

Osvrt na nuklearnu elektranu Černobil

Ćorluka, Daria

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:828101>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Daria Ćorluka

OSVRT NA NUKLEARNU ELEKTRANU ČERNOBIL

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, veljača 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja **Daria Ćorluka**

Predala je izrađen završni rad dana: 21. veljače 2023.

Povjerenstvo u sastavu:

prof. dr. sc. Veljko Filipan, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu

prof. dr. sc. Igor Sutlović, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 24. veljače 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Daria Ćorluka

OSVRT NA NUKLEARNU ELEKTRANU ČERNOBIL

ZAVRŠNI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Veljko Filipan

prof. dr. sc. Igor Sutlović

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Zagreb, veljača 2023.

Želim zahvaliti mentoru, prof. dr. sc. Veljku Filipanu, koji mi je svojim predavanjima pobudio interes u području tehničke termodinamike i time dao ideju za temu završnog rada te za svu pomoć i strpljenje tokom izrade ovog rada.

Hvala dr. sc. Davoru Margetiću i dr.sc. Anamariji Briš na prenesenom znanju i predivnoj atmosferi tijekom stručne prakse na Institutu Ruđer Bošković.

Hvala mojim roditeljima i sestri na bezbroj savjeta i ogromnoj potpori.

Hvala mom dečku i rodicama što su mi Zagreb pretvorili u novi dom i bili tu za sve što je bilo potrebno.

Hvala mojim prijateljicama koje su sve ovo prolazile sa mnom, za svo učenje i u NSK i doma cijelu noć te za sva dijeljenja materijala, ohrabrivanja i pomoć.

SAŽETAK

Tema ovog rada je nesreća koja se dogodila 26. travnja 1986. u nuklearnoj elektrani Černobil, uzrokovana manama u dizajnu reaktora, neupućenosti osoblja u navedene mane i ignoriranjem sigurnosnih mjera prilikom provođenja sigurnosnog testa na reaktoru 4. Objašnjen je proces fisije koji se događa u reaktorima nuklearnih elektrana koje koriste obogaćeni uranij kao gorivo. Prikazani su povijest nuklearnih elektrana i razvoj reaktora, s posebnim naglaskom na RBMK-1000 reaktor koji je korišten u nuklearnim elektranama u bivšem Sovjetskom Savezu, pa tako i u nuklearnoj elektrani Černobil. Opisan je i shematski prikazan princip rada RBMK-1000 reaktora i objašnjene su njegove najbitnije karakteristike – pozitivni koeficijent praznina, koji posebno dolazi do izražaja pri niskim snagama reaktora, i loš dizajn kontrolnih šipki, vrh kojih je načinjen od grafita koji ne usporava lančanu reakciju nego ju, naprotiv, pospješuje. Nesreća u nuklearnoj elektrani Černobil prikazana je u odlomcima kronološki, sa shematskim prikazima tijekom nesreće. Prikazani su ljudski naponi i žrtve tijekom sanacija posljedica nesreće, kao i zdravstvene posljedice stanovnika okolnog područja, pogotovo djece kod kojih je stotruko porastao broj raka štitnjače.

KLJUČNE RIJEČI: Černobil, RBMK reaktor, pozitivni koeficijent praznina, sigurnosni test, nuklearna energija

ABSTRACT

The topic of this thesis is the accident that occurred on April 26, 1986 at the Chernobyl nuclear power plant, caused by flaws in the design of the reactor, staff's lack of information about the mentioned flaws and the ignoring of safety measures when conducting the safety test on reactor No. 4. The fission process that occurs in nuclear power plant reactors that use enriched uranium as fuel is explained. The history of nuclear power plants and the development of reactors are presented, with special emphasis on the RBMK-1000 reactor, which was used in nuclear power plants in the former Soviet Union, including in the Chernobyl nuclear power plant. The working principle of the RBMK-1000 reactor is described and shown schematically, and its most important characteristics are explained - the positive void coefficient, which is especially important at low reactor powers, and the poor design of the control rods, the end of which is made of graphite, which does not slow down the chain reaction but, on the contrary, it promotes it. The accident at the Chernobyl nuclear power plant is presented in paragraphs chronologically, with schematic representations of the course of the accident. The human efforts and sacrifices during the remediation of the consequences of the accident and the health consequences of the inhabitants of the surrounding area, especially of children, where the number of thyroid cancers has increased a hundredfold, are shown.

KEY WORDS: Chernobyl, RBMK reactor, positive void coefficient, safety test, nuclear energy

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	TEORIJSKI DIO.....	2
2.1.	NUKLEARNA ENERGIJA.....	2
2.1.1.	Nuklearna fisija.....	2
2.1.2.	Nuklearne elektrane (NE).....	5
2.1.3.	Nuklearna energija u Sovjetskom Savezu	6
2.1.4.	Razvoj reaktora.....	7
2.1.5.	Razvoj RBMK reaktora.....	8
2.2.	RBMK REAKTOR	9
2.2.1.	Rashladni sustav RBMK reaktora.....	11
2.2.2.	Grafitni moderatori	12
2.2.3.	Kontrolne šipke.....	13
2.2.4.	Koeficijent praznine reaktivnosti (koeficijent praznine)	16
2.3.	NESREĆA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI ČERNOBIL	17
2.3.1.	Uvod: 25.04.1986 - 01:00-23:10 h.....	17
2.3.2.	Pripreme za sigurnosni test - 25.04.1986. 23:10h – 26.04.1986. 01:00 h	18
2.3.3.	Sigurnosni test - 26.04.1986. 01:00-01:23:40 h.....	19
2.3.4.	Eksplוזija i požar – 01:23:40 h – 05:00 h.....	21
2.4.	POSLJEDICE.....	24
2.4.1.	Dekontaminacija NE Černobil i radijusa od 30 km od NE	24
2.4.2.	Zdravstvene posljedice.....	27
2.4.3.	Promjene na RBMK reaktoru	28
3.	ZAKLJUČAK.....	29
4.	LITERATURA	30

1. UVOD

Najveća nuklearna nesreća dogodila se 26. travnja 1986. godine u nuklearnoj elektrani Černobil u jedinici broj 4 tokom provođenja sigurnosnog testa turbogeneratorskog reaktora. Potpuno uništenje reaktora broj 4 dogodilo se 6-7 sekundi nakon pritiska AZ-5 tipke kojom se u jezgri umeću sve kontrolne šipke. Uništenjem reaktora ogromna količina radioaktivnih tvari otpuštena je u atmosferu, tolika da je procijenjena ukupna aktivnost svih radionuklida otpuštenih iz jezgre reaktora bila približno 10^{19} Bq¹. [1] Boreći se s nastalim zračenjem i požarom od 28. travnja do 02. svibnja helikopteri su u uništenom reaktoru ispustili ukupno 5000 tona bora, olova, pijeska, gline i dolomita kako bi ugušili vatru i pokrili reaktor. Unatoč naporima oko 300 000 radnika („likvidatora“) pozvanih od strane države da zatvore reaktor, velike količine zračenja proširile su se diljem svijeta. Područje u krugu od 30 km od nuklearne elektrane je evakuirano i do danas je zatvoreno. [2] Evakuirano je 135 000 ljudi iz Pripjata i okolnih područja. Dva radnika nuklearne elektrane su poginula u nesreći, jedan u eksploziji reaktora, a drugi ubrzo nakon eksplozije, vjerojatno od ozljeda zadobivenih urušavanjem zgrade. Operateri reaktora koji su napustili zaštićenu kontrolnu sobu umrli su od posljedica zračenja. [3] 200 ljudi zadobilo je akutnu radijacijsku bolest i opekline od β zračenja², a 28 ljudi od tih posljedica je preminulo. Otkriveno je stotine slučajeva raka štitnjače (koji je povezan s unosom ¹³¹I nastalog u malim količinama radioaktivnim raspadom ²³⁵U) u djece koja su živjela u ili oko Bjelorusije i na sjeveru Ukrajine. [4] Mane u dizajnu RBMK-1000 reaktora, težnja za završenjem gradnje reaktora u planiranom roku i ignoriranje sigurnosnih mjera uz neinformirano osoblje jedinice 4 doveli su do katastrofe čije se posljedice osjećaju i danas.

¹ Bq (Becquerel) je jedinica radioaktivnog raspada i odgovara jednom raspadu (dezintegraciji) u sekundi.

² Beta čestice su brzi elektroni (β^-) ili pozitroni (β^+) velike energije koje neki radionuklidi izbacuju tokom beta raspada (oblik radioaktivnog raspada).

2. TEORIJSKI DIO

2.1. NUKLEARNA ENERGIJA

Jezgra atoma većinom je stabilna i ne mijenja svoje trenutno stanje, zbog čega se atom nekog elementa neće sam od sebe pretvoriti u atom nekog drugog elementa. Jezgre nestabilnih atoma mogu emisijom zračenja spontano prijeći u drugo stanje. Emitirano zračenje posjeduje kinetičku energiju; proces dezintegracije rezultira otpuštanjem energije koja je povezana s jezgrom (nukleusom), zbog čega se ta energija naziva nuklearna energija. Prijelaz mase u energiju opisuje se izrazom (1):

$$E = mc^2 \quad (1)$$

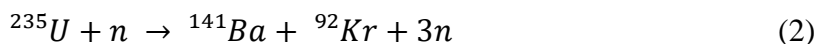
gdje je c brzina svjetlosti, 299 792,458 metara u sekundi. Iz izraza slijedi da je količina energije koja proizlazi iz gubitka mase ogromna; kilogram mase koji potpuno prijeđe u energiju ekvivalentan je energiji izgaranja 3 milijuna tona ugljena. U tipičnim nuklearnim reaktorima samo djelić mase prijeđe u energiju (oko 0,1%). U procesima nuklearne fisije, dezintegracija nestabilne jezgre i posljedično otpuštanje nuklearne energije potiču se pobuđivanjem jezgre bombardirajući ju neutronima. [4]

2.1.1. Nuklearna fisija

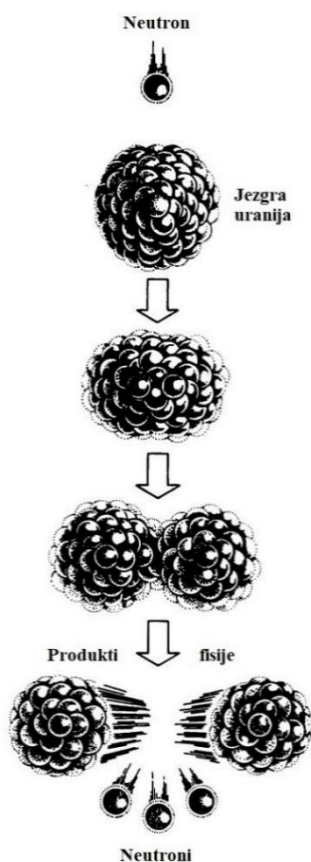
Fermi i suradnici, formiranjem novih radioaktivnih izotopa teških jezgri apsorpiranjem neutrona, posebno u slučaju urana, dolaze do otkrića jezgri veće mase i broja naboja od tada poznatih. Istraživanje nastavlja Meitner, Hahn i Strassmann, kao i Curie i Savitch, a Hahn i Strassmann konačno dolaze do otkrića da iz urana nastaju elementi mnogo manje atomske mase i naboja. Toj novootkrivenoj reakciji Meitner i Frisch daju naziv fisija i dolaze do zaključka da je za nju potrebna relativno mala energija neutrona i da se njome oslobađa ogromna količina energije. [5]

Neutron, koji se sudara s teškom jezgrom kao što je jezgra uranija, cijepa jezgru na 2 manje jezgre (produkte fisije) i otpušta još nekoliko neutrona koji dalje cijepaju jezgre uranija. Budući da neutroni odlaze s površine, ovaj proces nije samoodrživ za male mase uranija. Što je veća količina uranija, veća je vjerojatnost apsorpcije neutrona te za dovoljno veliku masu dolazi do samoodržive reakcije (lančane reakcije). Dijagramski prikaz fisije prikazan je na slici 1.

U procesu fisije atom uranija (^{235}U – fisilni³ izotop uranija) cijepa se na atome barija i kriptona te otpušta 3 neutrona:



Masa produkata na desnoj strani jednadžbe (2) manja je od mase reaktanata s lijeve strane za 0,091%, što znači da je oko 0,1% mase prešlo u kinetičku energiju produkata fisije i neutrona, koji se sudaraju sa susjednim atomima povećavajući njihove termalne vibracije, to jest, otpuštanje topline. [4]



Slika 1. Shematski prikaz procesa fisije [4]

Jedan kilogram ^{238}U (fisibilni⁴ izotop uranija) koji potpuno izreagira fisijom otpusti 8×10^{13} J energije, što je ekvivalentno energiji koja se dobije iz 3000 tona ugljena. 99,3% uranija u prirodi nalazi se u obliku ^{238}U . [4]

³ Fisilni materijal je radioaktivni nuklid koji se raspada fisijom i može održavati lančanu reakciju pomoću termičkih neutrona; materijal čije atomske jezgre mogu ući u spontanu ili nuklearnu fisiju

⁴ Fisibilni materijal je materijal sastavljen od nuklida koji se mogu pobuditi na raspad nuklearnom fisijom pomoću neutrona niskih ili visokih energija.

Tri neutrona koja nastaju u prethodno prikazanoj reakciji imaju brzinu od oko 20 000 km/s (brzi neutroni), zbog čega je vjerojatnost reakcije neutrona s uranijevim atomima izuzetno mala. Ako se njihova brzina smanji na 2 km/s, vjerojatnost da će neutroni reagirati s ostalim ^{235}U atomima povećava se 1000 puta. Budući da je ta brzina neutrona približno jednaka brzini atoma koji vibriraju zbog toplinskog gibanja, nazivaju se termički neutroni⁵, a nuklearni reaktori koji ih koriste zovu se termički reaktori. Kada se brzi neutroni sudaraju s velikim atomima, obijaju se od njih i gube male količine energije. Potrebno je oko 2000 uzastopnih sudara brzog neutrona s atomima uranija za njegov prijelaz u termički neutron. Sudaranjem s lakim atomima neutroni gube velike količine energije koja se prenosi na laki atom, zbog čega je potrebno samo oko 20 sudara neutrona s vodikom da prijeđe iz brzog u termički neutron. Kako svaki sudar neutrona s atomima sadrži mogućnost apsorpiranja neutrona (^{238}U apsorbira neutrone i prekida lančanu reakciju) i nastajanja novog izotopa te izostanka fisije, potrebno je uraniju dodati neki laki element koji će pospješiti prijelaz brzih neutrona u termičke neutrone koji će se zatim sudarati s uranijem. Taj se proces naziva moderiranje, a laki element moderator. Neki od moderatora su vodik (u obliku lake vode), deuterij (u obliku teške vode – najbolji moderator s vrlo malom apsorpcijom neutrona) i ugljik (u obliku grafita). [4] U tablici 1 dana je podjela nuklearnih reaktora i njihove osnovne karakteristike.

Tablica 1. Podjela nuklearnih reaktora i osnovne karakteristike [6]

Energija neutrona	Gorivo, obogaćenje	Moderator	Rashladno sredstvo	Naziv reaktora	Kratica
Termički	UO ₂ , lagano	laka voda	H ₂ O	hlađen kipućom vodom	BWR
	UO ₂ , lagano	laka voda	H ₂ O	hlađen vodom pod tlakom	PWR
	UO ₂ , lagano	teška voda	D ₂ O	hlađen teškom vodom	HWR
	UO ₂ , prirodno, obogaćeno	grafit	Plin	hlađen plinom	GCR
Brzi	Pu ²³⁹ O ₂ +U ²³⁸ O ₂	nema	Na	hlađen tekućim metalom	LMFBR

⁵ Termički neutron je spori neutron koji ima kinetičku energiju približno jednaku toplinskoj energiji čestice na sobnoj temperaturi.

Jedan od važnih produkata fisije je ksenon-135 (vrijeme poluraspada 9,2h), koji malim dijelom nastaje direktno fisijom, dok većina ^{135}Xe nastaje radioaktivnim raspadom ^{135}I (vrijeme poluraspada 6,7 h). Osim raspadom, ksenon nestaje i apsorpcijom neutrona - ^{135}Xe ima veliku vjerojatnost apsorpcije neutrona (engl. *high neutron capture cross-section*) i u rektoru uklanja oko 2% ukupne količine neutrona. Ravnoteža opisanih načina nastajanje i nestajanja ksenona u rektoru je takva da pad snage reaktora, a posljedično i pad broja neutrona, uzrokuju porast koncentracije ksenona. [4]

2.1.2. Nuklearne elektrane (NE)

Otto Hahn i Fritz Strassman 1939. u Berlinu uz pomoć Lise Meitner otkrivaju fisiju, a tri godine kasnije Enrico Fermi konstruirao prvi nuklearni reaktor sa samoodržavajućom fisijom. Uslijedila su desetljeća velikih očekivanja i velikih razočaranja tokom značajnog razvoja i primjene nuklearne tehnologije. Kako se razvoj nuklearne tehnologije odvijao tijekom ratnog razdoblja, tehnologija je prvu primjenu našla u atomskoj bombi. Nuklearna energija ostaje u vojnoj primjeni i u poslijeratnom razdoblju, uz razvoj nuklearne energetike. Govor „Atomi za mir“ tadašnjeg predsjednika SAD-a, D. Eisenhowera, 1953. godine unosi prekretnicu u korištenju nuklearne energije te je tri godine nakon toga puštena u pogon prva komercijalna nuklearna elektrana, Calder Hall. Optimistična očekivanja proizvodnje električne energije iz nuklearne vidljiva su u riječima Lewisa L. Straussa, predsjedavajućeg Komisije za atomsku energiju, koji je 1954. izjavio da će naši potomci uživati u električnoj energiji toliko jeftinoj da je se neće isplatiti naplaćivati. Skokoviti porasti cijene nafte uzrokovane naftnom krizom 1973. godine i kasnijim krizama u Iranu daju velik poticaj razvoju nuklearne industrije i energetske neovisnosti država. [7]

Percepcija javnosti naglo se mijenja nakon nesreće u černobilskoj nuklearnoj elektrani u proljeće 1986. godine, za koju se procjenjuje da je odnijela živote i do 4000 ljudi. Uvjeravanje javnosti da na Zapadu, zbog velike razlike u dizajnu, ne može doći do takve nesreće nije urodilo plodom, a uz to se javljao i problem zbrinjavanja radioaktivnog otpada nagomilanog iz desetljeća rada elektrana. Zemlje Zapada prestaju s razvojem nuklearne tehnologije. Austrija već 1978. donosi zakon kojim se zabranjuje proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama, a potpuno dovršena elektrana Zwentendorf nije ni puštena u pogon. Italija 1990. trajno obustavlja rad posljednja svoja 4 nuklearna reaktora, a Njemačka i Švedska odlučuju postepeno smanjiti broj nuklearnih reaktora. U mnogim državama prirodni plin postaje

najpoželjniji energent, a raste i uporaba obnovljivih izvora energije kao odgovor na efekt staklenika i sigurnost opskrbe. Budući da je, unatoč velikim ulaganjima, udio obnovljivih izvora energije u zadovoljenju ukupnih energetske potrebe još uvijek izrazito mali, a velika potražnja za prirodnim plinom uzrokuje probleme u opskrbi i visoke cijene, kao odgovor na sve veću potražnju za električnom energijom ponovno se javlja zanimanje za nuklearnim elektranama. [7]

2.1.3. Nuklearna energija u Sovjetskom Savezu

Iako bogat izvorima fosilnog goriva, Sovjetski Savez je favorizirao nuklearnu energiju kao glavni izvor energije jer se oko 80% energetske resursa nalazi na Istoku, a 75% stanovništva i potrošača električne energije se nalazi u europskom dijelu SSSR-a. Zbog toga je prijevoz goriva s istoka na zapad zemlje činio oko 40% željezničkog prometa, a i nuklearna energija je manje štetna za okoliš od konvencionalne energije. [8]

Upravo zbog bogatstva Sibira (zapad bogat naftom i plinom, istok bogat ugljenom i hidroenergijom) i centralne Azije (prirodni plin i hidroenergija) energijom, velika većina nuklearnih reaktora građena je u europskom dijelu Sovjetskog Saveza. Jedino se nuklearna elektrana Bilibino nalazi s istočne strane Urala. [9]

Sovjetski Savez sebe smatra začetnikom komercijalne atomske energije. Prvi svjetski nuklearni reaktor za proizvodnju električne energije (Obninsk, blizu Moskve) pušten je u pogon 27. lipnja 1954. godine. Do 1975. godine bilo je instalirano 5500 MW nuklearnog proizvodnog kapaciteta, što je predstavljalo 2,5% ukupnog kapaciteta za proizvodnju električne energije u zemlji. Cilj za 1980. bio je ukupno imati instalirano 19 400 MW nuklearne energije, što bi trebalo biti nešto manje od 7% ukupne proizvodnje. To znači da je petogodišnji plan (1976.-1980.) imao u cilju instalirati još 13 900 MW nuklearnih kapaciteta, odnosno instaliranje više nego dvostruko nuklearnih kapaciteta u tih 5 godina nego je bilo instalirano u prethodna 2 desetljeća. [9]

U prvoj su godini plana pokrenute nove jedinice u Kursku (1000 MW) i u Armeniji (405 MW) te posljednja od četiri male jedinice u Bilibinu. U drugoj godini, prvih 1000 MW pokrenuto je u elektrani Černobil, a reaktor broj 5 u Novovoronežskom 1978. podiže kapacitet elektrane za 1000 MW, na 2455 MW. Također su 1978. izgrađene jedinice br. 2 u Kursku i Černobilu, svaka od 1000 MW. Još neke od elektrana puštenih u pogon tokom petogodišnjeg

plana su Rovno (440 MW), Beloyarskiy (600 MW), 3. i 4. jedinica u Lenjingradu (svaka po 1000 MW) te prva jedinica u Kalininu (1000 MW)⁶. [9]

2.1.4. Razvoj reaktora

Generacija I – Prva proizvodnja električne energije iz nuklearnog reaktora bila je 1951. godine iz eksperimentalnog reaktora EBR-1. Prva nuklearna elektrana za proizvodnju električne energije puštena je u pogon 27. lipnja 1954. godine u Obninsku u Rusiji. Reaktori ove generacije više se ne koriste, a neki od njih, poput Magnox reaktora, uz neke izmjene evoluirali su u drugu generaciju nuklearnih reaktora. [7]

Generacija II – Razvili su se iz 1. generacije, a period tokom kojeg se grade je 30 godina, od 1960-ih do sredine 1990-ih godina. Tipični predstavnici ove generacije su PWR (tlakovodni reaktori, engl. *Pressurised Water Reactor*), BWR (ključajući reaktori, engl. *Boiling Water Reactor*) i AGR (napredni plinom hlađeni reaktori, engl. *Advanced Gas Reactors*) reaktori. [7]

Kipujući reaktor kanalnog tipa RBMK je danas zastarjeli tip grafitnih reaktora hlađenih vodom korišten u NE Černobil. Kako je VVER⁷ reaktor bio tehnološki puno zahtjevniji, bivši Sovjetski Savez odlučio se za ekonomičniji RBMK reaktor koji koristi prirodni uran kao gorivo (koje se moglo mijenjati tijekom pogona, bez zaustavljanja), a proizvodi i plutonij za vojne svrhe. Danas je, isključivo u Rusiji, u pogonu još desetak RBMK reaktora. [7]

Generacija III – Razvili su se poboljšanjem dizajna prethodne generacije, posebno poboljšanjem tehnologije izrade nuklearnog goriva i sigurnosnog sustava. Prvi reaktor ove generacije u pogonu je od 1996. godine (Japan), a tipovi reaktora su EPR (europski tlakovodni reaktor, engl. *European Pressurized Reactor*), AP 1000, ABWR (napredni ključajući reaktor, engl. *Advanced Boiling Water Reactor*) i System 80+ (koristi plutonij kao gorivo, a snaga mu iznosi 1300 MW). [7]

⁶ Svi MW navedeni u ovom poglavlju odnose se na MW(e). MW(e) ili megavat električni u elektroenergetskoj industriji odnosi se na električnu energiju koju proizvodi generator (izlazna snaga toplinskog stroja dobivena kao električna energija), dok se megavat toplinski ili MW(t) odnosi na toplinsku snagu koju proizvodi postrojenje (ulazna snaga u toplinski stroj). Što su te dvije vrijednosti bliže, to je elektrana učinkovitija.

⁷ VVER reaktor (rus. *vodo-vodnoj energetičeskij reaktor*) tlakovodni je reaktor prvotno razvijen za korištenje u ruskim nuklearnim podmornicama i ratnim brodovima. Gorivo je malo obogaćen uranov dioksid, a moderator i rashladno sredstvo je voda. Danas je u pogonu oko 50 VVER reaktora.

Generacija III+ - dijelom revolucionarni reaktori koji ne zadovoljavaju kriterije reaktora generacije IV. Najrazvijeniji su ESBWR (kipući reaktor s pojednostavljenom ekonomijom, engl. *Economic Simplified Boiling Water Reactor*) i PBMR (engl. *Pebble Bed Modular Reactor*). [7]

Generacija IV – skup novih i naprednih tehničkih rješenja koji su trenutno u razvojnoj fazi. Očekuje se da će biti raspoloživi za komercijalnu proizvodnju prije 2030. godine. Razvijeni su s primarnim ciljem poboljšanja nuklearne sigurnosti, smanjenja mogućnosti proliferacije, smanjenja nuklearnog otpada te smanjenja troškova gradnje i kasnijeg pogona ovih elektrana. Neki od predstavnika su: VHTR (visoko-temperaturni reaktor, engl. *Very High Temperature Reactor*), SCWR (Superkritični vodom hlađeni reaktor, engl. *Supercritical Water Cooled Reactor*), MSR (Reaktor hlađen rastaljenom soli, engl. *Molten Salt Reactor*) i IRIS (Međunarodni inovativan i sigurni reaktor, engl. *International Reactor Innovative and Secure*). [7]

2.1.5. Razvoj RBMK reaktora

Razvoj reaktora kanalnog tipa koji koristi kipuću vodu kao rashladno sredstvo i grafit kao moderator započeo je puštanjem u pogon prve nuklearne elektrane u Obninsku 1954. godine. Nakon nje u rad su pušteni Sibirski nuklearna elektrana snage 600 MW te prvi i drugi blok nuklearne elektrane Beloyarskiy (100 i 200 MW), a slijedi ih razvoj kanalnih reaktora velike snage (1000 MW(e)), RBMK-1000. [8]

Prednosti RBMK-1000 reaktora su velika snaga, fleksibilnost ciklusa goriva zbog mogućnosti dopunjavanja goriva pod opterećenjem, sigurnosti rektorskog sustava zbog više od 1000 pojedinačnih primarnih krugova koji ozbiljne gubitke rashladnog sredstva čine praktički nemogućim, korištenje nisko obogaćenog goriva s visokom učinkovitošću, nizak sadržaj fisibilnog materijala u ispuštenom gorivu i iskorištenje plutonija proizvedenog iz goriva. [8]

Prva dva RBMK-1000 reaktora izgrađeni su u Lenjingradu (1. je pušten u pogon 1973., a drugi 1975. godine), a do prosinca 1982. godine u Sovjetskom Savezu u rad je pušteno 10 RBMK-1000 reaktora ukupne snage 10 000 MW(e). 1980. godine RBMK-1000 reaktori proizveli su 47 milijardi kWh ili 64,5% ukupne električne energije proizvedene u svim nuklearnim elektranama u zemlji. [8]

2.2. RBMK REAKTOR

Kratica RBMK dolazi iz Ruskog „*reaktor bolshoy moshchnosti kanalny*“, što je u prijevodu „kanalni reaktor velike snage“. U Sovjetskom Savezu su bile 2 modifikacije RBMK reaktora koje su se razlikovale u kapacitetu: RBMK-1000, s nominalnom snagom od 1000 MW bruto električne energije, i RBMK-1500 s nominalnom snagom od 1500 MW bruto električne energije. RBMK reaktori korišteni su samo u Sovjetskom Savezu, a to su reaktori s kipućom vodom koji kao gorivo koriste obogaćeni uranij⁸, kao moderator koriste grafit, a kao rashladno sredstvo koriste vodu. [1]

Konstrukcija prvog RBMK započela je u ožujku 1970. u Lenjingradu, a reaktor je pušten u pogon u studenom 1974. godine. Prije Černobilske nesreće ukupno je 15 RBMK reaktora bilo u pogonu (4 u NE Lenjingrad, 4 u NE Černobil, 4 u NE Kursk, 2 u NE Smolensk i 1 u NK Ignalina). RBMK reaktori građeni su u paru tako da je svaki reaktor para zauzima suprotne strane jednog kompleksa zgrada, a turbogeneratori⁹ svakog para građeni su u jednoj zgradi. [1] Dizajn s dvostrukim reaktorima ima prednosti u konstrukciji, radu i održavanju. Omogućuje početak izgradnje i montaže komponenti za oba reaktora gotovo istovremeno, a prosječno vrijeme izgradnje po dva reaktora od 1000 MW bilo je 7,68 godina, čime prosječno vrijeme izgradnje jednog reaktora iznosi 3,84 godine. [8] Konstrukcija 1. reaktora u Černobilu započela je u lipnju 1972. godine, a reaktor je pušten u pogon u svibnju 1978. godine. Konstrukcija 4. reaktora u Černobilu započela je u travnju 1979. godine, a reaktor je pušten u pogon u ožujku 1984. godine. [1]

Slika 2 prikazuje glavne elemente RBMK reaktora. Jezgra reaktora izgrađena je od grafitnih blokova (oznaka A na slici 2) probijenih okomitim kanalima (oznaka B na slici 2) (RBMK-1000 ima 1663 kanala). Sadrži tlačne kanale (cijevi) od legure cirkonija (Zr + 2,5% Nb) unutarnjeg promjera 88 mm, debljine 4 mm i duljine oko 7m, od kojih svaki sadrži 2 sklopa goriva duljine 3640 mm. Gorivo su peleti blago obogaćenog (2%) uranovog dioksida zatvorene u cijevi od cirkonijeve legure vanjskog promjera 13,6 mm, debljine 0,825 mm i duljine 3,64 m (engl. *fuel pins/rods*). [4] Skup od 18 takvih cijevi s gorivom (engl. *18 pin clusters*) postavljen je cilindrično u nosač formirajući sklop goriva (engl. *fuel assembly*), a dva sklopa goriva naslagani duljinom jedan na drugi zauzimaju svaku tlačnu cijev. Svaka tlačna cijev (kanal s

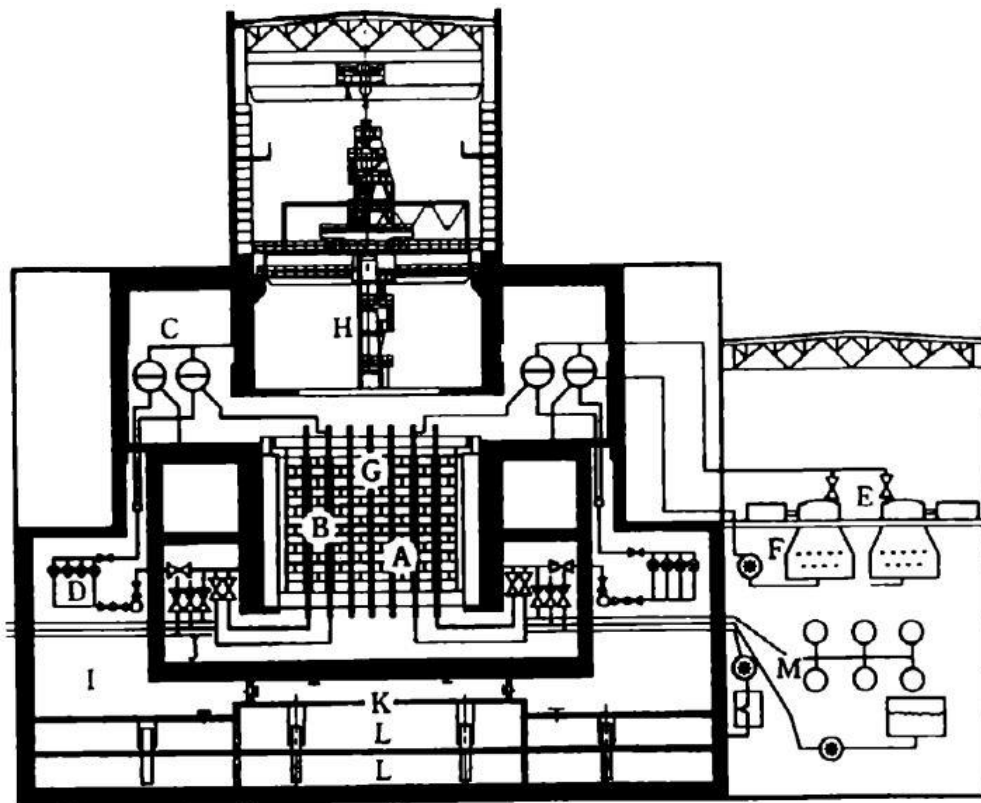
⁸ Obogaćeni uranij sadrži većinom 3-5% izotopa ²³⁵U, za razliku od uranija u prirodi koji sadrži 0,7% izotopa ²³⁵U i 99,3% izotopa ²³⁸U.

⁹ Turbogenerator je turbina povezana s generatorom, koji zajedno pretvaraju mehaničku energiju fluida u kretanju (tekuća voda, para, prirodni plin ili zrak) u električnu energiju.

gorivom) hladi se zasebno kipućom vodom [10] (detaljnije objašnjeno u poglavlju Rashladni sustav RBMK reaktora). [10]

Uzlazne cijevi prenose smjesu vode i pare iz kanala za gorivo u separatore pare (parne bubnjeve) (oznaka C na slici 2). Svaka od dvije odvojene identične petlje (kruga) rashladne tekućine ima dva separatora pare i četiri cirkulacijske pumpe (oznaka D na slici 2), od kojih 3 normalno rade, a četvrta je u stanju pripravnosti). [4]

Parne bubnjeve napušta suha para koja odlazi do jednog od dva turbinska generatora (oznaka E na slici 2). Turbinski generatori rade pri 3000 o/min i snazi od 500 MW(e). Para pod vrlo niskim tlakom se kondenzira u cjevastim kondenzatorima i vraća u parne bubnjeve napojnim pumpama (oznaka F na slici 2). [4]



Slika 2. Shema RBMK reaktora [4]

Apsorpcijske šipke (oznaka G na slici 2) služe u svrhu upravljanja i zaštite reaktora. Stroj za punjenje gorivom (oznaka H na slici 2) radi s postolja koje se proteže duž cijele hale za punjenje. [4]

Na slici 2 također su prikazani glavne cirkulacijske pumpe (oznaka I) i distribucijski cjevovod (oznaka J), smješteni u zasebnim, ali povezanim odjeljcima. Odjeljci su povezani i s površinskim kondenzatorom (oznaka K na slici 2) i s 2 bazena za smanjenje tlaka (oznaka L na slici 2). Odvojeni odjeljci služe za zadržavanje tekućine u slučaju nesreće. Slovom M na slici 2 označen je sustav za hlađenje jezgre u hitnim slučajevima. [4]

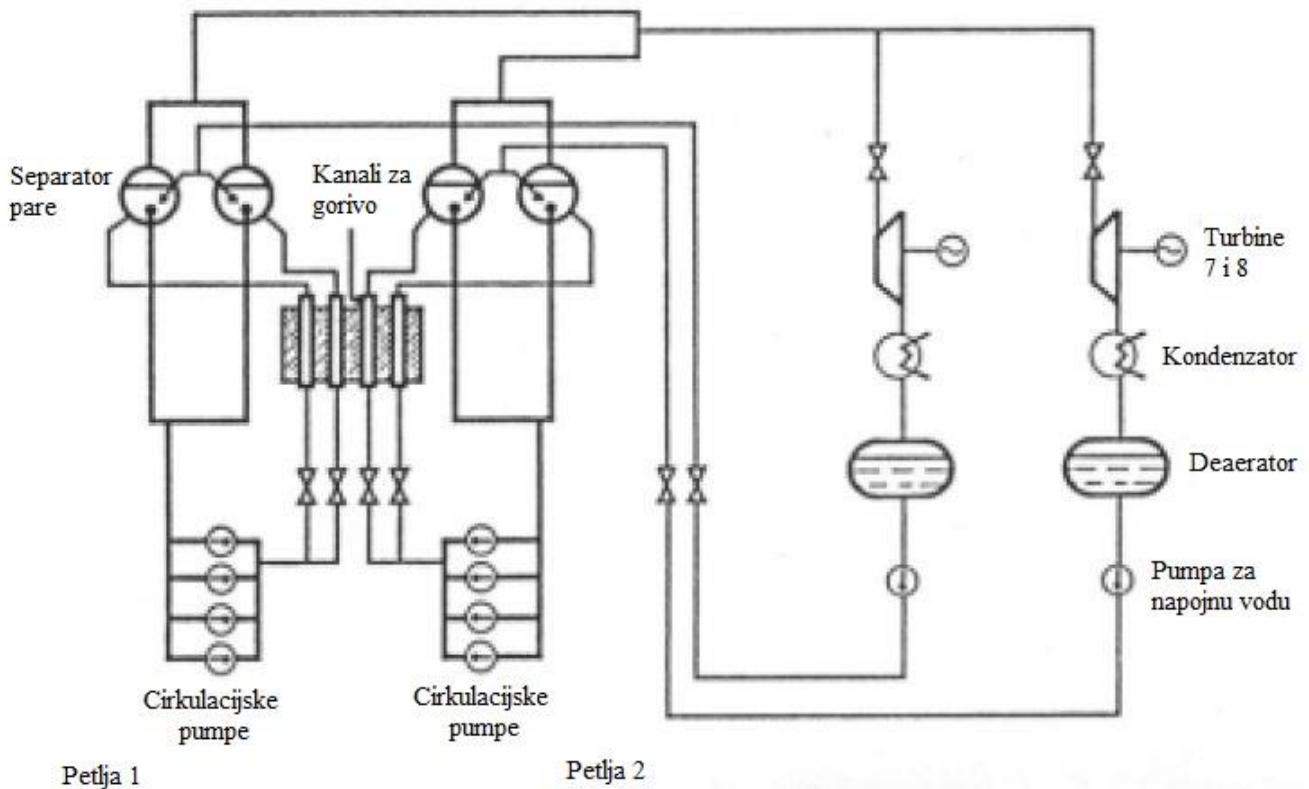
2.2.1. Rashladni sustav RBMK reaktora

Svaka od dvije paralelne petlje rashladnog sustava služi za hlađenje polovice rektorske jezgre (lijeva i desna polovica) i spojena je na sabirnice jednog turbogeneratora. Kao što je već rečeno, svaka se petlja sastoji od 2 separatora pare i 4 glavne cirkulacijske pumpe (engl. *main circulating pumps, MCPs*), od čega se tri koriste za normalan rad reaktora, a četvrta pumpa je rezerva u slučaju kvara jedne od te 3 pumpe. Svaka od 6 glavnih cirkulacijskih pumpi radi s protokom od oko 7000 t/h. Rad pri većem protoku (pri stabilnoj izlaznoj snazi reaktora) nije poželjan jer uzrokuje promjenu odnosa između mase napojne vode i mase vode odvojene u separatorima pare, zbog čega se povećava prosječna temperatura smjese napojne i separirane vode te dolazi do ključanja rashladnog sredstva na ulazu u jezgru. Ista je posljedica rada glavnih pumpi pri njihovim nazivnim protocima kada reaktor radi smanjenom snagom. [1]

Rashladno sredstvo (voda) ulazi u kanale za gorivo s donje strane pri tlaku od 8,2 MPa i temperaturi od 270 °C. Prolaskom kroz kanale padovi tlaka do izlaznog 7 MPa i temperature do izlazne 284,5 °C uzrokuju vrenje vode na udaljenosti od oko 2,5 m od mjesta ulaska vode. Izlazna smjesa vode i pare, koja sadrži 14,5 %¹⁰ pare, ulazi u separator pare gdje se razdvaja na zasićenu paru i vodu. Zasićena para prolazi kroz turbine, kondenzira (u napojnu vodu) i ulazi u separator pare gdje se miješa s odvojenom vodom kojoj se tako temperatura spušta na 270 °C. [1]

Budući da rashladno sredstvo teče zasebno u svaki kanal za gorivo, RBMK reaktori zahtijevaju individualnu regulaciju protoka u svakom kanalu goriva. Shematski prikaz rashladnog sustava u Černobilskom reaktoru broj 4 prikazan je na slici 3. [1]

¹⁰ Navedeni postotak se odnosi na maseni udio pare u smjesi



Slika 3. Shematski prikaz rashladnog sustava RBMK reaktora [1]

2.2.2. Grafitni moderatori

Grafit je ključna strukturna komponenta RBMK reaktora koji služi kao moderator i reflektor neutrona, osigurava strukturni integritet i akumulira toplinu u slučaju privremenog kvara rashladnog sustava. Jezgra RBMK reaktora sastoji se od grafitnih blokova naslaganih u stupove s aksijalnim otvorima/kanalima za gorivo (tlačne cijevi) i apsorbere.

Oko 5% energije fisije raspršuje se u grafitnu strukturu. Ta toplina, nastala kao rezultat usporavanja neutrona i rezultat gama zračenja¹¹, prenosi se u kanale za gorivo kondukcijom i zračenjem preko niza grafitnih prstena tipa "klipnog prstena". Grafitni prsteni dopuštaju dobar toplinski kontakt između tlačne cijevi i grafitnih blokova. [4] Radi poboljšanja prijelaza topline i sprječavanja oksidacije grafita kroz omotač u kojem je zatvorena struktura grafita polagano cirkulira smjesa helija i dušika volumnih udjela 85-90% He i 15-10% N₂. Grafitna struktura teška je 1700 tona, a gustoća joj je 1,65 g/cm³. Montirana je na donjoj metalnoj konstrukciji

¹¹ Gama zračenje su elektromagnetski valovi vrlo visoke frekvencije i energije, valnih duljina kraćih od 10⁻¹³ m, koji nastaju prilikom kvantnih prijelaza atomskih jezgri s pobuđenih stanja, u procesu kočnog zračenja brzih elektrona prilikom sudara s atomskim jezgrama, pri nuklearnim procesima u zvijezdama i u procesima pretvorbi subatomske čestice. Otkrili su ga 1898. Maria Curie-Sklodowska i Pierre Curie.

unutar reaktorskog prostora i ima oblik okomitog cilindra sastavljenog od 2488 stupaca grafitnih blokova oblika paralelopipeda¹² presjeka 250 x 250 mm i visine 600 mm. Kako se grafitna struktura ne bi pomicala u radijalnom smjeru, osigurana je zavarenim šipkama smještenima u perifernim stupovima bočnog grafitnog reflektora. [11]

Temperatura grafitne strukture prati se pomoću termoparova postavljenih na različitim točkama po volumenu cijele strukture, a temperaturni uvjeti se kontroliraju mijenjanjem sastava plinske smjese dušik-helij (povećanjem udjela helija snižava se temperatura grafita). Maksimalna temperatura grafita pri kojoj grafitni stog ne izgara u odsutnosti vodene pare je 750 °C. [11]

2.2.3. Kontrolne šipke

Apsorberski dio kontrolne šipke izgrađen je od bor karbida koji apsorbira neutrone i time kontrolira brzinu fisije. Određen broj šipki ostaje u jezgri tijekom rada reaktora, a ostale šipke se spuštaju u jezgru ukoliko se poveća razina snage reaktora i dođe do odstupanja od normalnih radnih uvjeta. [10]

Bor karbid najčešće je korišten apsorber neutrona koji u reaktoru podliježe sudarima s brzim neutronima (zbog čega nastaju točkasti ili prošireni defekti u strukturi bor karbida) te apsorpciji neutrona kojom dolazi do transmutacije¹³ ¹⁰B izotopa u helij i litij. Nakupine helija u malim mjehurićima pod pritiskom mogu dovesti do inter- i intragranularnog pucanja, dok je utjecaj litija manje jasan budući da litij nije vidljiv klasičnim metodama, kao što su EMPA¹⁴ ili XPS¹⁵. [12]

Kanali za kontrolne i zaustavne šipke prolaze kroz okomite kanale u grafitnim blokovima, istog su promjera kao i kanali za gorivo (88mm) i hlade se zasebnim krugom vode. Sustav upravljanja i zaštite reaktora koristi 211 čvrstih apsorberskih šipki podijeljenih na način:

- 163 ručno upravljane šipke od kojih su 139 kontrolne šipke za radijalno oblikovanje snage, a 24 su namijenjene zaštiti u slučaju opasnosti

¹² Paralelopipedi je četverostrana prizma čije su osnovice paralelogrami.

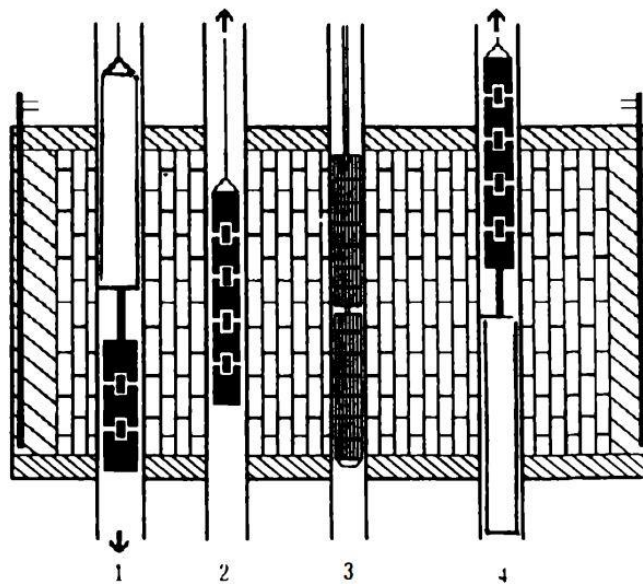
¹³ Pretvorba jednoga kemijskog elementa (odnosno njegova izotopa) u drugi; promjena broja protona ili neutrona u atomskoj jezgri.

¹⁴ *Electron Probe Micro Analysis*; mikroanaliza elektronskom sondom

¹⁵ *X-Ray Photoelectron Spectroscopy*; rendgenska fotoelektronska spektroskopija

- 24 šipke za automatsku regulaciju snage koji se umeću i izvlače na osnovu povratnih informacija iz jezgre. Polovica tih šipki služi za automatsku regulaciju prosječne snage (3 grupe po 4 šipke), a druga polovica za automatsku regulaciju lokalne snage
- 24 kratke apsorberske šipke za profiliranje aksijalnog fluksa. [4]

Na slici 4 prikazan je dijagram različitih kontrolnih šipki i sklopa za gorivo gdje su oznake: 1-Kratke apsorberske šipke, 2-automatske kontrolne šipke, 3-tlačna cijev s dva sklopa goriva, 4-ručno upravljane šipke i šipke za hitno isključivanje. Vidljivo je da se sve šipke osim skraćениh apsorbirajućih šipki izvlače i umeću od gore. [4]

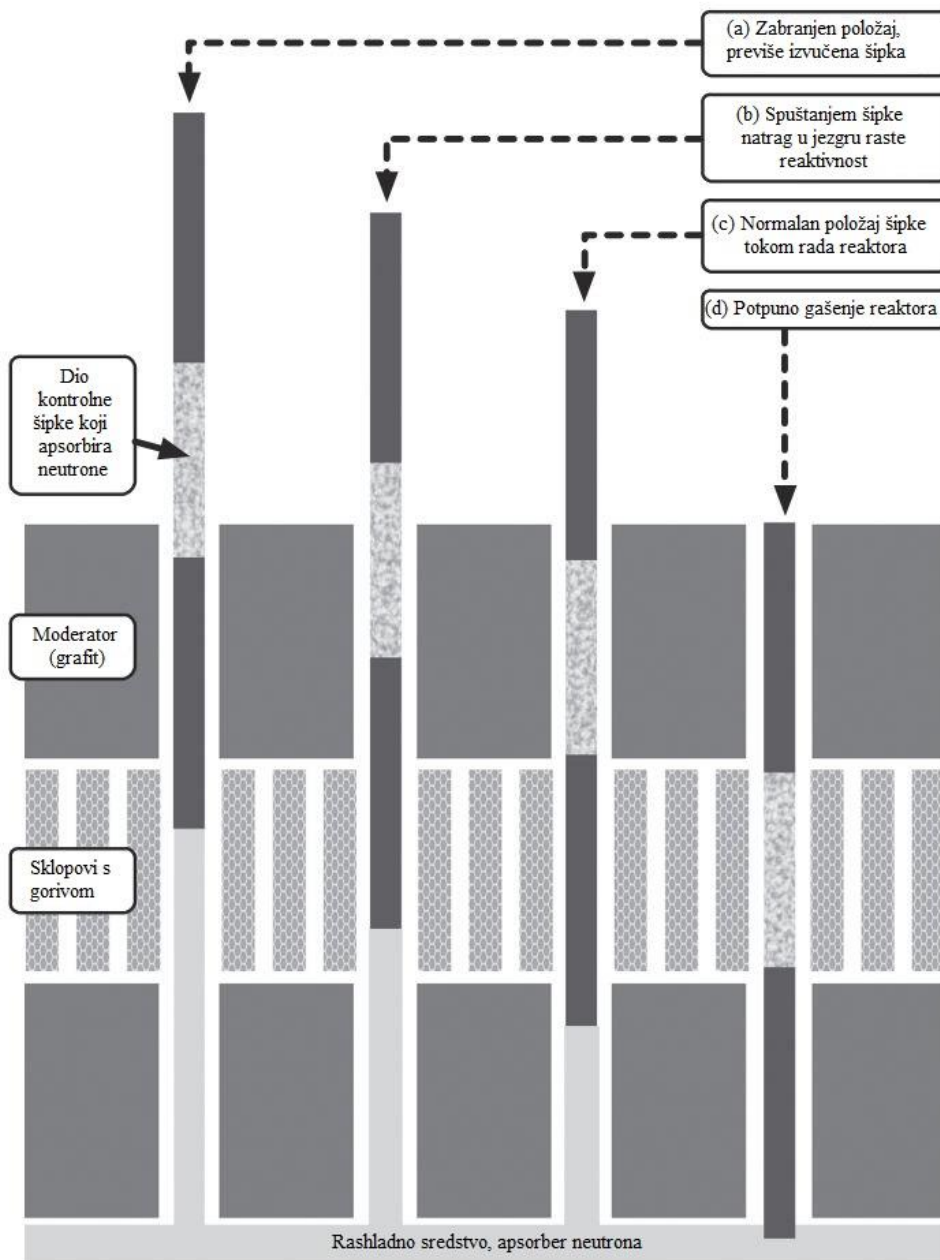


Slika 4. Dijagram kontrolnih šipki i sklopa za gorivo RBMK reaktora [4]

Kratke šipke, umetnute od dna jezgre prema gore, služe za ravnomjernu raspodjelu snage u reaktoru. [10] Ostale šipke ravnomjerno su raspoređene po jezgri u šest skupina od 30 do 36 šipki. Šipke za isključivanje u nuždi rade na motorni pogon i imaju brzinu umetanja od 0,4 m/s te potpuno umetanje u jezgru traje 15-20 sekundi. Na kraju svake kontrolne šipke nalazi se niz zglobnih elemenata koji ne sadrže materijal koji apsorбира neutrone i čija je uloga sprječavanje vode da zauzme prostor koji je oslobodila šipka kada se izvuče. [4]

Na slici 5 prikazani su dizajn i različite moguće pozicije kontrolnih šipki. Kanali u kojima se nalaze kontrolne šipke ispunjeni su vodom. Kada su potpuno umetnute u jezgru (paljenje ili gašenje reaktora), šipke apsorbiraju sve neutrone u gorivu i reakcija se ne događa (pozicija d na slici 5). Kada su šipke dijelom izvučene iz jezgre, neutroni mogu slobodno reagirati s moderatorom. Kako je već rečeno, kontrolne šipke RBMK reaktora sastoje se od 2

dijela, od kojih jedan apsorbira neutrone, a drugi, „istiskivač“, izgrađen je od grafita ili cirkonija koji ne apsorbiraju neutrone. Njegova je uloga sprječavanje ulaska vode (koja apsorbira neutrone) u kanal nakon što je šipka izvučena i posljedičnog usporavanja reakcije. Kada je šipka potpuno izvučena iz jezgre, samo taj neapsorbirajući dio ostaje u jezgri i lančana reakcija je potaknuta (pozicija c na slici 5). Međutim, ako se šipka još više izvuče van (pozicija a na slici 5), voda ulazi u kanal i apsorbiranjem neutrona usporava reakciju. Ako se šipka iz tog položaja vraća natrag u jezgru (pozicija b na slici 5), neapsorbirajući dio istiskuje vodu van iz kanala i pojačava reaktivnost. [13]



Slika 5. Dizajn i različiti mogući položaji kontrolnih šipki [13]

2.2.4. Koeficijent praznine reaktivnosti (koeficijent praznine)

Koeficijent praznine daje odnos između promjene reaktivnosti jezgre i udjela nastale pare u rashladnom sredstvu. Do promjene reaktivnosti promjenom udjela pare dolazi zbog činjenice da je voda učinkovitija i kao rashladno sredstvo i kao apsorber neutrona nego je to para. U reaktorima kod kojih je voda oboje i rashladno sredstvo i moderator koeficijent praznina je negativan jer povećanje udjela pare znači smanjeno moderiranje neutrona koje je ključno za lančanu reakciju. Taj način smanjenja snage reaktora ključna je sigurnosna mjera nuklearnih reaktora na Zapadu. [10]

RBMK reaktori imaju pozitivan koeficijent praznina. Kako su voda i rashladno sredstvo drugačiji materijal, veći udio pare uzorkuje smanjeno hlađenje reaktora, a moderiranje neutrona ostaje netaknuto i lančana reakcija se nastavlja. Nadalje, porastom udjela pare opada udio vode koja apsorbira neutrone, zbog čega raste broj slobodnih neutrona, pospješuje se lančana reakcija i reaktivnost raste. [10]

Koeficijent snage reaktora zbroj je koeficijenta praznina i temperaturnog koeficijenta goriva (negativan koeficijent goriva znači da porastom temperature dolazi do smanjenja broja neutrona). Pri normalnom radu reaktora pri punoj snazi temperaturni koeficijent goriva prevladava i koeficijent snage reaktora je negativan, a pri snagama nižim od 20% ukupne snage, zbog niskih temperatura goriva, koeficijent snage reaktora postaje pozitivan. Pri niskoj snazi reaktora povećanje snage ili smanjenje protoka rezultira vrenjem i daljnjim pojačanjem snage i većoj nestabilnosti reakcije. [4] Tokom nesreće u černobilskoj nuklearnoj elektrani koeficijent praznina je bio toliko pozitivan da je nadvladao ostale koeficijente reaktivnosti čineći koeficijent snage reaktora pozitivnim. Pojačanjem snage reaktora nastajalo je više pare što je zauzvrat dovelo do još većeg rasta snage, posljedica čega je povišenje temperature rashladnog sredstva i još veće nastajanje pare, zbog čega se smanjuju hlađenje i apsorpcija neutrona pa snage još raste. Rezultat svega toga bilo je brzo povećanje snage do oko 100 puta nazivnog kapaciteta reaktora. [10]

2.3. NESREĆA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI ČERNOBIL

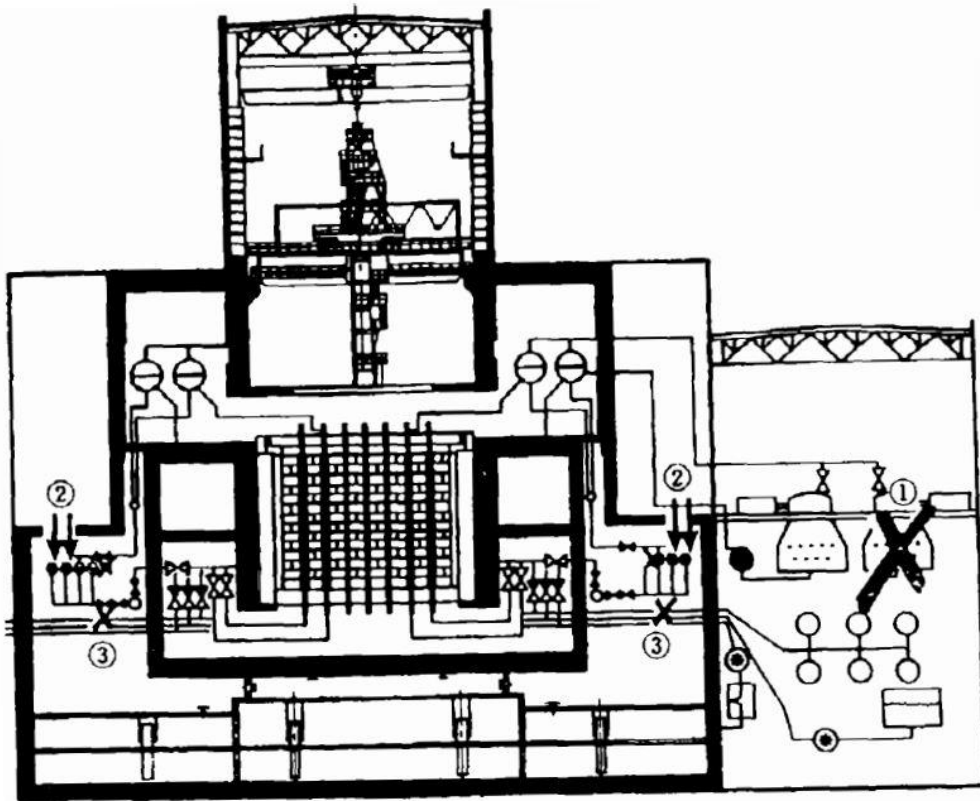
Nesreća u NE Černobil dogodila se tijekom provođenja sigurnosnog testa koji je trebao poboljšati sigurnost elektrane. Cilj testa bio je ispitati sposobnost turbinskog generatora da proizvodi dovoljno električne energije za napajanje hitnog sustava hlađenja jezgre (engl. *Emergency Core Cooling System, ECCS*) u slučaju nestanka struje, [2] odnosno ispitati hoće li turbo-generatorski blok moći opskrbiti sustav električnom energijom narednih 20-30 sekundi, koliko je potrebno za pokretanje hitnih dizelskih generatora.. Sigurnosni test bio je u planu neposredno prije sljedećeg redovnog gašenja reaktora radi održavanja. Sigurnosne upute propisivale su razine snage od 700-1000 MW(t) te prekid testa i neposredno gašenje reaktora za snage ispod navedene granice. [13]

U ovom će poglavlju nesreća biti prikazana u dijelovima, kronološki.

2.3.1. Uvod: 25.04.1986 - 01:00-23:10 h

Operateri su 25. travnja u 01:00 h počeli smanjivati snagu reaktora s nominalne, pune snage (1000 MW(e), oko 3000 MW(t)). Dvanaest sati kasnije, oko 13:05 h, kada je reaktor radio pri 1600 MW(t), isključen je turbogenerator broj 7 (broj 1 na slici 6), a 4 glavne cirkulacijske pumpe i dvije pumpe napojne vode spojene su na turbogenerator broj 8 (br. 2 na slici 6). [4]

U 14:00 isključen je hitni sustav hlađenja jezgre kako ne bi bio lažno pokrenut očekivanom niskom razinom u parnom bubnju tokom eksperimenta (br. 3 na slici 6). U tom je vremenu kijevski dispečer električne mreže, zbog nedostatka struje, naredio nastavak rada jedinice 4 do 23:10h, što je značilo da će eksperiment morati obaviti druga smjena koja nije bila predviđena za taj posao. [4]



*Slika 6. Stanje reaktora 25.06.1986. u periodu 01:00-23:10h.
Prekrižena je komponenta koja tijekom sigurnosnog testa nije bila u pogonu [4]*

2.3.2. Pripreme za sigurnosni test - 25.04.1986. 23:10h – 26.04.1986. 01:00 h

U 23:10 h kreće smanjivanje snage reaktora, koja 26. travnja u 00:10 h doseže iznos od 720 MW(t) (donja granica). [1] U 00:28h 26. travnja ugašen je sustav lokalnog automatskog upravljanja (koji upravlja s 12 kontrolnih šipki). Ne postavljajući ponovno radnu točku sustava automatske regulacije, operater nije bio u mogućnosti kontrolirati snagu reaktora kombinacijom ručne i sveukupne automatske kontrole, zbog čega snaga reaktora pada na 30 MW(t). Ne znajući da je reaktor tokom prvog spuštavanja snage ušao u stanje otrovanja ksenonom (koje je pad snage na 30 MW(t) naglo povećao), operater uz velike teškoće u 01:00 h podiže i stabilizira snagu reaktora na 200 MW(t), daleko ispod sigurnosne granice. [4] Snaga je podignuta izvlačeći kontrolne šipke malo više nego je dopušteno sigurnosnim regulacijama. [2]

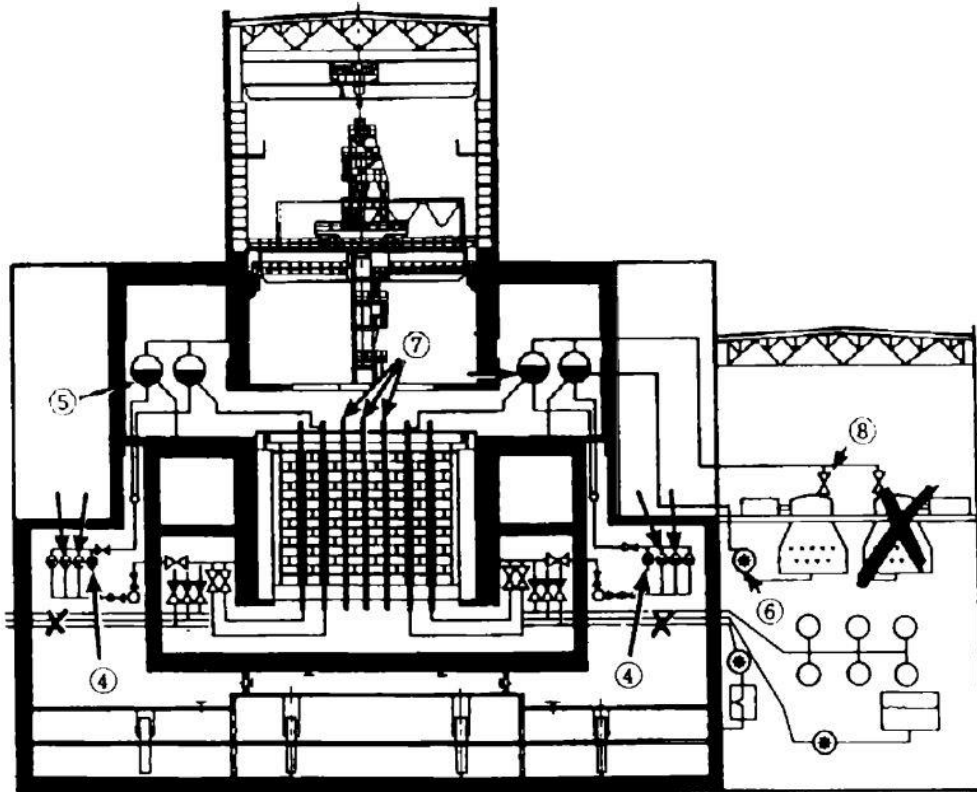
2.3.3. Sigurnosni test - 26.04.1986. 01:00-01:23:40 h

U 01:03 i 01:07 operateri su pokrenuli po jednu rezervnu cirkulacijsku pumpu u obje petlje (br. 4, slika 7) , tako da bi na kraju sigurnosnog testa 4 pumpe ostale spojene na mrežu (ostale 4 su spojene na turbogenerator broj 8) i osigurale pouzdano hlađenje jezgre. Zbog premale snage reaktora (7% nominalne) i promjene entalpije duž jezgre (6% nominalne, odnosno 4°C), brzina protoka rashladnog sredstva bila je veća od očekivane (115-120% normalne) sa svih 8 pumpi u pogonu, a stvaranje pare je bilo drastično smanjeno. To je zabranjen način rada jer može doći do neplaniranog gašenja pumpe zbog gubitka snage (engl. *pump-trip*), što dovodi do kavitacije¹⁶ i vibriranja glavnog dovodnog cjevovoda. Operateri su nadjačali postavke „pump-trip“ točke pokušavajući ručno kontrolirati tlak pare i razinu u parnom bubnju (br. 5, slika 7). Da bi povećao razinu vode u parnom bubnju operater je u 01:09 h otvorio glavni dovodni ventil i povećao protok vode 3 puta. Željena razina vode je postignuta nakon 30 s, ali je dovod vode u bubanj nastavljen. Prolaskom hladne vode iz bubnja kroz jezgru još više opadaju nastanak pare i tlak. Veći udio vode znači veću apsorpciju neutrona zbog čega je svih 12 automatskih kontrolnih šipki potpuno izvučeno iz jezgre (br. 7 na slici 7). Da bi se snaga reaktora održala na 200 MW(t), izvučeno je i nekoliko ručno upravljanih kontrolnih šipki, zbog čega je dio automatsko upravljanih šipki ponovno uvučen u jezgru za 1,8 m. [4]

U 01:21:50 h operater je naglo smanjio protok napojne vode, čime se povećala temperatura vode na ulazu u reaktor i povećalo stvaranje pare, zbog čega su se automatske kontrolne šipke počele spuštati u jezgru. [4]

U 01:22:30 h operater je, gledajući ispis parametara reaktora, primijetio da se u jezgri nalazi samo 6-8 djelomično spuštenih kontrolnih šipki; manje i od „sigurne“ granice od 15 šipki (ispod koje se reaktor treba ugaziti) i od iznosa danog u uputama testa, 30. Sigurnosni test je svejedno nastavljen. Zbog velike koncentracije ksenona u sredini jezgre i nastajanja pare u gornjim dijelovima jezgre, profil koncentracija neutrona bio je normalan u radijalnom smjeru, a u aksijalnom se povećavao prema gore. [4]

¹⁶ Kavitacija je pojava nastanka mjehurića pare isparavanjem kapljevine u niskotlačnom dijelu cjevovoda i njihove implozije kada smjesa pare i kapljevine dospije u visokotlačni dio. Posljedica implozije je razaranje materijala stijenke stroja (kavitacijska erozija).



Slika 7. Stanje reaktora tokom provođenja sigurnosnog testa [4]

Sigurnosni test započinje u 01:23:04 h. Zatvoreni su glavni parovodni ventili do turbogeneratorske jedinice br. 8 (raste tlak pare, neznatno opada proizvodnja pare u jezgri), a sigurnosna mjera gašenja reaktora kad su oba turbogeneratorska isključena, protivno planu sigurnosnog testa, bila je isključena, vjerojatno u svrhu ponavljanja testa ako prvi bude neuspješan. [4]

Turbogenerator br. 8, četiri glavne cirkulacijske pumpe (br. 2 na slici 7) i dvije pumpe napojne vode (br. 6 na slici 7) su gašeni. Smanjeni su glavni protok rashladnog sredstva i protok napojne vode, zbog čega rastu ulazna temperatura vode i stvaranje pare. Zabilježen je porast snage reaktora (01:23:31 h), što se (bezuspješno) pokušalo kompenzirati s 12 automatskih kontrolnih šipki. Došlo je do nekontrolirane fisijske lančane reakcije i voditelj smjene pokušao je ručno „skremirati“ reaktor (engl. *to scram* – ugasiti reaktor u hitnim slučajevima). [4] Radnici nisu mislili da postoji stvarna potreba za *scram* tipkom (hitni slučaj) već su operateri RBMK reaktora inače koristili *scram* kao prečac za ručno gašenje reaktora. U ovom slučaju to je značilo istovremeno spuštanje preko 200 kontrolnih šipki u jezgru. [13] Voditelj smjene dao je naredbu da se pritisne AZ-5 tipka, pritiskom koje se sve kontrolne šipke i šipke u slučaju opasnosti spuštaju u jezgru. Međutim, nakon par sekundi spuštanja šipki osjetili su se brojni udari i operater je vidio da su se šipke zaustavile bez da su se potpuno spustile u jezgru. [1] Krajevi

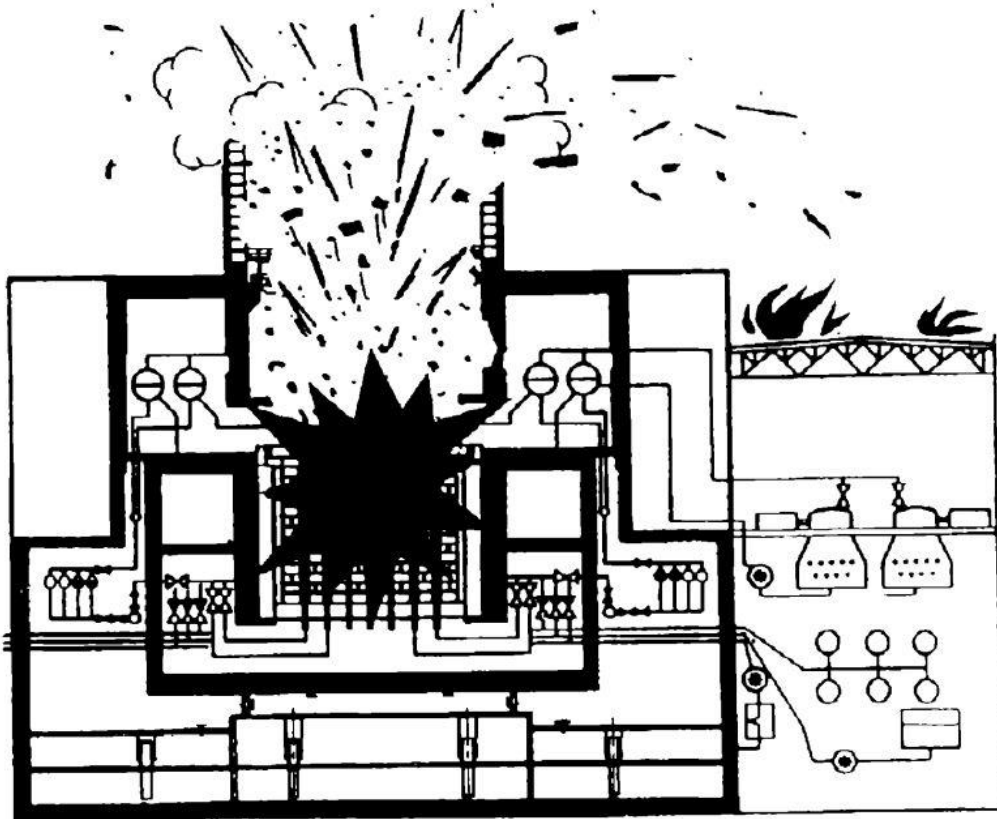
šipki, izgrađeni od materijala koji ne apsorbira neutrone (grafita), istisnuli su vodu (koja apsorbira neutrone) i pojačali reaktivnost u jezgri (dolazi do skoka snage reaktora). Kontrolne šipke, umjesto da potpuno prekinu fisiju, odveli su je u nekontrolirano stanje, a radnici su mogli samo gledati – sustav je bio automatiziran i nisu ništa mogli napraviti. [13] Skok snage bio je potaknut i povećanim stvaranjem pare u jezgri (zbog zastoja pumpe) i velikog pozitivnog koeficijenta praznina te je snaga nakon 3 sekunde dosegla 530 MW(t) i nastavila eksponencijalno rasti. Jedino je negativan temperaturni koeficijent goriva smanjivao broj neutrona u tom trenutku. [4]

U 01:24 h čule su se dvije eksplozije, jedna za drugom tijekom kojih su odletjeli otopljeni i gorući komadići iz jedinice br. 4, od kojih su neki pali na krov zgrade turbogeneratorske i izazvali požar. [4] Doživljaj jednog od radnika u NE Černobil je sljedeći: „Bio sam u blizini jedinice 4, oko 500 metara dalje, kad sam odjednom čuo glasan prasak. Onda je došlo nešto poput zvuka eksplozije. Mislio sam da je parni ventil, što smo s vremena na vrijeme znali čuti. Zatim je za nekoliko sekundi svijetli, plavi bljesak bio praćen ogromnom eksplozijom. Gledajući blok 4, vidio sam da su od njega ostala samo dva zida. Objekt je bio u ruševinama, voda se izlivala, bitumen je gorio na krovu jedinice 4“. [1]

2.3.4. Eksplozija i požar – 01:23:40 h – 05:00 h

Gorivo izbačeno iz cirkonijevih cijevi porastom tlaka oštetilo je tlačne cijevi, zbog čega je para ušla u prostor grafitnog moderatora, tlak je pao (01:23:47 h) i voda je pojurila natrag u kanale s gorivom. Prva eksplozija mogla je biti upravo zbog interakcije rashladne vode i goriva (nastajanje ogromnih količina pare) izbačenog iz cijevi. Druga eksplozija bila je zbog miješanja vrućeg vodika (nastalog u voda-cirkonij procesu) i ugljikovog dioksida (nastalog gorenjem grafita) sa zrakom zbog oštećenog zaštitnog omotača reaktora. Zajedno s nakupljenom parom ove detonacije raznijele su gornji štit reaktora težak 1000 tona, slomile tlačne cijevi i podignule nekoliko kontrolnih šipki. Dio grafitnih blokova izbačen je iz jezgre i oštećeni su neki strukturni dijelovi zgrade. Osim požara na krovu zgrade, buknuo je preko 30 požara na različitim mjestima zbog puknutih vodova za gorivo, oštećenih kabela i toplinskog zračenja iz izložene jezgre. Mnogi od dežurnih vatrogasaca (pozvanih do 1:30 h) i vatrogasaca iz Pripjata i Černobila poginuli su uslijed izloženosti smrtonosnim dozama zračenja. Požari na reaktorskoj i turbinskoj zgradi ugašeni su do 05:00 h, kada je tek ugašen i reaktor broj 3 koji se nalazio uz

oštećeni blok. Jedinice 1 i 2 nastavile su raditi do sljedećeg jutra (oko 24 h nakon nesreće). Na slici 8 shematski su prikazani eksplozija i vatra koja je uslijedila. [4]



Slika 8. Eksplozija i vatra tokom sigurnosnog testa (01:23:40 h - 05:00 h) [4]

Eksplozija je potpuno uništila jezgru rektora bloka 4, uništila je zidove prostorija sa separatorima pare te je srušila 2 kata odzračivača i prostorije s glavnim cirkulacijskim pumpama. Potpuno je uništen i sustav hitnog hlađenja rektora. Donja metalna konstrukcija spustila se 4m niže te prignječila nosive konstrukcije i vodovodni sustav. [1]

Izbačena je velika količina materijala jezgre (veliki komadi grafita i cijeli grafitni blokovi, fragmenti kanala za gorivo, sklopovi goriva). Cijela nuklearna elektrana Černobil bila je prekrivena grafitnom prašinom. [1]

Na slikama 9 i 10 prikazan je uništen reaktor 4.



Slika 9. Uništen reaktor br. 4 fotografiran iz zraka nekoliko tjedana nakon nesreće [14]



Slika 10. Uništen reaktor br. 4 fotografiran s krova jedinice br. 3 [14]

2.4. POSLJEDICE

Glavni razlozi nesreće bili su ozbiljni prekršaji koje su počinili radnici jedinice 4, a posebno je važno naglasiti izvođenje pokusa snagom ispod predviđene za ispitivanje, blokadu zaštitnih sustava koji se oslanjaju na razinu vode i pare u separatorima pare i na signal isključenja iz dva turbogeneratorsa, priključenje svih glavnih cirkulacijskih pumpi na reaktor te isključivanje sustava hlađenja jezgre u nuždi (ECCS). [1]

Važno je naglasiti i da operateri reaktora nisu bili upoznati s manama reaktora: dizajn kontrolnih šipki s neapsorbirajućim dijelom koji istiskuje vodu prilikom spuštanja u jezgru, premala debljina tlačnih cijevi (4mm) koje nisu mogle izdržati tlak u abnormalnim okolnostima zbog čega je došlo do pucanja cijevi i istjecanja vode u grafitni dio, pozitivni koeficijent praznina posljedice kojeg su se izbjegavale zabranom rada reaktora pri niskim snagama. [2]

Ukupno je 650 000 ljudi bilo uključeno u čišćenje NE Černobil (zakopavanje jedinice 4 i povratak u rad ostalih neoštećenih jedinica) i područja u radijusu od 30 km. Postavljanjem barijere između mjesta reaktora i rijeke Pripjat podzemne i površinske vode zaštićene su od kontaminacije.

2.4.1. Dekontaminacija NE Černobil i radijusa od 30 km od NE

Nastalo zračenje može se podijeliti u četiri faze:

- Prva faza - zračenje uzrokovano eksplozijom
- Druga faza – zračenje vezano za izgaranje grafita
- Treća faza – zračenje uzrokovano procesima koji se odvijaju povećanjem temperature goriva (zbog energije radioaktivnog raspada akumuliranih produkata fisije)
- Četvrta faza – naglo smanjenje zračenja zbog stabilizacije i kasnijeg postupnog pada temperature (06.05.1986. kreće nagli pad količine zračenja radionuklida iz oštećenog reaktora, nakon čega količina zračenja nastavlja polako padati). [15]

Sljedećih dana, a sve do 1988., ublažavanje katastrofe odvijalo se metodom pokušaja i pogrešaka, a ne znanstvenim pristupom. Priljev voljnih, ali neorganiziranih volontera koji nisu bili upoznati s radiološki opasnim okruženjima doveo je do novih problema. Jedan od njih bila je količina kontaminirane odjeće koja je preplavila čistače elektrane (u početku nisu postojala sigurna odlagališta za kontaminiranu odjeću i opremu). [13]

Tijekom 1800 letova vojni su helikopteri bacili više od 5000 tona materijala koji apsorbira neutrone u ruševine reaktora 4. Kako helikopteri nisu imali zaštitu od radijacije, piloti su počeli stavljati olovne ploče ispod svojih sjedala. Velike količine zračenja uništavale su sovjetske i strane robote koji su zatim zamijenjeni „bio-robotima“, tj. vojnicima u zaštitnoj olovnoj opremi - likvidatorima. Oni su u iznimno opasnim uvjetima lopatama bacali grafit s krova natrag u ruševine reaktora, radeći samo 1-2 minute prije nego su akumulirali cjeloživotnu dozu radijacije i napustili mjesto. Fotografije ovih vojnika, kao ovdje prikazana slika 11, jedne su od najozloglašnijih slika napora čišćenja Černobila. [13]



Slika 11. Likvidatori bacaju grafit natrag u jezgru uništenog reaktora koja će kasnije biti prekrivena sarkofagom [14].

Likvidatori su većinom bili vojnici, a kako vojska nije imala prikladnu opremu za radioaktivne uvjete, likvidatori su je morali sami napraviti (slika 12). Rezali su olovne ploče debljine 2-4 mm u pregače koje su stavljali ispod odjeće pokrivajući prednji i stražnji dio tijela, naročito štiteći kralježnicu i koštanu srž. [14]



Slika 12. Likvidatori sami izrađuju zaštitnu odjeću [14]

Kako bi se spriječila kontaminacija podzemnih voda, o kojima je ovisila polovica stanovništva Ukrajine, zasebna radna skupina krenula je u izgradnju podzemne barijere ispod cijele strukture, a njihov je rad kasnije bio ograničen samo na najopasnija područja. Osim toga, kako bi se zračenje zadržalo unutar jedinice 4, 20. svibnja 1986 krenula je izgradnja obloga (sarkofaga) oko jedinice 4, koja je završena u studenom iste godine. [13]

Unatoč svemu, tjednima nakon eksplozije najviši ukrajinski dužnosnici i dalje su pozivali na brzi povratak na „normalno stanje“. Međunarodni mediji donosili su stvarnu sliku posljedica nesreće: skandinavski sobovi masovno su zaklani, britanske ovce bile su u karanteni, grčki poljoprivredni proizvodi izbačeni su iz prometa, a njemačke regije borile su se oko pravilnog načina dekontaminacije zelene salate. Značajni dijelovi Europe toliko su bili kontaminirani da vlasti i danas preporučuju ograničenja konzumacije divljih gljiva i bobičastog voća. Nimalo zanemarive nisu ni zdravstvene posljedice ljudi izloženih zračenju, jedna od kojih je stopa raka štitnjače kod djece izložene radioaktivnom jodu, osobito u Ukrajini, Bjelorusiji i Rusiji. [13]

Ekonomska cijena nesreće iznosi oko 6,8 milijardi USD izravnog troška (u koje spadaju. gubitak reaktora, evakuacija, medicinska njega i dekontaminacija) i jednako toliko dolara neizravnog troška (npr. zamjena za izgublenu struju, nova gradnja i nadzor hrane). Kada se tomu dodaju troškovi u drugim zemljama, ukupni iznos je oko 15 milijardi američkih dolara. [16]

2.4.2. Zdravstvene posljedice

Sjeverozapadni vjetar nosio je krhotine iz eksplodiranog reaktora prema Pripjatu, u kojem su razine zračenja oko 30 sati nakon nesreće (27. travnja u 07:00 h) porasle na 180-600 mrem/sat, a isti dan u 17:00 h dosegle su vrijednosti od 720-1000 mrem/sat. Rano ujutro 27. travnja stanovnici Pripjata upozoreni su da ostanu u kućama, a isti dan su kasnije obaviješteni da će biti evakuirani te su stotine autobusa krenule iz Kijeva i okolnih gradova prema Pripjatu. Za pružanje medicinske skrbi 135 000 evakuiranih osoba organizirano je 450 „medicinskih brigada“, svaka od kojih se sastojala od liječnika, medicinske sestre, radiološkog tehničara i ostalog pratećeg osoblja. Nijednom stanovniku Pripjata nije bila potrebna hospitalizacija zbog izloženosti zračenju, a jedan civil koji je čak nastavio raditi u svom vrtu nakon nesreće imao je (samo) blage opekline od beta zračenja na potkoljenicama koje nisu zahtijevale hospitalizaciju. [3]

Neki stanovnici Pripjata već su 26. travnja dobili kalijev jodid u tabletama od 130 mg, a ostali su KI tablete dobili tek prilikom evakuacije i to dovoljno za 10 dana uzimanja tableta. Od 2000 trudnica među evakuiranima, niti jedna nije dobila KI. U prosjeku su evakuirani primili 1,5-5,0 rad gama zračenja te 10-20 rem beta zračenja u kožu i do 30 rad u štitnu žlijezdu. Procjenjuje se da je čak 25 000 osoba primilo 35-50 rem, a 2000 trudnica bez KI tableta primilo je prosječne ukupne tjelesne doze od 43 rad. Od njih se do rujna 1986. oko 400 porodilo bez ikakvih značajnih abnormalnostima beba. [3]

Za usporedbu, prosječna godišnja doza prirodnog zračenja koju prime stanovnici Europe je 1 mSv/osoba/godina (100 mrem), a osobe koje su profesionalno izložene ionizacijskom zračenju smiju primiti najviše 5 mSv (0,5 rem) godišnje. Prag za leukopeniju¹⁷ iznosi 0,5 Sv (50 rem), a za anoreksiju, mučninu, povraćanje i umor je 1 Sv (100 rem). Doza od 3,5 Gy (350 rad, što je ekvivalentno dozi od 3,5 Sv, tj. 350 rem) je srednja smrtonosna doza, tj. doza od koje će umrijeti 50% ozračenih osoba. Doze niže od 0,5 Sv (50 rem) u čovjeka ne izazivaju kliničke niti morfološke promjene na organima, ali mogu izazvati promjene na genima tjelesnih ili spolnih stanica, što za posljedicu ima pojavu raka i različitih oštećenja na potomstvu. [17]

Porast broja karcinoma štitnjače u djece i adolescenata (i manji porast kod odraslih) uočen je 1990. u južnim područjima Bjelorusije i sjeverne Ukrajine i od 1994. u regijama Briansk i Kaluga (jugu Ruske Federacije). Zabilježeno je oko 800 slučajeva karcinoma štitnjače kod mlađih od 15 godina iz najkontaminiranih područja, što je porast od 100 puta (s 0,03 do

¹⁷ Smanjen broj leukocita u krvi ispod normalnih vrijednosti.

3,0 slučaja raka štitnjače na 100 000 djece godišnje). Od toga je 98% zabilježeno kod djece mlađe od 10 godina, a 65% kod mlađih od 5 godina. Zabilježeno je i da se rak štitnjače pojavio i kod neke djece koja su u vrijeme nesreće još uvijek bila u maternici. [18]

2.4.3. Promjene na RBMK reaktoru

Na račun povećanih troškova proizvodnje, Rusija i Ukrajina provele su niz mjera za poboljšanje sigurnosnih karakteristika RBMK reaktora:

1. Radne točke položaja kontrolnih šipki postavljene su tako da su sve šipke uronjene u jezgru najmanje 1,2 m, uz što postoji i fizička mogućnost sprječavanja njihovog izvlačenja van te granice. Time je eliminiran pozitivan učinak *scram-a*.
2. Minimalan broj kontrolnih šipki u jezgri u svakom trenutku povećan je na 70-80, što ograničava pozitivni koeficijent praznina.
3. Gubitak aktivnosti smanjivanja koeficijenta praznina tako da reaktor ne može postati kritičan nadoknađen je većim obogaćivanjem goriva, s 2% na 2,4% ^{235}U .
4. Osigurana je dodatna instrumentacija za mjerenje pothlađenja na ulazu u glavne cirkulacijske pumpe.
5. Uveden je dodatni neovisni sustav automatskog „brzog“ gašenja reaktora bez intervencije operatera s vremenom umetanja od 1-2 sekunde za granicu reaktivnosti ispod prethodno postavljene razine.
6. Implementirana su mnogobrojna poboljšanja u tehničkom upravljanju i obuci operatera.

[4]

3. ZAKLJUČAK

Nesreća u NE Černobil rezultat je kombinacije lošeg dizajna reaktora, lošeg informiranja osoblja o dizajnu i sigurnosnim procedurama te ignoriranja pravilnog postupanja s reaktorom. Učinci nesreće pogoršani su lošom reakcijom od samog početka nesreće; kasnom evakuacijom stanovnika, prikriivanjem stvarne situacije od strane SSSR-a (dok su sve druge države pogođene zračenjem odmah krenule provoditi sigurnosne mjere) i lošim opremanjem i osposobljavanjem likvidatora i svih volontera.

Osim ogromnih zdravstvenih, ekoloških i ekonomskih učinaka, nesreća je učinak imala i na globalnu proizvodnju električne iz nuklearne energije. Percepcija javnosti o nuklearnoj energiji uzrokovana strahom dugo se nije mijenjala, gašene su postojeće nuklearne elektrane i prestajalo se s izgradnjom novih. Izvor električne energije, suprotno optimističnim očekivanjima iz 1954. godine, i dalje su primarno neobnovljivi izvori energije, čija cijena kontinuirano raste i na čiji se učinak u globalnom zagrijavanju stalno podsjeća. U posljednje se vrijeme, upravo zbog visokih cijena energenata, energetske (ne)ovisnosti država, globalnog zagrijavanja i ratova čiji su uzrok upravo energenti, sve više vraća nuklearnim elektranama, čiji je veliki izazov trenutno skladištenje i odlaganje nastalog radioaktivnog otpada.

Iako je sanacija posljedica nesreće uključivala velik broj ljudi i sredstava, posljedice nesreće osjećaju se i danas, pa je tako ogromna količina radioaktivnog otpada u Černobilu zarobljena unutar sarkofaga, a područje oko njega još će dugo biti nenastanjivo. Nesreća u nuklearnoj elektrani Černobil bila je nesreća koja je imala sve predispozicije za dogoditi se, a nesreća koja se nikako nije smjela dogoditi.

4. LITERATURA

- [1] **Malko, M.V.**, The Chernobyl Reactor: Design Features and Reasons for Accident u: **Imanaka, T.**, Recent Research Activities about the Chernobyl NPP, Accident in Belarus, Ukraine and Russia, Kyoto University, 2002, str. 11-27
- [2] **Nakao, M.**, Failure Knowledge Database / 100 Selected Cases, Chernobyl Accident, <http://www.shippai.org/fkd/en/cfen/CA1000644.html> (pristup 16.08.2022.)
- [3] **Bonte F.J.**, Chernobyl retrospective. *Semin. Nucl. Med.* **18** (1988) 16-24
- [4] **Hewitt, G.F., Collier, J.G.**, Introduction to Nuclear Power, 2nd ed., Taylor & Francis, New York, 2000, str 3-4, 17-20, 50-54, 165-174, 180
- [5] **Bohr, N.**, The Mechanism of Nuclear Fission, *Phys. rev.*, **56** (1939) 426-450
- [6] **Budin, R., Mihelić-Bogdanić A.**, Osnove tehničke termodinamike, drugo izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 2002. str 342
- [7] **Knapp, V., Krejči, M., Lebegner, J.**, Prvih pola stoljeća nuklearnih elektrana, *Energija*, **55** (2006), 658-689
- [8] **Semenov, B.A.**, Nuclear power in the Soviet Union, *IAEA BULLETIN*, **25** (1983) 47-59
- [9] **Pryde, P.R.**, Nuclear energy development in the Soviet Union, *Soviet Geography*, **19** (1978) 75-83
- [10] **World Nuclear Association**, RBMK Reactors – Appendix to Nuclear Power Reactors, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx> (pristup 07.08.2022.)
- [11] **Abagyan A.A., Mysenkov A.I., Asmolov V.G., Pavlovskij O.A., Gus'kova A.K., Petrov V.N., Demin V.F., Pikalov V.K. II'in L.A., Protsenko A.N., Izrael' Yu.A., Ryazantsev E.P., Kalugin A.K., Sivintsev Yu.V., Konviz V.S., Sukhoruchkin V.K., Kuz'min I.I., Tokarenko V.F., Kunzevich A.D., Khrulev A.A., Legasov V.A., Shakh O.Ya., Malkin S.D.**, USSR state committee on the utilization of atomic energy, the accident at the Chernobyl' nuclear power plant and its consequences, I.dio, radni dokument, Beč, 1986, Annex 2, str 1, 8, 33
- [12] **Desgranges L., Esclaine J.M., Bienvenu P., Roure I, Gosset D., Boffy R., Köster U.**, A new methodology for studying neutron absorber materials: First results with boron carbide, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **432** (2017), 42-47.
- [13] **Schmid, S.D.**, Producing Power The Pre-Chernobyl History of the Soviet Nuclear Industry, The MIT Press, Cambridge, 2015, str 128-137
- [14] **Taylor, A.**, Photos From the 1986 Chernobyl Disaster, <https://www.theatlantic.com/photo/2019/06/chernobyl-disaster-photos-1986/590878/> (pristup 11.08.2022.)
- [15] **Sivintsev, Yu. V., Khrulev A.A.**, Estimation of the emission of radioactive substances during the 1986 accident in the fourth-power generating unit at the Chernobyl nuclear power plant (review of primary data), *At Energy*, **78** (1995) 390-401
- [16] **Anspaugh, L.R., Catlin, R.J., Goldman, M.**, The Global Impact of the Chernobyl Reactor Accident, *Science*, **242** (1988) 1513-151

[17] **Kraljević, P.**, Posljedice zračenja uzrokovanog černobilskom nuklearnom nesrećom, *Arh. hig. rada toksikol.*, **38** (1987) 261-272

[18] **Pacini F., Vorontsova T., Molinaro E., Shavrova E., Agate L., Kuchinskaya E., Elisei R., Demidchik E.P., Pinchera A.**, Thyroid consequences of the Chernobyl nuclear accident, *Acta Paediatr.*, **88** (1999) 23-27