

ANALIZA GENERISANJA TOPLOTNE ENERGIJE U NUKLEARNIM REAKTORIMA**ANALYSIS OF HEAT GENERATION IN NUCLEAR REACTORS***Azra Selimović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – Rad je namjenjen analizi uticaja moderatora na mogućnost održavanja lančane reakcije unutar nuklearnog reaktora. Analiziran je lakovodni pritiski reaktor (PWR) za tri najčešće vrste moderacije: obična voda, teška voda i grafit.. Cilj analize je prikazati kako izbor moderatora utiče na sigurnost i performanse nuklearnih elektrana. Korištena metoda za određivanje samoodrživosti lančane reakcije je putem faktora kritičnosti reaktora konačnih dimenzija.

Ključne reči: nuklearni reaktor, generisanje toplote, moderator, samoodrživa lančana reakcija

Abstract – The work is aimed at analysing the impact of moderators on the ability to sustain a chain reaction within a nuclear reactor. A pressurized water reactor (PWR) was analysed for the three most common types of moderation: ordinary water, heavy water, and graphite. The objective of the analysis is to demonstrate how the choice of moderator affects the safety and performance of nuclear power plants. The method used for determining the self-sustainability of the chain reaction is through the criticality factor of a reactor of finite dimensions.

Keywords: nuclear reactor, heat generation, moderator, self-sustaining chain reaction

1. ŽIVOTNI CIKLUS NUKLEARNE ELEKTRANE

Nuklearna elektrana je energetska postrojenja u kojem uz pomoć toplote generisane reakcijom fisije dobijamo paru, a kasnije konvencionalnom konverzijom i električnu energiju. Princip rada elektrane zasnovan je na Rankinovom ciklusu. Elektrana se sastoji iz primarnog i sekundarnog kruga. Primarnom krugu pripadaju reaktor sa pratećim komponentama i parogenerator kao veza između primarnog i sekundarnog kruga, u sekundarni krug pripadaju komponente za pretvorbu toplotne u električnu energiju tj. turbina, kondenzator i pumpa kondenzatora. Životni ciklus nuklearne elektrane sa može podijeliti u četiri osnovne faze a to su: predizgradnja, izgradnja, operativna faza i zatvaranje i dekomisija. Svaka od navedenih faza sa sobom nosi specifične zahtjeve i izazove kao i detaljnu procjenu sigurnosti, tehnički standarda i operativnih procedura koji se moraju unapređivati shodno najnovijim standardima ili regulativama sigurnosti [3].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Đorđije Doder, doc.

2. ATOM

Broj elementarnih čestica koje se nalaze u atomskom mikrosvijetu je veoma velik, ali za razumjevanje procesa fisije potrebno je poznavati osnovne elementarne čestice: nukleoni (proton i neutron), foton, neutroni i elektron. Atom koji sadrži isti broj protona a različit broj neutrona u jezgri su izotopi. Osnovne sile koje određuju stabilnost atomskih jezgri su nuklearne sile (privlačna sila) i elektrostatska sila (odbojna sila) koja raste s brojem protona u jezgri. Nuklidi koji se nalaze u pobuđenom stanju su nestabilni i kod tih nuklida postoji prirodna težnja da se putem unutrašnjih transformacija i/ili putem emisija suvišnih čestica vrate u područje stabilnosti i ovaj proces nazivamo radioaktivnost. Odvajanje nukleona i protona iz jezgre zahtjeva utrošak energije koji je za protone znatno veći, svaka promjena kojom se oslobađa energija rezultira većom energetsom stabilnosti. Promjena energije sistema kod postizanja veće stabilnosti nuklearnog sistema potiče iz činjenice da je materija neuništiva i da se ona javlja u dva osnovna vida koja se međusobno mogu transformisati a to su masa i energija. Povećanje energije mora dovesti do smanjenja mase i obrnuto, Einstein-ova specijalna teorija relativnosti je odredila kvantitativan izraz ekvivalenosti odnosno uslov pretvorbe mase u energiju:

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

Oslobađanje potencijalne enegije atomskog jezgra može se ostvariti preko dvije vrste nuklearnih reakcija: fisija (cijepanje teških jezgri) i fuzija (spajanje lakših jezgri). Obje nuklearne reakcije rezultuju nastankom atomskih jezgri sa većom energijom po nukleonu. Budući da su nuklearne reakcije pojave u mikrosvijetu svaka se kvantifikacija tih pojava mora zasnivati na principima vjerovatnoće. Parametar koji kvantificira učestalost pojave pojedinih nuklearnih reakcija naziva se udarni presjek. Udarni presjeci bitni za analizu su: udarni presjek za elastični sudar i udarni presjek za nelastičan sudar, a pored fisije bitna je i nuklearna reakcija zarobljivanja neutrona [1].

3. SAMOODRŽIVA LANČANA REAKCIJA

Proces fisije atoma praćen je emisijom neutrona, gdje postoji mogućnost da će sit neutroni iskoristiti za izazivanje daljih fisija i time proces nastaviti bez unošenja dodatnih neutrona u nuklearno gorivo. Taj proces je poznat kao lančana reakcija. Analiza mogućnosti ostvarenja samoodržive lančane reakcije unutar određenog sistema je osnova za funkcionisanje nuklearnog reaktora. S obzirom da je najčešće korišteno gorivo unutar nuklearnih reaktora za dobijanje električne energije U-235 ili U-238 sa određenim postotkom obogaćenja tj udjelom U-235 možemo reći da će samoodrživa lančana reakcija biti ostvarena ako je ispunjen uslov za efikasno usporjenje

neutrons do termičkih energija (0.025 eV). Efikasnost usporenja neutrona zavisi od izbora moderatora, najčešće korišteni moderatori su obična voda, teška voda i grafit. Efikasnost moderatora se ogleda u vrijednosti parametra ξ koji predstavlja broj obrnutno razmjernan potrebnom broju sudara neutrona od fisije energije (2 MeV) do termičke energije.

4. DIFUZIJA NEUTRONA

Poznavanje raspodjele neutronske toka u prostoru je bitno za određivanje prostorne raspodjele nuklearnih reakcija izazvanih neutronima. Neutroni difundiraju kroz čvrste tvari u cik cak putanjama sudarajući se sa jezgrama materijala. Iako su putanje pojedinih neutrona sasvim nepravilne najveća je vjerovatnoća rezultantnog kretanja neutrona od mjesta njihove veće gustine prema mjestu manje. Granični uslovi difuzije neutrona se najčešće odnose na:

1. rasprostiranje neutronske toka na granici materijala i
2. rasprostiranje neutronske toka na granici dva materijala različitih svojstava.

Iz prvog uslova dobijamo definiciju ekstrapolirane dužine koja predstavlja zamišljenu udaljenost van materijala kod koje bi neutronska tok, kad bi opadao istim gradijentom kao na graničnoj površini postao jednak nuli.

Ekstrapolirana dužina neovisna je o neutronske toka na graničnoj ploči i koristi se za neposrednu primjenu kod izračunavanja kritičnih dimenzija nuklearnog reaktora. Iz drugog graničnog uslova dobijamo podatak da u neposrednoj blizini granične ploče neutronska tok i neutronska struja iznose isto za oba medija/materijala [1].

Tabela 1. Difuzijske konstante i ekstrapolirane dužine termičkih neutrona

Moderator	Difuzijska konstanta [m]	Ekstrapolirana dužina [m]
Obična voda	0.0016	0.0034
Teška voda	0.0085	0.0181
Grafit	0.0084	0.0179

Difuzijska konstanta ovisi o svojstvima materijala kroz koji se neutroni kreću.

5. STATIČKA ANALIZA KRITIČNOSTI REAKTORA

Faktor multiplikacije/kritičnosti reaktora k_{ef} određuje odnos broja proizvedenih neutrona i osnova je statičke analize kritičnosti reaktora. Faktor k_{∞} predstavlja multiplikacijski faktor neograničenog reaktora tj. bijeg neutrona je zanemariv. Faktor kritičnosti reaktora konačnih dimenzija određujemo preko relacije:

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta \quad (2)$$

Gdje je :

- faktor ϵ predstavlja faktor brze fisije, kod lakovodnih reaktora zbog gustog pakovanja goriva dolazi do interakcija brzih neutrona sa susjednim gorivnim šipkama, pa je ovaj faktor uvijek veći od jedinice.

- faktor f predstavlja faktor iskorištenja termičkih neutrona, koji zavisi od razmaka gorivnih šipki tj koraka šipke gorivnog sklopa gdje će faktor f biti povoljniji ako je razmak između gorivnih šipki znatno veći od njihovih poluprečnika. Faktor f raste ako poluprečnik šipke pada, gdje je povišenje faktora povoljno ako iz iste količine urana napravimo više tanjih gorivnih šipki umjesto manje debljih šipki. Ako iz istu debljinu gorivne šipke, raste odnos zapremine moderatora i urana u jezgri faktor f opada, jer se povećava zahvat termičkih neutrona u moderatoru.
- faktor p predstavlja vjerovatnoću izbjegavanja rezonantne apsorpcije, apsorpcija neutrona rezonantne energije u nuklearnom gorivu, kao i odnos prosječnih neutronske tokova u gorivnoj šipki i moderatoru zavisi od vrste nuklearnog goriva i odnosa površine i mase gorivne šipke, ova pojava određuje pomoću empirijskog izraza i nazvamo je efektivni rezonantni integral. Efektivnim rezonantnim integralom obuhvata se odnos tokova neutrona u gorivu i moderatoru pa se faktor p također dobija iz empirijskih izraza.
- faktor η predstavlja broj fisijih neutrona koji se dobija po apsorbovanom neutronu u nuklearnom gorivu, tj. faktor umnožavanja neutrona u procesu fisije zavisi samo od vrste nuklearnog goriva, a ne o vrsti moderatora ili načinu na koji je gorivo pomiješano sa moderatorom. Faktor η je uvijek manji od broja neutrona dobijenih u fisiji jer svaka apsorpcija neutrona u nuklearnom gorivu ne dovodi do fisije.

Kritičnost reaktora konačnih dimenzija se iskazuje kroz uslov da je $k_{ef} = 1$, što je k_{∞} bliži jedinici to možemo dozvoliti manji bijeg neutrona iz reaktora, tj. moramo graditi veći reaktor.

$$k_{ef} = k_{\infty} L_b L_t \quad (3)$$

gdje faktore L_b i L_t definišemo kao faktore bijega brzih i termičkih neutrona [2].

5.1 Dimenzije kritičnog reaktora

Najčešći geometrijski oblik reaktora je cilindričan, tako da se sve empirijske formule za izračun dimenzija reaktora i faktora zakrivljenja dobijaju iz niza matematičkih sistema sa cilindričnim koordinatama osnih simetrija. Najjednostavniji princip dobijanja empirijskih formula jeste da zamislimo da je centar koordinatnog sistema postavljen na polovinu visine cilindra jer tada možemo zanemariti aksijalnu raspodjelu toka neutrona jer će biti simetrična. Faktor zakrivljenja neutronske toka određujemo kao geometrijski faktor zakrivljenja B_g kako bi se razlikovao od onog iz kojeg proizlazi na osnovu bilanse neutrona tj. materijalnog faktora zakrivljenja B_m . Kritičnost reaktora se postiže kada je $B_g = B_m$ i faktor zakrivljenja kritičnog reaktora se dobija na osnovu relacije:

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \quad (4)$$

Zavisnosti minimalne zapremine cilindričnog reaktora i faktora zakrivljenja neutronskog toka B dobijamo optimalni odnos između visine i poluprečnika kritičnog cilindričnog reaktora sa stanovništa najmanjeg utroška materijala. Odnos između poluprečnika i visine cilindričnog reaktora možemo pisati kao:

$$R^2 = \frac{2.405^2 H^2}{B^2 H^2 - \pi^2} \quad (5)$$

Zapremina cilindra:

$$V = \pi R^2 H = \frac{\pi 2.405^2 H^3}{B^2 H^2 - \pi^2} \quad (6)$$

Diferenciranjem i sređivanjem izraza dobija se minimalna zapremina i poluprečnik cilindra reaktora, dok odnos visine i poluprečnika koji daje minimalnu zapreminu je 1.85.

$$R = \frac{2.945}{B} \quad \text{i} \quad V_{min} = \frac{148.2}{B^3} \quad (7)$$

Dimenzije reaktora se mogu smanjiti vraćanjem dijela odbjeglih neutrona u reaktorsku jezgru što se postiže oblaganjem jezgre reaktora slojem materijala koji nazivamo reflektor. Dobar reflektor mora imati svojstvo male apsorpcije i efikasnog usporavanja neutrona kao i moderator [1].

6. KINETIČKA ANALIZA KRITIČNOSTI REAKTORA

Kritičnost reaktora u slučaju stacionarnog stanja može izraziti pretpostavkom da je efektivni multiplikacijski faktor reaktora jednak jedinici. Kod kinetičke analize reaktora efektivni multiplikacijski faktor može biti veći ili manji od jedinice, u slučaju $k_{ef} > 1$ reaktor je nadkritičan i u slučaju $k_{ef} < 1$ reaktor je podkritičan. Brzina promjene neutronskog toka je funkcija veličine odstupanja k_{ef} od jedinice i mjera za to odstupanje je nazvana reaktivnost na koju utiču razni faktori: temperatura, zatrovanje fisionuklearnim produktima, izgaranje nuklearnog goriva, reglacijske šipke, otopljeni apsorberi... Osnovna zadaća kinetike reaktora je odrediti zavisnost promjene neutronskog toka u reaktoru a time i generisane snage, izraz po kojem računamo reaktivnost reaktora je:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \quad (8)$$

Ako je reaktivnost veoma mala i ω_0 (frekvencija promjena u neutronskom fluksu tj. brzina kojom se reaktor prilagođava promjenama reaktivnosti) će biti veoma mala i kod takvih promjena stabilni period reaktora zavisi od karakteristika zakašnjelih neutrona a ne o trajanju ciklusa. Kod veoma velike promjene

reaktivnosti period reaktora (koji je pokazatelj brzine promjene neutronskog toka) zavisan je samo o trajanju ciklusa promptnih neutrona i takav reaktor nazivamo promptno kritičan reaktor. Reaktor postaje promptno kritičan kada može održavati kritičnost bez zakašnjelih neutrona. Udio zakašnjelih neutrona zavisi o tipu nuklearnog reaktora [1].

6.1 Temperaturni koeficijent reaktivnosti

Promjenom temperature u jezgri reaktora mijenja se i reaktivnost. Najbitniji razlozi za uticaj temperature na reaktivnost su:

- broj atoma moderatora po jedinici zapremine se mijenja zbog termičke ekspanzije;
- mikroskopski udarni presjeci su ovisni od prosječne energije termičkih neutrona i
- rezonantni zahvat neutrona u uranu mijenja se sa intenzitetom oscilatornog kretanja atoma urana pod djelovanjem temperature.

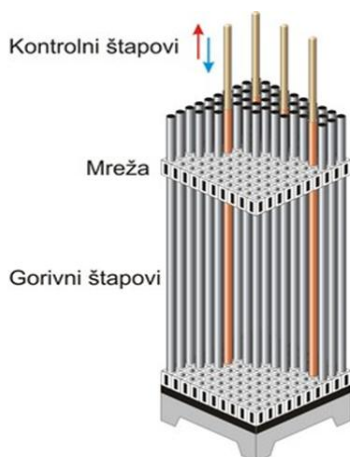
Odziv snage reaktora na promjene temperature zavisi od predznaka temperaturnog koeficijenta reaktivnosti α_T . U slučaju da je α_T pozitivan reaktor na povišenje reaktivnosti reaguje povišenjem neutronskog toka i generisane snage. Povećanje snage dovodi do daljnjeg povećanja temperature i proces se nastavlja do obustave reaktora djelovanjem zaštitnog sistema, odnosno razaranjem reaktora ako taj sistem otkaže. Ako je α_T negativan svako unošenje pozitivne reaktivnosti u reaktor dovodi do povišenja temperature koja generiše negativnu reaktivnost ismanjuje snagu i temperaturu reaktora. Budući da je negativni temperaturni koeficijent reaktivnosti od bitnog značaja za sigurnost pogona reaktora u propisima za pogon nuklearnih energetske postrojenja, dozvoljen je pogon reaktora samo u takvom slučaju. Najveći broj nuklearnih reakcija odvija se u nuklearnom gorivu i moderatoru iz tog razloga razlikuju se temperaturni koeficijent reaktivnosti goriva i temperaturni koeficijent reaktivnosti moderatora. Temperaturne prilike u nuklearnom gorivu i moderatoru se razlikuju sa dva aspekta:

1. Nivo temperature i brzina temperaturnih promjena su mnogo veće u gorivu
2. Odziv temperature goriva na promjenu snage je znatno brži nego odziv temperature moderatora.

6.2 Reaktivnost po unošenju apsorbera u jezgru

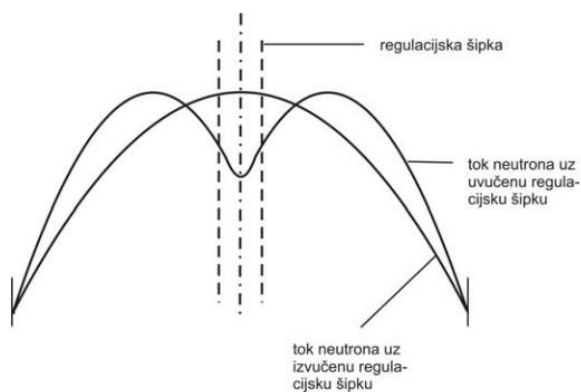
Apsorberi su materijali koji služe da kontrolišu brzinu lančane reakcije. Hemijski elementi koji se koriste kao apsorpcijski materijal su: bor (B), kadijum (Cd), indijum (In), srebro (Ag) i hafnijum (Hf). Najčešća izvedba upotrebe apsorpcijskih materijala jeste u obliku kontrolnih šipki, koje se pomjeraju tj. ulaze ili izlaze iz jezgre reaktora kako bi se omogućila potpuna kontrola brzine. Pored kontrolnih šipki postoji još metoda korištenja apsorbera u reaktoru kod kojih se apsorber ubacuje u vidu borne kiseline u rashladno sredstvo ili tzv. zonskim punjenjem goriva čiji je princip ubacivanja goriva sa različitim nivoom obogaćenja raspoređuje u različitim zonama reaktorskog jezgra radi prostorne distribucije. Ovi načini su dodatni slučajevi apsorpcije, u svakom reaktoru kontrolne šipke su glavni vid apsorpcije tj kontrole

reaktivnosti reaktora, nalaze se u gorivom sklopu između gorivnih šipki radi maksimalne sigurnosti i garancije da će apsorpcija biti izvršena [3].



Slika 1. Jednostavni prikaz gorivnog sklopa [3]

Tok neutrona u reaktoru prije i nakon uranjanja šipke prikazat ćemo na slici 2.



Slika 2. Tok neutrona u zavisnosti od položaja šipke

Detaljnu analizu efikasnosti regulacijskih/kontrolnih šipki u zavisnosti od položaja dobijamo iz teorije petrubacije. Iz iskustvenih izvora znamo da je efikasnost šipke najveća kad se vrh šipke nalazi u sredini jezgre a najmanja kada se on nalazi u gornjem ili donjem dijelu jezgre reaktora [1].

7. UTICAJ MODERATORA NA KRITIČNOST

Izvršena je analiza APR1000 reaktora koji pripada trećoj generaciji lakovodnih pritisnih reaktora (PWR). Reaktor je napravljen prema svim mogućim sigurnosnim standardima i mjerama predostrožnosti i pravi je primjer konstantnog unapređenja. Analiza je rađena za tri vrste moderacije, gdje se kao rezultat mogućnosti samoodržive lančane reakcije obična i teška voda pokazale kao dobar način moderacije iako je reaktor predviđen samo za moderaciju običnom vodom. Dok za slučaj moderacije grafitom samoodrživa lančana reakcija nije bila moguća, reaktor se nalazio u podkritičnom stanju. Ovakvi rezultati su bili i očekivani s obzirom da reaktorski gorivni sklopovi i veličina gorivnih šipki nije prilagođena za moderaciju grafitom. Moderacija grafitom se vrši preko ploča C-12 koje se nalaze u gorivnom sklopu između gorivnih šipki, dok voda (obična i teška) opstrujava gorivni sklop, a po samoj prirodi tečnog fluida, znamo da će voda opstrujuti gorivni sklop u cjelini [4].

8. ZAKLJUČAK

Nuklearna elektrana predstavlja jedan o najefikasniji i najčistijih izvora električne energije, ali zbog svoje prošlosti (nesreća u Černobilu i Fukušimi) kao i povezanosti sa nuklearnim oružjem često nepreavedno percipirana kao opasna i destruktivna. Međutim, u posljednjih nekoliko decenija, napredak u kompjuterskoj tehnologiji omogućio je detaljno praćenje i preciznu regulaciju lančane reakcije u realnom vremenu čime je značajno smanjena mogućnost incidenta. Savremene regulative i zakoni koji uređuju rad nuklearnih elektrana postaju sve strožiji, čime se dodatno osigurava sigurnost u njihovom radu. Ove promjene vode ka razvoju četvrte generacije nuklearnih reaktora koji obećavaju još veću sigurnost, efikasnost i ekološku prihvatljivost. Uz pravilnu edukaciju javnosti i nastavak stroge regulacije, nuklearna energija može postati ključni element u globalnoj tranziciji ka održivim izvorima energije.

4. LITERATURA

- [1] Feretić, D. (2007). *Uvod u nuklearnu energetiku*. Zagreb: Školska knjiga.
- [2] Popović, D. (1970). *Osnovi nuklearne tehnike*. Beograd: Naučna knjiga.
- [3] Augustin A. (2012). *Infrastructure And Methodologies For The Justification Of Nuclear Power Programmes*
- [4] APR100 – Advanced Power Reactor 1000, Preuzeto 13.08.2024 godine sa aris.iaea.org

Kratka biografija:



Azra Selimović rođena je u Tuzli 1998. godine. Diplomirala je 2022. na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Tuzli na smjeru Energetika i termofluidni inženjering gdje je odbranila završni rad na temu „Karakteristike kotlovskih postrojenja u okviru nuklearne elektrane“. Master rad je završila na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu iz oblasti Mašinstva – Analiza generisanja toplotne energije u nuklearnim reaktorima.
Kontakt: azselimovicra@gmail.com