



CS06RA321

# INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE

„BORIS KIDRIČ“

IBK-53

Naim Afgan i Predrag Kulundžić

ANALIZA UDESA USLED POVIŠENJA

TEMPERATURE NA REAKTORU RA

U VINČI

VINČA-BEOGRAD

IBK-53

IBK-53

Naim Afgan i Predrag Kulundžić

ANALIZA UDESA USLED POVIŠENJA  
TEMPERATURE NA REAKTORU RA  
U VINČI

Za I Simpozijum termičara - Herceg Novi -15. juni 1964.

Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič", Vinča  
Beograd, juni 1964.

Naim Afgan, dipl.ing. i Predrag Kulundžić, dipl.ing. saradnici Laboratorije za reaktorsku termotehniku, Instituta za nuklearne nauke "Boris Kidrič" u Vinči.

ANALIZA UDESA USLED POVIŠENJA TEMPERATURE NA REAKTORU RA  
U VINČI

Abstrakt

Rad je baziran na pronalaženju maksimalnih vremena pri kojima i pored mehaničkih kvarova neće doći do udesa.

Posmatrani su slučajevi: prestanak cirkulacije moderatora, curenje moderatora uz i bez postojeće cirkulacije, kao i udesi pri vadjenju tehnoloških kanala iz reaktorskog suda.

Dobijeni su rezultati numeričkom i eksperimentalnom metodom. Eksperimentalna aparatura je postavljena da bi se dobila potvrda numeričkih rezultata.

U radu se vodilo računa da se uvek analiziraju najnepovoljniji slučajevi pa su zato i dobijeni rezultati donje granice rešenja.

U V O D

Posmatrajući nuklearni reaktor kao jednu termotehničku mašinu, možemo sve moguće udese usled povišenja temperature podeliti u dve glavne grupe:

- I. Udese u samom reaktoru, gde se podrazumevaju svi mogući udesi i to gorivnih elemenata, tehnoloških kanala i moderatora.
- II. Udese pri vadjenju tehnoloških kanala iz reaktorskog suda radi zamene prepravke ili slično. Drugim rečima

udesi, koji mogu nastupiti za vreme potrebom da se tehnološki kanal transportuje iz reaktorskog suda do bazena za odležavanje.

Poznato je da kontrolna instrumentacija na samom reaktoru reaguje prilikom svakog poremećaja i automatski gasi reaktor. Poznavajući fizičku prirodu samog reaktora, upoznañi smo sa činjenicom, da pri gašenju lančane reakcije snaga reaktora ne pada na nulu, već na vrednost oko 6% svoje nominalne vrednosti. Opadanje snage odvija se dalje u vremenu po eksponencijalnom zakonu.

Mada je mala, zaostala snaga može biti dovoljna da pri raznim mehaničkim kvarovima dovede do topljenja aktivne zone, ako nije sprovedeno odgovarajuće hladjenje.

### I Udesi u reaktorskom sudu

Posmatrajući sve moguće udese sa stanovišta zakasnele generacije toplote i poznavajući automatiku samog reaktora, može se reći da će do udesa u reaktorskom sudu doći pri ovim mehaničkim kvarovima:

1. Prestanak cirkulacije moderatora,
2. Curenje moderatora uz postojeću cirkulaciju,
3. Curenje moderatora bez cirkulacije.

Pod udesom ovde se podrazumeva akcident u kome dolazi do topljenja aktivne zone.

### 1. Prestanak cirkulacije moderatora

Prilikom prestanka cirkulacije moderatora reaktor se automatski zaustavlja. Zaostala snaga, koja se i dalje razvija, data je empiriskim obrascem:

$$P_s = 6,62 \cdot 10^{-2} P_o \left[ \tau_s^{-0,2} - \left( \tau_s + \tau_o \right)^{-0,2} \right]$$

Ako toplotni kapacitet aktivne zone obeležimo sa  $C_{ak}$  i usvajajući da je dozvoljeni porast temperature moderatora  $t$ , moguće je naći količinu toplote koju aktivna zona može da akumulira, a da se pri tome ne prekorači dozvoljena temperaturna razlika. S druge strane, moguće je, iz poznavanja promene zakasnele snage, naći vreme za koje će se taj proces obaviti. Na osnovu ovoga može se pisati:

$$C_{ak} \frac{dt}{d\tau} = P_s \quad \text{odnosno} \quad C_{ak} / t_2 - t_1 / = \int_0^{\tau} P_s d\tau_s$$

znajući da je toplotni kapacitet aktivne zone  $C_{ak} = 2973$  kcal. dozvoljeni temperaturni gradijent  $\Delta t = t_2 - t_1 = 60^\circ \text{C}$ , i koristeći se postojećom literaturom, gde je dato da ako reaktor radi na snazi  $P_o$  beskonačno dugo vremena, može se za  $\tau_s \approx 200$  sec. uzeti da je

$$\int_0^{\tau_s} P_s d\tau_s = 0,125 P_o \tau_s^{0,8} \text{ Kwh} \quad \text{tako da naša jednačina postaje}$$

$$C_{ak} / t_2 - t_1 / = 0,125 P_o \tau_s^{0,8}$$

Iz ove jednačine moguće je naći za razna opterećenja reaktora dozvoljeno vreme rada bez cirkulacije:

$P_o = 4 \text{ Mw}$	$\tau = 9154 \text{ sec} = 2,54 \text{ h}$
$P_o = 6 \text{ Mw}$	$\tau = 5496,7 \text{ sec} = 1,52 \text{ h}$
$P_o = 10 \text{ Mw}$	$\tau = 2820,5 \text{ sec} = 47 \text{ min}$

Ovde je potrebno naglasiti da su ova vremena u stvarnosti nešto veća, jer postoji gubljenje toplote iz aktivne zone u okolinu i da je pri nekom kraćem vremenskom periodu rada reaktora, veličina zakasnele snage manja.

Dobijena dozvoljena vremena rada reaktora bez cirkulacije su dovoljno velika, samim tim što tek posle isteka tih vremena dolazi do ključanja moderatora. Može se smatrati da je osoblje reaktora u stanju da mehaničke kvarove usled kojih je došlo do prestanka cirkulacije otkloni pa ne postoje realni uslovi koji bi vodili ka udesu.

## 2. Curenje moderatora uz postojeću cirkulaciju

Pri normalnom radu reaktora nivo teške vode je na 1850 mm, i ako dodje do curenja, cirkulacija kroz tehnološke kanale se neće obustaviti sve do momenta dok nivo ne opadne na 150 mm, kada počinje usisavanje helijuma iz reaktorskog suda i pumpe prestaju sa radom. Taj momenat može se smatrati kao potencijalni početak udesa.

Curenje moderatora može biti van reaktorskog suda i u eksperimentalne reaktorske kanale unutar reaktorskog suda.

a/ Curenja van reaktorskog suda možemo podeliti na: curenje u spoljnji reaktorski sud, curenje u halu reaktora, curenje u slivni rezervoar kroz ventil br. 9 i curenje u tehnološke prostorije sistema teške vode kroz cirkulacione cevi u elemente sistema.

Kako su za nas interesantni najnepovoljniji uslovi ovde će biti razmatran slučaj curenja u tehnološke prostorije

sistema, obzirom da je to najniža tačka sistema. Račun je sproveden za tri mogućnosti otvora: 1 cm<sup>2</sup>; 10 cm<sup>2</sup> i 100 cm<sup>2</sup>. Pri ovome važno je napomenuti da pri opadanju nivoa, na 1500 mm reaktor se automatski gasi, dok se cirkulacija isključuje pri dostizanju nivoa od 150 mm.

Od trenutka nastajanja otvora pa do momenta gašenja reaktora, odnosno da dostizanja nivoa moderatora od 1500 mm protećiće sledeća vremena.

1	cm <sup>2</sup>	$\tau_g = 896$ sec
10	cm <sup>2</sup>	$\tau_g = 89,6$ sec
100	cm <sup>2</sup>	$\tau_g = 8,96$ sec

U ovim vremenima zaustavlja se reaktor, ali cirkulacija kroz tehnološke kanale još uvek postoji, sve do nivoa 150 mm. Prestanak cirkulacije desiće se za adekvatne otvore:

1	cm <sup>2</sup>	$\tau_c = 103,8$ min
10	cm <sup>2</sup>	$\tau_c = 10,38$ min
100	cm <sup>2</sup>	$\tau_c = 1,038$ min

Gornji račun pokazuje da su vremena relativno kratka i samim tim veličine zakasnele snage velike, te ako se ne obezbedi neko naknadno hladjenje sigurno će doći do topljenja aktivne zone. Obzirom da je za analizu mogućeg udesa potrebno znati vremena u kojima će posle prestanka cirkulacije doći do topljenja aktivne zone, i to redosleda topljenja od centra ka periferiji, pojava je tretirana teoretski i eksperimentalno.

Poznavajući zakon opadanja zakasnele snage nalazimo snagu u centralnom kanalu:

$$P_c = \frac{P_s}{n \cdot \eta_r} \quad \text{odnosno po jednom gorivnom elementu}$$

vedeći računa o uzdužnoj distribuciji  
fluksa

$$P'_c = \frac{P_c}{n' \cdot \eta_l} = A \cdot q$$

Obzirom da toplotni kapacitet tehnološkog kanala sačinjavaju gorivni element i spoljašnja cev to je potrebno izraziti vremensku promenu temperature svakog od ovih delova. Tako za gorivo važi da je

$$q \, d\tau = C \, dt + Q'_c \, d\tau$$

a za spoljašnju cev

$$Q'_o \, d\tau = C' \, dt' + Q_o \, d\tau$$

Poznavajući razlike temperature i geometriske parametre kanala moguće je naći vremensku distribuciju temperature gorivnog elementa:

$$d\tau = \frac{C \, dt}{q - Q'_o}$$

Račun je sproveden na digitalnoj računskoj mašini. Radjeno je sa tri specifična toplotna opterećenja koja odgovaraju prema položajima u reaktoru centralnom, srednjem i perifernom kanalu. Dobijena su vremena dostizanja temperature goriva od 650°C, koja se smatra tačkom topljenja aluminijske košuljice.

Pri radu reaktora na snazi 4 Mw

$q_c = 0,2072 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/sec cm}$	$\tau_t = 9,78 \text{ min}$
$q_{sr} = 0,1545 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/sec cm}$	$\tau_t = 13,74 \text{ min}$
$q_{per} = 0,115 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/sec cm}$	$\tau_t = 19,8 \text{ min}$



Pri radu reaktora na snazi 10 Mw

$$\begin{aligned}q_c &= 0,516 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/sec cm} & \tau_t &= 221,3 \text{ sec} \\q_{sr} &= 0,385 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/sec cm} & \tau_t &= 300,9 \text{ sec} \\q_{per} &= 0,2865 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/sec cm} & \tau_t &= 412,5 \text{ sec}\end{aligned}$$

U cilju proveravanja ranije izračunatih računskih vrednosti izvršen je eksperimentat na geometrijski sličnom modelu, grejnom jednosmernom strujom. Eksperimentalna aparatura sastojala se iz spoljne cevi istog prečnika kao i tehnološki kanal u kojoj se nalazi grejni element čiji je prečnik jednak prečniku gorivnog elementa.

Za dobijanje vremenske zavisnosti odvedene količine toplote, merena je vremenska varijacija temperature grejača u zavisnosti od priključene snage, koja je pri svakom merenju držana kontantnom. Na osnovu izraza da je:

$$P_o = P - P_c = P - C \frac{dt}{dt}$$

dobijene su vremenske zavisnosti odvedene količine toplote. Odredjivanje snage vršeno je pomoću merenja napona i struje. Napon je meren milivoltmetarom, tačnosti 0,2%, dok je struja merena pomoću šenta. Temperatura je merena pomoću termoparova Fe - Co. Eksperimentalni deo je bio dužine 1075 mm. Na tri nivoa, 315 mm, 540 mm i 760 mm od gornjeg priključka grejača, pod uglom od 180° pomoću 6 termoparova, merena je temperatura grejača i temperatura fluida po horizontali u zazoru između grejača i obloge. Na dva druga nivoa, 440 mm i 645 mm od gornjeg grejača, pod uglom od 180° merena je pomoću 4 termopara temperatura spoljnje obloge. Vodjeno je računa c tome da se temperatura

prostori je u kojoj se radilo ne menja, kao ni uslovi cirkulacije u njoj. Na osnovu ovih merenja dobijene su krive  $t = f / \hat{T} /$ , pa je bilo moguće naći  $P_0 = f / \hat{T} /$ . Koristeći se dijagramima (1 i 2) dobijena su vremena dostizanja temperature goriva od  $650^{\circ}\text{C}$ , koja su data u dijagramu (3)  $t_g = f / \hat{T} /$ , za tri generacije izabrane kao u predhodnom slučaju.

Eksperimentalni rezultati se vrlo dobro slažu sa teoriskim.

b/ Interesantno je takodje videti šta će se desiti ako dodje do curenja unutar reaktorskog suda, odnosno u eksperimentalne kanale.

U reaktorskom sudu postoji 9 eksperimentalnih kanala i to: 1 x  $\emptyset$  110 /VK-5/; 4 x  $\emptyset$  100 /VK-9/ i 4 x  $\emptyset$  50 /VK-7/.

Prilikom curenja u eksperimentalne kanale doći će do izjednačavanja nivoa u sudu i kanalima, što dovodi do smanjenja nivoa moderatora. Ako sa  $S_1$  obeležimo neto površinu reaktorskog suda, sa  $S_2$  površinu svih reaktorskih kanala a znajući zapreminu teške vode, nivo posle punjenja svih kanala će biti na visini H koja je data,

$$H = \frac{V}{S_1 + S_2} = 1780 \text{ mm što pokazuje da je}$$

$H = / H_0 - H / = 7 \text{ cm.}$  i neće prouzrokovati niti gašenje reaktora a samim tim niti nikakvu potencijalnu opasnost.

### 3. Curenje moderatora bez cirkulacije

Pri ovoj vrsti udesa najveća je mogućnost za cštećenje samog reaktora, jer je vreme isključivanja samog reaktora usled smanjenja nivoa sa vremenom izronjavanja gorivnih elemenata a samim tim je i zakasnela snaga velika.

U proračunu vremena potrebnog za topljenje pretpostavljeno je da zagrevanje elementa počinje onog trenutka kada dodje do njegovog potpunog izronjavanja. Kako nas interesuje procentualno topljenje goriva, sproveden je isti račun kao u predhodnom slučaju samo sa tom razlikom što je uzeta generacija toplote za jedan gorivni element. Rezultati su dati tabelarno, za otvor curenja od 1 cm.

$$P_c = 4 \text{ MW}$$

$$P_c = 10 \text{ MW}$$

Izronjavanje prvog reda elemenata. Vreme posle gašenja reaktora  $\tau_s = 293 \text{ sec.}$

$$\begin{array}{ll} q_c = 0,3172 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 369,7 & q_c = 0,792 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 142,1 \\ q_{sr} = 0,237 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 507,27 & q_{sr} = 0,599 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 195,6 \\ q_{per} = 0,176 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 708,4 & q_{per} = 0,441 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 260,8 \end{array}$$

Izronjavanje drugog reda elemenata. Vreme posle gašenja reaktora  $\tau_s = 615,8 \text{ sec.}$

$$\begin{array}{ll} q_c = 0,320 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 366,2 & q_c = 0,800 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 137,4 \\ q_{sr} = 0,248 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 428 & q_{sr} = 0,596 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 193,9 \\ q_{per} = 0,1775 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 701,58 & q_{per} = 0,444 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 258,9 \end{array}$$

Izronjavanje trećeg reda elemenata. Vreme posle gašenja reaktora  $\tau_s = 931,8 \text{ sec.}$

$$\begin{array}{ll} q_c = 0,342 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 341,2 & q_c = 0,851 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 134,3 \\ q_{sr} = 0,255 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 468,1 & q_{sr} = 0,634 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 178,7 \\ q_{per} = 0,190 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 649,2 & q_{per} = 0,476 \cdot 10^{-2} \quad \tau_t = 240,7 \end{array}$$

Vrednosti za  $q$  su u /kcal/sec cm/ a  $\tau_t$  u/ sec/

Na dijagramu /5/ data je u procentima zavisnost ukupne količine goriva prema količini, koja se topi u funkciji vremena za snage na kojima je radio reaktor 4 i 10 MW respektivno.

## II. Udesi pri vadjenju tehnoloških kanala iz reaktorskog suda.

Potreba vadjenja tehnoloških kanala javlja se prilikom zamene gorivnih elemenata ili prilikom otklanjanja eventualnih kvarova na tehnološkom kanalu.

U normalnim uslovima rada, reaktor se zaustavi i hladi pa se tek posle odredjenog vremena pristupa vadjenju kanala. Nas interesuju potrebna vremena hladjenja.

Podatci su dobijeni eksperimentalno na ranije opisanom modelu. Za temperaturu okoline od  $20^{\circ}\text{C}$  prinudne cirkulacije kako duž kanala tako i u radnoj prostoriji, pri priključenoj snazi od 458 W dostiže se temperatura od  $300^{\circ}\text{C}$  na sredini grejača. Kako je u stvarnim uslovima gorivo opkoljeno aluminijskom košuljicom, zbog samih metalurških osobina aluminijuma / $306^{\circ}\text{C}$  tačka rekristalizacije/ ova se temperatura može smatrati maksimalno dozvoljenom. Znači, za sve veće zaostale snage od 548 W ne sme se pristupiti vadjenju tehnoloških kanala, već se mora nastaviti hladjenje.

Koristeći se sledećim dijagramom /6/ može se doći do zaključka o potrebnim vremenim hladjenja. Na apcisi su data vremena rada reaktora, a na ordinati odnosc zaostale i radne snage. Krive su date za razna vremena posle gašenja reaktora. Horizontalne prave 4 i 10 MW su nivoci koji sa termotehničke strane ne smeju biti prevaziđjeni, ako je reaktor radio na snazi 4 i 10 MW respektivno.

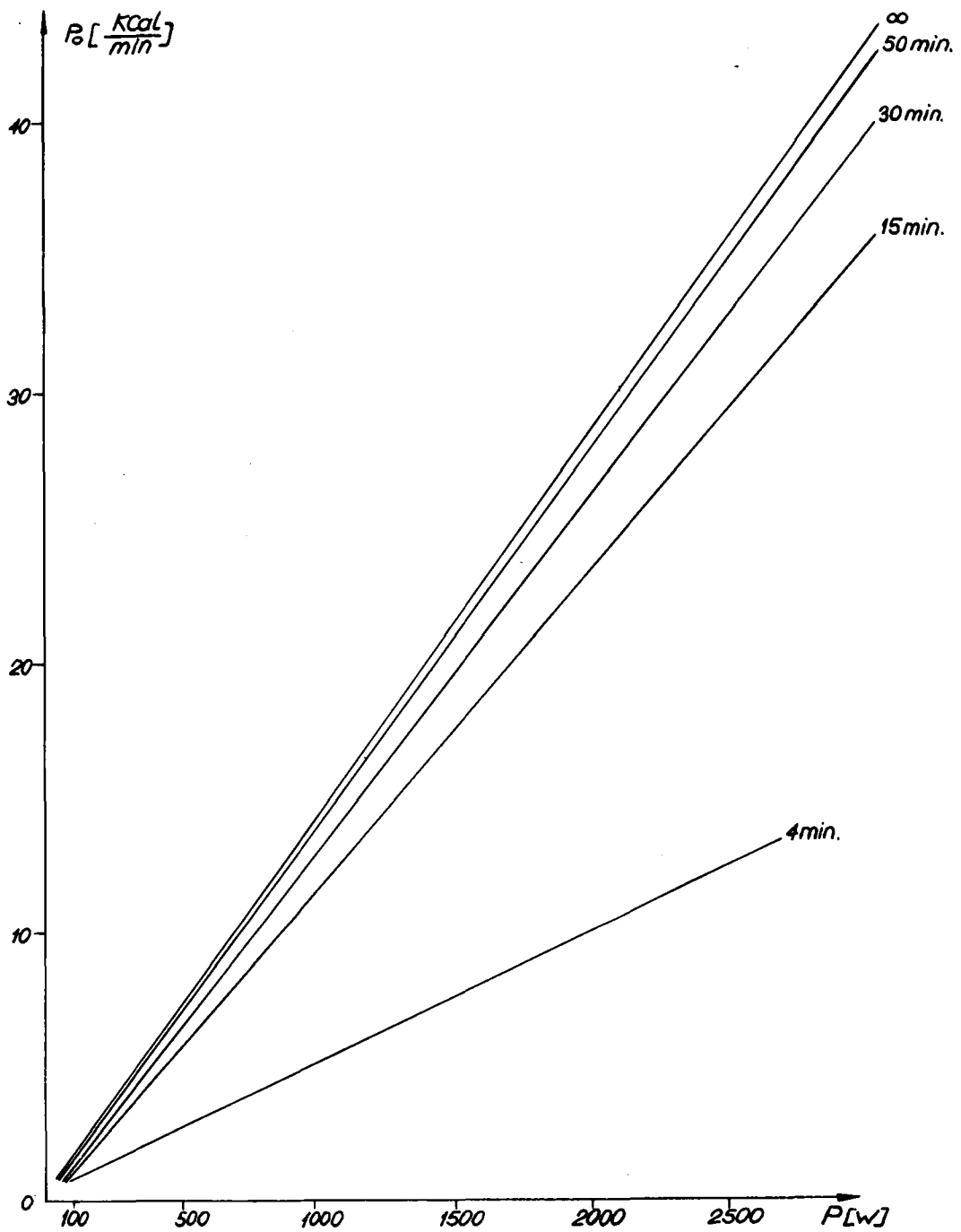
U slučaju da je potrebno tehnički vaditi iz reaktorskog suda, neposredno posle gašenja reaktora, iz bilo kojih razloga, važno je znati vremensku distribuciju temperature, kao i vreme kada dolazi do topljenja goriva. Koristeći se dobijenim podacima, na eksperimentalnom modelu, opisanom u predhodnoj glavi, analognom metodom kao i ranije opisanom, dobijaju se dijagrami /7 i 8/, kao i vreme posle koga dolazi do topljenja goriva  $\tau_t = 5,25$  min.

Nomenklatura

C	toplotni kapacitet /kcal/
P	snaga /KW/
P <sub>o</sub>	nominalna snaga reaktora u Kw
P <sub>s</sub>	zaostala snaga reaktora u KW
P <sub>c</sub>	snaga centralnog kanala
P <sub>c</sub>	snaga gorivnog elementa centralnog kanala /KW/
q	generisana količina toplote /kcal/sec cm/
q <sub>c</sub>	generisana količina toplote u gorivnom
q <sub>sr</sub>	elementu centralnog, srednjeg i perife
q <sub>per</sub>	riskog kanala /kcal/sec cm/
Q' <sub>c</sub>	odvedena količina toplote sa goriva
Q <sub>c</sub>	odvedena količina toplote sa teh. kanala
t	temperatura goriva /°C/
t'	temperatura aluminijske obloge
τ	vreme /sec/
τ <sub>c</sub>	<b>vreme rada reaktora na snazi P<sub>o</sub> /sec/</b>
τ <sub>s</sub>	vreme posle zaustavljanja reaktora /sec/
τ <sub>g</sub>	vreme gašenja reaktora
τ <sub>c</sub>	vreme prestanka cirkulacije
τ <sub>t</sub>	vreme u kome dolazi do topljenja
n	broj tehnoloških kanala
n'	broj elemenata u tehnološkom kanalu
η <sub>r</sub>	koeficijent radijalnog usredjenja
η <sub>l</sub>	koeficijent podužnog usrednjenja

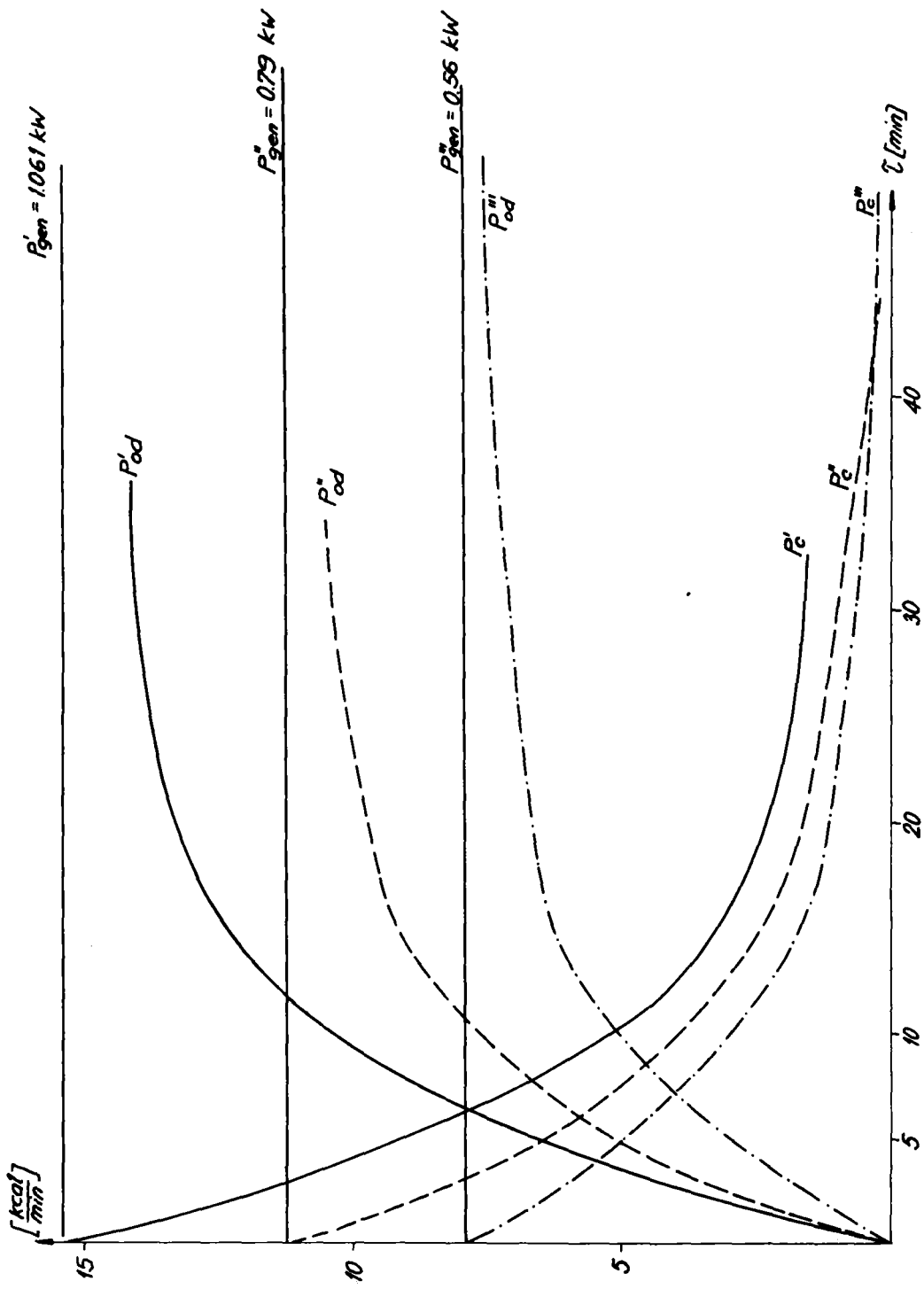
Way an Wigner	Rate of decay of fission products.
B. Hoay	Nuclear reactor experiments.
A. Rockwel	Reactor shielding desing manual.
ANL 6469	Calculation for shutdown cooling.
M. Jerković	Zakasnela snaga reaktora i problem hladjenja posle zaustavljanja RA
P. Kulundžić	Zakasnela generacija u reaktorskom elementu RA.

ZAVISNOST ODVEDENE KOLIČINE  
TOPLOTE OD PRIKLJUČNE SNAGE



DIJAGRAM 1





DIJAGRAM 2

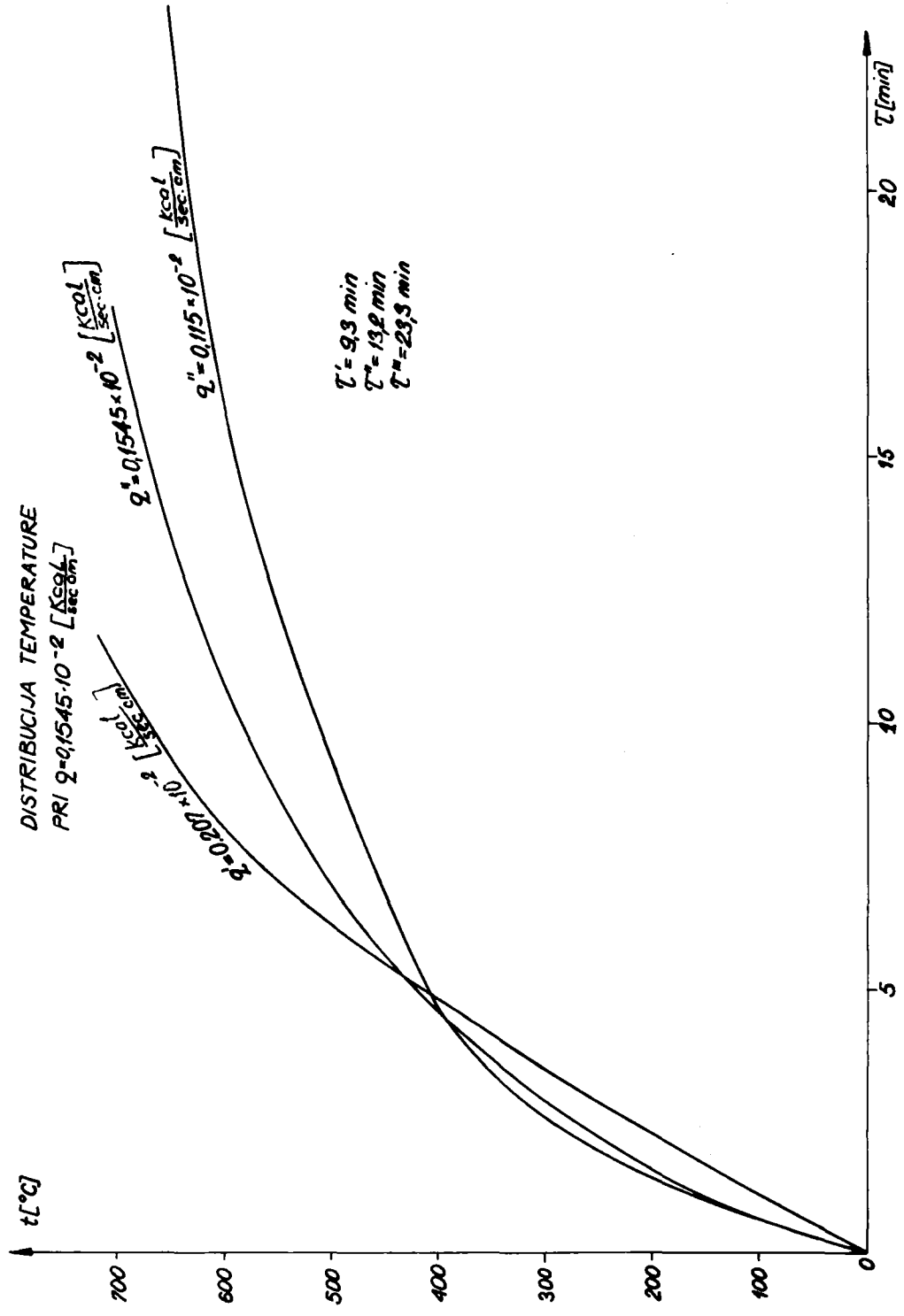
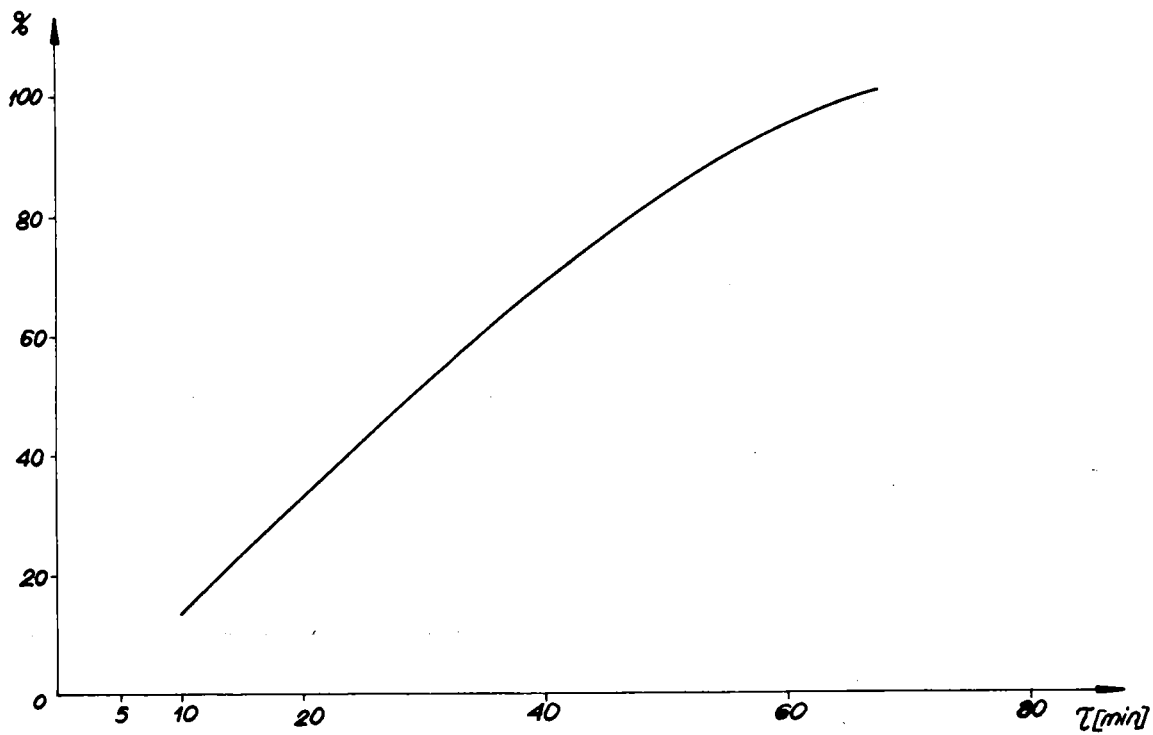


DIAGRAM 3

TOPLJENJE GORIVA  
 $P_0 = 4 \text{ MW}$  SA CIRKU-  
LACIJOM UZ CURENJE



DIJAGRAM 4

TOPLJENJE GORIVA BEZ CIRKULACIJE  
UZ CURENJE

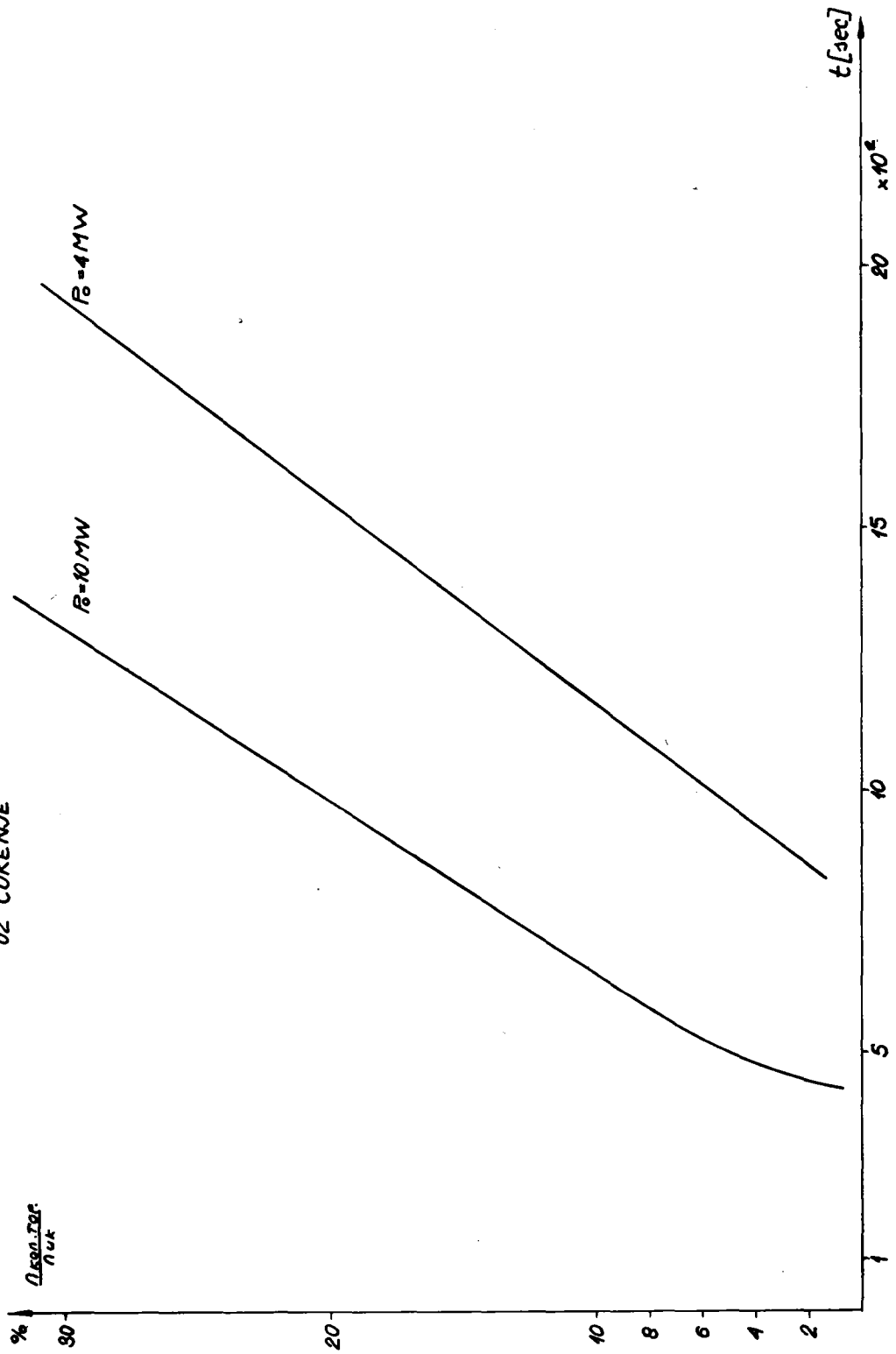
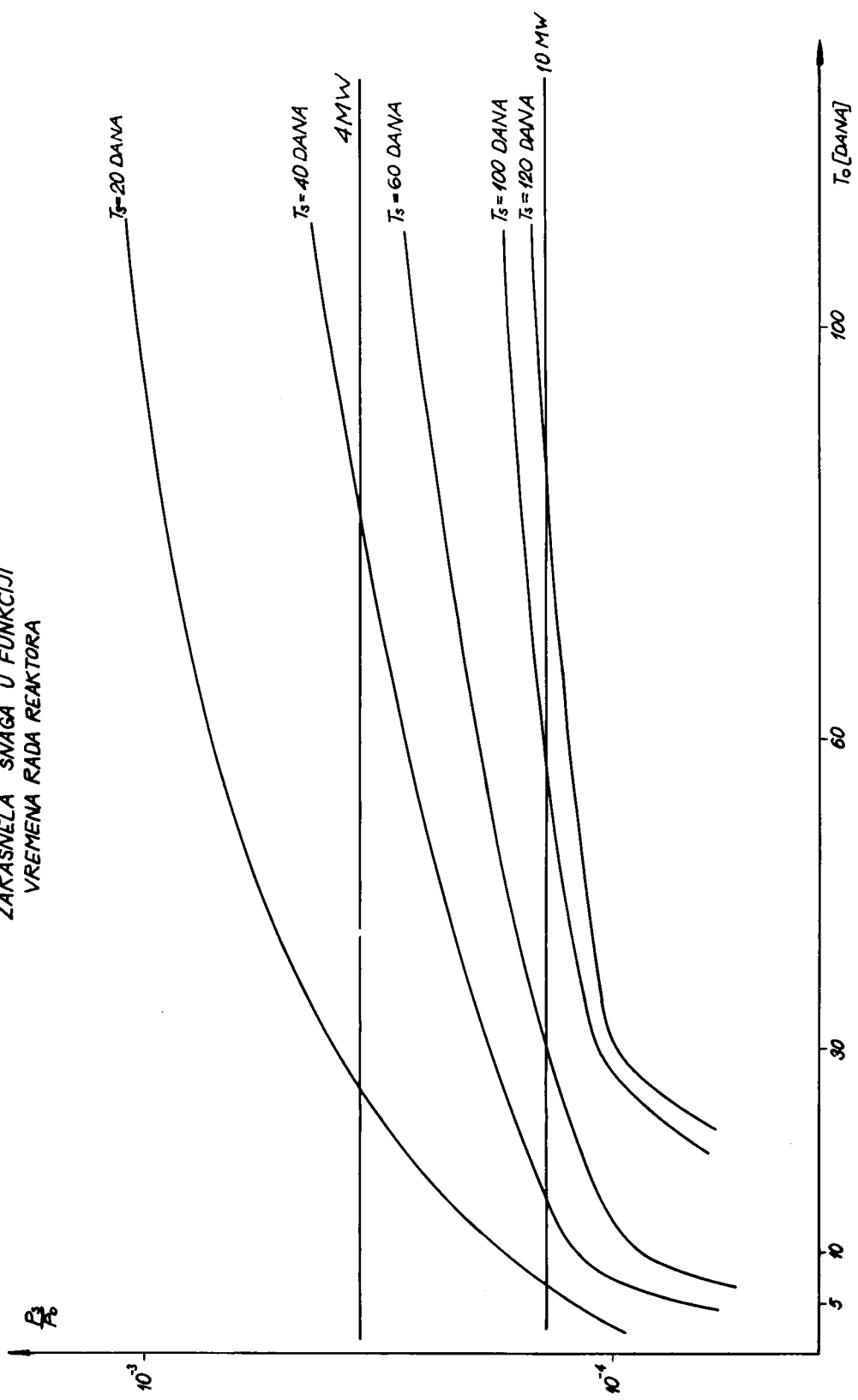


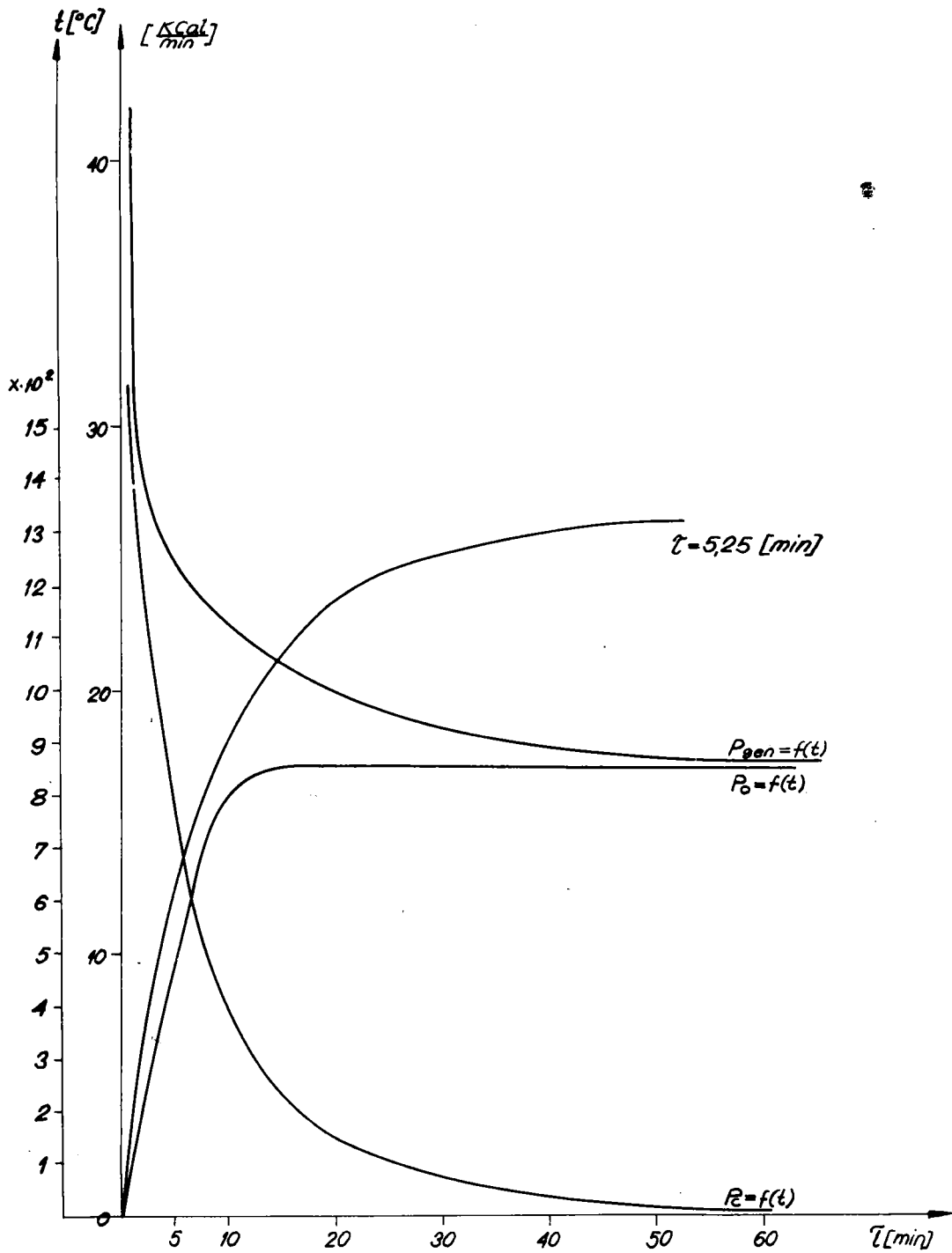
DIAGRAM 5

ZAKASNELA SMAGA U FUNKCJI  
VREMENA RADA REAKTORA



DIJAGRAM 6

PORAST TEMPERATURE CENTRALNOG  
 KANALA  $P_0 = 4 \text{ MW}$   $T_0 \rightarrow \infty$   
 NEPOSREDNO POSLE VAĐENJA KANALA



DIJAGRAM 7