $6\cdots7$ MPa i $550\cdots560$ K, a razlika entalpija pare na ulazu u turbinu i na izlazu iz nje u nuklearnoj elektrani iznosi $\sim 60\%$ od razlike koja se ostvaruje u suvremenim konvencionalnim termoelektranama (tlak ~ 23 MPa i temperatura ~ 820 K). Za jednaku snagu volumen je pare na ulazu u turbinu u nuklearnoj elektrani za $4\cdots6$ puta, a na izlazu iz turbine za ~ 2 puta veći nego u konvencionalnoj elektrani. Veći volumen pare zahtijeva veće dimenzije cjevovoda, ventila i turbine. Zbog toga ima više dvostrukih niskotlačnih kućišta (v. *Turbine, parne*).

Ekspanzijom pare u turbinu povećava se vlažnost pare, a to je povećanje to veće što je niža temperatura pare i što je para na ulazu u turbinu manje pregrijana. Ekspanzijom zasićene pare povećava se vlažnost pare do granice koja nije prihvatljiva s obzirom na eroziju turbinskih lopatica.

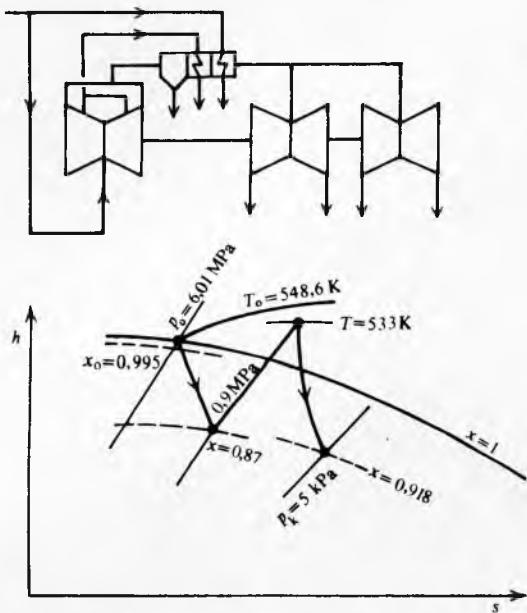
Maksimalni sadržaj vlage u pari koja struji među posljednjim turbinskim lopaticama (na kraju ekspanzije), uz koji se još može osigurati dovoljan životni vijek tih lopatica, iznosi $12\cdots13\%$. Uz zadatu temperaturu u kondenzatoru, koja ovisi o temperaturi rashladne vode, vlažnost je pare na kraju ekspanzije to veća što je veći tlak zasićene pare na ulazu u turbinu. Spomenuta granična vlažnost na kraju ekspanzije dostiže se već za tlak zasićene pare od $0,3\cdots0,4$ MPa, ako je tlak u kondenzatoru $0,005$ MPa. Tlak zasićene pare na ulazu u turbinu nuklearne elektrane iznosi, kako je već spomenuto, $6\cdots7$ MPa, pa uz taj tlak para na kraju ekspanzije sadrži $\sim 18\%$ vlage. Zbog toga je potrebno predvidjeti separator vlage, pomoću kojega se izdvaja vlaga iz pare nakon ekspanzije do tlaka uz koji se postiže maksimalno dozvoljena vlažnost. To sušenje pare moguće je postići mehaničkim izdvajanjem kapljica vode iz pare ili grijanjem vlažne pare (sl. 62). Kad je tlak svježe pare manji od 4 MPa, moguće je separaciju vlage izvesti s jednim separatorom vlage bez pregrijavanja. Za veće tlakove svježe pare potrebna je separacija vlage u dva stupnja ili u jednom stupnju, ali s pregrijavanjem vlažne pare. Vlažna se para pregrijava svježom parom ili parom iz otcjepa turbine koja ima viši tlak i temperaturu od pare koju treba pregrijavati.



Sl. 62. Principijelne sheme separatora vlage i prikaz hs -dijagramima. a) jednostruki separator vlage, b) dvostruki separator vlage, c) jednostruki separator vlage s pregrijavanjem pare, l — sadržaj vlage, p_x tlak u kondenzatoru

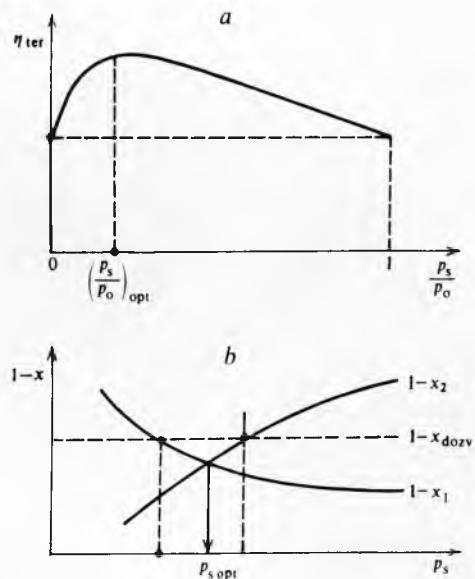
U NE Krško tlak zasićene pare iznosi 6 MPa. Separacija vlage provodi se pomoću jednog separatora i dva stupnja pregrijavanja pare. Pregrijava se parom iz prvog otcjepa na visokotlačnom dijelu turbine i svježom parom (sl. 63).

Separacijom vlage u toku ekspanzije povećava se termički stupanj djelovanja kružnog procesa, a vlaga u pari nepovoljno utječe i na unutrašnji stupanj djelovanja turbine. Maksimalni termički stupanj djelovanja postiže se uz određeni omjer tlaka pare u separatoru vlage i tlaka svježe pare (sl. 64a). Optimalni omjer tlakova za izvedbu s jednim separatorom bez pregrijavanja pare iznosi $0,06\cdots0,12$, a za izvedbe s jednim separatorom i pregrijavanjem pare $0,14\cdots0,22$ (u NE Krško taj je omjer $\sim 0,15$). Poboljšanje termičkog stupnja djelovanja upotreboom separatora vlage iznosi $0,04\cdots0,06\%$.



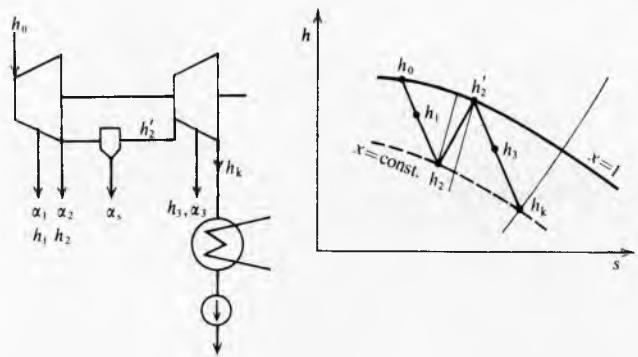
Sl. 63. Principijelna shema separatora vlage u NE Krško i prikaz hs-dijagramom

Što je tlak u separatoru vlage veći, veći je postotak vlage iza niskotlačnoga, a manji iza visokotlačnog dijela turbine (sl. 64b). Optimalna vrijednost tlaka u separatoru postiže se kad je podjednaka vlažnost iza oba dijela turbine. Na izlaznom stupnju visokotlačnog dijela turbine može se dozvoliti nešto veća vlažnost pare nego na izlazu iz niskotlačnog dijela turbine, jer su manje obodne brzine u visokotlačnom dijelu, pa i manja opasnost od erozije lopatica turbine.



Sl. 64. Ovisnost termičkog stupnja djelovanja kružnog procesa η_{ter} i vlažnosti pare o tlaku pare u separatoru. p_s tlak pare u separatoru vlage, p_0 tlak svježe pare, x_1 vlažnost pare iza visokotlačnog dijela turbine, x_2 vlažnost pare iza niskotlačnog dijela turbine

Ako su h_1, h_2, h_3 entalpije pare na otcjepima za oduzimanje pare za zagrijavanje kondenzata (regenerativno zagrijavanje pojne vode, v. Elektrane, TE3, str. 566), h'_2 entalpija pare nakon odjeljivanja vlage u separatoru, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ količina oduzete pare po kg svježe pare, α_s količina izdvojene vode u separatoru po kg svježe pare, h_0 entalpija svježe pare, a h_k entalpija pare na kraju ekspanzije u turbinu (sl. 65), mehanička energija dobivena po kg svježe pare iznosi



Sl. 65. Osnovna shema procesa separacije vlage u toku ekspanzije zasićene pare u turbinu i prikaz h-s dijagramu

$$E_{\text{meh}} = (h_0 - h_1) + (1 - \alpha_1)(h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_s)(h'_2 - h_3) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_s - \alpha_3)(h_3 - h_k) \quad (14)$$

Jednostavnim preuređenjem dobiva se izraz za specifičnu potrošnju pare

$$d = \frac{1}{E_{\text{meh}}} =$$

$$= \frac{1}{(h_0 - h_k) \left[1 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \frac{h'_2 - h_2}{h_0 - h_k} - \alpha_s \frac{h'_2 - h_k}{h_0 - h_k} - \sum_{n=1}^3 \alpha_n y_n \right]} \quad (15)$$

gdje je

$$y_n = \frac{h_n - h_k}{h_0 - h_k}. \quad (16)$$

Općenito, ako visokotlačni dio turbine ima p , a niskotlačni dio r otcjepa za oduzimanje pare za zagrijavanje kondenzata, specifični potrošak pare iznosi

$$d = \frac{1}{E_{\text{meh}}} =$$

$$= \frac{1}{(h_0 - h_k) \left[1 + \left(1 - \sum_{n=1}^p \alpha_n \right) \frac{h'_s - h_s}{h_0 - h_k} - \alpha_s \frac{h'_s - h_k}{h_0 - h_k} - \sum_{n=1}^{p+r} \alpha_n y_n \right]} \quad (17)$$

gdje je h_s entalpija pare pred separatorom vlage, a h'_s entalpija pare iza njega. Za proizvodnju 1 kg svježe pare potrebno je iz reaktora (direktni) ili parogeneratora (indirektni proces) dovesti kružnom procesu toplinu

$$q = h_0 - h_p, \quad (18)$$

gdje je h_p entalpija pojne vode, pa je termički stupanj djelovanja

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{E_{\text{meh}}}{h_0 - h_p} = \frac{1}{d(h_0 - h_p)}, \quad (19)$$

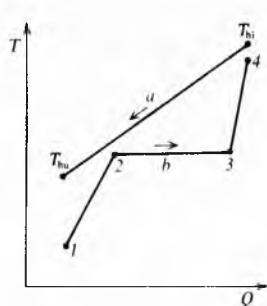
u koji treba uvrstiti d iz (17).

Kružni procesi s pregrijanom parom uobičajeni su u konvencionalnim termoelektranama. U nuklearnim elektranama takvi se procesi primjenjuju kad reaktorsko rashladno sredstvo prolazi kroz parogenerator ili reaktor znatno mijenja temperaturu (za 100 K ili više). Veliki porast temperature rashladnog sredstva u primarnom krugu ostvaruje se u plinom hlađenim termičkim reaktorima i u brzim reaktorima hlađenim tekućim metalima.

Ako se povećanje temperature ΔT_h rashladnog sredstva pri prolazu kroz reaktor smatra varijablom, snaga potrebna za cirkulaciju tog sredstva može se prikazati relacijom

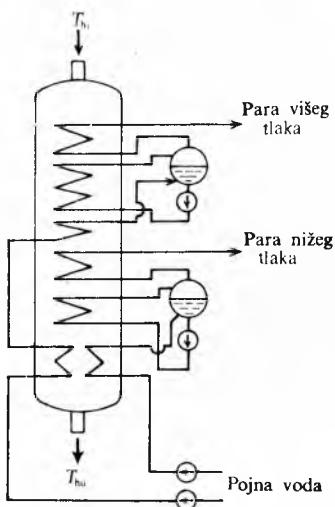
$$P_p = \frac{k_{pT}}{c_p^3 \rho^2 \Delta T_h^3} \quad (20)$$

gdje je $k_p T$ konstanta. Vrijednost umnožaka $c_p^3 \rho^2$ za plinove mnogo je manja nego za vodu, pa se snaga za cirkulaciju može smanjiti povećanjem razlike temperature ΔT_h . Relativno velika razlika temperature (150–250 K) omogućuje bolje prilagođivanje temperature rashladnog sredstva temperaturi djelatne tvari u parogeneratoru (sl. 66) ako se u parogeneratoru proizvodi pregrijana para. S pregrijanom parom postiže se bolji termički stupanj djelovanja zbog više temperature pare i praktički se eliminira problem odvođenja vlage iz turbine i zagrijavanja pare tokom ekspanzije.



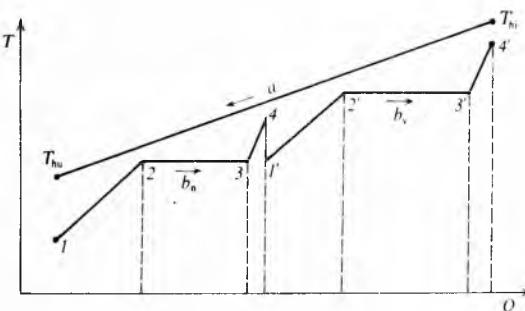
Sl. 66. TQ -dijagram procesa u parogeneratoru s proizvodnjom pregrijane pare. a rashladno sredstvo, b djelatna tvar

Budući da je razlika srednjih temperatura rashladnog sredstva i djelatne tvari (sl. 66) relativno velika, a smanjenjem je razlike poboljšava se stupanj djelovanja procesa, prilike se mogu poboljšati primjenom kružnog procesa sa dva tlaka pare. Za proizvodnju pare dvaju tlakova potrebna su dva odvojena kruga djelatne tvari u parogeneratoru (sl. 67). TQ -dijagram (sl. 68) pokazuje da se radi o dva procesa u parogeneratoru: proces nižeg tlaka 1–2–3–4 i proces višeg tlaka 1–2–1'–2'–3'–4'.



Sl. 67. Shema parogeneratora nuklearne elektrane s plinom hlađenim reaktorom sa dva tlaka pare

Na sl. 68 je prikazan TQ -dijagram procesa u parogeneratoru s proizvodnjom pregrijane pare dvaju tlakova. Prikazani su reaktorsko rashladno sredstvo (b_n) i vježna djelatna tvar (b_v). Proces je podijeljen na sljedeće fazne: 1–2–3–4 (zagrijavanje pojne vode višeg i nižeg tlaka), 2–3 (isparivanje pojne vode nižeg tlaka), 3–4 (pregrijavanje pojne vode nižeg tlaka), 1'–2' (dodatno zagrijavanje pojne vode višeg tlaka), 2'–3' (isparivanje pojne vode višeg tlaka), 3'–4' (pregrijavanje pojne vode višeg tlaka).

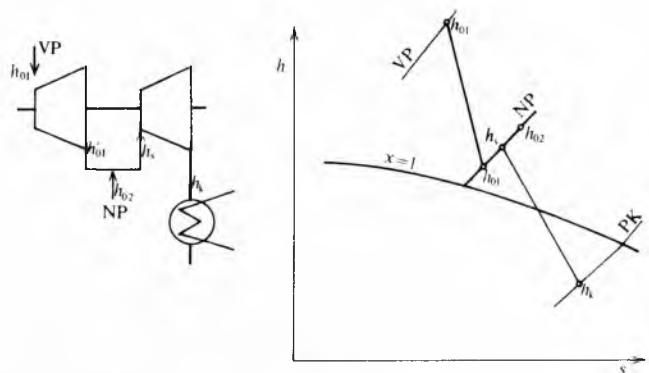


Sl. 68. TQ -dijagram procesa u parogeneratoru s proizvodnjom pregrijane pare dvaju tlakova, a reaktorsko rashladno sredstvo, b_n vježna djelatna tvar, 1–2 zagrijavanje pojne vode višeg i nižeg tlaka, 2–3 isparivanje pojne vode nižeg tlaka, 3–4 pregrijavanje pojne vode nižeg tlaka, 1'–2' dodatno zagrijavanje pojne vode višeg tlaka, 2'–3' isparivanje pojne vode višeg tlaka, 3'–4' pregrijavanje pojne vode višeg tlaka

Kružni procesi višeg i nižeg tlaka povezuju se tako da u visokotlačnom dijelu turbine ekspandira pregrijana para višeg tlaka, pa se, nakon ekspanzije do tlaka pare nižeg tlaka, ekspandirana para miješa sa svježom parom nižeg tlaka. Zatim se sva para uvodi u niskotlačni dio turbine (sl. 69).

Izvedbom parogeneratora mogu se mijenjati temperature pregrijavanja pare višeg i nižeg tlaka. Ima parogeneratora u kojima se postižu jednake temperature pregrijavanja pare i jednog i drugog tlaka.

U kružnom procesu sa dva tlaka pare parametri pare i pojne vode međusobno su ovisni. Temperaturom pojne vode određen je tlak niskotlačne pare proizvedene u parogeneratoru. Prema tome, ako je uz temperaturu pojne vode poznat tlak visokotlačne pare, ostali su parametri kružnog procesa definirani pri određenoj temperaturi rashladnog sredstva koje struji iz reaktora.



Sl. 69. hs -dijagram ekspanzije pare u turbini u procesu sa dva tlaka pare. h_{01} entalpija svježe pare višeg tlaka, h'_{01} entalpija pare nakon ekspanzije u visokotlačnom dijelu turbine, h_{02} entalpija svježe pare nižeg tlaka, h_s entalpija pare nakon miješanja, h_k entalpija pare na kraju ekspanzije

Mehanička energija dobivena od 1 kg pare višeg tlaka i od ε kg pare nižeg tlaka iznosi

$$E_{\text{meh}} = (h_{01} - h'_{01}) + (1 + \varepsilon)(h_s - h_k) - \alpha_1(h_1 - h_k) - \alpha_2(h_2 - h_k) - \dots - \alpha_n(h_n - h_k) \quad (21)$$

gdje je h_{01} entalpija svježe pare višeg tlaka, h'_{01} entalpija pare višeg tlaka nakon ekspanzije u visokotlačnoj turbinici, h_s entalpija smjese pare entalpije h'_{01} i svježe pare nižeg tlaka s entalpijom h_{02} , h_k entalpija ukupne pare nakon ekspanzije u niskotlačnoj turbinici, h_1, h_2, \dots, h_n entalpije pare na otcjepima za zagrijavanje kondenzata, a $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ količina oduzete pare za zagrijavanje kondenzata. Nakon srednjivanja izraz (21) može se napisati u obliku

$$E_{\text{meh}} = (h_{01} - h_k) \left(1 + \varepsilon \frac{h_{02} - h_k}{h_{01} - h_k} - \sum_{n=1}^n \alpha_n y_n \right); \quad (22)$$

gdje je

$$y_n = \frac{h_n - h_k}{h_{01} - h_k}. \quad (23)$$

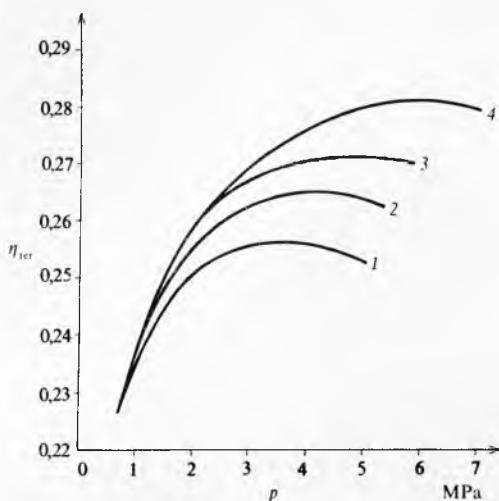
Budući da je toplina predana djelatnoj tvari $h_{01} - h_p + \varepsilon(h_{02} - h_{p'})$, termički je stupanj djelovanja

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{E_{\text{meh}}}{h_{01} - h_p + \varepsilon(h_{02} - h_p)}, \quad (24)$$

gdje je h_p entalpija pojne vode.

Za zadalu temperaturu pojne vode stupanj djelovanja kružnog procesa ovisi o tlaku pare višeg tlaka i o razlici temperaturi reaktorskog rashladnog sredstva na ulazu i izlazu iz parogeneratora (sl. 70). Za svaku razliku temperaturu reaktorskog rashladnog sredstva maksimalni stupanj djelovanja kružnog procesa postiže se za određeni tlak pare višeg tlaka. U kružnom procesu sa dva tlaka pare postiže se bolji stupanj djelovanja kružnog procesa nego s jednim tlakom pare. S druge strane, upotreba kružnog procesa sa dva tlaka pare komplicira i poskupljuje izvedbu sekundarnog kruga nuklearne elektrane. Upotreba kružnog procesa sa dva tlaka to je opravdanija što je veća razlika temperatura rashladnog sredstva na ulazu i izlazu iz parogeneratora (sl. 71).

Razlika temperatura (ΔT_h) rashladnog sredstva na izlazu i ulazu u reaktor, a to je i razlika temperatura rashladnog sredstva na ulazu i izlazu iz parogeneratora, ovisi o snazi

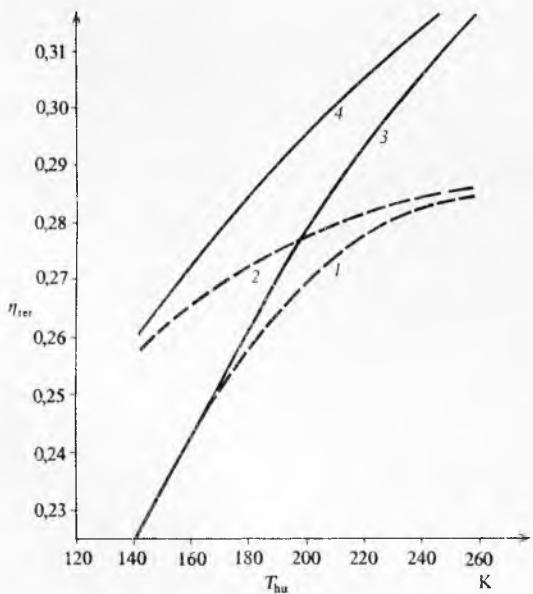


Sl. 70. Ovisnost stupnja djelovanja kružnog procesa sa dva tlaka pare o višem tlaku pare. Krivulje su izračunate za temperaturu rashladnog sredstva 648 K na izlazu iz reaktora i za sljedeće temperature rashladnog sredstva na izlazu iz parotgeneratora: 413 K (krivulja 1), 433 K (krivulja 2), 453 K (krivulja 3), 493 K (krivulja 4)

za cirkulaciju kroz primarni krug prema relaciji (20), a s povećanjem te snage smanjuje se snaga na pragu elektrane. Iskoristivost nuklearne elektrane prema snazi za cirkulaciju može se prikazati izrazom

$$\eta = \frac{P_e(1-k)}{Q_r}, \quad (25)$$

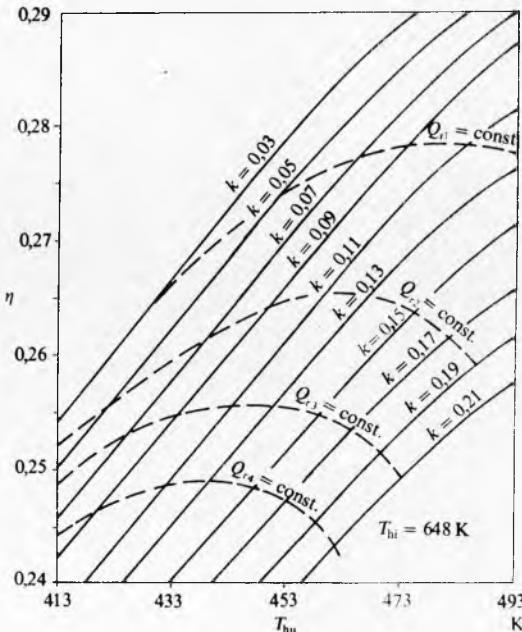
gdje je P_e snaga na pragu elektrane uvećana za snagu potrebnu za cirkulaciju rashladnog sredstva, k omjer snage za cirkulaciju P_p i snage P_e , a Q_r snaga reaktora (10). Ako se postavi da je $Q_r = Q_{pg} - \varphi k P_e$, gdje je Q_{pg} snaga predana parogeneratoru, a φ udio snage za cirkulaciju koja se predaje rashladnom sredstvu, te ako je $\eta' = Q_{pg}/P_e$, dobiva se



Sl. 71. Ovisnost stupnja djelovanja kružnog procesa s jednim i sa dva tlaka pare o izlaznoj temperaturi rashladnog sredstva iz parogeneratora (izlazna temperatura 648 K). 1 kružni proces s jednim tlakom pare bez zagrijavanja kondenzata, 2 kružni proces sa dva tlaka pare bez zagrijavanja kondenzata, 3 kružni proces s jednim tlakom pare sa zagrijavanjem kondenzata, 4 kružni proces sa dva tlaka pare i sa zagrijavanjem kondenzata

$$\eta = \frac{1-k}{1-\varphi k \eta'} \eta'. \quad (26)$$

Iz toga izraza može se odrediti iskoristivost elektrane prema izlaznoj temperaturi rashladnog sredstva iz reaktora i prema omjeru k (sl. 72). U dijagramu su i krivulje konstantne snage reaktora, pa se može odrediti i optimalna temperatura T_{hu} i optimalni omjer k , odnosno optimalna snaga za cirkulaciju rashladnog sredstva.



Sl. 72. Ovisnost iskoristivosti nuklearne elektrane o ulaznoj temperaturi rashladnog sredstva iz reaktora i o snazi za cirkulaciju tog sredstva za kružni proces sa dva tlaka pare

Kružni procesi s plinom. Razvojem plinom hlađenih visokotemperaturnih reaktora s izlaznim temperaturama plina od ~ 1100 K moguće je ostvariti kružni proces s plinom za upotrebu plinske turbine. Prednost je plinske turbine u neposrednom rashladnom krugu reaktora, u mnogo kompaktnijem postrojenju i većoj iskoristivosti elektrane. Helij je najpogodnije rashladno sredstvo i djelatna tvar jer ima dobra i nuklearna i termička svojstva. Kompleksnost postrojenja može se rastumačiti omjerom tlakova. U postrojenju s plinskom turbinom omjer maksimalnog i minimalnog tlaka plina iznosi 2...5, dok je omjer tlakova u elektrani s parnom turbinom 1500...3000.

U procesu s plinskom turbinom (v. *Elektrane*, TE 3, str. 570) reaktor zamjenjuje komore za izgaranje, a postrojenje se može izvesti s višestepenom ekspanzijom i kompresijom. U nuklearnim elektranama s reaktorom hlađenim helijem, međutim, mora se upotrijebiti zatvoreni proces, što znači da se isti plin nakon ekspanzije i hlađenja ponovno komprimira i uvodi u reaktor. Kad se upotrebljavaju konvencionalna goriva (zemni plin, loživo ulje), primjenjuje se otvoreni proces jer je tada djelatna tvar zrak, odnosno smjesa zraka i plinova izgaranja.

U visokotemperaturnim reaktorima postignuta je do sada temperatura helija od 1000 K uz tlak od 5 MPa, a analize pokazuju da je moguće i premašiti temperaturu od 1100 K uz tlak 8 MPa.

Dosadašnja iskustva s plinskim turbinama ograničena su na snage manje od 100 MW, a šira primjena plinskih turbina zahtijeva takve turbine snage najmanje 400...600 MW.

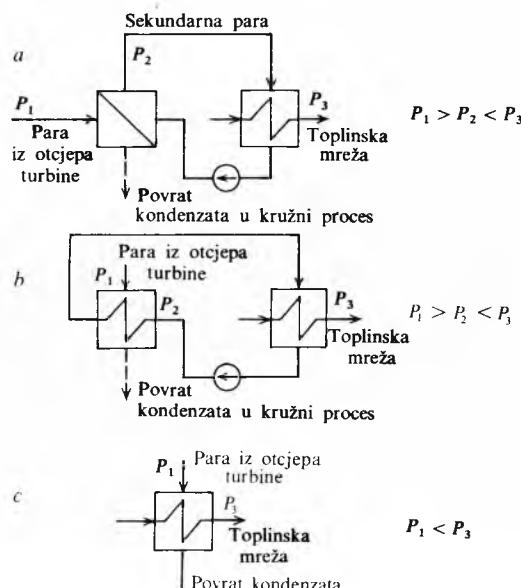
Danas je u pogonu samo jedno nuklearno postrojenje s plinskom turbinom, i to u Oberhausenu (SR Njemačka) snage 50 MW (zatvoreni kružni proces s helijem).

Upotreba nuklearnih postrojenja za kombiniranu proizvodnju električne energije i topline, odnosno samo za proizvodnju topline. Nuklearni reaktor može služiti ne samo za proizvodnju električne energije nego i za kombiniranu proizvodnju električne

energije i topline (nuklearne toplane), kao što se to ostvaruje u toplanama izgaranjem konvencionalnog goriva (v. *Elektrane, TE 3*, str. 568).

U toplani se dio pare, nakon što je djelomično ekspandirala u turbini, odvodi iz turbine i njezina se toplina iskorišćuje za tehnološke procese ili za grijanje (v. *Grijanje, TE 6*, str. 296). Veza s toplinskom mrežom, kojom se razvodi para ili vrela voda potrošaćima, ostvaruje se preko pretvarača pare ili izmjenjivača topline, kojima se toplina dovodi iz otcjepa turbine.

Shema priključka toplinske mreže na proces u nuklearnoj elektrani (sl. 73) ovisi o tome da li je u nuklearnoj elektrani primijenjen direktni ili indirektni proces. U nuklearnoj elektrani s direktnim rashladnim krugom (BWR) treba spriječiti kontaminaciju vode, odnosno pare koja odlazi u toplinsku mrežu, ali i mogućnost onečišćenja reaktorskoga rashladnog sredstva ulaskom vode iz toplinske mreže u rashladni krug reaktora. Zbog toga se ugrađuje posredni krug za prijelaz topline, u kojemu je tlak niži od tlaka u kružnom procesu nuklearne elektrane i od tlaka u toplinskoj mreži (sl. 73a i b). Kad se toplina oduzima iz sekundarnog kruga nuklearne elektrane, toplinska se mreža spaja na nuklearnu elektranu, slično kao na konvencionalnu termoelektranu (sl. 73c).

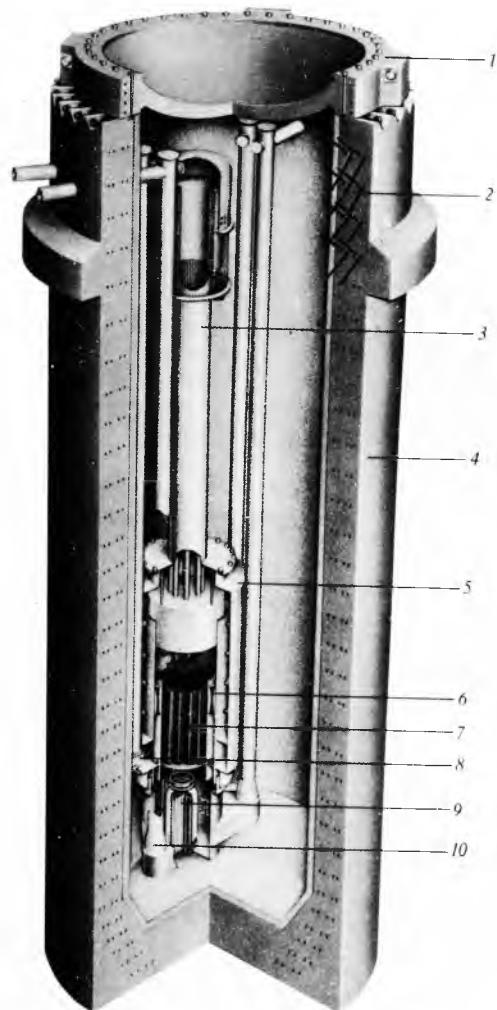


Sl. 73. Sheme priključka toplinskih mreža na kružni proces u nuklearnim elektranama. a) isparivač s posrednim krugom, b) izmjenjivač s posrednim krugom, c) neposredni krug

Toplinska energija iz nuklearnih elektrana može se upotrijebiti za desalinaciju morske vode isparivanjem. Najveće je do danas izgrađeno takvo postrojenje nuklearna elektrana Sevčenko u SSSR. Elektrana proizvodi toplinsku energiju u brzom oplodnom reaktoru hlađenom tekućim natrijem. U sekundarnom krugu rade tri protutlačne turbine snage po 50 MW s ulaznim parametrima pare 4,5 MPa, 708 K. Para u turbinama ekspandira do tlaka od 0,6 MPa, nakon čega se odvodi u isparivače morske vode.

Projektiran je posebni reaktor niskog tlaka i temperature, namijenjen samo za grijanje (sl. 74). Ulazna i izlazna temperatura rashladnog sredstva iznosi 363 K, odnosno 393 K, a tlak 0,7 MPa. Predviđaju se posebne sigurnosne mjere, jer je taj reaktor namijenjen za rad u gusto naseljenim područjima. Jedna je od njegovih karakteristika da je potopljen u armirano-betonsku posudu ispunjenu visokoboriranom vodom. Kad bi se pojavio poremećaj u normalnom hlađenju reaktorske jezgre, borirana bi voda ušla u reaktor i prestala bi lančana reakcija. Rashladno sredstvo reaktora predaje toplinu toplinskoj mreži preko posrednog rashladnog kruga (slično kao na sl. 73a).

Danas se proučava mogućnost upotrebe topline iz nuklearnih reaktora za provođenje kemijjskih procesa koji traže i mnogo

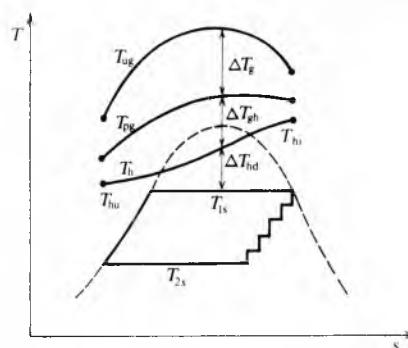


Sl. 74. Reaktor niske temperature i tlaka samo za proizvodnju toplinske energije snage 200 MW. 1 poklopac betonske posude, 2 kabeli za prednaprezanje, 3 plin pod tlakom, 4 posuda od prednapregnutog betona, 5 reaktorska posuda, 6 ograničivači protoka, 7 reaktorska jezgra, 8 izlaz reaktorskog rashladnog sredstva, 9 zaporni sloj tople vode, 10 ulaz reaktorskog rashladnog sredstva

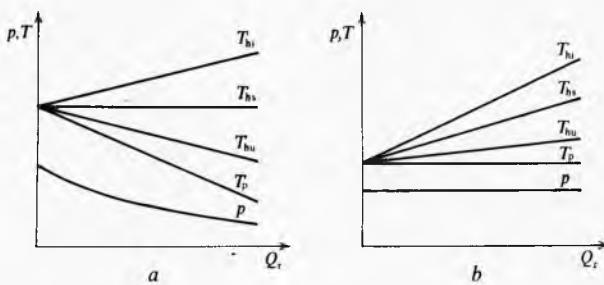
energije i visoke temperature (termoliza vodika, proizvodnja sintetskog metana i dr.).

Snaga nuklearnog energetskog postrojenja i karakteristične temperature u kružnom procesu. S termodinamičnog gledišta kružni proces u nuklearnoj elektrani odvija se između dva toplinska spremnika. Topli je spremnik nuklearno gorivo ili, u indirektnom procesu, reaktorsko rashladno sredstvo u parogeneratoru, a rashladna je voda kondenzatora hladni spremnik.

U nuklearnoj elektrani mogu se definirati sljedeće srednje temperature (sl. 75): T_{ugs} srednja temperatura nuklearnog goriva

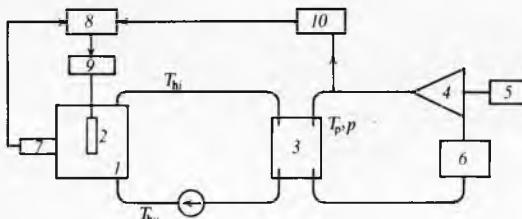


Sl. 75. Karakteristične temperature i temperaturne razlike u nuklearnoj elektrani



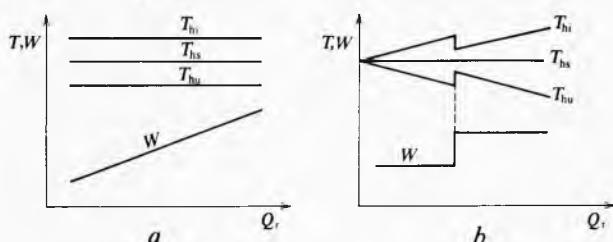
Sl. 77. Regulacija opterećenja nuklearne elektrane. a) regulacija uz konstantnu srednju temperaturu reaktorskog rashladnog sredstva, b) regulacija uz konstantan tlak pare, T_{hi} , T_{hs} , T_{hu} izlazna, srednja i ulazna temperatura rashladnog sredstva, T_p temperatura pare, p tlak pare, Q_r snaga reaktora

Regulacija snage reaktora uz konstantnu srednju temperaturu rashladnog sredstva (sl. 77) slična je, što se tiče promjene temperature u reaktoru, prirodoj samoregulaciji reaktora s negativnim temperaturnim koeficijentom reaktivnosti. Zbog toga takva regulacija zahtijeva malu intervenciju regulacijskih mehanizama. Osim toga uz konstantnu prosječnu temperaturu ne mijenja se volumen rashladnog sredstva u toku rada reaktora, te volumen tlačnog spremnika može biti relativno malen. Mana je takve regulacije, koja je inače veoma dobra s gledišta funkcionalnosti primarnog kruga nuklearne elektrane, da se tlak pare u sekundarnom krugu smanjuje s porastom opterećenja. Za rad sekundarnog kruga nuklearne elektrane mnogo je povoljnija regulacija opterećenja uz konstantan tlak pare (sl. 77b), ali se tada povišuju sve temperature u primarnom krugu s povećanjem opterećenja. U praksi se traži kompromis između tih dvaju kriterija za regulaciju snage reaktora. Optimalna se promjena referentne srednje temperature rashladnog sredstva programira, naime, u generatoru referentnog signala u funkciji opterećenja elektrane (sl. 78).



Sl. 78. Principijelna blok-shema regulacije opterećenja nuklearne elektrane uz konstantni protok reaktorskog rashladnog sredstva. 1 reaktor, 2 regulacijske šipke, 3 parogenerator, 4 turbina, 5 generator, 6 kondenzator, 7 neutronski detektor, 8 komparator signala, 9 generator signala za pokretanje regulacijskih šipki, 10 generator signala proporcionalnog traženoj snazi reaktora

Regulacija snage reaktora kontinuiranom promjenom protoka rashladnog sredstva osigurava nepromijenjene temperature rashladnog sredstva u reaktoru i pri promjeni njegove snage (sl. 79 a). Kontinuiranu promjenu protoka, međutim, dosta je teško ostvariti, jer zahtijeva kontinuiranu regulaciju brzine vrtnje pumpi, odnosno plinskih puhalo velike snage. Lakše je, naime, izvesti skokovitu promjenu protoka pomoću motora s dvije brzine vrtnje (sl. 79 b).

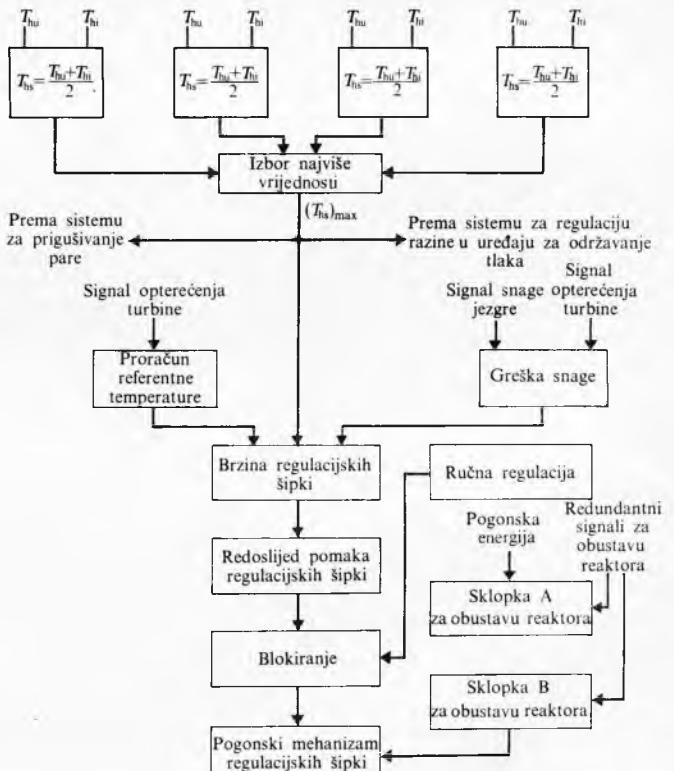


Sl. 79. Regulacija opterećenja nuklearne elektrane promjenom protoka reaktorskog rashladnog sredstva, a) kontinuirana promjena protoka, b) skokovita promjena protoka, T_{hi} , T_{hs} , T_{hu} izlazna, srednja i ulazna temperatura rashladnog sredstva, W protok rashladnog sredstva, Q_r snaga reaktora

Regulacija snage nuklearne elektrane s reaktorom s vodom pod tlakom (PWR) shematski je prikazana na sl. 80. Uzlatni signali u programator koji određuje brzinu i redoslijed kretanja regulacijskih šipki jesu: a) izmjerena srednja temperatura rashladnog sredstva T_{hs} ; srednje se temperature mjere u svim primarnim krugovima i odabire najviša izmjerena vrijednost $T_{hs\ max}$ kao mjerodavna, b) programirana vrijednost $T_{hs\ ref}$ za zadanu snagu, c) snaga reaktora Q_r i d) opterećenje turbine Q_t . Signal pogreške koji određuje brzinu kretanja regulacijskih šipki formira se prema relaciji

$$\Delta = (T_{hs\ max} - T_{hs\ ref}) + K_1 \left(\frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_r}{dt} \right) + K_2 (Q_t - Q_r), \quad (36)$$

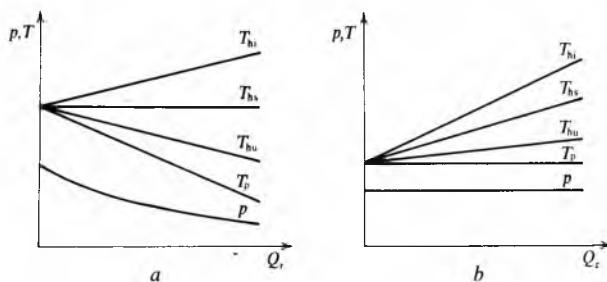
gdje su K_1 i K_2 faktori pojačanja. Prema tome, pojačanje signala raste s porastom razlike brzina promjene opterećenja turbine (dQ_t/dt) i promjene snage reaktora (dQ_r/dt), te s porastom razlike između opterećenja turbine i snage reaktora. Brzina kretanja regulacijskih šipki s obzirom na vrijednost signala greške određena je programiranim dijagramom, prema kojem je područje neosjetljivosti određeno vrijednošću signala greške u granicama $-0,8K \leq \Delta \leq 0,8K$, područje konstantne brzine kretanja šipki u granicama $0,8K < \Delta \leq 1,6K$, područje linearne povećanja kretanja šipki u granicama $1,6K < \Delta \leq 2,7K$, a za veće vrijednosti signala greške ($\Delta > 2,7K$) šipke se kreću maksimalnom brzinom.



Regulacija opterećenja nuklearnih elektrana s reaktorom s vodom pod tlakom omogućuje promjenu snage od 5%/min u granicama od 15 do 100% maksimalne snage. Sporije promjene reaktivnosti (npr. zbog izgaranja nuklearnog goriva) reguliraju se promjenom koncentracije bora u rashladnom sredstvu reaktora. Tokom normalnog pogona s konstantnim opterećenjem regulacijske šipke najčešće su izvučene iz jezgre reaktora.

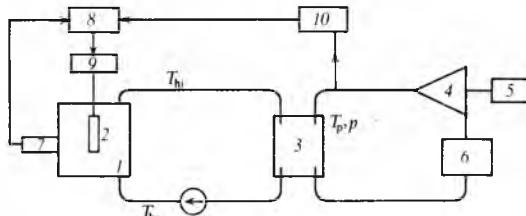
Dinamika rashladnog sustava. Zbog ovisnosti reaktivnosti reaktora o temperaturi (temperaturni koeficijent reaktivnosti) promjene temperature u rashladnom sustavu reaktora povratno djeluju i na snagu reaktora, pa zbog toga i na snagu na pragu elektrane. Zato proučavanje stabilnosti rada nuklearnog energetskog postrojenja traži dinamičku analizu termičkih pro-

NUKLEARNA ENERGETSKA POSTROJENJA



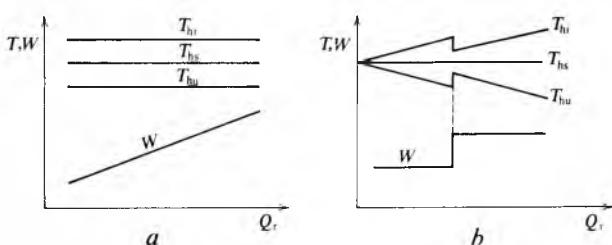
Sl. 77. Regulacija opterećenja nuklearne elektrane. a) regulacija uz konstantnu srednju temperaturu reaktorskog rashladnog sredstva, b) regulacija uz konstantan tlak pare. T_{hi} , T_{hs} , T_{hu} izlazna, srednja i ulazna temperatura rashladnog sredstva, T_p temperatura pare, p tlak pare, Q_r snaga reaktora

Regulacija snage reaktora uz konstantnu srednju temperaturu rashladnog sredstva (sl. 77) slična je, što se tiče promjene temperature u reaktoru, prirodnoj samoregulaciji reaktora s negativnim temperaturnim koeficijentom reaktivnosti. Zbog toga takva regulacija zahtijeva malu intervenciju regulacijskih mehanizama. Osim toga uz konstantnu prosječnu temperaturu ne mijenja se volumen rashladnog sredstva u toku rada reaktora, te volumen tlačnog spremnika može biti relativno malen. Mana je takve regulacije, koja je inače veoma dobra s gledišta funkcionalnosti primarnog kruga nuklearne elektrane, da se tlak pare u sekundarnom krugu smanjuje s porastom opterećenja. Za rad sekundarnog kruga nuklearne elektrane mnogo je povoljnija regulacija opterećenja uz konstantan tlak pare (sl. 77b), ali se tada povišuju sve temperature u primarnom krugu s povećanjem opterećenja. U praksi se traži kompromis između tih dvaju kriterija za regulaciju snage reaktora. Optimalna se promjena referentne srednje temperature rashladnog sredstva programira, naime, u generatoru referentnog signala u funkciji opterećenja elektrane (sl. 78).



Sl. 78. Principijelna blok-shema regulacije opterećenja nuklearne elektrane uz konstantni protok reaktorskog rashladnog sredstva, 1 reaktor, 2 regulacijske šipke, 3 parogenerator, 4 turbina, 5 generator, 6 kondenzator, 7 neutronski detektor, 8 komparator signala, 9 generator signala za pokretanje regulacijskih šipki, 10 generator signala proporcionalnog traženoj snazi reaktora

Regulacija snage reaktora kontinuiranom promjenom protoka rashladnog sredstva osigurava nepromijenjene temperature rashladnog sredstva u reaktoru i pri promjeni njegove snage (sl. 79a). Kontinuiranu promjenu protoka, međutim, dosta je teško ostvariti, jer zahtijeva kontinuiranu regulaciju brzine vrtanja pumpi, odnosno plinskih puhalo velike snage. Lakše je, naime, izvesti skokovitu promjenu protoka pomoću motora s dviće brzine vrtanja (sl. 79b).

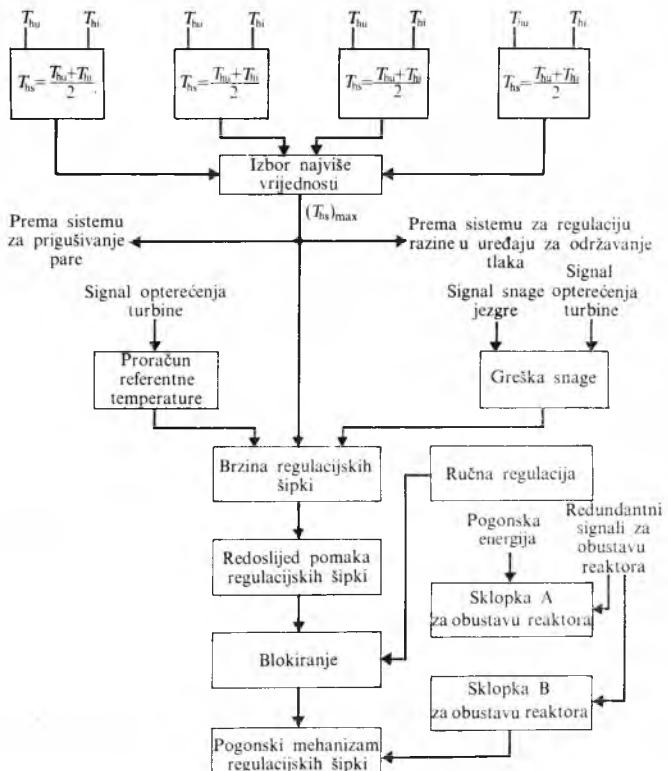


Sl. 79. Regulacija opterećenja nuklearne elektrane promjenom protoka reaktorskog rashladnog sredstva. a) kontinuirana promjena protoka, b) skokovita promjena protoka, T_{hi} , T_{hs} , T_{hu} izlazna, srednja i ulazna temperatura rashladnog sredstva, W protok rashladnog sredstva, Q_r snaga reaktora

Regulacija snage nuklearne elektrane s reaktorom s vodom pod tlakom (PWR) shematski je prikazana na sl. 80. Uzlatni signali u programator koji određuje brzinu i redoslijed kretanja regulacijskih šipki jesu: a) izmjerena srednja temperatura rashladnog sredstva T_{hs} ; srednje se temperature mjere u svim primarnim krugovima i odabire najviša izmjerena vrijednost $T_{hs\ max}$ kao mjerodavna, b) programirana vrijednost $T_{hs\ ref}$ za zadanu snagu, c) snaga reaktora Q_r i d) opterećenje turbine Q_t . Signal pogreške koji određuje brzinu kretanja regulacijskih šipki formira se prema relaciji

$$\Delta = (T_{hs\ max} - T_{hs\ ref}) + K_1 \left(\frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_r}{dt} \right) + K_2 (Q_t - Q_r), \quad (36)$$

gdje su K_1 i K_2 faktori pojačanja. Prema tome, pojačanje signala raste s porastom razlike brzinā promjene opterećenja turbine (dQ_t/dt) i promjene snage reaktora (dQ_r/dt), te s porastom razlike između opterećenja turbine i snage reaktora. Brzina kretanja regulacijskih šipki s obzirom na vrijednost signala greške određena je programiranim dijagramom, prema kojem je područje neosjetljivosti određeno vrijednošću signala greške u granicama $-0,8K \leq \Delta \leq 0,8K$, područje konstantne brzine kretanja šipki u granicama $0,8K < \Delta \leq 1,6K$, područje linearnog povećanja kretanja šipki u granicama $1,6K < \Delta \leq 2,7K$, a za veće vrijednosti signala greške ($\Delta > 2,7K$) šipke se kreću maksimalnom brzinom.



Sl. 80. Blok-shema regulacije snage nuklearne elektrane s reaktorom koji je hladen i moderiran vodom pod tlakom (PWR)

Regulacija opterećenja nuklearnih elektrana s reaktorom s vodom pod tlakom omogućuje promjenu snage od 5%/min u granicama od 15 do 100% maksimalne snage. Sporije promjene reaktivnosti (npr. zbog izgaranja nuklearnog goriva) reguliraju se promjenom koncentracije bora u rashladnom sredstvu reaktora. Tokom normalnog pogona s konstantnim opterećenjem regulacijske šipke najčešće su izvučene iz jezgre reaktora.

Dinamika rashladnog sustava. Zbog ovisnosti reaktivnosti reaktora o temperaturi (temperaturni koeficijent reaktivnosti) promjene temperature u rashladnom sustavu reaktora povratno djeluju i na snagu reaktora, pa zbog toga i na snagu na pragu elektrane. Zato proučavanje stabilnosti rada nuklearnog energetskog postrojenja traži dinamičku analizu termičkih pro-

mjena u gorivu i rashladnom sredstvu te njihova utjecaja na cijelo postrojenje. U tu svrhu treba postaviti jednadžbe koje prikazuju te promjene. U veoma pojednostavljrenom obliku to su sljedeće jednadžbe:

za gorivo:

$$Q_r = k_1 \frac{dT_g}{dt} + k_2(T_g - T_{hs}), \quad (37)$$

za rashladno sredstvo:

$$k_2(T_g - T_{hs}) = k_3 \frac{dT_{hs}}{dt} + k_4(T_{hi} - T_{hu}), \quad (38)$$

za cjevovod između reaktora i parogeneratora:

$$T_{hgu} = T_{hi}(t - \tau_1), \quad (39)$$

$$T_{hu} = T_{hgi}(t - \tau_2), \quad (40)$$

za parogenerator:

$$k_5(T_{hgu} - T_{hgi}) = k_6(T_{hgs} - T_p), \quad (41)$$

$$k_6 \frac{dT_p}{dt} = k_6(T_{hgs} - T_p) - k_7 pG_p. \quad (42)$$

U tim jednadžbama još nedifinirane oznake znači: T_{hgu} , T_{hgi} ulazna, izlazna i srednja temperatura reaktorskog rashladnog sredstva u parogeneratoru, T_g temperatura goriva, T_p p i G_p temperatura, tlak i količina pare proizvedene u parogeneratoru, τ_1 i τ_2 trajanje prolaza rashladnog sredstva kroz cjevovode od reaktora do parogeneratora, odnosno od parogeneratora do reaktora, te k_1, k_2, \dots, k_7 konstante ovisne o dimenzijama uređaja i o svojstvima materijala. Pomoću tih jednadžbi mogu se odrediti prijelazne funkcije (v. *Regulacija, automatska*) za elemente reaktorskog postrojenja kojima je opisano dinamičko ponašanje tih elemenata.

Analiza dinamičkog ponašanja reaktora s kipućom vodom komplikiranija je od takve analize za reaktore s vodom pod tlakom. U reaktoru s kipućom vodom s promjenom snage mijenja se i prosječna gustoća rashladnog sredstva (smjesa vode i pare) u jezgri, što utječe na reaktivnost reaktora. Smanjenjem gustoće moderatora, odnosno s povećanjem omjera volumena pare i vode u jezgri, smanjuje se, naime, reaktivnost reaktora. Povećanjem opterećenja turbine povećava se i količina pare koja se odvodi iz reaktora, a zbog toga i intenzitet isparavanja vode u jezgri. Iz navedenog proizlazi da reaktor na povećanje opterećenja turbine reagira smanjenjem vlastite snage. Utjecaj promjene gustoće moderatora na reaktivnost reaktora s kipućom vodom suprotan je utjecaju negativnih temperaturnih koeficijenata reaktivnosti. Temperaturni koeficijent reaktivnosti reaktora s kipućom vodom ima također negativnu vrijednost, a njegovo djelovanje djelomično kompenzira utjecaj promjene gustoće moderatora.

Ponašanje reaktora s kipućom vodom iz kojeg se para neposredno dovodi parnoj turbini može, zbog svega toga, nepovoljno djelovati na stabilan rad nuklearne elektrane. Poboljšanje stabilnosti postiže se: a) djelovanjem regulacijskog sustava (uključujući i recirkulaciju), b) izvedbom kombiniranoga kružnog procesa voda – para sa spremnikom vrele vode izvan jezgre i c) oduzimanjem konstantne količine pare iz reaktora tako da se višak pare odvodi u kondenzator.

Stavljanje u pogon i obustava nuklearnog energetskog postrojenja. Za stavljanje u pogon nuklearnog energetskog postrojenja potrebne su opsežne pripreme za sigurno postizavanje kritičnosti reaktora i za povećanje snage do nominalne razine. Potrebno je, osim toga, razlikovati stavljanje reaktora u pogon iz hladnog stanja, tj. nakon dulje obustave pogona, i stavljanje u pogon iz vrućeg stanja, tj. neposredno nakon ispada iz pogona (tabl. 7 i 8).

Prije stavljanja u pogon iz hladnog stanja tlačni je spremnik napunjen vodom. Reaktorsko postrojenje održava se pomoću sustava volumne i kemijske kontrole na tlaku od $\sim 2,8$ MPa. To je minimalni tlak koji dozvoljava stavljanje u pogon

Tablica 7
ZAHVATI POTREBNI ZA POSTIZANJE PUNE SNAGE NUKLEARNE ELEKTRANE PRI STAVLJANJU U POGON IZ TOPLOG I HLADNOG STANJA I NJIHOVO TRAJANJE

	Iz toplog stanja	Iz hladnog stanja
Povišenje tlaka u primarnom krugu na 2,8 MPa i zagrijavanje vode električnim grijalima u tlačnom spremniku do temperature zasićenja	—	6,5 h
Formiranje parnog jastuka u tlačnom spremniku drenažom vode do 25% volumena spremnika, uz održavanje temperaturu zasićenja koja odgovara tlaku od 2,8 MPa	—	2,0 h
Izvlačenje regulacijskih šipki do postizanja kritičnosti reaktora	0,5 h	0,5 h
Postizanje nominalnog tlaka i temperature u primarnom krugu nuklearne elektrane (15,7 MPa, 564 K). Tokom povišenja temperature i tlaka u primarnom krugu počinje proizvodnja pare u parogeneratorima i pokretanje turbine	—	3,5 h
Povećanje snage nuklearne elektrane do punog iznosa. To je povećanje ograničeno termičkim naprezanjima u turbinu (navedeno trajanje povećanja snage odnosi se samo na ograničenja primarnog kruga)	0,5 h	0,5 h
Ukupno	1,0 h	13,0 h

Tablica 8
KARAKTERISTIKE REAKTORA S VODOM POD TLAKOM PRI STAVLJANJU U POGON IZ HLADNOG I IZ TOPLOG STANJA

	Hladno stanje	Toplo stanje
Temperatura u reaktoru Tlak u primarnom krugu Stanje u tlačnom spremniku, ispunjenost Temperatura u tlačnom spremniku	330 K 2,8 MPa 100% 330 K	564 K 5 – 7 MPa 25% 617 K

reaktorskih rashladnih pumpi. Sustav volumne i kemijske kontrole napunjen je vodom s jednakom koncentracijom bora kao i voda u reaktoru. U rezervoaru toga sustava nalazi se dušik iznad razine vode, a pri stavljanju u pogon treba dušik zamjeniti vodikom. Signali su sustava za zaštitno hlađenje jezgre blokirani kako ne bi proradili zbog niskog tlaka u jezgri.

Opterećenje nuklearne elektrane regulira se ručno do 15% od nominalne snage, a zatim automatski.

Obustavljanje nuklearne elektrane odvija se obrnutim redom od stavljanja u pogon. Osnovni zahvati pri obustavljanju nuklearne elektrane jesu: a) smanjenje opterećenja elektrane na 15% od nominalne snage i prebacivanje s automatske na ručnu regulaciju, b) prebacivanje opskrbe vlastitog potroška s otcepa na generatoru na mrežu, c) rasterećenje turboagregata i odvajanje generatora od mreže, d) obustava reaktora regulacijskim i zaustavnim šipkama, povećanje koncentracije bora u rashladnom sredstvu reaktora do iznosa koji je potreban za hladni reaktor, e) otvaranje obilaznog parovoda za odvođenje svježe pare u kondenzator; protok pare se regulira na iznos koji osigurava hlađenje primarnog kruga uz sniženje temperature od ~ 27 K na sat, f) isključivanje električnih grijala u tlačnom spremniku i smanjenje tlaka ubrizgavanjem vode u parni prostor, g) blokiranje sustava za zaštitno hlađenje jezgre, h) stavljanje u pogon sustava za odvod zaostale topline kad temperatura i tlak u primarnom krugu dostignu vrijednosti od 450 K i 2,8 MPa i i) punjenje sekundarne strane parogeneratora vodom kad temperatura reaktorskog rashladnog sredstva postane niža od 365 K. Trajanje obustave i hlađenje nuklearne elektrane iznosi ~ 20 h.

Opskrba vlastitog potroška u nuklearnoj elektrani. Sustav za opskrbu vlastitog potroška u nuklearnoj elektrani mora biti

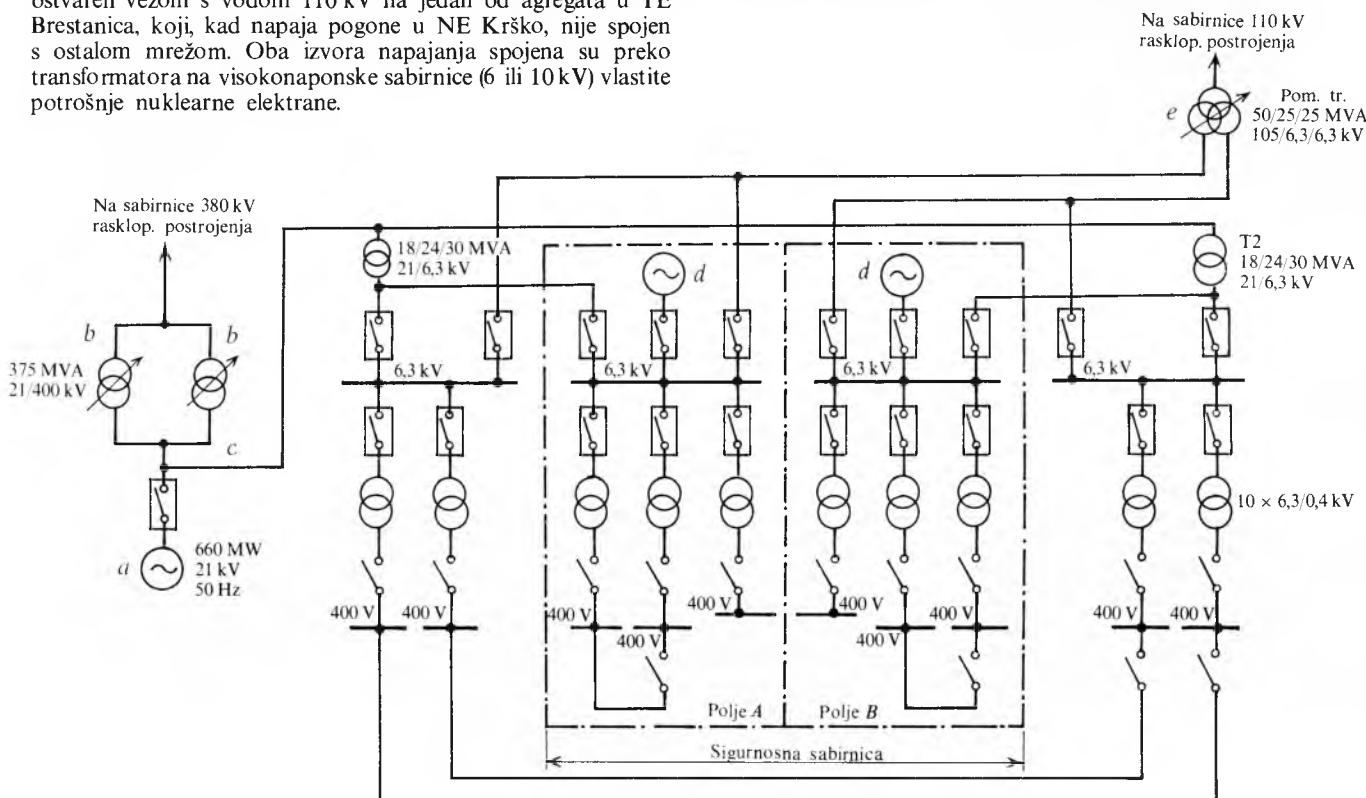
NUKLEARNA ENERGETSKA POSTROJENJA

pouzdan i mora sadržavati dovoljnu redundantnost, tako da prestanak opskrbe iz jednog od izvora napajanja ne ugrozi sigurno napajanje najvažnijih pogona u elektrani. Taj se uvjet mora zadovoljiti radi osiguranja postrojenja, a može biti ispunjen ako se za opskrbu vlastitog potroška u nuklearnoj elektrani predvide, osim glavnih, i pomoćni, neovisni izvori napajanja. Glavni je izvor napajanja otcjep na generatoru nuklearne elektrane, spojen preko kućnih transformatora na mrežu vlastitog potroška (sl. 81). Iz pomoćnog izvora napajaju se pogoni u nuklearnoj elektrani kad generator nije u pogonu ili kad je prekinuta glavna veza nuklearne elektrane s vanjskom električnom mrežom. U NE Krško pomoći je izvor napajanja ostvaren vezom s vodom 110 kV na jedan od agregata u TE Brestanica, koji, kad napaja pogone u NE Krško, nije spojen s ostalom mrežom. Oba izvora napajanja spojena su preko transformatora na visokonaponske sabirnice (6 ili 10 kV) vlastite potrošnje nuklearne elektrane.

od hladnog starta do punog opterećenja). Dizelski agregat (u NE Krško snage $2 \times 3,5 \text{ MW}$) mora osigurati napajanje najbitnijih potrošača i pri potpunoj izolaciji nuklearne elektrane od vanjske mreže (raspad sustava).

Električne instalacije za opskrbu vlastitog potroška u nuklearnoj elektrani izvode se tako da se električni aparati i kabeli za napajanje sigurnosnih sustava vode odijeljeno da ne bi kvar ili požar na jednom ugrozio rad drugog sustava.

Uređaji koji se napajaju iz mreže niskog napona, a koji su bitni za sigurnost (instrumentacija, upravljanje i potrebna rasvjeta) upskrbljuju se sa sigurnosnim sabirnicama preko odvojenih transformatora. Kao rezervni izvor napajanja tih potrošača



Sl. 81. Shema mreže za napajanje vlastitog potroška u NE Krško. a glavni generator, b mrežni transformatori, c otcjep na generatoru, d dizelski agregati, e pomoći transformator za vezu s mrežom 110 kV

U normalnom pogonu sabirnice napaja vlastiti generator, a pomoći izvor napajanja automatski se uključuje kad prestanje dobava iz toga generatora. Pomoći je izvor napajanja bitan pri stavljanju elektrane u pogon. Predviđena je i mogućnost da pomoći izvor napajanja opskrbljuje dio vlastite potrošnje i u toku normalnog pogona.

S visokonaponskim sabirnicama napajaju se veliki motori, velika električna grijala, sigurnosne sabirnice i transformatori za napajanje niskonaponskih sabirnica vlastite potrošnje.

Visokonaponske sabirnice moraju se sastojati najmanje od dva odvojena sustava sabirnica, od kojih se svaki može potpuno opskrbiti iz glavnog i iz pomoćnog izvora napajanja. Nuklearna elektrana, osim toga, mora imati i odvojene sigurnosne sabirnice (sl. 81) s kojih se opskrbljuju oni pogoni kojima je rad bitan za sigurnost reaktorskog postrojenja. Sigurnosne sabirnice moraju također imati najmanje dva neovisna sustava sabirnica, od kojih je svaki moguće napajati s visokonaponskih sabirnica vlastite potrošnje i iz jednog od kućnih dizelskih agregata.

Sa sigurnosnih sabirnica napajaju se pumpe za zaštitno hlađenje jezgre, pumpe za odvođenje zaostale topline, sustav za hlađenje nuklearnih komponenata, specijalni ventilacijski stvari, instrumenti za mjerjenje, regulacijski uređaji i drugi uređaji u nuklearnoj elektrani koji su bitni za sigurnost postrojenja i okoliša. Na svaku je sigurnosnu sabirnicu priključen generator dizelskog agregata s brzim startom (10–12 sekunda

postoje akumulatorske baterije koje se pune preko agregata priključenih na sigurnosne sabirnice. Izmjenična struja potrebna za zaštitni sustav reaktora može se dobiti i pretvorbom istosmjerne struje iz akumulatorskih baterija preko invertora.

SIGURNOST I UTJECAJ NA OKOLIŠ

U nuklearnim energetskim postrojenjima postoji velika količina radioaktivnih materijala, nastalih najviše raspadom jezgara nuklearnog goriva. Osnovni je zahtjev pri projektiranju nuklearnog energetskog postrojenja, sa gledišta sigurnosti, da radioaktivni proizvodi u svim pogonskim situacijama i prilikom izmjene goriva ostanu sigurno izolirani od okoliša. Pouzdana zaštita okoliša postiže se primjenom višestrukih barijera kojima se sprečava ispuštanje radioaktivnih materijala iz reaktorskog postrojenja u okoliš.

Može se smatrati da u nuklearnom energetskom postrojenju postoje barijere u gorivu, zatim barijere stvaraju obloge gorivih elemenata, zatvoreni rashladni sustav reaktora i sigurnosni štit. U zaštitno djelovanje može se uključiti i izbor lokacije i postupci koji se poduzimaju pri velikim oštećenjima.

Gorivo. Fizijski proizvodi nastaju unutar gorivih elemenata. Gorivo zadržava većinu tih proizvoda. Samo plinoviti fizijski proizvodi (uglavnom izotopi joda, kriptona i ksenona) mogu izići iz goriva i skupljati se u zazoru između tableta uran-oksida i obloge gorive šipke. Oslobođanje plinovitih fizijskih

proizvoda iz goriva ovisi o temperaturi i odgoru (iskorištenju) goriva. Do odgora uran-oksida od $\sim 20 \text{ MW d/kg}$ i pri temperaturi nižoj od 1950 K manje od 1% plinovitih fisijskih proizvoda izlazi iz goriva. Pri višim temperaturama količina fisijskih proizvoda, iz kojih se oslobađaju radioaktivni plinovi, naglo raste. Na temperaturi od $\sim 3000 \text{ K}$ uran-oksid se tali i praktički svi plinoviti fisijski proizvodi izlaze iz njega.

Obloge gorivih elemenata jesu metalne cijevi od cirkonija ili nerđajućeg čelika (u visokotemperaturnim reaktorima obloge su od grafita). One zadržavaju fisijske proizvode unutar gorivih šipki. U toku pogona reaktora neke od gorivih šipki propuštaju fisijske proizvode kroz oblogu (statistički $\sim 0,1\%$). Ako se zbog gubitka hlađenja rastale obloge gorivih šipki, plinoviti fisijski proizvodi iz tih šipki dospijevaju u hladilo reaktora.

Zatvoreni rashladni sustav reaktora. U svim nuklearnim energetskim postrojenjima reaktorsko rashladno sredstvo kruži u zatvorenom krugu, pa stjenke toga kruga predstavljaju sigurnosnu barijeru. Dio rashladnog sredstva kontinuirano se izdvaja radi pročišćivanja od fisijskih i korozijskih proizvoda.

Sigurnosni štit (containment) štiti okoliš od fisijskih proizvoda pri gubitku hermetičnosti zatvorenog kruga reaktorskoga rashladnog sredstva. Sigurnosni štit mora izdržati tlak i temperaturu koji se mogu u njemu pojaviti pri oštećenju neke od komponenata rashladnog sustava reaktora. Kad unutar sigurnosnog štita naraste tlak, on propušta dio svoga sadržaja u okoliš ($\sim 0,1\% \dots 0,2\%$ volumena na dan). Tlak se može smanjiti, a time i propuštanje u okoliš, uprskivanjem hladne vode u prostor unutar sigurnosnog štita da bi se dio pare kondenzirao. Nuklearne elektrane s reaktorom s vodom pod tlakom imaju cijeli primarni sustav obuhvaćen zaštitnim štitom. U nuklearnim elektranama s reaktorom koji se hlađi i moderira kipućom vodom u sigurnosni štit je zatvorena samo reaktorska posuda sa sustavom za unutrašnju recirkulaciju. Visokotemperaturni reaktori imaju sigurnosni štit od prednapregnutog betona kojim je obuhvaćen reaktor i paragenerator.

Lokacija nuklearne elektrane mora biti sigurna od prirodnih katastrofa (u prvom redu od potresa) i u njezinoj blizini ne smije biti većih naselja. Izbor lokacije također je barijera protiv prodiranja fisijskih proizvoda do stanovništva u okolini nuklearne elektrane.

Evakuacija stanovništva u široj okolini nuklearne elektrane krajnji je postupak pri većem oštećenju na postrojenju i kad istodobno ne djeluju uspješno sve navedene barijere protiv prodiranja fisijskih proizvoda do naselja u široj okolini oko nuklearne elektrane. Da bi došlo do takve situacije skoro je nemoguće.

Sigurnosne razine. Koncepcija višestrukih barijera osnova je za projektiranje sigurnosnih sustava nuklearne elektrane. Pri projektiranju je potrebno predvidjeti da nijedna barijera ne izgubi svoju funkciju i u nenormalnim situacijama, kao što su kvarovi na opremi, ljudske greške ili prirodni fenomeni. U SAD je prihvaćena koncepcija projekta sa tri sigurnosne razine koje osiguravaju zaštitu u dubinu svake od sigurnosnih barijera.

Prva sigurnosna razina zasniva se na postulatu da projekt mora pružiti maksimalnu sigurnost u svim pogonskim situacijama i maksimalnu toleranciju kad ne funkcionišu pojedini sustavi. Potrebno je prihvatiti samo sigurna i provjerena rješenja, posvetiti punu pažnju kvaliteti opreme, osigurati redundantnost opreme i sustava te mogućnost inspekcije i testiranja kvalitete i funkcionalnosti i tokom stavljanja u pogon i u toku pogona. Prva sigurnosna razina zahtijeva potrebe postupke pri projektiranju, gradnji i nadzoru u toku pogona, koji će spriječiti kvarove na postrojenju i gubitak njegove funkcionalnosti.

Iz prve sigurnosne razine proizlaze sljedeća pravila: *a)* reaktor mora imati negativni temperaturni koeficijent reaktivnosti, *b)* odabrani materijali moraju imati dobro poznata svojstva; materijali goriva rashladnog sredstva i sigurnosnih sustava moraju zadržati svoja svojstva i nakon odzračivanja i u svim pogonskim uvjetima, *c)* instrumentacija i regulacija

postrojenja mora osigurati kontrolu i uvid u stanje postrojenja u svim situacijama; dovoljna redundatnost instrumentacije treba da omogući da i pri kvaru najbitnijih instrumenata operator prima dovoljno informacija za sigurnu obustavu pogona reaktora, *d)* pri gradnji elektrane treba primijeniti najviša dostignuća inženjerske prakse i *e)* komponente opreme moraju biti konstruirane i izvedene tako da omoguće njihovu periodičku provjeru u toku pogona.

Druga sigurnosna razina zasniva se na postulatu da je potrebno pretpostaviti da se usprkos svih opreznosti pri projektiranju, gradnji i pogonu nuklearne elektrane mogu pojaviti kvarovi, pa u elektrani moraju postojati sigurnosni sustavi koji štite pogonsku posudu i okoliš pri takvim kvarovima. Da bi se postigla druga sigurnosna razina, u nuklearnoj elektrani moraju postojati: *a)* sustav za zaštitno hlađenje reaktorske jezgre; taj sustav sprečava taljenje goriva i ispuštanje fisijskih proizvoda iz gorivih šipki nakon gubitka reaktorskoga rashladnog sredstva, *b)* redundantni uređaji za obustavljanje reaktora kad neke od regulacijskih šipki ostanu zaglavljene izvan jezgre i *c)* rezervno napajanje električnom energijom; nuklearna elektrana, naime, mora imati pouzdan izvor električne energije koji je neovisan o radu reaktora. Taj izvor služi za napajanje sustava za zaštitno hlađenje jezgre, prijevo potrebnih sigurnosnih sustava i instrumentacije. Nuklearna elektrana mora imati osigurano vanjsko napajanje električnom energijom (dva neovisna vanjska izvora) i unutrašnje napajanje (dva ili tri dizelska agregata koji se vrlo brzo mogu staviti u pogon). Nadalje, nuklearna elektrana mora imati neovisan unutrašnji izvor istosmjerne struje (akumulatorska baterija) za napajanje najpotrebnije instrumentacije.

Treća sigurnosna razina zasniva se na postulatu da je potrebno pretpostaviti dovoljnu zaštitu okolišu i pri graničnom hipotetičnom oštećenju i kad istodobno prestane djelovanje nekih zaštitnih sustava. Ta treća sigurnosna razina nadopunjuje prve dvije, jer ona zahtijeva zaštitu okoliša nuklearne elektrane i pri najtežem hipotetički mogućem kvaru i ugradnjom rezerve u zaštitnim sustavima.

Najteži kvarovi u reaktorskom postrojenju koji su hipotetički još mogući imaju veoma malu vjerojatnost nastanka. Takvi su kvarovi definirani u sigurnosnim propisima za projektiranje nuklearnih elektrana. Za reaktore s vodom pod tlakom računa se da je odrez primarnog cjevovoda najveći mogući kvar.

Prikazani principi sigurnosti nuklearnih energetskih postrojenja osnova su propisa za projektiranje, izradbu opreme, ispitivanje i pogon nuklearnih elektrana. U SAD ti su propisi uključeni u propise koji definiraju opće kriterije za projektiranje nuklearnih elektrana.

Vjerojatnost štetnog utjecaja na okoliš. Svaka komponenta i sustav u nuklearnoj elektrani, uz svu pažnju pri izradbi i montaži, ima neku vjerojatnost kvara koja je veća od nule. Apsolutna sigurnost ne postoji. Neki događaj u nuklearnoj elektrani, koji može biti štetan za okoliš, može se dogoditi istodobnim nastankom nekoliko kvarova, od kojih svaki ima određenu vjerojatnost. Vjerojatnost takva događaja određuje se iz analize vjerojatnosti istodobnog nastanka tih kvarova. Ako se npr., razmatra vjerojatnost nastanka štete u okolišu zbog loma glavnog cjevovoda u primarnom krugu nuklearne elektrane s reaktorom s vodom pod tlakom, može se zaključiti da je takva šteta moguća uz uvjet da istodobno ne djeluje sustav za zaštitno hlađenje jezgre i da je oštećen sigurnosni štit. Ako se vjerojatnosti loma glavnog cjevovoda, prestanka djelovanja sustava za zaštitno hlađenje jezgre i oštećenja sigurnosnog štita označe sa P_a , P_b i P_c , štetne posljedice za okoliš nastaju pri istodobnoj pojavi tih triju događaja s vjerojatnošću

$$P = P_a P_b P_c. \quad (43)$$

Tipične su vrijednosti s kojima se računa u sigurnosnim analizama nuklearnih elektrana s reaktorom koji je hlađen i moderiran vodom pod tlakom: $P_a < 10^{-3}$, $P_b < 10^{-2}$ i $P_c < 10^{-2}$ po reaktoru godišnje. To znači, npr., da će lom glavnog

cjevovoda (P_a) nastati u prosjeku jednom u tisuću godina na svakom od reaktora, odnosno da će takav kvar nastati u prosjeku jednom godišnje ako je u pogonu tisuću reaktora. Iz navedenih podataka slijedi da je $P < 10^{-7}$ po reaktoru godišnje. Prema tome, promatrani događaj sa tri istodobna kvara pojavljuje se prosječno svakih 10 milijuna godina na svakom reaktoru, odnosno u prosjeku svakih milijun godina ako postoji 10 reaktora.

Američka komisija za atomsku energiju izradila je studiju (WASH-1400) u kojoj se detaljno analiziraju rizici za stanovništvo koje stanuje u okolini nuklearnih elektrana. Analiza je obuhvatila oko 15 milijuna ljudi koji žive na udaljenosti manjoj od 30 km od tih elektrana. Dobiveni su sljedeći podaci o godišnjem riziku po stanovniku:

automobilske nesreće $2,8 \cdot 10^{-4}$, padovi $1,0 \cdot 10^{-4}$, požar $3,7 \cdot 10^{-5}$, udar električne struje $6,0 \cdot 10^{-6}$, udar groma $5,3 \cdot 10^{-7}$, rad 100 nuklearnih elektrana $2,0 \cdot 10^{-8}$.

To znači, npr., da postoji vjerojatnost da jedan stanovnik godišnje na 3571 stanovnika ($1:2,8 \cdot 10^{-4}$) pogine u automobilskoj nesreći, i da jedan stanovnik godišnje na 50 milijuna strada zbog djelovanja pogona stotinu nuklearnih elektrana.

Analiza pokazuje, dakle, da za stanovnike koji žive u okolini nuklearnih elektrana postoji mnogo veća vjerojatnost nesreće (reda 10^4 puta) da stradaju od drugih uzroka nego od djelovanja nuklearnih elektrana.

Utjecaj na okoliš

Termičko opterećenje i opterećenje radioaktivnim zračenjem dva su osnovna utjecaja nuklearnih elektrana na okoliš.

Utjecaj termičkog opterećenja nuklearnih elektrana sličan je utjecaju takva opterećenja konvencionalnih termoelektrana. Pri transformaciji kemijske (u konvencionalnim termoelektranama) i nuklearne energije (u nuklearnim elektranama) u mehaničku, odnosno električnu energiju, znatan dio energije u obliku topline predaje se okolišu. U konvencionalnim termoelektranama dio energije goriva predaju plinovi izgaranja koji izlaze kroz dimnjak okolnom zraku (10–20% energije goriva), a dio se energije goriva predaje rashladnoj vodi koja protječe kroz kondenzator turbine. Rashladna voda predaje dalje toplinu vodi u vodotoku, jezeru ili moru iz kojih je odvedena u kondenzator turbine (protočno hlađenje), ili toplinu predaje okolnom zraku konvekcijom i djelomočnim isparivanjem u rashladnim tornjevima (povratno hlađenje). U konvencionalnoj termoelektrani rashladnom vodom odvodi se 45–55% energije goriva. U nuklearnoj elektrani, međutim, praktički se sva toplina, koja se predaje okolišu, odvodi rashladnom vodom iz kondenzatora parne turbine, jer se u procesu u nuklearnoj elektrani ne stvaraju plinovi izgaranja. Iskoristivost na pragu nuklearne elektrane manja je nego na pragu konvencionalne termoelektrane, jer su tlak i temperatura pare u nuklearnim elektranama mnogo niži nego u konvencionalnim termoelektranama. Iskoristivost na pragu nuklearne elektrane iznosi 0,30–0,32, što znači da se rashladnom vodom odvodi nešto više od dvostruko energije u obliku topline nego što se proizvodi u obliku električne energije. Problemi odvođenja topline rashladnom vodom iz nuklearnih elektrana, ako se uzme u obzir razlika u količini otpadne topline, nisu u osnovi različiti od onih u konvencionalnim termoelektranama.

Pri tome, nuklearna elektrana, za razliku od konvencionalne termoelektrane, ne zagađuje okoliš proizvodima izgaranja (ugljik-oksid, sumpor-dioksid, oksidi dušika, pepeo, čada), ali ona opterećuje okoliš radioaktivnim tvarima u obliku plinovitih, tekućih i krutih radioaktivnih otpadaka.

Radioaktivni otpaci iz nuklearne elektrane. Iz svih nuklearnih elektrana ispušta se mali dio radioaktivnih tvari u okoliš. Količina ispuštenih radioaktivnih tvari se održava na najnižoj razumno mogućoj granici (tzv. ALARA princip).

Ispuštanje tekućih radioaktivnih otpadaka. Tekući radioaktivni otpaci ispuštaju se u rijeke ili more. Količina ispuštenih otpadaka prilagođuje se protoku u vodotoku tako da koncentracija ni jednog od nuklida ne bude veća od dopuštene i

da koncentracija svih nuklida ne uzrokuje veću dozu zračenja od dopuštene prema zakonskim propisima.

Na primjer, dodatna koncentracija radioaktivnih izotopa u rijeci Savi zbog pogona NE Krško može se odrediti prema količinama vode koje protječu Savom i aktivnosti ispuštenih tekućih radioaktivnih otpadaka. U profilu Save kod Krškog protječe prosječno godišnje oko $6,6 \cdot 10^{12} \text{ dm}^3$ vode, pa je moguće reguliranim ispuštanjem otpadaka prema protoku Save održavati koncentraciju svih nuklida, osim tricija, na iznosu od $5,6 \cdot 10^{-2} \text{ Bq}/\text{dm}^3$, a koncentraciju tricija na iznosu od $2,8 \text{ Bq}/\text{dm}^3$.

Naš propis o zaštiti od ionizirajućih zračenja predviđa da nije potrebna zaštita ako prosječna godišnja koncentracija radioaktivnih izotopa u pitkoj vodi nije veća od sljedećih iznosa: a) $0,15 \text{ Bq}/\text{dm}^3$ za neidentificiranu smjesu radioaktivnih nuklida, b) $0,37 \text{ Bq}/\text{dm}^3$ ako u ispuštenoj tekućini nema nuklida ^{226}Ra ni ^{228}Ra , c) $7,4 \text{ Bq}/\text{dm}^3$ ako osim nuklida pod a) nema ni ^{129}I , ^{210}Po , ^{254}Cf , d) $20 \text{ Bq}/\text{dm}^3$ ako osim nuklida pod b) nema ni ^{210}Pb , ^{227}Ac , ^{231}Pa , ^{248}Cm , ^{256}Fm , prirodnog urana i torija.

Disperzija plinovitih radioaktivnih otpadaka definira se difuzijskom jednadžbom

$$K \nabla^2 X = \frac{\partial X^2}{\partial t}, \quad (44)$$

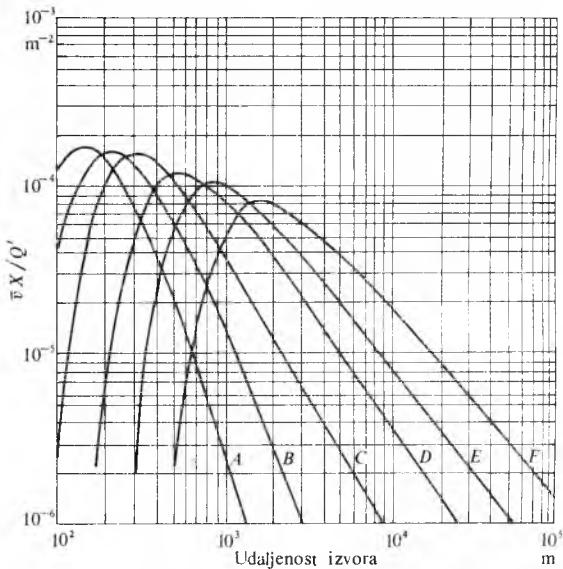
gdje je X koncentracija radioaktivnih otpadaka u atmosferi, a K koeficijent difuzije. Ako neki izvor plinovitih otpadaka emitira Q otpadaka u jedinici vremena, raspodjela koncentracije tih otpadaka u koordinatnom sustavu, s ishodištem na površini tla ispod izvora emisije, u kojemu je y horizontalna os u smjeru strujanja zraka, a z os okomita na površinu tla, iznosi

$$X(y, z) = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (45)$$

gdje je v brzina strujanja zraka, a σ_y i σ_z horizontalni su i vertikalni koeficijenti disperzije. Ako se prepostavi da se količina Q emitira na visini h iznad tla, najveća koncentracija na razini tla u smjeru strujanja zraka iznosi

$$X(z) = \frac{Q}{\pi v \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (46)$$

Koeficijenti disperzije ovise o stupnju stabilnosti atmosfere koja se određuje sa 7 stupnjeva, od A (vrlo nestabilno) do G (vrlo stabilno stanje atmosfere). Na sl. 82 vidi se ovisnost koeficijenta razrjeđenja plina ($v X/Q$) o udaljenosti od izvora kad je izvor 30 m iznad tla, a za različite stupnjeve stabilnosti atmosfere.



Sl. 82. Ovisnost koeficijenta razrjeđenja plinovitih radioaktivnih otpadaka o udaljenosti od izvora emisije plina uz stupnjeve stabilnosti atmosfere od A do F (plin se ispušta 30 m iznad tla)

Ako nastane veći kvar u reaktorskom postrojenju, plinovi iz reaktora mogu prodrijeti u prostor unutar sigurnosnog štita. Zbog propusnosti štita može dio plinova dospjeti u okoliš. Strujanjem zraka oko reaktorske zgrade pojavljuju se vrtlozi zbog kojih se mogu radioaktivne tvari nakupiti neposredno oko reaktorske zgrade. Da se u proračun disperzije uzme u obzir i ta pojava, računa se s koeficijentima Σ_y i Σ_z koji zamjenjuju koeficijente σ_y i σ_z . Novi koeficijenti određuju se iz relacija

$$\Sigma_y^2 = \sigma_y^2 + \frac{D_B}{\pi v}; \quad \Sigma_z^2 = \sigma_z^2 + \frac{D_B}{\pi v}, \quad (47)$$

gdje je $D_B = CAv$, C konstanta koja ima vrijednost $0,5 \dots 0,67$, a A površina presjeka reaktorske zgrade.

Apsorbirana doza zračenja. Proračun apsorbirane doze zračenja na temelju podataka o ispuštanjima radioaktivnih nuklida iz nuklearne elektrane i podataka o okolišu elektrane vrlo je složen. Prilikom proračuna treba uzeti u obzir tzv. kritične putove izotopa, faktore koncentracije pojedinih nuklida u živim organizmima, navike stanovništva u okolini nuklearne elektrane s obzirom na potrošnju mlijeka, ribe, povrća i sl. (prema definiciji standardnog čovjeka), te meteorološke prilike na mjestu gradnje nuklearne elektrane.

Proračun za okolicu NE Krško, proveden metodama i pomoću programa razvijenih u SAD, pokazuje da apsorbirana doza zračenja najugroženijeg stanovnika u okolini elektrane (oko 500 m od reaktorske zgrade) iznosi godišnje $\sim 3,7 \cdot 10^{-5}$ Sv (3,7 mrem) na cijelom tijelu. Ta je doza zračenja najvećim dijelom (više od 95%) rezultat djelovanja plinovitih radioaktivnih otpadaka (kripton, ksenon, jod), dok tekući otpaci, koji djeluju posredovanjem vode (piće, kupanje, hranjenje ribom i sl.) imaju mali udio u apsorbiranoj dozi zračenja.

Maksimalna dodatna apsorbirana doza zračenja u okolini nuklearnih elektrana iznosi $2 \dots 3\%$ od doze zračenja koju uzrokuju prirodni (svemirski, zemaljski) i drugi (rendgensko snimanje, televizija) izvori radioaktivnog zračenja. Ta dodatna doza prema kriterijama za projektiranje i gradnju nuklearnih elektrana, koji vrijede u Evropi i SAD, ne smije godišnje biti veća od $5 \cdot 10^{-5}$ Sv (5 mrem) unutar ekskluzivne zone (do ~ 500 m od reaktorske zgrade). Treba naglasiti da se proračuni doza zračenja provode pomoću vrlo konzervativnih metoda. Ostvarene doze zračenja u okolini izgrađenih nuklearnih elektrana redovito su niže od onih utvrđenih proračunom. Ostvarene doze

Tablica 9

GODIŠNJE DOZE ZRAČENJA U NEPOSREDNOM OKOLIŠU NUKLEARNIH ELEKTRANA U SAD

Nuklearna elektrana	Doza zračenja 10^{-5} Sv	Nuklearna elektrana	Doza zračenja 10^{-5} Sv
Mc Guire	1,42	N. Anna	1,64
Pt. Beach	1,60	Zion	2,70
Salem	0,80	D. C. Cook	3,00
Keweenaw	1,30	Trojan	2,40
Indian Pt.	0,60	Prairie Is.	1,15
Fairley	1,25	Catawba	2,42

Tablica 10

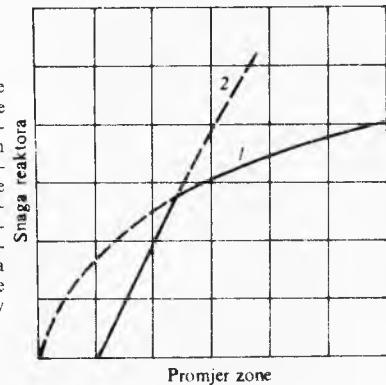
DOPUŠTENA EMISIJA OTPADAKA IZ NUKLEARNIH ELEKTRANA I DOPUŠTENA EMISIJA KEMIJSKIH ZAGADIVAČA U OKOLIŠ, PREMA PROPISIMA U SAD

Omjer dopuštene i prirodne apsorbirane doze zračenja	Omjer dopuštene i prirodne koncentracije u atmosferi
0,03	SO_2 150
$1,6 \cdot 10^{-5}$	NO_x $6 \cdot 10^{-2}$

zračenja za neke elektrane koje su u SAD u pogonu vide se u tabl. 9.

Propisi o dopuštenoj emisiji otpadaka iz nuklearnih elektrana mnogo su strožiji od propisa o dopuštenoj emisiji kemijskih zagadivača u okoliš (tabl. 10).

Doze zračenja pri kvaru u reaktorskom postrojenju. Okoliš nuklearne elektrane mora biti zaštićen i pri većem kvaru u reaktorskom postrojenju. Najteži kvar s kojim se računa u sigurnosnim analizama jest odrez primarnog cjevovoda, iako je zbog stroge kontrole kvalitete pri izradbi cjevovoda takav kvar veoma malo vjerojatan. Osim toga, računa se s još konzervativnijom pretpostavkom, naime, da istodobno s odrezom primarnog cjevovoda otkažu i sustavi za zaštitno hlađenje reaktorske jezgre. Tada će se djelomično rastaliti gorivi elementi iz kojih će dio fizijskih proizvoda prodrijeti u prostor unutar sigurnosnog štita, pa će zbog nepotpunog brtvenja štita dio plinovitih radioaktivnih otpadaka dospjeti u okoliš. Pri proračunu apsorbirane doze zračenja u okoliš elektrane računa se sa sljedećim najnepovoljnijim pretpostavkama: a) prije kvara reaktor je radio s punim opterećenjem dovoljno dugo da su koncentracije radioaktivnih materijala u jezgri postigle ravnotežu, b) zbog loma primarnog cjevovoda ispušta se iz reaktorske jezgre u prostor unutar sigurnosnog štita 25% joda i 100% plemenitih plinova koji se nalaze u jezgri, c) propuštanje sigurnosnog štita, već prema konstrukciji, iznosi 0,1 \dots 0,2% volumena na dan, d) radioaktivni oblak ne gubi svoju aktivnost taloženjem radioaktivnih materijala na tlu ni radioaktivnim raspadom i e) atmosferske prilike odgovaraju stupnju F stabilnosti atmosfere (sl. 82) uz brzinu strujanja zraka od 1 m/s.



Sl. 83. Promjer ekskluzivne zone u okolini nuklearne elektrane prema snazi reaktora i dozovljenim dozama zračenja nakon kvara na reaktorskom postrojenju. 1 krivulja ograničenja snage reaktora zbog maksimalno dopuštene doze ozračenja tiroidne žlezde od 3,0 Sv u toku 2 sata, 2 krivulja ograničenja snage reaktora zbog maksimalno dopuštene doze zračenja na cijelo tijelo od 0,25 Sv u toku 2 sata

Propisi o sigurnosti nuklearnih elektrana traže da, uz te pretpostavke, maksimalne doze zračenja na granici zaštitne zone oko elektrane do 2 sata nakon kvara ne budu veće od 0,25 Sv na cijelo tijelo i od 3 Sv na tiroidu (doza zračenja tiroide potječe od nuklida joda, najviše od ^{131}I). Ta ograničenja određuju promjer ekskluzivne zone (sl. 83). Unutar ekskluzivne zone nije dozvoljeno stalno naseljavanje, ali su dozvoljene (uz neke izuzetke) privredne aktivnosti.

Preradba radioaktivnih otpadaka. Svaku vrstu radioaktivnih otpadaka treba posebno preraditi. Osnovna je svrha preradbe zaštita okoliša, a ponovno iskoriscivanje prerađenog materijala ima tek sekundarnu važnost. Vrsta i količina radioaktivnih otpadaka ovisi o tipu i snazi nuklearnog energetskog postrojenja.

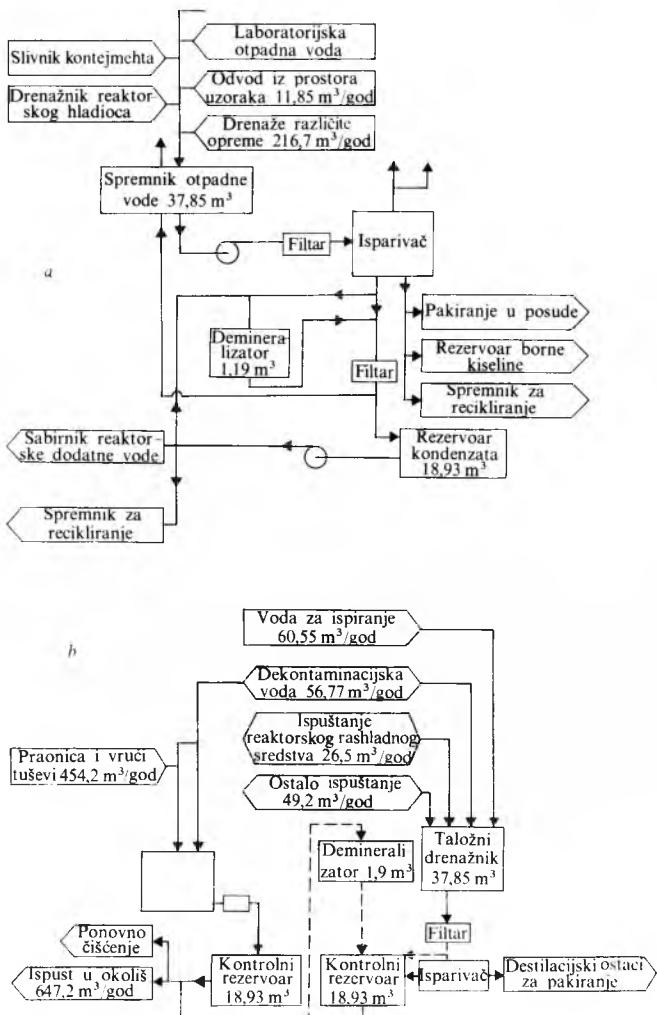
Tekući radioaktivni otpaci u nuklearnoj elektrani s reaktorom hlađenim vodom pod tlakom mogu se svrstati u otpatke koji se recikliraju i one koje nije potrebno reciklirati.

a) Otpaci koji se pojavljuju zbog propuštanja elemenata reaktorskog postrojenja (prirubnice, ventili i sl.) sadrže korozione i fizijske proizvode i znatan sadržaj tricija. Oni se prerađaju filtriranjem, destilacijom i otplinjivanjem. Izdvojena borna kiselina vraća se na ponovnu upotrebu, destilat se šalje u spremnik reaktorske vode, a talog isparivača se prerađuje u kruti radioaktivni otpad.

b) Otpaci iz dijelova postrojenja koji nisu dio tehnološkog procesa i otpaci iz tehnološkog procesa koji nisu pred-

viđeni za recikliranje kontrolirano se ispuštaju u rashladnu vodu, uz uvjet da se koncentracija radioaktivnih nuklida u rashladnoj vodi održava u propisanim granicama. Većina je takvih otpadaka voda iz pronača kontaminirane odjeće i iz kupaonica, voda do ispiranja kontaminiranih prostorija i sl. Takvi otpaci sadržavaju male količine tricija.

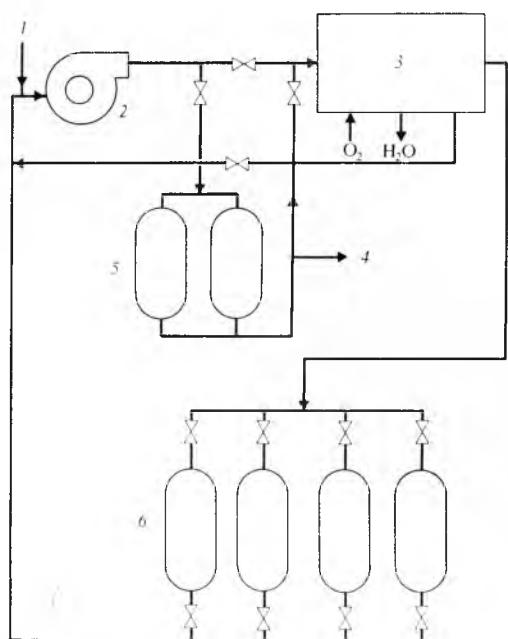
U shemi tretiranja tekućih radioaktivnih nuklida u NE Krško (sl. 84) nalaze se i podaci o količinama otpadaka i o volumenu spremnika.



Sl. 84. Shema tretiranja tekućih radioaktivnih otpadaka u NE Krško. a - otpaci koji se recikliraju, b - otpaci koji se ne recikliraju

Plinoviti radioaktivni otpaci potječu od plinovitih fizijskih proizvoda, koji zbog oštećenja obloga gorivih elemenata dospijevaju u reaktorsko rashladno sredstvo. Radioaktivni plinovi uglavnom su izotopi kriptona, ksenona i joda. U postrojenju s reaktorom s vodom pod tlakom osnovni je izvor radioaktivnih plinova rezervoar za volumnu i kemijsku kontrolu. Takvi se radioaktivni otpaci komprimiraju u posude za uskladištenje gdje dugi ostaju zatvoreni. Kad radioaktivnost u jednoj posudi dosegne određenu vrijednost, ona se zatvara i počinje punjenje sljedeće posude. Kapacitet posuda obično je dovoljan za životni vijek elektrane. Vodik, koji se nalazi u otpadnim plinovima, rekombinira se dodavanjem kisika u katalitičkim rekombinatorima, kako bi se sprječilo stvaranje eksplozivnoga praskavog plina.

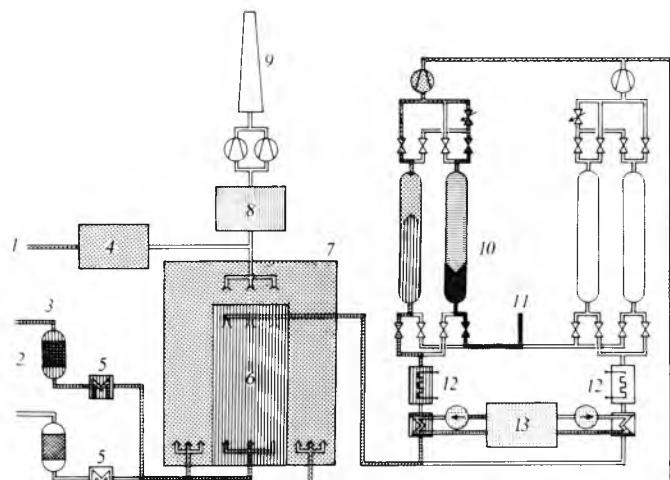
Sustav za tretiranje otpadnih plinova u NE Krško (sl. 85) ima šest rezervoara za otpadne plinove, od kojih dva služe za stavljanje nuklearne elektrane u pogon. Pri stavljanju u pogon treba dušik u rezervoaru volumne i kemijske kontrole zamijeniti vodikom.



Sl. 85. Shema tretiranja plinovitih radioaktivnih otpadaka u NE Krško. 1 ulaz plina, 2 kompresor, 3 rekombinacija praskavog plina, 4 vraćanje plina u rezervoar volumne i kemijske kontrole, 5 posude za uskladištenje plinova za stavljanje reaktora u pogon, 6 posude za uskladištenje otpadnih radioaktivnih plinova

U postrojenju s reaktorom s kipućom vodom glavni je izvor plinovitih radioaktivnih otpadaka ejektor kondenzatora turbine i kondenzator za paru koja dolazi iz labirintnih brtvi. Plinovi se odvode u rekombinatore praskavog plina, a zatim se preko posuda za zadržavanje (da se omogući radioaktivni raspod nuklida s kratkim vremenom poluraspa), adsorpcijskih kolona i filtera kontrolirano ispuštaju u atmosferu (sl. 86). Posude za zadržavanje imaju veliki volumen (više od 1000 m³), a ispunjene su pijeskom određene granulacije ili aktivnim ugljenom. Adsorpcijske kolone sadrže aktivni ugljen za adsorpciju težih plinova (jod, ksenon, kripton), te za dalje zadržavanje radioaktivnih izotopa. Plinovi se zadržavaju u sustavu i nekoliko sati.

Kruti radioaktivni otpaci u nuklearnoj elektrani potječu uglavnom od istrošenih smola iz ionskih izmjenjivača, filter-



Sl. 86. Shema tretiranja plinovitih radioaktivnih otpadaka u nuklearnoj elektrani s reaktorom koji je hlađen i moderiran kipućom vodom. 1 улаз гаса из кондензатора лабиринтних бртви, 2 улаз гаса из ејектора кондензатора turbine, 3 рекомбинатор праскавог гаса, 4 посуда за здржавање гаса, 5 хлађење гаса, 6 контейнер, 7 ванjsка посуда за здржавање гаса, 8 излазни филтер, 9 извесник, 10 адсорбцијске колоне с активним угљеном, 11 прикључак на кондензатор turbine radi recirkулације гаса, 12 предгријач, 13 хлађадни уређај

skih uložaka, taloga iz isparivača, kontaminirane odjeće i različitih otpadaka iz kontaminiranih prostorija (papiri, krpe i sl.), te kontaminiranih alata i dijelova opreme.

Najveći volumen krutih otpadaka potječe iz ionskih izmjnjivača i filtara. Kruti se radioaktivni otpaci prešaju i odlazu u bačve koje su iznutra obložene slojem betona radi zaštite od zračenja. Talozi se isparivača prije ulaganja u bačve mijesaju s betonom u krutu kompaktну masu. Otpaci se mogu učvrstiti i u staklenu masu. U toku pogona nuklearne elektrane treba godišnje odložiti 400–1000 bačava s krutim radioaktivnim otpacima. Bačve se nakon privremenog uskladištenja u nuklearnoj elektrani šalju u skladište za krute radioaktivne otpatke (sl. 87).



Sl. 87. Skladište krutih radioaktivnih otpadaka

LIT.: G. Masse, Systems Summary of a Westinghouse Pressurised Water Reactor Nuclear Power Plant. Westinghouse PWRSD 1971. — R. Salvatori, The Environmental Impact of Nuclear Power Plants in United States. Westinghouse, NES 1974. — J. Bebin, Fonctionnement et technologie des réacteurs à eau pressurisée. FRAMATOM 1974. — CANDU 600 MW (c) Pressurised Heavy Water Reactor. CANATOM 1976. — H. Požar, Osnove energetike, I, II. Školska knjiga, Zagreb 1976/78. — D. M. Considine, Energy Technology Handbook. McGraw-Hill, 1977. — T. Maruzlova, Атомные электрические станции. Вицкая школа, Москва 1978. — D. Popović, Nuklearna energetika. Naučna knjiga, Beograd 1978. — Nuclear Power Plant with Pressurised Heavy Water Reactor, KWU 1979. — Fast Breeders, IAEA INFCE Working Group 1980. — General Description of a Boiling Water Reactor. General Electric Atomic Power Dept. 1980. — Nuclear Power Reactors in the World. IAEA Reference Data, Series 1982.

* D. Feretić

NUKLEARNA ENERGIJA, energija koja se oslobođa u nuklearnim transformacijama, tj. transformacijama atomskih jezgara. Nuklearne transformacije mogu biti spontane (radioaktivni raspad) ili nastaju sudarom neke vanjske čestice s jezgrom (nuklearna reakcija).

Nuklearna reakcija može se simbolički napisati u obliku

$$a + X \rightarrow b + Y, \quad (1)$$

kad sudarom čestice a s jezgrom X nastaje jezgra Y uz emisiju čestice b . Prema zakonu o održanju mase i energije vrijedi

$$m_a c^2 + M_X c^2 + E_{kp} = m_b c^2 + M_Y c^2 + E_{kk}, \quad (2)$$

gdje su M_X , M_Y , m_a i m_b mase jezgara i čestica, E_{kp} i E_{kk} početna i konačna kinetička energija, a c brzina svjetlosti. Razlika između konačne i početne kinetičke energije Q naziva se vrijed-

nošću reakcije, pa je $Q = E_{kk} - E_{kp}$. Ako Q ima pozitivnu vrijednost, reakcija je egzoergična, pa se tom reakcijom oslobođa energija. Zakon o održanju mase i energije pokazuje da to oslobođanje energije ide na račun dijela mase koji se pretvara u energiju

$$Q = (M_X + a)c^2 - (M_Y + b)c^2. \quad (3)$$

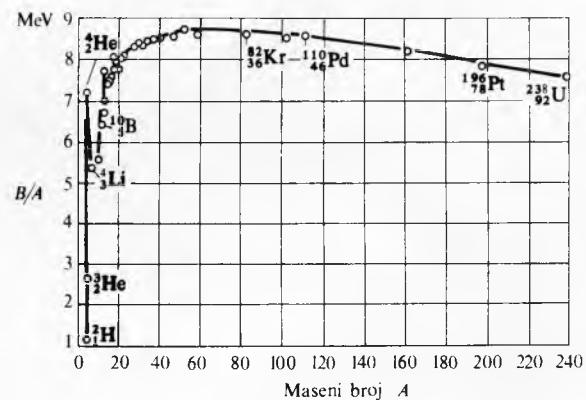
Egzoergične nuklearne reakcije osnovni su izvor energije Sunca i zvijezda. U nuklearnim procesima ekvivalencija mase i energije manifestira se mnogo više nego u atomskim procesima u kojima se mijenja samo raspored elektrona oko jezgara. Mase atomskih jezgara manje su za $\sim 1\%$ od zbroja masa protona i neutrona od kojih su sastavljene, jer se u procesu sastavljanja jezgre oslobođa mnogo veća energija. Ukupna oslobođena energija pri spajanju jezgre koja ima maseni broj A i koja sadrži Z protona mase m_p i $A - Z$ neutrona mase m_n iznosi

$$B(Z, A) = [Zm_p + (A - Z)m_n - M(Z, A)]c^2, \quad (4)$$

gdje je $M(Z, A)$ masa jezgre.

Energija $B(Z, A)$ naziva se *energijom vezanja jezgre*, a smanjenje mase prikazano u uglatim zagradama *defektom mase*. Vrlo važnu informaciju o jezgri daje energija vezanja po jednom sastojku jezgre, tj. omjer B/A (sl. 1), koji je nazvan specifičnom energijom vezanja ili čvrstoćom vezanja. Energije se iskazuju u elektronvoltima, uobičajenoj jedinici u nuklearnoj fizici ($eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$).

Iako se može kazati da je vrijednost omjera B/A približno konstantna, odstupanja imaju dalekosežne posljedice. S maksimumom od $\sim 8,5$ MeV za $A = 60$, smanjenje čvrstoće vezanja i prema laganijim i prema težim jezgrama vrlo je važna činjenica iz koje proizlazi mogućnost dobivanja energije nuklearnim reakcijama. U okviru semiempiričkoga nuklearnog modela u kojemu se jezgra uspoređuje s električki nabijenom kapljicom tekućine može se uspješno kvalitativno rastumačiti empirička krivulja na sl. 1. Manje vrijednosti čvrstoće vezanja za lagane jezgre posljedica su slabijeg vezanja nukleona na površini, njihov udio je veći u laganim jezgrama. Manje vrijednosti čvrstoće vezanja za teške jezgre nastaju zbog sve većeg odbijanja među protonima zbog djelovanja električnih sila. Od opće tendencije odstupa jezgra helija koja, iako vrlo malena, ima veliku vrijednost omjera B/A (7,07 MeV). To je odraz težnje istovrsnih nukleona da se slažu u parove i svojstva zasićenja nuklearnih sila. U principu spajanje laganih (nuklearna fuzija) i cijepanje teških jezgara (nuklearna fiksija) vodi na jezgre koje su bliže maksimalnoj vrijednosti omjera B/A , dakle i na oslobođanje energije.



Sl. 1. Energija vezanja po jednom nukleonu (B/A) kao funkcija broja nukleona (A). Energija je izražena u megaelektronvoltima ($MeV = 1,602 \cdot 10^{-13} J$).

Za nuklearnu fuziju najvažnije su reakcije između jezgara najlakših atoma 2H , 3H , 3He :

