



CS06RA653

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE

„BORIS KIDRIČ“

2.05d

011-501/34

RAZRADA METODA TEORIJSKE
ANALIZE NUKLEARNIH
REAKTORA (I FAZA)

I-V

IV D e o

IZ-121-0193-1962

VINČA-BEOGRAD

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE "BORIS KIDRIČ"
Laboratorija za reaktorsku i neutronska fiziku

Šifra Instituta
2.05

Ugovor sa SKNE
br.011-501/34

Nosilac ugovora:
Inž.J.Pop-Jordanov

2.05d 011-501/34

RAZRADA METODA TEORIJSKE
ANALIZE NUKLEARNIH
REAKTORA (I FAZA)

I-V

IV D e o

IZ-121-0193-1962

VINČA - BEOGRAD
juli 1962.

LABORATORIJA 09

Ugovor: 2.05

Zadatak: 2.05.d

PROMENA IZOTOPNOG SASTAVA GORIVA

I faza

Nosilac Zadatka

Ing. Aleksandar Stojadinović

zg. Aleksandar Stojadinović

Nosilac ugovora

Ing. Jordan Pop-Jordanov

J. Pop-Jordanov

Načelnik laboratorije

Đaišić Nenad

Ing. Nenad Đaišić

Zadatak 2.05.d "Promena izotopnog sastava goriva" podeljen je na tri faze, i to:

I faza: Deplecija goriva

II faza: Konverzija goriva

III faza: Uticaj promene izotopnog sastava goriva na reaktivnost uz konstantan fluks.

Priloženi izveštaj o izvršenju I faze obuhvata:

Opšti pregled promene izotopnog sastava goriva sa ozračivanjem. Analizu sagorevanja U^{235} i nastajanje U^{236} i drugih nefisibilnih jezgara. Računsku primenu na sistem tipa Calder Hall. Pregled literature.

Smatramo time da je I faza u potpunosti ispunjena prema ugovoru.

Nosilac ugovora

Ing. Jordan Pop-Jordanov

J. Pop-Jordanov

Načelnik laboratorije

Ing. Nenad Raišić

Raišić N.

S A D R Ź A J

1. OPŠTI PREGLED PROMENE IZOTOPNOG SASTAVA GORIVA SA
OZRAČIVANJEM
 - 1.1. Uvod
 - 1.2. Značaj promene izotopnog sastava
 - 1.3. Pregled promene izotopnog sastava goriva
2. LANAC U-235
3. NEUTRONSKI SPEKTAR
4. RAČUNSKA PRIMENA NA SISTEM TIPRA CALDER HALL
5. LITERATURA

Analiza promene izotopnog sastava goriva vrši se sa ciljem sagledavanja kvalitativnih i kvantitativnih promena goriva pri ozračivanju i uticaja ovih promena na reaktivnost reaktora pri dugom radu. Ove promene se prate preko promena preseka apsorpcije i fisije goriva u funkciji ozračivanja.

U odeljku 1 "opšti pregled promene izotopnog sastava goriva sa ozračivanjem", je dato: ekonomski značaj stepena sagorevanja goriva, odnosno njegovog srednjeg života, pretpostavke i ograničenja datog razmatranja i pregled promene izotopnog sastava goriva. U odeljku 2 analiziran je lanac U^{235} , gde su dati analitički izrazi za koncentracije U^{235} , U^{236} i Np^{237} u funkciji ozračivanja. U odeljku 3 analiziran je uticaj neutronskeg spektra uz tretiranje preseka po Wescott-u. U odeljku 4 data je računska primena na sistem tipa Calder Hall. Rezultati računanja (zavisnost preseka od ozračivanja i količina pojedinih izotopa u kg/t) dati su u tablici III i na dijagramima 1 i 2. Račun je izveden na digitalnoj mašini ZUZE-22 R. Na kraju je dat pregled literature u vezi sa zadatkom, kako direktno korišćene tako i ostale koja se odnosi na ovu temu.

1. OPŠTI PREGLED PROMENE IZOTOPNOG SASTAVA GORIVA SA OZRAČIVANJEM

1.1. U v o d

Nuklearno gorivo bilo bi najefikasnije iskorišćeno ako bi se omogućile njegove potpune sagorevanje u reaktoru. No u tome postoji ograničenje, jer u toku celog rada reaktor mora ostati kritičan. Ovo ograničenje se međjutim vremenski različito održava za razne vrste goriva i režime rada reaktora.

Pri oslobađanju energije u nuklearnom gorivu dolazi uglavnom do ovih promena:

- Pri fisiji se stvaraju produkti koji nisu fisibilni i koji "koče" lančanu reakciju apsorbujući neutrene. Pri tome reaktivnost reaktora opada, (zatrovanje reaktora).

- Fisija i zahvat fisibilnim izotopima smanjuju broj fisibilnih atoma i na taj način se reaktivnost smanjuje (deplecija goriva).

- Kao rezultat zahvata u nefisibilnim jezgrima (uran 238), dolazi do posrednog stvaranja sekundarnog nuklearnog goriva što dovodi do porasta reaktivnosti.

Osim toga pri radu reaktora dolazi do promene temperature goriva i moderatora što se takođe odražava na premenu reaktivnosti.

Ako bi ukupan bilans ovih efekata bio stalno pozitivan omogućio bi se neograničen rad reaktora. Ako je pak negativan bilo bi potrebno obogatiti nuklearno gorivo ili naći pogodniju geometriju. Najčešće je ukupan efekat u početku pozitivan, a kasnije negativan. To znači da je rad reaktora vremenski ograničen, da zavisi od oblika krive reaktiv-

nosti i od toga našta se koristi početni višak reaktivnosti.

U ovom zadatku analiziraće se promene u izotopnom sastavu goriva nastale sagorevanjem U^{235} , nastajanje sekundarnog goriva u lancu U^{238} i uticaj ovih promena na reaktivnost sistema. Ovo će biti analizirano na primeru prirodni uran - grafitne rešetke tipa Calder Hall, jer je ona od najvećeg interesa za nas, a i podatci u literaturi za nju su najdostupniji. Analiza uticaja zatrovanja produktima fisionije i temperature na reaktivnost date je posebnim zadacima i izlazi iz okvira ovog zadatka.

Pri računanju zanemarene su male promene kao što je recimo, promena čistoće moderatora, jer je greška koju one unose u totalni presek apsorpcije neutrona manjeg reda veličine od tolerancije sa kojom su dati osnovni preseki, /2/, /3/, /4/ i /5/. Osim toga usvojeno je da su promene nastale u sastavu goriva uniformne po zapremini gorivnog bloka, čime je zanemareno veće stvaranje plutonijuma na površini gorivnih elemenata. Na kraju, rezultati koji su dati u prve dve faze zadatka predstavljaju samo lokalno stanje u jediničnoj zapremini goriva na nekom mestu u reaktoru. Oni bi se mogli primeniti na ceo sistem samo u slučaju reaktora sa izravnatim fluksom. Kod reaktorskih sistema sa neizravnatim fluksom, da bi se dobila rezultantna promena reaktivnosti sa ozračivanjem, ovi rezultati se moraju usrednjiti po zapremini, što se obično čini perturbacionom teorijom. Ovo će biti detaljnije razmatrano u III fazi zadatka.

1.2. Značaj promene izotopnog sastava

Poznavanje stepena sagorevanja nuklearnog goriva, odnosno njegovog ciklusa, je osnovni elemenat za optimizaciju reaktora koja bi se zasnivala na troškovima proizvodnje energije. Pri radu reaktora treba obezbediti takve uslove da život goriva bude što je moguće duži.

Promena izotopnog sastava goriva sa ozračivanjem, kako će se kasnije videti, sastoji se uglavnom u smanjenju U^{235} i stvaranju Pu^{239} , Pu^{240} i Pu^{241} , pri čemu Pu^{239} dostiže ravnotežnu koncentraciju. Preseci za fisiju i apsorpciju u gorivu rastu sa ozračivanjem, a konverzioni odnos najpre opada pa zatim raste. Sve ove u slučaju goriva od prirodnog urana rezultira u prilično složenu promenu K_{eff} . Život goriva određen je vrednošću ozračivanja za koju K_{eff} postaje jedinica. Srednji život goriva međutim zavisi od načina izmene samog goriva. Postoje uglavnom dva načina izmene goriva koji daju različite srednje živote goriva:

1. Diskontinualna izmena goriva. Čitava šarža se menja odjednom, onda kad K_{eff} padne do jedinice. Pri tome ovde treba razlikovati slučajeve izravnatog i neizravnatog fluksa.

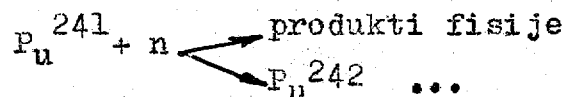
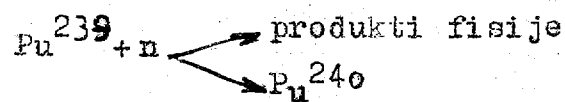
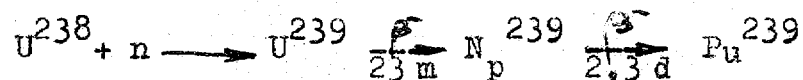
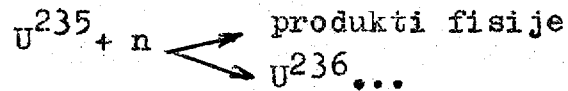
2. Kontinualna izmena goriva. Dodavanje svežeg goriva i odstranjivanje najozračenijeg vrši se kontinualno, pri čemu se višak neutrona od svežeg goriva koristi da bi se produžilo ozračivanje onog čije je K_{eff} postale manje od 1.

Kod velike većine grafitnih gasom hladjenih NTE predviđena je kontinualna izmena goriva, čime se srednji život goriva povećava za oko 50% (14). Tako dobijeni srednji životi iznose oko 3000 MWd/t, a njihove maksimalne teoriske vrednosti 4500 MWd/t. Kod Calder Hall-a izmena goriva nije kontinualna te maksimalni život goriva iznosi samo 2000 MWd/t.

U tesnoj vezi sa životom goriva je i problem izravnanja fluksa. Izravnanjem fluksa postiže se izjednačenje gustine snage u svim gorivnim elementima, čime se omogućuje da svi oni rade na maksimalnoj dozvoljenoj snazi i uz maksimalni toplotni fluks. Međutim, ovo izravnanje je uvek vezano sa gubitkom reaktivnosti, pa se javlja potreba iznalaženja ekonomski najopravdanijeg rešenja.

1.3. Pregled promene izotopnog sastava goriva sa ozračivanjem

Kako je već rečeno, u toku rada reaktora dolazi do promene izotopnog sastava goriva. Ove promene se uglavnom svode na sledeće procese:



Izotop Pu^{242} ima mali presek apsorpcije (oko 40b) pa je prema tome dobijanje sledećih izotopa plutonijuma malo verovatno. Apсорpcija neutrona izotopima U^{236} , U^{239} i Np^{239} je relativno mala u odnosu na apсорpciju ostalih jezgara. Raspad U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} i Pu^{241} može se uvek zanemariti, jer su odgovarajuća vremena poluraspada vrlo velika.

Prema gornjim relacijama promene izotopnog sastava goriva u toku rada reaktora možemo svrstati u tri veće grupe;

- Lanac U^{235}
- Lanac U^{238}
- Produkti fisije

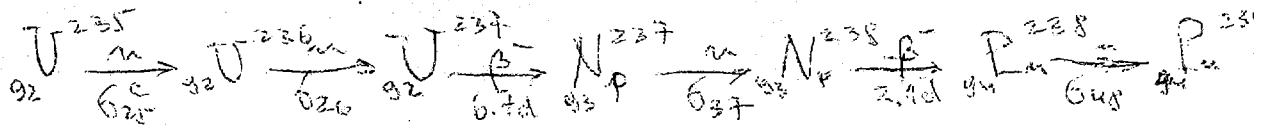
Zadatak analize promene izotopnog sastava goriva i njenog uticaja na reaktivnost reaktora pri dugom radu svodi se na posmatranje promena totalnih preseka apsorpcije ($\Sigma_a = \Sigma_a(r)$) i fisije ($\Sigma_f = \Sigma_f(r)$) u gorivu i funkciji ozračivanja ϕ .

Ozračivanje τ definisano je relacijom:

$$\tau = \int_0^t \phi(t') dt'$$

2. Lanac U^{235}

Ovaj lanac dat je sa:



gde svako jezgro nastaje od svog roditelja ili neutronskim zahvatom ili radioaktivnim raspadom. Međutim, oba elementa koja podležu β raspadu (U^{237} i Np^{238}) mogu se odmah zanemariti. Prvo, zbog njihove niske koncentracije koja je uslovljena njihovim vrlo kratkim vremenom poluraspada, i drugo, zbog veoma malih apsorpcionih preseka. Ako se oni izostave ostaje ~~samo~~ lanac jezgara kod kojih se nastajanje sledećeg od prethodnog vrši samo neutronskim zahvatom. Njihov doprinos ukupnoj apsorpciji može se ovako izračunati (2):

Obzirom na definiciju τ očigledno je da će biti:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sigma_{i-1}^c N_{i-1} - \sigma_i N_i \quad \dots (1.1)$$

diferencijalna jednačina i-tog jezgra N_i u lancu, gde je:

σ_{i-1}^c - presek za zahvat "i-1"-ovog jezgra, a

σ_i - totalni apsorpcioni presek "i"-tog jezgra

Označi li se početno roditeljsko jezgro indeksom 0, rešenje je:

$$N_i(\tau) = \sum_{j=0}^i \Delta_{ij} e^{-\sigma_j \tau} \quad (1.2)$$

gde je:

$$\Delta_{ij} = \frac{\sigma_{i-1}^c \Delta_{i-1,j}}{\sigma_i - \sigma_j} \quad (j < i) \quad (1.3)$$

$$\Delta_{ij} = N_{i+1}(0) - \sum_{k=0}^{i-1} \Delta_{ik} \quad (j=i) \quad (1.4)$$

Ako je uslov $N_1(0)$ jednako nuli ispunjen za sva jezgra sem za početno jezgro lanca ($i = 0$), tada je:

$$A_{\sim j} = \frac{\prod_{k=0}^{i-1} \sigma_k^c N_0(0)}{\prod_{k=0, k \neq j}^{i-1} (\sigma_k - \sigma_j)} \quad (j < i) \quad (1.5)$$

$$A_{\sim j} = - \sum_{k=0}^{i-1} A_{\sim k} \quad (1.6)$$

Koristeći se ovim, mogu se doprinosi totalnoj apsorpciji jednog ovakvog lanca dovoljno dobro i brzo izračunati i na stolnoj računskoj mašini.

Obzirom na male vrednosti preseka, roditelja, a time i na mali doprinos totalnoj apsorpciji, Pu^{238} i Pu^{239} se mogu izostaviti, tako da se od svih jezgara koja dolaze iza U^{236} jedino Np^{237} može uzeti u obzir. Prema navedenoj literaturi (2), (3), (5), doprinos totalnoj apsorpciji od ostalih izotopa ovog lanca manji je od 1% te se svakako može zanemariti, jer je greška koja se pri tome čini reda veličine nepouzdanosti osnovnih nuklearnih podataka. Prema tome lanac U^{235} dat je sistemom diferencijalnih jednačina:

$${}_{92}\text{U}^{235} \quad \frac{dN_{25}}{dt} = - \sigma_{25} N_{25} \quad (1.7)$$

$${}_{92}\text{U}^{236} \quad \frac{dN_{26}}{dt} = \sigma_{25}^c N_{25} - \sigma_{26} N_{26} \quad (1.8)$$

$${}_{93}\text{Np}^{237} \quad \frac{dN_{37}}{dt} = \sigma_{26} N_{26} - \sigma_{37} N_{37} \quad (1.9)$$

Koristeći (1.2), (1.6) i (1.7) rešenja ovih diferencijalnih jednačina su:

$$N_{25}(\tau) = N_{25}(0) e^{-\lambda_{25}\tau} \quad (1.10)$$

$$N_{26}(\tau) = \frac{\lambda_{25} N_{25}(0)}{\lambda_{25} - \lambda_{26}} [e^{-\lambda_{26}\tau} - e^{-\lambda_{25}\tau}] \quad (1.11)$$

$$N_{37}(\tau) = \frac{\lambda_{25} \lambda_{26} N_{25}(0)}{(\lambda_{26} - \lambda_{25})(\lambda_{37} - \lambda_{25})(\lambda_{37} - \lambda_{26})} \left[(\lambda_{37} - \lambda_{26}) e^{-\lambda_{25}\tau} - (\lambda_{37} - \lambda_{25}) e^{-\lambda_{26}\tau} - (\lambda_{25} - \lambda_{26}) e^{-\lambda_{37}\tau} \right] \quad (1.12)$$

Znajući koncentracije pojedinih jezgara u lancu U^{235} može se odrediti njihova apsorpcija kao funkcija τ , što je i bio cilj.

3. Neutronske spektr

Vodeći računa s jedne strane o temperaturi reaktora u radu i s druge strane da bi se otklonila greška nastala zbog jednogrupnog tretiranja problema, u račun se ušlo sa preseccima koje sugerira Westcott (6). Prema Westcott-u je:

$$\sigma_j = \sigma_{j0} [q_j + r \cdot \lambda_j] \quad (1.13)$$

gde je:

σ_{j0} - presek za 2200 m/sec

q_j, λ_j - koeficijenti definisani u (6) i (7)

r - epitermalni odnos definisan kao

$$r = \frac{\beta_m}{b(1 + \beta_m)} \quad ; \quad b = \frac{4}{\sqrt{\mu \pi}}$$

gde je izraz za β_m dat sa:

$$\beta_m = \sqrt{\frac{4T_0}{\mu T}} \cdot \frac{e \cdot p}{1 + 2L_1^2 + \beta_m^2 L_2^2} \cdot \frac{V_u (N_{235} \sigma_{235}^f + N_{238} \sigma_{238}^f + N_{239} \sigma_{239}^f)}{V_m \sigma_m^s \bar{\Sigma}_m}$$

gde su

V_u - zapremina uranske šipke

V_m - zapremina moderatora

σ_m^s - presek za rasejanje grafita

$\bar{\Sigma}_m$ - srednji logaritamski dekrement energije za grafit

$\sigma_{238}^f = \sigma_{238}^t \cdot q_j^f$ - maksvelov presek za fisiju

$\mu = 2.81$ za grafitne reaktore (μ - kator energija u jedinicama kT)

$T_0 = 293,6^\circ K$

Ireko epitermalnog odnosa r imamo zavisnost mikro preseka od $\sum N_i \sigma_i^+$ koji pak zavisi od ozračivanja $\hat{\nu}$. Irena tome, očigledno je da diferencijalne jednačine za koncentracije jezgara nisu linearne. Međutim, za gotovo sva jezgara u gorivu ili je epitermalna apsorpcija mala u odnosu na termalnu ili je ukupna apsorpcija jezgara mala. U oba ova slučaja može se smatrati da je epitermalni odnos r konstantan sa ozračivanjem a da greška u totalnom apsorpcionom preseku, koja se pri tom čini, ne bude veća od 1%. Jedini izuzeci su Pu^{239} i Pu^{240} . Kod njih se promena epitermalnog odnosa r sa ozračivanjem mora uzeti u obzir zbog njihovog visokog epitermalnog doprinosa ukupnoj apsorpciji i relativne važnosti ovih jezgara (sekundarno gorivo). Za ostala jezgara može se sa dovoljno tačnosti smatrati da je:

$$r(\hat{\nu}) = r_0 = 0,06946 \quad (1.15)$$

$$\text{pri } T = 283^\circ\text{C}$$

Analiza Zavisnosti epitermalnog odnosa r od ozračivanja $\hat{\nu}$ i temperature T reaktora data je u referenci (3).

4. Računska primena na sistem tipa Calder Hall

Podaci o reaktoru Calder Hall koji su korišćeni u računima dati su u tablici I (10), (24):

Tablica I

Geometriske i fizičke konstante rešetke

Poluprečnik uranske šipke	$r_0 = 1,46 \text{ cm}$
Ekvivalentna debljina obloge	$= 0,514 \text{ cm}$
Poluprečnik kanala	$r_1 = 5,28 \text{ cm}$
Poluprečnik ćelije	$r_2 = 11,464 \text{ cm}$
Visina aktivne zone	$H_0 = 640,1 \text{ cm}$
Poluprečnik aktivne zone	$R_0 = 472,4 \text{ cm}$
Broj elemenata po kanalu	$= 6$
Dužina uranske šipke	$l = 101,6 \text{ cm}$
Gustina urana	$\rho_u = 18,7 \text{ gr/cm}^3$
Gustina grafita	$\rho_m = 1,73 \text{ gr/cm}^3$
Srednja temperatura urana	$T_u = 425^\circ\text{C}$
Srednja temperatura grafita	$T_m = 235^\circ\text{C}$
Efektivni presek apsorpcije	$\Sigma_a = 0,003016 \text{ cm}$
Obloge	
Faktor brze fisije	$\epsilon = 1,030$
Faktor izbegavanja rezonance	$p = 0,885$
Koeficijent reaktivnosti (vruć nezatrovan)	$k_\infty = 1,07875$

Odnos fluksa u moderatoru prema

fluksu u gorivu

$$\bar{\Phi}_w/\bar{\Phi}_u = 1,5164$$

Srednji termalni fluks

$$\bar{\Phi}_u = 6,02 \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$$

Faktor izbegavanja isticanja

$$\frac{1}{1 + \lambda^2 L_2^2 / 6 L_1^2} = 0,9750$$

Podatci o mikro preseccima, koji su korišćeni u računu, dati su u tablici II./3/, /6/ i /7/:

Tablica II: Osnovni nuklearni podaci.

Izotop	Vrsta preseka	(2200) /barna/	$\sigma(283^\circ\text{C})$	$\sigma(283^\circ\text{C})$	γ
$^{235}_{92}\text{U}$	6a	693,52	0,92808	0,15170	-
	6f	582,78	0,92655	0,00386	2,47
$^{236}_{92}\text{U}$	6a	5,50	1	72,5600	-
$^{237}_{93}\text{Np}$	6a	172,00	1,0409	6,32500	-
$^{238}_{92}\text{U}$	6a	2,73	1	0	2,45
	6f	747,73	1,4004	1,39800	2,905
$^{240}_{94}\text{Pu}$	6a	300,00	1,1101	45,2700	-
$^{241}_{94}\text{Pu}$	6a	1397,46	1,2734	0,3986	-
	6f	1015,22	1,2735	0,3986	3,06
$^{242}_{94}\text{Pu}$	6a	30,09	1,0242	51,7000	-
$^{241}_{95}\text{Am}$	6a	587,17	1,2634	7,5360	-

Korišćenjem podataka iz Tablica I i II, i jednačina (1.10), (1.11) i (1.12) dobijaju se veličine preseka aproscije pojedinih izotopa u funkciji ozračivanja

τ . Rezultati računa dati su u tablici III i na dijagramu 1 i 2. Mikro preseci uzeti su prema (1.13), s tim da je za epitermalni odnos r usvojena vrednost (1.15), jer ovim lancem nije obuhvaćen plutonijum.

Na kraju je dat tekući dijagram prema kome je sastavljen program za računanje na digitalnoj mašini.

TABLICA III

Preseci $\frac{\sigma \cdot N_i(T)}{N_{25}(0)}$ i koncentracije pojedinih izotopa

τ (a/kb)	$\frac{\sigma_{25}^{N_{25}}}{N_{25}(0)}$ (barna)	$\frac{\sigma_{26}^{N_{26}}}{N_{25}(0)}$ (barna)	$\frac{\sigma_{37}^{N_{37}}}{N_{25}(0)}$ (barna)	$N_{25}(\tau)$ (kg/t)	$N_{26}(\tau)$ (kg/t)	$N_{37}(\tau)$ (kg/t)
0	$6,5052 \cdot 10^2$	0	0	7,2000	0	0
0,01	$6,4631 \cdot 10^2$	$5,9854 \cdot 10^{-2}$	$7,6582 \cdot 10^{-5}$	7,1533	$1,3627 \cdot 10^{-2}$	$2,2033 \cdot 10^{-6}$
0,02	$6,4212 \cdot 10^2$	$1,1930 \cdot 10^{-1}$	$3,0209 \cdot 10^{-4}$	7,1069	$2,7162 \cdot 10^{-2}$	$8,6917 \cdot 10^{-6}$
0,03	$6,3795 \cdot 10^2$	$1,7834 \cdot 10^{-1}$	$6,7511 \cdot 10^{-4}$	7,0608	$4,0604 \cdot 10^{-2}$	$1,9423 \cdot 10^{-5}$
0,04	$6,3382 \cdot 10^2$	$2,3698 \cdot 10^{-1}$	$1,1942 \cdot 10^{-3}$	7,0150	$5,3955 \cdot 10^{-2}$	$3,4360 \cdot 10^{-5}$
0,05	$6,2971 \cdot 10^2$	$2,9522 \cdot 10^{-1}$	$1,8581 \cdot 10^{-3}$	6,9695	$6,7216 \cdot 10^{-2}$	$5,3461 \cdot 10^{-5}$
0,06	$6,2562 \cdot 10^2$	$3,5307 \cdot 10^{-1}$	$2,6654 \cdot 10^{-3}$	6,9243	$8,0386 \cdot 10^{-2}$	$7,6678 \cdot 10^{-5}$
0,07	$6,2157 \cdot 10^2$	$4,1052 \cdot 10^{-1}$	$3,6147 \cdot 10^{-3}$	6,8794	$9,3466 \cdot 10^{-2}$	$1,0400 \cdot 10^{-4}$
0,08	$6,1754 \cdot 10^2$	$4,6758 \cdot 10^{-1}$	$4,7047 \cdot 10^{-3}$	6,8348	$1,0645 \cdot 10^{-1}$	$1,3536 \cdot 10^{-4}$
0,09	$6,1353 \cdot 10^2$	$5,2425 \cdot 10^{-1}$	$5,9342 \cdot 10^{-3}$	6,7905	$1,1936 \cdot 10^{-1}$	$1,7073 \cdot 10^{-4}$
0,10	$6,0955 \cdot 10^2$	$5,8053 \cdot 10^{-1}$	$7,3017 \cdot 10^{-3}$	6,7465	$1,3217 \cdot 10^{-1}$	$2,1008 \cdot 10^{-4}$
0,20	$5,7116 \cdot 10^2$	1,1226	$2,8279 \cdot 10^{-2}$	6,3216	$2,5560 \cdot 10^{-1}$	$8,1388 \cdot 10^{-4}$
0,30	$5,3519 \cdot 10^2$	1,6288	$6,1701 \cdot 10^{-2}$	5,9234	$3,7085 \cdot 10^{-1}$	$1,7752 \cdot 10^{-3}$

0,40	$5,0148 \cdot 10^2$	2,1013	$1,0637 \cdot 10^{-1}$	5,5503	$4,7842 \cdot 10^{-1}$	$3,0605 \cdot 10^{-3}$
0,50	$4,6990 \cdot 10^2$	2,5422	$1,6122 \cdot 10^{-1}$	5,2008	$5,7880 \cdot 10^{-1}$	$4,6378 \cdot 10^{-3}$
0,60	$4,4030 \cdot 10^2$	2,9535	$2,2524 \cdot 10^{-1}$	4,8732	$6,7244 \cdot 10^{-1}$	$6,4806 \cdot 10^{-3}$
0,70	$4,1257 \cdot 10^2$	3,3371	$2,9749 \cdot 10^{-1}$	4,5663	$7,5978 \cdot 10^{-1}$	$8,5594 \cdot 10^{-3}$
0,80	$3,8658 \cdot 10^2$	3,6947	$3,7712 \cdot 10^{-1}$	4,2787	$8,4121 \cdot 10^{-1}$	$1,0850 \cdot 10^{-2}$
0,90	$3,6224 \cdot 10^2$	4,0281	$4,6330 \cdot 10^{-1}$	4,0092	$9,1710 \cdot 10^{-1}$	$1,3330 \cdot 10^{-2}$
1,00	$3,3942 \cdot 10^2$	4,3386	$5,5531 \cdot 10^{-1}$	3,7567	$9,8781 \cdot 10^{-1}$	$1,5977 \cdot 10^{-2}$
1,10	$3,1804 \cdot 10^2$	4,6278	$6,5224 \cdot 10^{-1}$	3,5201	1,0536	$1,8772 \cdot 10^{-2}$
2,10	$1,6594 \cdot 10^2$	6,6050	1,7873	1,8366	1,5038	$5,1425 \cdot 10^{-2}$
3,10	$8,6586 \cdot 10^1$	7,9062	2,9718	$9,5833 \cdot 10^{-1}$	1,7089	$8,5503 \cdot 10^{-2}$
4,10	$4,5178 \cdot 10^1$	7,8500	4,0225	$5,0002 \cdot 10^{-1}$	1,7872	$1,1573 \cdot 10^{-1}$
5,10	$2,3572 \cdot 10^1$	7,9070	4,8801	$2,6089 \cdot 10^{-1}$	1,8002	$1,4040 \cdot 10^{-1}$
6,10	$1,2299 \cdot 10^1$	7,8181	5,5418	$1,3612 \cdot 10^{-1}$	1,7800	$1,5944 \cdot 10^{-1}$
7,10	6,4174	7,6568	6,0281	$7,1027 \cdot 10^{-2}$	1,7432	$1,7343 \cdot 10^{-1}$
8,10	3,3484	7,4613	6,3665	$3,7060 \cdot 10^{-2}$	1,6987	$1,8317 \cdot 10^{-1}$
9,10	1,7471	7,2514	6,5848	$1,9336 \cdot 10^{-2}$	1,6509	$1,8945 \cdot 10^{-1}$
10,10	$9,1158 \cdot 10^{-1}$	7,0373	6,7077	$1,0089 \cdot 10^{-2}$	1,6022	$1,9299 \cdot 10^{-1}$

8. G. Craig et al.: Long irradiation of natural uranium.
(Geneva conf. 1958²/205)

9. W. B. Lewis: Low cost- fuelling without recycling
(Atomic energy of Canada Limited)
LR-39 (1956 god.)

10. B. Cutts, R. W. Munnery,
J.J.Surett, J.C.Tyrer: Graphite moderated thermal reactor
calculations for the Calder Hall
reactors.
(A/Conf. 15/E 15, 1958 god.).

11. ORNL 2500/2 (1958)

12. J.F. Hill: As U^{235} fissions and isotopes of
Pu build up, the reactivity changes
(Nuclear Power, 1957 god.).

13. R.L. Murray: Nuclear reactor physics
(London Macmillan & Co LTD), 1959.

14. J. Pop-Jordanov: Fizika reaktora
(Dokumentacija preduzeća "Energoprojekt"
1961 god.).

15. T.H. Pigford et al.: Fuel cycles in single-region thermal
power reactors.
(A/Conf. 1/1016, 1958 god.).

16. S.E. Lewis and
J.C.S. Lowthian: Theoretical aspects of fuel cycling
in industrial Calder Hall type reactors
(A/Conf. E/311, 1958_g.)

17. A. Léval et al: Analytical and economic investigation of plutonium production in nuclear power reactors.
(A/Conf. P/1727, 1958 god.).

18. R.E. Gallie et al: Problems of fuelling in industrial Calder Hall type reactors.
(A/Conf. P/37, 1958).

19. M. Goto et al: Burnup calculation of natural-uranium graphite-moderated power reactor using a digital computer.
(A/Conf. P/1339, 1958 god.).

20. S.M. Feinberg et al: Fuel burnup in water-moderated water-cooled power reactors and uranium-water lattice experiments.
(A/Conf. P/2145, 1958).

21. D.Dz.Litler: Bitelnoe izmenenie reaktivnosti reaktorov na estestvenom urane (ruski prevod, Dokladi inostranih učionih.
Ženeva 1955, str. 589.

22. E. M. Vajnbarg: Obzor ciklov vesproizvodstva jačernovo topliva i tipov reaktorov.
(Dokladi inostranih učionih, Ženeva 1955 god., str. 598).

23. Ež. V. Lenvart: Toplivie cikli i tipi reaktorov
(Dokladi stranih učionih, Ženeva 1955, str. 616).

24,

Directory of Nuclear Reactors

Vol. I. Power Reactors.

(The International Atomic Energy
Agency, 1959).

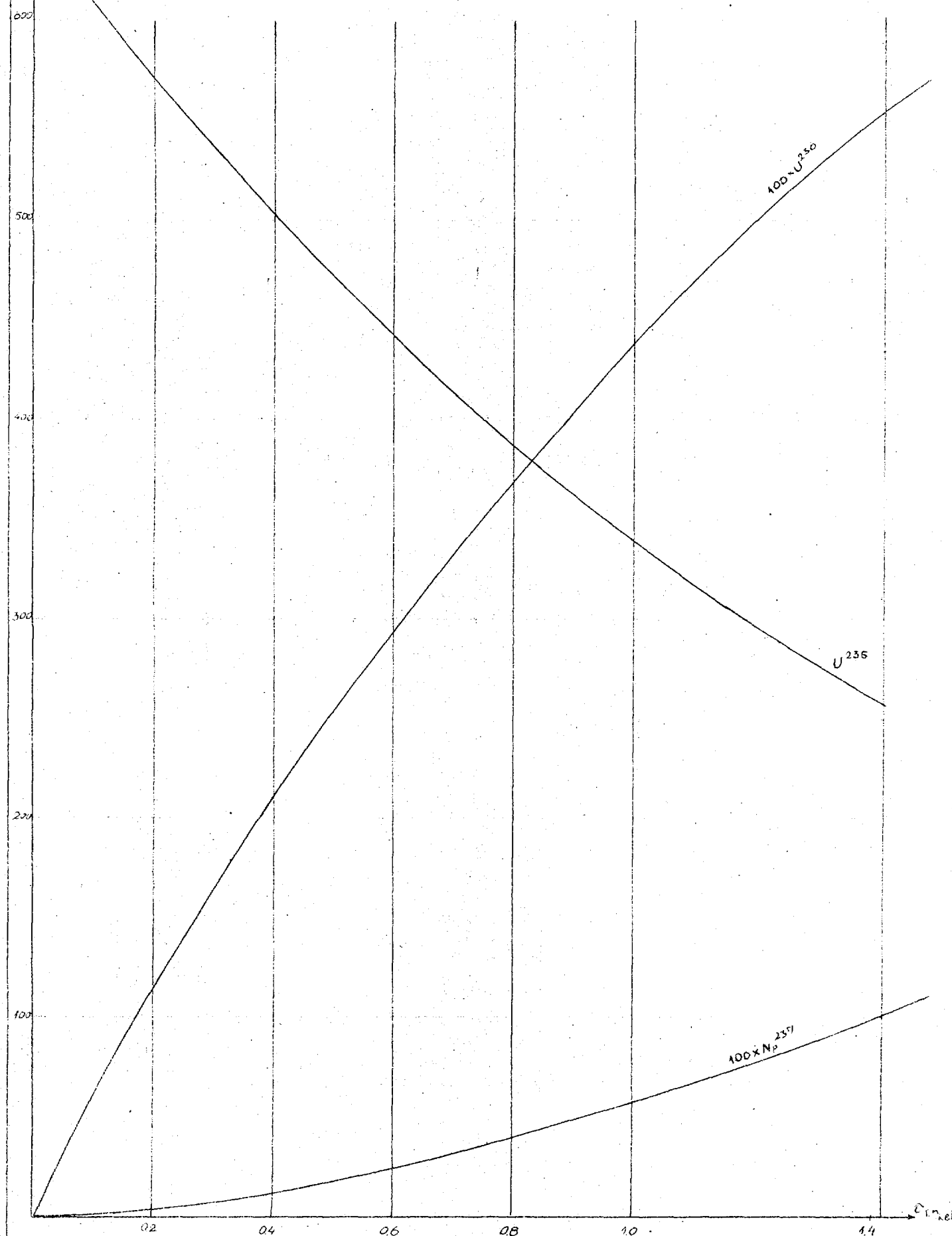
25. H. Etherington:

Nuclear engineering handbook

(Mc.Graw-Hill Book Company, inc.,
1958 god.).

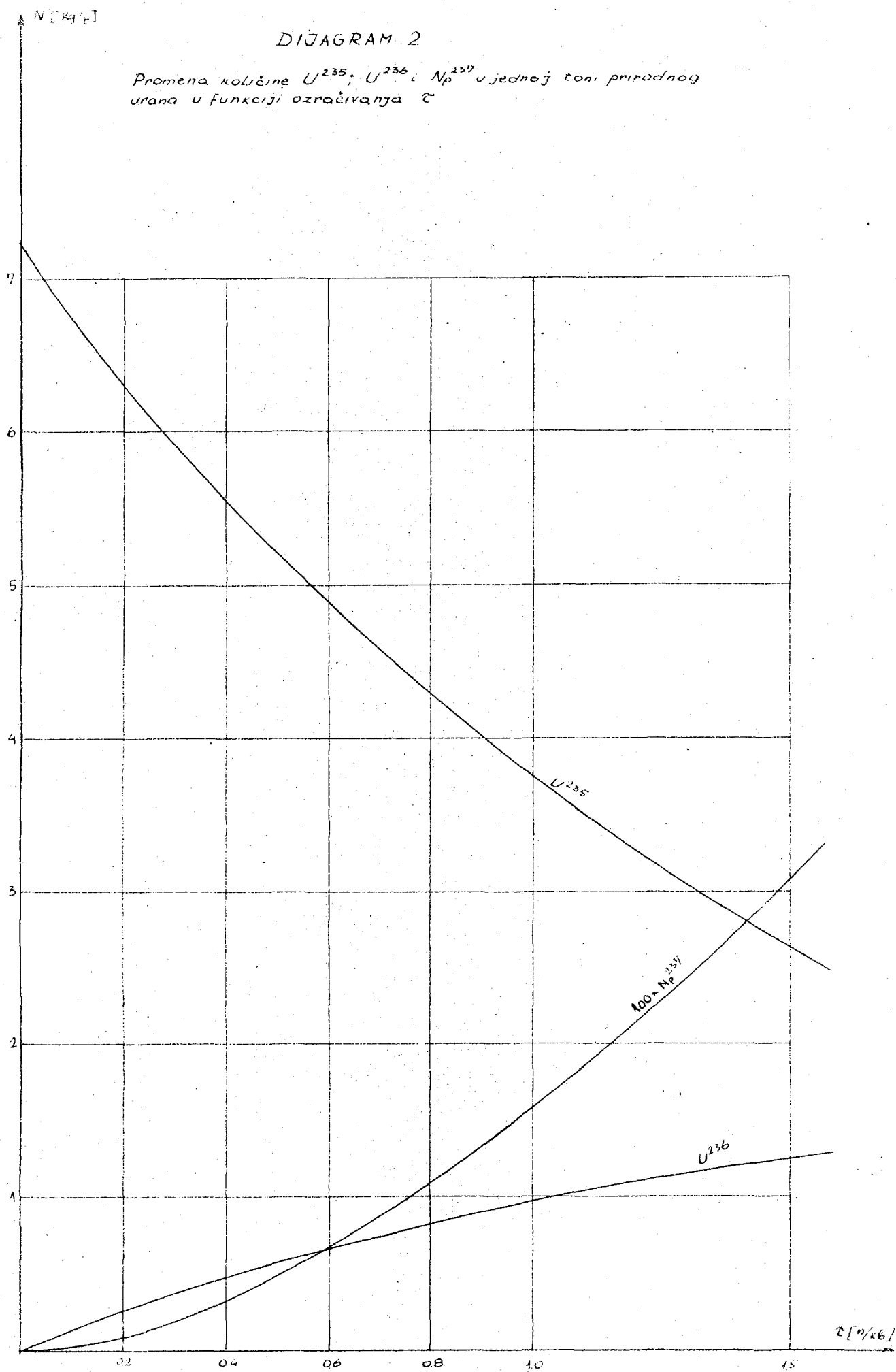
DIJAGRAM 1

Zavisnost preseka U^{235} , U^{236} , N_p^{237} od ozračivanja τ



DIJAGRAM 2

Promena količine U^{235} , U^{236} i Np^{237} u jednoj toni prirodnog urana u funkciji ozračivanja τ



TEKUĆI DIJAGRAM

