

M.Milošević, D.Stefanović, M.Pešić, D.Popović,
D.Nikolić, D.Antić, N.Zavaljevski
Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič" - Vinča
OOUR Institut za nuklearnu energetiku i tehničku fiziku "NET"

Proglašen za najbolji
rad u komisiji i nag-
radjen.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE BRZOG REAKTORA NULTE SNAGE LASTA

DESIGN CHARACTERISTICS OF ZERO POWER FAST REACTOR LASTA

SADRŽAJ - U radu su prikazni namena, podloge i polazni elementi za izbor koncepcije kao i osnovna rešenja domaćeg brzog reaktora nulte snage LASTA. Opisana je korišćena metodologija za proračune osnovnih neutronsko-fizičkih parametara i prelaznih procesa. Za izabranu konfiguraciju reaktora LASTA su dati osnovni rezultati proračuna i analize. Izložen je postupak utvrđivanja sigurnosnih kriterijuma i izbor radnih parametara na osnovu ovih kriterijuma i rezultata proračuna. Na kraju su opisane osnovne karakteristike domaćeg reaktora LASTA sa aspekta nuklearne sigurnosti.

ABSTRACT - The concept, purpose and preliminary design of a zero power fast reactor LASTA are described. The methods of computing the reactor core parameters and reactor kinetics are presented with the basic calculated results and analysis for one selected LASTA configuration. The nominal parameters are determined according to the selected safety criteria and results of calculations. Important aspects related to the overall reactor safety are examined in detail.

1. UVOD

Zbog istovremenog oslobađanja energije i stvaranja novih fisibilnih nuklida brzi oplodni reaktori predstavljaju budućnost nuklearne energetike. Pored dosadašnjeg rada na ovladavanju eksperimentalnim metodama u oblasti fizike brzih neutrona i razvoju metodologije i računarskih programa za proračune brzih reaktora, u Jugoslaviji postoji interes za izgradnju jednog istraživačkog brzog reaktora /1-3/. Ovaj reaktor bi bio osnova za istraživanja koja bi vremenom učinila da se lakše uključimo u korišćenje jedne od najsavremenijih tehnologija, tehnologije brzih oplodnih energetskih reaktora. Uloga ovog reaktora i prilike u kojima bi se pristupilo njegovoj izgradnji zahtevaju da to bude istraživački reaktor nulte snage. Najpovoljnije bi bilo da gorivo bude u obliku plutonijum dioksida i/ili obogaćenog metalnog uranijuma. U našim uslovima realnije je razmišljati o brzom reaktoru sa manjom količinom fisibilnog goriva. Takav reaktor se može uključiti u sadašnji trend primena samo ako se na njemu mogu vršiti ispitivanja različitih konfiguracija za koje je moguće izvršiti ekstrapolaciju eksperimentalnih rezultata na znatno veće konfiguracije (bliske energetske brzim reaktorima). U tom smislu, kao prvi polazni element, usvojeno je da domaći brzi reaktor bude maksimalno fleksibilan u pogledu mogućnosti formiranja različitih konfiguracija po sastavu i geometriji. Drugi polazni element je maksimalna sigurnost reaktora u svim uslovima njegove eksploatacije, i u tom cilju je usvojeno korišćenje gravitacije pri uklanjanju reaktivnosti. Kako među postojećim brzim reaktorima nulte snage nema onih koji za sva rešenja uklanjanja reaktivnosti koriste dejstvo gravitacije, to nije usvojeno neko postojeće postrojenje kao referentno. Do kon-

cepcije domaćeg brzog reaktora nulte snage došlo se na osnovu usvojenih polaznih elemenata i iskustva sa postojećih reaktora kao što su VERA /4/, SNEAK /5/, PURNIMA /6/ i drugi. Reaktor čija je koncepcija određena na ovaj način nazvan je LASTA.

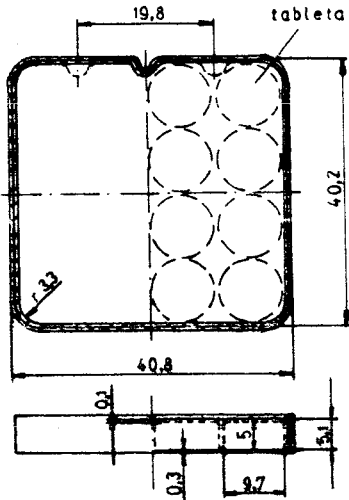
2. KONCEPCIJA REAKTORA

Za zadovoljenje kriterijuma maksimalne fleksibilnosti najpogodnije je da gorivo bude u obliku pločica. Usvojeno je da za kritični sistem LASTA gorivo bude u obliku kvadratnih pločica stranice 40.8 mm i debljine 5.7 mm, slika 1. Radi zaštite od plutonijuma pločice sa tabletama od PuO_2 treba da imaju čeličnu košuljicu debljine 0.3 mm. Pločice od obogaćenog i prirodnog metalnog uranijuma će biti presvučene niklom debljine 10 μm radi zaštite od korozije. Za formiranje gorivnih i reflektorskih elemenata željenog sastava pločice treba slagati u cevi elemenata debljine 0.7 mm. Detalji gorivnog elementa su prikazani na slici 2.

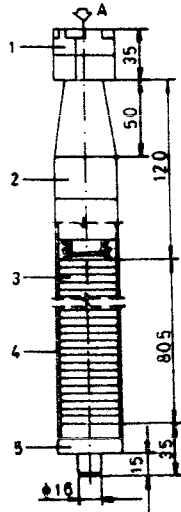
Analizirajući različite tipove brzih reaktora, kao što su reaktori sa dve polovine od kojih se jedna horizontalno pomera (reaktor VERA), zatim reaktori sa vertikalnim pomeranjem jezgra (reaktor PURNIMA) i reaktori sa fiksnim jezgrom i vertikalnim položajem gorivnih elemenata (reaktor SNEAK) izabrano je rešenje sa fiksnim vertikalnim jezgrom (centralna sekcija) i dve pokretne sekcije koje imaju ulogu sigurnosnih blokova. Gorivni i reflektorski elementi bi se uvođili odozdo naviše i učvršćivali za gornju platformu. Na ovaj način bi se izbegla mogućnost unošenja velikih vrednosti reaktivnosti kao i akcidenti tipa - pad gorivnog elementa u jezgro. Analizirane su različite konfiguracije i zaključeno je da centralna sekcija i sigurnosni blokovi treba da imaju najviše po 15x5 elemenata sa korakom od 43.7 mm između dva elementa. To znači da je maksimalna širina sistema LASTA 740 mm a maksimalna visina 800 mm. Uredjaji predviđeni za pomeranje sigurnosnih blokova omogućili bi njihovo podizanje naviše u toku približavanja kritičnosti (većom brzinom od 0.9 mm/s i manjom od 0.3 mm/s) kao i brzo oslobađanje za slobodan pad. Ovakva koncepcija povećane sigurnosti zahteva uvođenje više automatskih mašina za asembliranje reaktora, zatim veliku halu reaktora kao i savladavanje više tehničkih problema vezanih za precizno pomeranje sigurnosnih blokova i njihovo zaustavljanje pri slobodnom padu. Kao dodatni nezavisni sigurnosni elementi na sistemu LASTA su predviđene sigurnosne šipke. Njihov osnovni zadatak je da obezbede veliku početnu brzinu uklanjanja reaktivnosti. Predviđeno je da se to ostvari pomoću posebnih uredjaja za ubrzanje pokretnih delova šipki pri njihovom udaljavanju iz jezgra. Na osnovu analiza sigurnosti zaključeno je da na sistemu LASTA treba predvideti najviše 5 sigurnosnih šipki. Za regulaciju reaktivnosti predviđene su 4 upravljačke šipke.

Da bi se zadržao veći manipulativni prostor oko sistema LASTA i umanjio uticaj refleksije neutrona sa zidova i pada hale usvojeno je da sistem LASTA bude podignut 3.5 m od poda hale. S obzirom na namenu koju bi imao kritičan sistem LASTA, izabrana je snaga za kontinualni rad od 1 W, s tim što bi povremeno mogao raditi i na većoj snazi, obično desetostrukoj. Za potrebe izvodjenja različitih eksperimenata sistem LASTA bi bio opremljen neutronske izvornima, horizontalnim i vertikalnim eksperimentalnim kanalima, uredjajima za pomeranje folija i uzorka itd.

Za utvrđjivanje sigurnosnih kriterijuma i izbor radnih parametara reaktorskog sistema LASTA izabrana je jedna kritična konfiguracija sa dve aktivne zone, jedna sa PuO_2 mase 9.1 kg i zapremine 1.5 l i druga sa obogaćenim ($20\%^{235}\text{U}$)



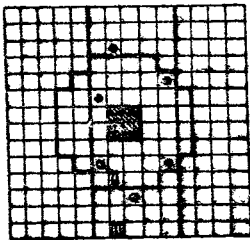
Sl. 1 Pločica sa tabletama od PuO_2



- 1 Brava
- 2 Glava
- 3 Pločica
- 4 Košuljica
- 5 Kapa

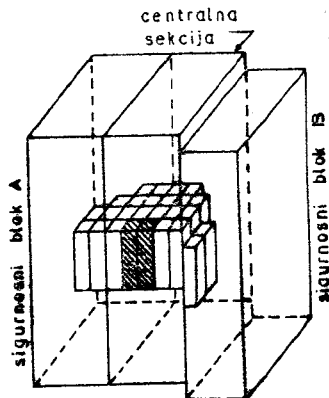
Sl. 2 Gorivni element

sigurnosni blok A centralna sekcija sigurnosni blok B



- I - PuO_2
- II - metalni U (20% ^{235}U)
- III - prirodni metalni U
- - sigurnosne šipke sa metalnim U (20% ^{235}U)
- - upravljačke šipke sa prirodnim metalnim U

Sl. 3 Horizontalni presek reaktora LASTA



Sl. 4 Vertikalni presek reaktora LASTA

metalnim uranijumom mase 311 kg i zapremine 18.4 l. Izabrana konfiguracija spada u kompaktne brze reaktore sa "tvrdim" energetskim spektrom neutrona. Ova konfiguracija sadrži 4 gorivna elementa sa pločicama od PuO_2 i 44 gorivna elementa sa pločicama od obogaćenog metalnog uranijuma. Svaki od gorivnih elemenata sadrži po 36 pločica od PuO_2 ili obogaćenog metalnog uranijuma. Ispod i iznad ovih pločica u gorivnom elementu se nalazi po 48 pločica od prirodnog metalnog uranijuma, koje formiraju gornji i donji aksijalni reflektor. Reflektor sadrži 142 elementa sa po 132 pločice od prirodnog metalnog uranijuma. U jezgru sa obogaćenim uranijumom su postavljene 3 sigurnosne šipke SŠ1, SŠ2 i SŠ3 i upravljačka šipka UŠ4, a u reflektoru dve upravljačke šipke UŠ5 i UŠ6. Pokretni delovi sigurnosnih šipki, dužine 350 mm, sadrže po 36 pločica od obogaćenog metalnog uranijuma i po 11 pločica od prirodnog metalnog uranijuma iznad i ispod pločica sa obogaćenim uranijumom. Kod upravljačkih šipki pokretni delovi sadrže po 58 pločica od prirodnog metalnog uranijuma. Raspored gorivnih i reflektorskih elemenata i sigurnosnih i upravljačkih šipki na izabranoj konfiguraciji je prikazan na slici 3, dok je na slici 4 prikazan vertikalni presek reaktora.

3. KORIŠĆENI PROGRAMI

Za sistem LASTA, koji nema referentan sistem, proračuni neutronske-fizičke karakteristika (kritične mase, reaktivnosti sigurnosnih i upravljačkih elemenata i dr.), kinetičkih parametara i kinetike imaju poseban značaj jer su jedino preko njih mogli biti utvrđeni sigurnosni kriterijumi i izabrani radni parametri jezgra, upravljačkog i sigurnosnog sistema. Specifičnost neutronske-fizičkih proračuna potiče od niza efekata koji karakterišu procese u brzim reaktorima. U nedostatku odgovarajućih inostranih programa prešlo se na razvoj metodologije i domaćih računarskih programa. Rezultat ovog razvoja je paket domaćih programa VERA /7/. Ovaj paket programa koristi osvedočenu biblioteku 26-grupnih konstanti BNAB-78 /8/. Uključeni su efekti rezonantne apsorpcije, heterogene rezonantne apsorpcije, anizotropije elastičnog rasejanja i uticaj realnog energetskog spektra neutrona na preseke za elastično usporavanje. Programi su zasnovani na transportnoj metodi verovatnoće sudara. Razvijeni su programi za jednodimenzionalnu ravnu, sfernu i cilindričnu geometriju i dvodimenzionalnu x-y geometriju. U paket je uključen i difuzioni program za dvodimenzionalnu r-z geometriju baziran na Galerkinovoj metodi. Paket programa VERA omogućava proračune: prostorno-energetske raspodele gustine neutronske i adjungovanog fluksa; efektivnog faktora umnožavanja neutrona; konstante slabljenja promptnih neutrona; vrednosti reaktivnosti šipki; kinetičkih parametara; temperaturskih koeficijenata reaktivnosti; vrednosti reaktivnosti uzoraka i dr.

Svi proračuni u trodimenzionalnoj x-y-z geometriji su izvršeni pomoću inostranog programa TRITON /9/ i 4-grupnih konstanti koje su pripremljene pomoću paketa programa VERA. Program TRITON je baziran na difuzionoj aproksimaciji i metodi konačnih razlika.

Analize odziva kritičnog sistema LASTA na različite pobude reaktivnosti, zatim utvrđivanje sigurnosnih kriterijuma i izbor radnih parametara upravljačkog i sigurnosnog sistema su urađeni pomoću domaćeg programa SCM /10/. Algoritam programa je zasnovan na modelu prostorno-nezavisne kinetike i novoj metodi čija je suština u slabljenju zavisnosti jednačina za koncentracije prethodnika zakasnelih neutrona od vremena trajanja promptnih neutrona. Program uključuje povratne sprege vezane za promene temperature jezgra.

Proračuni ponašanja kritičnog sistema LASTA u toku akcidenata su izvršeni pomoću domaćeg programa MELT /11/. Program uključuje različite fizičke efekte koji se javljaju u toku ekskurzije snage. Algoritam programa je zasnovan na spregnutim neutronsko-fizičkim, kinetičkim i hidrodinamičkim modelima i jednačinama stanja koje zavise od gustine materijala. Koristi se prostorno-zavisni model kinetike na bazi kvazistatičke aproksimacije. Za hidrodinamičke proračune se koristi standardna Nojmanova metoda.

Svi domaći programi su testirani na primeru većeg broja brzih reaktora počev od kompaktnih sistema do sistema sa razblaženim jezgrom bliskim po sastavu energetskim brzim reaktorima. Dobijeno je zadovoljavajuće slaganje sa eksperimentalnim rezultatima i rezultatima proračuna drugih autora. Na osnovu iskustva u eksploataciji izlazi da su greške koje daje paket programa VERA: za efektivni faktor umnožavanja neutrona manje od 1%; za reaktivnost šipki 10-15%; za temperaturski koeficijent reaktivnosti oko 20%; za vreme generacije promptnih neutrona oko 10%; za efektivne frakcije zakasnelih neutrona oko 2% i za prostorno-energetsku raspodelu gustine neutronskeg fluksa ispod 10%. Pri izboru radnih parametara reaktorskog sistema LASTA ove greške su uzete u obzir.

4. NEUTRONSKO-FIZIČKI PARAMETRI

Za izabranu konfiguraciju je dobijeno da je $\Delta k_{eff}/\Delta H = 0.0166$ (1/cm), što znači da greški parametra k_{eff} od 1% odgovara neodređenost visine jezgra od 0.6 cm što približno odgovara jednom redu pločica (debljine 0.57 cm).

Rezultati proračuna zavisnosti k_{eff} od položaja sigurnosnih i upravljačkih elemenata su prikazani na tabeli 1.

Tabela 1. Zavisnost k_{eff} od položaja sigurnosnih i upravljačkih elemenata

| Opis položaja elemenata | k_{eff} |
|--|-----------|
| Početno stanje, spuštene sigurnosni blokovi i sve šipke | 0.769 |
| Početno stanje + podignute sve sigurnosne šipke | 0.799 |
| Prethodno stanje + podignut sigurnosni blok A | 0.937 |
| Prethodno stanje + podignut sigurnosni blok B | 0.993 |
| Prethodno stanje + delimično podignute upravljačke šipke | 1.000 |

Dobijeni rezultati proračuna reaktivnosti šipki, kao i brzine promene reaktivnosti pri podizanju njihovih pokretnih delova su dati u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednosti reaktivnosti šipki

| Šipka | $\frac{\rho_0}{\beta_{eff}}$ | $\frac{1}{\beta_{eff}} \cdot \frac{d\rho}{dt}$ (1/s) |
|-------|------------------------------|---|
| SŠ1 | 3.25 | 0.0176 |
| SŠ2 | 1.46 | 0.0081 |
| SŠ3 | 1.46 | 0.0081 |
| UŠ4 | 0.84 | 0.0047 |
| UŠ5 | 0.39 | 0.0022 |
| UŠ6 | 0.39 | 0.0022 |

U tabeli 3 su dati kinetički parametri za izabranu konfiguraciju kritičnog sistema LASTA.

Tabela 3. Kinetički parametri

| | |
|---|------------------------------|
| Vreme generacije promptnih neutrona | 35 ns |
| Efektivna frakcija zakasnelih neutrona | 0.006 |
| Doplerov koeficijent reaktivnosti | |
| u jezgru sa PuO ₂ | 0 |
| u jezgru sa metalnim U (20% ²³⁵ U) | $-2 \cdot 10^{-7}$ (1/K) |
| Temperaturski koeficijent reaktivnosti | |
| u jezgru sa PuO ₂ | $-8 \cdot 10^{-7}$ (1/K) |
| u jezgru sa metalnim U (20% ²³⁵ U) | $-5 \cdot 10^{-6}$ (1/K) |
| Energetski koeficijent povratne sprege | $-1.06 \cdot 10^{-10}$ (1/J) |

5. UPRAVLJANJE REAKTOROM I NUKLEARNA SIGURNOST

Pri izboru radnih parametara upravljačkog sistema nastojalo se da se isključi svaka mogućnost unošenja velikih vrednosti reaktivnosti kao i unošenje reaktivnosti velikim brzinama. Za utvrđivanje kriterijuma sigurnosti o maksimalnim dozvoljenim brzinama unošenja reaktivnosti uradjene su analize odziva sistema LASTA na različite pobude reaktivnosti. Dozvoljene brzine unošenja reaktivnosti su izabrane iz uslova da u toku 20s od početka unošenja reaktivnosti perioda sistema ne bude kraća od 20s. Na osnovu ovih analiza i pomenutog uslova za sistem LASTA su usvojeni sledeći sigurnosni kriterijumi: brzina unošenja reaktivnosti u podkritičnim stanjima sa reaktivnošću $|\rho| > 3 \beta_{eff}$ mora biti manja od $0.05 \beta_{eff}$ (1/s); brzina unošenja reaktivnosti u stanju blizu kritičnosti na zakasnele neutrone mora biti manja od $0.01 \beta_{eff}$ (1/s) i ukupni višak reaktivnosti mora biti manji od $1/\beta_{eff}$. Na osnovu ovih kriterijuma za svaku novu konfiguraciju sistema LASTA se biraju sastav i geometrija sigurnosnih blokova i sastav i položaj šipki. Ostali parametri, kao što su brzine podizanja sigurnosnih blokova (dve brzine, veća od 0.9 mm/s i manja od 0.3 mm/s) i brzina podizanja šipki (1.2 mm/s) su unapred izabrani i ne mogu se menjati. Na slikama 5 i 6 su prikazani zavisnost brzine unošenja reaktivnosti i izabrani profil brzina podizanja sigurnosnih blokova u funkciji njihovog položaja za izabranu konfiguraciju. Predviđeni sistem za logičku kontrolu i odlučivanje bi sprečavao izvršenje pogrešno zadatih komandi i obezbedio bi ispravan redosled operacija.

Kritične konfiguracije sistema LASTA nemaju inherentnu sigurnost kao termički reaktori. Zbog toga se pri izboru radnih parametara sigurnosnog sistema pošlo od sledećih zahteva: da merni kanali za praćenje gustine neutronske fluksa imaju brz odziv; da sigurnosni elementi imaju što manje kašnjenje dejstva od trenutka aktiviranja sigurnosnog sistema (kraće od 90 ms) i da sigurnosni elementi imaju veliku početnu brzinu uklanjanja reaktivnosti i da uklanjaju veliku reaktivnost. Predviđeno je da se u sigurnosni sistem postrojenja LASTA uključe sledeći merni kanali: logaritamski impulsni, linearni i logaritamski strujni kanali za merenje gustine neutronske fluksa (odnosno fisione snage); logari-

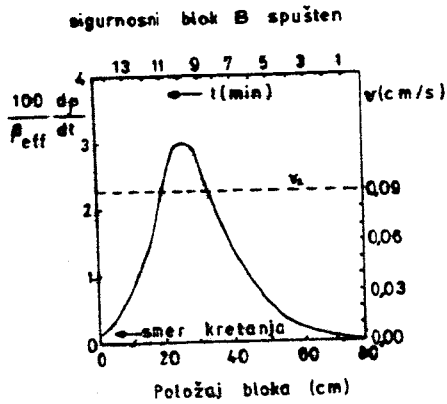
ritamski impulsni kanal za merenje gustine fluksa gama zračenja; kanali za merenje koncentracije plutonijuma, uranijuma i beta emitera u vazduhu hale i kanal za merenje potpritisaka u vazduhu hale. Svi ovi kanali bi imali po tri paralelne merne linije a za njihovo aktiviranje bi se koristila loika "2 od 3". Izračunato je da granična (najveća) brzina unošenja reaktivnosti koju sigurnosni sistem može kontrolisati (ugasiti reaktor neposredno pre dostizanja kritične temperature u centru jezgra od 900°C, kada počinje omekšavanje čelične košuljice tableta sa PuO₂) iznosi $2\beta_{\text{eff}}$ (1/s).

Izborom koncepcije jezgra i reflektora na sistemu LASTA je izbegnuta mogućnost nastanka niza akcidenata. Prvo, zbog niske fisione snage nema akcidenata vezanih za gubitak hladenja. Drugo, zbog korišćenja gravitacije za uklanjanje reaktivnosti gubitak električnog napajanja ne predstavlja opasnost. Najkritičnije operacije sa aspekta unošenja reaktivnosti su one u postupku približavanja kritičnosti. Najteži akcident od svih koji se smatraju verovatnim za dati reaktor se naziva projektni akcident. Za izabranu konfiguraciju sistema LASTA analiza mogućih akcidenata pokazuje da osnovni projektni akcident može nastati u slučaju: da je kritična masa procenjena tako da je za oko 2.8% niža od stvarne (čemu odgovara greška proračuna k_{eff} od 1%; odnosno $1.7\beta_{\text{eff}}$); da se pri približavanju kritičnosti ne poštuju propisi, odnosno ne vrši procena sledeće operacije na osnovu merenja reaktivnosti i da istovremeno otkazu oba uredjaja za pomeranje sigurnosnih blokova i sistem za logičku kontrolu i odlučivanje, tako da se oba bloka kreću naviše maksimalnom brzinom od 0.9 mm/s. Opisanim akcidentu odgovara brzina unošenja reaktivnosti od $0.14\beta_{\text{eff}}$ (1/s). Najsporiji strujni kanal sa pragom za snagu na 10 W, uz sva kašnjenja bi zaustavio reaktor pre isteka 5s od početka akcidenta. U tom trenutku snaga reaktora bi bila manja od 11 W. U slučaju da u toku osnovnog projektnog akcidenta otkaze i sigurnosni sistem prema rezultatima prikazanim na slikama 7, 8 i 9 došlo bi do oštećenja reaktora. Zahvaljujući negativnom temperaturskom koeficijentu reaktivnosti bilo bi izbegnuto dostizanje kritičnosti na zakasnele neutrone, ali bi zbog umnožavanja zakasnelih neutrona energija rasla sve do početka topljenja PuO₂ u centru jezgra, odnosno sve do naglog širenja jezgra sa PuO₂. Prema rezultatima dobijenim programom MELT; ukupna oslobodjena energija bi dostigla vrednost od 39 MJ, a kinetička energija 0.40 MJ. Najveća temperatura bi bila u centru jezgra sa PuO₂ i dostigla bi vrednost od 3640 K. Temperature veće od 2900 K bi bile samo oko centra jezgra sa PuO₂ u zapremini od 5% od ukupne zapremine PuO₂, što znači da bi se istopilo oko 5% PuO₂. U jezgru sa obogaćenim metalnim uranijumom najveća temperatura bi dostigla vrednost od 680 K. Iako, kinetička energija dostiže samo oko 1% od ukupno oslobodjene energije mogu se očekivati znatna mehanička oštećenja gorivnih elemenata sa PuO₂. S obzirom da trajanje oslobadjanja energije u osnovnom projektnom akcidentu na reaktoru LASTA iznosi 1600 ms ne očekuje se pojava udarnih talasa, što znači da bi čelični plašt postavljen unutar hale reaktora sprečio nekontrolisano ispuštanje radioaktivnih čestica u okolinu.

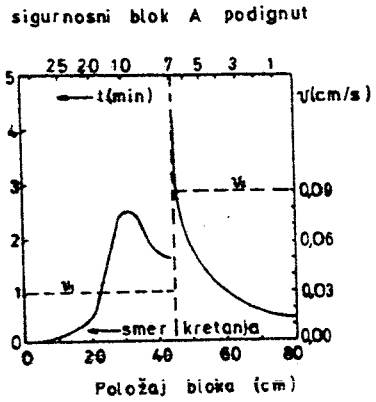
Naravno, i pored mogućnosti sigurnosnog sistema da spreči oštećenja jezgra pri brzinama unošenja reaktivnosti koje su za dva reda veličine veće od dozvoljenih i za red veličine veće no za osnovni projektni akcident, moraju se strogo poštovati postavljeni sigurnosni kriterijumi o unošenju reaktivnosti.

6. ZAKLJUČAK

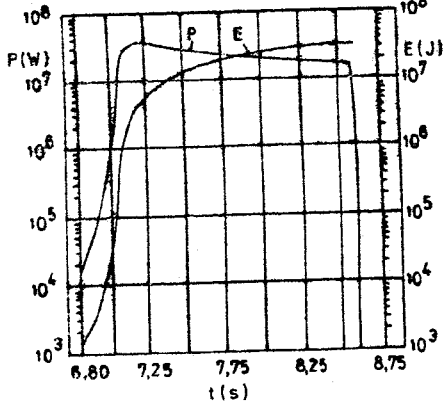
Na osnovu prethodnih analiza može se zaključiti da bi izabrana koncepcija brzog reaktora LASTA mogla odgovoriti postavljenim polaznim zahtevima o maksimalnoj fleksibilnosti i maksimalnoj nuklearnoj sigurnosti.



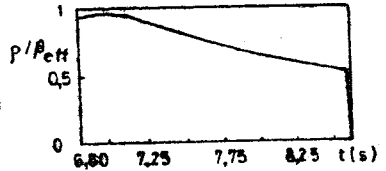
Sl. 5 Zavisnost dp/dt pri podizanju sigurnosnog bloka A



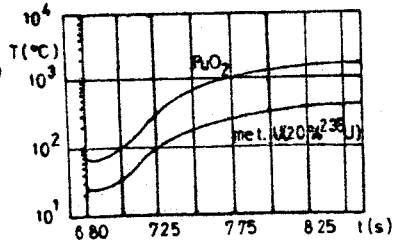
Sl. 6 Zavisnost dp/dt pri podizanju sigurnosnog bloka B



Sl. 7 Promena snage i oslobodjene energije u toku osnovnog projektnog akcidenta



Sl. 8 Promena reaktivnosti u toku osnovnog projektnog akcidenta



Sl. 9 Zavisnost srednje temperature u toku osnovnog projektnog akcidenta