

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD JNA

ATOMSKO
ORUŽJE I
ZAŠTITA

БИБЛИОТЕКА
ДОМА ЈНА — БЕОГРАД

Инв. бр. III-12-120 3

Бр. 12406



VOJNA BIBLIOTEKA

NAŠI PISCI

KNJIGA ČETVRTA

UREĐUJE ODBOR

ODGOVORNI UREDNIK

pešadiski pukovnik
NOVO MATUNOVIĆ

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD JNA

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD JNA

ATOMSKO ORUŽJE I ZAŠTITA

(ZBIRKA ČLANAKA)

БЕЛОРУССКАЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

БЕЛОРУССКАЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СФ. III-10-120/3

книг. бр. 15039

P R E D G O V O R

6 i 9 avgusta 1945 godine japanski gradovi Hirošima i Nagasaki sa svojih 240.000 stanovnika bili su prve žrtve napada atomskom bombom. Tada je ustvari i započela borbena primjena jednog od najstrašnijih i najsmrtonosnijih ratnih sredstava u historiji razvoja oružja.

Kao što je u prošlosti barut izazvao revolucionarne promjene u naoružanju i vođenju rata, tako i u naše vrijeme primjena nuklearne energije kao oružja uslovljava kvalitativne skokove u razvoju ratne tehnike i oružja i drugih sredstava masovnog razaranja i uništavanja.

Atomska (nuklearna i termonuklearna) oružja ispoljavaju sve veći utjecaj i imaju sve veći značaj u razvoju savremenih armija, pripremi nacionalnih teritorija za odbranu kao i na izgradnju savremene vojne misli i vojne doktrine, te vojno-političke strategije uopće kako kod zemalja koje su neposredni proizvođači atomskih oružja, tako i kod onih koje ovim oružjima još ne raspolažu.

S obzirom na taktičko-tehničke mogućnosti savremenih aviona (nosivost, plafon, brzina i veliki akcioni radijus), dirigovanih projektila i slobodno-letećih (balističkih) raketa i atomske artiljerije, koji prenose i izbacuju nuklearne i termonuklearne bombe ili atomske bojeve glave i zrna, danas svaka tačka na Zemljinoj kugli može biti izložena razornom i uništavajućem dejstvu.

Razne vrste atomskih oružja i sve masovnija proizvodnja ovih predstavljaju potencijalnu opasnost i stalnu prijetnju za čitav ljudski rod ukoliko do njihove zabrane ne dođe.

Polazeći od činjenice da se s proizvodnjom atomskih oružja produžava i da probe novih vrsta atomskog oružja

ne prestaju, sve više se suočavamo s jednom stvarnošću i opasnošću po čovečanstvo o kojoj moramo stalno voditi računa. Nažalost, danas je sve očiglednije, da sav naš rad i sve naše napore u pripremi naše zemlje za odbranu, moramo posmatrati kroz prizmu mogućnosti primjene atomskih oružja i drugih sredstava masovnog uništavanja u jednom eventualnom budućem ratu. Potreba da se svaki naš građanin, a pogotovo pripadnik naših oružanih snaga, upozna s karakteristikama atomskih oružja, s jedne, i s posljedicama koje će primjena nuklearne energije u vojne i nevojne svrhe izazvati, s druge strane, postaje iz dana u dan sve veća.

U svjetskoj štampi o nuklearnoj energiji i njenoj primjeni kao oružja napisano je mnogo knjiga, brošura i članaka a samo neznatan dio od toga preveden je i na naš jezik. Osim toga, većina ovih publikacija samo su djelimično dostupne našem čitaocu.

Knjiga »Atomsko oružje i zaštita« u izdanju »Vojnog djela« iako ne predstavlja cjelovito djelo te vrste, već zbir interesantnih i korisnih članaka, ima poseban značaj. Ako ne u potpunosti, ona će većim dijelom moći zadovoljiti najnužnije potrebe naših čitalaca, jer su članci obuhvatili osnovna pitanja o nuklearnoj energiji i nuklearnoj fizici, nuklearnom eksplozivu i nuklearnim reaktorima, konstrukciji i vrstama atomskog oružja i lansirnim sredstvima za njihovu primjenu.

Pored gornjih pitanja, u knjizi su obrađeni vrste i efekti nuklearnih eksplozija, kakav je njihov utjecaj na živu silu, tehniku i materijal, kakva je perspektiva primjene nuklearne energije u kopnenoj vojsci, mornarici i vazduhoplovstvu kako u naoružanju, tako i kao energetskom izvoru, kao i neki operativno-taktički problemi zaštite pomorskih i vazduhoplovnih baza. Isto tako u knjizi se razmatraju i neki aspekti tehničkih i medicinskih mjera u organizaciji i izvođenju zaštite.

Čitalac treba imati u vidu da su doskoro podaci o atomskim oružjima bili strogo čuvana tajna pa su prema tome neki članci rađeni na osnovu malobrojnih i oskudnih materijala i već poznatih dostignuća nuklearnih nauka do prve polovine 1956 godine. Naprotiv, mnogobrojne

eksplozije i eksperimenti nuklearnih i termonuklearnih oružja u 1957 godini, koji su u izvjesnom smislu obogatili naša znanja o raznim vrstama atomskih oružja, potvrdili su pravilnost postavki i gledanja iznesenih u knjizi »Atomsko oružje i zaštita« a samim tim još više istakli korisnost i vrijednost ove knjige.

Do pojave domaćih iscrpnijih i sveobuhvatnijih djela o razvoju atomskih oružja i njihovom utjecaju na razvoj i izgradnju naših oružanih snaga i pripremu zemlje i naroda za odbranu, knjiga »Atomsko oružje i zaštita«, iako prva ovakve prirode, predstavlja značajan doprinos, jer će kao priručni materijal biti veoma korisna za podizanje na viši nivo znanja naših čitalaca, bilo vojnih ili civilnih, o atomskom oružju i primjeni nuklearne energije u odbranbene svrhe uopće.

Beograd, septembar 1957 god.

General-major
RADE BULAT

Dr MILOJEVIĆ ALEKSANDAR
Institut za nuklearne nauke
»Boris Kidrič« — Vinča

ISTORIJA OTKRIĆA NUKLEARNE ENERGIJE

Prošlo je nepunih 20 godina od kako je, 1939 godine, otkriveno cepanje, fisija, uranovog jezgra, a već danas se govori kako živimo u doba nuklearne ili, popularnije rečeno, atomske energije. Dok su u ranijoj istoriji čovečanstva prolazile decenije pa i stoleća od jednog naučnog otkrića do njegove korisne primene, sada je čovečanstvo ušlo u epohu u kojoj mnogi rezultati naučno-istraživačkog rada, često još nedovoljno proučeni i ispitani, pravo iz laboratorija ulaze u industriju i privredu. Tako je bilo i s nuklearnom energijom.

U periodu od svega 15 godina, manjem od polovine životne aktivnosti jednog čoveka, savladan je proces cepanja jezgra, na tom principu izgrađeni su reaktori iz kojih kontrolisano dobijamo nuklearnu energiju, napravljene su »atomske« bombe, konstruisane podmornice na nuklearni pogon, podignute prve eksperimentalne centrale za dobijanje električne energije; osvojen je i drugi važan proces oslobađanja nuklearne energije — proces fuzije, tj. spajanje jezgara lakih u jezgra težih elemenata, i on je primenjen u superbombama, poznatim pod imenom hidrogenske bombe. U bliskoj budućnosti biće završeni brodovi sa nuklearnom energijom kao pogonom, a možda i avioni (u ovom pogledu stoji savlađivanje izvesnih tehnoloških i metalurški težih problema). Izgrađeni su već čitavi sistemi i mreže centrala za korišćenje nuklearne kao po-

gonske energije, itd., itd. I to nije sve. Kao lavina, sve više i brže, otkrića i rezultati nuklearne energije prodiru u sve oblasti ljudske aktivnosti: od naučnih laboratorija — preko bolnica i klinika — do visokih peći i raznih procesa proizvodnje u industriji.

Mnogi smatraju da je čovek u svojoj istoriji napravio jedno od najrevolucionarnijih otkrića onda kada je prvi put pokorio i naučio da koristi vatru. Danas mnogima izgleda da je otkriće nuklearne energije po svojoj revolucionarnosti bar isto toliko značajno. Teško je, naravno, praviti poređenje između vremenski toliko udaljenih istorijskih epoha. Međutim, jedno je sigurno: čovek je konačno uspeo da nađe način kako da iskoristi i energiju jezgra atoma. A to je mnogo. Isto tako sa velikom sigurnošću se može pretpostaviti da će dalji razvoj nuklearne energije, jednog uopšte novog, visoko koncentrovanog tipa izvora energije, koja široko obuhvata i sjedinjuje najviša naučna dostignuća mnogih nauka sa najsavremenijim tehničkim ostvarenjima, duboko zadirati ne samo u proizvodne već direktno i u društvene odnose.

Čovečanstvo se upoznalo sa otkrićem nuklearne energije u teškim i ozbiljnim trenucima svoje istorije, pred kraj Drugog svetskog rata. Njena prva direktna primena bila je razaranja. Po završetku Drugog svetskog rata nuklearna bomba bezobzirno je korišćena u propagandi i borbi nerava u toku intenzivnog hladnog rata. Razumljivo je onda što je posle Nagasakija i Hirošime počeo da se stvara pojam o toj energiji kao o nečem tajanstvenom, nedostupnom shvatanju prosečnog čoveka. Usled svega toga prirodno je i široko interesovanje za »tajne atoma«, koje je nosilo i nosi još uvek u sebi ukus »atomske i hidrogenske bombe«. Tako se rodio pojam »atomska energija«.

Međutim, na prvu koncepciju o atomskoj strukturi materije, u osnovi čisto filozofski spekulativnu, ne nailazi se samo u sistemima grčkih filozofskih materijalističkih škola pre 2500 godina. Njenih tragova ima u daleko ranijem vremenu, kod starih induskih filozofa. Ali je tek u XIX veku, razvojem eksperimentalnih i egzaktnih nauka, atomistika postala temeljem hemije i

fizike i postigla je prve velike uspehe. Atom je realnost, najmanji mogući delić svakog elementa koji u prirodi postoji. No, docnije je utvrđeno još nešto. Atomi nisu neki krajnje elementarni delići pojedinih elemenata. Atom je komplikovan i složen sistem, sastavljen od jezgra i elektrona. Takođe su detaljno proučeni već ranije poznati hemijski procesi sagorevanja i raznih eksplozivnih mešavina.

Pokazalo se da u svim hemiskim procesima dobijanja energije glavnu ulogu igraju električne sile jezgra i elektrona. Upotrebom ulja u parnim mašinama ili elektrocenralama već se koristi atomska energija, ustvari sile koje vladaju u omotaču jezgra atoma. U tim procesima se radi o pregrupisanju atoma pojedinih elemenata u njihovim jedinjenjima, pri čemu se oslobađa energija. Otkrilo se međutim, da i jezgro atoma nije prosto, da je složeno, ali da u njemu vladaju sile druge prirode od dosada poznatih sila. Pronalaze se uslovi da se i jezgro atoma primora na predaju svoje energije. Dobija se energija jezgra koja se oslobađa pri pregrupisavanju u jezgru njegovih sastavnih čestica. Prema tome, pojam atomske energije obuhvatao bi i sve dosadašnje konvencionalne hemiske tipove izvora energije, energetske procese omotača jezgra atoma, kao i samu energiju jezgra, nukleusa atoma, nuklearnu energiju. Zbog toga je tačnije, kada je reč o energiji jezgra — govoriti o nuklearnoj, a ne atomskoj energiji.

*

Naučna osnova nuklearne energije jeste nauka o jezgru atoma, nuklearna fizika. Sam razvoj fizike jezgra bio je brz i buran, pun neočekivanih iznenađenja i imao je skoro dramatičan tok. Ustvari, to su bili potresi, udar za udarom po već ustaljenim rutinskim zakonima i shvatanjima strukture materije i mnogih osnovnih naučnih pojmova. Trebalo je srušiti bedem uskog, svakodnevnog praktičkog iskustva čoveka da bi se išlo dalje. Silom eksperimentalnih činjenica i razvojem čovečije misli to je i postignuto.

Nuklearna fizika je inače mlada nauka. Počela je da se stvara i razvija posle otkrića radioaktivnosti, pre nepunih 60 godina.

Francuski fizičar Bekerel je ispitivao krajem prošlog veka razna uranova jedinjenja sa kojima je vršio eksperimente, proučavajući pojavu fluorescencije, tj. pojavu da jedno telo emituje svetlosne zrake ako je bilo ozračeno nekom svetlošću. Bekerel je stavljao na fotografske ploče, umotane u crnu hartiju, uranovu rudu koju je prethodno bio izložio dejstvu sunčane svetlosti. Razvijajući fotografske ploče konstatovao je, što je i očekivao, da su ispod uranove rude ploče pocrnele kao da je na njih direktno delovala sunčeva svetlost. U toku eksperimenata naišlo je nekoliko vrlo oblačnih dana. Bekerel je ostavio uranovu rudu na fotografskim pločama u fijoci svog radnog stola čekajući da se vreme prolepša. Međutim, posle nekoliko dana, ne nastavljaajući eksperimente, ipak je razvio fotografske ploče misleći da će naći neko vrlo slabo zacrnjenje ili ništa. Ali — bio je iznenađen. Trag na ploči bio je daleko crniji od svih ranijih. To je značilo da uranova ruda, i kada nije izložena nekoj svetlosti, deluje na fotografske ploče. Uranova ruda je iz sebe isпустиła neke zrake koji su crnili ploču.

Bekerelovo otkriće, naizgled ne toliko bitno i važno, osnovni je eksperiment iz koga se razvila cela jedna nauka, fizika o jezgru, koja je omogućila da se jednog dana dođe do nuklearne energije. Taj eksperiment je doveo do prekretnice u koncepciji strukture atoma, jer je to bilo, ustvari, otkriće prirodne radioaktivnosti. Pokazalo se da ima elementa koji u sebi sadrže izvesne dotada nepoznate izvore energije.

Bekerelovi radovi pobudili su interesovanje Marije Sklodovske i njenog muža Pjera Kirija. Kirijeva je iz rude urana izdvojila čist uran i ponovila ogledе sa njim. Međutim, ogledi nisu uspeli. Crna fleka na pločama nije se pojavila, jedva da se nazirala. Element koji je toliko aktivno delovao na ploče nije bio sam uran. Taj element se nalazio u jedinjenju urana, i bračni par Kiri počeo je da ga traži. Malo je naučnika čiji je život i rad toliko

poznat i čuven kao bračnog para Kiri. Radili su pod vrlo skromnim uslovima. Prva laboratorija bila im je jedna vrsta hangara-šupe. Već 1898 uspeli su da izdvoje iz rude uranovog oksida, pehblende, jedan element 400 puta aktivniji od urana. Novi element dobio je ime polonijum, jer je Marija Sklodovska bila Poljkinja. Uskoro su pronašli i jedan drugi element, oko 900 puta aktivniji od urana. Taj element je nazvan radijum, a sama pojava radioaktivnost. Docnije, da bi dobili jedan deseti deo grama čistog radijuma, Kirijevi su morali da obrade jednu tonu uranove rude pehblende. U čistom uranu se nalazi jedan deo radijuma na 2,8 miliona delova urana.

Pjer Kiri je, kao što je poznato, poginuo nesrećnim slučajem 1906. Pregazila su ga špediterska kola i to baš onog dana kada je od kuće išao u Akademiju nauka i nosio izveštaj o rezultatima i naučnim otkrićima proteklih godina. Marija Sklodovska Kiri nastavila je sama sa svojim naučnim radom.

Radioaktivnost je kao potpuno nova i nepoznata pojava zainteresovala mnoge istraživače. Već 1912 godine postojalo je oko 30 pronađenih radioaktivnih elemenata.

Pored Pariza, gde Kirijevi stvaraju čitavu školu i tradiciju, u Engleskoj već od samog početka počinje da proučava radioaktivnost Raderford, koji ubrzo postaje jedan od najvećih i najpoznatijih naučnika u oblasti nuklearne fizike.

Već prvi radovi Raderforda i njegovih saradnika bili su od najvećeg značaja. Pronađeno je da je radioaktivno zračenje složeno i da u njemu ima naelektrisanih čestica, kao i čisto elektromagnetskog zračenja, koje je po svojoj prirodi slično svetlosti. Razlikuju se tri vrste zračenja koja emituju prirodno radioaktivna tela: negativne čestice, beta zraci — ustvari elektroni; pozitivne čestice, alfa zraci, teže oko 8.000 puta od elektrona — ustvari jezgra gasa helijuma; i gama zraci koji su elektromagnetske prirode.

Raderford i Sodi (Soddy) došli su 1903 do jednog od osnovnih zakona radioaktivnosti: prilikom ispitivanja radioaktivnih zrakova sama materija, element, hemiski se menjala. Od jednog elementa nastajao je drugi. Od radi-

juma, koji je čvrsto telo, postajao je jedan inertni gas, koji se zatim i sam pretvarao u druge elemente. Proces se ponavljao u čitavom jednom nizu; u prirodi se, na kraju, posle milijarde godina, dobijalo neradioaktivno, obično stabilno olovo.

Sama priroda, dakle, igrala je ulogu velikog hemičara i ukazivala na nove izvore energije. Tri kilograma radijuma zrače toliku energiju, koja se oslobađa u procesu radioaktivnosti, dovoljnu da stotinama godina neprekidno gori jedna sijalica od 100 vati.

Razumljivo je onda što se posle otkrića radioaktivnosti, već početkom ovog veka, pojavila ideja o atomu kao jednom mogućem neslučenom izvoru energije. Već 1902 Pjer i Marija Kiri su pisali: »Svaki atom jedne radioaktivne supstance se ponaša kao stalni izvor energije...«. Raderford i Sodi su 1903 otišli i dalje: »Svi atomi, a ne samo radioaktivni, poseduju ogromne količine energije. Radioaktivni elementi nemaju nikakvih specijalnih svojih hemiskih i fizičkih osobina različitih od drugih elemenata, pa prema tome nema razloga da se pretpostavi da je energija nagomilana isključivo u atomima radioaktivnih elemenata«.

Možda će izgledati da se udaljujemo nešto sa puta nuklearne fizike govoreći o Ajnštajnovom principu ekvivalentnosti mase i energije. Međutim, retko je koja teorija mogla da bude primenjena sa tolikom tačnošću na pojave mnogo docnije otkrivene, kao što je to slučaj sa Ajnštajnovim postavkama i nuklearnom energijom.

U Birou za patente u Bernu, 1905 godine, radio je 26-togodišnji fizičar Albert Ajnštajn. Razmišljajući o ogledima Majklsona i Morlija o merenju brzine svetlosti, mladi naučnik je razradio svoju specijalnu teoriju relativnosti.

U vezi sa nuklearnom energijom naročito nas interesuje jedan od Ajnštajnovih zaključaka koji kaže da svakoj količini energije odgovara jedna masa, i obrnuto, da svakoj masi odgovara određena količina energije. Da se dobije količina energije koja odgovara jednoj masi, treba tu masu pomnožiti sa kvadratom brzine svetlosti. Sama

brzina svetlosti je ogroman, veliki broj. Prema tome, ako bi to bilo tačno, u masi se nalaze neshvatljive rezerve energije.

Moderno shvatanje strukture atoma proizišlo je direktno iz istraživanja radioaktivnosti. Raderford i njegovi saradnici su na osnovu svojih radova dali 1911 godine sliku kako bi trebalo da izgleda najmanji deo jednog elementa, atom: u centru atoma, u takozvanom jezgru, nalazi se koncentrisan najveći deo mase atoma, koji je pozitivno naelektrisan a oko njega kruže daleko lakše negativne čestice, elektroni. Ukoliko je atom teži, to je veće pozitivno naelektrisanje njegovog jezgra, kao i masa, a prema tome veći i broj elektrona oko njega. U normalnom svom stanju atom je neutralan.

Ta prvobitna slika atoma, koja je umnogome potsećala na sunčani sistem, poslužila je velikom fizičaru Nilsu Boru da razvije svoj model atoma i otpočne da krči put ka savremenoj kvantnoj mehanici.

Nas dalje interesuje samo jedno, to pozitivno naelektrisano jezgro atoma. Proučavajući osobine radioaktivnog zračenja Raderford je otkrio, 1919 godine, da se ne samo u prirodi vrši spontano pretvaranje radioaktivnih elemenata jednih u druge, već i da to može da se izazove veštački, delujući radioaktivnim zracima na materiju. Taj Raderfordov ogled ubraja se među najčuvenije eksperimente fizike.

Raderford je puštao pozitivno naelektrisane alfa čestice, koje zrači jedan radioaktivni element iz porodice radijuma, i ispitivao do kakvih se procesa dolazi prilikom njihovog prolaska kroz vazduh.

Šta je otkrio? Utvrdio je da pozitivne čestice poneki put pogode atom azota tj. njegovo jezgro, i nešto promene u njemu, tako da se on pretvara u atom kiseonika. To je bilo veliko otkriće. Značilo je da je pronađen put da se prodre u samo jezgro atoma i da počnu da se ispituju zakoni koji vladaju u njemu. Bleket je docnije uspeo da metodom Vilsonove komore snimi Raderfordov proces pretvaranja azota u kiseonik.

Drugo veliko otkriće u veštačkom pretvaranju jednog elementa u drugi učinili su procesom bombardovanja Kokroft i Uolton 1932 godine. Oni su, naime, uspeli da naprave generator visokog napona od oko 700 hiljada volti. U njemu su ubrzavali pozitivna jezgra vodonika, protone, koji su oko četiri puta lakši od alfa čestica. Kao metu bombardovanja uzeli su jedan od lakih elemenata, litijum. Od jezgra atoma litijuma dobili su dva jezgra atoma inertnog gasa helijuma.

Dok je Raderford koristio kao projekte zračenje prirodno radioaktivnog elementa, Kokroft i Uolton su svoje projekte veštački dobili. O jezgru atoma se još uvek malo znalo. U svim fizičkim laboratorijama sveta počele su da se grade i pronalaze mašine za dobijanje projektila za bombardovanje što većih brzina. Prvi uređaji, akceleratori, davali su električna polja od milion volti, pa i više, u kojima su direktno ubrzavane naelektrisane čestice. Uskoro su počele da se primenjuju mašine konstruisane na principu koji je još 1928 otkrio Amerikanac Lorens (Lawrence). U tim mašinama, nazvanim ciklotronima, naelektrisane čestice bile su naterane magnetnim poljem da se kreću po kružnim zatvorenim putanjama, a povremeno i periodično su dobijale ubrzanje, od jednog promenljivog električnog polja. U ciklotronima su čestice dostizale brzine kao kada bi bile ubrzane u električnim poljima od desetine miliona volti. Veliki napredak na polju akceleratora učinjen je 1944 kada je u SSSR Veksler razvio princip savršenije mašine od ciklotrona, sinhrotron, u kome je uspelo ubrzavanje čestica do odgovarajućih napona od nekoliko stotina miliona volti. Na otkriću Vekslera zasnivaju se, uglavnom, i današnji najmoderniji akceleratori-giganti, betatroni, iz kojih izlaze čestice koje odgovaraju razlikama napona od nekoliko milijardi volti. Sadašnji akceleratori su moćno i važno istraživačko sredstvo, kako na polju nuklearne fizike tako uopšte na polju strukture materije.

Proučavanje pretvaranja jednog elementa u drugi, transmutacije elemenata, dovelo je do još jednog značajnog otkrića. Kći Marije Kiri, Irena Kiri i njen muž Žolio,

1934 godine u Parizu, bombardovali su, kao i Raderford, aluminijum radioaktivnim zracima, ispitujući pojave transmutacije. Međutim, jednog dana Žolio je uklonio radioaktivni izvor i uzeo tanku aluminijumsku pločicu da proverí da je nije slučajno uprljao radioaktivnim materijalom. Rezultat je bio potpuno neočekivan. Konstatovao je da aluminijumska pločica nije bila uprljana radioaktivnim materijalom, ali je aluminijum pokazivao jedno drugo zračenje, različno od zračenja kojim je bombardovan. Sam aluminijum ponašao se kao radioaktivno telo.

Pored transmutacija, koje se odigravaju trenutno, uspelo se veštački postići da i aluminijum, srebro i bakar, itd. postanu radioaktivni i u dužim ili kraćim periodima zrače kao i radijum. Fizici je uspelo da, pored prirodnih radioaktivnih elemenata, veštački izazove radioaktivnost i svih ostalih postojećih elemenata. Dok je nekada postojalo svega nekoliko stotina grama radijuma koji je korišćen u bolnicama za lečenje raka, danas se raspolaže veštačkim radioaktivnim telima koja imaju dejstvo desetine kilograma radijuma. Za industrijske potrebe priprema se proizvodnja veštačkih radioaktivnih izvora koji će moći da zamene stotine, pa i hiljade kilograma radijuma.

Posle svog čuvenog eksperimenta transmutacije elementa, Raderford je u Rojal Soaeti u Londonu 1920 godine održao jedno predavanje. U svom izlaganju on je rekao kako bi bilo idealno kada bi se za bombardovanje jezgra mogla pronaći jedna električno neutralna čestica, koju pozitivno jezgro ne bi odbijalo. Opisao je osobine koje bi ta čestica trebalo da ima, izneo izvesne argumente za njeno stvarno postojanje, čak joj je dao i ime — »neutron«.

Raderfordova ideja i argumenti o postojanju neutrona naročito su zagrejali jednog od njegovih saradnika, Čedvika (Chadwick). Čedvik je 1924 godine pisao Raderfordu: »Mislím da treba organizovati sistematsko traženje neutrona. Napravio sam jedan plan po kome ću, ako budem tačno radio, morati da imam uspeha.« Čedvik je izvršio niz eksperimenata i uspeo da otkrije i utvrdi posto-

janje neutrona tek 1932 godine. Međutim, neutron je već ranije bio pronađen, samo se nije znalo da je to što je bilo pronađeno stvarno neutron.

U Nemačkoj su Bote (Bothe) i Beker (Becker) još 1929 godine otkrili jedno novo zračenje koje su nazvali ultra gama zračenje. Mislili su da je ono elektromagnetske prirode, kao svetlost, jer nije pokazivalo osobine naelektrisanih čestica.

Na ultra gama zračenju radilo se dosta. Eksperimente Botea i Bekera ponovili su Irena Kiri i Zolio u Parizu i napravili snimke dejstva tog zračenja prilikom prolaska kroz materiju. Kada su 1932 godine, na jednom kongresu u Engleskoj, izneti poslednji rezultati istraživanja na ultra gama zračenju, Čedvik je dokazao da se tu radi ustvari o neutronima.

Nastao je vrlo plodan period rada za fizičare. Neutron je bio stvarno pogodna čestica za ispitivanje jezgra atoma i prodiranje u njega. Eksperimentalni materijal počeo je da se gomila. Izvesna slika o jezgru počela je da se ocrtava. Prema jednoj ideji koju su istovremeno i nezavisno jedan od drugog postavili sovjetski i nemački naučnici D. Ivanenka i V. Hajzenberg (Heisenberg) 1932 g., jezgra svih elemenata sastavljena su iz dve osnovne čestice: protona, pozitivno naelektrisanog, koji u prirodi postoji i jeste jezgro najlakšeg elementa — vodonika, i neutrona, neutralne čestice iste mase kao i proton. Nauka se vratila na hipotezu engleskog naučnika Prauta (Prout) iz 1816 godine, da su svi elementi izgrađeni iz vodonikovog atoma. Ideja je u izvesnoj meri tačna, jer neutron i proton pokazuju mnoge zajedničke osobine. Tako, neutron može da izbací iz sebe jedan elektron i da se pretvori u proton, ali sa druge strane i proton, kad je u jezgru, može da izbací iz sebe jedan pozitivan elektron, pozitron, i da se pretvori u neutron.

U samom jezgru vladaju sile koje zajedno vezuju protone i neutrone. Te sile su toliko snažne da se prilikom izgradnje jezgra protoni i neutroni »sabiju« do te mere da jedan deo njihove mase »ispari« i, po Ajnštajnovoj re-

laciji, pojavi se kao oslobođena energija. Otud je jezgro po masi lakše od svojih sastavnih delova.

Pored toga, pokazalo se još nešto. U prirodi mogu da postoje više različitih jezgara atoma jednog elementa. Naime, hemiske osobine elemenata određene su brojem protona u njegovom jezgru. Svaki atom sa istim brojem protona u jezgru, a sa različnim brojem neutrona, pripada uvek jednom elementu. Po težini jezgra različni atomi, a isti po broju protona, nazivaju se izotopi. U prirodi je jedan element obično mešavina više izotopa.

Primer je i najlakši gas vodonik, koji je mešavina uglavnom dva svoja izotopa, običnog vodonika sa jednim protonom u jezgru, i, daleko ređe, t.zv. teškog vodonika ili deuterijuma, koji u jezgru ima pored jednog protona jedan neutron. Teški vodonik je otkrio Jurej (Urey) u Americi 1931 godine.

Eksperimentalno je konstatovano isto tako da sile koje vladaju u jezgru vezuju najjače pojedine čestice u jezgrima elemenata srednje težine kao što su gvožđe, nikal ili cink. Najveće isparenje mase, ili najveće smanjenje mase, ili, stručno, maseni defekt po jednoj čestici, protona ili neutrona, izmereno je za jezgra tih elemenata. Drugim rečima, kako se razlika u masi javlja kao oslobođena energija, vezivanjem nuklearnim silama jedne čestice u jezgrima elemenata srednje težine dobija se najviše energije. Međutim, to znači da će se javljati oslobađanje energije jezgra ne samo kada se bude vršila izgradnja jezgra, polazeći od lakih ka srednjim elementima, već i kad se bude išlo ka srednjim elementima razbijanjem, cepanjem jezgra teških elemenata.

Poznati naučnik Aston dao je 1927 godine eksperimentalni dijagram, krivu relativnog »isparenja« mase ili masenog defekta za jezgra elemenata periodičnog sistema. Astonov dijagram je ukazivao bar teoriski, još 1927 godine, na dva moguća procesa oslobađenja nuklearne energije: prvi proces izgradnje, spajanja jezgara, i drugi proces cepanja ili fisije jezgara.

Da je neko pre 1939 godine postavio fizičarima pitanje postoji li neki put i način da se dođe do energije jezgra,

odgovor bi bio: »Postoji, izgradnja jezgra od njegovih sastavnih čestica, proces kakav se odigrava u unutrašnjosti zvezda.« Drugi put, cepanje jezgra teških elemenata niko nije smatrao toliko realnim niti ga je ko očekivao.

Otkriće fisije jezgra bilo je za sve veliko iznenađenje. Tu i jeste veličina toga otkrića.

Neposredno posle pronalaska neutrona, italijanski fizičar Fermi, sa svojim saradnicima u Bolonji, 1934 godine, bombardovao je neutronima poslednji poznati element periodičnog sistema, uran. Njegova je ideja bila da u jezgro urana ubaci neutron: jezgro postaje teže, suvišni neutron se pretvara u proton i veštački se dobija novi, na zemlji nepoznat element, teži od urana. Fermi je dobio stvarno niz nekih radioaktivnih tela koja je sve svrstao u takozvane transuranske elemente — »s one strane urana«. Fermijeve radove je te godine kritikovala hemičarka Ida Nodak (Noddack), smatrajući da procesi između jezgra i neutrona nisu dovoljno proučeni, da ne mogu da budu tipa drugih poznatih procesa, i da je čak moguće da se jedno teško jezgro, pod dejstvom neutrona raspadne na više fragmenata. I stvarno, Fermijevi zaključci bili su samo delom tačni. Ali, to je otkriveno tek docije.

Počelo je sličnim radovima u Institutu Kiri u Parizu 1937 godine gde su u eksperimentima Irena Kiri i naš naučnik Pavle Savić dobili čudne rezultate. I oni su neutronima bombardovali uran. Međutim, njihovo otkriće jednog radioaktivnog elementa, koji se je stvarao u tom procesu, potpuno je uzdrimalo tadašnju šemu transurana, razvijenu od dva nemačka naučnika, Han (Hahn) i Strasmana (Strassmann), koji su u to vreme uveliko radili na istim problemima u Berlinu.

Jedan očevidac, kanadski hemičar (Kuk (Cook), koji se septembra 1938 godine nalazio na radu kod Hana, kaže: »Teško se može zamisliti Hanovo iznenađenje kad je pročitao rad Kirijeve i Savića. Sećam se dobro dana kada je stigao časopis u kome je beleška štampana. Prva Hanova reakcija bila je da to ne može da bude tačno i da su se Kirijeva i Savić strašno prevarili.«

Međutim, svega nekoliko nedelja docnije pošto je ponovio eksperimente Kirijeve i Savića, Han je objavio svoj zaključak: »Kao hemičar moram da kažem da se tu radi o lantanu i barijumu (elementi dva puta lakši od urana). Kao fizičar — da je to jedino moguće ako se uranovo jezgro cepa na skoro dva jednaka dela«.

Han i Štrasman, koji je radio s njim, dobili su za to svoje otkriće 1944 godine Nobelovu nagradu. U jednom svom članku o otkriću fisije, sam Han piše u časopisu *Experimentia*, 1948 godine: »Nezavisno od radova na transuranima Hana, Majsnera i Štrasmana, Kirijeva i Savić (1937—1938) opisali su telo aktivnosti 3,5 sati dobijeno bombardovanjem urana neutrona, čije hemiske osobine nije bilo lako utvrditi. Po Kirijevoj i Saviću, element je bio sličan retkim zemljama, ali nije bio aktinijum već pre lantan«. Dalje u članku navodi da je zbog toga i ponovio eksperimente Kirijeve i Savića.

Danas možemo da kažemo da je otkrićem fisije bio rešen jedan od osnovnih problema dobijanja nuklearne energije. Naučnici u svim zemljama bacili su se na proučavanje cepanja uranovog jezgra. Prema eksperimentalnim podacima postoji oko 30—40 načina da se uranovo jezgro rascepi i svakog puta dobiju dva druga elementa.

Da bi se što bolje proučio mehanizam fisije na identifikaciji fisionih produkata radilo se mnogo: I. Kiri i P. Savić u Francuskoj, Feder (Feather) i Brečer (Bretscher) u Engleskoj, Abelson u Americi, Han u Nemačkoj, itd.

Ispitivana je takode i mogućnost fisije drugih elemenata. Tako je fisija torijuma otkrivena od strane Irene Kiri i Pavla Savića, zatim je do 1947 godine pronađen čitav niz teških elemenata koji su bili podložni fisiji, bilo neutronima, ili drugim česticama, pa i elektromagnetskim gama zracima. Posle 1947 godine uspelo je da se izazove i fisija nešto lakših elemenata kao bizmuta, olova, žive, zlata, platine i tantala.

Otkrićem fisije jednog uranovog izotopa 235 nije pronađen neki univerzalni, standardni tip cepanja jezgra. Iako je strukturna šema jezgra u osnovi prosta, jezgra se razlikuju između sebe jedino po većem broju protona

ili neutrona koji su u njima; jezgro je jedan od najsloženijih i najkomplikovanijih sistema sa kojima smo se dosada u prirodi sreli. Tako, samo jedan proton više u jezgri potpuno menja hemiske osobine elementa. Od gasa pri istim uslovima postaje čvrsto telo, tačke ključanja i mržnjenja se razlikuju itd. Isto tako postoje individualne i velike razlike u osobinama jezgra koja imaju isti broj protona, a samo jedan ili koji neutron više ili manje. Istina, kod izotopa su hemiske osobine skoro identične. Ali se zato bitno razlikuju u procesima transmutacije, veštačke radioaktivnosti, kao i po tipu fisije. Jedan neutron više ili manje često menja karakter zračenja, tj. određuje da li će to biti beta, alfa ili neki drugi zraci, trajanje radioaktivnog raspada, energiju zračenja itd., itd.

Do pre nepune dve godine, kada se pisalo o nuklearnoj energiji, težište je uglavnom bilo na fisiji jezgra. U međuvremenu ostvarene su bombe na principu stapanja, fuzije, lakih elemenata i problem takozvanih termonuklearnih procesa ne može se više mimoći.

Mogućnost dobijanja nuklearne energije u procesu fuzije elementa bila je razrađena daleko pre procesa fisije u vezi sa izvorima energije zvezda. Već početkom ovoga veka odbačena je stara hipoteza Helmholtza (Helmholtz) u 1853 da su izvor sunčeve energije gravitacione sile. Tako je engleski astronom Džins (Jeans) još 1904 godine postavio da bi ta energija mogla da bude energija radioaktivnih procesa ali njegova hipoteza nije bila ni dovoljno jasno izražena niti dovoljno argumentovana. Tek je 1920 godine Edington pomislio na mogućnost da se energija zvezda oslobađa u procesu izgradnje helijuma od jezgra vodonika, dok je F. Peron (F. Perrin) pretpostavljao da je za to odgovoran proces stvaranja težih atoma od protona i elektrona.

Međutim, postalo je očigledno, po poznatoj Astonovoj krivoj energiji veza čestica, da u procesu fuzije lakih elemenata dolazi do pojave isparavanja mase i oslobodenja energije. Verovatnoće takvih procesa stvarno su male usled odbojnih sila među pozitivno naelektrisanim jezgrima lakih elemenata. Samo u tim procesima se oslo-

bađa veća energija po čestici u jezgru, ili nukleonu, zajedničkom imenu za protone, nego u procesu fisije. Kako, pak, u zvezdama vladaju visoke temperature od desetina miliona stepeni, to su brzine kretanja čestica veoma velike, i stvaraju se uslovi i povećava verovatnoća da se prilikom sudara čestica savladaju odbojne električne sile i dođe do fuzije jezgra. Condon, Gurmey i Camow, koristeći kvalitetnu mehaniku, teoriski su obradili verovatnoću procesa a Atkinson i Hautermans, 1929 godine, izračunali su količine energije koje bi mogle u uslovima unutrašnjosti zvezda da se oslobađaju u nuklearnim transformacijama. Takvi procesi su nazvani termonuklearnim, jer se praktično odigravaju pri vrlo visokim temperaturama.

Kao i u slučaju fisije, svaki proces fuzije pojedinih vrsta jezgara je vrlo individualan, ne samo u pogledu energije koja se oslobađa, uslova da do procesa dođe, već i po mnogim drugim bitnim karakteristikama. Naučnici su, međutim, uspeli da izmere površinske temperature zvezda, da proračunaju temperature unutrašnjosti, i na osnovu toga i drugih podataka tražili su procese fuzije koji bi odgovarali merenim veličinama. Tako je 1939 godine, Bete (Bethe) predložio svoj poznati proces ugljenika, gde se, ustvari, preko jezgra ugljenika protoni spajaju u jezgra helijuma.

Mada postoje i mnogi drugi procesi koji dolaze u obzir, Beteov ciklus ugljenika je prihvaćen kao jedina nuklearna reakcija koja daje najpribližniju vrednost veličine energije zvezda. Naše Sunce zrači toliku energiju u sve strane u vasionu da svake sekunde gubi 4,4 miliona tona svoje mase. Međutim, taj gubitak mase je toliko mali u odnosu na njegovu ukupnu masu, da se praktično ne primećuje u toku miliona i milijardi godina.

Posle iznenadnog otkrića fisije, pred naučnike se postavilo pitanje kako se taj proces može iskoristiti za dobijanje nuklearne energije.

Tačno je da se u fisiji jezgra oslobađa relativno velika količina energije u odnosu na hemisku energiju, naprimer sagorevanja uglja. Međutim, sa energijom iz cepanja jed-

nog jezgra ne može se uraditi ništa. Praktično je zanemarljivo mala. Trebalo je zbog toga, da bi se dobila upotrebljiva količina energije, naći i ostvariti uslove da proces fisije obuhvati i da se prenese na vrlo veliki broj jezgara, na merljivu količinu urana. A za to, na prvom mestu, treba raspolagati jakim izvorima neutrona kojima bi se jezgra urana bombardovala.

Dalja istraživanja otkrila su put kojim treba ići. Žolio, Halban i Kovarski u Francuskoj (kao i Fermi* u SĀD već početkom 1939 godine) pretpostavljali su što je i eksperimentalno potvrđeno, da se prilikom cepanja jezgra urana, pored dva jezgra lakših elemenata, javlja i nekoliko neutrona. Potreban izvor neutrona nalazio se u samom procesu fisije.

Ostao je još jedan korak: proveriti da li je moguće izazvati i održati jednu lančanu reakciju procesa fisije, u kojoj bi bar jedan od oslobođenih neutrona iz rascepa jednog jezgra pogodio i ponovo izazvao cepanje jednog drugog jezgra urana — i tako kao epidemiju prenosio fisiju na okolna jezgra.

Međutim, jedan neutron na svome putu može da preživi više događaja: da dovede do izmene, transmutacije jezgra, da izvrši fisiju ili čak da prosto, ukoliko nema dovoljno jezgara u njegovoj okolini, izleti napolje iz materijala u okolni prostor. Mogućnost svih tih procesa trebalo je detaljno proveriti i na tome je naročito rađeno u Parizu.

Prve eksperimentalne pokušaje izvršili su Halban i njegovi saradnici. Naime, po teoriji cepanja jezgra koju su razvili naučnici Bor (Bohr) i Viler (Wheeler), od dve vrste jezgra urana, izotopa, urana 235 (broj 235 označava

*) Italijanski fizičar, jedan od retko smelih i originalnih, a po rezultatima vrlo istaknuti naučnik u oblasti nuklearne energije, preminuo je u Americi 1954. Amerikanci su objavili da je umro od teškog raka, u 54 godini života, radeći upravo na eksperimentima preko kojih se misli da će se za koju godinu otkriti i pronaći siguran lek protiv te, još uvek skoro neizlečive bolesti. Fermi je pionir nuklearne energije, i po prvi put u istoriji čovečanstva, Fermi je bio taj koji je ostvario kontrolisano oslobođenje energije jezgra.

koliko ukupno ima čestica, protona i neutrona u jezgri) koji je inače dosta redak u prirodi, cepa se naročito lako pod dejstvom sporih neutrona, što nije slučaj sa uranom 238 (jezgro urana koje ima tri neutrona više), koji uopšte pokazuje mnoge druge osobine. Kako su, pak, neutroni oslobođeni u procesu fisije brzi neutroni, Halban i saradnici su pokušali da ih uspore puštajući ih da prolaze kroz običnu vodu. Izvršeni eksperimenti, mada ne sasvim pozitivni, dali su naslutiti da će veštačkim usporavanjem neutrona moći da se ostvare uslovi za lančanu reakciju u prirodnom uranu. Materijali koji se koriste za usporavanje neutrona zovu se moderatori. Uopšte, docnije se pokazalo da eksperimenti Halbana i saradnika nisu mogli potpuno uspeti, jer je obična voda kvarila i ometala održavanje procesa lančane reakcije. Danas se kao dobri moderatori upotrebljavaju teška voda, grafit ili berilijum. Dalji neophodni istraživački radovi o raznim procesima koji se odigravaju između jezgara urana vršeni su kako u Parizu od strane Halbana, Žoliosa, Kovarskog i P. Savića, tako i u Americi od strane Andersena, Fermija i drugih. Dobijene rezultate i podatke koristio je Fermi kada je gradio svoj prvi reaktor, uransku peć za dobijanje nuklearne energije, 1942 godine.

U stvari, tim poslednjim nizom otkrića i radova rešeni su bili svi osnovni glavni problemi da fisija urana 235 počne da se koristi za dobijanje nuklearne energije. Docnije je utvrđeno da još neki elementi mogu da se cepaju u sličnim procesima i zamenjuju uran 235. Najvažniji je plutonijum, element koga inače nema u prirodi i koji se veštački proizvodi.

*

Istorijat otkrića nuklearne energije ne bi bio potpun ukoliko se, u najkraćim crtama, ne bismo osvrnuli na razvoj ideje i proizvodnju nuklearnih bombi, prve primene nuklearne energije.

U punom toku istraživanja fisije jezgra, septembra 1939, počeo je Drugi svetski rat. Poslednja otkrića nukle-

arne fizike ukazivala su na to da mogu da se dobiju neslućene količine energije, i da bi ratna nuklearna oružja imala strahovito dejstvo. Amerikanci su zbog toga poslali fizičarima u Pariz telegram potpisan od strane mnogih naučnika i drugih poznatih ličnosti. U telegramu se tražilo da se prestane sa objavljivanjem postignutih rezultata koje bi neprijatelj mogao da koristi.

I tačno. Pariz je uglavnom dao sve. Čak su u njemu počeli da se razrađuju i planovi uranskog reaktora za dobijanje nuklearne energije. Žolio je preko Halbana i Kovarskog nabavio i poslednju postojeću zalihu teške vode iz Norveške, za proučavanje lančane reakcije.

Dok je do Drugog svetskog rata centar naučnog rada u toj oblasti bila Evropa, sada se on premešta u Ameriku. Tamo se nalazi veliki broj poznatih evropskih fizičara, kao Ajnštajn, Fermi, Silar (Szilard) i mnogi drugi koji su emigrirali pred fašizmom.

Američki fizičari, kako sami Amerikanci kažu, nisu se bili srodili sa idejom da se nuklearna energija upotrebi u ratne svrhe. Uglavnom evropski fizičari, u saradnji sa engleskim, razrađuju nacрте i planove nuklearne energije. Sa svojim predlozima o korišćenju nuklearne energije u ratne svrhe obratili su se i Ministarstvu rata i Ministarstvu mornarice SAD, ali su bili odbijeni. Najzad, Ajnštajn i Fermi traže lični sastanak sa Ruzveltom. Ruzvelt je shvatio ogroman značaj nuklearne energije. Odluka je pala.

Amerika tom problemu pristupa frontalno. Angažovani su svi čuveni naučnici za izgradnju A1 bombe, kako su je Amerikanci nazvali, sa Openhajmerom na čelu, koga je nedavno progonio Makartijev komitet. Stavljena je u pokret ogromna američka industrija. Rezultati su poznati.

Naučnici su toliko bili sigurni u sebe, da su dizane čitave nove industrije i fabrike, još pre nego što su u laboratorijama izvedena i završena sva potrebna istraživanja i eksperimenti. Siborg je proučio hemiju plutonijuma na količini od svega pola miligrama, i na osnovi

njegovih rezultata podignuta je čitava varoš Nahford za industrijsku proizvodnju tog novog, veštački stvorenog elementa.

Najzad je 1942. Kondon telefonom javio Vašingtonu: »Italijanski moreplovac otkrio je traženu zemlju. Stigao je ranije nego što se nadao. Domoroci su ga dočekali ljubazno i prijateljski«. Razgovor je bio šifra. Značilo je da je uranski reaktor koji je gradio Fermi ispod fudbalskog igrališta Čikaškog univerziteta, počeo da radi.

Prva fisiona nuklearna bomba isprobana je u Novom Meksiku, početkom 1945. godine. Kao nuklearni eksploziv upotrebljen je uran 235, koji je dugim i komplikovanim procesima izvađen u čistom stanju iz prirodne mešavine urana. Tip Fermijevog uranskog reaktora je usavršen i docnije korišćen za proizvodnju plutonijuma, tako da se pored urana 235 ubrzo počeo da koristi i plutonijum kao eksploziv fisionih bombi.

Od urana su napravljene bombe, kao i uređaji, reaktori za kontrolisano dobijanje nuklearne energije.

Najzad, poslednje godine postiglo se što je nekada i najsmelijim naučnicima ličilo na nedostižno maštanje. Preko nuklearnih bombi ostvareni su uslovi koji vladaju u unutrašnjosti našeg Sunca ili zvezda, upaljene su prve termonuklearne reakcije, realizovan je i drugi proces dobijanja nuklearne energije preko spajanja jezgra. Nuklearna fisiona bomba upotrebljena je kao detonator za stvaranje uslova fuzije. To je i urađeno eksperimentima u SSSR, SAD i u Engleskoj sa superbombama: u sredini u kojoj trenutno vladaju milioni stepeni temperature i vrlo veliki pritisci, započinjala je izgradnja jezgara uz još veće oslobađanje nuklearne energije.

Ipak, i tu se nije stalo. U oblasti termonuklearnih reakcija razvija se živa istraživačka delatnost. Traže se novi putevi i rešenja usmerena da se pronađe drugi tip »upaljača« termonuklearnih procesa, umesto fisionih atomskih bombi, koji bi omogućio i izgradnju uređaja za kontrolisano oslobađanje nuklearne energije u procesima fuzije. Traže se načini da se pale »mala sunca« kojima bi

komandovali ljudi, da se izgrade termonuklearni reaktori za praktičnu primenu. Verovatno da je u tome pravcu do danas dosta urađeno. Međutim, rezultati se još uvek čuvaju kao velike tajne, jer je to pitanje usko povezano sa mogućnošću izrade i proizvodnje novih tipova termonuklearnih bombi. Korak koji je preostao, a koji se kao moguć očekuje, doprineće još više da nuklearna energija zauzme svoje pravo mesto, kao jedna od najvećih dodatnijih naučnih i tehničkih tekovina, na kojoj će počivati i razvijati se budućnost čovečanstva.

* * *



Dr LEONTIĆ BORAN
profesor univerziteta
Zagreb

ATOMSKA JEZGRA KAO IZVOR ENERGIJE

Energija je jedan od osnovnih faktora u prirodnim zbivanjima i kretanju uopšte, pa je i za čoveka njena uloga presudna. Dobijanje novih i sve većih količina energije postaje zato sve važniji problem u civilizovanom društvu. Izvesna količina dobija se iskorišćavanjem vodenih snaga, a u vrlo maloj meri korišćenjem sunčanih zrakova ili vetra. U tu svrhu se najviše koriste goriva svih vrsta, a pretežno fosilna goriva. Iako je dobijanje raznih oblika energije na ovaj način neekonomično, ipak je ono najzgodnije, bar u ovom periodu razvitka tehnike.

Nećemo se upuštati u proučavanje pojedinih goriva ali treba ipak naglasiti dve glavne činjenice: prvo, današnje društvo crpe pogonsku energiju uglavnom iz fosilnih goriva i, drugo, energija koja nastaje sagorevanjem goriva je hemiska — ona se, naime, oslobađa prilikom oksidacije goriva, tj. hemiskim spajanjem goriva sa kiseonikom.

I eksplozivi su goriva. Međutim, oni se razlikuju od običnih goriva po tome što sve hemiske promene, popraćene eksplozijom, nastaju u samom eksplozivu — bez pomoći kiseonika iz atmosfere. Ali oni ne sadrže znatno više hemiske energije nego obično gorivo. Njihovo dejstvo se zasniva na vrlo naglom oslobađanju te energije. Maksimalna količina energije, koja se može dobiti hemiskim procesima, uslovljena je energijom vezivanja atoma u molekulama produkata hemiske reakcije.

Stoga nema nade da bi se snaga konvencionalnih hemiskih goriva mogla znatno povećati.

Sve bržim trošenjem takvih goriva, a u nestašici drugih izvora energije, perspektive naše civilizacije ne bi bile naročito povoljne. Sunce je, doduše, veliki izvor energije (svaki kvadratni metar Zemljine površine dobija od Sunca snagu od oko 1 kilovata u obliku zračenja), pa bi se i ta energija donekle dala iskoristiti. Na tome se već dosta i radi. Većina vodenih snaga je neiskorišćena, pa se i tu može mnogo postići. Međutim, svi ovi izvori energije imaju svojih ozbiljnih nedostataka, pogotovu što su vezani za izvesna područja, koja nisu uvek lako pristupačna.

Fizičari su, međutim, otkrili jedan novi izvor energije, koji po svojoj specifičnoj snazi i veličini daleko prevazilazi sve dosadašnje. To su atomska jezgra.

Atomska jezgra se sastoje od čestica, protona i neutrona, koji su međusobno vezani mnogo jačim silama od hemiskih. Stoga je i energija, koja nastaje dejstvom nuklearnih sila, daleko veća od hemiske. Dok hemiske energije vezivanja merimo u elektronvoltima (eV^1), nuklearne energije vezivanja merimo milionima elektronvolti (MeV).

Sada ćemo se malo detaljnije upoznati sa prirodom nuklearne energije i načinom kako se ona dobija.

Potrebno je da vidimo kakva je struktura atoma i njegovog jezgra.

Naglašavamo da je opis atoma dosta površan. Radi jasnoće primorani smo da pravimo upoređenja sa predmetima iz mikroskopskog vidokruga, iako nema mnogo sličnosti između mikroskopskog i submikroskopskog sveta. Ta upoređenja su svakako korisna pa, prema tome, i naučno opravdana.

Atomi svih elemenata su slično građeni i po svojoj strukturi potsećaju na planetarni sistem. U sredini njihove strukture nalaze se mala ali masivna jezgra oko kojih kruže elektroni. Električne sile između električno

¹⁾ 1 eV (elektronvolt) je energija koju dobije čestica jediničnog elektronskog naboja prelazeći potencijalnu razliku od 1 volta.

negativno nabijenih elektrona i električno pozitivnih jezgara izazivaju gibanje (kretanje) elektrona oko jezgra.

Elektron je fundamentalna čestica. On pretstavlja najmanji delić elektriciteta uopšte. Njegov naboj iznosi $4,8 \times 10^{-10}$ e.s.j.²⁾, njegova masa $9,1 \times 10^{-28}$ gr.

Jezgra atoma sastavljena su od protona i neutrona. Protoni su fundamentalne čestice, čija je masa 1836 puta veća od mase elektrona. Oni nose pozitivni električni naboj, koji je po iznosu jednak negativnom naboju elektrona. Neutroni imaju, praktično uzev, istu masu kao i protoni (ustvari im je masa 1839 puta veća od mase elektrona) ali su električki neutralni. Iz ovoga se vidi da je gotovo čitava masa atoma sadržana u njegovom jezgru. Broj elektrona, koji kruže oko jezgra, jednak je broju protona u jezgru, tako da je atom kao celina neutralan. Broj neutrona u jezgrima lakših atoma približno je jednak broju protona. Ali, što idemo dalje prema težim elementima, broj neutrona prelazi sve više broj protona. Atomi svih hemiskih elemenata su, dakle, sastavljeni od istih elementarnih čestica, a jedino se razlikuju po broju tih čestica. Najjednostavniji je atom vodonika. Sastoji se od jednog protona oko koga kruži jedan elektron. Budući da se hemiske osobine elemenata zasnivaju na elektronskoj konfiguraciji atoma, koja opet zavisi od broja protona u jezgru, to je mesto jednog elementa u periodičnom sistemu elemenata određeno brojem protona u jezgrima njegovih atoma. Često atomi sa istim brojem protona, dakle atomi istog elementa, imaju različiti broj neutrona. To su *izotopi*. Izotopi jednog elementa imaju ista hemiska svojstva.

Jezgro atoma se sastoji od čestica istog naboja (protona) i neutralnih čestica (neutrona). Odbojna električna sila između protona nastoji da raznese jezgro. Pa ipak se to ne dogodi. Naprotiv, jezgra atoma su vrlo čvrsto građena. Njihove sastavne delove drže na okupu jake nuklearne sile malog dometa. Energija vezivanja pojedinog nukleona³⁾ u prosečnom jezgru iznosi oko 8 MeV. To je

²⁾ e.s.j. = elektrostatička jedinica.

³⁾ Izraz nukleon se upotrebljava bilo za proton ili neutron.

prosečna energija koja bi se morala utrošiti da se jedan proton ili neutron otkine od nekog srednje velikog jezgra. Ova energija vezivanja nije jednaka za sva jezgra. Sva jezgra nisu jednako stabilno građena. Najstabilnija su ona koja se nalaze u sredini periodičnog sistema elemenata. Kada bismo grafički prikazali odnos između atomske mase pojedinih jezgara i njihove energije vezivanja, dobili bismo sedlastu krivulju, koja bi se od vodonika naglo spuštala prema elementima skupine železa, a zatim bi se polagano dizala prema transuranskim elementima. Baš u ovoj razlici i energiji vezivanja pojedinih atomskih jezgara leži ključ problema dobijanja atomske energije. Ako bi se postiglo da pojedine manje stabilne nuklearne strukture pređu u stabilnije, onda bi se mogla iskoristiti razlika između energije vezivanja tih struktura. To možemo gledati i ovako: nestabilnija struktura ima višu potencijalnu energiju od stabilnije. Ovo vredi svuda u prirodi, pa i u svetu atoma. Prilikom prelaska nestabilnije strukture u stabilniju, oslobađa se višak potencijalne energije. Postoje dva moguća načina za oslobađanje energije koja vezuje čestice u atomskom jezgru. Ili se lakša jezgra međusobno spajaju u teža i stabilnija, ili se teška jezgra cepaju u lakša i stabilnija. Dosad je uspelo da se ostvari i jedna i druga vrsta reakcije. Prva je t. zv. termonuklearna, a druga fisiona reakcija. Razmotrimo kako u praksi nastaje ova druga i to u tipičnom primeru cepanja uranijuma, odnosno njegovog izotopa $U\ 235^4$). $U\ 235$ je nestabilan izotop sa neparnim brojem neutrona (što nije slučajno) i sklon je cepanju pod izvesnim okolnostima.

Da bi se rascepalo jedno jezgro $U\ 235$ (ili ma koje nestabilno jezgro), treba mu dati neku energiju koja će ga dovesti u pobuđeno stanje. U slučaju $U\ 235$, ovo se pobuđeno stanje jezgra završava njegovim cepanjem na dva nejednaka jezgra. Ovu pojavu možemo zgodno prikazati na modelu kapljice. Jezgro, naime, zamišljamo kao ka-

⁴) U nuklearnoj fizici upotrebljavaju se simboli koji tačno označuju jezgro o kome se govori. Veliko slovo označava element, a broj označava broj nukleona u tom jezgru. Time je ujedno određen i izotop.

pljicu tekućine. Dovedena energija izaziva oscilacije kapljice. One postaju tako jake, da se kapljica rascepi zbog električnih sila, koje pomažu pri tome cepanju. Najprikladniji način oslobađanja malih količina energija iz jezgra U 235 je bombardovanje neutronima. Pri takvom raspadanju jezgra U 235 nastaje, pored dva nova lakša jezgra, i nekoliko slobodnih neutrona. Ako bi se mogli sakupiti svi produkti raspadanja jednog teškog jezgra, videlo bi se da je ukupna masa tih produkata raspadanja manja od mase prvobitnog jezgra. Ovoj razlici u masama odgovara određena količina oslobođene energije. Produkti raspadanja su, naime, došli u energetski stabilnije stanje, nego što je bilo prvobitno jezgro. Količina energije, koja je nastala smanjenjem gornje mase, data je poznatom formulom:

$$E = mc^2,$$

gde je E-energija, m-masa, a c-brzina svetlosti u vakuumu. Energija oslobođena cepanjem jezgra uzima oblik bilo elektromagnetskog gama zračenja, bilo kinetičke energije produkata raspadanja.

Od bitne praktične važnosti je, međutim, jedna činjenica koju smo napred samo usput pomenuli. Ako, naime, jedan neutron pogodi jezgro U 235, ono će se raspasti na dva dela i pri tome će nastati nekoliko novih slobodnih neutrona. Ovi slobodni neutroni bi se mogli nadalje koristiti za bombardovanje drugih jezgara U 235. Razmotrimo sad ovaj slučaj. U komad uranijuma U 235 uđe jedan neutron i pogodi jedno njegovo jezgro. Ono se rascepi i pri tome stvori još dva ili tri neutrona. Tada svaki novonastali neutron krene od svoga mesta postanka i (1) izađe iz mase uranijuma, a da pri tome nije naišao ni na jedno jezgro U 235 ili (2) naiđe na neko drugo jezgro U 235 i kod njega izaziva cepanje uz stvaranja novih neutrona. U prvom slučaju cepanje prvog jezgra neće imati daljnjih posledica. U drugom slučaju proces će se širiti i zahvatiti celu uranijumovu masu. To je »atomska eksplozija«. Međutim, u praksi će nastati i gubitak novonastalih neutrona i njihovo stvaranje novim raspadanjima. Pitanje je samo da li će novim raspada-

njem nastati više neutrona nego što će biti izgubljeno, ili obrnuto. U prvom slučaju će nastati »lančana reakcija«. U drugom slučaju neće biti vidne reakcije. Da li će jedan neutron u svom kretanju naići na jezgro i kod njega izazvati cepanje, zavisi od količine materije, tj. od broja jezgara koja stoje na putu tom neutronu. Iz ovoga je odmah jasno da će relativno veći gubitak neutrona biti kod manjih komada uranijuma nego kod većih. I zaista, lančana reakcija ne može uopšte nastati kod količina uranijuma (U 235) koje su ispod jedne određene mase, t.zv. »kritične mase«, zbog toga što su gubici neutrona u takvom slučaju veći od količine koja se stvara bombardovanjem jezgara neutronima. Naprotiv, u jednom bloku uranijuma sa masom većom od kritične, svako početno bombardovanje uranijuma neutronima izaziva lančanu reakciju, koja se proširi na ceo blok. Iz ovoga vidimo da se količine veće od kritične mase nuklearnih eksploziva (U 235 i svih ostalih izotopa koji imaju slična svojstva) ni u kom slučaju ne mogu čuvati, jer u njima smesta nastaje lančana reakcija, koju započnu »dolutali« neutroni, produkti reakcija kosmičkih zraka ili prirodne radioaktivnosti. Stoga je tehničko pitanje »aktiviranja« atomske bombe dosta složeno. Mi ćemo ga u načelu razmotriti kasnije, a za sada ćemo još samo dodati da osim U 235 podležu cepanju i jezgra U 233 i plutonijuma (Pu 239), kad ih pogode neutroni. Produkti raspadanja svih ovih jezgara su lakša jezgra elemenata, koji spadaju oko barija, kriptona itd.

Pogledajmo sada kako se pri bombardovanju neutronima ponaša »obični« uranijumov izotop U 238 (koji se u prirodnom uranijumu nalazi u koncentraciji od preko 99%). Njegova jezgra se retko cepaju kad ih pogode brzi ili spori neutroni, koje oni vrlo jako apsorbuju. Ove spore neutrone još češće nazivamo *termalnim* neutronima, jer im brzine odgovaraju brzinama svih onih čestica, koje su u toplotnoj ravnoteži sa okolinom. Prilikom apsorpcije jednog neutrona, jezgro U 238 prelazi u Np 239 (Np = neptunijum), a ovo onda beta raspadom⁵⁾ u Pu 239.

⁵⁾ Beta raspad je kada se iz atomskog jezgra oslobodi elektron, tj. beta zrak.



Plutonijum (Pu 239), kako smo već rekli, ima osobine slične U 235, tj. on se cepa bombardovanjem neutronima. U 238 je, dakle, važna sirovina za produkciju plutonijuma, jer se bombardovanjem neutronima pretvara u plutonijum.

Postavlja se pitanje da li je moguće ostvariti lančanu reakciju u prirodnom uranijumu? Drugim rečima, da li bi onaj mali procenat U 235 i U 233 u prirodnom uranijumu mogao dati više neutrona svojim cepanjem, nego što se gubi apsorpcijom U 238 i izlaskom iz mase itd.? Odgovor na ovo pitanje je potvrđan. Pri izvesnim uslovima moguće je ostvariti lančanu reakciju u prirodnom uranijumu. To se vrši u nuklearnim reaktorima ili pećima. Ovi uređaji, u čiji se detaljniji opis ovde nećemo upuštati, sastoje se od šipki običnog uranijuma, koje su ravnomerno razmeštene u grafitu ili »teškoj vodi«. Grafit ili »teška voda« ovde imaju dvostruku svrhu. Prvo, da smanje broj »odbeglih« neutrona, dakle da služe kao »reflektori«, a drugo, da ih uspire i time povećaju njihovu korisnost. Ima mnogo vrsta reaktora koji se razlikuju od ovog opisanog tipa i koji ne upotrebljavaju prirodni uranijum, ali svi oni rade na istom principu, odnosno njihovo se »gorivo« u reaktoru za vreme rada nalazi u takvoj količini i razmeštaju da čini upravo »kritičnu masu«. Jednom nastala lančana reakcija produžuje se dalje istom brzinom. Posledica reakcije je oslobađanje toplote, koja se može praktično iskoristiti za dobijanje korisne energije. Nuklearni reaktor je, dakle, osnovna mašina za konstruktivnu upotrebu atomske energije.

Vratimo se sada na problem lančane reakcije u čistom U 235 ili Pu 239. Već smo pomenuli da je brza lančana reakcija potrebna ako hoćemo da ostvarimo atomsku eksploziju. Tako brza reakcija može da nastane jedino u masi znatno većoj od kritične. Ali mi već znamo da se masa atomskog eksploziva, veća od kritične, »sama od sebe zapali«. Rešenje problema aktiviranja atomske bombe leži u tome da se dve zasebne i odvojene količine atomskog eksploziva u danom času vrlo brzo dovedu u dodir.

A najprostiji način da se to postigne je kad se jedna upotrebi kao zrno, a druga kao meta.

Tako smo ukratko upoznali principe na kojima se zasniva dobijanje energije nastale cepanjem teških jezgara. Ostaje nam da pogledamo kako nastaje oslobađanje energije kad se jezgra lakih atoma stapaju u teže i stabilnije strukture i pri tome oslobađaju energiju. Uzmimo konkretno slučaj 6 nukleona, i to 3 protona i 3 neutrona. Njih možemo zamisliti bilo kao slobodne čestice, bilo vezane kao neka jezgra. Za naš primer uzmimo tri slučaja:

- a) da su svih 6 slobodni;
- b) da su 4 povezana u 1 jezgru helijuma He^4 , a ostala dva u 1 jezgru deuterijuma (teškog vodonika) H^2 ;
- c) da su svih 6 vezani u jezgru litija Li^6 .

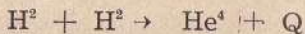
Izračunajmo sada posebno mase ovih triju grupa. Masa protona je 1,00813 j.a.m., a masa neutrona je 1,00894 j.a.m.⁹⁾. Masa deuterijuma iznosi 2,01472 j.a.m., masa helijuma — He^4 je 4,00388 j.a.m., a masa litijuma — Li^6 je 6,01690 j.a.m. Za pojedine gornje slučajeve imamo ove mase:

- a) 6,05121 j.a.m.;
- b) 6,01860 j.a.m.;
- c) 6,01690 j.a.m..

Iako u svakom od ta tri slučaja imamo na okupu 3 protona i 3 neutrona, iz ovoga se vidi da je njihova zajednička masa utoliko manja što idemo više prema sredini sistema elemenata, tj. prema sredini sedlaste krivulje, koja nam daje odnos između atomske težine i energije vezivanja jezgara. Kad bismo od jednog jezgra He^4 i jednog jezgra H^2 stvorili jedno jezgro Li^6 , tj. od b) grupe stvorili c), dobili bismo energiju koja je ekvivalentna ovoj masi. To možemo izračunati jednačinom $E = mc^2$. Ako se gornja vrednost uvrsti u tu jednačinu (pazeći na jedinice), dobija se da je 0,00170 j.a.m. ekvivalentno energiji od 1,58 MeV. Kada bi se na sličan način grupa a) pretvorila u grupu c), oslobodila bi se energija od 31,9 MeV. Izgleda, prema tome, da bi problem dobi-

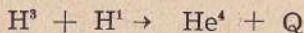
⁹⁾ j.a.m. je skraćeniica za »jedinica atomske mase«. Po definiciji 1 j.a.m., iznosi 1/16 mase atoma kiseonika ^{16}O . To je izvanredno mala količina jer iznosi svega $1,67 \times 10^{-24}$ grama.

janja ove energije i u praksi morao biti vrlo jednostavan. Treba samo dovoljno približiti jezgra kao što su ona u b), pa da se pretvore u jezgra iz c), a pri čemu će osloboditi energiju. To ustvari i jeste tako. Ali samo »približavanje« tih jezgara nije tako lako. Smeta nam tu odbojna električna sila između jezgara. Videli smo kako su jezgra nabijena električitetom. I najjednostavnija jezgra, jezgra vodonika, sastoje se od jednog protona, a u slučaju teškog vodonika (deuterijuma), od jednog protona i jednog neutrona. Kada bi se dva jezgra teškog vodonika dovoljno približila, mogla bi se stopiti u jedno jezgro helijuma i to po jednačini:



gde Q označava nastalu energiju. Međutim, ovom približavanju se protivi električna sila, jer se dva jezgra, kao dva istoimena naboja, odbijaju. Električna sila između dvaju naboja obrnuto je proporcionalna kvadratu udaljenosti tih naboja, a proporcionalna je umnošku naboja. Dakle, što se više približe dva naboja, konkretno dva jezgra, odbojna sila između njih je sve veća i, tek ako se jezgra približe na domet nuklearnih sila, mogu da se stope i da nastane nuklearna reakcija. Da bi se savladala ova prepreka, stvorena električnom silom, u nuklearnoj fizici poznata kao Kulonova barijera (Coulomb), jezgrima treba dati veliku kinetičku energiju⁷⁾, kako bi se ova, međusobnim sudarom, približila na domet nuklearnih sila.

Za praktično ostvarenje ove reakcije dolaze, bar zadata, u obzir samo jezgra koja imaju jedinični naboj, tj. koja sadrže jedan proton. To su H^1 (vodonik), H^2 (deuterijum, teški vodonik) i H^3 (tritijum). To je zato što jezgra sa više protona imaju i toliko veću Kulonovu barijeru, pa ih je zato i teže približiti. Ako, dakle, želimo da od mešavine tritijuma (H^3) i vodonika (H^1) stvorimo helijum (He^4) prema reakciji:



onda moramo mešavini H^3 i H^1 dati toliku energiju, da se jezgra H^3 i H^1 , usled svoje dobijene kinetičke energije,

⁷⁾ Kinetička energija je energija kretanja.

»zabiju« jedna u druge. Ovo se u praksi postiže tako da se mešavina slična gornjoj ugrije na vrlo visoku temperaturu. Temperatura nekog tela jeste posledica kretanja njegovih molekula i atoma, pa je ovo kretanje utoliko jače ukoliko je viša temperatura. Ovo objašnjava naziv »termonuklearna reakcija«. Čim termonuklearna reakcija započne, ona se nastavlja velikom brzinom jer je toplota oslobođena atomskim spajanjem (fuzijom) mnogo više nego dovoljna, da bi reakciju podržavala.

Bez daljeg upuštanja u opisivanje termonuklearne bombe, o čemu će biti govora na drugom mestu, možemo jedino reći da se zagrevanje termonuklearnog »eksploziva«, tj. smese lakih elemenata, »katalizatora« itd., vrši u praksi običnom nuklearnom bombom. Ona je, po svemu izgleda, zasada jedina »šibica« koja je u stanju da »zapali« termonuklearnu »vatru«.

Konačno se postavlja pitanje da li se termonuklearna energija koristi za konstruktivne svrhe? Kako da ne! Ceo život i kretanja na Zemlji crpu svoju energiju direktno ili indirektno od Sunca, a ono je ustvari velika termonuklearna peć. Optimisti veruju da će se termonuklearne peći moći uskoro graditi na zemlji. Međutim, neke činjenice iz nuklearne fizike ukazuju da ovaj optimizam nije baš sasvim opravdan. Dosta je napomenuti da se sve poznate stvari na Zemlji isparavaju pri temperaturi od oko 4000° Celzijusa, a najniža temperatura termonuklearne »vatre« je na milione stepeni Celzijusa.

Dr MLADENović MIŠA i ing RAIŠIĆ NENAD
Institut za nuklearne nauke »Boris Kidrič« — Vinča

NUKLEARNI EKSPLOZIVI

STABILNOST ATOMSKOG JEZGRA

Jedna od osnovnih činjenica koja karakteriše strukturu materije jeste ograničenost broja atomskih vrsta. Mendeljejev periodični sistem sadržavao je do nedavno 92 elementa, a sada, zahvaljujući nuklearnoj fizici, sadrži 101 elemenat. Većina elemenata pojavljuje se u nekoliko atomskih vrsta koje su hemiski identične, ali se razlikuju po masi. Njih nazivamo izotopima i mogu biti stabilne ili radioaktivne. Stabilnih izotopa ima 271, dok se radioaktivni izotopi stalno pronalaze i sada ih ima preko 800. Ako na dijagramu prikazemo sve poznate atomske vrste tako, da ih rasporedimo u odnosu na broj protona i neutrona koje sadrže u jezgru, dobijamo interesantnu sliku. Izotopi istog elementa nalaze se vertikalno jedan ispod drugog. Elementi iz periodičnog sistema nižu se jedan pored drugog.

Pre svega, uočavamo da stabilni izotopi nisu rasturjeni po celom dijagramu, već su sakupljeni duž jedne neprekidne linije. Ova linija se naziva linija stabilnosti. Stabilno atomsko jezgro ne može da sadrži ma kakav broj protona i neutrona. Samo ako je odnos broja protona prema broju neutrona blizak vrednosti koju daje linija stabilnosti, jezgro može da ostane stabilno. Ukoliko je ovaj odnos veći ili manji za nekoliko neutrona, dobijamo nestabilna jezgra koja se radioaktivnim raspadanjem pretvaraju u stabilna i to na taj način da se jedan neutron pretvara u proton ili obratno. Ako je razlika još

veća, jezgro uopšte ne može da postoji. Vidimo, iz dijagrama, da će vrlo laka jezgra biti stabilna ako je broj neutrona jednak broju protona; a ukoliko su jezgra teža, utoliko se i broj neutrona povećava u odnosu na protone.

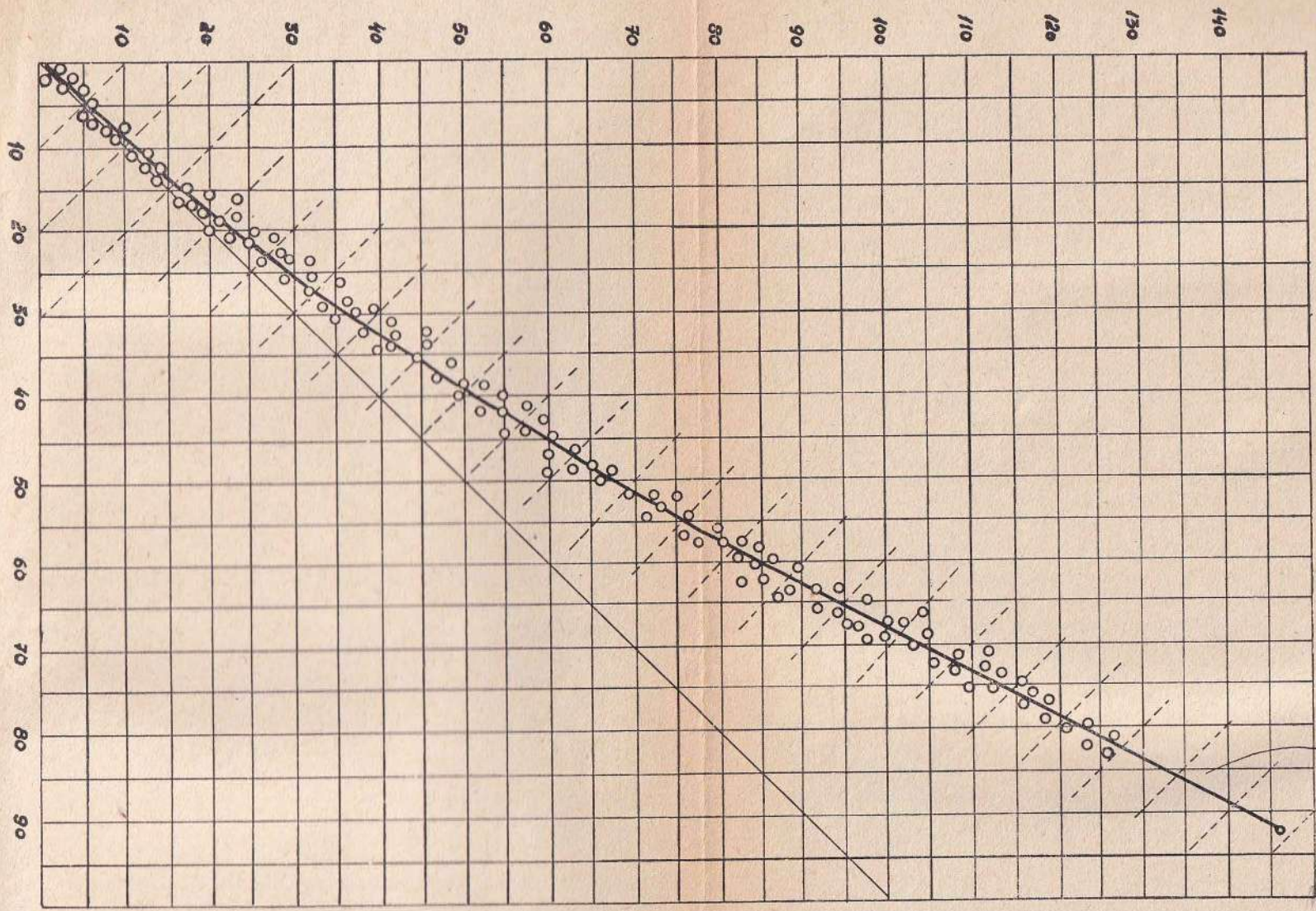
Uzrok ovih zakonitosti leži u prirodi nuklearnih sila koje drže na okupu neutrone i protone u jezgru. Svi protoni su pozitivno naelektrisani, pa zbog toga između njih postoje jake odbojne sile koje nastoje da rasture jezgro. Njima se suprotstavljaju privlačne nuklearne sile koje deluju između svih čestica u jezgru: proton privlači proton, neutron privlači neutron i proton privlači neutron. O prirodi nuklearnih sila ne zna se mnogo, ali je poznato da se znatno razlikuju od svih do sada poznatih sila, kao što su gravitacione, električne itd. Jedna od osnovnih razlika jeste u tome da su u jezgru, i to tamo gde su čestice veoma blizu jedna drugoj, nuklearne sile znatno jače od električnih i potpuno neutrališu njihovo odbojno dejstvo. Nuklearne sile zavise od udaljenosti; ali, za razliku od električnih, dejstvo nuklearnih sila opada znatno brže sa udaljenošću.

DEFEKT MASE

Dalje interesantne podatke o stabilnosti jezgra dobićemo ako proučimo njihove mase. Uzmimo kao najjednostavniji primer jezgro teškog vodonika, koje se sastoji od jednog protona i jednog neutrona. Na prvi pogled bismo očekivali da će masa teškog vodonika biti jednaka zbiru mase protona i neutrona. Mnogobrojni eksperimenti tačno su utvrdili da je masa teškog vodonika manja od zbira mase protona i neutrona. Pogledajmo šta kažu brojke:

— masa protona:	1,67260	10^{-24}	grama;
— masa neutrona:	1,67491	10^{-24}	grama;
	<hr/>		
	3,34751		
Masa teškog vodonika:	3,34355	10^{-24}	grama;
Razlika iznosi:	3,34751		
	— 3,34355		
	<hr/>		
	0,00396	10^{-24}	grama.

Broj
neutrona



Linija stabilnosti

Slika 1

Broj
protona

Vidimo da je masa jezgra teškog vodonika oko 2 promila lakša od sume masa protona i neutrona. Ista takva pojava se zapaža i kod svih ostalih atomskih jezgara. Masa svakog jezgra je manja od sume protona i neutrona u njemu. To znači da se prilikom formiranja atomskog jezgra izgubi jedan deo mase. Tu pojavu zovemo defektom mase.

Šta biva s tom masom? Odgovor na ovo pitanje daje Ajnštajnova teorija relativiteta. Ova teorija polazi od eksperimentalno utvrđene činjenice da u materijalnom svetu postoji gornja granica brzine koja se ne može prevazići. Najveća moguća brzina iznosi oko 300.000 km/sek. To je brzina svetlosti u bezvazдушnom prostoru. Teorija relativiteta naročito objašnjava šta biva sa telima čija brzina počinje da se približava brzini svetlosti. Ako nekom takvom telu dodajemo energiju, šta će se desiti? Ono ne može da je koristi za povećanje brzine, jer je blizu granice. Po navedenoj teoriji ta će se energija uglavnom koristiti za povećanje mase. To znači da se masa može menjati, a energija pretvarati u masu. Logično je da se masa može pretvoriti u energiju, i obratno. Tako je Ajnštajn došao do zakona o ekvivalenciji mase i energije, koje se smatraju za dva različita vida materije, i našao brojni odnos između njih. Taj odnos glasi:

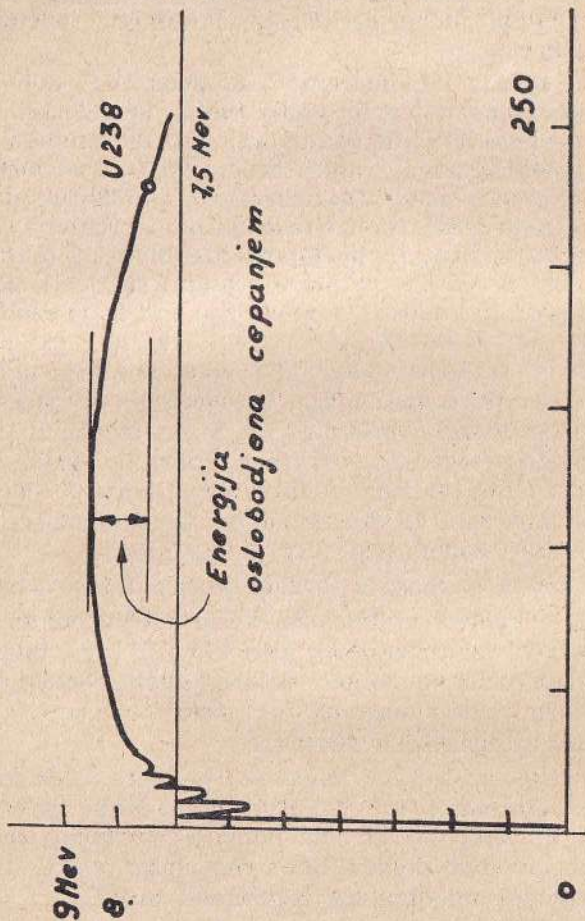
$$\text{Energija} = \text{masa} \times (\text{brzina svetlosti})^2, E = mc^2.$$

Iz jednačine vidimo da masu treba pomnožiti sa kvadratom brzine svetlosti, a to je velik broj, tako da se za male mase mogu dobiti velike količine energije. Kad bi se jedan gram mase sav pretvorio u energiju, dobili bismo 25 miliona kilovatčasova.

Vratimo se sad na defekt mase. Jasno je da je masa, koja je izgubljena prilikom formiranja jezgra, pretvorena u energiju. Ako hoćemo da ponovo rasturimo jezgro na njegove sastavne delove, onda mu treba vratiti tu energiju, koja će nadoknaditi izgubljenju masu.

Defekt mase, koji pokazuje koliko je energije oslobođeno pri formiranju jezgra, predstavlja neku vrstu mere stabilnosti jezgra. Ukoliko je defekt veći, utoliko

Srednja energija
veze po nukleonu



Atomska težina A

Slika 2

je stabilnost veća. Tu energiju fizičari zovu energijom veze celog jezgra. Pošto ta energija zavisi i od broja čestica u jezgru, slika je jasnija ako posmatramo deo energije koji otpada na vezivanje jedne čestice u jezgru, a dobićemo ga ako energiju veze podelimo sa brojem čestica u jezgru. Tako dobijamo energiju veze jednog nukleona (čestice u jezgru, bilo da je proton ili neutron).

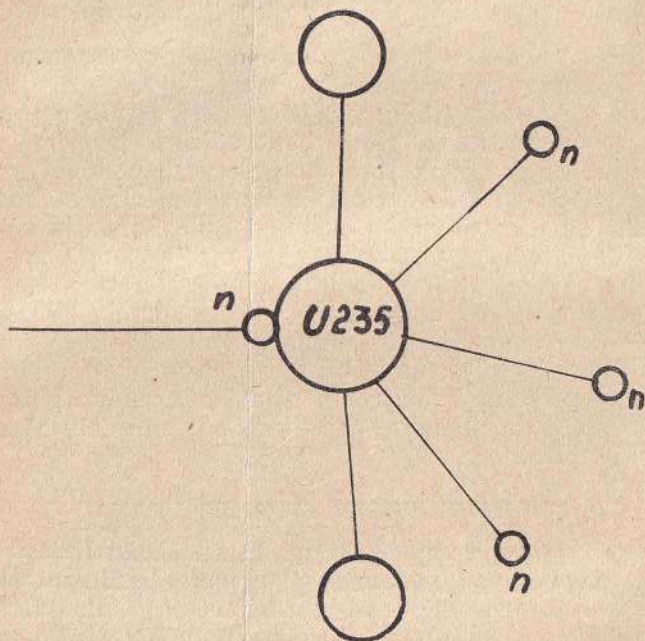
Sl. 2 pokazuje energiju veze nukleona za razna jezgra. Vidimo da je energija veze najveća za jezgra srednje težine. Kod lakih jezgara ima izvesnih nepravilnosti, a zatim kriva raste ka srednjim jezgrima. Od srednjih jezgara ka težim energija veze ponovo opada, što znači da su teža jezgra, kao naprimer uran, manje stabilna od jezgara upola lakših od njih. Zahvaljujući toj činjenici omogućeno je dobijanje energije cepanjem jednog teškog jezgra, kao što je uranovo. Defekt mase kod urana manji je od defekta mase jezgra upola lakšeg od njega. Ako bismo jezgro urana raspolovili, nova jezgra koja bismo dobili još ne bi bila slična jezgrima koja imaju isti broj protona i neutrona, zato što uranove polovine imaju manji defekt mase nego jezgro u tom delu Mendeljeve tablice.

DELJENJE (FISIJA, CEPANJE) URANA

Opis deljenja. Elementi na kraju Mendeljeve tablice, razlikuju se od većine elemenata lakših od olova time što su prirodno radioaktivni. Ova radioaktivnost je posledica nestabilnosti tih elemenata, koju nije teško razumeti. Kod teških elemenata broj protona je toliko velik da njihovo odbojno dejstvo ozbiljno smanjuje stabilnost jezgra. Činjenica da u prirodi ne postoje elementi teži od urana pokazuje da su oni znatno nestabilniji od njega; pa ako su nekad i postojali, brzo su se raspali.

Kada u jezgro dospe jedan neutron, ono se uzbudi. Razlog uzbuđivanja lako ćemo razumeti ako pođemo od efekta mase koji kaže da je svaki nukleon u jezgru lakši nego kad je slobodan, odnosno izvan njega. Kad neutron dospe u jezgro urana, on mora da izgubi jedan mali deo mase. Taj mali deo mase pretvori se u energiju koju

neutron preda jezgru i na taj način ga uzbudi. Pošto je uran inače nestabilan, energija koju dobije ulaskom neutrona još više poveća tu nestabilnost, koja sad dostigne takvu meru da opstanak jezgra postane nemoguć i ono se rascepi na dva obično nejednaka dela.



Slika 3

Prilikom deljenja jezgra urana oslobode se i 2—3 neutrona, što je od presudne važnosti za praktično korišćenje energije dobijene cepanjem. Razlog oslobađanja neutrona je jednostavan i može se uočiti posmatranjem sl. 1. Na njoj vidimo da je relativan broj neutrona utoliko veći ukoliko je jezgro teže. Uran, naprimer, ima na svaki proton prosečno po 1,5 neutrona, dok ih lantan ima 1,44. To znači da delovi, koji nastaju cepanjem, imaju znatno više neutrona nego što je normalno, pa je razumljivo da

se neki neutroni oslobode u toku samog cepanja. U malom broju slučajeva, oko 1%, dešava se da neutron napusti jednu od polovina tek posle nekoliko sekundi. Ovi neutroni se zovu naknadni.

Kad se jezgro podeli, između oba ova dela, koji su pozitivno naelektrisani, deluju veoma jake odbojne sile. Zbog toga se oni udaljuju jedan od drugoga velikom brzinom. Najveći deo energije oslobođene cepanjem odnose ovi delovi u vidu kinetičke energije.

Proizvodi deljenja. Kad neutron dospe u jezgro urana, proces deljenja je tako buran da se ne može očekivati da se sva jezgra, koja se dele, podele podjednako. Proizvodi deljenja mogu biti prilično različiti po veličini. Ukupno se dobija oko tridesetak različitih elemenata. Pošto neki od tih elemenata imaju po više izotopa, ukupan broj izotopa, koji se dobijaju cepanjem urana, iznosi oko dve stotine.

Najvažnija karakteristika proizvoda deljenja jeste njihova radioaktivnost. Neposredni proizvodi deljenja imaju relativno veći broj neutrona nego stabilna jezgra iste težine. Proizvodi nastoje da se stabilizuju pretvarajući neutrone u protone, dok se ne dođe do stabilnog odnosa između njih. Ovo pretvaranje se vrši u samom jezgru. Neutron se pretvori u proton i jedan elektron koji napušta jezgro. Odmah posle izlaska elektrona (ili beta čestica, kako se on u ovom slučaju naziva) može i neki gama zrak da napusti jezgro. Obično posle nekoliko sukcesivnih emisija beta i gama čestica, dobija se stabilno jezgro.

Energija oslobođena deljenjem. Energiju koja se oslobađa deljenjem jednog grama urana 235 možemo proceniti na više načina. Pogledajmo, naprimer, kakav je bilans mase pri deljenju. Masa jezgra urana iznosi 235,124 atomskih jedinica mase. Uzmimo da su kao proizvodi deljenja, dobijena jezgra molibdena 95 čija je masa 94,945 i lantana 139 čija je masa 138,955 atomskih jedinica mase. Pretpostavimo zatim da su prilikom deljenja oslobođena dva neutrona; ali, pošto je za proizvođenje procesa bilo potrebno da jedan neutron uđe u jezgro urana

235, to ćemo za bilans uzeti u obzir samo jedan neutron. Tada dobijamo sledeće:

	— masa jezgra urana 235...	235,124 at. jedinica	
		mase ¹⁾	
minus:	— Mo 95	94,945	
	— La 139	138,955	
	— masa neutrona	1,009	
		0,215	atomičkih je-
			dinica mase

Vidimo da je jezgro urana 235 za 1 promil teže od proizvoda cepanja. Razlika u masi pretvorena je u energiju koja se oslobađa prilikom deljenja. Na osnovu Ajnštajnovne formule za ekvivalenciju mase i energiju može se izračunati da je 0,215 atomskih jedinica mase ekvivalentno energiji od 198 MeV-a²⁾. Pošto se deljenje može vršiti na više različitih načina, ova energija može da bude nešto manja ili veća, pa ćemo kao orijentacionu vrednost uzeti 200 MeV-a.

Da bismo ustanovili koliki je čisti dobitak, treba od 200 miliona elektronvolti da odbijemo energiju koja je utrošena na izazivanje deljenja. Kao što ćemo kasnije videti, deljenje urana 235 najefikasnije se postiže ako neutroni imaju veoma male energije, manje od 1 elektronvolt, što je potpuno zanemarljivo prema oslobođenoj energiji. Čist dobitak od 200 MeV-a treba uporediti sa energijom koja se dobija u hemiskim procesima. U njima učestvuju samo elektroni na periferiji atoma koji su slabo vezani za jezgro. Zbog toga, energije oslobođene u hemiskim procesima ne iznose više od nekoliko elektronvolti po atomu. Razlika između koncentracije hemiske i nuklearne energije je ogromna; kao što vidimo, u nuklearnim procesima se oslobađa milionima puta više energije.

¹⁾ Jedna atomska jedinica mase iznosi $1,66 \times 10^{-24}$ grama.

²⁾ MeV pretstavlja jedinicu energije koja se primenjuje u nukl. fizici i pretstavlja onu vrednost koju elektron dobije ako se ubrza kroz razliku potencijala od 1 volt. 1 MeV = milion elektronvolti.

Energija koja se oslobodi deljenjem raspoređena je na proizvode deljenja i na ostale čestice koje se oslobađaju u toku samog cepanja i posle njega. Najveći deo odnose proizvodi deljenja u vidu kinetičke energije. On iznosi oko 162 MeV-a, odnosno 83%. Ovi delovi se kreću velikom brzinom kroz ostali, još nerascepljeni materijal, sudarajući se sa jezgrima urana. Pri svakom sudaru prenose jedan deo energije na ostala jezgra. Sva se energija tako utroši na ubrzavanje kretanja okolnih atoma ili, kako bi se drugačije moglo reći, na povišenje temperature. Neutroni oslobođeni pri deljenju odnose prosečno oko 6 MeV-a energije. Istu količinu odnose i gama zraci koji se oslobađaju u toku samog deljenja. Ostatak od 21 MeV-a otpada na energiju koja se oslobađa kasnije prilikom radioaktivnog raspada proizvoda deljenja. Proizvodi deljenja emituju beta čestice i gama zrake i neutrone³⁾. To znači da se oko 10% energije ne oslobađa odmah pri deljenju, nego tek kasnije.

Da bismo dobili jasniju pretstavu o količini energije koja se oslobodi pri deljenju urana, izračunaćemo koliko se oslobodi ako se izdele sva jezgra u 1 gramu U 235; to ćemo izraziti u nama bližim jedinicama, tj. kilovatčasovima. U jednom gramu urana ima oko $2,64 \cdot 10^{21}$ atoma, što znači da se ukupno oslobodi $5,28 \cdot 10^{23}$ MeV-a. Da pređemo od MeV-a na kilovatčasove, treba da pomnožimo sa $4 \cdot 10^{-20}$, tako da dobijemo $2,1 \cdot 10^4$ kilovatčasoiva.

Teorija deljenja. Godinu dana posle otkrića deljenja jezgra urana, danski fizičar Nils Bor sa saradnicima dao je teorisko objašnjenje tog procesa. Ono se zasniva na pretpostavci da je atomsko jezgro u izvesnom smislu slično jednoj kapljici tečnosti. Ove sličnosti su bile poznate još pre toga i fizičari su iz njih izvlačili korisna obaveštenja. Kad u jezgro urana dospe neutron, on ga uzbudi do te mere da forma jezgra, koja je do tada bila okrugla, počinje da se menja. Ona se naizmenično izdužuje i skuplja, tj. osciluje. Slične pojave su zapažene i kod kapljica tečnosti. Ako se jezgro suviše izduži, može

³⁾ Neutrino je nuklearna čestica neznatne mase koju je vrlo teško detektovati.

da dođe do sužavanja po sredini. Zbog odbojnog dejstva protona, dva kraja nastoje da se još više odbiju i tako dolazi do deljenja na dva dela.

Teorija lako objašnjava razliku u pogledu deljenja između U 235 i U 238. Prvi se deli sa neutronima bilo kakve energije, a drugi samo ako u njega dospe neutron čija je energija veća od 1 MeV-a. Ovo se objašnjava polazeći od teoriske pretpostavke da je za deljenje potrebno da jezgro dođe u položaj C kad mu je sredina uža od krajeva i kad je sigurno da će doći do deljenja zbog odbojnog dejstva protona. Kod U 235 energija koja se oslobodi ulaskom neutrona u jezgro dovoljna je da ga dovede u položaj C. Kod U 238, koji je nešto stabilniji, ta energija nije dovoljna, već neutron treba da donese još oko 1 MeV-a.

Za jezgra lakša od uranovog, koja su stabilnija od njega, potrebno je dati jezgru više energije da bi dospelo u položaj C, i to, uglavnom utoliko više ukoliko je jezgro lakše. Naprimer, bizmut se može takođe deliti, ali sa česticama čija energija iznosi 50 MeV-a. Olovo, živa i zlato se takođe mogu deliti, ali su potrebne još veće energije. Ovakvi procesi ne mogu poslužiti za praktično korišćenje oslobođene energije, jer je proizvodnja i ubrzavanje projektila skupo, a samo mali broj izazove deljenje.

Na kraju, treba napomenuti da je ipak na osnovu eksperimentalnih i teoriskih rezultata dobro upoznat proces deljenja. Jedan od prilično sigurnih zaključaka je svakako taj da među elementima, koji se nalaze u prirodi, jedino uran i torijum mogu da posluže za praktično korišćenje energije deljenja.

LANČANA REAKCIJA

Deljenjem jezgra urana oslobađa se relativno velika energija ali to samo po sebi ne bi omogućavalo praktično korišćenje te energije, da taj proces nije praćen i pojavom emisije više od jednog neutrona. Za svaki neutron koji utrošimo na deljenje dobijamo 2 do 3 nova neutrona. Na taj način, mogu se nadoknaditi neizbežni gubici neutrona, a istovremeno ojačati proces.

Da bismo dobili sliku o mogućnostima koje pruža ovakvo umnožavanje neutrona procesom deljenja, pretpostavimo da svaki neutron koji se oslobodi u deljenju može da prouzrokuje novi proces (što je delimično tačno) i da u svakom procesu dobijamo po dva neutrona (prosečno 2,5). Tada situacija izgleda ovako: polazi se od jednog neutrona koji izaziva deljenje i dobiju se dva neutrona; zatim oni izazivaju deljenja i dobiju se 4, pa 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384, 32768, itd. Već u dvadesetoj generaciji dobija se preko milion i po neutrona. U 70-oj generaciji 2,000.000.000.000.000.000.000 neutrona. To je dovoljno da se izdele sva jezgra u jednom gramu urana. Ovakav proces nazivamo lančanom reakcijom. On nam omogućuje korišćenje nuklearne energije.

Drugo važno pitanje, koje nas interesuje u vezi sa lančanom reakcijom, jeste vreme koje je potrebno da se ona razvije. Treba da razmotrimo dva faktora. Prvo, put neutrona od trenutka kad je osloboden pa do trenutka kad dospe u jezgro urana i drugo, vreme od trenutka kad neutron uđe u jezgro pa do trenutka kad se jezgro izdeli. Brz neutron prelazi i po milijardu sm u sekundi. Ako je put dug, recimo 10 sm, on će ga preći za stomilioniti deo sekunde. Kad uđe u jezgro, deljenje nastaje za tako kratko vreme da ga možemo zanemariti. To znači da bi lančana reakcija od sedamdeset generacija mogla biti završena za manje od milionitog dela sekunde. Drugim rečima, moguće je eksplozivno korišćenje nuklearne energije.

KRITIČNA MASA ✓

U gornjem razmatranju pošli smo od idealnog slučaja da se u svakoj generaciji broj deljenja umnožava za dva, jer se neutroni ne gube za druge procese. U stvarnosti nije tako. Neutrone gubimo na dva načina. Jedan deo neutrona, koji dospeju u jezgra urana, ne izazivaju deljenje već druge procese, kao što ćemo kasnije videti. Pošto je količina urana uvek ograničena, jedan deo neutrona izlazi iz mase urana napolje i ne izaziva deljenje. Kako da smanjimo efekat bežanja neutrona na razvoj lančane reakcije? Neutroni beže preko površine uranove mase. Ukoliko je ta površina veća, utoliko će pobeći veći

broj. Nas interesuje relativni broj neutrona koji uspe da pobegne, tj. deo od ukupne količine neutrona koji se kreću kroz uran. Ukupna količina neutrona stvorena deljenjem srazmerna je količini urana, ukoliko njega ima više, biće više i neutrona. Drugačije rečeno, ukupna količina neutrona srazmerna je zapremini urana, a količina koja pobegne — njegovoj površini. Odnos koji nas interesuje, tj. odnos između neutrona koji pobegne prema onima koji se kreću kroz uran, isti je kao odnos između površine i zapremine urana. Ako hoćemo da relativan gubitak bude manji, treba da smanjimo odnos između površine i zapremine. Taj odnos zavisi od dva faktora. Prvi faktor je oblik uranove mase. Oblik lopte predstavlja najpogodniji oblik, jer ima najmanji odnos površine prema zapremini. Duguljasti oblici su nepovoljni, jer se relativno povećava površina.

Drugi faktor je veličina uranove mase. Pretpostavimo da uran ima oblik kugle. Ako povećamo kuglu, njena površina raste sa kvadratom radijusa, dok zapremina raste sa kubom radijusa. Znači, zapremina brže raste. Ukoliko je masa veća utoliko je odnos površine prema zapremini manji; prema tome, opadaju i relativni gubici neutrona preko površine.

Pretpostavimo da smo pošli od neke male mase urana u kojoj su gubici toliki da se lančana reakcija ne može održati. Povećajmo tu masu, relativni gubici se smanjuju. Tako ćemo doći do izvesne mase kada su gubici toliko smanjeni da se lančana reakcija može održati. Ovakva masa se naziva kritičnom masom. Količina urana u bombi i reaktorima mora biti veća od kritične mase.

Kad neutron dospe u jezgro urana, deljenje nije jedini moguć proces, koji se dešava. U uređajima za korišćenje energije deljenja, kao što su reaktori i bombe, procesi koji ne dovode do deljenja su nepoželjni jer ne daju energiju, a smanjuju broj neutrona. Ti uređaji sadrže i druge konstrukcione materijale, pa je stoga važno znati kako se neutron ponaša prema jezgrima drugih elemenata, kao što su aluminijum, ugljenik itd.

Prirodna reakcija između nekog datog jezgra i neutrona zavisi, u prvom redu, od energije neutrona. Po

jednom opštem pravilu, verovatnoća da neutron stupi u reakciju sa nekim jezgrom utoliko je veća ukoliko je energija tj. brzina neutrona manja. Ovo se može objasniti na jednostavan način. Spori neutron provodi duže vremena oko jezgra, pa zato postoji i veća mogućnost da ga jezgro zakači. Neutroni se po energijama dele obično u tri grupe: termalne, epitermalne i brze neutrone.

Termalni neutroni su oni koji se nalaze u termalnoj ravnoteži sa supstancom kroz koju prolaze. Pretpostavimo da neki neutron, čija je energija nekoliko MeV-a, prolazi kroz vodu. On će u sudarima sa jezgrima vodonika i kiseonika, od kojih je sastavljena voda, gubiti energiju sve dotle dok je njegova energija veća od energije molekula vode. Kad se ova izjednači sa energijama molekula, onda će neutron da se kreće haotično kao i ostali molekuli. Energija molekula vode, pa prema tome i neutrona, zavisi od temperature. Pri običnoj temperaturi od 20 C° srednja energija neutrona iznosi svega oko 0,038 eV.

Iznad termalnog predela nalazi se epitermalni, koji obuhvata neutrone energije do 300 eV. Ovaj predeo predstavlja izuzetak od opšteg pravila da verovatnoća reakcije opada sa energijom neutrona jer, za izvesnih vrednosti energija, mogućnosti reakcije neutrona veoma naglo rastu. Treći predeo obuhvata brze neutrone preko 300 eV gde verovatnoća reakcije ponovo opada sa energijom neutrona.

VRSTA REAKCIJE

Kad neutron dospe u neko jezgro, može da se izvrši više procesa. Od njih vredi spomenuti:

1. Neelastično rasejavanje. — Neutron uđe u jezgro, ali odmah iza toga iz jezgra izađe jedan neutron sa manjom energijom. Ovakvi procesi su mogući za brze neutrone, čija je energija iznad nekoliko desetina hiljada elektronvolti.

2. Zahvat neutrona. — Neutron ostane u jezgru. Pošto je jezgro uzbuđeno, ono se normalizuje izbacujući nekoliko gama zrakova. Ovaj proces je važan zbog toga što se najčešće koristi za dobijanje radioaktivnih izotopa. Pomću ovog procesa se od U 238 dobija plutonijum.

3. Deljenje. — Ovaj proces se dešava, kao što smo već rekli, kod jezgra urana i težih.

U aparatima za korišćenje nuklearne energije nas interesuje samo deljenje i nastojimo da što manje neutrona izgubimo na ostale procese. Pogledajmo šta će se desiti ako je jedan termalni neutron ušao i ostao u jezgru U 235, U 238, Pu 239. U tom slučaju dolazi ili do cepanja ili do zahvata neutrona. Odnos između ova dva procesa je približno sledeći:

	U 235	U 238	Pu 239
deljenje	84,5%	0%	70%
zahvat	15,5%	100%	30%

Vidimo dakle da kod plutonijuma skoro 30% neutrona koji su ušli i ostali u jezgru ne dovodi do deljenja. Termalni neutroni imaju znatno veću verovatnoću da proizvedu deljenje U 235 nego brzi neutroni.

U predelu epitermalnih neutrona za izvesne energije (rezonantne) neutron se lako zadržava u jezgru. To je naročito jako izraženo kod U 238. Na tim energijama se U 238 ne može deliti, pa je svaki neutron koji uđe u njegovo jezgro izgubljen. U 235 ne pokazuje na ovim energijama velika pojačanja apsorpcije, a oni koji se apsorbuju većim delom proizvode deljenje.

Kod brzih neutrona verovatnoća da neutron dospe u jezgro znatno je manja nego za sporije neutrone. S druge strane verovatnoća zahvata je izvanredno mala i postoji znatno veća verovatnoća da će ponovo izaći sa smanjenom energijom nego da će biti apsorbovan.

Iz ovih podataka, kao i činjenica da na jedan atom U 235 dolazi 140 atoma U 238, možemo izvući sledeće zaključke:

1) U jednoj kompaktnoj masi prirodnog urana nemoguće je održati lančanu reakciju. Posmatrajmo jednu generaciju neutrona dobijenu deljenjem. Njihova energija

je velika. Srednja vrednost iznosi oko 2 MeV-a. Na visokim energijama najčešće se dešava neelastično rasejavanje. Neutron uđe u jezgro i preda mu nešto energije, a zatim ga opet napusti. Od deset brzih neutrona koji uđu u jezgro, samo će jedan izazvati deljenje, a ostali ga napuštaju sa smanjenom energijom. Posle izvesnog broja takvih sudara, energija neutrona se smanji ispod jedan MeV. Tada više ne mogu izazvati deljenje U 238. Ostaje im samo U 235 koga ima znatno manje. Daljim neelastičnim rasejavanjem energija neutrona se smanjuje dok ne dođu u epitermalnu oblast. Tada U 238, koga ima mnogo više, znatno apsorbuje neutrone. Međutim, oni koji preostanu, i čija se energija smanji na termalnu, nisu dovoljni da održe lančanu reakciju. Zbog toga se u reaktorima sa prirodnim uranom, ovaj tako raspoređuje da se izbegne apsorpcija u epitermalnom predelu. Između šipki urana stavljaju se materijali kao što je teška voda, koji efikasno usporavaju, a ne apsorbuju neutrone, tako da se neutroni nalaze van urana kada spadnu na epitermalne energije i u njega dospevaju tek kad se termalizuju, a tada imaju i znatno veću verovatnoću deljenja.

2) Za nuklearnu bombu treba upotrebiti samo materijal koji se deli neutronima svih energija. Videli smo da se samo jedan mali deo U 238 cepa i to dok je energija neutrona iznad 1 MeV. Veći deo ostaje neizdeljen. Zbog toga se U 238 ne može nazvati nuklearnim eksplozivom, jer bi ustvari predstavljao nepotreban, strani materijal u bombi⁴).

Do danas su poznate samo tri vrste atomskog materijala pomoću kojih je moguće ostvariti nuklearnu lan-

⁴) U 238 se može dovesti do eksplozije samo pomoću termonuklearne reakcije koja stvara daleko više neutrona nego nuklearna reakcija. Zato su već izrađene tzv. fisiono-fuziono-fisione bombe, čija je košuljica od U 238. Najpre eksplodira upaljač ove bombe (ustvari obična fisiona nuklearna bomba) koja započne termonuklearnu reakciju kod okolnog termonuklearnog eksploziva. Neutroni stvoreni termonuklearnom eksplozijom sada deluju na omotač (košuljicu bombe) od U 238, te i ovaj eksplodira (pošto su neutroni, stvoreni termonuklearnom reakcijom, sa energijom znatno većom od 1 MeV).

čanu reakciju fisije, koja bi se odvijala eksplozivno. To je poznati izotop urana U 235, veštački stvoreni element plutonijum i novi veštački stvoreni izotop U 233. Ova tri elementa u vrlo čistom stanju predstavljaju nuklearni eksploziv i njima se mogu puniti nuklearni projektili i proizvesti nuklearna eksplozija.

Od ova tri elementa jedino se U 235 nalazi u prirodi i to pomešan sa glavnim izotopom U 238. Plutonijuma i U 233 u prirodi uopšte nema i jedini put za njihovo dobijanje su nuklearne reakcije.

Način dobijanja i izdvajanja svakog od ova tri elementa je različit, pa ćemo stoga pojedinačno razmotriti proizvodnju i osobine svakog od njih.

Uran 235

Izotopska smesa U 235 i 238, koja se nalazi u prirodi, predstavlja i osnovnu sirovinu za dobijanje nuklearnog eksploziva U 235. I sam prirodni uran predstavlja materijal kojim se može ostvariti lančana reakcija deljenja. Međutim, ova reakcija se može ostvariti samo u nuklearnim reaktorima, gde se prirodni uran nalazi raspoređen u obliku rešetke u grafitu ili teškoj vodi. U nuklearnom reaktoru moguće je ostvariti nuklearnu reakciju, ali ona se, u ovom slučaju, odvija isuviše sporo da bi konstrukcija mogla da posluži kao bomba. Uran 238 koji se ne cepa, takoreći razblažava nuklearni eksploziv i ne dozvoljava da se reakcija odvija eksplozivno.

Da bi se eksplozivna lančana reakcija mogla ostvariti, U 235 mora da se odvoji od U 238. Kao što je poznato, izotopi su hemiski potpuno isti elementi, pa se hemiski i ponašaju identično. Zbog toga nije moguće pronaći hemiski način odvajanja ova dva izotopa, već se moraju primeniti skupe fizičke metode odvajanja, na bazi razlike u masama. Metoda za to ima nekoliko, ali danas se za odvajanje većih količina uglavnom koriste dve, i to:

1. — Metoda odvajanja gasnom difuzijom kroz membrane;
2. — Metoda elektromagnetskog odvajanja.

Prva metoda se najviše, upotrebljava za odvajanje izotopa urana u većim količinama. Mada je dosta skupa, ipak se koristi, pošto je to jedini praktičan način dobijanja čistog U 235.

Proces se bazira na sledećoj činjenici: ako pustimo smešu dva gasa da zajedno prolaze (difunduju) kroz neku poroznu membranu, lakši gas će prolaziti brže, a to znači da će smeša koja je prošla kroz membranu biti obogaćena lakšim gasom. Na tom principu je razrađen i proces odvajanja uranovih izotopa. Naime jedno jedinjenje urana, uranheksafluorid, na temperaturama iznad 60°C je gas, tako da heksafluorid prirodnog urana predstavlja gasnu smešu heksafluorida sa U 235 i heksafluorida sa U 238. Ova dva gasa imaju različite mase i to za nešto manje od 1%. Na bazi ove razlike, lakši gas će sa U 235 prolaziti kroz poroznu membranu nešto brže. Pošto je razlika u masi isuviše mala, jednim prolazom kroz membranu polovina gasne smeše može da se obogati za oko 3/1000 U 235. Ovo izgleda beznačajno, ali ako se proces ponovi nekoliko hiljada puta, može da se dobije praktično čist U 235 heksafluorid. Ceo uređaj, u kome se proces obogaćivanja ponavlja mnogo puta, nazivamo »separacionom kaskadom«, a pojedini element kaskade, u kome gas jednom prolazi kroz membranu obogaćujući se za 3/1000, nazivamo jednim stepenom kaskade.

Jedan stepen kaskade ustvari predstavlja uređaj u kome se gasna struja koja ulazi deli na dva dela. Jedan, koji prolazi kroz membranu i obogati se sa U 235, i drugi koji je samo prošao kroz stepen ne prolazeći kroz membranu i osiromašen je sa U 235. Od ove dve gasne struje samo prva, obogaćena, ide u sledeći viši stepen obogaćivanja. Druga, osiromašena, vraća se u jedan stepen niže. Na taj način, čitava kaskada je povezana duplim sistemom cevi, i svaki stepen ima po dve pumpe. Jedna vuče gas kroz membranu i upućuje u viši stepen, dok druga vuče zaostali gas i upućuje ga u niži stepen.

Ovakav uređaj predstavlja vrlo složenu i skupu konstrukciju i to iz više razloga. Prvo, izvanredno velika korozivnost heksafluorida, koji lako nagriza obične konstruktivne materijale. Radi toga, čitava konstrukcija,

pumpe, cevovodi itd. moraju biti izrađeni od specijalnih nekorozivnih materijala. Membrane moraju, uz uslov da su nekorozivne, ispunjavati i posebne zahteve. Dimenzije pora na membranama moraju biti izvanredno male, a broj pora po sm^2 vrlo veliki. Ukupna površina membrana u postrojenju i za manje kapacitete mora da iznosi na desetine ari.

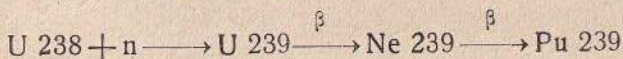
Pumpanje gasa kroz kaskadu zahteva utrošak znatne snage, tako da postrojenje traži poseban energetski izvor, električnu centralu, za svoj pogon.

Sve ovo doprinosi da je cena jednog postrojenja za gasnu difuziju vrlo visoka. Tako se pominje da su američka postrojenja stajala nekoliko stotina miliona dolara.

Krajnji produkt odvajanja je čist U 235 heksafluorid koji, za vojne potrebe, treba da se preradi u čisti uran-metal. Tek čist metal predstavlja nuklearni eksploziv i njime mogu da se pune nuklearni projektili.

Plutonium

Plutonium, za razliku od U 235, predstavlja jedan od veštački stvorenih elemenata kojih nema u prirodi. Jedini način njegovog dobijanja jesu nuklearne reakcije, pri kojima se sami elementi menjaju te od jednih postaju drugi. Tako se plutonium proizvodi od U 238 bombardovanjem neutronima. Neutroni ulaze u jezgro urana, te izazivaju pojave veštačke radioaktivnosti i spontanog izbacivanja jedne beta čestice. Nakon dva takva raspada od U 238, preko elementa neptunijuma, postaje plutonium. Ovaj proces možemo izraziti formulom:



Plutonium je element koji se hemiski razlikuje od urana. Zbog toga je moguće hemiski odvojiti uran od plutonijuma.

Proces proizvodnje plutonijuma bi se, prema tome, sastojao u pretvaranju U 238 u plutonium putem nuklearnih reakcija, zatim odvajanju (hemiskim putem) plutonijuma iz mase urana koji nije reagovao. Proces nuklearnog pretvaranja urana u plutonium je skup i

spor proces. Pošto za svaki atom plutonijuma treba utrošiti jedan neutron, to je za proizvodnju potrebna ogromna količina neutrona. Danas su najjači izvori neutrona nuklearni reaktori, tako da su oni ustvari i najpogodnija postrojenja za proizvodnju plutonijuma.

Reaktori za proizvodnju plutonijuma uglavnom imaju posebne konstruktivne zahteve, koji im omogućavaju da proizvedu što više plutonijuma uz minimum troškova. Kao gorivo im služi prirodni uran, u kome U 235 gori i svojim deljenjem proizvodi neutrone, dok U 238 apsorbuje višak neutrona i pretvara se u plutonijum. Na svaki sagoreli atom U 235 obično dolazi 0,6—0,8 atoma plutonijuma. Zbog što prostije konstrukcije i lakšeg procesa, reaktori rade na niskoj temperaturi, tako da oslobođena energija ne može uspešno da se koristi, i obično se baca. Za proizvodnju samo 1 kg plutonijuma treba iz reaktora da se odvede oko 20 miliona KWh toplotne energije.

Reaktori za proizvodnju plutonijuma obično su izgrađeni od urana i grafitu, a u poslednje vreme i teške vode. Snaga pojedinih reaktora je izvanredno velika i prelazi i 100 MW⁵⁾. Najčešće su hlađeni običnom vodom i rade na temperaturama nižim od 100°C.

Uranske šipke se zadržavaju u reaktoru oko dva meseca, pa se posle toga vade i pristupa hemiskom odvajanju plutonijuma. Materijal izvađen iz reaktora je izvanredno radioaktivan. Zbog toga se obično čeka neko vreme kako bi mu se aktivitet smanjio do izvesne mere. Ovo čekanje tzv. »hlađenje« šipki potrebno je i iz drugog razloga. Naime, za reakciju radioaktivnog preobražavanja od U 238 do Pu 239 potrebno je da prođe izvesno vreme kako bi se sva jezgra koja su stupila u reakciju pretvorila u plutonijum.

Pošto je i posle perioda »hlađenja« uran još uvek vrlo radioaktivan, čitav proces hemiskog odvajanja plutonijuma odvija se iza betonskih zaštitnih zidova, s tim da se proces kontroliše televizijom i upravlja sa rastojanja. Uran se najpre rastvara te se hemiskim putem talože produkti cepanja urana i plutonijuma. Na kraju

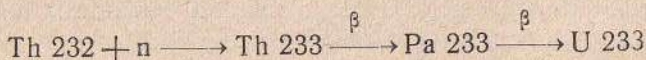
⁵⁾ MW = megavat, tj. milion vata.

se plutonijum hemiski prečišćava preko jonoizmenjivačkih kolona da bi se dobio potpuno čist. Ostatak urana može ponovo da se upotrebljava za proizvodnju šipki za reaktor, a produkti cepanja, smeša niza hemiskih elemenata koja je vrlo radioaktivna, obično se spremaju na sigurno mesto kako svojim zračenjem ne bi štetno delovali na okolinu⁶⁾.

Čist plutonijum ima slične osobine kao i U 235, te se može koristiti kao nuklearni eksploziv. On po svojim kvalitetima čak prevazilazi U 235, te se smatra boljim eksplozivom.

Uran 233

Uran 233 je takođe jedna od veštački stvorenih atomskih vrsta kojih u prirodi nema. Dobija se, slično plutonijumu, u nuklearnim reaktorima, samo polazni produkt ovde nije uran 238 već torijum. Torijum apsorbuje neutron i radioaktivnim preobražajima se pretvara u uran 233.



Pošto torijum nije gorivo i ne može da se upotrebljava u nuklearnim reaktorima, to reaktor u kome će se proizvoditi U 233 mora biti uranski, a torijum se samo stavlja u njega da bi se uz apsorpciju neutrona od njega stvorio U 233. Vađenje iz reaktora, »hlađenje« i odvajanje urana su slični procesi kao i kod plutonijuma. U 233 ima, s obzirom na nuklearno deljenje, slične osobine kao i U 235 i plutonijum.

Do sada su poznata samo ova tri fisiona nuklearna eksploziva. Zajednička im je osobina da se pod dejstvom neutrona mogu izdeliti oslobađajući energiju i nekoliko novih neutrona. U energetskom pogledu ova tri elementa su približno jednake vrednosti. Pri deljenju oslobađaju

⁶⁾ Ovo sklanjanje takvog radioaktivnog materijala predstavlja velike teškoće, pa se obično stavlja u betonske kovčege i potapa u velike dubine okeana.

skoro jednaku količinu energije. Međutim, što se tiče eksplozivne vrednosti, postoji izvesna razlika i to, u prvom redu, u odnosu na broj oslobođenih neutrona u procesu. U tom pogledu najbolji je plutonijum, pošto oslobađa najviše neutrona i omogućava najlakšu lančanu reakciju. Za njim dolaze U 233, pa U 235.

Ovim redom stoje i veličine kritičnih masa ova tri eksploziva. U 235 ima najveću, pa se prema tome smatra najslabijim eksplozivom. U 233 i plutonijum su, po svojim kvalitetima, znatno bolji.

Radioaktivni izotopi koji nastaju cepanjem urana

Izotop	Poluživot	Procenat	Maksim. ener. u MeV	
			β	γ
Zn72	49 sati	$1,5 \times 10^{-5}$	0,6	
Ga72	14,1 sat		3,1	2,25
Ga73	5 sati	1×10^{-4}	1,4	
Ge76	2,1 sat	0,02	0,6	
As77	40 sati	0,009	0,7	
Ge77	12 sati	0,0037	2	
Br82	34 sata	$2,8 \times 10^{-5}$	0,465	1,35
Br83	2,4 sata	0,4	1,3	
Kr85	4,5 sati		0,94	0,37
Kr85	10 god.	0,24	0,74	
Kr88	3 sata		2,5	
Rb86	19,5 dana	$1,6 \times 10^{-4}$	1,56	
Rb87	$6,3 \times 10^{10}$ g.		0,132	0,129
Sr89	53 dana	4,6	1,5	
Sr90	25 dana		0,6	
Y91	57 dana	5,9	1,6	
Y92	3,5 sati		3,4	0,7
Y93	10 sati		3,1	0,7
Zr95	65 dana	6,4	1	0,9
Cb95	35 dana		0,15	0,75

Izotop	Poluživot	Procenat	Maksim. ener. u MeV	
			β	γ
Mo99	67 sati	6,2	1,2	0,24
Ru103	42 dana	3,7	0,8	0,56
Ru105	4,5 sati	0,9	1,35	0,76
Ru106	1 god.	0,48	0,03	
Rh105	36,5 sati		0,6	0,33
Pd109	13,4 sata	0,028	1,1	
Pd112	21 sat	0,011	0,2	
Ag111	76 dana	0,018	0,24	
Ag112	3,2 sata		3,6	0,86
Cd115	2,23 dana	0,011	1,13	0,65
Cd115	44 dana	0,0008	1,7	0,5
In115	4,5 sati		0,3	0,3
Sn121	62 sata	0,014	0,76	
Sn123	130 dana	0,0012	1,44	
Sn123	10 dana	0,0044	2,6	
Sb125	2,7 god.	0,023	0,7	0,6
Sb127	93 sata		1,15	0,72
Te127	90 dana	0,033	0,05	
Te129	32 dana	0,19	0,07	
Te131	30 sati	0,15	0,147	
Te132	77 sati	3,6	0,28	0,22
I131	8 dana	2,8	0,5	0,37
I133	22 sata	4,5	1,3	0,55
I135	6,7 sati	5,6	1,35	1,6
Xe133	5,3 dana		0,35	0,085
Xe135	9,2 sata	5,9	0,94	0,25
Cs135	2,5x10 ⁴ god.		0,21	
Cs136	13 dana	0,008	0,28	1,2
Cs137	33 god.		0,8	0,75
Ba144	128 dana	6,1	1,05	0,5

Izotop	Poluživot	Procenat	Maksim. ener. u MeV	
			β	γ
La140	40 sati		2,12	2,3
La141	3,7 sati		2,8	
Ce141	28 dana	5,7	0,5	0,2
Ce143	33 sata	0,54	1,35	0,5
Ce144	275 dana	5,3	0,35	
Pr143	14 dana		1	
Pr145	4,5 sati		3,1	
Nd147	11 dana	2,6	0,4	0,6
Sm153	47 sati	0,15	0,73	0,57
Sm156	10 sati	0,016	0,8	
Eu155	2 god.	0,03	0,23	0,08
Eu156	15,4 dana	0,013	0,5	2
Eu157	15,4 sata	0,007	1,7	0,6

* * *

Ing RAIŠIĆ NENAD i ing KONDIĆ NENAD

NUKLEARNI REAKTORI

Nuklearnim reaktorima nazivamo uređaje u kojima se ostvaruje kontrolisana lančana reakcija deljenja jezgra (fisija) nuklearnih goriva. Za razliku od nuklearne bombe gde se proces nuklearne lančane reakcije odvija nekontrolisano, ovde su konstruktivne karakteristike uređaja takve, da je reakciju moguće lako kontrolisati. Pokazalo se da se proces može potpuno kontrolisati i da je nuklearni reaktor danas isto tako sigurna mašina za proizvodnju energije kao i svaka druga. Danas već postoji u svetu oko stotinu nuklearnih reaktora i još toliko se gradi. Njihov uspešan rad u periodu od 14 godina pokazuje da se ovi uređaji mogu smatrati budućim izvorima energije koja će pokrivati veliki deo svetske potrošnje.

FIZIKA REAKTORA

Mogućnost praktičnog korišćenja nuklearne energije iz nuklearnog goriva leži u činjenici da se njegova jezgra dele pod dejstvom neutrona, a te iste čestice se oslobađaju samim procesom deljenja. Na taj način moguće je pomoću nuklearnog goriva ostvariti lančanu reakciju. Jednom započeti proces deljenja nastavlja se preko neutrona koji se oslobađaju u procesu. Broj neutrona koji se ovom prilikom oslobađa iznosi preko dva kod svih nuklearnih goriva, tj. urana 235, plutonijuma i urana 233, tako da je lančana reakcija moguća i sa gubicima neutrona na sporedne procese. U tome pogledu postoji pravilo, da reakcija može da teče u onom slučaju, ako od svih neutrona koji se oslobode ostane makar jedan za produžavanje

reakcije. Uzevši u obzir da se fisijom oslobađa u proseku 2,5 neutrona znači da $\frac{2}{5}$ ukupnog broja mora da se upotrebi za nastavljjanje reakcije. Ovaj se procenat može postići jer postoje osnovni uslovi za to. Oni se sastoje u sledećem:

1) Neutroni mogu imati različite energije i u zavisnosti od nje izazivaju fisiju lakše ili teže. Ovo je ustvari kinetička energija, te definiše brzinu neutrona. Od energije zavisi kako će da se vrši apsorpcija neutrona u materijalu koji se ne deli.

Nuklearne osobine jezgra su takve da se fisija mnogo lakše odigrava sa sporim neutronima. S druge strane, u izotopu urana koji se ne deli i koga obično imamo manje ili više u nuklearnom gorivu, lakša je apsorpcija brzih neutrona. Iz ovoga izlazi da, ukoliko se uran upotrebljava kao gorivo, lančana reakcija ide mnogo lakše sa sporim neutronima. Međutim, ukoliko se kao gorivo upotrebljava čisti U 235, plutonijum ili U 233, reakcija može da se odigrava sa neutronima bilo kojih energija.

2) Da bi što manji broj neutrona bežao iz sistema napolje, sistemu se moraju dati veće dimenzije.

3) Da bi se što manje neutrona gubilo na apsorpciju u konstruktivnim materijalima, ove treba birati među onima koji slabo apsorbuju neutrone.

Kao što vidimo, mora da se ispuni niz uslova kako bi se ostvarila nuklearna reakcija u nuklearnom reaktoru. Ovi uslovi se moraju ispunjavati strogo. Ukoliko bi se u jednom iz bilo koga razloga otstupilo, utoliko se strože mora ispunjavati uslov u drugome. Ako, naprimer, uzmemo konstruktivni materijal koji guta više neutrona moramo imati uran sa više U 235, ili povećati dimenzije reaktora, tj. povećati količinu goriva i obratno. Ovo je naročito teško kada kao gorivo postoji samo prirodni uran. U tome slučaju jedino je moguće ostvariti lančanu reakciju preko sporih neutrona i što manje konstruktivnog materijala u reaktoru. U prirodnom uranu, za spore neutrone postoji veća verovatnoća da izazovu cepanje U 235 (mada ga ima svega 0,7%), nego da se apsorbuju u U 238 koga ima 99%.

Za usporavanje neutrona u reaktorima se koriste specijalni materijali, t.zv. moderatori, koji mogu da uspore neutrone, a da ih tom prilikom ne apsorbuju. Kao moderatori se najčešće upotrebljavaju teška voda, grafit i drugi lakši elementi. Usporavanje se vrši na taj način što neutron pogodi jezgro moderatora (recimo grafita) i u tome sudaru preda jezgru deo svoje kinetičke energije. Posle velikog broja ovakvih sudara neutron se uspori do brzine kojom osciluju i sama jezgra moderatora, te se dalje ne može usporavati. Ovu graničnu brzinu, koja zavisi od temperature moderatora, nazivamo termalnom, tako da i neutrone koji se tom brzinom kreću nazivamo termalnim neutronima.

Da bi se neutroni u reaktoru najpre usporili, a zatim vratili u uran i izazvali deljenje, uran se stavlja u moderator i to prirodni uran obično u obliku metalnih šipki raspoređenih u obliku rešetke. U procesu fisije neutron obično izleti iz mase urana i nađe se u moderatoru. Ovdje se uspori i sada kao spor luta moderatorom dok ne naleti na uran i izazove novo cepanje jezgra.

U principu moguće je uran i pomešati sa moderatorom, naprimer rastvoriti neku uranovu so u teškoj vodi. Međutim, ukoliko se radi sa prirodnim uranom, postoji velika verovatnoća da će neutron još dok se usporava naleteti negde na jezgro urana 238 i biti apsorbovan i izgubljen za reakciju. Radi toga se ovakvi reaktori obično grade sa obogaćenim uranom, gde je verovatnoća da pogodi uran 238 manja.

Da li će jedna konstrukcija moći da radi kao reaktor, tj. da li će u njoj moći da se odvija lančana reakcija, zavisi od nekoliko faktora. Ti faktori su sledeći:

- 1) Broj neutrona koji se stvori u toku fisije. (Za uran 235 iznosi 2,52.)
- 2) Procenat neutrona izgubljenih apsorpcijom u uranu 238.
- 3) Procenat neutrona izgubljenih u moderatoru i konstruktivnim materijalima apsorpcijom.
- 4) Procenat neutrona koji pobegnu iz reaktora ne izazvajući deljenje.

Pomoću ovih faktora može se za jedan sistem izraditi bilans koji pokazuje da li taj sistem može da radi kao reaktor ili ne.

Ukoliko takav bilans pokaže da za nastavak lančane reakcije ostaje manje nego jedan neutron, znači da ovakav uređaj ne može da radi kao reaktor. Vrednost neutrona koji ostaju za nastavljanje lančane reakcije obično nazivamo reproduktivnim faktorom.

Svi faktori koji govore o gubicima, osim onoga koji vodi računa o pobeplim neutronima, zavise od materijala koji se upotrebljava, tj. kvaliteta goriva i moderatora, njihovog uzajamnog rasporeda i, konačno, konstruktivnog materijala koji se u reaktoru upotrebljava. Onu količinu materijala koja je dovoljna da reproduktivni faktor bude jedan, nazivamo kritičnom količinom. Ukoliko je količina materijala veća, tako da više od jednog neutrona ostaje za nastavljanje reakcije, kažemo da je reaktor natkritičan.

Za uspešan rad reaktora obično se pri konstruisanju ostavlja reproduktivni faktor, nešto više od jedan. Pri stabilnom radu reaktora ovo se može kompenzovati kontrolnim uređajem.

Kada reaktor radi stalnom snagom, tada ovaj reproduktivni faktor iznosi tačno jedan, što znači da se u svakom trenutku proizvede fisijom jednak broj neutrona, a ovi sa svoje strane stvaraju jednak broj fisija. Ovde se i nalazi razlika između nuklearne bombe i reaktora. U reaktoru se lančana reakcija prenosi preko jednog i samo jednog neutrona. Broj fisija u svakoj generaciji neutrona je jednak. Stalno se oslobađa jednaka količina energije i to tačno onoliko koliko mi to želimo. Kod bombe lančana reakcija se prenosi preko više neutrona, recimo dva. Na taj način broj fisija i neutrona u svakoj generaciji se povećava za dupli broj i oslobađanje energije raste strahovito brzo. Ovo oslobađanje se ne može kontrolisati, tako da ceo uređaj eksplodira.

Za kontrolu nuklearne reakcije u reaktoru važna je još jedna činjenica. Naime, neutroni koji se dobijaju deljenjem jezgra ne oslobađaju se svi trenutno. Jedan mali broj, oko 1%, oslobađa se tek naknadno, posle nekoliko

sekundi i više. Ova činjenica je vrlo važna za kontrolu nuklearnog reaktora. Kada se reaktor pušta u rad, nije dovoljno da bude samo kritičan, tj. da reproduktivni faktor bude 1. Ako bi to bilo ne bismo mogli dizati i menjati snagu reaktora po našoj volji. On bi radio na minimalnoj snazi preko onih par neutrona sa kojima je proces počeo. Ako želimo da reaktor radi recimo na 1000 KW znači da u svakoj sekundi moramo imati $3 \cdot 10^{16}$ fisija ili oko 10^{12} neutrona u svakoj generaciji. Da bi se ovo postiglo od jednog neutrona koji je počeo lančanu reakciju deljenjem jednog jezgra treba dostići broj od 10^{12} . Ovo možemo postići samo ako dozvolimo lančanoj reakciji da se odvija preko više od jednog neutrona. Znači u početku reaktor treba da bude natkritičan, kako bi se broj neutrona i deljenja povećavao iz generacije u generaciju. Kada se dostigne neki željeni nivo, reproduktivni faktor može da se smanji na jedan, pa tada broj neutrona i fisija u svakome trenutku ostaju isti.

Problem kontrole nuklearnog reaktora prema ovome sastoji se u tome da se dozvoli povećavanje broja neutrona do željenog nivoa a zatim održava stanje koje se želi. Ako pogledamo koliko vremena protiče od jedne generacije neutrona do druge, vidimo da je ono vrlo kratko — manje od hiljaditog dela sekunde. Da bi se napr. snaga reaktora podigla od nule do 1000 KW sa natkritičnošću od 2% proteklo bi vreme od svega dela sekunde. Nikakav mehanički uređaj za kontrolu ne bi mogao tako brzo da reaguje da zaustavi povećanje snage i čitav reaktor bi verovatno eksplodirao.

Ovde dolaze do izražaja oni neutroni koji se kasnije oslobađaju i koje nazivamo »zakasneli neutroni«. Ako se tako učini da višak nad kritičnošću sačinjavaju samo zakasneli neutroni, onda će se snaga povećavati onom brzinom kojom se ovi neutroni emituju. Na taj se način može postići da se snaga reaktora udvostruči za vreme od nekoliko desetine sekundi, pa i minuta. Ovo je potpuno dovoljno da se snaga zaustavi na bilo kome nivou, ukidajući natkritičnost pomoću kontrolnog sistema.

Ovakav način kontrole karakterističan je za sve reaktore bilo koga tipa. Reaktor sa termalnim neutronima

najlakše je kontrolisati jer je razmak vremena od generacije do generacije najduži. Zato je termalni reaktor i najprostije konstruisati i kontrolisati, i to je razlog što ovih reaktora ima najviše u svetu.

Ovo ne isključuje mogućnost da se izradi i reaktor sa brzim neutronima. Njemu, razumljivo, nije potreban moderator jer neutrone ne treba usporiti. Takav jedan brzi reaktor sastoji se samo od metalnog jezgra. On dostiže potseća na nuklearnu bombu, pošto je malih dimenzija i radi istom vrstom neutrona. Čak je i kontrola slična sistemu paljenja bombe. Ovde su kontrolne šipke ustvari gorivo i njihovim uvlačenjem u telo reaktora dostiže se kritičnost. Razumljivo je da ovakav reaktor može da radi samo sa vrlo obogaćenim gorivom. Obično se za to upotrebljava čist plutonijum.

Ništa ne stoji na putu da se izgrade i reaktori sa neutronima srednjih energija. Ovde imamo tu prednost da je reaktor relativno mali, a njegova kontrola prostija. I ovde se koristi isključivo vrlo obogaćeno gorivo. U reaktoru postoji nešto malo moderatora koji može delimično da uspori neutrone.

Kao što vidimo, fizika nuklearnog reaktora se sastoji ustvari od fizike neutrona. Neutroni su izazivači nuklearne reakcije. Oni u ovom slučaju, kod »nuklearnog sagorevanja«, igraju onu ulogu koju ima kiseonik kod hemiskog sagorevanja. Nedostatkom njih nuklearna reakcija se gasi kao što se gasi i vatra bez kiseonika. Ako njih imamo suviše sagorevanje se pretvara u eksploziju, kao što je bio slučaj i sa hemiskim eksplozivom, gde baš višak kiseonika omogućuje burnu hemisku reakciju.

OPREMA NUKLEARNOG REAKTORA

Do sada je nabrojano sledeće kao neophodno za rad reaktora: kritična količina goriva (urana ili plutonijuma), usporivač ili moderator neutrona (ukoliko se radi o termalnom reaktoru) i konstruktivni materijali. Reflektor neutrona, jedna obloga oko reaktora kojoj je namena da neutrone koji beže iz reaktora vraća natrag, nije za reaktor neophodan ali je koristan pošto smanjuje potrebnu količinu goriva i moderatora.

Za rad reaktora su još neophodni:

1) Uređaj za kontrolu procesa lančane reakcije. Kako je već rečeno, reaktori rade sa masom koja je nešto veća od kritične. Ovo je potrebno i radi toga što se tokom rada smanjuje količina goriva u reaktoru, a, sa druge strane, u reaktor se mogu unositi i neki materijali za ozračivanje i proizvodnju radioizotopa koji takođe gutaju neutrone. Uređaj za kontrolu reguliše tu kritičnost reaktora, tj. intenzitet obavljanja lančane reakcije. Šipke od bora ili kadmijuma imaju apsorpciju neutrona vrlo veliku, te su u stanju da neutrone takoreći upiju i smanje njihov broj u reaktoru. Uvlačenjem tih šipki u reaktor smanjuje se broj neutrona i tako lančana reakcija prigušuje. Kada se reaktor na taj način učini potkritičnim može sasvim da se ugasi. Izvlačenjem šipki iz reaktora pojačava se gustina i ukupan broj neutrona, a time i toplotna snaga koju reaktor oslobađa. Tim postupcima se reguliše po volji nivo snage reaktora i reaktor obezbeđuje od neželjenog zagrevanja i havarija. Ova kontrola može da bude ručna, tj. šipke se uvlače i izvlače ručnim upravljanjem, a može i automatska, s tim što se automatu odredi maksimalna dozvoljena snaga i ovaj sam kontroliše rad reaktora.

Kontrola reaktora: uređaji za upravljanje i sigurnost uglavnom su automatski — konstruisani na bazi elektronike i servomehanizama.

2) Za bezbedan rad oko reaktora i omogućavanje bližeg pristupa ljudi, neophodna je zaštita od zračenja, koja se konstruktivno ostvaruje opkoljavanjem reaktora zidovima od olova, betona i gvožđa, pa čak i prostorima napunjenim vodom. Spoljna kontura ovih zidova obično je cilindrična, šestougona ili poligona. Opasno zračenje iz reaktora se sastoji uglavnom od gama zrakova i neutrona. Ovo zračenje u manjim intenzitetima probija debelu zaštitu reaktora i izlazi napolje. Zaštitni oklop ima funkciju da zračenje, po mogućstvu, potpuno apsorbuje. Energija ovih zračenja, koja se u zaštitnim slojevima zaustavljaju, pretvara se u toplotu. Pošto ova toplota može da iznosi i do 5% ukupno razvijene toplote u reaktoru,

to se kod reaktora veće snage mora predvideti i hlađenje zaštitnog oklopa.

3) Izuzimajući reaktore vrlo male snage, koji se spontano hlade, moraju se predvideti uređaji za odvođenje toplote iz reaktora kao celine. Oni se u obliku konstruktivnih rešenja izvode kao sistem sa prinudnom cirkulacijom nekog fluida (gasa ili tečnosti). U reaktoru taj fluid je u intimnom kontaktu sa izvorima toplote, tj. šipkama urana, a van reaktora taj zagrejani fluid, ako je u otvorenoj cirkulaciji, odlazi i baca se, ili, ako je u zatvorenoj cirkulaciji, hladi se na početnu temperaturu u jednom uređaju koji zovemo razmenjivač toplote. U njemu se fluid, koji se u reaktoru zagrejavao, hladi, odnosno od njega se nekim drugim sekundarnim fluidom odvodi toplota.

Uzmimo naprimer reaktor koji ima tešku vodu kao moderator i rashladni fluid. Teška voda se u reaktoru greje hladeći uranske šipke. Ovako zagrejana izlazi iz reaktora u razmenjivač toplote, gde je hladi obična voda. Kada se ovako ohladila, teška voda se ponovo vraća u reaktor. Na taj način ona cirkuliše po sistemu reaktor-razmenjivač-reaktor, hladeći reaktor i prenoseći toplotu na običnu vodu u razmenjivaču.

Osim gore opisanih, na reaktoru postoji još niz elemenata opreme u koje ovde ne možemo ulaziti. Nabrojani su samo oni osnovni bez kojih reaktor ne bi mogao da radi.

PRIMENA NUKLEARNOG REAKTORA

Pod eksploatacijom ćemo obuhvatiti neke načelne postavke, a pre svega da odgovorimo na pitanje: čemu reaktor može da služi? U tom pogledu imamo tri velika područja primene nuklearnog reaktora:

- 1) Proizvodnja energije, tj. reaktori za snagu.
- 2) Proizvodnja čistih nuklearnih goriva i eksploziva U 233 i plutonijuma, tj. produkcionni reaktori.
- 3) Eksperimenti sa područja fizike, hemije i nuklearne tehnike, kao i proizvodnja radioizotopa.

Razumljivo je da reaktor ima budućnost u prvom redu kao proizvođač energije. Proizvodnja goriva i eks-

ploziva može sa ovim da se poveže. Budući reaktori verovatno će biti reaktori za snagu koji će u isto vreme proizvoditi manje ili više čistog nuklearnog goriva na račun materijala kao što su U 238 i plutonijum. U vezi s tim reaktor treba najpre razmotriti kao mašinu za proizvodnju energije.

Nuklearni reaktor ima niz osobina koje ga principijelno razlikuju od drugih uređaja koji proizvode energiju. Ove osobine bi se sastojale u sledećem:

1) Kod reaktora, snaga koja se razvija načelno ne zavisi od temperature na kojoj se razvija, kao što je ređovan slučaj kod parnih kotlova.

2) Fisija se može vršiti na svim temperaturama, tj. nuklearno gorivo nema svoju karakterističnu temperaturu sagorevanja ispod koje ne bi moglo da daje svoju energiju.

3) Kod hemiskog goriva u bilo kojoj količini smeše, može da počne sagorevanje; kod nuklearnih goriva reakcija može da počne samo kada se dostigne kritična masa.

4) Količina nuklearnog goriva nezavisna je od snage koju reaktor treba da da od sebe. Menjamo po volji samo brzinu, odnosno vreme sagorevanja i time period izmene šarže u reaktoru. Što više energije od reaktora uzimamo, to gorivo brže sagoreva.

5) Dok hemisko gorivo sagoreva površinski, na granici materijala i vazduha (kiseonika), nuklearno gorivo »sagoreva« zapreminski, svuda i postupno po dubini materijala. Međutim, u zavisnosti od intenziteta lokalne gustine neutrona koji izazivaju fisiju, postoji izvesna razlika po zapremini reaktora. Gustina neutrona je najveća u centralnom delu reaktora i opada sve do zaštitnog zida, u kome treba praktično da bude do blizu nule. Nuklearno gorivo se troši proporcionalno ovoj brzini i to najviše u sredini reaktora i sve manje prema periferiji.

6) Nuklearno sagorevanje, nasuprot hemiskom, može da se obavlja bez prisustva kiseonika.

Na osnovu izloženog, veličini toplotne snage koju može da razvije nuklearni reaktor, nema načelnih, teo-

riskih ograničenja. Razume se da praktična ograničenja ipak postoje.

Snaga može da se razvije u onoj meri u kojoj je u stanju da odvede rashladni sistem, a ovaj može da odvede utoliko veću snagu ukoliko mu je veći protok fluida i temperaturna razlika između fluida i goriva. Za slučaj urana postoje kao ograničenje maksimalne temperature, temperatura njegove rekristalizacije, kada menja strukturu kristalne rešetke, što povlači sobom promenu i mehaničkih osobina. Tako se temperaturni efekti u vezi procesa odvođenja toplote javljaju kao veoma ozbiljno ograničenje snage reaktora, ugrožavajući strukturu i mehaničku otpornost urana. Ova granica otpornosti urana nalazi se negde na temperaturi od preko 600°C , te prema tome reaktor koji radi sa čistim uranom ne sme da se više toplotno optereti. Radi toga se u poslednje vreme i radi na legurama urana koje bi bile u stanju da se zagrevaju na višim temperaturama bez nekog većeg oštećenja.

REAKTORI ZA SNAGU

U suštini, prva transformacija potencijalne energije atomskog jezgra je u kinetičku energiju. Ta energija se kao nekim unutrašnjim trenjem pretvara u toplotnu energiju, te se uran odnosno gorivni elementi greju. Ne baveći se ovde pitanjem eksplozivnog oslobađanja nuklearne energije, vidimo da postoji mogućnost da se dobijena toplotna energija koristi, te tada reaktor deluje kao neka toplana. Toplotna energija može se dalje pretvoriti u mehaničku, na način poznat kod konvencionalnih toplotnih instalacija, preko parnih mašina, parnih i gasnih turbina itd. Ova mehanička energija može se koristiti za kretanje vozila, ili okretanje nekih stacioniranih radnih vratila. Posebnu pažnju zaslužuje slučaj kada mehanička energija okreće generator električne struje, te se tako pretvara u električnu energiju za dalju upotrebu. Korišćenje nuklearne energije u cilju dobijanja električne ima niz prednosti nad klasičnim načinima.

1) Količina utrošenog goriva je mnogo manja nego kod klasičnih načina. Energetski ekvivalent jednog grama

utrošenog U 235 u procesu fisije, ravan je 3 tone uglja kalorične moći oko 6.700 kalorija. Ovo sleduje iz poznate relacije ekvivalentnosti mase i energije.

2) Mogućnost uštede čvrstih mineralnih goriva, čije su rezerve u svetu ograničene, i korišćenje istih u hemiskoj industriji, gde su skoro nezamenljiva. Ta ušteda bi bila velika ako bi se nuklearna energija primenjivala umesto uglja kod termoenergetskih postrojenja.

3) Mehanička energija dobijena na osnovu nuklearne energije ima prednost kod nekih specijalnih pogona prevoznih sredstava — naprimer u podmornici, jer se proces obavlja bez upotrebe vazduha, kao i kod pogona vazduhoplova, gde je usled male potrošnje goriva moguć veliki akcioni radijus.

Ne ulazeći u iznalaženje drugih manje-više specifičnih prednosti primene nuklearne energije iz nuklearnih reaktora, treba navesti i neke nedostatke. Ovi se pre svega sastoje u opasnosti za okolinu od nuklearnog zatrovanja atmosfere radioaktivnim izotopima. Opasnost od havarija kod nuklearnih reaktora je mnogo veća nego kod konvencionalnih izvora energije i to ne radi toga što je nuklearni reaktor nesigurna mašina, već radi velike količine radioaktivnog materijala koji se u reaktoru nalazi i kojim se u slučaju nesreće može kontaminirati veliki prostor. Za ovaj radioaktivni materijal postoji i problem smeštaja pri čišćenju reaktora od »radioaktivnog pepela« i zamene nuklearnog goriva. Ovaj pepeo mora da se specijalno smešta u duboke izolovane bunkere kako ne bi štetno delovao na okolinu. No jedna od najvećih teškoća za primenu nuklearne energije danas je cena električne energije dobijene iz nuklearnih elektrana, koja je dosta viša od cene energije dobijene iz klasičnih termo i hidrocentrala. Razlog ovome je još uvek nedovoljno razvijen postupak za tehnologiju nuklearnog goriva, retki i specijalni konstruktivni elementi koji se grade od metala (kao cirkonijum) gde zahtev za velikom hemiskom čistoćom mnogo povećava cene. S druge strane, nuklearne centrale mogu konkurisati klasičnim izvorima energije samo ako se grade u snazi od 200 MW i više. Sve do sada izgrađene probne elektrane imaju

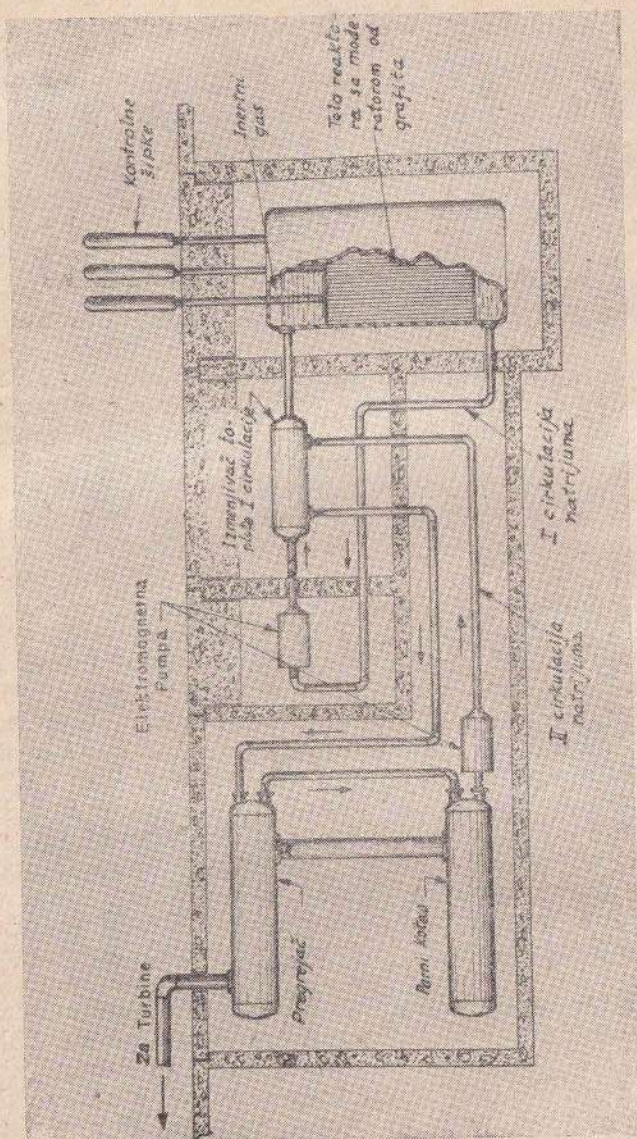
mnogo manju snagu i razume se da cena proizvedene energije mora biti vrlo velika.

Kolike su danas stvarne cene električne energije iz nuklearnih elektrana ne može se tačno odrediti ali kada se kaže da su investicioni troškovi više nego dupli pri upoređenju sa hidrocentralom onda smo sasvim blizu sadašnjih vrednosti. Za nuklearni pogon podmornice cifre su još veće. Tako su investicije za motor američke nuklearne podmornice iznosile preko deset puta više nego što bi bile za hidrocentralu iste snage.

Na slici 1 prikazana je šema nuklearne elektrocen-
trale.

Ovo je ustvari šema američkog projekta koji je u gradnji. Reaktor je termalni sa moderatorom od grafita. Gorivo je obogaćeni uran koji je u obliku šipke ugrađen u grafitno telo reaktora. Svaka šipka se hladi tečnim natrijumom koji cirkuliše kroz reaktor i odvodi toplotu. Kako je ovaj natrijum koji prolazi kroz reaktor vrlo radioaktivan to se ne sme upotrebiti direktno za proizvođenje pare. Zato on svoju toplotu predaje u razmenjivaču toplote prve cirkulacije takođe tečnom natrijumu ali druge cirkulacije. Ovaj natrijum koji se greje samo natrijumom prve cirkulacije i ne ulazi u reaktor nije radioaktivan i može da se upotrebi za proizvodnju pare. Radi toga on cirkuliše kroz parni kotao, gde se para stvara, i pregrejač, gde se ona pregrejava. Ovako proizvedena i pregrejana para može da se koristi za pokretanje turbine ili parne mašine. Tako ustvari imamo dve cirkulacije natrijuma i jednu cirkulaciju vode i pare. Prva odvodi toplotu iz reaktora, druga proizvodi paru, a treća, parna, pokreće parnu turbinu. Tečan natrijum cirkuliše u krug pomoću takozvanih elektromagnetskih pumpi koje su u stanju da tečni metal kreću po cevovodima.

Razume se da postoje i druge principijelne šeme kako može da izgleda jedno nuklearno postrojenje. Tako u slučaju hlađenja reaktora vodom pod pritiskom, nije potreban drugi cirkulacioni krug nego voda prvoga direktno proizvodi paru za parnu turbinu. U poslednje vreme postoje i pokušaji da se i ova dva ciklusa svedu na



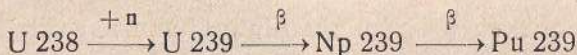
Slika 1

jedan. U tome slučaju voda bi se u reaktoru direktno pretvarala u paru, pregrevala i išla na turbine. Ovakav reaktor obično nazivamo reaktorom sa ključalom vodom.

Što se tiče efektivnosti ovakvog energetskeg postrojenja, tj. njegovog stepena korisnog dejstva, ona iznosi naprimer kod prve elektrocentrale koja je izgrađena u SSSR-u oko 17%, tj. samo 17% toplotne energije, koja se proizvede u reaktoru nuklearnim procesom, pretvara se u električnu. Ovaj koeficijent je sasvim blizak onome kod klasičnih termocentrala. Kod parne lokomotive on je još i manji i iznosi manje od 10% svedeno na snagu na točkovima, te je jasno da male vrednosti ovoga koeficijenta nemaju porekla u vezi sa samim nuklearnim reaktorom. To je posledica poznatog stepena korisnosti parnog ciklusa i drugih zakona termodinamike, kao i opšte tendencije energije da prelazi na okolinu i gubi se za radni proces.

PRODUKCIONI REAKTORI

Danas u svetu postoji poseban tip reaktora koji je namenjen jedino proizvodnji čistog nuklearnog goriva, odnosno eksploziva, plutonijuma. Ovi reaktori rade isključivo sa prirodnim uranom i konstrukcija im je tako podešena da se što veći broj neutrona apsorbuje u uranu 238 te stvori plutonijum prema poznatoj šemi:



U tu svrhu obezbeđuje se samo najpotrebniji broj neutrona za nastavljanje nuklearne reakcije a svi ostali gubici se svode na minimum. Tako u reaktoru ima vrlo malo konstruktivnog materijala, a da bi što manje neutrona bežalo iz reaktora napolje, ovi se grade vrlo veliki.

Obično su to termalni reaktori sa grafitom ili teškom vodom kao moderatorom. Grade se ogromne snage, nekoliko stotina megavata, a rade na vrlo niskoj temperaturi. Ukupna toplota koja se proizvodi baca se, jer je istu nemoguće koristiti. Količina vode za hlađenje koja se ovde troši ogromna je. Obično se čitave reke koriste za hlađenje reaktora.

Po kilogramu utrošenog U 235 stvara se oko 900 grama plutonijuma. Veću količinu nije moguće proizvesti u reaktorima koji rade sa termalnim neutronima. Reaktor radi neprekidno a reaktorske šipke urana povremeno se vade prema određenom redu i vremenu provedenom u reaktoru. Uran se zatim upućuje na hemisku preradu gde se rastvara i iz njega vadi stvoreni plutonijum.

Ovakva proizvodnja plutonijuma, vrlo neefikasna i skupa, uslovljena je potrebom za nuklearnim eksplozivom, tako da se najveći deo proizvodnje ovih reaktora upotrebljava za vojne svrhe. Tri ovakva reaktora Amerikanci su izgradili još za vreme Drugog svetskog rata i oni su dali plutonijum za nuklearnu bombu koja je razorila Nagasaki. To su grafitni reaktori sa prirodnim uranom kao gorivom, hlađeni običnom vodom. Cena ovako proizvedenog plutonijuma svakako da je vrlo visoka, čak po nekim proračunima i viša nego čistog U 235.

Za korišćenje plutonijuma u nuklearnim elektranama svakako da nema ekonomskog opravdanja. Za to bi trebalo obezbediti jevtiniju proizvodnju. Radi toga se danas ide sve više na to da se proizvodnja plutonijuma poveže sa proizvodnjom energije, te da se energija produkcionih reaktora koristi. Razume se da bi u ovome slučaju cena plutonijuma bila niža.

Za ovakvu proizvodnju plutonijuma naročito dolaze u obzir t.zv. oplodni reaktori ili, kako ih Amerikanci zovu brider (breeder) reaktori. Ovi su tako konstruisani da proizvode više plutonijuma nego što su potrošili nuklearnog goriva. U obzir dolaze isključivo reaktori sa brzim neutronima, pošto se samo sa njima može postići više od 100% regeneracije. Konstruisani su tako da im se jezgro reaktora (koje je u ovom slučaju malo) okruži uranom 238 ili torijumom. Neutroni koji beže iz reaktora apsorbuju se u ovim elementima te se stvara novo gorivo, koje se kasnije vadi i koristi. Time se postiže da ustvari sagorevamo nefisone materijale kojih ima u prirodi mnogo više nego recimo U 235. Ovim procesom rezerve nuklearnog goriva se znatno povećavaju.

EKSPERIMENTALNI REAKTORI

Ovi reaktori u principu služe za naučna ispitivanja iz oblasti nuklearne fizike, hemije i drugih oblasti nauke u vezi sa nuklearnim zračenjem i njegovim dejstvom na materijale i žive organizme. Na takvim reaktorima se vrši ispitivanje i traže osnovni parametri za proizvodnju energije. On može idealno da posluži za obuku kadrova za eksploataciju i konstrukciju budućih nuklearnih elektrana.

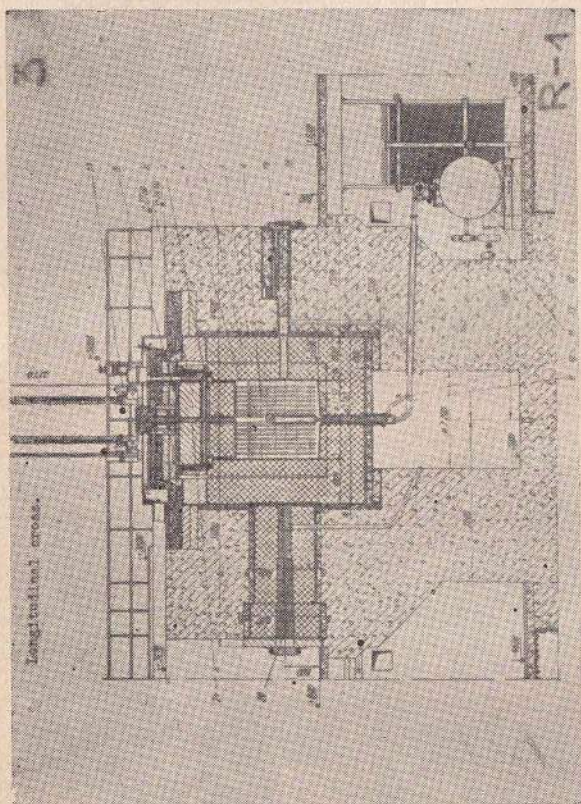
Takav jedan reaktor se gradi i kod nas u Jugoslaviji i na tome konkretnom slučaju pokazali bi kako takav jedan reaktor izgleda.

Budući jugoslovenski reaktor će biti heterogeni, cilindričnog oblika jezgra, sa elementima od obogaćenog urana i moderatorom — teškom vodom. Ima grafitni reflektor, a zaštitni zid od slojeva vode, peska i betona. To je reaktor velikog fluksa neutrona. Snaga mu je 7.000 KW, a može da radi u specijalnim uslovima i sa 10.000 KW. Ovo je reaktor za eksperimentalne svrhe te mu se energija neće koristiti, pa će se čak i trošiti nešto snage za odvođenje toplote iz reaktora. Sva toplota koja se u reaktoru razvija odvodi se teškom vodom, a ovu u razmenjivaču toplote hladi obična rečna voda. Pošto se ova tom prilikom ugrije za svega desetak stepeni to se ne može praktično koristiti.

Pri korišćenju reaktora u eksperimentalne svrhe korišće se snop neutrona koji se kroz eksperimentalne kanale izvodi iz reaktora napolje i tu upotrebljava za eksperimentalna merenja osobina neutrona. U samome jezgru reaktora nalaziće se niz kanala u koje će moći da se stave pojedini uzorci za ozračivanje. U ovim kanalima će se proizvoditi i radioaktivni izotopi za upotrebu u medicini, hemiji i poljoprivredi. Mogućnost proizvodnje izotopa, s obzirom na veliku snagu i fluks neutrona, biće vrlo velika.

Da bi se dobila slika o izgledu jednog eksperimentalnog reaktora dajemo sledeću šemu preseka kroz telo i rashladni sistem (sl. 2). Na slici se vidi reaktorski tank sa

uranskim šipkama zamočenim u tešku vodu. Teška voda se hladi preko cevi na dnu tanka u razmenjivaču toplote koji vidimo u prostori pod reaktorom. Reaktorski tank je okružen grafitnim reaktorom (šrafirano) i postavljen u



Slika 2

betonski oklop. Slika pretstavlja nuklearni reaktor Sovjetske akademije nauka i radi na snazi od 300 KW. Ovaj reaktor je prilično zastareo ali smo ga namerno izabrali jer mu se funkcionalni delovi mnogo lakše mogu razaznati.

OPŠTA PODELA NUKLEARNIH REAKTORA

Još nije ustanovljen kriterij za neku opštu standardnu podelu reaktora, po kojoj bi se jedan reaktor nalazio tačno i samo na jednom mestu takve klasifikacije. Postoje razne podele u odnosu na kakav se kriterij gleda kod ocene reaktora. Radi toga ćemo navesti neke osnovne podele koje se primenjuju pri klasifikaciji nuklearnih reaktora.

Podela reaktora

1) Po nameni:

a) Za razvoj i istraživanja — a₁) bazična, a₂) tehnička istraživanja

b) Za proizvodnju nuklearnih goriva (U 233 i Pu 239) produkcionni reaktori i brider reaktori

c) Za oslobodjenje energije u cilju korišćenja u vidu mehaničke ili električne snage

2) Po vrsti goriva

a) Sa prirodnim uranom

b) Sa ostalim nuklearnim gorivima, obogaćen uranom i plutonijumom

3) Po strukturi goriva

a) Homogeni, gorivo i moderatori su izmešani međusobno

b) Heterogeni, gorivo je u vidu elemenata nekoga oblika (šipke, cevi, ploče), raspoređeno u masu moderatora

4) Po vrsti moderatora

a) Sa teškom vodom

b) Sa grafitom

c) Sa berilijumom

d) Sa običnom vodom

e) Sa organskim moderatorima

5) Po vrsti neutrona koji održavaju lančanu reakciju

a) Termalni

b) Intermedijalni (sa neutronima srednjih energija)

c) Brzi

6) Po radnoj temperaturi u reaktoru

a) Hladni sa temperaturom nižom od 200°C

- b) Topli sa temperaturom višom od 200°C
- 7) Po sistemu hlađenja reaktora
- a) Sa gasovima — a₁) na pritisku blizu atmosferskog, a₂) na pritisku višem od atmosferskog
 - b) Sa tečnostima — b₁) u prirodnoj cirkulaciji, b₂) u prinudnoj cirkulaciji
 - c) Sa tečnim metalima, kao specijalnim tečnostima, sa odličnim termičkim osobinama. Ovde se često primenjuje tečni natrijum
 - d) Kombinovani sistemi od gore navedenih
 - f) Bez hlađenja — kod male snage kada sama okolina hladi reaktor i odvodi ono malo toplote koja se razvija
- 8) Po snazi
- a) Nula snage (snaga je manja od 100 KW)
 - b) Male snage (od 100 do 1.000 KW)
 - c) Srednje snage (od 1.000 do 10.000 KW)
 - d) Velike snage (sa više od 10.000 KW)

* * *

Dr MILOJEVIĆ ALEKSANDAR

TERMONUKLEARNE REAKCIJE I TERMONUKLEARNI EKSPLOZIVI

Mogućnost kontinuiranog dobijanja nuklearne energije u procesu izgradnje jezgra razmatrana je daleko pre otkrića cepanja, fisije jezgra, u vezi sa poreklom i izvorima energije zvezda.

Početak ovoga veka odbačena je stara hipoteza Helmholtza (H. von Helmholtz) iz 1853 godine, koji je postavio teoriju da se Sunčeva energija oslobađa u toku procesa skupljanja, kontrakcije Sunca, ustvari da se rad gravitacionih sila pretvara u toplotu. Tako je već krajem 19. veka, 1899 godine, američki naučnik Čemberlin (T. C. Chamberlin) istakao da Helmholtz u svojoj hipotezi ne uzima u obzir »latentne energije atomske ili ultra-atomske prirode«.

Daljim naučnim otkrićima i boljim upoznavanjem pojave radioaktivnosti sve se više učvršćuje ideja o atomu kao mogućem izvoru energije. Pjer i Marija Kiri, 1902 godine, pišu: »Svaki atom jedne radioaktivne supstance se ponaša kao stalni izvor energije...« E. Rutherford i F. Sodi, 1903 godine, u svojoj postavci odlaze još dalje: »Svi atomi, a ne samo radioaktivni, poseduju ogromne količine energije. Sva razmatranja dovode do zaključka da energija latentna u atomu mora da bude ogromna u poređenju sa onom koja se oslobađa prilikom obične hemijske promene«.

Engleski astronom Džinz (J. H. Jeans) predložio je, 1904 g., šemu dobijanja radioaktivne energije, po kojoj bi: »... sjedinjavanje pozitivnih i negativnih čestica (jona) imalo za rezultat iščezavanje izvesne količine mase... a kao posledicu porast materijalne energije«. Tačno objaš-

njenje odnosa mase i energije dao je A. Ajnštajn, 1905 godine, u svojoj poznatoj jednačini ekvivalentnosti ta dva vida materije.

Docnije su američki naučnici, V. D. Harkinis i E. D. Vilson, 1915 g., polazeći od eksperimentalnih podataka i merenih težina atoma raznih elemenata, i od ne potpuno ispravne postavke da su svi atomi izgrađeni od vodonika, izračunali »gubitak mase«, tj. energiju koja bi se oslobađala prilikom stvaranja, iz atoma vodonika, 4 grama helijuma. To je bio skoro direktan povod A. S. Edingtonu (Eddington) da 1920 g. postavi svoju teoriju: »Zvezde se koriste ogromnim rezervoarom energije... koji ne može biti drugi do subatomska energija«. Edington dalje razvija misao da energija koja se oslobađa u zvezdama potiče od »intimnog« sjedinjavanja atoma vodonika u atome složenih elemenata, naročito helijuma. Sličnu hipotezu dao je i Francuz F. Peren (Perrin), koji je pretpostavio da je za energije kojima raspolažu zvezde odgovoran proces izgradnje težih elemenata od protona i elektrona.

Edingtonova teorija naišla je na široko interesovanje. Međutim, još uvek nije bilo nađeno zadovoljavajuće rešenje i mehanizam koji bi objašnjavali izgradnju helijuma od atoma vodonika.

Kada je F. V. Aston, 1927 godine, objavio svoju poznatu eksperimentalnu krivu, koja je pokazivala »defekt mase«, tj. »isparenje« i »gubitak« mase pojedinih sastavnih čestica jezgara, koji se javljao kao oslobođena energija prilikom izgradnje jezgara, i kada je nešto detaljnije upoznat mehanizam nuklearnih reakcija, pitanje oslobađanja energije u zvezdama ponovo je razmotreno.

Tako su R. D. E. Atkinson i F. F. Houtermans, 1929 godine, pretpostavili da se oslobođenje energije u zvezdama javlja kao rezultat nuklearnih reakcija pod vrlo visokim temperaturama. U uslovima od 15 do 30 miliona stepeni, kakvi vladaju, naprimer, u unutrašnjosti Sunca, protoni i jezgra lakih elemenata kreću se dovoljno velikim brzinama da mogu da savladaju barijere odbojnih sila pozitivnog naelektrisanja. Dolazi do fuzije vodonika i drugih lakih elemenata u dovoljnom iznosu da mogu da se dobiju energije reda veličine koje zvezde

zrače. Nuklearne reakcije pod uslovima tako visokih temperatura nazvane su termonuklearne reakcije. Uskoro zatim su Kondon (E. U. Condon) i Gerni (R. Gerney), kao i G. Gamov i teoriski obračunali doprinos oslobođenja energije u termonuklearnim procesima, za razne elemente i razne gustine i temperature, po već ranije postavljenim teorijama o nuklearnim reakcijama.

Ipak, teorija termonuklearnih reakcija nije mogla dalje da se razvija, jer još nisu postojali dovoljni podaci o procesima fuzije kod lakih elemenata. Tek pošto su J. D. Kokroft i E. T. S. Valton, 1932 godine, pronašli način i konstruisali prvi uređaj, akcelerator, kojim su mogli da ubrzaju protone do energije dovoljne za nuklearne reakcije, i uspjeli da bombardujući protonima litijum dobiju dva jezgra helijuma, otpočelo je detaljnije proučavanje raznih tipova nuklearnih procesa.

Znatno docnije, 1938 godine, raspoloživi podaci omogućili su Beteu (H. Bethe), a istovremeno i Vajeseneru, da predlože jednu povezanu šemu reakcija koja bi odgovarala brzini oslobađanja energije kod Sunca. Ustvari to je jedan lanac reakcija, poznat pod nazivom »ciklus ugljenika«, u kome kao krajnji rezultat dolazi do fuzije četiri protona u jedno jezgro helijuma, praćeno oslobođenjem energije.

Sve do otkrića fisije jezgra, 1939 godine, nije izgledalo da bi moglo na zemlji da se nađe tehničko rešenje postizanja potrebnih uslova termonuklearnih reakcija. Međutim, već u prvim godinama rada na razvoju reaktora i atomske fisione bombe razmatrana je i mogućnost termonuklearnog oružja. U leto 1942 godine Openhajmer (J. B. Oppenheimer) i E. Teller u SAD već su postavili i izvestan radni program. Početkom 1943 godine u laboratorijuma u Los Alamosu, po Openhajmeru: »... otpočelo je proučavanje osobina tricijuma, i drugih materijala, od mogućeg interesa za termonuklearni program«. Openhajmer 1944 god. prijavljuje patent termonuklearne bombe. Od tada se rad na termonuklearnim eksplozivima ne skida sa dnevnog reda, mada Openhajmer 1945 izjavljuje da »ne treba nastaviti rad na termonuklearnom oružju«, zbog čega je uklonjen iz Los Alamosa.

Dok su svi ovi podaci praktično i do danas ostali nepoznati širokoj javnosti, austrijski fizičar Tiring (H. Thirring) u svojoj knjizi o istoriji atomske bombe, krajem 1945 g., pisao je o mogućnosti termonuklearne bombe, polazeći od pretpostavke da bi eksplozija fisione uranove ili plutonske bombe mogla da stvori početne uslove visokih temperatura za termonuklearne reakcije. Tiring je predvideo pravi put. U SAD je Teler (E. Teller) 1951 godine završio sve potrebne proračune i prvi eksperimenti sa termonuklearnim eksplozivima izvršeni su u operaciji »Grinhaus«, maja te godine.

Uskoro zatim uspela je i konstrukcija prve stvarne termonuklearne bombe, ekvivalenta 5 do 7 megatona, koja je eksplodirala na Maršalskim Ostrvima, 1 novembra 1952 godine. Nekoliko meseci kasnije, 20 avgusta 1953 godine, L. L. Štraus, predsednik američke Atomske komisije, saopštio je da su kontrolna mesta za nuklearne eksplozije u SAD registrovala eksploziju termonuklearne bombe u SSSR-u.

Time rad na termonuklearnom gorivu i eksplozivu nije bio završen. Naprotiv, postao je intenzivniji. Cilj radova je dvojak: prvo, pronaći drugi tip »upaljača« za termonuklearno oružje, umesto fisioničkih atomskih bombi; i drugo, ovladati termonuklearnim reakcijama za mirnodopsku primenu, tj. izgraditi termonuklearne reaktore. Oba pitanja su usko povezana, jer bi pronalaženje novog tipa paljenja moglo da omogući realizaciju termonuklearnih reaktora, a na polju nuklearnog oružja to bi značilo da bi i manje količine termonuklearnog eksploziva mogle da se koriste, što nije slučaj sa fisionim eksplozivima čija je donja granica dejstva praktično određena kritičnom masom.

Prva saopštenja o novijim rezultatima na polju termonuklearnih sistema dao je ruski naučnik M. G. Mersčijakov, jula 1955 god.: »... da se u Sovjetskom Savezu uveliko radi na termonuklearnim reaktorima«. Avgusta meseca iste godine, na Konferenciji za mirnodopsku primenu atomske energije, organizovanoj od strane Ujedinjenih nacija u Ženevi, predsednik Konferencije Baba (H. Bhabha) izneo je mišljenje da može da se očekuje da će termonu-

klearne reakcije biti potpuno savladane u periodu od sledećih 20 godina. Uskoro zatim ser Džon Kokroft u Engleskoj, Smit (H. D. Smith) u Americi i Z. V. Kurčatov iz SSSR-a, objavili su i izvesne veoma ograničene pojedivosti o radovima na termonuklearnim reaktorima u tim zemljama. Orijentacija i pravac istraživanja uglavnom ukazuju da se radi o pronalaženju novih tipova »upaljača« termonuklearnih reakcija. Francuska je isto tako nedavno dala nezvaničnu i kratku opštu vest da se i njeni naučnici interesuju za isti problem.

Međutim, kao najnovije dostignuće na polju termonuklearnih goriva i eksploziva, može se smatrati zvanično saopštenje američke Atomske komisije da je 5 maja 1956 godine izvršena probna eksplozija »džepne hidrogenske bombe«, ekvivalenta energije od 1000 tona TNT, zasnovane »na novim naučnim principima otkrivenim u laboratorijama Atomske komisije«. Iz toga saopštenja moglo bi se zaključiti da je otkriven nov tip upaljača umesto fisioh atomskih bombi, kod kojih eksplozivna energija nominalnih bombi iznosi već 20.000 tona TNT. Sa vojne tačke gledišta to bi moglo da znači da su otvorena vrata i ka taktičkom termonuklearnom oružju, sa daleko manjom eksplozivnom energijom od fisioh bombi, dok su se do sada termonuklearni eksplozivi koristili praktično isključivo za »super« nuklearne bombe, a u pogledu kontrolisanog sagorevanja termonuklearnih goriva da su pronađeni put i metode od kojih se može očekivati rešenje praktične primene.

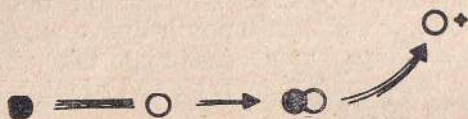
NUKLEARNI PROCESI FUZIJE

Izgradnja jezgra, naročito lakih elemenata, praćena je znatnim oslobodjenjem nuklearne energije.

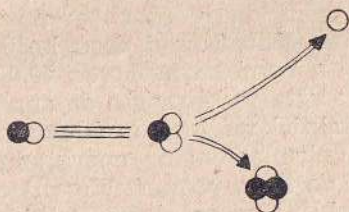
Sjedinjavanjem dva protona u jedan deutron oslobađa se $1,4 \text{ MeV}$ -a¹⁾ po nuklearnom procesu; a prilikom

¹⁾ MeV je simbol za jedan milion elektronvolti. Elektronvolt je jedinica za energiju, to je kinetička energija koju dobija elektron u električnom polju potencijalne razlike od 1 volta i odgovara $4,44 \times 10^{-20} \text{ KVC}$.

dobijanja jezgara helijuma 4, od teškog²⁾ i superteškog vodonika³⁾ (deuterijuma i tricijuma), 17,6 MeV-a. Po kilogramu mase polaznih elemenata, to bi predstavljalo energiju od 20 miliona, odnosno 90 miliona kilovatčasova.



Slika 1. — Šema nuklearne reakcije: $p + p \rightarrow D + e^+ + 1,4 \text{ MeV}$ -a. Prilikom fuzije protona u deuterone dolazi do pojave pozitrona (pozitivnog elektrona). Po kg mase termonuklearnog gasa oslobada se energije 19 miliona kwč.

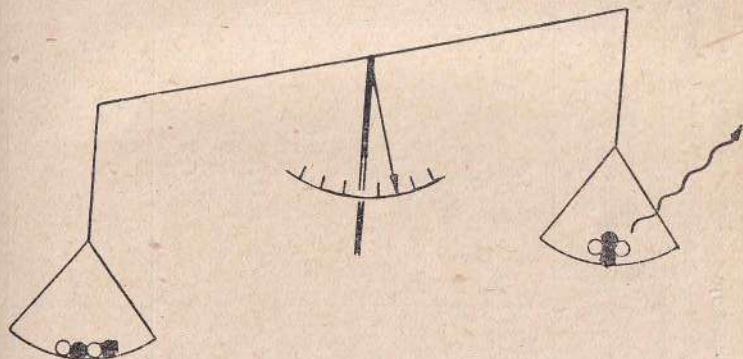


Slika 2. — Šema nuklearne reakcije: $D + T \rightarrow 2 \text{ He}^4 + n + 17,6 \text{ MeV}$ -a. Prilikom fuzije deuterona i tritona dobija se jedna alfa čestica, jezgro helijuma 4, i jedan neutron. Po kg mase termonuklearne mešavine izotopa vodonika oslobada se energije 93 miliona kwč.

²⁾ Teški vodonik = deuterijum, D: izotop vodonika, mase 2. Teški vodonik je atom vodonika, samo je po masi dva puta teži od atoma običnog vodonika. U prirodi se nalazi 1 atom teškog vodonika na 6500 atoma običnog vodonika.

³⁾ Superteški vodonik = tricijum, T: izotop vodonika, mase 3. Superteški vodonik je atom vodonika, samo po masi tri puta teži od običnog vodonika. Superteški vodonik je radioaktivan, praktično se ne nalazi u prirodi, a za potrebe atomske energije proizvodi se veštački, preko nuklearnih reakcija.

Do danas je poznato i proučeno preko stotinu tipova procesa fuzije lakših elemenata. Kod procesa fuzije do oslobođenja energije dolazi usled »defekta mase« pri izgradnji jezgara, »isparenja« mase pod dejstvom nuklearnih sila. Prilikom izgradnje jezgra helijuma 4, od 4 protona, defekt mase iznosi oko 0,75% ukupne mase protona. Energija koja se oslobađa u jednoj nuklearnoj reakciji različita je i zavisi od tipa nuklearne reakcije.



Slika 3. — Šematska pretstava dejstva nuklearnih sila i oslobođenja energije prilikom izgradnje jezgara od sastavnih, osnovnijih čestica: jedan deo mase se »isparava« i javlja u vidu energije. Taj proces je ustvari poznati Ajnštajnov odnos mase i energije.

Jezgro helijuma, alfa čestice, izgrađeno od 2 protona + 2 neutrona, lakše je po masi za 0,75% od mase sastavnih čestica.

Da bi do jednog procesa fuzije moglo da dođe, protoni ili laka jezgra koji učestvuju u procesu, moraju imati dovoljno energije da savladaju odbojne sile naelektrisanja (Coulomb barijeru). U laboratorijama, da bi se proučile nuklearne reakcije i procesi fuzije, protoni i deuteroni, pa čak i druga jezgra, ubrzavaju se u akceleratorima do potrebnih energija.

Termonuklearne reakcije

Međutim, pod izvesnim uslovima, moguće je ubrzati ne samo pojedine čestice, kao kod akceleratora, već i sve čestice čak i velikih količina raznih elemenata, do dovolj-

TABELA I

Srednja brzina reakcije i doprinos proizvodnje energije u termonuklearnim sistemima, pod uslovima koji vladaju na Suncu: $t=20,000.000^{\circ}\text{C}$, gustina 80 gr/sm^3 , koncentracija $0,35$:

Tip reakcije	Srednje trajanje reakcije — red veličine:	Oslobodena energija po nuklearnom procesu u MeV-ima:	Doprinos oslobodene energije u kwč, po kg. u sek—red veličine:
$\text{P} + \text{p} \rightarrow \text{D} + \text{e} + \gamma$	10^{12} godina	1,4	$2,8 \cdot 10^{-11}$
$\text{p} + \text{D} \rightarrow {}_2\text{He}^3 + \gamma$	0,5 sekundi	5	$1,1 \cdot 10^9$
$\text{p} + \text{T} \rightarrow {}_2\text{He}^4 + \gamma$	0,05 sekundi	20	—
$\text{D} + \text{D} \rightarrow {}_2\text{He}^3 + \text{n}$	$3/100.000$ sekunde	3,3	$2,8 \cdot 10^7$
$\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} + \text{p}$	$3/100.000$ sekunde	4	—
$\text{T} + \text{D} \rightarrow {}_2\text{He}^4 + \text{n}$	million. deo sekunde	17,6	—
$\text{T} + \text{T} \rightarrow {}_2\text{He}^4 + 2\text{n}$	—	11,4	—
${}_3\text{Li}^6 + \text{n} \rightarrow \text{T} + {}_2\text{He}^4$	—	4,8	—
${}_3\text{Li}^6 + \text{p} \rightarrow {}_2\text{He}^3 + {}_3\text{He}^4$	(5 sek.)*	—	$8,8 \cdot 10^7$

Tip reakcije	Srednje trajanje reakcije — red veličine:	Oslobodena energija po nuklearnom procesu u MeV-ima:	Doprinos oslobodene energije u kvč, po kg. u sek—red veličine:
${}_3\text{Li}^7 + p \rightarrow {}_4\text{Be}^8 + \gamma$	(1 min.)	17,2	—
${}_3\text{Li}^7 + p \rightarrow {}_2\text{He}^4$	million. deo sekunde	17,3	$2,8 \cdot 10^7$
${}_3\text{Li}^6 + D \rightarrow {}_2\text{He}^4$	—	22,4	—
${}_3\text{Li}^7 + D \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^6$	—	14,2	—
${}_3\text{Li}^7 + D \rightarrow {}_4\text{Be}^8 + n$	—	15	—
${}_3\text{Li}^6 + T \rightarrow {}_2\text{He}^4 + n$	—	15,9	—
${}_2\text{He}^4 + {}_3\text{Li}^7 \rightarrow {}_5\text{B}^{11} + \gamma$	$(4 \times 10^{14}$ godina)	8,5	$5,6 \cdot 10^{-14}$
${}_2\text{He}^4 + {}_6\text{C}^{12} \rightarrow {}_8\text{O}^{16} + \gamma$	$(10^{33}$ godina)	7,3	$2,8 \cdot 10^{-32}$

* Srednja vremena trajanja termonuklearnih reakcija, navedena u zagradama, proračunata su teorijski po Gamow-u, a ostali podaci uzeti su iz objavljenih literature.

nih energija za pojavu reakcija fuzija. 1. Pri visokim temperaturama, od desetina miliona stepeni i većih, usled termičkog kretanja, čestice stižu potrebne brzine da mogu savladati odbojne sile pozitivnog naelektrisanja i približe se jedna drugoj na otstojanja na kojima vladaju nuklearne sile. Tako prosečna brzina vodonikovih molekula ili atoma iznosi 1.800 metara u sekundi na 30°C, 18 kilometara na 30.000°C, a 180 kilometara na 3 miliona stepeni temperature. Proces fuzije pri visokim temperaturama, termonuklearne reakcije, odigravaju se u unutrašnjosti zvezda u vasioni.

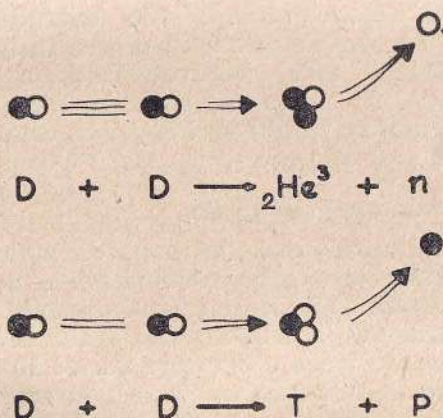
Kod termonuklearnih sistema jedan od najvažnijih faktora jeste temperatura sistema, ustvari energija čestica, koja određuje kako brzinu oslobodjenja energije, koja se definiše kao »specifična oslobođena energija«, tj. doprinos u sekundi po gramu termonuklearnog goriva, tako i tip nuklearne reakcije koja se odigrava.

Drugi važan faktor u termonuklearnim procesima jeste koncentracija termonuklearnog goriva, jer od koncentracije, broja jezgara/sm³, zavisi doprinos oslobođene energije u sekundi po sm³ zapremine.

Ukoliko bi se uzela jedna mešavina raznih tipova jezgara, sa porastom temperature prvo bi otpočele reakcije između protona i najlakših jezgara, tek docnije između alfa čestica i drugih lakih elemenata, i najzad, za znatno više temperature mogli bi da postanu značajni i direktni sudari između težih jezgara. S druge strane, u termičkom kretanju sve čestice nemaju istu brzinu i energiju, i uvek je manji broj čestica koje imaju veće brzine od prosečne brzine čestica celog sistema. Prema tome, sa porastom temperature, kako raste prosečna brzina čestica, raste i broj čestica sa većom energijom, kao i količina oslobođene energije po sekundi i jedinici mase. Sa porastom temperature termonuklearni proces postaje »brži« i intenzivniji.

Tako, naprimer, proces fuzije mešavine jednog grama izotopa litijuma 7 i vodonika, pri kome bi se ukupno oslobodilo 58.000 kwč energije, trajao bi na laboratorijskim temperaturama, od nekoliko hiljada stepeni, milijarde godina, jer bi u jednoj sekundi dolazilo do fuzije

samo izvesnog broja čestica mešavine, a na 20 miliona stepeni proces bi se odigrao eksplozivno, praktično sa trenutnom fuzijom cele mase. Na temperaturi od 20 miliona stepeni, proces fuzije 1 grama mešavine hlora sa vodonikom trajao bi milijardu milijardi milijardi godina, oko 10^{25} , a vreme fuzije mešavine olova i vodonika moglo bi se pretstaviti jedino astronomskim ciframa, oko 10^{250} godina. Procesi fuzije mešavine jezgara helijuma 4 (alfa čestica), sa lakim jezgrima, na toj istoj temperaturi trajali bi stotine miliona milijardi godina, i njihov doprinos postao bi nešto znatniji tek za temperature preko 50 miliona stepeni.



Slika 4. — Šematska pretstava dva različita tipa fuzije deuterona:

1. $D + D \rightarrow {}_2\text{H}^3 + n + 3,3 \text{ MeV-a}$
2. $D + D \rightarrow T + p + 4 \leftarrow \text{MeV-a}$

Prilikom fuzije deuterona moguća su oba tipa reakcije: formiranje jezgra helijuma 3 više jedan neutron, ili formiranje tritona više jedan proton. Ustvari se odigravaju oba procesa paralelno, sa praktično istom verovatnoćom. Tako bi se, po kg termonuklearnog gasa, za prvi proces dobilo 22, a za drugi 26 miliona kwč oslobođene energije.

Prema tome, sa porastom temperature jednog termonuklearnog sistema raste doprinos oslobođene energije, koji u isto vreme naglo opada sa naelektrisanjem čestica, ukoliko se radi o težim elementima. Međutim, od tog

opšteg pravila ima izvesnih odstupanja. Nuklearni procesi fuzije su vrlo individualni i zavise uveliko od tipa čestica koje u procesu učestvuju. Tako, pri istim uslovima temperature, od 20 miliona stepeni, proces fuzije jednog grama protona u deuterijum trajao bi oko 10 milijardi godina, a jednog grama deuterijuma i tricijuma u jezgra helijuma, oko milioniti deo sekunde. Pri istoj temperaturi od 20 miliona stepeni i istom naelektrisanju čestica, kao reakciji izotopa litijuma 6 i litijuma 7 sa običnim vodonikom, proces fuzije mešavine jednog grama termonuklearnog goriva, po teoriskim proračunima, za litijum 6 trajao bi 5 sekundi, a za litijum 7 oko jedan minut. To znači da, iako čestice imaju iste energije, ne mora pri svakom sudaru da se odigra proces fuzije, već da za to postoji veća ili manja verovatnoća, koja je karakteristična za svaki tip nuklearne reakcije. Ukoliko je proces verovatniji, utoliko će biti veći doprinos oslobođene energije, po gramu u sekundi.

Termonuklearni sistem Sunca

Termonuklearne reakcije mogu da budu i vrlo složene, da se sastoje iz niza pojedinačnih reakcija povezanih u jednu celinu. Sunce zrači na sekundu oko 100 hiljada milijardi milijardi kw, tačno $4 \cdot 10^{23}$ KW, što odgovara pretvaranju mase u energiju od $4,4 \cdot 10^6$ tona. Da se dobije toplotni ekvivalent energije koju zrači Sunce trebalo bi svakih 5 dana sagoreti jednu kuglu kamenog uglja veličine Zemlje. Temperatura u centru Sunca iznosi oko 20 miliona stepeni, a na površini oko 7.000°C . Pritisци u centru Sunca su proračunati na 100 milijardi atmosfera. Pa ipak Sunčeva masa se nalazi u gasnom obliku, koji je usled velikog pritiska vrlo sabijen, i ima prosečnu specifičnu gustinu od oko $1,4 \text{ gr sm}^3$, a specifičnu gustinu u centru oko 80 gr/sm^3 . Pod tako visokim temperaturama ne postoje više atomi i molekuli u svom normalnom stanju. Prilikom međusobnih sudara otrgnuti su od atoma svi elektroni, i celokupna masa pretstavlja mešavinu golih jezgara i elektrona, i takav gas može da ima mnogo veće gustine od gasa sastavljenog od atoma i molekula. Masa Sunca sastoji se pretežno od vodonika,

oko 35 procenata. Međutim, doprinos oslobođene energije po gramu mase Sunca na sekundu je vrlo mali i iznosi manje od milijarditog dela vata, 2 erga/gr/sek.

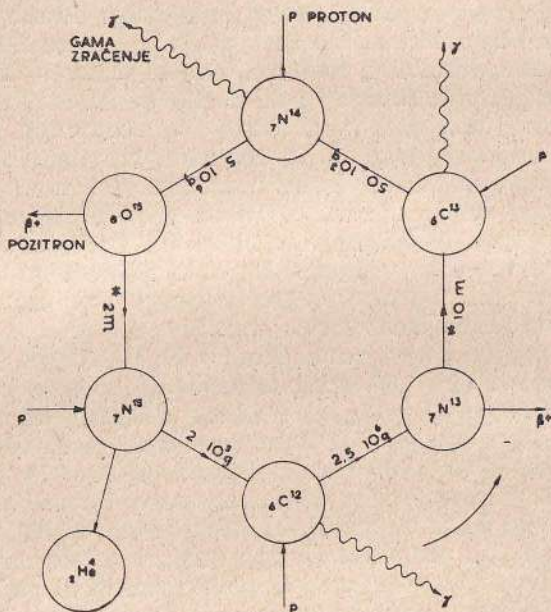
Za termonuklearni sistem Sunca trebalo je pronaći odgovarajuću reakciju fuzije koja bi zadovoljila postojeće uslove temperatura i doprinosa energije. Tip reakcije izgradnje deuterijuma od protona pokazao se suviše spor i dao bi manji doprinos energije. S druge strane, procesi fuzije sa litijumom su suviše brzi. Da u centru Sunca postoje znatnije količine litijuma, ono bi doživelo katastrofalnu eksploziju. Slično bi se desilo sa izvesnim reakcijama berilijuma ili bora u fuziji sa protonima. Zato je predložen čitav jedan lanac reakcija, šematski pretstavljen na slici 5. Po toj šemi, u jednom kružnom ciklusu, počevši od fuzije ugljenika 12 sa protonima, učestvuju ugljenik, azot i oksigen, da bi se na kraju zatvorenog ciklusa dobio opet ugljenik 12, a četiri protona reakcije bila sjedinjena u jedno jezgro helijuma. Ceo ciklus traje oko 5 miliona godina. Čist bilans reakcije je fuzija četiri protona u jedno jezgro helijuma, koji daje po jednom kg vodonika oko 180 miliona kwč oslobođene energije. Za održavanje uslova koji vladaju u Suncu, kao i količine zračene energije, u Suncu se svake sekunde treba da izgradi 560,000.000 tona helijuma od 564,000.000 tona vodonika. Računa se da je Sunce staro 10 milijardi godina i da je do sada izračilo u energiji ispod 1⁰/₁₀₀ ukupne svoje mase, pa prema tome ima rezervi u termonuklearnom gorivu, vodoniku, za još stotine milijardi godina.

Ugljenikov ciklus se smatra da je u osnovi odgovoran najvećim delom za oslobođenje energije u Suncu. Međutim, jasno je da procesi u Suncu nisu tako jednostavni i određeni, i da se verovatno pored ugljenikovog ciklusa odigrava paralelno i niz drugih nuklearnih reakcija, koje je teško jednostavno obuhvatiti i prikazati.

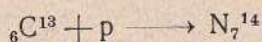
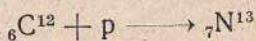
Termonuklearna goriva i eksplozivi

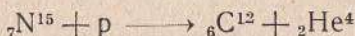
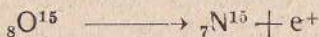
Da bi jedan termonuklearni sistem, kao Sunce, mogao da se održava, treba imati u vidu da oslobođena energija u procesima fuzije mora da drži konstantnom temperaturu celog sistema i da pokriva toplotne gubitke

koji nastaju zračenjem. U termonuklearnim reakcijama na Suncu doprinos oslobođene energije je vrlo mali, i održavanje termonuklearnog sistema je moguće jedino usled ogromne mase Sunca, gde iza svakog sm^2 površine Sunca, koja zrači, stoji $3 \cdot 10^5$ tona njegove mase. Pod

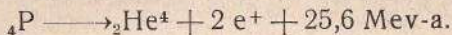


Slika 5. — Šematska pretstava ugljenikoveg ciklusa termonuklearnog sistema na Suncu. Ciklus obuhvata sledeće reakcije:





Procesi označeni zvezdicom su radioaktivni. Posle prosečno 5 miliona godina javlja se ponovo početno jezgro ${}_6\text{C}^{12}$. Čist bilans procesa bi bio:

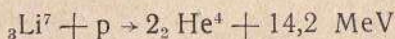


Po kg mase termonuklearnog gasa protona dobija se oko 180 kwč oslobođene energije.

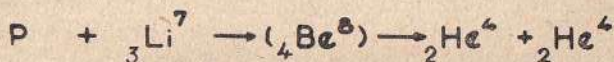
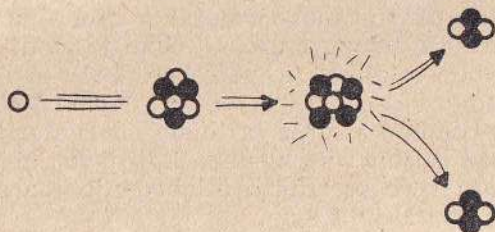
istim uslovima kao na Suncu, ciklus ugljenika u jednom kubnom metru bi se ugasio zbog velikih toplotnih gubitaka, pa čak ne bi mogao da se održi ni u dimenzijama Zemlje. Teoriski, da bi se ugljenikov ciklus odigravao u jednom termonuklearnom sistemu dimenzija Zemlje, bila bi potrebna koncentracija mase od preko 1 tone po sm^3 , pa i tada znatno više temperature. Ukoliko je manji termonuklearni sistem, utoliko je potreban veći doprinos energije po gramu i sekundi, da bi se održao. S druge strane, ako bi se Sunčeva masa sastojala od deuterijuma i tricijuma, ili od litijuma i vodonika, koji pod tim temperaturama imaju veće specifično oslobođenje energije, proces bi se odigrao eksplozivno.

Za termonuklearne eksplozivne sisteme, koji se razlikuju od kontrolisanih sistema po brzini odvijanja procesa, odnosno po trenutnom oslobođenju energije ukupnog termonuklearnog goriva, problem se postavlja u drugom vidu. Sam termonuklearni sistem mora da bude dovoljno brz, sa brzim i dovoljnim doprinosom oslobođene energije, da se u sistemu pre eksplozije utroši efektivno sav nuklearni eksploziv. Temperatura »paljenja« potrebno je da bude što viša, pošto od temperature zavisi brzina »specifičnog sagorevanja« termonuklearne eksplozivne mešavine. Uslovi su utoliko povoljniji, ukoliko u celom sistemu temperatura raste i postaje sve viša, jer se time ubrzava proces eksplozije.

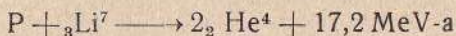
Među mnogobrojnim poznatim reakcijama fuzije, ističu se naročito dva termonuklearna sistema, za koje se smatra da pri temperaturama od 20 i više miliona stepeni »sagorevaju« u milionitom delu sekunde. To je fuzija deuterijuma i tricijuma, kao i litijuma 7 i protona:



Prema stranoj stručnoj literaturi prvi proces bi se koristio u bombi vodoničnog tipa, a drugi u litijumskoj bombi. U prvoj reakciji, po kg čiste termonuklearne mešavine oslobađalo bi se 93 miliona, a u drugoj 58 miliona kwč energije. Po izvesnim objavljenim pretpostavkama, litijumski proces zahtevao bi više početne temperature paljenja od hidrogenskog procesa deuterijuma i tricijuma.



Slika 6. — Šema nuklearne reakcije:

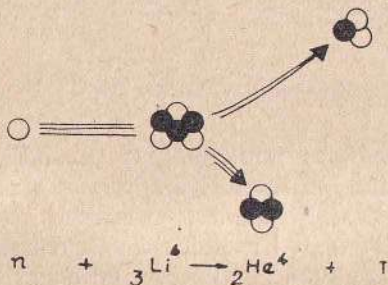


Kod te reakcije pretpostavlja se da se litijum 7 i proton prvo spoje u jedno složeno jezgro, $\text{Be} \frac{8}{4}$ vrlo nestabilno, koje se u roku od sto hiljada milijarditog dela sekunde raspadne na dva jezgra helijuma mase 4.

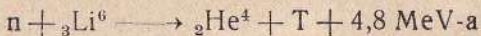
Po kg mase termonuklearne mešavine oslobađa se 58 miliona kwč energije.

Termonuklearni procesi fuzije mogu da se podele na više tipova:

1) Takozvani direktni termonuklearni procesi, kao hidrogenski proces, fuzija deuterijuma i tricijuma, ili litijumski proces fuzije litijuma 7 i protona, itd. Kod tih tipova procesa, posle izvršene fuzije, nastaju čestice koje dalje ne uzimaju učešća u novim procesima fuzije. To nije lančani tip reakcija kao u slučaju fisije jezgara. Nuklearno gorivo sagoreva dok postoje aktivni elementi termonuklearnih reakcija. Oslobođena energija služi za održavanje ili povećanje temperature termonuklearnog sistema. Naprimera, u slučaju procesa litijuma 7, dva nastala jezgra helijuma svoju veliku energiju sudarima prenose na ostale čestice sistema i »zagrevaju« ceo sistem.



Slika 7. — Šema nuklearne reakcije:



Reakcija ne spada u termonuklearne, jer se odvija i za vrlo niske energije neutrona, tj. na normalnim temperaturama. Međutim, reakcija je dvojako važna:

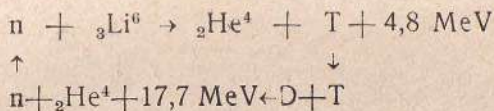
1. kao jedna grana termonuklearnog ciklusa fuzije deuterijuma i tricijuma, u termonuklearnoj mešavini litijuma 6 i deuterijuma; i

2. što je to polazna reakcija proizvodnje tricijuma.

Reakcija ima karakteristike slične fisiji: pod dejstvom sporih neutrona, od litijuma 6 dobijaju se jezgra helijuma 4 i tricijuma. Po kg mase oslobađa se 18 miliona kwč energije.

2) Tipovi procesa koji su ciklični, kao ugljenikov proces termonuklearnog sistema Sunca, u kome se posle završenog ciklusa ponovo javlja, regeneriše, jedna od čestica procesa. Teoriski je moguć veliki broj raznih cikličnih procesa, uz učešće raznih elemenata, i težih od ugljenika. Ti tipovi procesa, obično, zahtevaju znatno više temperature, velike astronomske geometriske dimenzije i pripadaju sporijim termonuklearnim sistemima. Ciklični termonuklearni sistemi još nisu dovoljno proučeni i ispitani.

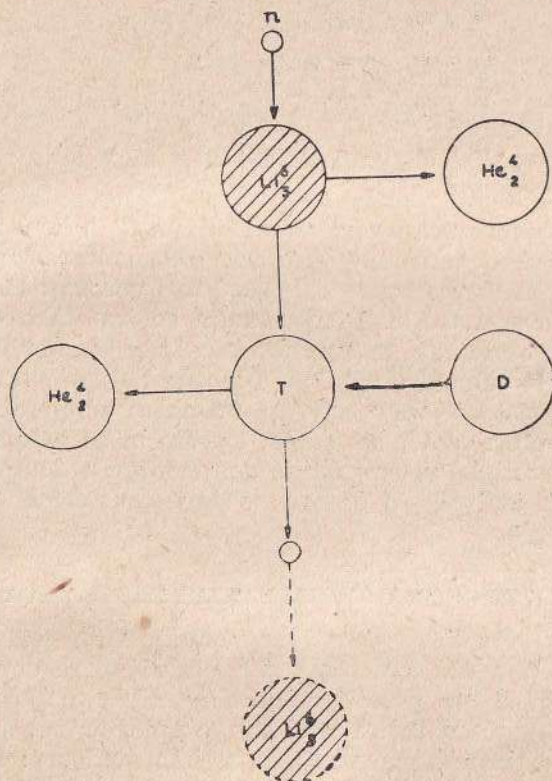
3) Tipovi procesa sa izvesnom sličnošću sa lančanim sistemima, u kojima se posle fuzije javljaju čestice koje dalje učestvuju u termonuklearnim reakcijama. Primer je tip procesa:



Fuzija litijuma 6 sa neutronom proizvodila bi tricijum, a fuzija tricijuma sa deuterijumom predstavljala bi izvor neutrona koji bi dalje obnavljao reakcije sa litijumom 6. Ciklus se odvija u dve reakcije i zatvara se. Međutim, u toku procesa proizvode se čestice koje aktivno učestvuju u održavanju sistema i dolazi do neke vrste lančanog povezivanja reakcija. Ipak, i taj sistem je termonuklearnog tipa. Mada za reakcije litijuma 6 sa neutronima nisu potrebne visoke temperature, jer se reakcija odigrava dajući znatan doprinos i sa sporim neutronima, fuzija deuterijuma i tricijuma zahteva termonuklearne uslove. Pretpostavlja se da se i taj tip procesa koristi u termonuklearnim eksplozivnim sistemima.

U stvarnosti, u termonuklearnim mešavinama, obično se paralelno odvija više tipova reakcija. U jednostavnim slučajevima, za jednu datu temperaturu jedna od reakcija je najznačajnija, dok se ostale po svom doprinosu

mogu zanemariti. Međutim, češće u doprinosu učestvuju skoro ravnopravno dve, pa i više reakcija. U termonuklearnoj mešavini tricijuma i deuterijuma odigravala bi se



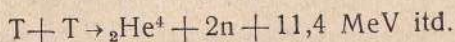
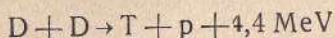
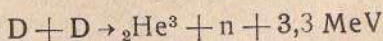
Slika 8. — Šematski prikaz reakcije fuzije tricijuma i deuterijuma, proces koji se odigrava u dva stepena, od polazne termonuklearne mešavine litijuma 6 i deuterijuma.

Prvi stepen daje tricijum, koga nema u polaznoj mešavini, kao proizvod nuklearne reakcije između neutrona i litijuma 6.

Drugi stepen je fuzija deuterijuma i dobijenog tricijuma, pri čemu se pojavljuje i neutron, koji dalje služi za obnavljanje prvog stepena sa litijumom 6.

Čist bilans oba stepena su dva jezgra helijuma 4 više, ukupno 22,4 MeV-a. Po kg mase dobija se oslobođenje energije od oko 75 miliona kwč.

sigurno i reakcija fuzije između tricijuma i tricijuma. Postojalo bi više konkretnih procesa:



Koji bi od procesa bio predominantan, ili u kom bi procentu učestvovao u razvoju termonuklearnih reakcija, zavisilo bi od temperature sistema, kao i verovatnoće različitih tipova reakcije. Pretpostavlja se isto tako da kao eksploziv može da se koristi skoro sam deuterijum, sa manjom količinom tricijuma. Početno paljenje termonuklearnog sistema obezbedila bi, na nižim temperaturama, fuzija deuterijuma i tricijuma, i pošto bi se temperatura sistema postigla, proces fuzije deuterijuma i deuterijuma ustvari bi prihvatio i obrazovao dalji tok termonuklearnih reakcija.

ELEMENTI TERMONUKLEARNIH EKSPLOZIVA

Karakteristike i podaci termonuklearnih goriva koji se upotrebljavaju kao eksplozivi praktično se uopšte ne objavljuju, mada postoji veliki nagomilan materijal sakupljen u dosadašnjim probnim eksplozijama. Ipak se sa sigurnošću može smatrati da se kao nuklearni eksplozivi za sada koriste jedino mešavine izotopa elemenata vodonika i litijuma kao i njihova jedinjenja, koja mogu da obrazuju brze termonuklearne sisteme.

1. Vodonik

Latinsko ime vodonika je hidrogen, od hydros = voda. Otkrio ga je engleski naučnik Kavendiš (Cavendish) 1766 godine. Tačka topljenja — 259,14°C, tačka ključanja — 252,7°C. Specifična težina 0,089 gr po litru.

Vodonik se nalazi u prirodi najviše u jedinjenjima sa kiseonikom, kao voda, zatim u kiselinama, bazama, alkoholima, ugljenim hidratima, itd. Industrijski se koristi u velikim količinama, a dobija se elektrolizom vode, dekompozicijom ugljenih hidrata na toploti i izdvajanjem iz kiselina pomoću izvesnih metala.

Vodonik ima tri izotopa: obični vodonik, protijum; teški vodonik, deuterijum i superteški vodonik, tricijum. U prirodnoj mešavini deuterijum se nalazi u odnosu 1 : 6.500, a tricijum je mnogo ređi, u odnosu 1 : 10^{17} (jedan prema sto miliona milijardi) atoma običnog vodonika.

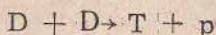
Deuterijum

Prvi teži izotop vodonika otkrili su 1931 godine u SAD Juri (H. G. Urey), Brikved (F. G. Brickwedde), i Merfi (G. M. Murphy), pošto su uparili 4 litra teškog vodonika na 1 sm^3 . Temperatura ključanja čistog deuterijuma je — $24,66^\circ\text{C}$. Teški izotop je dobio ime deuterijum — »drugi«, a po težini je oko dva puta teži od običnog vodonika.

Deuterijum se danas industrijski proizvodi, i smatra se kao jedna od sirovina nuklearne energije. Metode proizvodnje su elektroliza vode, i novija rentabilna metoda razmena jona lakog i teškog vodonika. Obe metode daju tešku vodu kao finalni produkt, koja može da ima do 99,99% teškog vodonika, a po potrebi se izdvaja kao čist deuterijum. Svetska cena teške vode po 1 kg je oko 62 dolara.

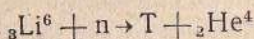
Tricijum

Superteški izotop vodonika otkrili su 1934 godine E. Raderford, Olifent (M. L. E. Oliphant) i Hartek (P. Har-teck), kao produkt nuklearne reakcije:



Novi izotop dobio je ime tricijum — »treći«, a po masi je oko tri puta teži od običnog vodonika. Tricijum je radioaktivan, poluperioda raspada oko 12 godina, otpušta beta zračenje maksimalne energije 0,018 MeV-a.

Kako se tricijum praktično ne nalazi u prirodnoj mešavini vodonika, on se proizvodi ozračavanjem litijuma u nuklearnim reaktorima, preko reakcije:



Legura magnezijuma i litijuma, posle ozračavanja, zagrejana, otpušta proizvedeni tricijum kao gas, koji se dalje prečišćava.

Tricijum se u manjim količinama može proizvoditi u svakom nuklearnom reaktoru. Industriska proizvodnja razvijena je u SAD, SSSR-u i Engleskoj. U SAD za proizvodnju tricijuma podignuta su postrojenja Savannah River koja su koštala 1,5 milijardu dolara.

2. Litijum

Litijum je dobio ime po grčkom lithos — stena, a otkrio ga je Arfvedson 1817 godiine. Tačka topljenja 186°C , tačka ključanja preko 1220°C , specifična težina 0,534 (NTP).

Litijum je najlakši alkalni metal, koji se uopšte ne nalazi slobodan u prirodi, ali je čest u jedinjenjima u zemljinoj kori. Na vazduhu sagoreva u litijum oksid (Li_2O), a soli su mu slične sa solima natrijuma i kalijuma. Litijum ima najveću specifičnu toplotu od svih čvrstih tela.

U industriji se koristi u legurama za povećanje otpornosti na istezanje i korozije.

U prirodnoj mešavini nalaze se praktično dva izotopa: litijum 6 i litijum 7, u procentualnom odnosu 7,3% i 92,6%.

Delimično izdvajanje izotopa može se dobiti elektrolizom soli litijuma, pri čemu se koristi živa kao katodni materijal. Elektromagnetnom separacijom postiže se obogaćivanje Li 6 do 99,97%, a Li 7 do 99,94%.

Postrojenja za separaciju izotopa litijuma u većim količinama postoje u SAD, SSSR-u i Engleskoj. Zvanične cene kreću se od 30 do 45 dolara po mg izdvojenog izotopa.

TABELA II

Oslobodena energija termonuklearne mešavine izotopa vodonika po kilogramu mase u millionima kwč

Tip reakcije	Čista termonuklearna goriva	Termonuklearna mešavina jedinjenja:
$P + P \rightarrow D + e^+$	19	2,1 (H_2O)
$P + D \rightarrow {}_2He^3 + \gamma$	44	7,1 ($H_2O + D_2O$)
$P + T \rightarrow {}_2He^4 + \gamma$	130	28 ($H_2O + T_2O$)
$D + D \rightarrow {}_2He^3 + n$	22	4,4 (D_2O)
$D + D \rightarrow T + p$	26	5,3 (D_2O)
$T + D \rightarrow {}_2He^4 + n$	93	24 ($T_2O + D_2O$)
$T + T \rightarrow {}_2He^4 + 2n$	46	15 (T_2O)
Fisija urana	22,7	

3. Jedinjenja vodonika i litijuma

Deuterijum i tricijum, koji su kao izotopi vodonika gasovi, imaju i pod velikim pritiscima relativno male gustine. Da bi se dobile megatonske količine eksploziva bili bi potrebni rezervoari dimenzija koje onemogućuju konstrukciju prenosnih tipova termonuklearnih bombi.

Zbog toga se za termonuklearne eksplozive koriste jedinjenja izotopa vodonika, tečnosti ili čvrsta tela, od kojih najdirektnije dolaze u obzir teška i superteška voda, kao i teški i superteški hidridi, deuteridi i tritidi.

Teška i superteška voda: D_2O i T_2O .

U mešavini teške i superteške vode kiseonik ne učestvuje u termonuklearnim reakcijama i pretstavlja nepotrebno opterećenje. Međutim, ukoliko i ne učestvuje

u doprinosu energije eksplozije, kiseonik povećava »efekat iskorišćenja« termonuklearnog eksploziva. Kiseonik deluje kao inertna masa, u izvesnoj meri usporava eksploziju termonuklearne mešavine povećavajući vreme trajanja i količinu eksploziva koja se iskoristi. Na tabeli



Slika 9. — Snimak superteške vode (T_2O), koja fluorescira pod dejstvom beta zračenja tricijuma, na temperaturi od $-180^{\circ}C$.

II date su količine energije koja se oslobađa po kilogramu eksploziva, za čiste nuklearne eksplozive kao i eksplozivne mešavine teške i superteške vode.

Prvu proizvodnju teške vode (D_2O) za naučne svrhe otpočela je Norveška (Norsk Hydro), 1935 godine, elek-

trolizom vode i godišnjom proizvodnjom od 1—2 tona. Danas proizvodnja Norveške iznosi oko 25 tona godišnje. Potražnja teške vode je naglo porasla jer se ona koristi i u mnogim tipovima fisijih reaktora. U industrijskim količinama tešku vodu proizvode SAD, SSSR, Engleska, Kanada, Francuska, a mnoge zemlje pripremaju proizvodnju (Izrael, Belgija, Zapadna Nemačka i Švajcarska).

Podaci o industrijskoj proizvodnji superteške vode (T_2O) se ne objavljuju.

Litijum teški hidridi

Za termonuklearne reakcije sa litijumom kao procesi fuzije jezgra litijuma sa izotopnim jezgrima vodonika, zbog trostrukog naelektrisanja jezgra litijuma potrebne su više temperature nego za hidrogenske procese. Međutim, mada se tačni podaci o temperaturama koje razvijaju fisione bombe drže u tajnosti, smatra se da se postiže oko 50 miliona $^{\circ}C$, što bi omogućilo upotrebu litijuma kao termonuklearnog eksploziva. Pretpostavlja se da je SSSR prvi isprobao litijum hidride kao termonuklearni eksploziv sredinom 1953 godine. Prema nezvaničnim izveštajima SAD probna eksplozija od 1 marta 1954 godine na Enivetoku izvršena je sa litijum deuteridom (${}_3Li^6 D$).

Litijum hidridi su vrlo efikasni eksplozivi, sa velikim vrednostima oslobođene energije po kilogramu mase (tabela III), i spadaju u brze termonuklearne sisteme.

Proizvodnja litijuma lakih i teških hidrida je tehnički jednostavna a pogodne su i sve ostale karakteristike. Tako:

— Litijum je elemenat koga ima dovoljno u prirodi, i relativno se lako dobija;

— Laki i teški hidridi litijuma su na normalnim temperaturama stabilna jedinjenja u čvrstom stanju;

— Sadrže isključivo aktivne elemente termonuklearnih reakcija.

Sa izotopima vodonika litijum se jedini u hidride (Li H), deuteride (Li D) i tritide (Li T), na temperaturi oko 700 $^{\circ}C$. To su bela, kristalna jedinjenja, veoma osetljivi-

TABELA III

Oslobodena energija po kilogramu mase termonuklearnih čistih goriva sa litijumom

Tip reakcije	Oslobodena energija po kg mase u milionima kwč
${}_3\text{Li}^6 + n \rightarrow \text{T} + {}_2\text{He}^4$	18
${}_3\text{Li}^6 + p \rightarrow {}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^4$	15
${}_3\text{Li}^7 + p \rightarrow {}_4\text{Be}^8 + \gamma$	58
${}_3\text{Li}^7 + p \rightarrow 2{}_2\text{He}^4$	58
${}_3\text{Li}^6 + \text{D} \rightarrow 2{}_2\text{He}^4$	75
${}_3\text{Li}^7 + \text{D} \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^5$	42
${}_3\text{Li}^7 + \text{D} \rightarrow {}_4\text{Be}^8 + n$	44
${}_3\text{Li}^6 + \text{T} \rightarrow 2{}_2\text{He}^4 + n$	41
Fisija urana	22,7

va prema vlazi i vrlo reaktivna. Pod dejstvom kiseonika iz vazduha kod vlažnih hidrida može se izazvati pojava vatre. Pri višim temperaturama postepeno se razlažu.

ZAKLJUČAK

Fizička osnova termonuklearnih i fisionih goriva i eksploziva je ista. U oba slučaja do oslobodjenja energije dolazi usled pojave »defekta mase«, isparenja mase, prilikom promene strukture jezgra, pod dejstvom nuklearnih sila. Međutim, procesi oslobodjenja energije su razli-

čiti. Kod fisionih eksploziva energija se oslobađa u procesu cepanja jezgara pod uslovima lančane reakcije, a kod termonuklearnih eksploziva u procesu izgradnje jezgara pod uslovima visokih temperatura. Za fisione eksplozive koriste se izotopi teških elemenata kao uran 235 i plutonijum 239, a za termonuklearne laki elementi, izotopi vodonika i litijuma.

U energetskom pogledu procesi fisije, po elementarnoj nuklearnoj reakciji, oslobađaju veće količine energije od procesa fuzije. Prilikom fisije jezgra urana oslobađa se, po fisiji, oko 200 MeV-a energije. U procesima fuzije red veličine je desetina MeV-a, a prosečno oko 20 puta manje. Međutim, po kilogramu mase, termonuklearni procesi mogu da budu efikasniji. To dolazi usled toga što je broj atoma po kg mase lakih elemenata veći, i do 100 puta, od broja atoma teških elemenata:

Tabela IV

Broj atoma po kilogramu mase $\times 10^{24}$

Element	U 235	Pu 239	H	LiH	D ₂ O
Broj atoma	2,55	2,53	600	75	75

Ukoliko se radi o termonuklearnim eksplozivima koji koriste mešavine jedinjenja lakih elemenata, kao D₂O i T₂O, koja sadrže termonuklearno neaktivne atome drugih elemenata, oslobođena energija po kilogramu mase može da bude reda veličine i manja nego kod fisionih eksploziva:

Tabela V

Ekvivalent eksplozije u hiljadama tona TNT, po kilogramu mase fisionih i termonuklearnih eksploziva.

Eksploziv	Energija
Fisija U 235 ili P 239	20
D + T (čisto gorivo)	82
D + T (mešavina D ₂ O + T ₂ O)	21
${}_3\text{Li}^6 + \text{D} ({}_3\text{Li}^6\text{D})$	66
${}_3\text{Li}^7 + \text{H} ({}_3\text{Li}^7\text{H})$	50

Međutim, glavnu prednost termonuklearnih goriva ne čini moguća veća količina oslobođene energije po kilogramu mase eksploziva, već ukupna količina koja se može koristiti u eksploziji. Kod fisionih eksploziva energija eksplozije je određena kritičnom masom. Energija eksplozije može se konstruktivnim rešenjima menjati samo u određenim granicama. Može se postići manja ili veća energija od energije koja odgovara kritičnoj masi, ali red veličine energije ostaje isti. Kod termonuklearnih eksploziva, naprotiv, ograničenje energije eksplozije kritičnom masom ne postoji. Energija je direktno proporcionalna količini eksploziva:

1 gram termonuklearnog eksploziva litijuma 6 + deuterijum, imao bi ekvivalent od 66 tona TNT, 1 kilogram 66 kilotona TNT, a 1 tona eksploziva imala bi ekvivalent od 66 miliona tona, ili 66 megatona TNT, itd.

Prema tome, teoretski, termonuklearni eksplozivi se mogu koristiti kako u megatonskim, tako i u najmanjim količinama, i u tom pogledu imaju sličnosti sa klasičnim hemiskim eksplozivima.

Praktično, do sada su termonuklearni eksplozivi upotrebljavani u termonuklearnim superbombama, ekvivalenta do 20 megatona TNT. Za postizanje potrebnih visokih temperatura služe fisione bombe, koje već same mogu da imaju ekvivalent do nekoliko stotina kilotona TNT. To znači, da energija fisione bombe postavlja donju granicu energije eksplozije koja se može dobiti termonuklearnim eksplozivima. Međutim, ukoliko se ostvari i nađe rešenje da se postignu temperature termonuklearnih reakcija drugom metodom, tj. da se pronade drugi tip »upaljača« tada bi se termonuklearni eksplozivi mogli koristiti i za oružja ekvivalenta do klasičnih hemiskih eksploziva.

NUKLEARNA BOMBA

1. — OPIS I KONSTRUKCIJA NUKLEARNE BOMBE

Nuklearni projektili mogu biti u raznim oblicima (bombe, granate, rakete i sl.), što zavisi od načina i sredstva za lansiranje, primene i odgovarajućih balističkih zahteva. Nuklearna bomba predstavlja jedan od prvih oblika u kojem se nuklearni eksploziv pojavio kao oružje — kao sredstvo za razaranje i uništavanje.

Nuklearna bomba podešena je za izbacivanje iz aviona. Da bi odgovarala osnovnim principima jednog projektila, koji se baca iz vazduha na određeni cilj na zemlji, nuklearnoj bombi dat je oblik klasične avionske bombe.

Osnovni sastavni delovi nuklearne bombe su:

- 1) telo bombe,
- 2) nuklearni eksploziv,
- 3) klasični eksploziv sa detonatorom,
- 4) neutronska štita i
- 5) osigurač.

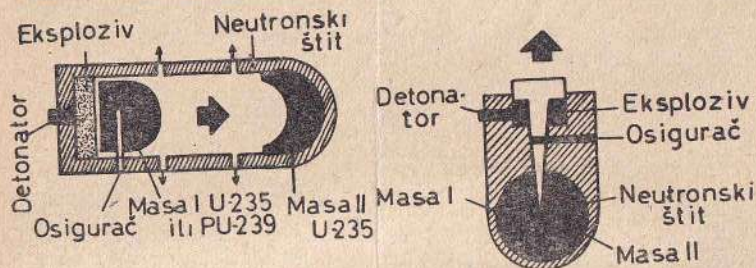
Na prikazanoj šemi vide se dve moguće konstrukcije nuklearne bombe (sl. 1).

1) Telo nuklearne bombe je ustvari jedan sud koji daje oblik bombi i sadrži i povezuje sve njene sastavne delove — nuklearni eksploziv i mehanizam koji dovodi do eksplozije i osigurava njen bezopasan transport. Izrađeno je od pogodne vrste metala.

2) Nuklearni eksploziv je određena količina urana 235 (U 235) koji se dobija odvajanjem od urana 238 (U 238). Kao nuklearni eksploziv može se upotrebiti i plutonijum 239, no njegovo dobijanje je mnogo skuplje.

Težina nuklearnog eksploziva kreće se, prema ne-proverenim podacima, od 10 do 30 kg, što zavisi od tipa bombe.

Treba imati u vidu da pri eksploziji ne eksplodira celokupna količina nuklearnog eksploziva, već 1,5% do 3%, a ostali deo se razbacava i ostaje neiskorišćen za eksplo-



Slika 1

ziju. Razlog ovome je velika brzina kojom se odvija fisioni proces i gubitak neutrona koji izazivaju cepanje atomskih jezgara. Međutim, zahvaljujući ogromnoj energiji koja se oslobađa pri cepanju atomskih jezgara u toku eksplozije bombe, i ovako mali procenat eksplodiranog nuklearnog eksploziva daje nuklearnoj bombi ogromnu snagu, koja je neuporedivo veća od snage dosadanjih (klasičnih) bombi.

Do izvršenja eksplozije nuklearne bombe nuklearni eksploziv, koji se nalazi u njenom telu, ne predstavlja jednu kompaktnu celinu, već je podeljen u dva ili više međusobno razdvojenih komada, što zavisi od konstruktivnog rešenja nuklearne bombe. Ovo se čini zato da bi se izbeglo stvaranje prirodno kritične mase i spontano izvršenje eksplozije usled dejstva kosmičkih zrakova — izazivača lančane reakcije — onda kada se to ne želi.

3) Klasični eksploziv sa detonatorom. Uloga klasičnog eksploziva sa detonatorom sastoji se u tome da u vrlo kratkom vremenu i kada to želimo dovede do spajanja razdvojenih komada nuklearnog eksploziva i na taj način stvori kritičnu masu, koja će eksplodirati usled dej-

stva kosmičkih zrakova. Za ovu svrhu obično se koristi trinitrotoluol (TNT).

4) *Osigurač* je telo (obično kadmijum) koje razdvaja nuklearni eksploziv na posebne komade i sprečava stvaranje kritične mase. Osobina ove materije je da upija i ne propušta slobodne neutrone. Samo ime objašnjava njegovu ulogu, tj. osigurava da ne dođe do spontane eksplozije onda kada se to ne želi.

U momentu kada se želi izvršenje eksplozije nuklearne bombe, osigurač se pod dejstvom klasičnog eksploziva lomi i raspada i na taj način oslobađa put za spajanje nuklearnog eksploziva i izazivanje eksplozije.

5) *Neutronska štita* je neka vrsta ogledala-reflektora koji obmotava nuklearni eksploziv i vraća slobodne neutrone u unutrašnjost eksploziva, smanjuje njihov gubitak i na taj način učestvuje u povećanju procenta eksploziva koji će eksplodirati.

Visinomer je mehanizam koji omogućava regulisanje visine na kojoj će nuklearna bomba eksplodirati.

Iz iznetog se vidi da nuklearna bomba, po svom obliku i konstruktivnom rešenju pojedinih problema, ima izvesnih sličnosti sa konstrukcijom klasične avionske bombe, a da se mnogo razlikuje u pogledu jačine i efekata.

Iz ovoga proizlazi zaključak da je ogromna kvalitetna razlika, koja postoji između nuklearne i klasične bombe, rezultat razlika u osobinama i kvalitetu između klasičnog i nuklearnog eksploziva, a izvesne razlike u konstruktivnim osobinama su posledica toga. Prema tome, bitni i osnovni sastavni deo nuklearne bombe koji joj je omogućio da kvalitetno prevaziđe sva do sada poznata klasična oružja jeste nuklearni eksploziv.

2. — JAČINA NUKLEARNE BOMBE U POREĐENJU S JAČINOM KLASIČNIH AVIONSKIH BOMBI I TNT

Da bismo imali jasniju pretstavu o jačini nuklearne bombe izvršićemo poređenje njenog dejstva sa dejstvom klasične avionske bombe, kao i sa snagom najjačeg klasičnog eksploziva — trinitrotoluola.

Količina energije koja se oslobađa pri eksploziji jedne nominalne nuklearne bombe ravna je energiji koju daje

eksplozija 20.000 tona klasičnog eksploziva TNT. Iz ovoga se može lako uočiti kolika se ogromna snaga krije u jednoj jedinoj nuklearnoj bombi, naročito kada se uzme u obzir količina eksploziva koji je u njoj upotrebljen. Ako uzmemo površinu na kojoj jedna nuklearna bomba od 20 KT, izražava svoje dejstvo videćemo da bi za postizanje istog efekta razaranja i oštećenja na istoj toj površini sa klasičnim avionskim bombama bilo potrebno oko 1.500 tona razornih i oko 1.000 tona zapaljivih bombi — pravilno raspoređenih na čitavoj površini.

Na ovoj osnovi, tj. poređenjem energije proizvedene eksplozijom nuklearne bombe sa količinom energije koju proizvodi TNT pri svojoj eksploziji, izvršena je i klasifikacija nuklearnih bombi i ostalih nuklearnih projektila prema njihovoj jačini, uzimajući kao jedinicu mere jednu KT-TNT (1.000 tona trinitrotoluola).

Na osnovi do sada objavljenih podataka poznato je da danas u svetu postoje sledeći tipovi nuklearnih bombi i ostalih nuklearnih projektila, koji po jačini proizvedene energije odgovaraju:

- 2.000 tona TNT (2 KT);
- 5.000 tona TNT (5 KT);
- 10.000 tona TNT (10 KT);
- 15.000 tona TNT (15 KT);
- 20.000 tona (20 KT — nominalna nuklearna

bomba);

- 75.000 tona TNT (75 KT);
- 100.000 tona TNT (100 KT);
- 200.000 tona TNT (200 KT);
- 500.000 tona TNT (500 KT);

U ovoj skali pada u oči, pre svega, velika međusobna razlika u jačini pojedinih nuklearnih projektila (od 2 KT pa do 500). Međutim, ova razlika ne zavisi samo od količine nuklearnog eksploziva, kao što je to uglavnom slučaj kod klasičnih bombi. Kod nuklearnih projektila uopšte to umnogome zavisi od njihovih konstruktivnih rešenja, tako da dve nuklearne bombe sa istom količinom upotrebljenog nuklearnog eksploziva mogu imati dosta različitu jačinu. Razlika je uslovljena količinom nuklearnog eksploziva koji će biti doveden do eksplozije u toku

fisionog procesa (ranije smo napomenuli da u toku ovog procesa eksplodira svega 1,5% do 3% od ukupno upotrebljene količine nuklearnog eksploziva).

Razlog za ovakvo ponašanje nuklearnog eksploziva jeste velika brzina (1/1.000 do 1/1.000.000 deo sekunde) kojom se odvija fisioni proces, kao i samo ponašanje neutrona. Prema tome, jačina nuklearne bombe zavisi od vremena trajanja fisionog procesa, jer ono utiče na ukupnu količinu nuklearnog eksploziva koja će eksplodirati.

Pri konstrukciji raznih tipova nuklearnih projektila, pored količine nuklearnog eksploziva i dužine trajanja fisionog procesa, značajnu ulogu igra »kritična masa« sa svojim zakonitostima, odnosno uslovima koje postavljaju neutroni kao izazivači lančane reakcije. Naime, prema zakonitosti kretanja neutrona i njihovog nailaska na atomska jezgra, neophodna dužina puta koju oni treba da pređu, da bi došlo do lančane reakcije, iznosi oko 10 sm. Prema tome, to je već jedan uslov po kome najmanja masa nuklearnog eksploziva treba da bude veličine jedne kugle prečnika 10 sm.

Ovaj problem imao je znatnog uticaja na dosadašnju konstrukciju nuklearnih projektila, jer otežava konstrukciju projektila manjih kalibara i dovodi u pitanje njihovu rentabilnost, pošto im je proizvodnja veoma skupa.

Na osnovi iznetog može se reći da je razlika u jačini između nuklearnih i običnih projektila vrlo velika, naročito pri količinskom poređenju jednog i drugog eksploziva. Ova količinska razlika bila bi još veća kada bi se našlo rešenje da se svaka količina nuklearnog eksploziva dovede do potpune eksplozije. U tom slučaju 1,5 kg nuklearnog eksploziva bio bi u pogledu proizvedene količine energije ravan energiji 20.000 tona TNT.

3. — RAZLIKA IZMEĐU NUKLEARNE I KLASIČNE BOMBE

Već je istaknuto da osnovna i bitna razlika između klasične i nuklearne bombe leži u kvalitetnoj razlici između klasičnog i nuklearnog eksploziva, kao njihovih eksplozivnih punjenja. Odavde proističu ogromne razlike u pogledu efekata i razmere dejstva jedne i druge bombe.

Bitna razlika u pogledu dejstva između nuklearne i klasične bombe jeste radioaktivno dejstvo nuklearne bombe, čiji nas učinak prisiljava na preduzimanje posebnih mera u pogledu zaštite živih bića, hrane i vode.

Što se tiče udarnog, a naročito toplotnog dejstva klasične avionske bombe ona prostorno zahvataju male razmere, koje izražavamo u metrima i koje su u velikoj meri zavisne od preciznosti pogotka. Kod nuklearne bombe pomenuta dejstva su neuporedivo većih razmera (u mogućnosti smo da ih izražavamo čak i u kilometrima), a indirektno dejstvo predstavlja karakterističnu osobinu nuklearne eksplozije, što prilično komplikuje mere zaštite.

Upoređujući učinak jedne nominalne nuklearne bombe (20 KT) sa učinkom klasičnih avionskih bombi, videli smo da je razlika između njih velika i da bi bilo potrebno više tona klasičnih bombi za postizanje istih efekata na istoj površini. Ako se uzme u obzir još i njihov učinak u jedinici vremena, kao i sredstva koja bi bila potrebna za transport tolike količine klasičnih bombi, onda je ta razlika još veća u korist nuklearne bombe.

Što se tiče preciznosti gađanja jednom ili drugom bombom, potreba za ovom je mnogo manja kod nuklearne bombe, kako zbog razmera njenog dejstva, tako i zbog samih dejstava.

Ako se nuklearna bomba posmatra kao oružje koje može biti primenjeno na bojnom polju, u izvođenju operacija, onda možemo zaključiti da njena primena postavlja pred komandovanje mnogo veće zahteve u pogledu pogodnosti taktičko-operativnih uslova (bezbednost sopstvenih trupa, odluka o momentu primene itd.) nego što je to slučaj sa klasičnom bombom. Drugim rečima, njena primena prilično uslovljava izvođenje operacija i pred komandni kadar postavlja nove zahteve u pogledu stručne osposobljenosti i moralnih kvaliteta, znatno veće nego pri primeni klasičnih bombi.

Dalje, ako uporedimo zavisnost efekata jedne i druge bombe od atmosferskih prilika i konfiguracije zemljišta, onda se ovo kod klasične bombe može gotovo zanemariti,

dok kod nuklearne bombe to nije slučaj, jer je jačina njenog dejstva u priličnoj zavisnosti od navedenih faktora.

Upoređujući moralno dejstvo izazvano eksplozijom jedne i druge bombe, i polazeći od toga da je nuklearna bomba jedna nova vrsta oružja čije pravo ratno dejstvo još uvek nije dovoljno poznato, a čiji razarajući i uništavajući učinak u ogromnoj meri prevazilazi učinak klasične bombe i koja ispoljava jedan novi vid dejstva (radioaktivnost) koje našim čulima ne možemo ni videti ni osetiti, a koje po svom učinku nije za zanemarivanje, moglo bi se reći da će moralno dejstvo nuklearne bombe i uopšte nuklearnog oružja biti daleko veće nego dosada već poznatih avionskih bombi.

Ako uzmemo u obzir i proces dobijanja nuklearnog eksploziva, kao i postrojenja potrebna za proizvodnju nuklearnih bombi, onda ćemo doći do zaključka da je cena jedne nuklearne bombe, upoređena sa cenom jedne klasične bombe najtežeg kalibra, neuporedivo veća, što dovodi u pitanje masovnu upotrebu nuklearnih bombi, a izbor cilja i momenat primene nuklearnog oružja zahtevaće od komandovanja više veštine i odgovornosti nego pri upotrebi klasičnih avionskih bombi.

Što se tiče težine nominalne nuklearne bombe (prema nekim podacima oko 4 tone), kao i ogromne količine energije koju ona razvija pri svojoj eksploziji, upoređeno sa težinom klasične bombe i njenom snagom može se reći da je nuklearna bomba daleko lakša.

Najzad, moglo bi se reći da je nuklearna bomba nova vrsta oružja koje pretstavlja kvalitetni skok u razvoju naoružanja uopšte i da po svojim učincima spada u red oružja za masovna razaranja i uništavanja žive sile i materijalnih sredstava, kao i to da mere zaštite i odbrane od takvog oružja moraju biti takođe masovne i blagovremeno organizovane i pripremljene.

ŽIVADINOVIĆ MILUTIN
Diplomirani fiziko-hemičar

TERMONUKLEARNA BOMBA

Termonuklearna bomba je naj snažnije do danas poznato oružje. Njena eksplozija se sastoji iz trenutnog oslobađanja ogromne količine nuklearne energije koju proizvodi neka od termonuklearnih reakcija. Napred su opisani termonuklearni procesi i termonuklearni eksplozivi kao najjači izvor nuklearne energije. Ovde će biti govora neposredno o termonuklearnoj bombi, njenom sastavu i njenim dejstvima.

Termonuklearna bomba se naziva još i vodonična ili hidrogenska bomba. Mada u sastav termonuklearnog eksploziva ulaze i izotopi vodonika (deuterijum i tritijum), naziv »termonuklearna bomba« je opštiji i adekvatniji. Ova bomba je nastala usavršavanjem nuklearnog oružja u cilju povećanja razornog dejstva. S druge strane, ostvarenje termonuklearne bombe nije bilo moguće bez postojanja nuklearne bombe, kao izvora toplotne energije i vrlo visoke temperature koja je neophodna za termonuklearne reakcije. Prva probna termonuklearna eksplozija izvršena je pre četiri godine. Danas termonuklearnim bombama raspolažu SAD i SSSR, a osvojila ju je i Engleska. Svi oni izvode probne eksplozije i usavršavaju tu vrstu oružja. U toku 1952 — 1954 opiti su izvođeni sa t.zv. instalacijama-bombama, glomaznim uređajima, postavljenim na zemlji u cilju podešavanja uslova za izvođenje termonuklearne reakcije. Međutim, ubrzo posle toga, novembra 1955, u SSSR je izvršena probna eksplozija termonuklearne bombe koja je bila smeštena u glavi vođenog projektila i prema tome bila

takve veličine da se mogla baciti i iz aviona. Maja 1956, SAD su izvršile na Bikiniju probnu eksploziju termonuklearne bombe koja je bačena iz mlaznog bombardera B-52. Prema tome, danas postoje termonuklearne bombe u pravom smislu reči, s kojima je moguće ugroziti teritoriju ma koje zemlje u eventualnom ratu.

Veličina bombe. Veličina bombe izražava se brojem tona trinitrotoluola (TNT), koji odgovara energiji oslobođenoj pri eksploziji nuklearne odnosno termonuklearne bombe. Nominalna nuklearna bomba je od 20 KT TNT. Nuklearne bombe po svojoj veličini, koliko je do danas poznato, nisu veće od 500 KT odnosno 0,5 MT (mega ili milion tona) TNT. Jače bombe mogu da budu samo termonuklearne, koje oslobađaju energiju veličine nekoliko miliona tona TNT. Do sada su izvršene probe termonuklearnim bombama sledećih veličina:

Kada	Ko i gde	Veličina u MT (megatona) TNT	Koliko puta jača od nominalne bombe
1.XI.1952	SAD na Maršal-skim Ostrvima	5-7	250-350
12.VIII.1953	SSSR	—	—
1.III.1954	SAD na BIKINIJU	12-14	600-700*)
22.XI.1955	SSSR, raketa nad Arktikom	oko 20	1000
26.V.1956	SAD, bomba iz aviona na BIKINI	15-18	750-900

*) Tu su izvršene još dve eksplozije 26. III. i 6. IV. 1954, ali o tome nije bilo ništa saopštavano.

Kao što se vidi, kod termonuklearnih bombi nema ograničenja u izboru njihove veličine, te se može očekivati gradnja još i većih bombi ove vrste. Bomba na prin-

cipu nuklearne fisije (uranova ili plutonijumova) definisana je kritičnom masom nuklearnog eksploziva, koja prema neproverenim podacima za uran 235 iznosi od 10—30 kg. To uslovljava bombu i njenu veličinu. Lančana reakcija fisije ne može da se održi u uranu manje količine od kritične mase i nema trenutnog, na eksplozivan način, oslobađanja energije. Uz to se treba potsetiti da samo 1,5—3% nuklearnog eksploziva biva transformisano u energiju a ostalo se rasprši kao neiskorišćeni nuklearni eksploziv. Sve to uslovljava priroda reakcije nuklearne fisije. Kod termonuklearnih bombi takvih ograničenja nema. One nisu zavisne ni od kakve kritične mase. Svaka količina termonuklearnog eksploziva sposobna je da eksplodira i iz reakcije energija je skoro sva iskorišćena. Snaga im zavisi od uzete količine termonuklearnog eksploziva, pod uslovima da je moguće dovesti ga na određenu visoku temperaturu da bi se izvršila termonuklearna reakcija.

Sastav bombe. Konstruktivni izgled i sastav termonuklearnih bombi je vojna tajna zemalja koje ih imaju. Naše pretstave o tome mogu da se zasnuju na opštim znanjima o termonuklearnim procesima. Naučnici nekih zemalja objavljivali su svoje zaključke o termonuklearnoj bombi na osnovu podataka o pojavama u vezi sa termonuklearnim eksplozijama; davali su mišljenja o vrsti upotrebljenog termonuklearnog eksploziva, o načinu njegovog postavljanja u bombu kao i o snazi bombe. Sa zvaničnog mesta ona obično nisu bila demantovana a ni potvrđivana. Polustručna i popularna literatura o svakoj od pobrojanih termonuklearnih bombi daje poneke podatke o njihovom sastavu. Iz toga se vidi da je svaka bomba bila drukčija jer je proces usavršavanja tog oružja išao na to da ona bude jevtinija, manja i lakša, da se nosi avionom, da je velike snage i pogodna za upotrebu.

Svaka od do sada poznatih termonuklearnih bombi sadržavala je u sebi t.zv. upaljač — nuklearnu bombu, koja za neki milioniti deo sekunde razvije temperaturu od oko 20 do 50 miliona stepeni. Tako je osnovna pretstava o sastavu termonuklearne bombe takva da se nuklearna bomba nalazi u sredini tela termonuklearne

bombe, okružena termonuklearnim eksplozivom — odgovarajućom smešom lakih elemenata. *

Prva termonuklearna bomba (1952) imala je naziv »vlažna« bomba, zato što je termonuklearni eksploziv bio u tečnom stanju. Upaljač — nuklearna bomba bila je okružena tečnom smešom kondenzovanih gasova deuterijuma i tricijuma. Navodi se da je ta bomba — instalacija, bila teška oko 60 tona zbog glomaznih uređaja za hlađenje (ispod -250°C) i visok pritisak za prevođenje tih gasova u tečno stanje. »Vlažna« bomba može da sadrži smešu teške i superteške vode (kiseonikova jedinjenja deuterijuma i tricijuma). Ona bi bila lakša od one sa kondenzovanim gasovima. »Suve« bombe su međutim daleko pogodnije i lakše. Prva takva je bila ruska iz 1953, a zatim i sve ostale s kojima su vršene probe do 1956. Termonuklearni eksploziv je u čvrstom stanju u vidu jedinjenja urana ili plutonijuma sa deuterijumom ili laki metal litijum 6 sa deuterijumom kao jedinjenje tipa hidrida. Navode se dve mogućnosti: prva, da je termonuklearna bomba ustvari smeša nuklearnog i termonuklearnog eksploziva, i druga, po kojoj je nuklearna bomba u sredini i odvojena od termonuklearnog eksploziva koji je okružava.

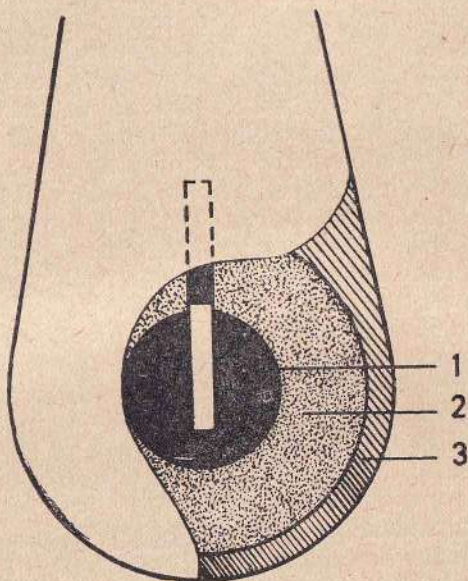
Engleski fizičar profesor J. Rotblat ovako pretstavlja termonuklearnu bombu koju je SAD ispitala 1. III. 1954. Upaljač je plutonijumova bomba jačine oko 500 KT. Oko nje se nalazi termonuklearni eksploziv u čvrstom stanju litijum-deuterid ($\text{Li}_6\text{-D}$).

Spoljni omotač bombe je metalni uran, debljine oko 3 sm (sl. 1).

Plutonijumska bomba-upaljač ima trostruku namenu: proizvodi potrebnu vrlo visoku temperaturu za izazivanje termonuklearne reakcije; oslobađa ogroman broj neutrona, koji, reagujući sa litijumom, daju tricijum, a tricijum istovremeno stupa u reakciju sa litijumom kao i deuterijum; proizvodi fisione produkte — radioaktivni materijal koji ulazi u sastav radioaktivne prašine nastale po eksploziji bombe.

Glavna termonuklearna reakcija je litijum-deuterijum uz koju se dešavaju i sporedne: deuterijum-deuteri-

jum, deuterijum-tricijum i litijum-tricijum. Neke od njih proizvode brze neutrone, koji, zajedno sa neutronima oslobođenim iz fisije plutonijuma, izazivaju fisiju urana 238 u omotaču bombe.



Slika 1

Spoljni uranski omotač (košuljica) bombe namenjen je ne samo da koliko toliko odoli pritisku koji bi prevremeno raspršio sadržaj bombe, već i da pri eksploziji poveća radioaktivnost u radioaktivnoj prašini, pošto uran 238 podleže fisiji sa brzim neutronima. Ovaj tip bombe stoga nazivaju fisiona-fuzionafisiona bomba kada proces eksplozije pratimo misaono počev od procesa fisije upaljača.

Od svih lakih elemenata i izotopa vodonika, koji ulaze u sastav termonuklearnog eksploziva, deuterijum je srazmerno najjevtiniji, a naročito su skupi tricijum i litijum atomske težine 6. Profesor Rotblat navodi i mogućnost da je kao termonuklearni eksploziv mogla da bude

i kombinacija deuterijuma i tricijuma. Termonuklearna eksplozija bi onda bila posledica dveju reakcija: sjedinjavanja deuterijum-deuterijum i deuterijum-tricijum. Obe reakcije proizvode neutrone. Ne može da bude poznat odnos deuterijuma i tricijuma u bombi, ali izgleda verovatno da tricijuma ima toliko koliko bi bilo dovoljno da započne termonuklearna reakcija fuzije, a da bi glavni izvor termonuklearne energije bila reakcija deuterijum-deuterijum.

Dejstva termonuklearne eksplozije. Dejstva eksplozije termonuklearne bombe su iste prirode kao i ona koja poznajemo kod nuklearne bombe s tim što im je razorno-uništavajuća moć daleko veća. Vatrena lopta koja se stvara pri eksploziji, prema neproverenim podacima, može da ima prečnik oko 5 km. Prizemna eksplozija može da stvara ogroman krater. Dejstvo termonuklearne bombe karakteriše se, sem toga, relativno jakim zaostalim radioaktivnim zračenjem. Sa stanovišta zaštite ono je od velikog značaja, bez obzira na kojoj visini se desila eksplozija. Prizemna eksplozija i ona pri kojoj vatrena lopta dodirne zemljinu površinu, stvaraju srazmerno velike količine radioaktivne prašine koja se rasprostire u atmosferi i na veće površine zemljišta okolo i relativno daleko od mesta eksplozije. To su pokazale probne eksplozije 1954 na Bikiniju. Prema neproverenim podacima sovjetska termonuklearna bomba (1955), koja je bila izbačena vođenim projektilom nad Arktikom, eksplodirala je na visini od oko 40 km. Japanski i drugi istraživači ispitivanjem atmosfere i atmosferskih padavina ustanovili su da je eksplozija proizvela radioaktivnu prašinu znatno sitniju od one koja je dobijena 1954 na Bikiniju. Američka termonuklearna bomba, koja je bačena iz aviona B 52 (1956) sa visine od 17.000 m, eksplodirala je na visini oko 4.500 m. Njena vatrena lopta verovatno nije doirdnula površinu zemlje. O toj eksploziji još nije ništa objavljeno, sem to da je s njom promašen cilj. Može da se zaključi da bi visina od 3—4 km nad površinom zemlje bila najpogodnija za eksploziju termonuklearne bombe, jer bi sa nje najbolje ispoljila svoje dejstvo.

Jačina dejstva i površina koju zahvataju eksplozijom proizvedeno udarno i toplotno dejstvo i početno radioaktivno zračenje zavise od snage odnosno veličine termonuklearne bombe, konfiguracije zemljišta i izvesnog uticaja meteoroloških uslova. Prostiranje i jačina naknadnog radioaktivnog zračenja zavisi još i od visine tačke eksplozije i pravca vetra. Kod termonuklearnih bombi ta dejstva još nisu tako definisana kao kod nuklearnih bombi (napr. kod nominalne) i još nije ustanovljena termonuklearna bomba koja bi služila kao merilo za druge. Zato ćemo dalje razmatrati pojedina dejstva za termonuklearne bombe veličine od 5 do 30 MT.

Udarno dejstvo. Poznato je da stepen oštećenja objekata zavisi od eksplozijom proizvedenog vazdušnog natpritiska, koji dejstvuje na njih (u kg/sm^2). Tako naprimer vazdušni udar od

2,0 kg/sm^2

je dovoljan pa da čoveka ubije na otvorenom prostoru, mada je praktično malo verovatno da će čovek poginuti samo od vazdušnog udara;

1,3 kg/sm^2

i veći natpritisci vrše potpuno razaranje građevinskih objekata;

1,3—0,45 kg/sm^2

stvaraju teška oštećenja zgrada, a

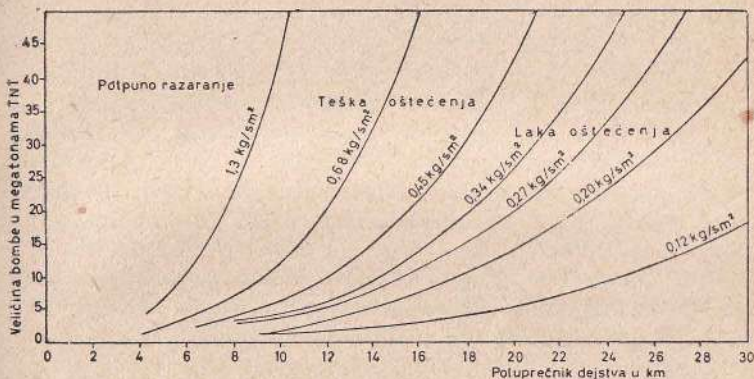
0,45—0,20 kg/sm^2

stvaraju laka oštećenja zgrada i građevinskih objekata.

Na kome će se otstojanju od mesta eksplozije ispoljiti dejstvo natpritiska od napr. 1,3 kg/sm^2 , zavisiće od veličine bombe, tj. od količine energije u MT, koju će ona osloboditi. Potsetimo se da nominalna bomba (20 KT) stvara potpuno razaranje u prečniku do 750 m.

Prema podacima iz literature poluprečnici, odnosno površine na kojima se ispoljava delovanje vazdušnog udara termonuklearne eksplozije po stepenu dejstva, mogu da se izračunaju po obrascu koji kaže: da je poluprečnik dejstva proporcionalan trećem korenu energije bombe koja se izražava u MT TNT. Dobiveni podaci ne bi bili potpuno tačni, ali ovaj obrazac, dobiven iskustvom za eksplozivne materije, daje približne vrednosti koje inače zadovoljavaju za praktične potrebe.

Slika 2 daje grafički pregled podataka o poluprečnicima udarnog dejstva termonuklearne bombe. Kada se pitamo kakvo dejstvo ima vazdušni udar termonuklearne bombe, onda je uvek potrebno naznačiti za koju veličinu bombe,



Slika 2. — Dejstvo vazdušnog udara termonuklearnih bombi

tj. za koji broj MT TNT. Pročitajmo iz grafikona poluprečnike dejstva, napr., za termonuklearnu bombu 10 MT:

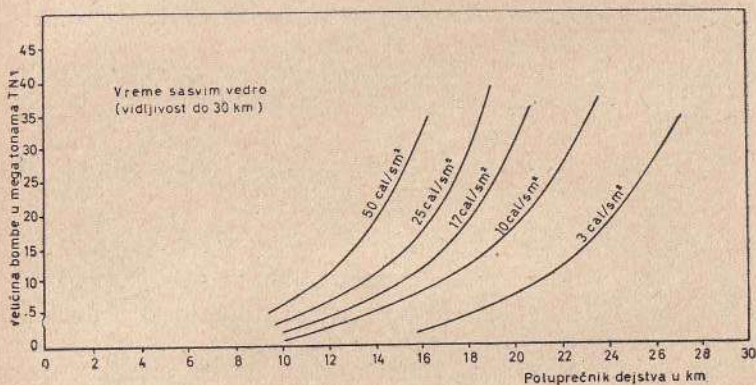
Potpuno razaranje u krugu poluprečnika	do 6 km
Teška oštećenja zgrada	„ 12,5 „
Laka oštećenja	„ 18 „
Stakla prozora polupana	„ 25 „

Takvi podaci bi važili, razume se, za relativno ravničasto zemljište, apstrahujući druge uticaje na domene dejstva eksplozije termonuklearne bombe. Na ovaj način može da se stvori pretstava o razmerama uništavanja i moći termonuklearnog oružja.

Toplotno dejstvo. Toplotno zračenje, koje se emituje u trenutku nuklearne eksplozije, pada na površinu zemlje i predmete na njoj i na čovekovo nezaštićeno telo. U kojoj meri će ono da proizvede oštećenja zavisi od količine toplotne energije koja se apsorbuje na jedinicu površine predmeta ili čovekovog tela, izražene u cal/sm². Tako naprimer:

2—3 cal/sm ²	na koži čoveka stvara ozlede I stepena
8—10 „	na koži čoveka stvara ozlede III stepena,
5 „	izaziva požar u šumama u letnjem periodu,
8 „	pali se guma,
9 „	pali se drvo mahagonij,
10 „	pali se gabarden (štof),
25 „	pale se drvo javor i drvene kuće itd.

Nominalna nuklearna bomba (20 KT) napr., na mestu koje je udaljeno od nulte tačke 2.000 m, ispoljava toplotno dejstvo od 10 cal/sm². Na kome otstojanju će termonuklearna eksplozija da ispolji isto toplotno dejstvo od 10 cal/sm² zavisi od veličine bombe, tj. od njenog ekvivalenta energije u MT pri istoj vidljivosti u atmosferi.



Slika 3. — Toplotno dejstvo termonuklearnih bombi

Na osnovu poznate zavisnosti, koja pokazuje kako se menja stepen oštećenja toplotnim dejstvom sa veličinom bombe, mogu se izračunati poluprečnici odgovarajućeg toplotnog dejstva termonuklearne bombe. Oni su pretstavljeni na grafikonu za termonuklearne bombe veličine od 5 do 30 MT.

Iz njega možemo pročitati na kojim udaljenjima toplotno dejstvo izaziva pojedina oštećenja pri dobroj vidljivosti. Napr., za termonuklearnu bombu od 10 KT:

Ozlede I stepena na koži čoveka na otstojanju	od 21	km
Ozlede III stepena na koži čoveka na otstojanju	„ 17	„
Drvene kuće bi se zapalile na otstojanju	„ 13,5	„

Ta otstojanja se smanjuju sa smanjenjem vidljivosti i pri oblačnom vremenu, a prirodna ili veštačka magla može da posluži i kao zaštitno sredstvo od ovog dejstva.

Radiološko dejstvo. Prema zvaničnom saopštenju Komisije za atomsku energiju SAD, početno radiološko zračenje termonuklearnih eksplozija je po svojoj prirodi isto kao kod nuklearnih bombi. Intenziteti tog zračenja, na datim otstojanjima od nulte tačke, su zavisni od veličine bombe i njih je moguće izračunati slično kao za udarno i toplotno dejstvo.

400 r gama zračenja, koje čovek primi za kratko vreme, predstavlja srednju smrtnu dozu, što znači da je verovatnoća smrtnosti 50%. Izračunato je da će nezaklonjeno ljudstvo primiti 400 r pri eksploziji termonuklearne bombe od 10 MT na udaljenju oko 4,1 km. Uporedimo to otstojanje sa onima iz grafikona 2 i 3. Iz njih vidimo da bomba od 10 MT stvara:

— potpuno razaranje na otstojanju	do 6	km
— ozlede III stepena na koži čoveka toplotnim dejstvom	do 17	km

a neposredno radiološko dejstvo:

— srednja smrtna doza gama zračenja na otstojanju od	4	km
--	---	----

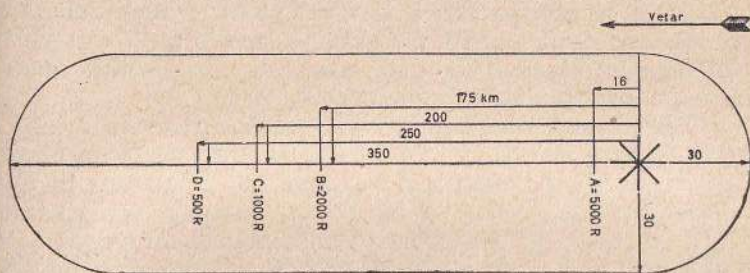
Može da se zaključi da početno radiološke dejstvo na otvorenom polju zaostaje po svome učinku od udarnog i toplotnog dejstva.

Kada je bilo govora o radiološkom dejstvu nuklearne nominalne bombe, onda se ono stavlja na treće mesto po svome značaju u pogledu dejstva na živu silu (iza toplotnog i udarnog dejstva). Navodi se da su gubici u Japanu 1945 (Hirošima i Nagasaki) od početnog i naknadnog radiološkog dejstva eksplozije iznosili oko 15% od ukupnog broja gubitaka. Drukčije stoji stvar kod termonuklearnog oružja. Eksplozijom termonuklearne bombe stvaraju se velike količine radioaktivne prašine koja se prostire na velika udaljenja i u priličnim koncentracijama na površini zemlje, tako da pretstavlja ozbiljnu opasnost po živa bića. Naučnici i državnici često upozoravaju na opasnost daljeg izvođenja eksperimenata sa nuklearnim oružjem zbog štetnog dejstva radioaktivnosti na ljudski rod. U zvaničnom izveštaju Komisije za atomsku energiju SAD kaže se da je potencijalno uništavajuće dejstvo termonuklearne bombe uglavnom u tome, što eksplozijom proizvedena naknadna radioaktivnost može da ima smrtonosno dejstvo na površini zemljišta koja je oko 25 puta veća od one na kojoj imaju smrtonosno dejstvo vazdušni udar i toplotno zračenje.

U sastav radioaktivne prašine ulaze: fisioni produkti iz eksplozije upaljača (fisione bombe) i produkti fisije urana 238 od koga je izrađen spoljni omotač (košuljica) bombe. Ako vatrena lopta dodirne površinu zemlje, ona ispari deo zemljine kore, koja, očvrstnuvši u atmosferi, pada kao radioaktivna prašina u smešu sa fisionim produktima urana. Prema podacima iz literature na svakih 20 KT odgovara oko 1 kg radioaktivnog materijala nastalog eksplozijom. Radioaktivna prašina koja je pala na brodiće japanskih ribara (1954) bila je veličine oko 0,3 mm pored još finijeg praha veličine 0,1—0,3 mikrona. U početku, po izvršenoj eksploziji aktivitet radioaktivne prašine naglo opada. Tako napr. za prvih 7 časova opadne na 1/10, za dva dana na 1/100, a za tri meseca na 1/1.000 deo od prvobitnog aktiviteta.

Zavisno od meteoroloških uslova radioaktivna prašina koja se prostire na manja ili veća udaljenja od mesta eksplozije, biva nošena vetrovima ili u oblacima, posle čega se sa padavinama taloži na površinu zemlje.

Na sl. 4 šematski je prikazano prostiranje radioaktivne kontaminacije posle termonuklearne eksplozije 1. III. 1954. Nošena vetrom, radioaktivna prašina je kontaminirala prostoriju dužine do 350 km, a širine oko



Slika 4. — U toku 36 časova posle eksplozije termonuklearne bombe 1. III. 1954 — Bikini, mogle su da se prime doze naknadnog zračenja u A — 5.000 r; B — 2.000 r; C — 1.000 r; i kod D — 500 r.

60 km. Na celoj zahvaćenoj teritoriji od oko 21.000 km² postoji opasnost od radiološkog dejstva po zdravlje čoveka. U toku 36 časova po izvršenoj eksploziji bila bi primljena doza na otstojanju od nulte tačke:

- 16 km doza gama zračenja od 5.000 r
- 175 km doza gama zračenja od 2.000 r
- 200 km doza gama zračenja od 1.000 r
- 250 km doza gama zračenja od 500 r

Za 36 časova bi se dakle primila srednja smrtna doza na daljini od oko 250 km od mesta eksplozije. Na otstojanju od 300 km za 36 časova bilo bi oko 5 — 10% ozbiljno ozleđenog ljudstva. Dalje od 350 km nije verovatno da će biti smrtnih slučajeva kod ljudstva koje je u zahvaćenoj prostoriji 48 časova od momenta eksplozije.

Zaključak. Podaci o dometima pojedinih dejstava termonuklearne eksplozije dobiveni su mahom računski, a samo neznatan deo neposrednim merenjem na zemljištu. O dejstvima koja se ispoljavaju u momentu eksplozije (udarno, toplotno i početno radiološko dejstvo), na-

vodi se da nema ništa novo u odnosu na poznata dejstva nuklearne bombe. Zato se za njih uspešno mogu primeniti zakoni proporcionalnosti, uzeti u odnosu na podatke koji važe za nominalnu nuklearnu bombu. S druge strane, novo je i nedovoljno ispitano naknadno radiološko dejstvo koje se mnogo razlikuje i po jačini i moći zahvata velikih teritorija pa čak i drugog kontinenta. To ustvari čini termonuklearnu bombu tipičnim radiološkim oružjem po dejstvu velikih razmera.

Termonuklearna bomba, kao snažno razorno oružje, može da ima primenu u ratu za ciljeve strategiskog značaja. Kako je ona izvanredno skupa, takva namena bi joj bila opravdana. Danas se još ne zna kakvog ekvivalenta (TNT u MT) je termonuklearna bomba najpogodnija s obzirom na koristan učinak njenog dejstva za onog ko je primenjuje. Izgleda da će se bombe praviti za svaki pojedini cilj, prema površini koju ovaj zahvata. Iz unapred poznatog poluprečnika cilja mogla bi da se izabere odgovarajuća veličina bombe. Kada se prostudiraju doleti napr. udarnog i toplotnog dejstva (grafikoni na slikama 2 i 3), moglo bi se zaključiti da neće biti potrebno da se grade bombe znatno veće od 10 MT, jer i takve, pa čak i manje, mogu poslužiti za najveće ciljeve (napr. industrijske rejone, najveće gradove, luke i sl.).

* * *

Ing. RAIŠIĆ NENAD

BORBENA RADIOAKTIVNA SREDSTVA I NJIHOVA NAMENA

Velike količine radioaktivnih otpadaka koji se danas stvaraju u toku proizvodnje nuklearnog eksploziva plutonijuma i U 233, neminovno dovode na misao da se ovaj materijal može uspešno koristiti i u ratne svrhe. Nuklearno zračenje koje ovaj emituje, štetno deluje na zdravlje ljudi koji se nalaze u njegovoj blizini, a velika količina zračenja može u krajnjoj liniji izazvati teška oboljenja pa i smrt. Na osnovu toga, može se razmatrati mogućnost njegove upotrebe u ratne svrhe slično bojnim otrovima i drugim sredstvima hemiskog rata. Osnovna misao bila bi u tome da se materijal rasprostire po terenu koji neprijatelj zauzima. Time bi se ovaj učinio neupotrebljivim za vojne operacije ukoliko se ne želi izlagati riziku.

Potencijalne mogućnosti ovakve upotrebe radioaktivnog materijala u formi borbenih radioaktivnih sredstava (BRS) postoje, te je potrebno razmotriti sledeće podatke koji će nam omogućiti da damo pravilnu ocenu o upotrebljivosti ovih novih ratnih sredstava u borbenim uslovima:

I. — Opasnost od rasutog radioaktivnog materijala na zemljištu.

II. — Mogućnosti proizvodnje radioaktivnog materijala u količinama potrebnim za ratne potrebe.

III. — Mogućnosti transporta i izbacivanja materijala na cilj i ocena osnovnih efekata.

Razmotrivši ove podatke moći ćemo izvući zaključak o njihovoj upotrebljivosti u ratnim uslovima, stepenu

opasnosti koji stvaraju, kao i njihovoj taktičkoj i strategskoj vrednosti kao oružja.

I. — OPASNOST OD RASUTOG RADIOAKTIVNOG MATERIJALA NA ZEMLJIŠTU

Radioaktivni materijal može biti štetan po čovečji organizam na dva načina, i to:

1. — Svojim zračenjem koje prodire kroz čovečje organe izazivajući oštećenja. Pri ovome, sam materijal ne mora biti unesen u organizam. Ovo dejstvo zračenja nazivamo spoljnim, pošto se izvor zračenja nalazi van organizma. U ovom slučaju samo prodorno zračenje kao što su gama zraci i donekle beta čestice izazivaju moguća oštećenja, pošto su jedino ova u stanju da prodru kroz odelo i kožu.

2. — Unošenjem izvora zračenja u organizam preko hrane, vode, kroz rane itd. opasnost se povećava pošto u ovom slučaju svaka vrsta zračenja postaje štetna i opasna, utoliko pre što većina radioaktivnih materijala ima osobinu da se fiksira (zadrži) u nekom organu, kostima i koštanoj srži, stalno zračeći. Uz opasnost od zračenja dolazi i hemiska toksičnost koja takođe često prati ovaj materijal. Ovaj način dejstva zračenja nazivamo unutrašnjim dejstvom, pošto se izvor nalazi u organizmu.

Od ova dva načina dejstva borbenih radioaktivnih sredstava (BRS) u ratnim uslovima kao primarno mora da se računa sa prvim, mada je manje efikasan. Ovo je očigledno pošto je mogućnost odbrane od njega mnogo teža i neefikasnija. Za unutrašnje dejstvo neophodno je da izvor zračenja dopre u organizam preko organa za ishranu, disanje itd. S obzirom da je otkrivanje preko instrumenata za detekciju dosta jednostavno, uvek se mogu obezbediti mere da BRS ne dospeju u organizam. Dejstvo spoljnog zračenja ne može se lako sprečiti pošto ne postoje efikasne metode zaštite u poljskim uslovima. Pasivna zaštita u ovom slučaju je teška i najefikasnije sredstvo zaštite je udaljavanje iz zatrovane zone uz maksimalne mere opreze da ne dođe do kontaminacije tela, odela itd.

Govoreći o radioaktivnim materijama, obično podrazumevamo sam pojam radioaktivnosti, tj. osobine ispuštanja jonizacionog zračenja, bez obzira u kakvoj se hemiskoj formi taj materijal nalazi. Hemiska forma je potpuno sporedna i u samoj pojavi radioaktivnosti ne igra nikakvu ulogu. Jedan radioaktivni elemenat, naprimer radijum, zadržaće svoju radioaktivnost u bilo kom se hemiskom jedinjenju nalazio. Osobina radioaktivnosti je karakteristika jezgra atoma, a kako je poznato, nikakvim hemiskim promenama jezgro se ne može izmeniti. Iz ovoga možemo odmah izvući zaključak da nikakav hemiski postupak ne može sprečiti radioaktivni materijal da zrači, te ni degazacija u klasičnom smislu reči, pomoću hemiskih sredstava, ne pomaže. S druge strane, vidimo da se radioaktivni materijal ne može proizvoditi klasičnim hemiskim postupcima, već jedino postupcima nuklearnim, kojima se deluje na samo jezgro atoma.

Druga osobina radioaktivnog materijala se sastoji u tome, da mu intenzitet zračenja tokom vremena opada. Kažemo, da se on spontano raspada. Ovo smanjivanje intenziteta može da se meri. Kao meru brzine raspadanja uzimamo t.zv. »vreme poluraspada« tj. ono vreme za koje intenzitet zračenja nekog radioaktivnog izvora spadne na polovinu. Prateći zakon raspadanja vidimo da se intenzitet zračenja smanjuje po eksponencijalnom zakonu. Ovo znači:

na jednu polovinu početnog intenziteta se smanji za	1 poluraspad
na jednu četvrtinu početnog intenziteta se smanji za	2 poluraspada
na jednu osminu početnog intenziteta se smanji za	3 poluraspada
na jednu šesnaestinu početnog intenziteta se smanji za	4 poluraspada itd.

Za potpuno iščezavanje zračenja potrebno je, praktično, dosta dugo vreme u odnosu na vreme poluraspada. Kada će neki zatrovani teren biti bezopasan s obzirom na zračenje, zavisice u prvom redu od početnog intenzi-

teta i dužine vremena poluraspada. Ako se, naprimera, instrumentima utvrdi da je nekakav teren kontaminiran aktivitetom sto puta većim nego što je dozvoljeno kao bezopasno, a vreme raspadanja iznosi recimo jednu godinu, izlazi da će teren biti bezopasan tek posle 7 godina.

Vreme poluraspada je karakteristično za svaki pojedini radioaktivni element. Ono vrlo mnogo varira od jedne do druge atomske vrste, krećući se od delića sekunde do hiljade godina. Ovo vreme će umnogome uticati prilikom izbora nekog radioaktivnog materijala za BRS. Suviše kratko vreme poluraspadanja ne omogućava da se sredstvo efikasno koristi. Od proizvodnje do upotrebe svakako mora proći izvesno vreme, ako i ne računamo potrebe uskladištenja. U slučaju kratkog poluraspada može se desiti slučaj da materijal prestane da zrači ili da zrači vrlo malo u trenutku kada se upotrebljava. S druge strane, suviše dugo vreme poluraspadanja stvara teškoće i za onoga koji BRS upotrebljava. Pošto je krajnji cilj upotrebe BRS da se neki teren očisti od protivnika ili da se spreči da on neki deo terena zaposedne, uvek će ranije ili kasnije doći do potrebe da se taj isti teren zaposedne sopstvenim trupama. Izlazi da suviše dug aktivitet onemogućuje bilo kome da se na ovome terenu zadržava. Upotreba dugoživotnih BRS koja se sporije raspadaju bila bi opasna i za onoga ko ih upotrebljava, jer se teren zasut njima pretvara u mrtvu zemlju. Da i ne spominjemo stalnu potencijalnu opasnost — rasprostranjivanje aktiviteta raznim načinima na veće prostranstvo, čime se dovodi u opasnost da se dejstvo zračenja duboko odrazi na opšti život cele oblasti.

Iz svega izlazi da je karakteristika materijala izražena vremenom poluraspadanja vrlo značajna za BRS. S vojne tačke gledišta najbolje bi odgovarala BRS sa kratkim vremenom poluraspadanja. Međutim, teško je stvoriti velike ratne rezerve ovih sredstava. No, ukoliko se stvaraju rezerve BRS sa dugim poluraspadanjem, njihovom dejstvu mogu biti izložene u krajnjoj liniji i sopstvene trupe.

Upotrebljivost i efikasnost jednog BRS umnogome će zavisiti i od karaktera zračenja koje ovaj emituje. Po-

znato je da radioaktivnost karakterišu tri vrste zračenja — alfa, beta i gama. Svaka od ove tri vrste razlikuje se po osobinama, s tim da i jedna sama vrsta može da ima različito dejstvo u odnosu na energiju koju posedaju. Sve ove osobine uglavnom se pokazuju u prodornosti zračenja tj. u mogućnosti da prodru kroz čovečji organizam i izazovu oštećenja.

Alfa zračenje u principu može da prodre svega par santimetara kroz vazduh, te kao spoljnje zračenje ne dolazi u obzir. Dejstvujući kao unutrašnje zračenje može da bude vrlo efikasno utoliko pre što većina elemenata koji emituju alfa zračenje može lako da se fiksira u kostima i koštanoj srži, gde dejstvo alfa čestica dolazi do izražaja.

Beta zračenje u vazduhu ima domet i do nekoliko metara. Može da prodre kroz kožu u organizam, te se može smatrati kao izvesna opasnost i kao spoljnje zračenje. Međutim, pošto i odelo pretstavlja prepreku da zračenje ne prodre do tela, to je praktično efikasnost ovog zračenja dosta slaba. Ovo vredi utoliko pre što najlakše dostupni izvori beta zračenja emituju zrake niskih energija čija je prodornost mala.

Ostaje kao jedino efikasno za spoljnje dejstvo gama zračenje. Ono u principu ima vrlo veliku prodornost, te je bez obzira na energiju, uvek u stanju da prodre kroz organizam i izazove oštećenja. Odelo načinjeno od bilo koga materijala ne pretstavlja nikakvu zaštitu protiv gama zračenja, tako da se principijelno može smatrati da će sve zračenje koje padne na čoveče telo prodreti i kroz sve organe. Mada će prodornost u principu zavisiti od energije koju zračenje poseduje, opasnost ne zavisi od nje u tolikoj meri kao kod beta zračenja, pošto su i niske energije dovoljne da zračenje prodre u organizam. Zbog toga moramo smatrati da gama aktivan materijal rasut po terenu može pretstavljati potencijalnu opasnost za ljude koji se na njemu nalaze. Razume se da prosta konstatacija o opasnosti u ovome slučaju nije dovoljna. Ovde treba oceniti niz faktora koji određuju u kolikoj je meri opasnost akutna, za koje vreme i pod kojim uslovima. Pri ocenjivanju ovih faktora uzimamo u obzir u prvom redu intenzitet zračenja, tj. količinu materijala koji je

rasut po terenu i kvalitet njegovog zračenja, a zatim vreme koje čovek u takvom prostoru provede.

Kao što je poznato, dejstvo zračenja na organizam meri se u jedinicama zvanim rendgen, koje pokazuju kolika je količina zračenja prošla kroz organizam. Jedinica rendgen ima svoje fizičko objašnjenje u koje se mi na ovom mestu nećemo upuštati. Dovoljno je naglasiti da primljena doza od 600 rendgena ima kao posledicu smrt, dok doze ispod 100 rendgena ne izazivaju teže posledice tako da se mogu smatrati bezopasnim po život ali opasnim po zdravlje. Pri ovome treba voditi računa da su doze kumulativne, tj. da se primljene doze u nekoliko mahova, pa čak i u izvesnim vremenskim intervalima, sabiraju i da su efekti u krajnjoj liniji identični sa efektima doze primljene u jedan mah.

Pitanje dozvoljene doze je prilično široko i umnogome zavisi od uslova. Za laboratoriske radnike koji rade stalno sa zračenjem, dnevna doza je vrlo mala, pošto postoji mogućnost nakupljanja doze u toku celoga života. U ratnim uslovima, za borca na terenu, dozvoljena doza može biti mnogo viša pod uslovima da se ne ponavlja. Na vežbama američke vojske u mirnodopskim uslovima dozvoljena doza je bila do 10 r, dok su prilikom proba atomskih eksploziva na Pacifiku stanovnici pojedinih kontaminiranih ostrva primali dozu i preko 100 r, bez vidljivih posledica. Radi toga možemo smatrati da će u ekstremnim ratnim uslovima dozvoljena doza moći da iznosi do 100 rendgena bez rizika za život ljudstva.

Na bazi ovih brojki mogla bi se odrediti koncentracija i dozvoljeno vreme zadržavanja na nekom kontaminiranom terenu. U tablici na str. 131 data je vrednost koncentracije radioaktivnog materijala na terenu u jedinicama kiri po metru kvadratnom, da bi se dobile doze od 100 i 600 rendgena u toku određenog vremena.

Kiri pretstavlja jedinicu kojom se meri količina radioaktivnog materijala. U principu 1 kiri je ona količina radioaktivnog materijala kod koje imamo $3,7 \cdot 10^{10}$ raspada na sekundu. Ovo približno odgovara količini od 1 grama radijuma gde imamo ovoliki broj raspada u sekundi. Te-

žinski nije definisan, pošto za neki radioaktivni materijal koji se brzo raspada može da iznosi vrlo malu vrednost i obratno.

Koncentracija		100 r za vreme od	600 r za vreme od
4	C/m ²	1 čas	6 časova
2	„	2 časa	12 „
1	„	4 „	24 „
0,5	„	8 „	48 „
0,25	„	16 „	96 „
0,125	„	32 „	192 „
0,062	„	64 „	284 „

Gornja tablica, kao što se može videti, daje dozvoljeno vreme zadržavanja na nekom kontaminiranom terenu u ratnim uslovima, a da ne dođe do štetnih posledica. S druge strane, daje i vreme koje bi bilo fatalno za čoveka. Tako u slučaju da je rasut aktivitet od oko 0,06 C/m², bilo bi dozvoljeno zadržati se oko 60 časova, bez nekih težih posledica, dok bi zadržavanje od 250 časova izazvalo teška oštećenja, a u krajnjoj liniji i smrt.

Ovo računanje je vršeno za radioaktivni materijal srednje energije gama zračenja od 0,7 MeV, što bi odgovaralo produktima fisije, tj. pepelu iz nuklearnih reaktora ili atomske bombe. Za drugi gama radioaktivni materijal rezultati bi bili nešto promenjeni, ali bi u krajnjoj liniji red veličine ostao isti. Pošto veličina kiri definiše broj radioaktivnih raspada, računato je da pri svakom raspadu izleće jedan gama zrak, kao što je slučaj sa fisionim produktima. Ukoliko bi se materijal raspadao po drugoj šemi uz izbacivanje više gama zrakova, potrebna koncentracija materijala za toliko puta bi se smanjila.

II. — MOGUĆNOST PROIZVODNJE RADIOAKTIVNOG MATERIJALA U KOLIČINAMA POTREBNIM ZA RATNE POTREBE

Materijale koji bi eventualno mogli doći u obzir za upotrebu kao BRS možemo podeliti na tri grupe.

(I. Veštački proizvedeni radioizotopi u nuklearnom reaktoru.

2. Hemiski BOt sa radioaktivnim atomima.
3. Fisioni produkti stvoreni u toku rada nuklearnog reaktora i izdvojeni u procesu odvajanja urana i regeneracije nuklearnog goriva.

1. — Veštački radioizotopi

Postoji praktično vrlo veliki broj radioaktivnih izotopa koji se mogu proizvesti u nuklearnom reaktoru. Među njima uvek je moguće izabrati takav, čije zračenje i vreme poluraspada najbolje odgovara upotrebi u ratne svrhe. Praktično, svaki nuklearni reaktor je ustvari tvornica radioizotopa i to po našoj želji. Međutim u pogledu proizvodnje postoje izvesna ograničenja, a to su:

a) Količina materijala koja se može staviti u reaktor, da bi se ozračivanjem od njega proizveo radioaktivni materijal, ograničena je.

b) Materijal se mora držati u reaktoru izvesno vreme, kako bi se stvorio aktivitet. Vreme zadržavanja u reaktoru može da se reguliše po želji s tim da ukoliko materijal držimo duže, njegov specifični aktivitet je veći. Specifičnim aktivitetom nazivamo aktivitet po jedinici težine. Dužim zadržavanjem se dostiže zasićenje, tj. nije moguće dalje povećanje aktiviteta. Vreme zasićenja, pa i količina stvorenog aktiviteta, zavisi od vremena poluraspada. Može se uzeti da se zasićenje dostiže za više od šest vremena poluraspada.

c) Specifični aktivitet naročito zavisi od fizičkih osobina reaktora, u prvom redu od jačine neutronskog fluksa, tj. gustine neutrona u reaktoru. Neutronski fluks zavisi od konstrukcije reaktora i snage na kojoj reaktor radi.

Pošto bi za vojne potrebe bilo neophodno proizvoditi što veće količine radioaktivnog materijala visokog specifičnog aktiviteta, to bi se za takve potrebe mogli izgraditi specijalni reaktori koji bi najbolje odgovarali gornjim zahtevima. Ako bi se u slučaju potrebe postojeći eksperimentalni nuklearni reaktori u svetu počeli koristiti za masovnu proizvodnju radioaktivnog materijala za ratne

svrhe, što bi u krajnjoj liniji i bio najverovatniji način proizvodnje BRS, onda bi ta proizvodnja bila prilično skupa i spora.

Uzmimo naprimer proizvodnju radioaktivnog kobalta, koji ima vrlo prodorno zračenje od 1,2 MeV i dosta dugo vreme poluraspada od 6 godina. U danas najmodernijem reaktoru na svetu, američkom MTR, koji ima najviši neutronske fluks od prosečno 10^{14} neutrona / cm^2 . sek, podaci o proizvodnji bi bili sledeći:

Količina Co-metala koji se može odjednom staviti u reaktor, iznosi približno 1 kg.

Za vreme zadržavanja od 1 dana dobijamo specifični aktivitet od oko 4,8 C/gr.

Ukupna proizvedena količina u jednom danu 4.800 C.

Kao što vidimo proizvodnja je relativno niska uzevši u obzir vojne potrebe. S druge strane, najveći broj reaktora u svetu ima mnogo slabije osobine. Kod najvećeg broja proizvodne mogućnosti su za deset do sto puta slabije.

Treba spomenuti činjenicu da se umesto svakog proizvedenog radioaktivnog atoma u nuklearnom reaktoru može proizvesti atom nuklearnog eksploziva plutonijuma. Prema tome, proizvedeći radioaktivni materijal lišavamo se plutonijuma. Pitanje da li se bolje isplati proizvoditi nuklearni eksploziv ili radioaktivni materijal, svakako da uopšte ne dolazi u obzir. Istina je da kod niza reaktora koji danas postoje nije moguće u kraćem roku proizvesti kritičnu količinu plutonijuma za atomsku bombu, dok je moguće proizvoditi radioaktivni materijal. Međutim mala proizvodnja plutonijuma obično znači i male mogućnosti proizvodnje radioaktivnog materijala ukoliko se, razume se, ne radi o reaktorima sa mnogo obogaćenim ili čistim nuklearnim gorivom. U tom slučaju se, svakako, ne isplati trošiti čisto gorivo, koje se može iskoristiti kao eksploziv, za proizvodnju mnogo neefikasnijeg radioaktivnog materijala.

Iz ovoga vidimo da je proizvodnja radioaktivnog materijala aktivacijom u nuklearnim reaktorima u principu moguća, te da se može i izvršiti izbor materijala najpogodnijih osobina za ratne svrhe. S druge strane, ova pro-

izvodnja je mala i skupa. Uz to onemogućava proizvodnju nuklearnog eksploziva plutonijuma. Ekonomska računica bi, verovatno, pokazala da se ovakva proizvodnja ne isplati u odnosu na efekte koji se ovim materijalom mogu postići na terenu.

2. — Radioaktivni bojni otrovi ✓

Radioaktivni BOT bi se razlikovali od prve vrste radioaktivnog materijala jedino po tome što se ovde radioaktivni elementi ugrađuju u hemiska jedinjenja klasičnih BOT, u cilju povećavanja njihove otrovnosti. Proizvodnja ovih otrova sastojala bi se u prvobitnom proizvođenju radioaktivnih elemenata koji ulaze u hemiski BOT ozračivanjem u nuklearnom reaktoru i njihovoj naknadnoj sintezi.

U pomenutom slučaju broj elemenata je ograničen na one koji se nalaze u jedinjenjima otrovnih osobina, a to su, uglavnom, H, N, O, C, P, Cl, S, As itd. Proizvodnja ovih radioaktivnih atoma u nuklearnom reaktoru moguća je. Međutim njihove osobine ne odgovaraju potrebnim osobinama za BRS kao što možemo videti na sledećoj tabelici.

Kao što se vidi iz sledeće tablice praktično ni jedan element koji ulazi u sastav BOT nema osobine koje bi ga učinile upotrebljivim kao BRS. Od ovih elemenata jedan broj ne emituje uopšte gama zračenje usled čega ne predstavljaju opasnost kao spoljnje zračenje. Ukoliko emituju gama zračenje poluvreme im je isuviše kratko da bi se mogli efikasno koristiti.

Pošto je krajnji cilj upotrebe radioaktivnih BOT da se zadrži opasnost i onda kada je izvršena degazacija i uništena hemiska otrovnost BOT-a, to bi se u prvom redu računalo na spoljnje dejstvo njegovog zračenja. Lista elemenata pokazuje da bi ovo bilo minimalno. U pogledu na unutrašnje dejstvo zračenja, za slučaj da BOT proдре u organizam, njegova hemiska otrovnost mnogo će pre doći do izražaja i biti mnogo značajnija za onesposobljavanje vojnika nego dejstvo zračenja. Ovo utoliko pre što su granice otrovnosti kod modernih BOT vrlo niske.

Elementi	Vreme poluraspada	Energija beta zraka	Energija gama zraka
${}^1\text{H}^3$	12,5 god.	0,018 MeV	—
${}^6\text{C}^{14}$	5.720 „	0,155 „	—
${}^7\text{N}^{16}$	7 sek.	0,09 „	6 MeV
${}^8\text{O}^{19}$	27 s:k.	2,9 „	1,2 „
${}^9\text{F}^{20}$	10 sek.	5,5 „	1,6 „
${}^{15}\text{P}^{32}$	14,3 dana	1,7 „	—
${}^{16}\text{S}^{35}$	87,1 dan	0,17 „	—
${}^{17}\text{Cl}^{36}$	0,44 10^6 god.	0,7 „	—
${}^{17}\text{Cl}^{38}$	37,3 min.	4,18 „ 1,11 „	1,6 „ 2,2 „
${}^{35}\text{Br}^{82}$	1,5 dana	0,4 „	0,2-1,4 „
${}^{33}\text{As}^{76}$	1,1 „	2,9 „	2,0 „

Iz svega izlazi da se upotreba BOT sa ugrađenim radioaktivnim atomima ne bi isplatila. Proizvodnja radioaktivnog materijala je skupa, a hemiska sinteza BOT, najčešće polazeći od elemenata ili prostih jedinjenja, u kakvom se obliku radioaktivni materijal proizvodi u reaktoru, suviše je komplikovana. Efikasnost ovakvih BOT ne bi mogla da opravda ovako skupu proizvodnju.

3. — Fisioni produkti

Fisioni produkti predstavljaju radioaktivni materijal koji se tokom rada nuklearnih reaktora stvara od urana koji je pretrpeo nuklearno deljenje. Ovaj materijal predstavlja smešu velikog broja radioaktivnih elemenata, oko

200, i izdvaja se iz urana u toku njegove prerade i izdvajanja plutonijuma. Pošto je to smeša, teško je odrediti njene osobine, kao što su vreme poluraspadanja i energija zračenja. Vreme poluraspadanja smeše ne može se ovde definisati, pošto se tokom vremena menja, a energiju zračenja moguće je izraziti samo kao srednju vrednost. Za gama zračenje ova iznosi 0,7 MeV, dok je za beta 0,4 MeV.

Brzina raspadanja se obično izražava formulom

$$I = I_0/T^{1,2}$$

gde je I intenzitet zračenja, a T vreme izraženo danima. Kao što vidimo, ukoliko vreme produžavamo, aktivnost sve sporije opada, tako da se može smatrati da ovaj materijal živi vrlo dugo.

Količina fisijonih produkata proizvedenih u reaktoru vrlo je velika. Njihovo prisustvo u reaktoru je štetno, pa je s vremena na vreme potrebno preraditi gorivo i fisijone produkte odvojiti. Tako se fisijoni produkti pojavljuju kao otpadni produkti pri radu nuklearnih reaktora. Količina ovih produkata naročito je velika kada reaktor radi velikom snagom, kao što je slučaj sa reaktorima za proizvodnju plutonijuma. Ovde može da se smatra da se uz svaki kilogram plutonijuma proizvede na stotine hiljada kirija fisijonih produkata. Ovu ogromnu količinu radioaktivnog materijala industrija nije u mogućnosti da apsorbuje i da je iskoristi. Radi toga se ovaj materijal obično ukopava duboko u zemlju i čuva, kako se aktivnost ne bi rasprostirala po zemljištu i izazvala kontaminacije širokih prostranstava.

Ovaj radioaktivni materijal mogao bi se koristiti i kao BRS. Njegova duga aktivnost omogućuje da se stavlja u skladišta i koristi u potrebnom momentu. Pitanje njegove cene se ne postavlja pošto je to otpadni produkt nuklearne industrije. Materijal bi se mogao koristiti u obliku prašine kojom bi se zasipao protivnički položaj. Velike količine toga materijala koje već postoje u svetu, i dalje u mogućnosti proizvodnje, pretstavljaju ratnu rezervu.

Postoje potencijalne mogućnosti da se ovaj otpadni produkt, danas sve veće nuklearne industrije, koristi kao BRS. Ostaje nerešeno pitanje kako zaštititi sopstvene trupe prilikom upotrebe ovog BRS. Isto tako ostaje pitanje šta da se učini sa ovim radioaktivnim materijalom rasprostrtim po terenu kada on izvrši svoju ulogu kao BRS. Kao što smo videli fisioni produkti su radioaktivni materijal dugoga života i oni će nastaviti da zrače još dugo vremena pošto su ispunili svoju namenu u ratu.

III. — MOGUĆNOSTI TRANSPORTA I PREBACIVANJA RADIOAKTIVNOG MATERIJALA NA CILJ I OCENA OSNOVNIH EFEKATA

Kao što smo napred videli, bilo koji od navedenih oblika radioaktivnog materijala moguće je teoriski koristiti kao BRS. Međutim, praktično, jedino fisioni produkti predstavljaju ekonomičan način korišćenja BRS. Veštački radioizotopi proizvođeni u nuklearnom reaktoru mogli bi po svojim osobinama takođe doći u obzir. Poteškoća je jedino relativno mala mogućnost proizvodnje i visoke cene. Radioaktivni BOt nemaju nekakvu veću praktičnu vrednost, pošto je nemoguće izvršiti pogodan izbor radioaktivnih elemenata, dok su, sa druge strane, teškoće sinteze i proizvodnje radioaktivnog materijala velike, pa prema tome i proizvodni troškovi.

Ostaje da se ispituju praktične mogućnosti korišćenja u prvom redu fisionih produkata, pošto su se oni sa proizvodne strane pokazali najpogodniji. Zadatak bi se sastojao u analiziranju mogućnosti dopremanja radioaktivnog materijala na cilj u ratnim uslovima i u proceni efekata koji se mogu postići ovom upotrebom.

Radioaktivni materijal bi se mogao izbacivati na cilj slično BOt, tj. pomoću granata punjenih ovim materijalom, avionskih bombi ili polivanjem iz aviona odnosno rasprašivanjem, ukoliko je materijal u obliku prašine. U stranoj vojnoj literaturi već se i pojavljuju skice granata i avionskih bombi punjenih sa BRS. Ove se ničim ne razlikuju od granata punjenih sa BOt, samo što je umesto hemiskog otrova stavljen radioaktivni materijal.

Osnovni problem koji se sada postavlja je: kako zaštititi sopstveno ljudstvo od dejstva nuklearnog zračenja prilikom dopremanja i upućivanja BRS na cilj?

Ako uzmemo da je zadatak da se izvrši kontaminacija odbranbenog otseka jedne divizije širine i dubine od oko 10 km, prema napred datoj tabeli vidimo da je za to potrebno, u slučaju namere da se spreči duže zadržavanje neprijatelja od 24 časa, upotrebiti količinu od 16 miliona kirija. Ova ogromna količina radioaktivnog materijala teško da bi se mogla ikakvim sredstvima transportovati. Ljudi koji ovim materijalom rukuju, uz sve mere opreze, bili bi izloženi strahovitom dejstvu zračenja. Ako bi se količina raspodelila i na stotine delova ipak je to još uvek velika opasnost. Usled toga, kontaminacija iz aviona koji bi prosipali radioaktivni materijal bila bi moguća jedino pomoću aviona bez posade. U običnom avionu posada bi morala biti zaštićena od zračenja metalnim štitom takve težine, da ga nikakav avion ne bi mogao dići.

Kontaminacija preko artiljeriskih zrna stvara slične probleme. Jedna granata koja treba da izvrši kontaminaciju 500 kvadratnih metara, mora biti punjena količinom od 80 kirija radioaktivnog materijala. Ova količina stvara na rastojanju od oko 70 sm dozu zračenja od 80 r za jedan čas. Zaista je teško zamisliti na koji način bi jedna artiljeriska jedinica izvršila kontaminaciju neprijateljskog terena, a da i sama ne bude izložena znatnim dozama zračenja.

Iz ovoga proizlazi da upotreba radioaktivnog materijala izgleda tehnički teško izvodljiva. Osnovni razlog tome je velika količina radioaktivnog materijala koju treba upotrebiti da bi se izvršila kontaminacija koja bi imala značaja za borbena dejstva trupa. S druge strane, praktično je vrlo teško obezbediti zaštitu od nuklearnog zračenja u poljskim uslovima. Ovo vredi kako za onoga koji se brani tako i za onoga koji napada.

Poznata je stvar da u nuklearnoj industriji rukovanje radioaktivnim materijalom pretstavlja vrlo težak problem koji se rešava primenom komplikovanih tehničkih uređaja koji služe da se sa ovim materijalom rukuje sa rastojanja i iza zaštitnih pregrada, kako ljudstvo ne bi bilo

izloženo zračenju. Razume se da se u poljskim uslovima ove mere mogu vrlo teško obezbediti. Za to su potrebne posebne instalacije koje se ne mogu dopremiti i montirati na svako mesto, te je rukovanje BRS za potrebe borbenih dejstava u poljskim uslovima vrlo težak problem.

S druge strane, šta se postiže upotrebom BRS? Videli smo da se ne može uopšte računati na neko momentalno dejstvo zračenja kojim bi neprijatelj bio izbačen iz stroja odmah. Ako je primljena doza i veća od dozvoljene, efekti zračenja se pojavljuju tek posle izvesnog vremena koje iznosi i po nekoliko nedelja. Znači da se upotrebom BRS ne može nikada da računa na efekte koji bi se u kratkom roku mogli eksploatisati. Gustina kontaminacije koja je data u navedenom primeru, sprečava zadržavanje na terenu duže od 24 časa. U tome roku ne mogu se očekivati nikakve naročite posledice i oštećenja. Da bi se postigli smrtni efekti potrebno je zadržati se na terenu čitavih šest dana i noći.

Već za ovu kontaminaciju videli smo da je potrebna ogromna količina radioaktivnog materijala i da se postavlja pitanje kako ga dopremiti na cilj. Za manje kontaminacije, koje su lakše izvodljive, dozvoljeno vreme zadržavanja je duže. U tome slučaju, ukoliko je kontaminirani položaj naročito važan za razvoj ratnih operacija, uvek je moguće kontrolisati dozu zračenja i u odgovarajućim periodima vremena vršiti smenu jedinica. Ovo vredi utoliko pre što velike kontaminacije zbog kojih bi trebalo vršiti smenu često nisu verovatne.

Možda bi bilo interesantno razmotriti mogućnosti i efekte kontaminacije užih prostora naročito važnih za odbranu, kao što su mostobrani, uporišta itd. U ovom slučaju manja količina radioaktivnog materijala mogla bi da stvori na uskom prostoru veću kontaminaciju, te na taj način prisili branioca na predaju. Ovde bi verovatno moglo doći do efikasnije upotrebe BRS, mada u današnje vreme nuklearnog oružja mogu za takve situacije da se nađu mnogo efikasnija i ne toliko rizična sredstva.

Ako bi uopšte došlo do upotrebe BRS u jednom budućem ratu, onda bi se najverovatnije u prvom redu računalo na psihičke efekte koje bi ovakva upotreba mogla

da izazove. Misterija radioaktivnog zračenja potencirana veštom propagandom mogla bi da izazove paniku i rasulo, što bi se u ratu dalo vešto iskoristiti. Ovde uopšte nisu važni intenziteti zračenja i jačina kontaminacije. U ovom slučaju disciplina i upoznavanje ljudstva sa osnovnim pojmovima i opasnošću od zračenja mogu paniku potpuno da spreče. Znači, kao osnovni zadatak postavlja se uvežbavanje i obuka ljudstva.

Identičan slučaj može nastati pri kontaminaciji pozadine u cilju njenog dezorganizovanja. I ovde posledice mogu biti teške ukoliko organizacija zaštite ne obavi svoj posao kako treba.

ZAKLJUČAK

Mada se danas na mnogim mestima u stranoj štampi pa i vojnoj literaturi pojavljuju senzacionalni prikazi o mogućnostima korišćenja BRS, analizirajući objektivno ove mogućnosti dolazimo do zaključka da je ova upotreba malo verovatna.

Svaki radioaktivni materijal pretstavlja potencijalnu opasnost za čoveka koji se u njegovoj blizini nalazi, a sprečiti supstancu da zrači nemoguće je. Time se i onaj koji BRS upotrebljava i napadnuti nalaze u sličnoj opasnosti od zračenja i u oba slučaja je teško organizovati efikasnu odbranu.

Ne zadržavajući se na moralnoj strani upotrebe BRS, mada se i ona može razmatrati, pošto radioaktivni materijal može da zrači godinama i pretstavlja opasnost po čitav živi svet na terenu na kome se nalazi, posmatrajući samo vojno-tehničku stranu problema izlazi da BRS ne bi mogla da imaju onakav značaj kakav im najčešće pripisuje strana štampa.

Pukovnik BAKARIĆ VLADIMIR

SREDSTVA ZA NOŠENJE I IZBACIVANJE ATOMSKIH ORUŽJA

Brzi razvoj atomskih oružja i sredstava za njihovo nošenje i izbacivanje u toku proteklih nekoliko godina omogućio je da se atomska oružja danas mogu postavljati na cilj na više načina. U osnovi postoje četiri načina: avionima, artiljerijom, vođenim i nevođenim zrnima i postavljeni (ukopani) eksploziv u obliku mine.

1) AVIJACIJA KAO NOSILAC ATOMSKIH ORUŽJA

Taktičko-tehničke osobine savremenih aviona i tradicionalno iskustvo avijacije u izvršenju bombarderskih napada za sada je nesumnjivo čine osnovnim sredstvom za nošenje termonuklearnih i nuklearnih oružja. Radijus dejstva, visina leta, brzina, nosivost, zadovoljavajuća preciznost i mogućnost dejstva gotovo po svakom vremenu — to su osobine avijacije koje omogućavaju dejstvo atomskim oružjem skoro u svako vreme i na bilo kojoj tački Zemljine površine.

Radijus savremenih teških bombardera kreće se od 6—10 pa i više hiljada kilometara, a može se još više povećati dejstvom sa isturenih baza i dopunskim punjenjem u vazduhu. Već od 1960 god. može se očekivati pojava superteških bombardera na atomski pogon, koji će, u odnosu na veličinu Zemlje, imati neograničen radijus.

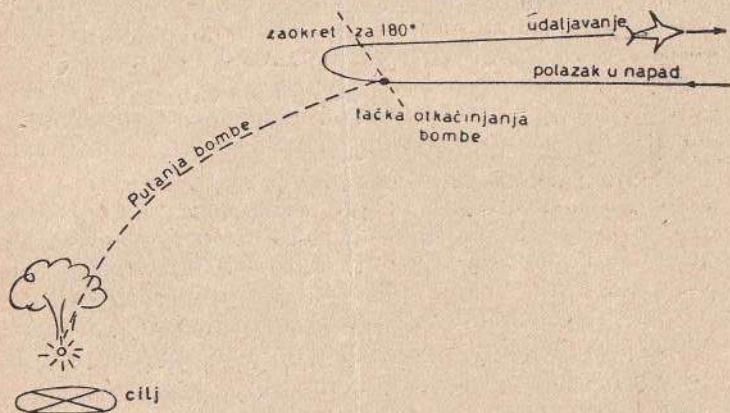
Radijus dejstva srednjih bombardera kreće se od 3 — 6 hiljada kilometara, a pored punjenja u vazduhu i dejstva sa isturenih baza, oni se mogu približiti ciljevima

odnosno može im se omogućiti dublji prodor u neprijateljsku teritoriju još i nosačima aviona.

Konstruktivno smanjenje težine termonuklearnih i nuklearnih bombi na nekoliko tona za prve, odnosno 500—1.000 kg za druge, omogućuje nošenje prvih na svim tipovima teških i većem broju srednjih bombardera. Taktičke nuklearne bombe mogu da nose svi tipovi savremenih lovaca-bombardera, jer se njihova nosivost danas kreće oko 1.000 kg. Potrebno je napomenuti da i sama zamena punog tereta klasičnih bombi jednom relativno lakšom nuklearnom ili termonuklearnom bombom istovremeno povećava i radijus dejstva zbog mogućnosti uzimanja veće količine goriva.

Visina leta za avion koji nosi atomsko oružje je važna iz dva razloga. Prvo, što izbegava i umanjuje dejstvo PAO, a drugo, što treba da izbegne posledice eksplozije sopstvene bombe. Savremeni mlazni bombarderi svih kategorija mogu da lete na visinama od 15 — 20 km što je, uz odgovarajući manevar, dovoljno da se izbegne samouništenje ili oštećenje, čak i pri eksploziji najjače postojeće bombe. Minimalna visina bacanja nominalnih nuklearnih bombi iznosi 8.000 m, a za termonuklearne bombe 15.000 m, kako bi se avion za vreme pada bombe zaokretom unazad mogao udaljiti i izbeći posledice eksplozije.

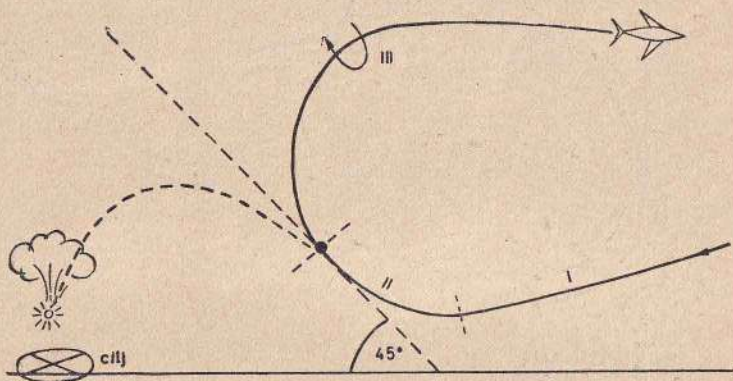
W



Slika 1. — Uobičajeni manevar za bacanje nuklearne bombe

Za vreme od 40—60 sekundi, koliko iznosi vreme pada bombe, avion može načiniti zaokret za 180° i udaljiti se za 5—10 km. Istovremeno bomba produžuje kretanje u suprotnom pravcu za približno istu vrednost, tako da je avion u momentu eksplozije udaljen 10—20 km od tačke eksplozije što ga u potpunosti obezbeđuje od oštećenja.

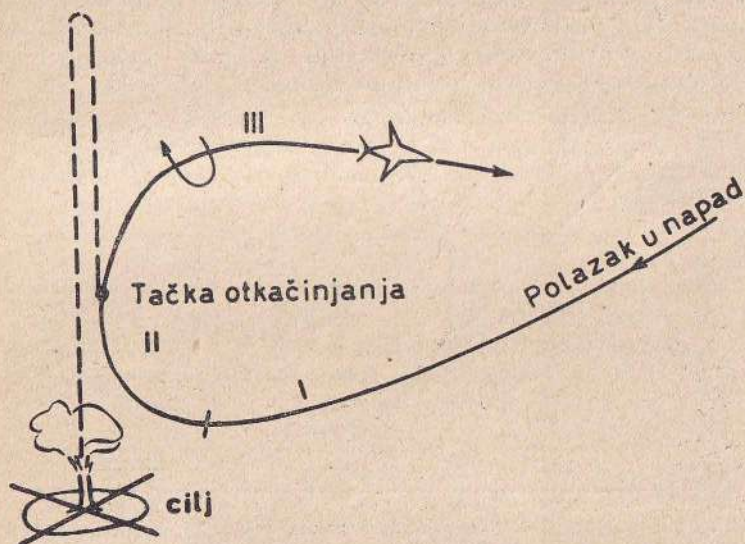
Ukoliko se ukaže potreba za manjom visinom bacanja upotrebom padobrana se može postići potrebno vreme da avion izađe iz opasne zone. Kod bombi koje treba da eksplodiraju na samoj površini zemlje, ili ispod nje, moguće je, uz upotrebu vremenskih upaljača, bacanje i sa najmanjih visina, uključujući i brišući let.



Slika 2. — Napad lovca-bombardera na cilj atomskom bombom sa prelaskom u imelman

S obzirom da letovi na velikim visinama omogućuju ranije otkrivanje napadačkog aviona, a time i njegovo efikasno presretanje lovcima, to se kao ozbiljan problem razmatra bacanje nuklearnih bombi pomoću lovca-bombardera sa malih visina. Jedan od tih načina, jeste napad iz blagog poniranja pri maksimalnoj brzini sa bacanjem bombe pod 45° i prelaskom u imelman. Drugi način, je sličan prvom sa tom razlikom što se bomba baca iz propinjanja vertikalno uvis.

Brzina aviona, koji se danas nalaze u naoružanju, kreće se od 800—1.000 km/čas. Brzine lovaca svega su za 10 — 20% veće od bombardera, što znatno otežava odbranu. Ako uzmemo prosečnu brzinu bombardera 900 km na čas, a baziranje lovaca-bombardera 100 km, srednjih bombardera 200 i teških bombardera 300 km od linije fronta, izlazi da im je za to rastojanje potrebno 15 do 25 minuta (sa poletanjem i penjanjem). To je ujedno i vreme potrebno za dejstvo po ciljevima na bojištu, a ako se ci-



Slika 3. — Napad lovca-bombardera na cilj atomskom bombom u propinjanju

ljevi nalaze u operativnoj dubini, onda je potrebno svega još pet minuta više. Dakle, vidimo da se za vreme od 30, do 1^h može, iz pripravnosti na aerodromu napasti svaki cilj do 500 km dubine. Ukoliko avioni nisu u pripravnosti, onda se vreme udvostručuje pošto je, prema najnovijim podacima, vreme za tehničku pripremu aviona za podvešivanje nuklearnih bombi svedeno na 1/2 — 1 čas.

Najveća prednost avijacije nad ostalim sredstvima za izbacivanje je mogućnost manevra, jer se ona u veoma kratkom vremenu može da prebazira sa jednog kraja bojišta na drugi. Pri dobroj organizaciji brzina prebaziranja je skoro ravna putnoj brzini. Ako su u pitanju manje grupe aviona, to je i vreme za pripremu prebaziranja veoma kratko. Potpuno je sigurno da će za potrebe hitne intervencije protiv novopojavljenih rentabilnih ciljeva postojati na aerodromima određene grupe aviona koji će biti spremni da za najkraće vreme polete bilo na cilj, bilo da izvrše manevar na drugi aerodrom. Iako vođena zrna, a naročito artiljerija, raspoložu većom tačnošću pogađanja od avijacije (na kraćim otstojanjima) rezultati koje je avijacija postigla razvojem nišanskih sredstava i sistema bombardovanja pokazuju da ta razlika nije velika. Pred kraj Drugog svetskog rata više od polovine pogodaka teških bombardera kretalo se u krugu od 500 — 1.000 m od cilja i to sa visine od 5 — 8.000 m. Prema najnovijim podacima novim elektronskim nišanskim spravama rasturanje je smanjeno ispod 500 m, što je za bombardovanje atomskim bombama dovoljno, jer se u tom slučaju tačka eksplozije za bombu od 20 KT nalazi unutar kruga potpunog uništenja. Sigurno je da će u ratu, zbog faktora sigurnosti i borbene situacije, biti priličan procenat promašaja, ali sa gornjim normama ipak treba računati jer će, u svakom slučaju, ta bombardovanja vršiti najbolja posada, uz najbrižljiviju pripremu i sva moguća elektronska obezbeđenja.

Sem u izuzetnim situacijama (oluja ili veoma gusta magla), avijacija može da dejstvuje danas pod svim meteorološkim uslovima i u svako doba dana, noći i godine. Zahvaljujući elektronskim sredstvima za navigaciju, kiša, magla, oblaci i noć nisu više velika prepreka za dejstvo avijacije. Već pred kraj Drugog svetskog rata, zahvaljujući vođenju aviona pomoću radara, moment otkačinjanja bombe kroz oblake ili noću mogao se odrediti sa tačnošću od 150 — 200 metara na daljinu do 250 km. Svakako je razvoj elektronike u toku poslednjih nekoliko godina stvorio još savršenija sredstva u pogledu dometa i preciznosti.

Za uništavanje duboko ukopanih objekata značajnu ulogu igra i dubina prodiranja bombe kroz zemlju. Konstrukcija košuljice bombe i brzina padanja omogućavaju za sada dublji prodor bombe od 7—15 metara ispod površine zemlje. Zbog toga i krateri atomskih bombi ne mogu da budu dublji od 30 — 50 metara, što zavisi od tvrdoće zemljišta. S obzirom da se na većinu ukopanih objekata, zbog njihovih dimenzija i važnosti, neće bacati projektili veće razorne moći od 20 KT, to će i debljina natsloja od 50 — 100 metara biti dovoljna. Znači, za takva skloništa mogu se upotrebiti i manji brežuljci, kose i sl.

2) PREMA NAMENI RAZLIKUJEMO ČETIRI OSNOVNE KATEGORIJE PROJEKTILA:

✓ *Zemlja-zemlja.* — Namereni su za dopunu i zamenu avijacije i klasične artiljerije.

Domet im se kreće prema tipovima, od nekoliko kilometara kod protivtenkovskih i taktičkih slobodno-letećih i vođenih raketa, do nekoliko hiljada kilometara kod interkontinentalnih vođenih projektila. Bojeva glava može da nosi do 1.000 kg eksploziva ili nuklearno punjenje.

✗ *Vazduh-zemlja.* — Namereni su za izbacivanje iz aviona u cilju veće preciznosti pogađanja i izbegavanja vatre PAA, a kod atomskih projektila još i u cilju izbegavanja sopstvenog oštećenja.

✗ *Zemlja-vazduh.* — Namereni su za dopunu i zamenu klasične PA artiljerije i lovačke avijacije. I kod njih se predviđa razvoj sa atomskim punjenjem za borbu protiv velikih bombarderskih formacija.

✗ *Vazduh-vazduh.* — Dopunjavaju i zamenjuju automatska oruđa na avionima za borbu protiv neprijateljske avijacije.

Načini upravljanja na cilj mogu biti sledeći:

— slobodan let, usmeravanje samo punjenjem i elevacijom;

— radio i radar-upravljanje sa zemlje;

— samonavođenje uređajima u samome projektilu na radio, radar, žiroskopskom, astronavigacionom i toplotnom principu;

— kombinovani sistem gornjih principa.

AVIONI KOJI MOGU NOSITI »A« i »H« ORUŽJE
A NALAZE SE U NAORUŽANJU

Prilog br. 1

Zemlja	Tip	Brzina maks. km/čas	Plafon u m	Težine	Nosivost	Taktički radijus	Nosivost bombi	R Z	Topovi Mitraljci	NAMENA	Napomena
ENGLESKA	Canbera B-8	890	18.000	21.000 kg	10.000 kg	+	1.700 kg	nema	4×20 mm	Laki bombarder	
ENGLESKA	Valiant	800	15.000	54.500 kg	25.000 kg	6-7 čas 3-3.500 stm	A i H	nema	—	Teški bombarder	Ušao u jedinice RAF-a
ENGLESKA	Vulcan	Ispod brzine zvuka	+15.000	60-70.000 kg	—	manji od Valianta	A i H	nema	—	Teški bombarder	Prva eskadrila biće formirana krajem 1956 god.
S A D	B-52	960	+15.000	158.000 kg	—	Dolet 11.000 km	A	—	—	Teški bombarder	
S A D	B-47	+960	+12.000	90.000 kg	—	5.500 km	9.000 kg i A	—	2×20 mm	Srednji bombarder	
S A D	B-36	700	+13.000	181.000 kg	—	Dolet 12.800 km	38.000 kg A i H	—	16×20 mm	Strategijski teški bombarder	
S A D	F-84 F Thunderstreak	1.040	+13.000	11.350 kg	—	1.600 km	4×453 kg A	24 kom.	—	Lovac bombarder	
S A D	B-66	—	—	35.000 kg	—	—	A i H	—	2×20 mm	Laki bombarder	
S S S R	IL-28	900	+13.000	20-24.000	—	3-7.000 km	3.000 kg A	—	3×23 mm	Srednji bombarder	Nalazi se u nao- ružanju Čehosl., Rumun. i Mad.
S S S R	Tu-16	1.050	12.000	50.000 kg	—	6.000 km	3.000 kg A	—	7×20 mm	Srednji bombarder	
S S S R	Tu-95	1.000	14.000	200.000	—	17.000 km	6-14.000 kg A i H	—	—	Teški bombarder	
S S S R	M-4	1.050	+15.000	200.000	—	7-12.000 km	17.000 kg A	—	10×23 mm	Teški bombarder	

Po konstrukciji vođeni projektili mogu biti:

- balistički, bez nosećih (krilnih) površina;
- nebalistički (aerodinamički), koji ustvari predstavljaju avione-robote bez posada.

Za pogon se koriste različite vrste poznatih mlaznih i raketnih motora.

Brzina vođenih projektila kreće se, u zavisnosti od konstrukcije i tipa, od 0,8 do 5 Mach (800 do 6.000 km/č).

Tačnost pogađanja postojećih taktičkih projektila, dometa do 800 km, kreće se u granicama od 100 do 300 metara (poluprečnik 50% pogodaka).

Vreme za pripremu oruđa za dejstvo kreće se od 1 do 3 časa za taktičke projekte.

Vidimo da je dobar deo postojećih vođenih zrna predviđen za nošenje nuklearnih, a neki tipovi interkontinentalnih zrna i za nošenje termonuklearnih punjenja.

Prilog br. 2

Kratak pregled broja upravljanih projektila
i to po državama

Država	Broj tipova			NAPOMENA
	u ispitivanju	u proizvodnji	Svega	
SAD	31	12	43	Vidi bilten ABH br. 1 od 1956 god.
SSSR	4	4	8	— „ —
Engleska	9	—	9	— „ —
Francuska	6	—	6	— „ —
Kanada	2	—	2	— „ —
Italija	1	—	1	— „ —
Švajcarska	2	1	3	— „ —
Japan	2	—	2	— „ —

Iako na putu razvoja vođenih zrna stoje još mnoge prepreke, naročito u sistemu upravljanja i problema košuljice pri brzinama preko toplotne barijere, njihovo postojanje u naoružanju velikih armija i mogućnost nošenja

nuklearnih punjenja stvara od njih oružja strahovite razorne moći, čije je dejstvo moguće kako na prostoru čitavog vojišta, tako i u bližoj pa i dubljoj pozadini.

3) ATOMSKI TOP

Razvoj nuklearnog oružja doveo je do smanjenja kritične mase i oklopa, tako da je težina zrna već svedena na ispod 500 kg, što je omogućilo njegovu primenu i kao



Slika 4. — Atomski top

artiljeriskog zrna. Ta težina, za artiljeriju još uvek velika, uslovlila je upotrebu atomske granate samo za oružja velikog kalibra. Da bi odgovarala taktičkoj nameni i bila rentabilna, ova oruđa moraju biti dalekometna. Ti zahtevi su doveli do konstrukcije američkog atomskog topa kalibra 280 mm. Težina ovog oruđa je 80 tona, a vuku ga dva tegljača-guseničara u tandemu, tako da je celokupna

dužina na maršu 36 metara. Zbog svoje težine i dužine atomski top kalibra 280 mm može da se kreće samo na ograničenom broju drumova i preko mostova velike nosivosti. To znači da mu je manevarska mogućnost, i pored moguće brzine od 60 km/čas, slaba, a u brdskom i planinskom zemljištu nikakva. Istovremeno se u SAD radi intenzivno i na konstrukciji atomskih granata za samohodna oruđa, kalibra 190 i 150 mm, koja bi mogla izbacivati granate sa nuklearnom bojevom glavom jačine 10,5 pa i 2 kilotona.

Prema američkim podacima SSSR raspolaže atomskim topom kalibra 210 mm.

Najverovatnije je da se tendencija razvoja atomske artiljerije neće kretati ka stvaranju novih oruđa, nego prilagođavanju atomskih granata postojećim oruđima manjeg kalibra (i konstrukciji zrna manje razorne moći).

Od uspešnog rešenja tog pitanja zavisiće i dalje postojanje atomske artiljerije u klasičnom smislu, ili njena zamena vođenim projektilima i slobodno letećim raketama.

4) POSTAVLJANJE NUKLEARNOG EKSPLOZIVA NA MESTU UPOTREBE

Pored tri napred navedena sredstva za lansiranje nuklearnih i termonuklearnih zrna, moguća je upotreba nuklearnih eksploziva i postavljanjem ili ukopavanjem na mestu upotrebe.

Nuklearni eksploziv se može koristiti kao *atomska mina*, koja se postavlja na mesto upotrebe prilikom povlačenja sopstvenih snaga i to sa ciljem da svojim razornim i radiološkim dejstvom onespособi i kontaminira za duže ili kraće vreme određeni važan objekat ili komunikacijski pravac, i onemogućiti neprijatelju njegovo korišćenje. Naročito dolaze u obzir velike saobraćajne raskrsnice i važne komunikacije u uskim dolinama, koje je nemoguće zaobići. Postoji mogućnost da se mina aktivira i posle zauzimanja terena od strane neprijatelja, ali bi to, zbog mogućnosti otkrivanja, bilo rizično.

Prednost ukopane atomske mine je još i u tome što se ona može dublje ukopati nego što atomska zrna mogu prodreti u zemlju. Time se postiže i daleko veći krater i veća količina izbačenog materijala.

5) IZBOR SREDSTAVA ZA IZBACIVANJE

Kojim će sredstvima atomsko oružje biti bačeno na cilj zavisice svakako od konkretnih uslova borbene situacije. Tu spada: karakter, mesto, važnost i rentabilnost cilja, potrebno vreme za pripremu oružja, vrsta raspoloživih oružja i način komandovanja njima, meteorološki i zemljišni uslovi itd.

Prema svom karakteru atomski cilj može biti: taktički, operativni ili strategiski, zatim pokretan ili nepokretan, stalan ili privremen, branjen, maskiran, ukopan itd.

Razlikovanje cilja po mestu odnosi se uglavnom na njegovu udaljenost od linije fronta.

Važnost i rentabilnost cilja zavisi od rezultata koji će se postići njegovim uništenjem ili neutralisanjem. Ona može biti: stalna ili privremena. Stalnu važnost imaju uglavnom veliki strategiski objekti, dok privremenu mogu da dobiju određeni objekti (luke, delovi železničke mreže, skladišta itd.) ili vojne jedinice — u zavisnosti od njihove uloge u jednoj operaciji u određenom momentu.

Pokretljivost cilja je elemenat koji utiče na vreme potrebno za pripremu oružja, a time i na sredstvo za izbacivanje.

To isto važi i za privremene ciljeve, naprimer koncentracije trupa, koji se povremeno pojavljuju da bi po izvršenom zadatku nestali (kao cilj) rasturanjem na širu prostoriju. Na izbor sredstava za lansiranje takođe utiču raspoloživa oružja, način njihove upotrebe i vreme potrebno za njihovu primenu, što se naročito ispoljava kod pokretnih i vremenski kratkotrajnih (privremenih) ciljeva. Za te ciljeve, ako ostali uslovi ne diktiraju drugačije, vojni starešina će uvek izabrati ono sredstvo koje traži najmanje vremena za pripremu, a nalazi se direktno pod njegovom komandom (artiljerija, vođena zrna), a ne ona za čiju upotrebu treba da traži odobrenje od viših ili sadejstvujućih štabova (avijacije).

Prilog br. 3

Orijentacioni pregled izbora lansiranih sredstava i vrsta oružja u zavisnosti od karaktera i udaljenosti cilja

Grupe ciljeva i udaljenost	Ciljevi	Vrsta oružja	Sredstva za lansiranje
Strategijski objekti duboke pozadine udaljeni preko 3.000 km	a) Važni vojno-politički, administrativni, industrijski i saobraćajni centri velikog prostiranja b) Iste objekti kao gore srednje veličine	Termonuklearne bombe	Teška bombarska avijacija, interkontinentalna vođena zrna
Strategijski objekti duboke pozadine udaljeni do 3.000 km	Kao pod a) Kao pod b)	Nuklearne bombe 20—500 KT Termonuklearne bombe	Srednja bombarska avijacija, interkont. vođena zrna, teška bombarska avijacija
Objekti operativnog značaja u vojnoj dubini do 1.000 km	Armiske baze, aerodromi, saobraćajni centri, raskrsnice, luke, industrija za remont i snabdevanje vojista, flotni sastavi, bojni brodovi, nosači aviona, konvoji	Nuklearne bombe 1—50 KT	Lovачko-bombarska avijacija, taktička vođena zrna, srednja bombarska avijacija
Objekti taktičkog i operativnog značaja na bojištu	Koncentracije trupa od bataljona naviše, grupacije tenkova, artiljerijske grupe, utvrđeni rejonni, manji ratni brodovi, vazdušni i pomorski desanti po iskrcavanju	Nuklearno oružje 1—20 KT	Lovачko-bombarska avijacija, taktička vođena zrna, slobodno letéće rakete, atomska artiljerija
Objekti u vazduhu	Velike grupe bombardera, manje grupe i pojedinačni avioni koji nose atomske bombe, veliki vazduhoplovni desanti u vazduhu	Nuklearno oružje 1—20 KT	Lovачka avijacija sa zrnima vazduh - vazduh. Vođena zrna zemlja - vazduh

Iako sva navedena lansirna sredstva mogu uglavnom da djeluju na svakom zemljištu i pod svim meteorološkim uslovima, u određenim situacijama (kao što su: teže prohodno zemljište za artiljeriju ili naročito nepovoljni meteorološki uslovi za avijaciju), zemljište i meteorološki uslovi imaju značajan uticaj na određivanje vrste lansirnog sredstva, odnosno zamenu jednog drugim.

Izbor sredstava za izbacivanje zavisiće i od njegove nosivosti u odnosu na težinu datog oružja. Termonuklearne bombe mogu nositi za sada samo najteži i srednji bombarderi, a predviđaju se i interkontinentalna vođena zrna. Ojačane nuklearne bombe, preko 20 KT mogu da nose srednji bombarderi, a takođe i neki tipovi vođenih zrna. Taktička nuklearna oružja od 20 KT i manja mogu nositi i izbacivati sva napred pobrojana sredstva.

Na kraju, potrebno je napomenuti da bi prednje razmatranje odgovaralo približno prvom periodu rata koji bi eventualno sada izbio. Međutim, nalazimo se u periodu neviđenog tehničkog napretka koji iz dana u dan donosi sve savršenija i savršenija oružja, tako da je veoma teško davati bilo kakve određenije programe za kasnije.

Savladavši zvučnu barijeru, avioni kreću u napad na toplotnu. Vođena zrna se približavaju potpunoj automatizaciji. Ne treba da nas iznenadi smanjenje atomskih projektila na 20—50 kg, a time i njihova primena u poljskoj artiljeriji i raketama malog kalibra.

To sve zahteva stalno povećanje vojne tehnike i brzo preduzimanje efikasnih protivmera kako bi se dejstvo tih budućih oružja za masovno uništavanje svelo na najmanju moguću meru.

* * *

Potpukovnik PEROLO VIKTOR

VRSTE NUKLEARNIH EKSPLOZIJA

1. UOPŠTE O NUKLEARNOJ EKSPLOZIJI

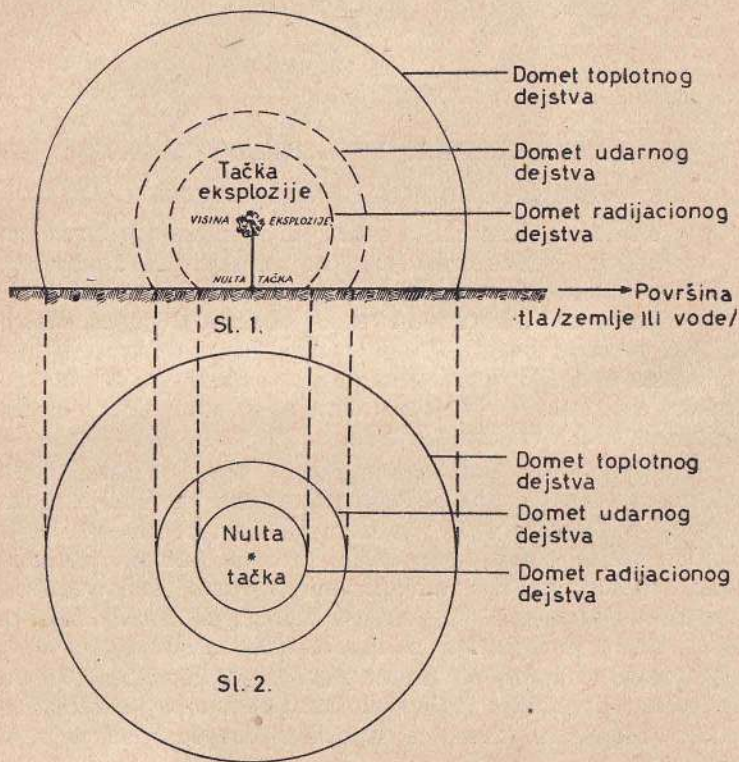
Nuklearna eksplozija može biti izvršena u raznim atmosferskim prilikama i na najrazličitijem zemljištu. No, bez obzira na navedene okolnosti ona će uvek dejstvovati pravoliniski u sve strane i obuhvatiti jedan manji ili veći prostor u kome će se ispoljiti njena razorna i uništavajuća moć. Prostor u kojem se ispoljava celokupno dejstvo nuklearne eksplozije ima uglavnom sferni oblik, neobično sličan obliku lopte (slika 1).

Za gruba teoriska razmatranja u vojne svrhe, prostor u kome se ispoljavaju dejstva nuklearne eksplozije može se smatrati loptom iako u stvarnosti nikad neće imati idealan sferni oblik, zbog uticaja raznih vetrova, temperature vazduha, gustine vazdušnih slojeva, kao i opšteg orografsko-hidrografskog sklopa zemljišta, iznad koga je ili na kome je izvršena nuklearna eksplozija.

Tačka u kojoj se izvrši nuklearna eksplozija zove se *centar eksplozije* (tačka eksplozije) i ona je, teoriski, središte lopte, u kome se ispoljava eksplozivno dejstvo (slika 1).

Horizontalna projekcija centra (tačka) eksplozije na površinu zemlje (vode) zove se *nulta tačka*, i ona je, teoriski, centar kruga raznih učinaka dejstva nuklearne eksplozije (slika 2). Nuklearna eksplozija izaziva tri različite vrste dejstava (toplotno, udarno i radioaktivno) čiji su dometi različiti. Prema tome, njih možemo pretstaviti kao tri koncentrične lopte, a njihov presek sa horizontom zemlje kao tri koncentrična kruga čiji će zajednički cen-

tar biti nulta tačka. Ovi krugovi na površini zemlje predstavljaju krajnje granice zone pojedinih dejstava i nastaju kao posledica sfernog oblika dejstva nuklearne eksplozije u prostoru. Radi toga, potrebno je uočiti da pravo-

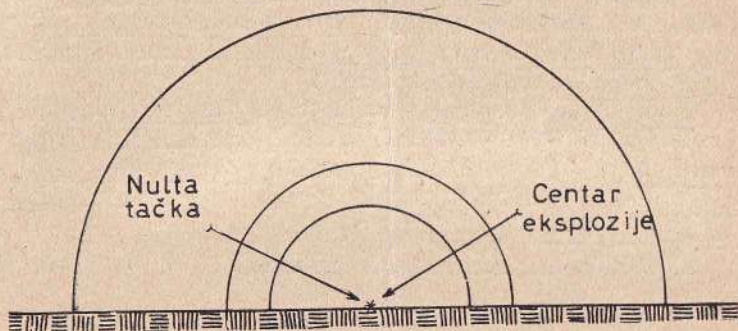


Slika 1 i 2. — Dejstvo nuklearne eksplozije na površinu zemlje (horizontalna projekcija)

linisko dejstvo nuklearne eksplozije polazi uvek iz tačke eksplozije, a ne iz nulte tačke, sem kada je eksplozija izazvana na površini zemlje.

Centar eksplozije i njegova projekcija na površini zemlje — nulta tačka, mogu biti na različitoj udaljenosti

jedan od druge. Ta udaljenost ustvari pretstavlja visinu centra eksplozije. U slučaju nuklearne eksplozije na površini zemlje centar eksplozije i nulta tačka potpuno se poklapaju (slika 3).



Slika 3. — Poklapanje centra eksplozije i nulte tačke

U gornjem slučaju visina eksplozije ne postoji i ravna je nuli.

2. PODELA NUKLEARNIH EKSPLOZIJA

Ne uzimajući u obzir na kakav je način nuklearni projektil poslat na cilj, on može, zavisno od toga gde je izabrana i određena tačka eksplozije, odnosno nulta tačka, da eksplodira na četiri razna mesta i to:

- u vazduhu,
- na površini zemlje,
- pod površinom zemlje,
- nad i pod vodom.

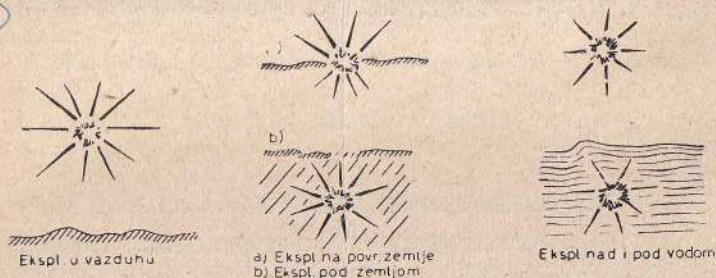
Svaka od ovih vrsta nuklearne eksplozije utiče i menja materijalna dejstva i njihove domete, zbog čega se ova mesta moraju svako ponaosob razmotriti.

Materijalni sastav sredine u kojoj je nastala nuklearna eksplozija različito utiče na dejstva. To je sasvim razumljivo, jer gasovita, tečna ili čvrsta sredina, svaka za sebe, različito se ponašaju na toplotno, udarno i radioaktivno dejstvo nuklearne eksplozije.

Uopšte uzev možemo reći da se u različitim sredinama i okolnostima dejstvo nuklearne eksplozije ispoljava različito. Pri tome će i domet pojedinih učinaka imati različite veličine prostiranja zavisne od vrste (visine, dubine) nuklearne eksplozije, kao i od oblika zemljišta i atmosferskih prilika. Ali će ukupni učinci nuklearne eksplozije zavisiti, pored ostalog, i od čvrstine, oblika, boje i rasporeda objekata.

Zbog toga, svestrano poznavanje vrsta nuklearnih eksplozija, njihovih karakteristika i učinaka ima izvanrednu važnost za celishodnu upotrebu ovog novog oružja bilo u napadne ili odbranbene svrhe, kao i za preduzimanje takticko-tehničkih mera zaštite.

a) Nuklearne eksplozije u vazduhu



Slika 4. — Vrste nuklearnih eksplozija

Pod nuklearnim eksplozijama u vazduhu podrazumevaju se sve one eksplozije čiji se centar eksplozije nalazi iznad površine zemlje, tako da obrazovana vatrena lopta ne dodiruje površinu.

Nuklearne eksplozije u vazduhu su dosada najtemeljnije ispitane i o njima postoje najobilniji podaci. Sve ostale vrste nuklearnih eksplozija znatno su manje ispitivane, a dobijeni podaci više su rezultat matematičkih proračuna sa nuklearnim eksplozijama u vazduhu i optima sa TNT.

Detaljno proučavanje nuklearnih eksplozija u vazduhu pokazalo je da je ova vrsta eksplozije najrentabil-

nija za primenu u vojne svrhe i zato je verovatno da će one i u budućem ratu biti upotrebljavane masovnije nego ostale vrste eksplozija.

Podela nuklearnih eksplozija u vazduhu

Nuklearne eksplozije u vazduhu mogu se podeliti, s obzirom na visinu centra eksplozija, na

- niskovazdušne i
- visokovazdušne eksplozije¹⁾.

Niskovazdušna nuklearna eksplozija je ona čiji je centar eksplozije udaljen od površine zemlje za veličinu 1,5 poluprečnika njene vatrene lopte (sl. 5). Radijus vatrene lopte nije stalna veličina, već promenljiva i zavisna od jačine bombe izražene u kilotonama (KT).

Naprimera:

20 KT nuklearne bombe ima poluprečnik vatrene lopte (r) veličine 140 m. Prema tome, niska vazдушna eksplozija (V_n) za 20 KT bombu bila bi:

$$V_n = r + \frac{r}{2} \quad V_n = 140 + 70 = 210 \text{ m}$$

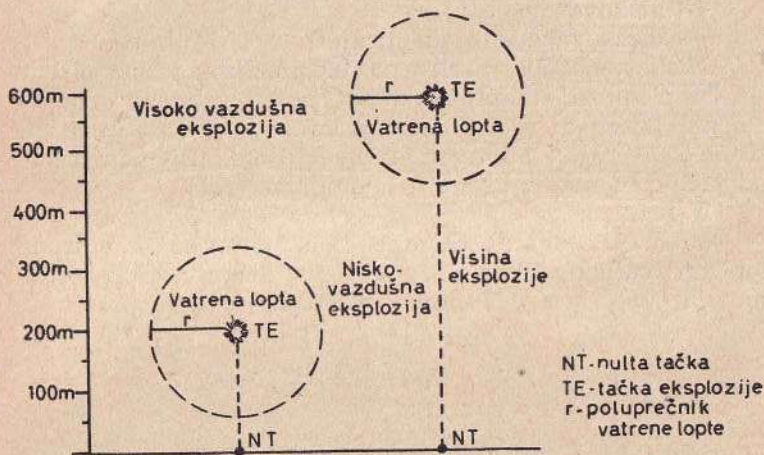
Znači da je niskovazdušna eksplozija za 20 KT nuklearnu bombu na visini od 210 m. Međutim, za 100 KT nuklearnu bombu visina tačke eksplozije ne bi bila 210 m, već neka druga — prema gore naznačenoj formuli. Tako, ako pretpostavimo da je za 100 KT bombu poluprečnik vatrene lopte veličine 240 m, onda bi niskovazdušna eksplozija bila na sledećoj visini:

$$V_n = 240 + 120 = 360 \text{ m.}$$

Iz navedenih primera vidi se da je visina niskovazdušnih eksplozija promenljiva i ne može se ustaliti jednom cifrom za sve vrste bombi, već je zavisna od jačine nuklearne bombe, odnosno njenog poluprečnika.

¹⁾ U stranoj literaturi može se naći podela i na srednje-vazdušne eksplozije.

Visokovazдушna nuklearna eksplozija je za 20 KT nuklearnu bombu na 600 m visine. Za nuklearne bombe drugih jačina visokovazдушna eksplozija izračunava se u odnosu na 20 KT nuklearnu bombu. Ovo izračunavanje ne vrši se proporcionalno u odnosu na jačinu bombe, već se proračun vrši u razmeri kubnih korena stepena povećanja (odnosno smanjenja) jačine nuklearne bombe.



Slika 5. — Niska i visoka eksplozija u vazduhu 20 KT bombe

Naprimer, ako bi hteli da izračunamo koja je visina visokovazdušne eksplozije (V_v) za 100 KT nuklearnu bombu prvo ćemo utvrditi stepen (S) za koliko je 100 KT bomba jača od 20 KT, a to je 5 puta. Ako slovom K obeležimo konstantnu visinu eksplozije od 600 m za 20 KT bombu, možemo postaviti sledeću formulu:

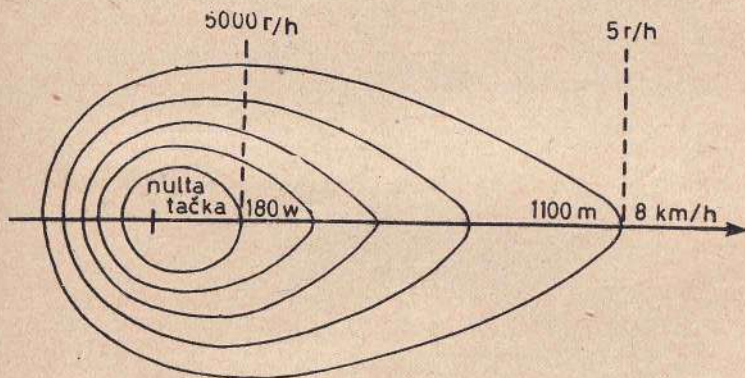
$$V_v = K \cdot \sqrt[3]{S} \quad V_v = 600 \cdot \sqrt[3]{5} = 600 \cdot 1,7 = 1.200 \text{ m}$$

Iz navedenog primera vidi se da iako je 100 KT nuklearna bomba 5 puta jača njena visina eksplozije nije zbog toga 5 puta veća od 20 KT nuklearne bombe, već samo 2 puta i zato je kod 20 KT bombe visokovazдушna eksplozija na 600 m, a kod 100 KT bombe na 1200 m.

Visina centra eksplozije i njen uticaj na učinak

Iz prednjeg izlaganja vidi se da kod nuklearnih eksplozija u vazduhu rasprskavanje bombe može da bude na raznim visinama. U vezi s tim, visine eksplozije odraziće se i na domet pojedinih učinaka dejstva.

Uopšte uzev, može se reći da visokovazdušne eksplozije izazivaju najveće štete i najviše mrtvih i ranjenih ako se cilj nalazi van zaklona, jer ukoliko je eksplozija izvršena na manjim visinama, neposredni efekti radioaktivnog, udarnog i toplotnog dejstva se manje šire, dok se efekat naknadne radioaktivnosti povećava. Međutim, to ne znači da u izvesnim povoljnim atmosferskim prilikama, zemljišnim uslovima i vrsti cilja eksplozije na manjim visinama ne mogu dati i veće rezultate. Zato je visina eksplozije u potpunosti zavisna od vrste cilja, atmosferskih prilika, naročito brzine vetra, kao i kod konfiguracije terena iznad kojeg će se izvršiti eksplozija.



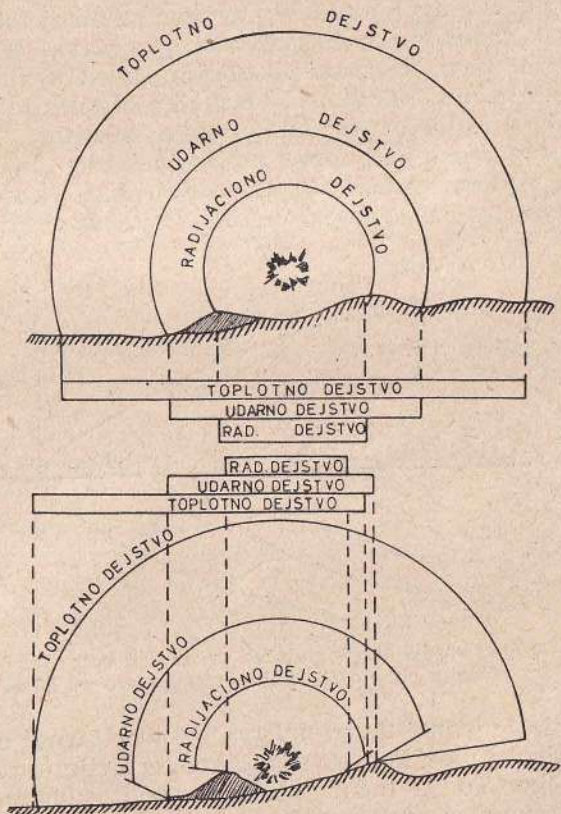
Slika 6. — Izgled radijacionog dejstva pri brzini vetra od 8 km na čas. Površinska eksplozija nuklearne bombe od 20 KT

Ranije je izneto da se dejstva pri nuklearnoj eksploziji prostiru u vidu koncentričnih krugova čije je središte nulta tačka. To je tačno, ali samo pod uslovom da je eksplozija izvršena na ravničastom zemljištu i pod idealnim atmosferskim prilikama. Međutim, ovakvi slučajevi

su retki sem na poligonima, a u uslovima rata oni će biti izuzetni.

Uticaoj vetra, s obzirom na njegovu snagu i brzinu, ispoljiće se na taj način što će krajnji domet pojedinih dejstava produžiti u pravcu vetra i time će oblik kruga dobiti manje ili više izdužen izgled donekle sličan elipsi (sl. 6).

Međutim, sa povećanjem dometa učinaka eksplozije u stranu vetra, smanjivaće se njihov domet na suprotnoj

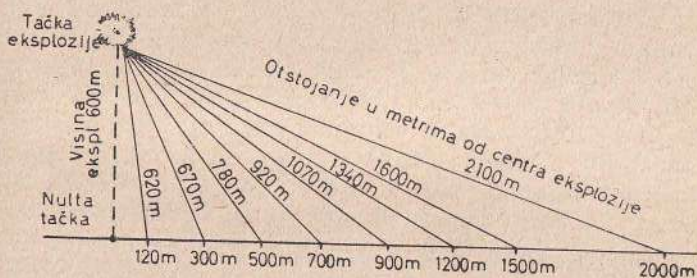


Slika 7. — Efekti dejstva pri raznim visinama eksplozije u vazduhu

strani. Isto tako i konfiguracija zemljišta utiče ne samo na izbor vrste eksplozije već i na određivanje visine tačke eksplozije u vazduhu. S obzirom da se dejstvo nuklearne eksplozije razvija pravoliniski, ispresecano zemljište svojim neravninama znatno će smanjiti njegov domet i pružiti zaštitu u određenom stepenu. Ovaj uticaj zemljišta ponovo menja sliku efekata dajući joj još nepravilniji oblik.

Ispresecano zemljište i njegove neravnine dovode do toga da niskovazdušne eksplozije imaju manje dejstvo od visokovazdušnih koje manje zemljišne neravnine obuhvataju sa svih strana (sl. 7). Ovo je i osnovni razlog da će nuklearna eksplozija u vazduhu uopšte, a visokovazdušne eksplozije posebno, biti češće od svih drugih vrsta nuklearnih eksplozija.

Najzad, treba napomenuti, kada se radi o nuklearnim eksplozijama u vazduhu, da se dometi raznih učinaka mogu meriti na dva načina (sl. 8), i to:



Slika 8. — Grafički i brojni prikaz odnosa odstojanja od nulte tačke i od centra eksplozije

- od centra eksplozije i
- od nulte tačke.

Dometi pojedinih dejstava mereni od centra eksplozije i od nulte tačke međusobno će se razlikovati, što se jasno vidi iz grafičkog i brojnog crteža. Razumljivo je da se promenom visine tačke eksplozije menja i odnos koji je na slici prikazan.

Opis nuklearne eksplozije u vazduhu

Prvi vidljivi efekat pri nuklearnoj eksploziji u vazduhu je sjajni beli blesak. Ova zaslepljujuća svetlost javlja se za jedan hiljaditi deo sekunde i na otstojanju od 8 km, i oko 100 puta je jača od sunca.

Usled veoma visoke temperature nastaje emitovanje energije putem elektromagnetskog zračenja, koju velikim delom apsorbuje vazduh koji neposredno okružava centar eksplozije. Usled toga vazduh se zagreva do usijanja, a pojavljuje se za oko vidljiva svetlosna kugla, koja je poznata pod nazivom »vatrena lopta«.

U momentu kada se vatrena lopta uoči, njen prečnik iznosi 13 metara, temperatura u centru je nekoliko desetina miliona stepeni, a na periferiji oko 100.000°C. Cela vatrena lopta ima pretežno crvenonarandžastu boju. Vatrena lopta stalno menja boju za izvesne nijanse i nalazi se u stadiju treperenja održavajući spoljni oblik lopte.

Vatrena lopta se vrlo brzo širi u prečniku i jednovremeno podiže u visinu. Za oko jedan stoti deo sekunde od formiranja ona ima prečnik oko 100 m, temperaturu u centru oko 300.000°C, a na površini oko 5.000°C. Međutim, intenzitet svetla je još uvek jak. Posle jedne sekunde vatrena lopta dostiže svoj najveći prečnik od oko 140 m, a za 10 sekundi dostiže visinu od oko 1.200 metara kada primetno počinje da gubi dotadanji sjaj i prestaje da svetli.

Vatrena lopta jeste onaj faktor koji emituje toplotno zračenje i uzročnike toplotnog dejstva nuklearne eksplozije.

Kada se pojavi vatrena lopta, oseti se udarni talas koji se širi upolje, a odmah zatim ispoljava se dejstvo početne nuklearne radijacije koja se sastoji iz alfa i beta čestica, gama zrakova i neutrona.

Ceo proces neposrednog dejstva nuklearne eksplozije u vazduhu traje svega oko 10 sekundi, jer se vatrena lopta za to vreme podigla na toliku visinu da se njeno dejstvo više ne oseća na zemlji. Posle 90 sekundi sva primarna dejstva nuklearne eksplozije su završena.

Pucanj koji se čuje posle eksplozije izvanredno je jak. Na daljini od 10 km ovaj pucanj se čuje kao da je neko artiljerisko oruđe velikog kalibra otvorilo vatru iz neposredne blizine. Vatrema lopta i posle 10 sekundi brzo se penje u vis dobijajući pri tome sve izduženiji oblik na čijem se vrhu stvara oblak, koji celoj nuklearnoj eksploziji u vazduhu daje poznati izgled pečurke. U roku od 1 časa vrh pečurke dostiže visinu od oko 12 km i pretežno je bele boje, sve dok je vetrovi potpuno ne raznesu.

Vrsta dejstva

Kod nuklearne eksplozije u vazduhu glavnu razornu moć nosi udarno, zatim toplotno pa radioaktivno dejstvo.

Udarni talas za prvih 10 sekundi razvije se do 3650 m od nulte tačke i sa vetrom koji ga prati sposoban je da razara i uništava. Pa ipak, neposredni gubici u ljudstvu prouzrokovani ovim dejstvom udarnog talasa biće uglavnom retki, pošto će na izvesnim manjim otstojanjima, na kojima bi jedno nezaštićeno lice inače poginulo od udara, ono pre stradati od opekotina i gama zrakova. Radi toga je teško utvrditi koje je od ova tri dejstva nuklearne bombe prouzrokovalo smrt. Natpritisak udarnog talasa na izvesnom otstojanju od nulte tačke spaja se sa udarnim talasom koji se odbija od površine zemlje. Ovaj fenomen spajanja zove se »Mahov efekat« i on umnogome povećava razornu moć i ubitačno dejstvo udarnog talasa. No i pored toga vrlo česti gubici ljudstva mogu biti od mehaničkog dejstva udarnog talasa, i to kao posredni gubici prouzrokovani rušenjem zgrada, rovova, kamenja, zemlje, raznih predmeta i sl.

Na objekte i razni materijal udarni talas ima najrazličitije dejstvo koje zavisi od njihovog položaja, oblika, boje i konstrukcije. Dok su izvesni objekti i materijal jako osetljivi, dotle su drugi vrlo postojani na udarno dejstvo. Ovo zahteva da se za svaki objekat ponaosob odredi njegova osetljivost.

Toplota i požar kod nuklearne eksplozije u vazduhu nastaju sa toplotnim zračenjem i svetlosnim bleskom. Ova

toplota može se osetiti na površini kože na znatnim udaljenjima od mesta eksplozije. Blesak vrlo nepovoljno utiče na organ vida i može dovesti do privremenog slepila. Dužina trajanja gubljenja vida zavisice od doba dana, atmosferskih prilika, kao i da li je nuklearna eksplozija u polju vida ili ne. Danju, ako je nuklearna eksplozija van polja vida, njen uticaj biće beznačajan, dok se noću može izgubiti vid i za čitav čas. Neposredna paljenja od nuklearne eksplozije u vazduhu su normalna pojava, ali masovni požari ne nastaju od tog dejstva, već od naknadnog raznošenja vatre pod dejstvom udarnog talasa i vetra sa jednog na drugo mesto.

Najmanje polovina ukupne energije nuklearne eksplozije ispoljava se u vidu svetlosnog bleska i udarnog dejstva, te su i učinci nuklearne eksplozije slični onima kod običnih eksploziva, samo znatno povećani.

Treći efekat nuklearne eksplozije je njeno radioaktivno dejstvo. Kako je ono nešto novo u odnosu na rat zbog toga je mnogo i popularisano. Međutim, radioaktivnost izaziva samo jedan relativno mali deo od ukupnog broja smrtnih slučajeva pri nuklearnoj eksploziji.

Početno radioaktivno zračenje koje se emituje pri eksploziji u vazduhu, kratkotrajno je. Njegovo dejstvo umnogome će zavisiti od visine centra eksplozije i konfiguracije zemljišta nad kojim je eksplozija izvršena.

Naknadna radioaktivnost, koja biva emitovana iz radioaktivnih čestica ostalih posle eksplozije na površini zemlje, uglavnom se sastoji iz gama zrakova i beta čestica produkata raspadanja, kao i alfa čestica iz urana i plutonijuma koji nisu pretrpeli cepanje. Sve ove radioaktivne čestice, razne vazdušne struje i vetar raznose na veliku površinu i time znatno umanjuju radioaktivno dejstvo, ali povećavaju površinu na kojoj se ono ispoljava. Vremenom radioaktivnost produkata cepanja opada i nestaje. Usled svega toga naknadna radijacija pri nuklearnoj eksploziji u vazduhu ima slabiji efekat dejstva na ljudstvo i ne predstavlja naročitu opasnost.

Pri nuklearnim eksplozijama u vazduhu gama zraci i visoka temperatura dopiru do cilja zajedno brzinom svetlosti, posle čega neposredno dolazi udarno dejstvo.

Uopšte uzetv efekti nuklearne eksplozije u vazduhu, posmatrani sa vojnog gledišta, biće najznačajniji i najrentabilniji za nanošenje štete i ljudskih žrtava protivniku, jer su njihov domet na površini zemlje i jačina pojedinih dejstava dovoljni da nanesu ozbiljne gubitke.

b) Nuklearna eksplozija na površini zemlje

Pod eksplozijom na površini zemlje podrazumevamo sve one nuklearne eksplozije, koje su u neposrednoj blizini površine zemlje. Vatrene loptu pri ovim eksplozijama, više ili manje dodiruje površinu zemlje, a centar eksplozije za 20 KT bombu ne prelazi visinu od 140 metara.

Pošto vatrena lopta kod ove vrste eksplozije dodiruje zemlju, te je visoka temperatura pretvara čak i ako je kamen na površini, u gasovito stanje i pepeo, to zemlja oko mesta eksplozije biva formalno isparena.

Masa zagrejanog vazduha trenutno se širi i udara u zemlju. Isparenje zemlje i ovaj udarni talas stvaraju krater na mestu eksplozije. Veličina kratera zavisiće od stvarnog položaja eksplozije, prirode zemljišta i jačine bombe.

Iz kratera i vatrene lopte diže se uvis tamno-sivi stub koji dostiže visinu i do 12 km. I ovaj stub, kao i kod eksplozije u vazduhu, završava se oblakom u vidu pečurke.

Energija koja se stvara prilikom eksplozije odlazi jednim delom u vazduh, a drugim prouzrokuje potres zemljišta.

Eksplozija stvara, pored udarnog talasa koji se prostire kroz vazduh (na sličan način kao i kod eksplozije u vazduhu) i udarni talas koji se prostire kroz zemlju u vidu površinskog potresa. Pošto centar ovog potresa nije bio pod zemljom, udarni talas brzo gubi intenzitet što mu znatno smanjuje domet.

Udarni efekat je manji od udarnog efekta pri eksploziji u vazduhu, pošto se jedan deo energije troši na razbijanje zemlje, njeno isparenje i stvaranje kratera. Iako Mahov efekat u ovom slučaju ne postoji, natpritisak u blizini nulte tačke na zemljištu biće mnogo veći no pri eksploziji u vazduhu, ali će opadati proporcionalno povećanju odstojanja od centra eksplozije. Zato će na jednom manjem području i najjače zgrade biti srušene, dok nešto dalje jedva da će biti oštećene, zato što se udarni talas pri ovoj vrsti eksplozije kreće od površine zemlje pa naviše.

Toplotni efekti površinske eksplozije su znatno manji od onih koji nastaju prilikom eksplozije u vazduhu. Veliki deo toplotne energije odlazi na isparenje predmeta u neposrednoj blizini tačke eksplozije ili pak na njihovo topljenje.

Neposredna nuklearna radijacija biće slična kao i pri eksploziji u vazduhu, ali će njen domet biti manji — sličan kao i kod toplotnog dejstva.

Naknadna radioaktivnost biće prouzrokovana padavinama, talasom prašine i kontaminacijom kratera kao i zemljišta na jednom relativno malom prostoru oko nulte tačke. Veličinu ove prostorije teško je odrediti jer će ona zavisiti i od prirode zemljišta i atmosferskih prilika. Posle 1 časa od nuklearne eksplozije radioaktivnost kratera u nultoj tački je još uvek oko 8.000 rendgena, a na daljini od 1150 m oko 0,7 rendgena. Preko kratera se sme prelaziti motornim vozilom ubrzo posle eksplozije, a pešice tek posle 6 časova, pri čemu se ljudstvo ne sme zadržavati, jer postoji izvesna opasnost od unošenja radioaktivne prašine u organizam, koja se podiže pri kretanju.

Kod nuklearne eksplozije na površini zemlje, svi efekti se smanjuju, ali se znatno povećava dejstvo naknadne radioaktivnosti i traje duže vreme.

c) Nuklearna eksplozija pod zemljom

Pod nuklearnom eksplozijom pod zemljom podrazumeva se svaka eksplozija ispod površine zemlje na manjoj

ili većoj dubini. Opiti sa podzemnom eksplozijom nisu do danas vršeni, te se ova vrsta nuklearnih eksplozija može izložiti samo na osnovu već poznatih efekata ostalih nuklearnih eksplozija svodeći ih na razmatranje u ovim uslovima.

Verovatno je da se pri podzemnoj eksploziji ne stvara tipična vatrena lopta već neka vrsta gasne lopte, koja izbija u vazdušni prostor stvarajući na površini zemlje krater. Približna veličina ovog kratera bila bi oko 365 m širine, a oko 106 m dubine. No u peskovitoj zemlji dubina će uglavnom biti zavisna od dubine eksplozije i stvora zemljišta. Pri tome, obrazuje se stub zemlje i prašine koji se visoko diže u vazduh. Računa se da bi na taj način bilo izbačeno oko milion kubika zemlje i da, zavisno od atmosferskih prilika i brzine vetra, produkti mogu biti razneseni na oko 6 km udaljenosti u pravcu vetra.

Udarni talas bio bi sličan zemljotresu umerene jačine i na njega bi se utrošila velika količina celokupne energije. Jačina udarnog talasa zavisila bi od geološkog stvora zemljišta i njegove strukture, kao i dubine na kojoj je eksplozija izvršena. Ovaj udarni talas, koji bi se kretao kroz zemlju, svakako bi znatno oštetio građevinske objekte u neposrednoj blizini, a i razna podzemna postrojenja. Verovatno bi postojao i vazdušni udarni talas, ali bi njegova snaga, usled velike apsorbovanosti, bila jednaka otprilike jednoj trećini energije udarnog talasa koji nastaje prilikom eksplozije u vazduhu.

Toplotno dejstvo se verovatno ne bi održavalo u većoj meri jer bi ga zemlja apsorbovala.

Dejstvo početne nuklearne radijacije u vidu gama zrakova i neutrona apsorbovala bi zemlja neposredno oko tačke eksplozije, tako da se ono na površini zemlje neće osetiti. Međutim, naknadna radijacija bila bi vrlo velika jer bi izbačena zemlja i prašina bile jako radioaktivne. Sastojci iz fisionog procesa sa zemljom u neposrednoj blizini kratera postali bi jako radioaktivni, a krug okolnog zemljišta zatrovan prašinom iz kratera bio bi širi što će, naravno, umnogome zavisiti od jačine i pravca vetra.

d) Eksplozija nad i pod vodom

Posle rata izvršeni su mnogobrojni opiti sa ovom vrstom eksplozije.

Eksplozija nad površinom vode u svemu je slična eksploziji u vazduhu odgovarajuće visine, a njeni efekti su takođe analogni ovoj vrsti eksplozije.

Eksplozija pod vodom je svaka vrsta eksplozije kod koje se centar eksplozije nalazi ispod površine vode. Pri ovoj vrsti eksplozije stvaraju se ogromni pritisci i vrlo visoke temperature na malom prostoru koji predstavlja centar eksplozije. Pritisak se širi u vidu udarnog talasa, a usled visoke temperature stvara se gasni mehur od vodene pare. Gasni mehur prvo povećava svoju zapreminu, a kasnije, usled hlađenja, se smanjuje i to se ponavlja nekoliko puta (pulsiranje). Produkti fisije nalaze se u vodi i sa vodom bivaju izbacivani u vazduh.

Pri izlasku gasnog mehura na površini vode, on prouzrokuje obrazovanje kupole od vodene pare i diže se u vidu šupljeg vodenog stuba. U samom podnožju vodenog stuba stvara se veliki vodeni talas, koji se širi zrakasto u svima pravcima velikom brzinom. Vodeni stub sadrži oko milion tona vode u vidu pare i kapljica. Prečnik mu je oko 600 m, a visina oko 2,5 km i završava se u poznatom obliku pečurke.

Visina početnog vodenog talasa u podnožju stuba je oko 300 m a na 400 m udaljenja oko 30 m. Vodeni stub posle izvesnog vremena (2,5 minuta) ogromnom širinom pada na mesto eksplozije i njegovu okolinu u vidu velikog vodopada. Kada počinje da pada na njegovoj osnovici stvara se jedan gigantski talas koji se zove bazni talas. Ovaj talas se neće formirati u plitkoj vodi. Isto tako će gasna lopta, ako bomba eksplodira na velikoj dubini ispod vode, izgubiti svoje bitne osobine pre no što izbije na površinu vode. Većina radioaktivnosti u ovom slučaju ostaje u vodi u vidu radioaktivne pene, čije naslage duž obale predstavljaju veliku opasnost.

Jednovremeno se obrazuje i radioaktivna magla koja se u vidu oblaka brzo penje uvis i dostiže visinu od 600

m. Ova magla praćena je sitnom kišom koja nekada može da traje i po čitav čas. Kiša izvlači fisione produkte zbog čega radioaktivnost brzo opada.

Eksplozija pod vodom ispoljava vrlo različite vrste dejstva kao: udarni talas kroz vodu, gasni mehur sa kupolom kapljica i vodenom parom, dizanje vodenog stuba, veliki vodeni talas u podnožju stuba, produbljavanje dna ako je voda plitka, radioaktivno zračenje i kontaminaciju.

Udarni talas je posledica ogromnog pritiska koji nastaje pri nuklearnoj eksploziji i širi se brzinom zvuka u sve strane od centra eksplozije. Ovaj udarni talas može pri promeni gustine sredine ili da izađe u vazduh ili da se odbije u dubinu vode. Njegova jačina opada sa kvadratnim korenom otstojanja. To znači da je domet udarnog talasa u vodi veći no pri eksploziji u vazduhu gde opada sa kubnim korenom. Ovaj talas ima jako razorno i ubitačno dejstvo na objekte i ljude u vodi.

Gasna lopta je posledica visoke temperature i ona stvara tamni prsten na površini vode. Posle izvesnog pulsiranja ona obrazuje kupolu od vodene pare.

Vodeni stub je posledica podizanja uvis gasne lopte i kupole koju je ova obrazovala. Moć sisanja koja se pri ovome javlja ima ogromnu snagu tako da sa površine dna izvlači velike količine materijala.

Veliki vodeni talas se stvara usled dizanja vodenog stuba u visinu, koji za sobom povlači i okolnu vodu koja se u vidu talasa odbija od njegovog podnožja i velikom brzinom širi u sve strane.

Produbljavanje dna ako je na mestu nuklearne eksplozije voda plitka, obuhvata površinu od 500—1.000 m u prečniku a materijal podiže i sa dubine od 10 m. Računa se da se pri tome sa dna podiže oko milion kubika materijala, a oko 3 miliona kubnih metara materijala stavlja u pokret. Kasnije, 35% ovog materijala vraća se u krater na dno vode.

Početna nuklearna radijacija biće u velikom delu apsorbovana od strane okolne vode, ali će zaostala radioaktivnost duže vreme biti velika, zbog toga što je voda usled eksplozije jako kontaminirana.

Voda iz vodenog stuba, iz velikog vodenog talasa, zatim kapljice iz oblaka, kao i izmaglica koja pokriva okolinu vrlo su radioaktivne i kontaminiraju predmete na koje padnu.

Ove kontaminirane materije su najopasnije prvih nekoliko minuta po svome stvaranju, a najveća radioaktivnost ostaje u samoj vodi.

Kod eksplozije pod vodom, oko polovine energije troši se na prostiranje udarnog talasa kroz vodu, oko 30% gubi se u vodi, u obliku toplotne energije, a ostatak se troši na stvaranje i pulsiranje gasnog mehura, dizanje vodenog stuba, produbljavanje dna i radioaktivno zračenje.

Uopšte uzev nuklearne eksplozije nad i pod vodom su vrlo efikasne protivu brodova i postrojenja na obali i sa vojne tačke gledišta su rentabilne.

* * *

Major BUZADŽIĆ ZDRAVKO

UDARNO DEJSTVO VAZDUŠNE NUKLEARNE EKSPLOZIJE

NAČIN DEJSTVA UDARNOG TALASA

Među najznačajnije efekte nuklearne eksplozije spada njeno udarno dejstvo, jer ono nanosi najteža razaranja i prouzrokuje (direktno pa i indirektno) i najveći broj ljudskih žrtava. Mada su i drugi efekti nuklearne eksplozije (toplotni i radioaktivni) značajni, oni, pri vazdušnoj eksploziji, nemaju toliku površinu dejstva kao udarno dejstvo. Uzrok ovako efikasnom dejstvu udara nalazi se u relativno niskim pritiscima vazdušnog udara koji su u stanju da oštete razne veštačke objekte na zemljištu.

Pri svakoj nuklearnoj eksploziji dolazi do pojave udarnog talasa koji se, od tačke eksplozije, širi u svim pravcima. Udarni talas se razvija sa porastom vatrene lopte. U njemu je vazduh zbijen, sa pritiskom većim od atmosferskog. Pritisak odmah posle eksplozije skoro trenutno raste do izvesnog maksimuma. U početku, u centru eksplozije on verovatno više stotina hiljada puta prevazilazi atmosferski pritisak. Ovo je pozitivna faza udara. Velika sabijenost vazduha u ovoj fazi, usled prolaska udarnog talasa, povećava temperaturu i jako zagrejava vazduh usled čega dolazi do njegovog bržeg kretanja, naročito na završetku prvog dela faze. Ovakvo kretanje uslovljava »zgušnjavanje« vazduha na čelu talasa i stvara se takozvani »čeonni front« koji se poput kakvog pokretnog zida kreće napred i ruši i najjače građevine u neposrednoj blizini, a slabije i na kilometre daleko.

Kretanjem udarnog talasa od centra eksplozije povećava se zapremina zagrejanog prostora, čelo udara dolazi u dodir sa sve većim masama okolnog vazduha, usled čega temperatura i pritisak opadaju.

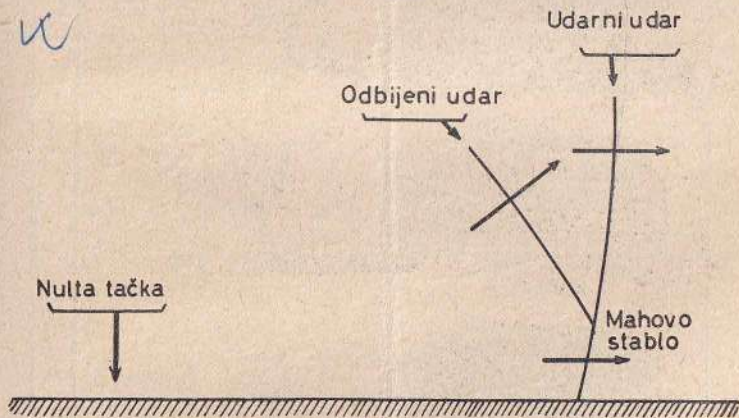
Uporedo sa opadanjem udarnog pritiska, prema širenju zagrejanog prostora, postepeno se menja i raspodela pritiska iza čela udara. Odnos se menja tako što pritisak opada sa približavanjem ka centru eksplozije. Najzad na izvesnim udaljenjima, razređivanje vazduha koje nastaje u centru eksplozije, prouzrokuje pad pritiska čak ispod normalnog. To je negativna faza dejstva. Dejstvo ove faze je naročito izraženo do 500 m od nulte tačke a trajanje je tri do tri i po puta duže od trajanja pozitivne faze.

Pritisaci postignuti na čelu udara u pozitivnoj fazi veći su od pritiska na bilo kome delu za vreme negativne faze. Prema tome i vetar, koji nastaje za vreme pozitivne faze, ima veću brzinu i kraće vreme trajanja nego u negativnoj fazi.

Čelo udara se u početku podudara sa vatrenom loptom. Iako brzina kretanja čela udara vremenom opada (kada temperatura vatrene lopte padne na oko 300.000°C) kretanje se nastavlja brže od razvijanja vatrene lopte. Tako, već posle jedne sekunde, kada vatrena lopta dostigne svoj maksimalni poluprečnik od oko 150 metara, čelo udara pređe oko 200 metara. Posle 10 sekundi, kada se vatrena lopta digne na oko 500 metara, udarni talas pređe oko 3,5 do 4 km., što pretstavlja maksimalno udaljenje od nulte tačke na kojem ovaj nanosi štetu. To je ujedno i ono vreme posle nuklearne eksplozije kada se može smatrati da su neposredna dejstva eksplozije završena.

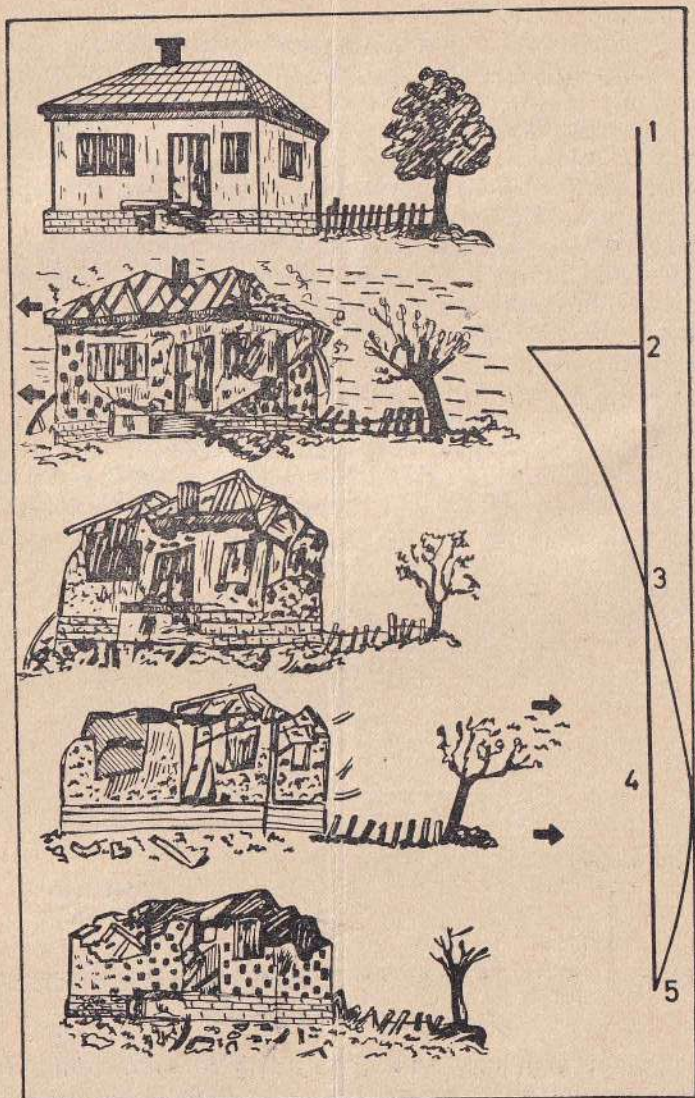
Vazдушna nuklearna eksplozija izaziva sasvim različite efekte od običnih eksplozivnih bombi. Udarno dejstvo širi se od tačke eksplozije radijalno u svim pravcima (kod običnih bombi koje eksplodiraju na površini ili nešto ispod nje, udarno dejstvo je upravljeno naviše, te je i razaranje potpuno samo u neposrednoj blizini mesta eksplozije). Udarni talas u svom širenju dopire do nulte tačke direktno ispod tačke eksplozije. Na nju udarni talas pada

vertikalno, a na ostale delove zemljišta pod različitim uglovima — zavisno od udaljenosti. Usled ovakvog načina dejstva udarnog talasa izvesni objekti, naročito oni otporni na vertikalna opterećenja, mogu ostati neuništeni ili čak i neoštećeni u samoj nultoj tački, dok bi nešto dalje od nje bili sigurno uništeni (napr. telefonski stubovi i slični objekti). Razlog ovome leži u sledećem: kada udarni talas dopre do površine, deo njegove energije apsorbuje tle, a ostatak se odbija. Ovo uslovljava pojavu koja se ne javlja kod klasičnih eksplozija, niti kod drugih načina nuklearnih eksplozija. Pojavljuju se dva talasa: udarni i od površine tla odbijeni talas. Odbijeni talas se kreće nešto brže, dostiže udarni — osnovni talas, sjedinjuje se s njim i zajedno ostvaruju jedinstven front, koji se širi po površini zemlje. U tački (liniji) preseka — spajanja ovih dvaju talasa osnovnog i odbijenog, stvara se pokretni udarni zid (Mahovo stablo), koji može biti dva do osam puta jači od osnovnog udarnog talasa. Ova pojava poznata je kao Mahov efekat (sl. 1).



Slika 1. — Mahov efekat

Pojavi Mahovog efekta pripisuje se tako veliko razorno dejstvo udarnog talasa jer su štete prouzrokovane njime znatno veće od onih koje bi nastale usled dejstva



Slika 2. — Dejstvo udarnog talasa

osnovnog udarnog talasa (bez pojave Mahovog efekta). Pojava Mahovog efekta smatra se redovnom na ravnom zemljištu, dok se na neravnom ne javlja. Zato se, pri istim jačinama nuklearne eksplozije i visine eksplozije, može desiti da neki objekti budu oštećeni na većem udaljenju od nulte tačke, a drugi, bliži i iste konstrukcije, da ostanu neoštećeni.

Posle nuklearne eksplozije javlja se vrlo jak vetar koji naizmenice duva u oba smera — od nulte tačke i ka njoj. Vetar je dugotrajan i zato izaziva jača oštećenja pošto njegovo dejstvo tj. natpritisak ima znatnu dužinu trajanja. Ova dužina dejstva udarnog talasa i jeste glavni uzročnik velikih razaranja i štete.

Udarno dejstvo vazdušne nuklearne eksplozije na površini zemlje na izvesnom udaljenju (naprimer na 1—2 km) od nulte tačke odvijalo bi se uglavnom ovako:

— nailaskom udarnog talasa i pojavom Mahovog efekta pritisak vazduha se naglo penje do određenog maksimuma. Objekti na površini zemlje prime jak udarac, koji se može uporediti sa udarcem prouzrokovanim eksplozijom obične bombe u neposrednoj blizini;

— odmah zatim pritisak naglo slabi, ali je i za celo vreme trajanja pozitivne faze iznad atmosferskog. U tome periodu se oseća jak vetar koji dolazi od mesta eksplozije;

— oko pola sekunde posle prolaska Mahovog efekta, pritisak se vraća na normalan, pa i dalje opada stvarajući na taj način depresiju (negativnu fazu) koja traje nekoliko sekundi. U ovoj fazi javlja se vetar obrnutog smera a pritisak opada do izvesnog minimuma. Grafički prikaz dejstva udarnog talasa dat je na sl. 2.

Jačina dejstva udarnog talasa meri se u atmosferama, — kg/sm^2 . Na tabeli 1 prikazani su maksimalni natpritisaci na različitim otstojanjima od nulte tačke, kao i vrste oštećenja na raznim objektima i materijalima.

EFEKAT UDARNOG DEJSTVA NA POJEDINIM UDALJENJIMA OD NULTE TAČKE

Ono što bitno karakteriše udarno dejstvo nuklearne eksplozije jeste njegovo znatno duže trajanje (nekoliko

Tabela 1

Efekti eksplozije atomske bombe od 20 KT u vazduhu

Brzina vetra u km/čas	Trajanje vetra u sekund.	Natpritisak u kg/sm ²	Otstojanje od "O" tač. u km	VRSTE OŠTEĆENJA
80	1,25	0,10	3,6	Lake štete (razbijanje prozora i vrata i umerene štete na malteru zidova).
95	1,23	0,12	3,3	Ugljenisanje telefonskih stubova. Oštećenje krovova i maltera kod čelično-ramovskih konstrukcija. Delimične štete na objektima u polju.
110	1,20	0,14	3,0	Šteta od eksplozije na većini kuća. Ozbiljne štete od požara. Paljenje suvog zapaljivog materijala.
130	1,15	0,17	2,7	Teže štete na malteru zidova i tavanica.
160	1,12	0,20	2,4	Ozbiljne štete na kućama, teže štete na ramovima prozora i vrata.
200	1,06	0,25	2,1	Štete u strukturi višespratnih zgrada od cigala. Črepovi po krovu su po površini stopljeni.
255	0,98	0,36	1,8	Ozbiljne štete na strukturi zgrada sa čeličnim ramom. Umerena rušenja. Ozbiljne štete na celom prostoru. Višespratne zgrade od cigala porušene.
320	0,90	0,52	1,5	Ozbiljno porušeni zidovi od cigala debljine 30 sm. Čelične ramovske konstrukcije razorene. Lake betonske zgrade srušene.

Brzina vetra u km/čas	Trajanje vetra u sekundi	Natpriti- sak u kg/sm ²	Otstoja- nje od "O" tač. u km	VRSTE OŠTEĆENJA
430	0,77	0,70	1,2	Armirano-betonski dimnjaci, debljine zidova 20 sm, pretureni. Zidovi od cigala debljine 45 sm potpuno razrušeni.
610	0,62	1,12	0,9	Verovatno su sve zgrade potpuno porušene, sem armirano-betonskih otpornih prema zemljotresima.
880	0,45	1,68	0,6	Granica ozbiljnih oštećenja kod armirano-betonskih građevina otpornih prema zemljotresima. Armirano-betonske zgrade su sklone rušenju (debljine zidova 25 sm i favanice 15 sm).
1300	0,37	2,52	0,3	Rušenje teških čelično-ramovskih konstrukcija. Pomicanje kolovozne čelične ploče na mostovima.

sekundi) nego kod eksplozija običnih bombi (nekoliko hiljaditih delova sekunde). Usled toga je i snaga udara koju objekat prima daleko veća kod nuklearne eksplozije i objekat se ruši. Dva faktora se ispoljavaju u rušućem dejstvu udarnog talasa; snažno i trenutno dejstvo čela udara i pritisak vazdušnih snaga koje se kao kakav zid zgusnutog vazduha kreću iza čela udara.

Brzina kretanja udarnog talasa, neposredno posle eksplozije, kreće se daleko iznad brzine zvuka. Na 450—500 metara od nulte tačke brzina kretanja udarnog talasa je još uvek oko brzine zvuka, da bi na jedan kilometar od nulte tačke opala na oko 600 km/čas. Na 3 km kre-

tanje talasa opada na oko 100 km/čas, posle čega više ne predstavlja opasnost rušenja.

Ovako velika brzina kretanja vazдушnih masa do udaljenja od 2,5 km ruši sve slabije objekte, a one koji su slabo učvršćeni za tle može pomeriti sa mesta ili ih prevrnuti. U jednom normalno uređenom gradskom području eksplozija bi prouzrokovala potpuno rušenje u krugu poluprečnika oko 400 metara, jer na tom udaljenju od nulte tačke udarni talas izaziva pritisak od oko 2 kg/sm², što je 144 puta više od pritiska koji izaziva jaka bura. U krugu od 1,5 km udarni talas ruši većinu građevina, dok čvrste građevine sa armirano-betonskom konstrukcijom teško oštećuje. Na udaljenju većem od 2,5 km ne bi bilo rušenja ni većih oštećenja građevinskih objekata. Manje štete mogu biti izazvane i na većim udaljenjima. Razbijanje prozora može se pojaviti čak i na 20 km od mesta eksplozije.

Prilikom vazdušne eksplozije javlja se i podrhtavanje tla, koje se oseća kao slabiji zemljotres koji ne izaziva štetu, sem u neposrednoj blizini nulte tačke gde može izazvati manja oštećenja izvesnih ukopanih objekata, kao što su objekti za zaštitu od dejstva iz vazduha, kanalizacione i vodovodne cevi i sl.

Efekat udarnog dejstva nuklearne eksplozije ne povećava se u istoj srazmeri sa povećanjem snage bombe izraženo u KT. Kod nuklearnih bombi različitih snaga, otstojanja za iste vrste oštećenja menjaju se približno sa kubnim korenom energije bombe. Tako, naprimer, dok nominalna bomba od 20 KT daje rušeći učinak kao 1.500 tona običnih avionskih bombi, dotle bi jedna nuklearna bomba ekvivalenta 200 KT imala rušeće dejstvo samo kao 5000 tona umesto 15.000 tona običnih avionskih bombi.

USLOVI KOJI UTIČU NA EFEKAT UDARNOG DEJSTVA

Na efekat udarnog dejstva, tj. na stepen razaranja i oštećenja objekata u zoni dejstva nuklearne eksplozije utiče niz faktora: visina eksplozije, udaljenost, zaklonje-

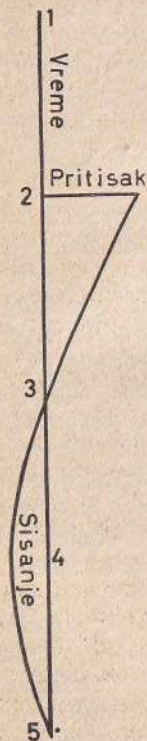
nost, veličina, oblik i građevinska konstrukcija objekta, pravac udarnog talasa u odnosu na dužu stranu objekta i konfiguracija zemljišta.

Visina nuklearne eksplozije bombe od 20 KT kreće se obično 300 do 600 metara. Inače, visina je u neposrednom odnosu sa površinom koju zahvata eksplozija u celini, pa i udarno dejstvo. Tako, ukoliko visina eksplozije raste povećava se i eksplozijom zahvaćena površina, ali stepen razaranja opada — i obratno, smanjenjem visine eksplozije, stepen razaranja se povećava ali se smanjuje površina razaranja. Znatan uticaj na razaranje ima ugao pod kojim pravac udarnog talasa dolazi na površinu zemlje. Porastom temenog ugla (ugla koji zatvara pravac eksplozije sa horizontalnom ravni) povećava se pritisak na horizontalnu ravan a smanjuje na vertikalne ravni objekata. Na većim otstojanjima od nulte tačke značaj bočne komponente se povećava.

Eksplozija blizu same površine zemlje praćena je stvaranjem kratera i topljenjem površine tla što uslovljava veliki gubitak energije udarnog talasa. Time i rušenje objekata u neposrednoj blizini nulte tačke biva veće nego što je to potrebno. Suvišno lokalno razaranje kod niskih eksplozija pretstavlja neekonomičan utrošak energije na rušenje objekata neposredno oko nulte tačke, umanjujući time razaranje udaljenijih objekata. Kod eksplozije visoko u vazduhu ne javljaju se ovi nedostaci sasvim niskih ili površinskih eksplozija. Zatim, eksplozijom u vazduhu izbegava se, koliko je najviše moguće, da jedan objekat štiti drugi. Visina od oko 600 metara uzima se za nominalnu bombu i zbog najracionalnijeg iskorišćenja Mahovog efekta na ravničastom zemljištu.

Udaljenost objekta od nulte tačke. Pritisak vazdušnog udara se smanjuje sa otstojanjem od nulte tačke, a time slabi i efekat njegovog udarnog dejstva. Na određenom otstojanju od nulte tačke (zavisno od visine eksplozije i konfiguracije tla) javlja se i Mahov efekat koji povećava pritisak. Kretanje pritiska, ukoliko se udaljava od nulte tačke (a što je u direktnoj srazmeri sa efektom udarnog dejstva) vidi se na dijagramu — sl. 3.

Zaklonjenost od udarnog dejstva vazdušne nuklearne eksplozije ne dolazi do naročitog izražaja. Kod običnih eksplozija zaštita od strane okolnih objekata igra veliku ulogu (slično je i kod površinskih nuklearnih eksplozija). Vazдушna eksplozija se izvodi na takvoj visini da udarni talas jednovremeno (nesmetano) zahvati sve objekte u zoni dejstva eksplozije. Time svi objekti manje-više bivaju izloženi (oni bliže nultoj tački više vertikalnom, a dalji više horizontalnom) dejstvu udarnog talasa, tako da je faktor zaklanjanja skoro beznačajan.



Slika 3. — Dija-gram dejstva u-darnog talasa

Veličina, oblik i građevinska konstrukcija objekta su značajni faktori koji utiču na efekat udarnog dejstva. Manji, prvenstveno niski objekti iste čvrstoće, daleko su otporniji prema udaru nego velike građevine. Visoki objekti su izloženi većem površinskom dejstvu udarnog talasa i lako se ruše. Kod objekta iste veličine i građevinske konstrukcije oblik odlučuje koji će objekat biti otporniji prema eksploziji. Građevine pravougljih oblika su manje otporne od okruglih građevina. Ukoliko se oblik dejstva više bliži aerodinamičnom, utoliko je objekat otporniji na udarno dejstvo jer ovakav oblik umanjuje udarno dejstvo vazdušnog pritiska.

Što se tiče građevinskih konstrukcija, najotpornije su građevine sa čeličnim i armirano-betonskim skeletom. Zavisno od veličine i oblika, ovakvi objekti mogu izdržati dejstvo udarnog talasa na daljinama većim od 1,5 km. Ako se radi o fortifikacionim objektima ove vrste, oni mogu izdržati pritisak i u neposrednoj blizini nulte tačke. Zatim, po otpornosti dolaze građevine od opeke. Obične kuće za sta-

novanje ruše se od pritiska oko 220—440 gr/sm², a to je pritisak koji izaziva udarni talas na udaljenju od 1,5—2 km od nulte tačke. Najmanje otporne prema udaru su građevine tipa baraka.

Na efekat razaranja usled udarnog dejstva, pored navedenih elemenata, ima uticaja i pravac eksplozivnog udara na objekat. Ukoliko udarni talas dolazi na stranu objekta sa većom površinom, rezultat rušenja, odnosno oštećenja, biće znatno veći nego kada ovaj dolazi na stranu sa manjom površinom.

Na svim građevinskim objektima postoje izvesni delovi koji su prema eksplozivnom udaru mnogo manje otporni od zidova. Tako prozori, laki obložni materijal i drugi slabiji elementi skoro trenutno popuste pod dejstvom čela udara. Pošto čelo udara poruši ove delove, pritisak sa unutrašnje i spoljašnje strane objekta nastoji da se izjednači, što u izvesnoj meri smanjuje razorni uticaj na objekat kao celinu.

Konfiguracija zemljišta znatno utiče na efekat udarnog dejstva, odnosno na stepen oštećenja objekata. Na ravnoj površini udarni talas ima najjače dejstvo jer se pritisak ravnomerno širi na sve strane.

Zemljišne neravnine — brda, brežuljci i sl. mogu udarni talas odbiti ili mu znatno promeniti smer kretanja. Manje udoljice talas obično pređe — »preskoči«, dok u uskim tesnacima, klisurama, može biti znatno pojačan. Tako zemljišne neravnine remete normalno širenje udarnog talasa: dok ga na nekim mestima zaustavljaju, menjaju smer i smanjuju domet dejstva, na drugim ga kanališu, pojačavaju i tako povećavaju daljinu i njegov efekat. Zato se lako može desiti da neki objekti na znatno većim udaljenjima, nego kod ravnog zemljišta, mogu biti razoreni ili oštećeni, dok drugi — daleko bliži, ostaju neoštećeni.

EFEKAT UDARNOG DEJSTVA NA LJUDE

Ljudi izloženi dejstvu nuklearne eksplozije mogu biti ubijeni ili ozleđeni udarnim, toplotnim ili radioaktivnim dejstvom. Ukoliko u momentu eksplozije ne koristi za-

klone ljudstvo će, na određenim udaljenjima od nulte tačke, u različitim stepenima biti ozleđeno od sve tri vrste dejstva. Iz iskustva u Japanu pokazalo se da su mnogi ljudi koji su bili ozleđeni udarnim dejstvom, bili i opečeni, a takav je slučaj bio i sa onima koji su podlegli radioaktivnom zračenju, te je nemoguće precizirati srazmernost učinaka za sva tri uzroka gubitaka i povreda.

Udarno dejstvo može naneti gubitke živoj sili dvojako: *neposredno* od direktnog dejstva udarnog talasa, i *posredno*, usled raznih rušenja izazvanih udarnim talasom.

Ljudski organizam je veoma otporan prema udarnom dejstvu. Čovek može bez težih posledica da izdrži pritisak koji bi inače lako razorio desetospratnu zgradu. Smatra se da je za izazivanje smrti ili teških povreda čovečjeg organizma potreban pritisak od 11—13 kg/sm² površine tela. U nultoj tački udarni talas dostiže samo jednu trećinu te vrednosti. Neposredno dejstvo udarnog talasa, koji deluje na telo u periodu pozitivne faze pritiska prozrokuje prskanje bubnih opni, povrede pluća, želuca, creva i unutrašnja krvarenja. Ovakve povrede zabeležene su u toku Drugog svetskog rata za vreme velikih napada iz vazduha. Neposredno dejstvo udarnog talasa u Japanu nije predstavljalo primarni uzrok smrtnosti, jer su ljudi koji su se nalazili u neposrednoj blizini mesta eksplozije bili sprženi od visoke temperature, smrvljeni od ruševina okolnih objekata, a primili su i smrtonosnu dozu nuklearne radijacije.

Posredno dejstvo udarnog talasa daleko je opasnije za nanošenje gubitaka živoj sili. Pritisak vazdušnih masa ruši razne građevinske objekte i razbacani materijal leti na sve strane, te predstavlja veliku opasnost. Posebnu opasnost predstavlja razbijeno staklo, koje na desetine kilometara može da nanese vrlo ozbiljne povrede. Parčad stakla probija laka odela i zabija se u organizam, a na otkrivenim delovima može i po nekoliko santimetara da prodre u telo.

Povrede od udarnog dejstva su raznovrsne, počev od potpunog gnječenja pod ruševinama građevinskih objekata ili pod odbačenim materijalom, teških preloma i ra-

njavanja sa krvarenjem, do manjih ogrebotina, modrica i kontuzija. U naseljenim područjima smrtni slučajevi i teške ozlede od posrednog dejstva udarnog talasa biće redovni za sve nezaklonjene ljude na udaljenosti 800—1.000 metara od nulte tačke. Broj smrtnih slučajeva se naglo smanjuje na daljini 1,5—2 km. Krajnja granica ozleda izazvanih dejstvom udarnog talasa kod nezaklonjenog ljustva smatra se udaljenje od 4 km od nulte tačke. Razaranjem ognjišta, gasnih, električnih i drugih instalacija mogu biti izazvani mnogi požari u naseljenim područjima. Gubici izazvani na ovaj način takođe se pripisuju indirektnom udarnom dejstvu.

Na otvorenom prostoru udarni talas može naneti nezaštićenim licima ozlede time što će ih odbaciti i udariti o zemlju ili razne okolne predmete. U Japanu je u mnogim slučajevima ozbiljne komplikacije predstavljao šok izazvan telesnim povredama, kao i psihičkim stanjem ozleđenih.

Broj raznovrsnih povreda od udarnog dejstva nuklearne eksplozije u jednom naseljenom području zavisice od građevinskih konstrukcija objekata, visine eksplozije kao i pravovremenosti preduzetih mera zaštite u odgovarajućim zaklonima. Što se tiče vrsta i karakteristika samih povreda nastalih posrednim dejstvom udarnog talasa, one su, u celini uzete, slične povredama koje prozrokuju eksplozije običnih avionskih bombi. Bitna razlika je u tome što su broj i raznolikost telesnih povreda izazvanih u vrlo kratkom vremenskom intervalu i na velikom prostranstvu daleko veći. Broj smrtnih slučajeva po kvadratnom kilometru razorenog gradskog područja daleko prelazi broj istih gubitaka i od najtežih bombardovanja razornim i zapaljivim bombama.

DEJSTVO NA RATNU TEHNIKU I MATERIJAL

Razne vrste ratne tehnike i materijala različito se odnose prema pojedinim vrstama dejstva nuklearne eksplozije, a isto tako se različito ponašaju i prema efektima eksplozije koji nanose štete ratnoj tehnici zavisno od vrste materijala od kojeg su pojedina sredstva izrađena, odno-

sno od osetljivosti toga materijala na pojedine efekte nuklearne eksplozije. Pri razmatranju štete koju ratnoj tehnici i materijalu nanosi udarno dejstvo imaju se u vidu samo štete prouzrokovane neposrednim dejstvom udarnog talasa.

Tenkovi i oklopni automobili su najotpornija ratna sredstva prema nuklearnoj eksploziji. Čak na udaljenju od 450—500 metara od nulte tačke udarno dejstvo im nanosi štetu koja se na licu mesta može otkloniti. Međutim, izvesna dopunska oprema, od koje zavisi njihova borbena efikasnost — u prvom redu sredstva veze — je znatno osetljivija.

Artiljeriska oruđa su neznatno osetljivija od tenkova i oklopnih automobila. Ona će se izvan kruga promera 1 km sa otklanjanjem izvesnih šteta na licu mesta, moći i dalje upotrebljavati. Ali su sredstva za upravljanje artiljeriskom vatrom znatno osetljivija. Na oko 800 metara od nulte tačke vazdušni udar ih onesposobljava za dalju upotrebu.

Motorna vozila — razne vrste terenskih, teretnih i drugih automobila — bila bi onesposobljena za saobraćaj na oko 1 km od nulte tačke. Međutim, ona će od toplote na oko 1.200 — 1.300 metara biti zapaljena, tako da je ovde dejstvo udarnog talasa drugostepenog značaja.

Osetljivost aviona umnogome zavisi od pravca u kome se avion nalazi postavljen u momentu eksplozije u odnosu prema tački eksplozije. Manje-više lake štete pretrpeće svi tipovi aviona na udaljenju od 2,5—3 km od nulte tačke.

Minska polja su otporna na udarno dejstvo, dok toplota i radioaktivno dejstvo — sem toplote oko same nulte tačke na neke vrste mina — nemaju nikakvog uticaja. Oštećenja minskih polja zavisice od vrste mina, odnosno vrste upaljača i debljine maskirnog pokrivača (sloja). Vazdušna eksplozija nuklearne bombe od 20 KT verovatno bi aktivirala nagazne mine na otstojanju 700—800 metara od nulte tačke.

Normalna žičana prepreka na dva reda kolja bila bi oštećena (kolčevi polomljeni i žice pokidane) na 400 me-

Tabela br. 2

VRSTA CILJA	Oštećenja	Udaljenost od NT
Tenkovi i oklopni automobili	Teška Srednja Laka	200 450 2.000
Artiljeriska oruđa	Teška Srednja Laka	250 600 2.000
Motorna vozila	Teška Srednja Laka	800 1.400 2.700
Radiostanice na otvorenom i u lakim vozilima	Lako (krajnja granica)	1.000
Antene i vodovi iznad zemlje — udari parčadi	— „ —	2.000
Tankerl za naftu	Uništenje	1.200
Skladišta goriva i maziva na otvorenom prostoru	Teška Srednja Laka	500 800 1.200
Municija na otvorenom prostoru	Teška Srednja Laka	300 500 1.000
Namirnice u drvenoj ambalaži na otvorenom prostoru	Teška Srednja Laka	400 800 1.200
Mostovi (okrenuti stranama prema eksploziji)	Uništenje Pomeranje	800 1.000
Mostovi (okrenuti krajevima prema eksploziji)	Uništenje Pomeranje	150 200

tara od nulte tačke. Preko 1000 metara udaljenosti žičane prepreke ne bi bile uopšte oštećene.

Žičane veze pretrpeće štete zavisno od sistema polaganja. Podignuti kablovi mogu biti oštećeni osim direktnim udarom, i raznim letećim predmetima i do 3 km od nulte tačke. Žičane linije položene po zemlji, sem u neposrednoj blizini nulte tačke, verovatno ne bi bile prekinute.

Radiostanice u vozilima pretrpele bi oštećenja približno ista ili, zavisno od vrste vozila, nešto veća, kao i vozila. Stalne radiostanice, zavisno od sistema zaštite, mogu postati neupotrebljive na udaljenju oko 2 km od nulte tačke.

Približni podaci o štetama koje nanosi udarno dejstvo vazdušne nuklearne eksplozije 20 KT bombe za neka ratna sredstva i materijal vide se iz tabele br. 2.

DEJSTVO NA ŠUME I RASTINJE

Velika šumska područja ponašaće se prema udarnom talasu približno kao i izgrađeni — naseljeni rejoni. Oko nulte tačke i na udaljenosti do otprilike 1 km udar bi polomio većinu drveća. Pokidano drveće i razbacano granje nanosilo bi ljudima (jedinicama) sklonjenim u šumi gubitke slične onima u naseljenim mestima.

Na većim udaljenjima, šuma i rastinje bi se prema udarnom talasu ponašali slično kao prema jakoj oluji, koja nanosi velike štete raznim prirodnim i veštačkim objektima.

* * *

Potpukovnik PEROVIĆ NIKOLA

TOPLOTNO DEJSTVO NUKLEARNE EKSPLOZIJE

(prikazano na primeru vazdušne eksplozije)

Jednu od najvećih razlika između obične i nuklearne eksplozije (pored radioaktivnog dejstva) čini jačina toplotnog zračenja koja se tom prilikom otpušta. Na toplotno zračenje odlazi oko 30% ukupne energije koja se oslobađa prilikom nuklearne eksplozije¹⁾ a stvorena temperatura, koja je u početku vrlo visoka, brzo pada. Tako, u momentu cepanja nukleona ova temperatura iznosi nekoliko miliona stepeni, ali se posle stotog dela sekunde smanjuje na 300.000°C, a posle jedne sekunde na svega 7.000°C. U blizini nulte tačke u prve 3 sekunde temperatura iznosi 3—4.000°C. Posle 3 sekunde od momenta eksplozije praktično nema toplotnog zračenja. Iz ovoga proističe da se najveći deo toplote proizvodi u prvoj sekundi, tj. posle pojavljivanja prvog bleska vatrene lopte.

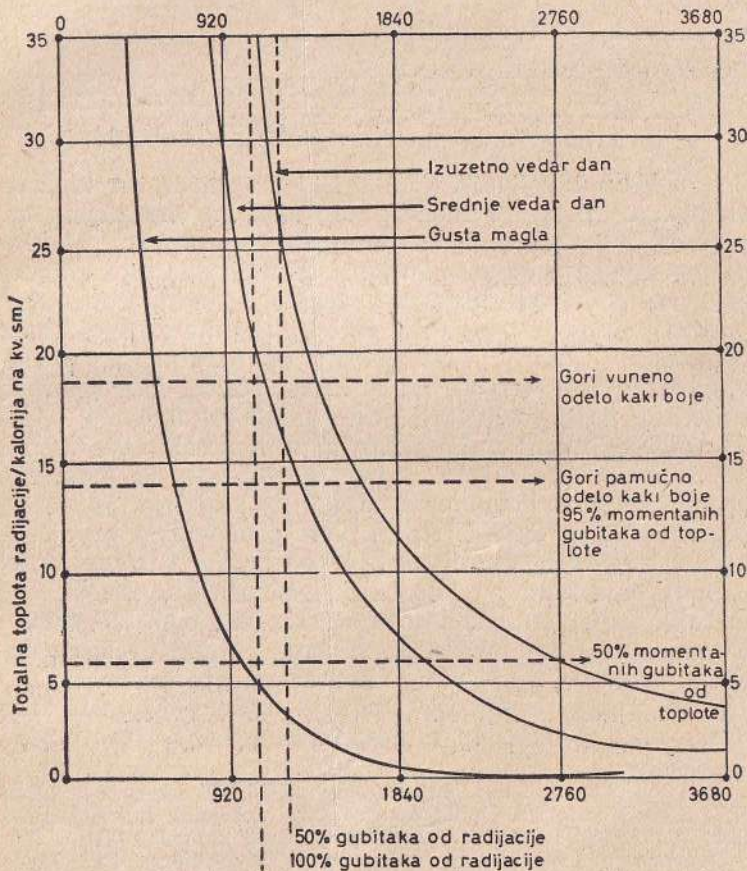
Vatrena lopta se vrlo brzo širi i penje uvis (oko 100 m/sek), a pri tome stalno zrači toplotu poput ogromne užarene peći. Toplotni zraci se kroz vazduh prostiru brzinom svetlosti, a njihovo je kretanje pravolinisko.

Na jačinu toplotnog zračenja utiče vidljivost, tako da se ono, zavisno od atmosferskih uticaja, apsorbuje i

¹⁾ Pri eksploziji nuklearne bombe od 20 KT oslobodi se blizu 700 milijardi kalorija, što odgovara toploti dobijenoj sagorevanjem 5.000 tona nafte ili preko 7.000 tona običnog kamenog uglja. Ovo pretvoreno u električnu energiju iznosi 8 miliona kvč. Iznos toplotne radijacije za atomske projekte drugih jačina proizvoda cepanja menja se kao kvadratni koren iz iznosa radijacije od 20 KT i jačine dotičnog projektila.

rastura, naročito ako se eksplozija događa pri oblačnosti, kiši i snegu (vidi šemu na slici br. 1).

Pored toplotnog zračenja, u momentu eksplozije dolazi i do vrlo jakog svetlosnog bleska, a razvijaju se i druga zračenja koja su (isključujući radioaktivno i ne-



Slika 1. — Uticaj vidljivosti na toplotnu radijaciju za projektil od 20 KT

utronske, o kojima se posebno govori u drugim člancima) praktično bezopasna i čije dejstvo može da izazove samo slabije opekotine, slične opekotinama od sunčanja.

Toplotno dejstvo ne samo da neposredno ugrožava ljudstvo i materijal (primarno toplotno dejstvo), već izaziva i požare (sekundarno toplotno dejstvo) koji pri pogodnim uslovima mogu uzeti velike razmere; to svakako treba imati u vidu pri organizaciji zaštite. S obzirom da se gotovo sva toplotna energija nuklearne eksplozije otpušta u vrlo kratkom vremenskom razmaku (manje od 3 sekunde), to ona nema dovoljno vremena da prodre u dubinu izloženog tela ili materije. Zbog toga toplotno zračenje u kratkom vremenu izaziva vrlo visoku površinsku temperaturu, usled koje se mnoge materije opeku, oprlje, ugljenišu ili zapale.

Povrede od opekotina na ljudskom organizmu, koje su posledica toplotnog dejstva, mogu se kao i opekotine od ma kog toplotnog izvora podeliti u tri vrste:

- prvi stepen — crvenilo kože;
- drugi stepen — pojava plikova;
- treći stepen — mnogo dublje opekotine, koje su zahvatile sve slojeve kože, sa eventualnim stvaranjem udubljenja u tkivu.

U kojim granicama se izazivaju opekotine ova tri stepena kod nezaštićenog ljudstva, pri vazdušnoj (600 m) eksploziji od 20 KT nuklearne bombe, a pri srednjoj vidljivosti dana, vidi se iz sledeće tablice:

Stepen opekotine	Toplotna energija na 1 sm ²	Približno otstojanje u metrima
Prvi	2—3	2.700
Drugi	3—4	2.400
Treći	8—10	1.700

Zbog kratkoće trajanja toplotnog zračenja najmanja zaštita, ma koje vrste i za najkraće vreme, može da bude

vrlo efikasna. Naravno da zaštitna moć materijala zavisi od udaljenosti od tačke eksplozije, kao i strukture i boje samog materijala. Tako, materije jače strukture manje apsorbuju toplotu, a materijali tamnije boje lakše apsorbuju toplotu nego oni svetlije boje. Ovo je dobro uočeno još u Japanu, gde su kod mnogih žena šare sa haljina, koje su ove imale na sebi u vreme eksplozije, bile preslikane u vidu opekotina na njihovoj koži. Svetle površine su odbijale toplotu, dok su je tamni delovi upijali i prenosili na kožu.

Toplotno zračenje pretstavlja veću opasnost za živu silu nego za materijal, tim pre što je praćeno svetlosnim bleskom koji može da prouzrokuje privremeno slepilo. Po danu se privremeno slepilo javlja samo kad se gleda neposredno u vatrenu loptu, jer blesak tada traje vrlo kratko vreme, dok noću traje znatno duže i za to vreme nije moguće, bez zaštite očiju, rukovati oružjem ili instrumentima.

Toplotni zraci se kreću pravoliniski, te su njihovom dejstvu izložena samo ona lica koja su direktno izložena blesku. Osobe koje su zaklonjene iza neke građevine, zida, drveta, oruđa, vozila ili čak drugom osobom neće dobiti opekotine ili će one biti neznatne. Zaklon može biti srušen udarnim dejstvom, ali će sprečiti toplotno zračenje, jer ono dejstvuje pre nego što naiđe udarni talas.

Odeća takođe pruža izvesnu zaštitu od opekotina, a to zavisi od udaljenosti od vatrene lopte. Osoba koja na sebi ima odeću od jednog sloja biće manje zaštićena, nego ona koja ima odeću od dva ili tri sloja. Na stepen efikasnosti zaštite odećom utiče i položaj odeće na telu. Na mestime gde odeća čvrsto prileže uz telo izložene osobe (ramena, laktovi, kolena), a na otstojanjima na kojima se odelo ugljeniše, nastaću opekotine, dok ih na delovima preko kojih odeća slobodno visi neće biti. Na manjim udaljenjima od vatrene lopte odeća će pružiti malu ili nikakvu zaštitu, jer će se odelo zapaliti i izazvati opekotine svojim plamenom ili će do ovih doći usled neposrednog toplotnog zračenja pošto odeća već bude izgorela.

Sve se ovo uglavnom odnosi na uslove eksplozije pri srednjoj vidljivosti dana. Međutim, ako se eksplozija dogodi po oblačnom vremenu, kiši, magli, snegu ili ako u vazduhu postoji oblak od prašine, neposredni efekti dejstva će se znatno umanjiti, a na izvesnim otstojanjima, na kojima se oni inače ispoljavaju pri dobroj vidljivosti, mogu sasvim i da izostanu, što se vidi iz šeme na slici br. 1.

Kakve sve povrede i gubici mogu da nastanu od opekotina u toku nuklearnih vazдушnih eksplozija na visini od 600 m, a pri srednjoj vidljivosti, vidi se u sledećoj tablici:

Energija u KT	Otstojanje od nulte tačke u metrima		
	14 kalorija na sm^2	9 kalorija na sm^2	3 kalorije na sm^2
	Pamučno odelo gorl. 95% povreda kod nezaklonjenog ljudstva. Pokriveni rov daje potpunu zaštitu.	Prouzrokuje teške opekotine kože. 80% povreda kod nezaklonjenog ljudstva. Pokriveni rov daje potpunu zaštitu.	Prouzrokuje srednje opekotine kože. 10% povreda kod nezaklonjenog ljud. Pokriveni rov daje potpunu zaštitu.
5	500	850	1.500
10	1.000	1.300	2.000
20	1.400	1.700	2.550
40	1.850	2.400	3.200
60	2.350	2.500	3.650
100	2.600	3.150	4.200

Uticaj toplotnog dejstva nuklearne eksplozije jačine 20 KT na organizme dat je u tablici na strani 189.

Kako ova dejstva iste jačine utiču na pojedine materijale vidi se iz sledeće tablice:

Vrste materijala	Dejstvo	Količina primljene toplote u kalorijama na sm^2	Otstojanje u met. od nulte tačke u uslovima srednje vidljivosti dana
Vuneno odelo	Oprlji se	4	2.500
	Zapali se	15	1.000
Pamučno odelo	Oprlji se	10	1.800
	Zapali se	17	1.500
Bela hartija	Ugljeniše se	8	2.000
	Zapali se	10	1.800
Crna (smeđa) hartija	Zapali se	3	2.800
Drvo	Ugljeniše se	8	2.000
	Zapali se	25	1.300
Drvo obojeno tamno	Zapali se	—	2.500
Guma	Zapali se	8	2.000
Bakelit	Ugljeniše se	75	800

Iz napred navedenog mogu se izvući neki zaključci, kao:

— najveći deo toplotnog zračenja vatrene lopte je u vremenu 0,3 do 3 sekunde posle eksplozije, što zahteva da se momentano potraži najbliži zaklon ili da se u roku od jedne sekunde između sebe i toplotnog izvora stavi bilo kakav zastor ili zaklon, makar i tanak, jer će se tako izbeći zračenje;

— toplotno zračenje u svom širenju od NT ili centra eksplozije brže stiže do nekih predmeta od udarnog talasa, te stoga treba koristiti i one zaklone koji bi mogli biti porušeni udarnim talasom, ali da pritom svojim padom ne povrede zaklonjenog; na taj način će se izbeći toplotno, a donekle i udarno dejstvo;

— kao što je rečeno, toplotno zračenje je pravolinijsko i zbog toga opekotine nastaju na direktno izloženim površinama (t.zv. »profilne opekotine«). Prema tome, svaki zaklon, odeća, i sl. mogu, zavisno od položaja i odnosa osobe prema izvoru zračenja, da umanje opekotine od toplotnog dejstva. Za zaštitu očiju od privremenog slepila treba nositi tamne naočare od nesalomljivog materijala.

— na smanjenje toplotnog zračenja utiče i providnost vazduha. Zbog toga za kretanje na prostori koja može biti izložena nuklearnoj eksploziji treba koristiti maglu, kišu, i sneg, a ako toga nema onda primeniti veštačko zadimljavanje;

— broj opekotina na živoj sili je obrnuto srazmeran otstojanju do centra eksplozije.

Do sada je bilo reči o primarnom toplotnom dejstvu. Međutim, ovo dejstvo (zračenje) izaziva i sekundarno dejstvo u vidu požara, koji obično prati nuklearnu eksploziju. Požari izazvani nuklearnom eksplozijom nemaju ništa specifično što bi ih izdvajalo od požara izazvanih na bilo koji drugi način. Sekundarno dejstvo toplotnog zračenja (zapaljivo dejstvo) izaziva veliki broj požara, požarne oluje, a samim tim i masovni broj opekotina od plamena. Sa ovim treba računati ne samo u naseljenim mestima, već i na položajima u poljskim uslovima, a naročito u šumi, rejonu rastinja i sazrelih biljnih kultura, rejonima skladišta itd.

Na obim i jačinu požara utiče, pre svega, broj i sastav zapaljivih objekata i materijala; raspored objekata i materijala u zoni toplotnog dejstva; stepen njihove zapaljivosti; atmosferski uslovi; vlažnost i strujanje vazduha, kao i stvor zemljišta na kome se objekti i materijali nalaze.

Udarni talas koji sledi toplotno zračenje, može da utiče dvojako na širenje požara: izvesne požare, obično manje i po jačini slabije, može da ugasi, a ponekad, razbijanjem pojedinih objekata i razbacivanjem zapaljenog materijala, izaziva još jače i obimnije požare. Naravno

da ovo zavisi od konkretnih uslova. Udarni talas gasi obično požar na većem udaljenju od nulte tačke i kada su zapaljivi objekti i materijali odvojeni u pojedina manja požarna ostrva. Naprotiv, bliže mestu eksplozije i kada su zapaljivi materijali gušće raspoređeni, dolazi do povezivanja požarnih ostrva, te ih je teže ugasiti.

Interesantno je napomenuti da kod požara izazvanih nuklearnom eksplozijom pojedine pregrade i prepreke ili slobodne površine bez objekata i rastinja, kao što su prosci u šumama, reke i kanali, ulice i trgovi u naseljenim mestima, ne sprečavaju požar u zoni dejstva toplotnog zračenja. To je naravno zbog toga što se zapaljivi objekti i materijali koji se nalaze u zoni zahvata toplotnog zračenja jednovremeno pale sa obe strane takvih pregrada. Međutim, ovakve pregrade na periferiji zone toplotnog zračenja mogu imati velikog uticaja za sprečavanje širenja požara na susedne sektore, te ih zato, kadgod je to moguće, treba i izgrađivati.

Na gašenje ili širenje požara ima velikog uticaja i t.zv. požarna oluja. Ova pojava je primećena i kod svakog većeg požara, odnosno onog koji zahvati veći broj objekata ili lako zapaljivih materijala. To su, naprimer, požari u naseljenim mestima izazvani zapaljivim bombama (Hamburg i Tokio u Drugom svetskom ratu) ili požari velikih kompleksa šuma.

Oko 20 minuta posle eksplozije nuklearne bombe, a usled rasplamsanog požara, počinje da duva vetar sa svih strana i to brzinom od 50—65 km/čas prema centru zapaljene prostorije. Trajanje vetra će zavisiti od jačine i trajanja požara. U Hirošimi je 2—3 sata bio iste jačine, a posle je opadao, tako da se 6 časova posle eksplozije smanjio do slabe ili umerene jačine i sa promenljivim pravcem. Ova oluja je od odlučujućeg značaja za ograničenje širenja požara od periferije zone zapaljivog dejstva ustranu, jer ne dozvoljava širenje požara, pa čak i gasi izvesna slabija požarna ostrva na periferiji. Međutim, bliže nultoj tački, gde je požar celovitiji, oluja doводи do njegovog pojačavanja i širi ga i na objekte koji nisu zapaljeni toplotnim zračenjem.

Ovi vetrovi velikim delom nastaju usled strujanja zagrejanog vazduha uvis iznad mesta požara, slično strujanju vazduha u dimnjaku kada gori vatra.

Iz svega izloženog jasno se vidi da bi gubici od toplotnog dejstva — zračenja i požara — u naseljenim mestima, iznad kojih bi bile izvršene nuklearne eksplozije, bili vrlo veliki. U Japanu je, naprimer, od ovog dejstva bilo oko 3/4 gubitaka u ljudstvu i materijalu. Treba računati da bi u naseljenim mestima sa zgradama osiguranim od požara ovaj procenat bio daleko manji.

U poljskim uslovima, ako ljudstvo ne bi bilo zaklonjeno, povrede od toplotnog dejstva mogle bi da budu procentualno brojnije nego u naseljenim mestima, jer zgrade igraju ulogu zaklona na izvesnim otstojanjima od nulte tačke. Međutim, povrede usled požara, ukoliko se ne bi radilo o šumskim prostorijama i prostorijama sa vrlo bujnim rastinjem, bile bi nesravnjivo manje. Za oruđa, vozila i druge materijale toplotno dejstvo u poljskim uslovima može biti ozbiljna opasnost.

Problem zaštite od toplotnog dejstva nuklearnih eksplozija je vrlo ozbiljan i zahteva brižljivo proučavanje u cilju pronalaženja pogodnih zaštitnih mera i sredstava. Donekle je olakšavajuće to što su povrede od opekotina po karakteru iste kao i povrede od običnih požara.

* * *

Major BUZADŽIĆ ZDRAVKO

RADIOAKTIVNO DEJSTVO NUKLEARNE EKSPLOZIJE

Svaku nuklearnu eksploziju prati emitovanje nuklearnih zračenja. Ovo je specifična pojava nuklearnih eksplozija, koja se ne javlja kod klasičnog eksplozivnog oružja. Zračenje se sastoji iz alfa i beta čestica, gama zrakova i neutrona. Neutroni i deo gama zrakova emituju se u procesu fisije nuklearnog eksploziva, tj. jednovremeno sa eksplozijom nuklearne bombe. Beta čestice i ostali deo gama zračenja oslobađaju se pri raspadanju produkata fisije. Alfa čestice emituje normalnim radioaktivnim raspadanjem nuklearni eksploziv — uran 235 ili plutonijum — koji nije pretrpeo fisiju.

Zajednička osobina svih nuklearnih zračenja jeste da prodiru kroz materiju i u njoj izazivaju jonizaciju; štetno deluju na žive organizme, te predstavljaju veliku opasnost za ljude koji se nađu u dometu njihovog dejstva.

Za praktične svrhe, prema vremenu nastajanja i dejstva, sva nuklearna zračenja dele se na dve kategorije:

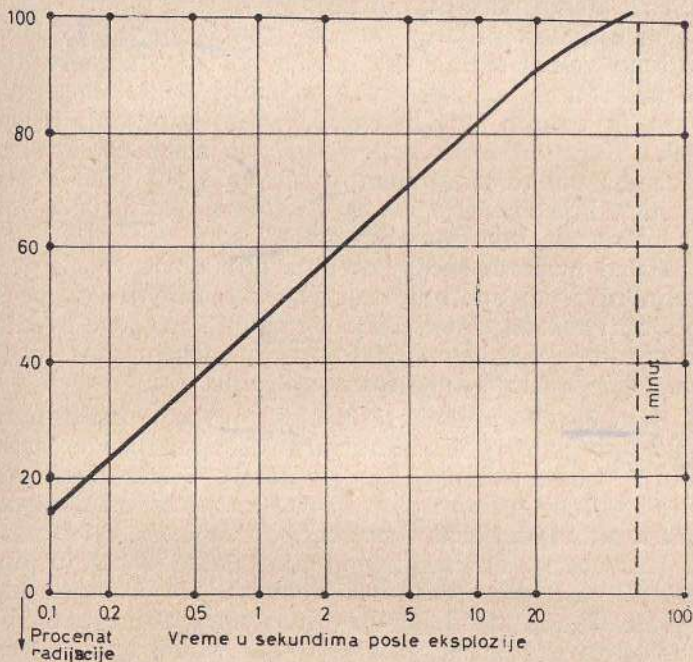
- početno (primarno) zračenje,
- naknadno (sekundarno) zračenje.

Početno radioaktivno zračenje se javlja u momentu eksplozije nuklearnog projektila i traje otprilike oko jedan minut (vreme emitovanja početnog zračenja prikazano je grafikonom na sl. 1). Ovo zračenje nije ravnomerno raspoređeno u okviru datog vremena. Tako, do isteka prve sekunde emituje se oko 50% celokupne radijacije, do kraja prvog minuta oko 98%, a neznatan osta-

tak od oko svega (2%) zrači do kraja drugog minuta od trenutka eksplozije.

Naknadno radioaktivno zračenje emituju radioaktivne čestice i drugi radioaktivni materijali koji se pojavljuju posle nuklearne eksplozije.

Odnos između totalne doze radijacije i vremena posle eksplozije
Visina eksplozije 600 m



Slika 1

Pošto se ukupno radioaktivno zračenje sastoji od 4 razne vrste nuklearnog zračenja, razmotrićemo svaku pojedinačno u vezi sa značajem njihovih učinaka u vojnom pogledu.

Alfa čestice predstavljaju čestice koje se emituju tokom prirodnog radioaktivnog raspada radioaktivnih elemenata. Posle nuklearne eksplozije njih emituje ne-

raspadnuti nuklearni eksploziv. Alfa čestice su ustvari jezgra atoma helijuma (sastavljena od dva protona i dva neutrona, sa dva pozitivna električna punjenja). Pri prolasku kroz materiju dejstvuju elektrostatičkom privlačnom silom na periferne elektrone atoma, te ih iz atoma izbacuju (eksčituju). Usled dvostrukog pozitivnog naelektrisanja i relativno velike mase, interakcija između alfa čestica i atoma pored kojih prolaze je vrlo intenzivna, te se duž njihovih putanja stvara gusta jonizacija. Zbog relativno velike težine alfa čestice se teško pomeraju sa pravca kretanja, a kako brzo rasipaju svoju energiju u stvaranju brojnih jonskih parova, to im je putanja pravoliniska i kratka. Alfa čestice su vrlo slabe prodornosti, ali veoma velike jonizacione moći (na 1 sm vazduha čestica osrednje energije, 1,7 MV¹⁾ stvara oko 30.000 jonskih parova, a ima domet svega 1,7 sm.

Usled ovakvih svojih osobina alfa zračenje ne predstavlja nikakvu spoljnu opasnost, jer nije u stanju da probije ni rožasti sloj čovečje kože. Ono je opasno jedino ako se radioaktivni materijal na neki način unese u organizam, gde nastaje dugotrajno zračenje.

Beta čestice predstavljaju elektroni koji emituju radioaktivne materije. Pri nuklearnoj eksploziji ove čestice emituju produkte fisije, kao i veštačke radioaktivne materije stvorene na zemljištu ili u vodi zahvatom neutrona (neutronska indukovano zračenje). Prolazeći kroz materiju beta čestice duž svojih putanja takođe izazivaju jonizaciju. Beta čestice imaju veći domet i jaču probojnu moć nego alfa čestice, ali daleko slabiju jonizacionu moć (jedna beta čestica iste energije, 1,7 MV, na 1 sm vazduha stvara 75 jonskih parova, a ima domet oko 13 m).

Mada ima nešto veću prodornu moć — može da prodre kroz kožu, ali ne dospeva do unutrašnjih organa, beta zračenje, kao ni alfa, ne predstavlja spoljnu opasnost, već samo unutrašnju kada se unese u organizam.

Neutroni su električki neutralne čestice, veoma velike prodornosti. Pošto su bez električnog punjenja do

¹⁾ MV = mega volt.

apsorpcije dolazi samo direktnim sudarom neutrona sa atomskim jezgrom. Mada se mehanizam apsorpcije neutrona razlikuje od mehanizma ostalih čestica, on na kraju takođe dovodi do jonizacije materije u koju neutroni prodru.

Neutroni emitovani u procesu fisije nose sobom oko 3% celokupne energije nuklearne eksplozije.

Razlikujemo dve vrste neutrona: *brze* i *spore*. Brzi neutroni emituju se u momentu nuklearne eksplozije i kreću brzinom svetlosti. Domet im je oko 600—700 m od tačke eksplozije. Na putu svoga kretanja brzi neutroni u sudaru sa česticama materija kroz koje prolaze predaju deo svoje energije, a sami skreću sa pravca kretanja i usporeno produžavaju dalje. Tokom više takvih sudara neutroni će biti jako usporeni i postaću takozvani spori (termalni) neutroni. Na kraju spori neutroni bivaju zahvaćeni (zarobljeni od nekih jezgara) i stvaraju radioaktivne izotope, koji potom emituju gama zrake ili beta čestice (ili i gama zrake i beta čestice zajedno), što zavisi od prirode materije čija jezgra su zahvatila neutrone.

Posle nuklearne eksplozije površina tla biće izložena dejstvu neutrona. Ljudstvo koje se bude nalazilo nezaštićeno takođe će biti izloženo ubitačnom dejstvu neutrona u poluprečniku od oko 500—600 m od nulte tačke (međutim na ovom udaljenju je dejstvo gama zrakova daleko iznad smrtonosne doze, te direktno neutronske zračenje i ne predstavlja posebnu opasnost). Razni materijali na zemljištu u zahvaćenom području (zemlja, kamen, razni metali i predmeti izrađeni od njih) bivaju neutronima veštački radioaktivirani (inducirano neutronske zračenje) i postaju izvor naknadnog radioaktivnog zračenja.

Gama zraci su elektromagnetna zračenja, slična vidljivoj svetlosti, radiotalasima ili rendgenskim zracima. To je elektromagnetno zračenje malih talasnih dužina, a širi se iz centra eksplozije brzinom svetlosti. Veoma je prodorno te se može zaustaviti samo debelim slojem materijala sa velikom atomskom težinom (što je materijal čvršći, time je i moć zadržavanja gama zrakova veća).

Gama zraci imaju veliku prodornu moć kroz sve vrste materijala kao i kroz čovečji organizam, a domet im zavisi od energije fotona²⁾ i od prirode apsorbenta. Prodirući kroz materiju gama zraci bivaju apsorbovani, a fotoni gube svoju energiju koju prima materija koja ih apsorbuje. Gama zračenje dejstvuje na materiju samo kada bude apsorbovano, a apsorpcija zavisi od atomske težine apsorbenta — što je atomska težina apsorbenta veća i apsorpcija je veća.

Apsorpcija gama zračenja dovodi do jonizacije materije koja je zračenje apsorbovala. Bilo da se radi o živom tkivu, ili neživoj materiji, foton će pri sukobu sa nekim atomom izbaciti iz ovog jedan elektron. Ovi elektroni izbačeni su iz atoma velikom brzinom i duž svoje putanje dejstvovaoće odbojnom elektrostatičkom silom na elektrone atoma pored kojih prolaze, te će ih ili pomeriti sa nivoa na kojima su se nalazili (ekscitacija atoma), ili će ih potpuno izbaciti iz atoma (jonizacija atoma). Na taj način stvara se duž putanje ovih brzih elektrona čitav niz jona, odnosno jonskih parova (naime, atomi iz kojih su istrgnuti elektroni postaju pozitivni joni, a sam istrgnuti elektron veže se za neki obližnji atom i tako nastaje negativni jon). Elektroni izbačeni iz atoma dejstvom gama fotona su vrlo velike brzine, te je verovatnoća dejstva na susedne atome, pored kojih prolaze, relativno vrlo mala, osim pri kraju putanje kada se elektron uspori. U živom tkivu, koje je sastavljeno od lakih elemenata i relativno male gustine, apsorpcija gama zračenja je slaba, te je usled ovih momenata specifična jonizacija (broj jonskih parova i mikron putanje) vrlo slaba. Gama zračenje ubrajamo u zračenja vrlo slabe jonizacione moći (gama foton određene energije stvara oko 1,5 jonski par na 1 sm vazduha), ali velike prodorne moći tj. vrlo velikog dometa.

Gama zraci koji se emituju u momentu eksplozije sadrže oko 3% ukupne energije koja se oslobodi eksplozijom nuklearne bombe. Pored ovih, mnogi fragmenti nuklearne fisije i njihovi produkti u toku svog raspada-

²⁾ Najmanji delić svetlosti.

nja emituju gama zrake približno iste količine energije, što znatno povećava početno radioaktivno dejstvo. U poređenju sa energijom udara i toplote, ova energija gama zračenja je znatno manja, ali ipak može da nanese velike gubitke, naročito nezaklonjenoj ili slabo zaklonjenoj živoj sili.

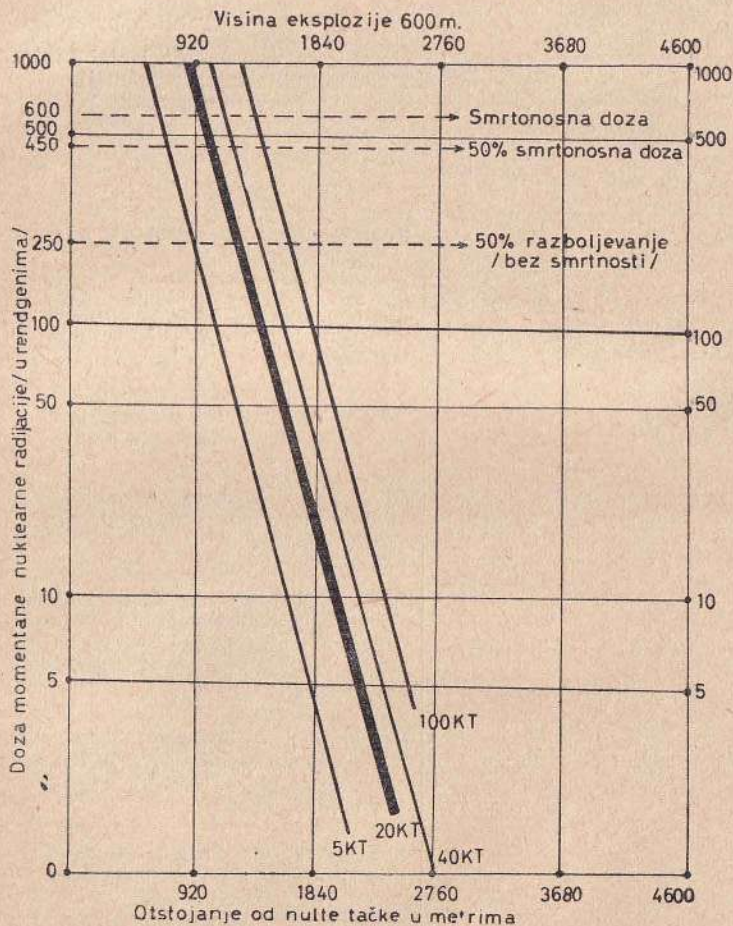
Tablica br. 1

Odnos između doze početnog nuklearnog zračenja i otstojanja od nulte tačke pri vazdušnoj nuklearnoj eksploziji

Otstojanje od nulte tač. u metr.	Doza u rendgenima	Verovatni efekti
1600	50 ili manje	Nema oboljenja ni smanjenja borbene efikasnosti.
1450	100	2% oboljenja ljudstva za 1 dan, nije potrebna evakuacija, svi sposobni za dužnost.
1350	150	25% oboljenja ljudstva za jedan dan, nije potrebna sanitetska evakuacija.
1300	200	50% oboljenja ljudstva, evakuacija 25% sanitetskim kolima, nisu verovatni smrtni slučajevi.
1250	300	100% oboljenja prvog dana. Potrebno je sve ljudstvo evakuisati u roku od 7 dana. Verovatno 25% smrtnih slučajeva. Jedinica nije sposobna za dužnost tri meseca.
1150	400	Prvog dana sve ljudstvo obolelo, 50% treba odmah evakuisati. Verovatno 50% smrtnih slučajeva. Jedinica nesposobna za borbu 6 meseci.
1050	600	Sve ljudstvo obolelo u roku od 4 sata. Potrebna momentalna evakuacija. Verovatno 100% smrtnih slučajeva. Od preživelih niko nije sposoban za borbu ni posle 6 meseci.

Opasan domet gama zračenja iznosi oko 1.500 metara od nulte tačke. Idući od nulte tačke ono vrlo brzo opada — što se vidi iz tablice br. 1.

Odnos između momentalne doze nuklearne radijacije i otstojanja nulte tačke za projekte različitog kalibra



Slika 2

Dejstvo radioaktivnog zračenja na ljude zavisi od primljene količine (doze zračenja) odnosno od udaljenosti od nulte tačke nuklearne eksplozije. Tako na oko 1.000 metara od nulte tačke nezaklonjeno ljudstvo primilo bi oko 600 rendgena, a to je doza koja izaziva smrt kod svih ozračenih, takozvana apsolutna smrtna doza. Već na oko 1.100 metara ona opada na 450 rendgena, a to je doza koja izaziva oko 50% smrtnih slučajeva kod ozračenih. Doza od 200 rendgena primi se na udaljenju od oko 1.300 metara. Iz ovoga se vidi da je granica između apsolutne smrtno doze i granice sigurnosti veoma uska. Na grafikonu sl. 2 dat je odnos početnog zračenja i otstojanja od nulte tačke sa umerenim karakterističnim granicama dejstva na ljude.

Sa vojne tačke gledišta, najopasnije od početnog nuklearnog zračenja je gama zračenje, jer ima najveći do met. Zbog toga, kada se uopšte razmatra nuklearno zračenje — radioaktivno dejstvo nuklearne eksplozije — misli se prvenstveno na gama zračenje, te su i svi proračuni dejstva kao i mere zaštite bazirani na dejstvu gama zračenja.

DEJSTVO NA MATERIJALE

Kao što je napred izneseno, samo udarno i toplotno dejstvo imaju neposredan štetan uticaj na razne materijale i objekte — razaranjem i paljenjem. Međutim, izvesni materijali mogu postati veštački radioaktivni — indukcijom neutrona ili taloženjem na površini radioaktivne prašine posle nuklearne eksplozije. Ni jedno ni drugo dejstvo ne utiču na fizičke osobine dotičnog materijala, ali njihova radioaktivnost predstavlja izvor opasnosti za svako lice koje bi rukovalo takvim materijalom. Rukovanje ovakvim materijalima je opasno sve dok se ne ukloni izvor zračenja, a to se postiže prirodnim opadanjem aktivnosti (kod inducirane neutronske radioaktivnosti — koja može da iščezne za nekoliko dana) ili uklanjanjem radioaktivne prašine sa predmeta koji se žele upotrebljavati (ovo se postiže takozvanom dekontaminacijom).

Naknadno radioaktivno zračenje je zračenje koje se javlja posle završetka nuklearne eksplozije. Ono se nastavlja, posle 1,5 do 2 minuta od momenta eksplozije, na početno radioaktivno zračenje (teško je ovde tačno definisati granicu kada jedno prestaje a drugo počinje). Naknadno zračenje nastaje uglavnom od produkata radioaktivnog raspadanja radioaktivnih materijala, a prema načinu nastajanja deli se na tri grupe:

— produkti cepanja (fisije) atoma nuklearnog eksploziva,

— neeksplozirani deo nuklearnog eksploziva i

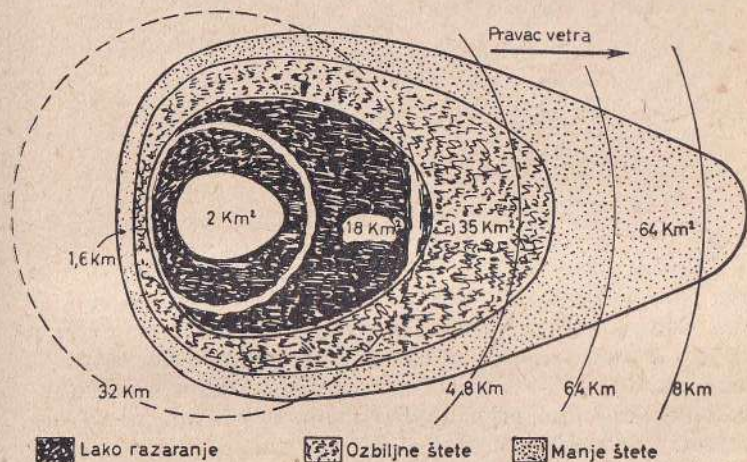
— veštački radioaktivni izotopi nastali usled dejstva neutrona na razne materijale, odnosno elemente, koji se nalaze na površini zemlje (ili u vodi).

Radioaktivni izotopi koji nastaju pri fisiji nuklearnog eksploziva (atomske jezgare urana 235 i plutonijuma 239) sastoje se iz radioaktivnih izotopa elemenata sa atomskim težinama između 70 i 160. Produkti fisije imaju različite periode poluraspada, koji se kreću između nekoliko miliona godina i nekoliko delova sekunde. Skoro svi produkti fisije emituju beta čestice, a većina uz ove i gama zrake.

Nuklearni eksploziv kojim je punjena nuklearna bomba pri eksploziji samo jednim delom, oko 1,5 do 3%, oslobađa nuklearnu energiju fisijom. Sav ostali deo nuklearnog eksploziva (urana 235 i plutonijuma 239) ne pretrpi fisiju, već ispari od ogromne temperature i po ohlađenju u atmosferi pada u obliku čvrstih čestica neeksploziranog nuklearnog eksploziva na površinu tla. Ovi elementi emituju alfa čestice i gama zrake sa vrlo dugim periodom poluraspada.

Neutroni koji se oblobođaju pri nuklearnoj eksploziji, čiji je domet, kao što je navedeno, oko 600—700 m od centra eksplozije, stupaju u dejstvo sa stabilnim izotopima elemenata od kojih je sastavljena zemljina kora i pojedini predmeti na njenoj površini, te tako grade radioaktivne izotope. Najvažniji elementi koji stupaju u interakciju sa neutronima su silicijum 31, aluminijum 28 i natrijum 24. Svi ovi emituju beta čestice i gama zrake.

Naknadno zračenje pri vazdušnoj nuklearnoj eksploziji ne pretstavlja veliku opasnost, kako za živu silu tako ni za materijale. Ono je daleko manje opasno od početnog nuklearnog zračenja. Stepenn opasnosti zavisi u prvom redu od visine nuklearne eksplozije. Mada pri ovoj eksploziji vatrena lopta ne dodiruje površinu zemlje, ona pri svom širenju i dizanju u vis povlači izvestan deo sagorelih i isparenih materija sa površine zemlje. Sve ove materije kao i čestice vazduha i vazdušne vodene pare i čestice prašine u vazduhu bivaju veštački radioaktivirane. One zajedno sa produktima fisije i neraspadnutim nuklearnim eksplozivom bivaju podignute u vidu atomskog oblaka i vazdušnim strujanjima raznesene i nata-



Slika 3

ložene na izvesnu daljinu od nulte tačke. Ovakav materijal poznat je pod imenom radioaktivna prašina. Radioaktivnu prašinu vetrovi mogu da odnesu i do desetak kilometara od mesta eksplozije. Najveće taloženje je u nultoj tački i neposredno oko nje. Ono se širi u vidu elipse (slika 3), što zavisi od vetra, i postepeno opada sa udaljenošću od nulte tačke.

Naknadno radioaktivno zračenje sa vojne tačke gledišta pretstavlja opasnost tek ako se nuklearna eksplozija dogodi na visini oko 150 metara i manjoj — kod takozvanih prizemnih nuklearnih eksplozija. Tako napr. kod jedne eksplozije na visini oko 30—50 metara iznad površine zemlje intenzitet naknadnog radioaktivnog zračenja posle jednog časa od momenta eksplozije biće približno sledeći:

Otstojanje od NT u metrima	Intenzitet gama zračenja u p/x
0	8 000
100	5.000
200	600
300	150
400	30
500	10
1.000	0,3

Naknadno radioaktivno zračenje javlja se u vidu alfa i beta čestica i gama zračenja. Tokom vremena oni gube svoju jačinu i radioaktivnost materija brzo se smanjuje. Ono je različito za razne vrste materijala. Za praktične svrhe može se grubo uzeti da jačina naknadnog radioaktivnog zračenja opada obrnuto srazmerno sa vremenom, naprimer, posle eksplozije od 10 časova opada na 1/10 početne jačine.

* * *

Dr ing KONRAD MAKSIMILIJAN
Ing ŽIVKOVIĆ NADA

INSTRUMENTI ZA MERENJE JAČINE I DOZE RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

U uslovima rata nuklearnim oružjem potrebno je ustanoviti da li i u kojoj meri postoji radioaktivno zračenje. Na osnovu izmerene jačine zračenja može se utvrditi u kom stepenu postoji opasnost od zračenja i unapred odrediti koliko se dugo ljudstvo i materijal sme zadržavati na takvom terenu. Zbog zdravstvene kontrole i lečenja osoba koje su bile izložene radioaktivnom zračenju, potrebno je odrediti ukupnu primljenu dozu zračenja svake pojedine osobe.

Merenje intenziteta, kao i vrste radioaktivnog zračenja, vrši se pomoću merača zračenja. S obzirom na njihovu namenu, postoje različite vrste merača, koje se međusobno razlikuju po konstrukciji i osetljivosti. Merači zračenja za male intenzitete služe uglavnom za utvrđivanje slabih izvora zračenja, napr. kod dekontaminacije oružja, opreme, ljudi i životinja, zatim kod ispitivanja hrane, vode itd. Iako se ovde radi o slabim izvorima zračenja, oni mogu biti opasni zbog trajnog delovanja na organizam, a naročito ako se unesu u telo. Merači zračenja treba da budu što osetljiviji, pa su i konstruisani tako da se mogu što više približiti ispitivanom predmetu. Pored instrumenata za pokazivanje intenziteta zračenja, neki od njih imaju i slušalice pomoću kojih se, na osnovu učestanosti broja udaraca, može brzo zaključiti o promena intenziteta zračenja, što je naročito važno za bliže određivanje mesta izvora zračenja.

Merači srednjih i velikih intenziteta radioaktivnog zračenja služe za određivanje jačine zračenja na prostorijama na kojima se kreću jedinice ili kod dekontaminacije terena.

Za određivanje doze zračenja koju je primila pojedina osoba služe lični dozimetri. S obzirom na način čitanja, postoji nekoliko tipova dozimetara, koji se opet mogu podeliti u dve grupe: u prvu spadaju dozimetri kod kojih se primljena doza može direktno čitati, a u drugu oni kod kojih se čitanje može izvršiti samo pomoću posebnog uređaja, ili posle specijalnih postupaka. Ovi poslednji su jednostavni, jevtini i pogodni za masovnu upotrebu ali se ne koriste tamo gde je važno što brže čitanje primljene doze.

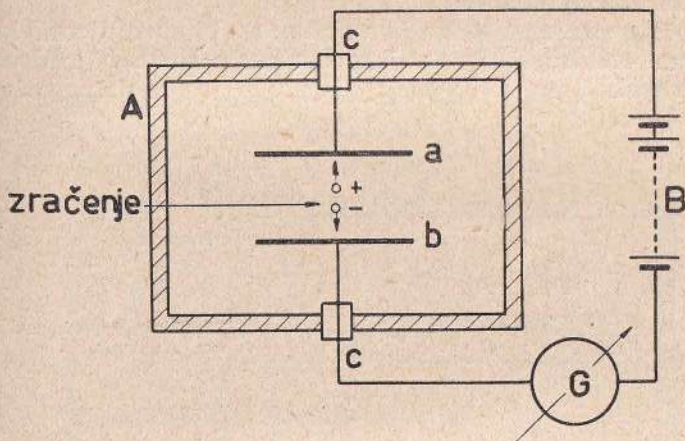
ELEKTRIČNI INSTRUMENTI ZA MERENJE RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

Instrumenti za električno merenje radioaktivnog zračenja zasnivaju se na činjenici da zračenje pri svom prolazu kroz gasove izaziva jonizaciju, tj. rastavljanje atoma, odnosno molekula gasa na pozitivno i negativno električki nabijene komponente (jone). Veličina jonizacije je proporcionalna intenzitetu zračenja, pa se stoga može koristiti za merenje jačine zračenja. Zračenje koje se sastoji od električki nabijenih čestica, kao što su alfa i beta zračenja, izaziva jonizaciju neposredno svojim nabojem, dok električki neutralna zračenja (neutroni i gama zraci) izazivaju jonizaciju posredno. Jonizacija izazvana električki nabijenim česticama znatno je jača nego ona izazvana drugim zračenjem. Zbog toga zračenje, koje se sastoji od električki nabijenih čestica, znatno brže gubi svoju energiju, pa mu je i domet manji. Razlika u dometu pojedinih vrsta zračenja može se koristiti za određivanje vrste zračenja.

Instrumenti sa jonizacionom komorom

Najjednostavniji instrument za merenje zračenja je jonizaciona komora, prikazana principijelno na sl. 1.

U zatvorenoj posudi — A smeštene su metalne elektrode a i b, na koje je, u seriji sa galvanometrom — G, priključena baterija — B. Električno polje, koje tako nastaje između elektroda a i b, proizvodi sile na električki nabijene čestice (jone), nastale jonizirajućim delovanjem zračenja.



Slika 1. — Šematski prikaz jednostavnog instrumenta sa jonizacionom komorom:

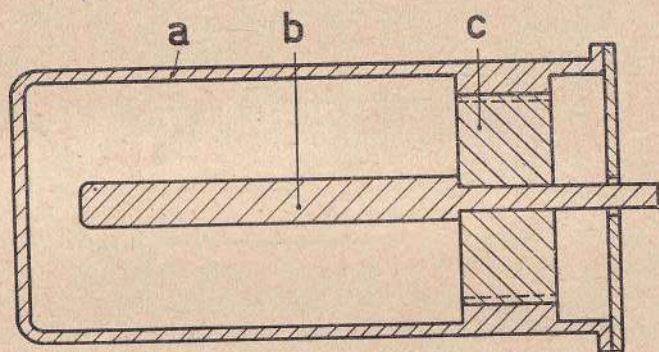
- A — zatvorena posuda
- a i b — metalne elektrode
- c — izolator
- B — baterija
- G — galvanometar

Pozitivni joni se kreću prema negativnoj elektrodi, a negativni prema pozitivnoj. Ako napon nije suviše visok, a dovoljan je da joni koji su nastali u gasu između elektroda stignu na elektrode a i b, jačina struje koja teče kroz galvanometar — G je proporcionalna intenzitetu zračenja. Jačina struje kroz galvanometar je veoma mala, pa instrument (kao što je prikazan na sl. 1) nije prikladan za merenje zračenja, čak ni najjačih, osim u laboratorijske svrhe, jer zahteva vrlo osetljiv galvanometar. Stoga se u prenosnim instrumentima umesto galvanometara upotrebljavaju pojačivači sa elektronskim cevima, koji

struju jonizacione komore toliko pojačaju da se ona može meriti relativno grubim instrumentima. Ovakvi instrumenti uglavnom služe samo za određivanje srednjih i jakih intenziteta zračenja.

Konstrukcija jedne tipične jonizacione komore, koja se ugrađuje u prenosne instrumente za merenje zračenja, prikazana je na sl. 2.

Komora *a* izvedena je u obliku cevi i služi ujedno kao jedna elektroda. Centralno smeštena šipka *b* je druga elektroda, i ona se obično spaja preko otvora na negativni pol baterije.



Slika 2. — Presek jednostavne jonizacione komore za prenosne merače zračenja:

- a — metalno kućište
- b — centralna elektroda
- c — izolator

Elektrode su izrađene od metala (najčešće od aluminijuma ili bakra), a međusobno su izolovane pomoću izolatora *c*, koji treba da bude od vrlo dobrog izolacionog materijala (kvarc ili plastični materijali).

Komora je najčešće punjena vazduhom pod atmosferskim pritiskom, a u nekim slučajevima, gde se traži veća osetljivost, upotrebljavaju se i druge vrste gasova (napr. argon) i to pod većim pritiscima (do 20 atm.).

Jonizaciona komora, prikazana na slici 2, služi samo za merenje gama zračenja ili beta čestica velikih energija,

jer metalni oklop zadržava teže čestice manjih energija i ne dozvoljava im pristup u njegovu unutrašnjost. Ukoliko se jonizacionom komorom žele meriti beta čestice manjih energija ili alfa čestice, potrebno je na spoljnoj strani predvideti prozor od tankog sloja materijala (aluminijuma itd.) koji propušta i teže čestice manjih energija.

Instrumenti sa brojačima

Merači slabih intenziteta radioaktivnog zračenja zasnivaju se na brojanju pojedinačnih jonizacija u gasu. Prolazom čestica emitovanih iz radioaktivnog izvora kroz gas između elektroda *a* i *b* (na slici 1), stvara se određeni broj jonskih parova u vrlo kratkom vremenu, koji proizvedu jedan strujni impuls. Što je jače zračenje, broj čestica koje prolaze između elektroda je veći, pa zbog toga i broj impulsa. Merenjem broja učestalosti impulsa može se zaključiti o intenzitetu zračenja. Međutim, treba napomenuti da broj impulsa nije direktna mera za jačinu zračenja, jer je njima dat samo broj pojedinačnih slučajeva jonizacije, a ne i ukupan broj jona proizvedenih zračenjem na osnovu kojeg je određena jedinica za jačinu zračenja.

Merenje intenziteta zračenja brojanjem omogućava konstrukciju vrlo osetljivih i jednostavnih uređaja za merenje zračenja, jer se veličina impulsa može učiniti dovoljno velikom za jednostavnu indikaciju. Povećavanje veličine impulsa može se postići na taj način što se poveća napon između elektroda *a* i *b*. Usled toga, poveća se i električno polje u gasu i joni proizvedeni zračenjem dobijaju dovoljnu energiju da sami dalje joniziraju gas. Time se postiže da, prolazom jedne čestice kroz gas, broj nastalih jona može nekoliko stotina hiljada puta premašiti broj prvobitno stvorenih jona. Ukoliko je napon odabran tako da postoji proporcionalnost između broja prvobitno stvorenih jona i totalnog broja stvorenih jona, ovakva komora se naziva proporcionalnim brojačem. Veličina impulsa iz ovakvog brojača zavisiće od vrste i energije zračenja, pa se takav brojač može koristiti

za određivanje energije i vrste zračenja. Veličina impulsa proporcionalnog brojača jako je zavisna od napona baterije, što znatno ograničava njegovu upotrebu za prenosne merače zračenja.

Daljnijim povećavanjem napona, veličina impulsa je sve manje zavisna od energije čestica, dok konačno ne postane sasvim nezavisna od energije. U takvim uslovima je električno polje između elektroda već tako jako, da prolaz jedne jonizirajuće čestice kroz gas, između elektroda, izaziva neprekidan prolaz struje. Da bi se mogao ustanoviti prolaz sledećih čestica, potrebno je prethodno prekinuti prolaz struje kroz brojač. To se može postići ili kratkotrajnim sniženjem napona brojača posle prolaza čestica, pomoću elektroničkih sklopova, ili dodavanjem primesa koje svojim prisustvom izazivaju prekid prolaza struje. Brojači koji sadrže te primese nazivaju se *samogasećim* Geiger-Müller (GM) brojačima, a oni koji ih nemaju — *nesamogasećim* GM brojačima. Kod prenosnih merača zračenja primenjuju se gotovo isključivo samogaseći brojači, jer oni ne zahtevaju dodatne elektroničke sklopove za svoj rad.

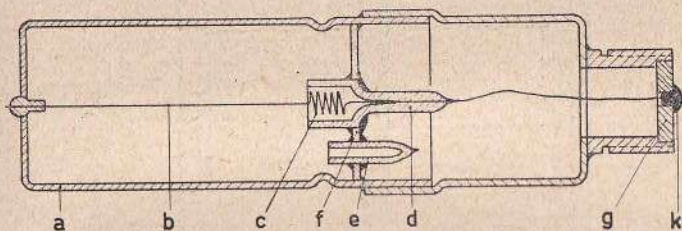
Kao sredstva za gašenje u samogasećim brojačima upotrebljavaju se organske pare ili halogeni elementi. Prilikom procesa gašenja molekuli organskih para se raspadaju. Trajnost brojača s organiskim parama ograničena je na oko 10,000.000 impulsa. Molekuli halogenih elemenata se rekombinuju (rekombinacija = ponovno stvaranje električnoneutralnih molekula od jona), zbog čega halogeni brojači imaju praktički neograničen život. Zbog svoje jednostavnosti GM brojači su vrlo podesni za merenje slabih, a neprikladni za merenje jakih zračenja jer mogu davati samo ograničen broj impulsa u sekundi (oko 10.000). To zbog toga što je posle gašenja brojača potrebno da prođe izvesno vreme da se brojač oporavi (tj. da se uspostavi prvobitno stanje u gasu) i postane sposoban za ponovno davanje impulsa.

Da bi GM brojač radio ispravno potrebno je da napon baterija bude unutar izvesnih granica. Ako je napon premalen, GM brojač radi kao proporcionalni brojač i daje

suviše malene impulse. Međutim, ako je napon previše visok, brojač sam od sebe daje impulse i bez prisustva zračenja.

Kod većine prenosnih instrumenata vrši se stabilizacija napona na GM brojaču i to ili nizom malih tinjalica ili pomoću korona stabilizatorskih cevi. Radni naponi brojača zavise od konstrukcije brojača i kreću se u granicama od oko 300 V do oko 1500 V. Jedna od važnih karakterističnih veličina brojača je t.zv. plato brojača. To je područje napona na brojaču unutar kojeg se broj impulsa, koje brojač daje kod određenog zračenja, malo menja sa naponom. Veličina platoa iznosi obično 10 do 20% iznosa radnog napona brojača.

Tehnička izrada GM brojača zavisi od njegove namene i vrste zračenja koje se njime želi meriti. Većinom su GM brojači u obliku cevi, pa se katkada nazivaju i GM cevima, mada čitav instrument ima četvrtast spoljni oblik, te liči na pravougaonu kutiju.



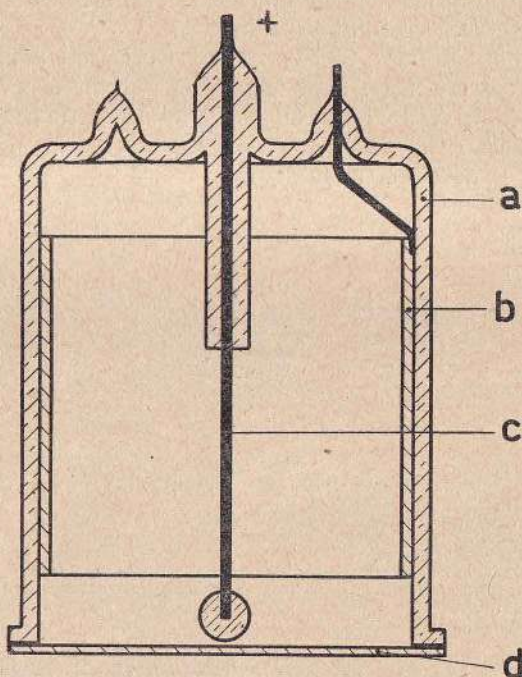
Slika 3. — Presek GM brojača za gama — beta zračenje:

- a — tanka aluminijska cev
- b — pozitivna elektroda od volframove žice
- c — opruga za zatezanje žice b
- d — stakleni provod
- e — zataljena staklena cev za punjenje brojača gasom
- f — pločica od aluminijuma za zatvaranje prostora brojača
- g — izolator
- k — kontakt

Karakterističan oblik GM brojača za merenje gama zračenja i beta zračenja većih energija prikazan je na slici 3. Kao negativna elektroda (katoda) služi spoljna cev a, koja je načinjena od tankog aluminijumovog lima, tako da kroz nju mogu proći čestice većih energija. Cev je

napunjena razređenim gasom (to je obično argon sa dodacima sredstava za gašenje). Centralna žica *b* služi kao pozitivna elektroda.

Ako se brojač upotrebljava samo za merenje gama zračenja, spoljna cev je obično od stakla, a negativna elektroda je ili elektroprovodljiva materija, kojom se premaže unutrašnja strana staklene cevi, ili zasebna metalna cev. S obzirom na hemisku aktivnost halogenih elemenata, halogeni brojači izvedeni su obično na ovaj poslednji način. Brojači koji služe za merenje beta zračenja manjih energija izvedeni su prema slici 4. Oni imaju tanki pro-

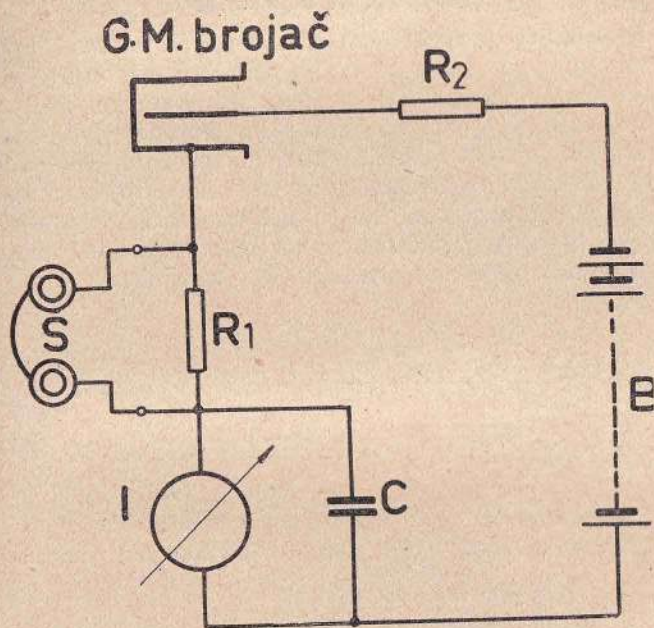


Slika 4. — Presek GM brojača za beta zračenje manjih energija:

- a — staklena cev
- b — negativna elektroda
- c — pozitivna elektroda od volframove žice sa staklenom kuglicom
- d — prozor od tankog tinjca (nekoliko μ)

zor d od tinjca (debljine nekoliko m^1), kroz koji lako mogu proći čestice manjih energija.

Na slici 5 prikazana je principijelna šema jednog jednostavnog instrumenta za merenje zračenja sa GM brojačem. Instrument služi za merenje prosečne struje brojača. Budući da svaki impuls GM brojača ima isti oblik i veličinu, kroz brojač kod svakog impulsa protiče određena količina struje. Prema tome, prosečna struja kroz instrument, a time i njegov otklon, proporcionalna je



Slika 5. — Šematski prikaz jednostavnog merača zračenja sa GM brojačkom cevi:

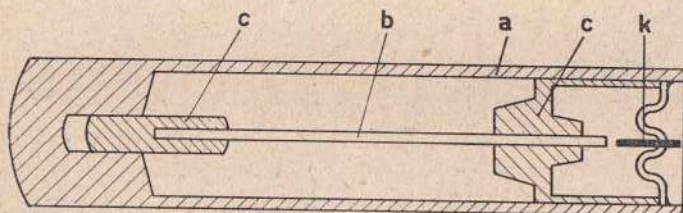
- B — baterija
- I — instrument za merenje prosečne struje brojača
- S — slušalice
- R_2 — otpor za ograničenje struje brojača
- R_1 — otpor za stvaranje napona za slušalice
- C — kondenzator za smanjenje kolebanja struje kroz instrument I

¹⁾ Mikron se obeležava sa μ , a iznosi jedan hiljaditi deo milimetra.

učestalosti impulsa. Uređaj ima i slušalice pomoću kojih se svako paljenje brojača čuje kao udarac. Opisani instrument je vrlo netačan jer je veličina impulsa jako zavisna od napona baterije — B, koji se vremenom menja, pa se kod tačnijih instrumenata ove vrste napon GM brojača stabilizuje; osim toga, impulsi GM brojača se oblikuju pomoću zasebnih elektronskih sklopova, pre nego što se dovedu na instrument I za merenje struje.

Električni dozimetri

Električni dozimetri su konstruisani na bazi jonizacione komore, a zasnivaju se na principu merenja gubitka naboja električki nabijenih elektroda komore, izazvanih jonima, koji je proizvelo zračenje. Glavni problem kod konstrukcije takvih dozimetara je sprečavanje gubitka naboja elektroda usled nesavršenosti izolacije i atmosferske vlage. Ti problemi su rešeni upotrebom specijalnih izolacionih materijala i hermetičkim odvajanjem prostora jonizacione komore od atmosferskog vazduha.

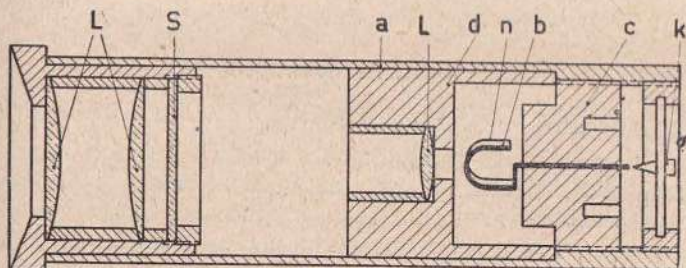


Slika 6. — Presek ličnog dozimetra sa čitanjem pomoću dodatnog uređaja:

- a — metalno kućište
- b — centralna elektroda
- c — izolator
- k — opna sa kontaktom za nabijanje

Na slici 6 prikazan je lični dozimetar kod kojeg se čitanje vrši spoljnim uređajem. Kućište *a* je spoljna elektroda, dok je *b* unutarnja elektroda u obliku šipke. Centralna elektroda *b* je izolovana od spoljne elektrode izolatorima *c*, koji ujedno i drže tu elektrodu. Na jednoj strani kućišta pričvršćena je opna *k* sa kontaktom, preko

kojeg se dozimetar priključuje na uređaj za nabijanje i to tako da se pritiskom kontakt *k* prisloni uz unutarnju elektrodu. Opna *k* hermetički zatvara prostor komore, tako da centralna šipka posle nabijanja ne dolazi u dodir sa okolnim vazduhom. Ako je komora izložena zračenju, naboj na centralnoj elektrodi se smanjuje, a usled toga i njen napon. Doza se određuje na taj način što se komora priključi na dodatni uređaj, koji ustvari meri napon centralne elektrode. Pošto se doza određuje iz veličine pada napona na centralnoj elektrodi, važno je da se pre upotrebe dozimetar nabije uvek na isti napon, tj. dovede do nultog podeoka.



Slika 7. — Presek ličnog dozimetra sa direktnim čitanjem:

- a — kućište dozimetra
- b — centralna elektroda
- n — kvarena nit
- c — izolator
- d — kućište komore
- L — leće (sočiva)
- S — skala
- k — kontakt za nabijanje dozimetra

Dozimetri kod kojih se čitanje vrši direktno građeni su u principu na isti način kao i prethodno opisani dozimetar, samo što imaju ugrađen elektrometar za merenje napona centralne elektrode sa uređajem za čitanje. Konstrukcija ovakvog dozimetra, koji obično ima oblik nalivpera, prikazana je na sl. 7.

Na centralnu žicu *b*, koja je savijena na svom kraju u obliku slova U, učvršćena je tanka kvarcna nit obložena metalom koja je takođe savinuta u obliku slova U. Kvarcna nit deluje kao listić elektroskopa. Ako se cen-

tralna elektroda nabije, kvarcna nit se odmiče usled električnog polja od centralne žice i to tim više, što je napon centralne elektrode veći. Položaj kvarcne niti meri se preko sistema sočiva (leća) L, koji pomicanje kvarcne niti mnogostruko povećava. Pomicanje kvarcne niti čita se na skali S, koja je direktno baždarena u rendgenima. Nabijanje se vrši na sličan način kao i kod prethodno opisanog dozimetra i to tako da nabijeni dozimeter pokazuje Or, što odgovara najvećem naponu na centralnoj elektrodi. Usled jonizacije, izazvane zračenjem, napon centralne elektrode pada, pa se kvarcna nit pomiče prema centralnoj elektrodi i svojim položajem pokazuje primljenu dozu zračenja.

Hemiski dozimetri

1. Principi na kojima se zasniva hemiška dozimetrija

Poznato je da radioaktivno zračenje izaziva hemiske promene u različitim supstancama kroz koje prolazi. Ukoliko je veća količina zračenja, utoliko će i hemiska promena biti veća. Prema tome, mereći pogodnom metodom količinu novostvorenih produkata, moguće je doznati količinu zračenja kojoj je neki hemiski sistem bio izložen. To bi bio princip na kome se zasnivaju sve metode hemiske dozimetrije.

Promene koje se događaju pod dejstvom zračenja mogu da budu različite: oksidacija, redukcija, polimerizacija, razlaganje složenih hemiskih jedinjenja na prostija itd. Da bi se utvrdile količine nastalih produkata pribegava se standardnim metodama kvantitativne hemiske analize: kolorimetriji (odnosno spektrofotometriji), titrimetriji, PH-metriji, polarografiji i dr.

Iako u principu izgleda jednostavno, hemiska dozimetrija ima i svoje loše strane. Ne može, naime, bilo koja supstanca da bude hemiski dozimeter, niti pak postoji takva supstanca koja bi mogla da dozira sve vrste i količine zračenja. Time se objašnjava zašto danas ne postoji »univerzalni« hemiski dozimeter, nego ih ima više i svaki od njih radi sa dosta ograničenja.

2. Podela hemiskih dozimetara

Hemiske dozimetre mogli bismo da klasifikujemo na različite načine (prema reakcijama, vrsti zračenja koju mere itd.). Najpraktičnije je, međutim, da ih podelimo prema tome na kojim mestima i u koje svrhe se upotrebljavaju.

Glavna područja primene hemiske dozimetrije bila bi sledeća:

a) Lična dozimetrija. — Ova oblast obuhvata doze od 0 do 600 rendgena. Kao što samo ime kaže, hemiski dozimetri su tako konstruisani da mogu da posluže za ličnu kontrolu osoba izloženih nuklearnom zračenju. Granica od 0 do 600 r data je na osnovu rezultata dobijenih prilikom eksperimentisanja sa životinjama i iskustava iz eksplozija atomskih bombi u Japanu. Ovi rezultati su pokazali da doze preko 600 r izazivaju sigurnu smrt, a doze ispod 600 r različite stepene oštećenja organizma.

Pomenuta oblast hemiske dozimetrije ima veliki značaj sa gledišta vojne i civilne zaštite u eventualnom ratu nuklearnim sredstvima, pa joj se zato i obraća najviše pažnje. Rezultati postignuti na tome području biće dati tokom daljeg izlaganja.

b) Dozimetrija različitih radioaktivnih izvora. — U mnogobrojnim naučnim laboratorijama, a sve češće i u fabrikama, bolnicama i drugim mestima, sreću se različiti radioaktivni izvori. To su obično veštački radioaktivni izotopi (Co 60, Ir 192 i dr.) ili prirodni izvori zračenja (Ra, U i dr.). Isto tako i razni medicinski uređaji koji proizvode X zračenja mogu da se svrstaju u ovu grupu izvora zračenja.

Da bi se preduzeo ma kakav naučno-istraživački ili praktičan posao sa ovim izvorima, potrebno je odrediti doze zračenja koje takvi izvori emituju. Sem elektronskih instrumenata, u te svrhe se danas već uveliko koristi čitav niz hemiskih dozimetara (Fricke-ov dozimetar na bazi oksidacije dvovalentnog gvožđa u trovalentno, dozimetar na bazi redukcije cera i sl.).

c) Dozimetrija nuklearnog reaktora. — Ogromne količine zračenja, koje se oslobađaju u nu-

klearnom reaktoru, zahtevaju dozimetre koji su, s jedne strane, u stanju da mere vrlo velike doze, a s druge da sami ne budu razoreni ili da ne postanu veštački radioaktivni. Fizičke metode (jonizacione komore, kalorimetri) za sada nisu dale zadovoljavajuće rezultate, pa se danas, paralelno sa nastojanjem da se one adaptiraju za nove uslove, radi i na hemiskim sistemima koji bi mogli da posluže za dozimetriju reaktora.

To bi u najopštijim crtama bila podela hemiske dozimetrije. Sada ćemo dati osnovne informacije o ličnom dozimetru, njegovoj nameni, konstrukciji i osobinama, jer od svih pomenutih dozimetara on privlači najveću pažnju sa gledišta merenja individualnih doza zračenja i lične zaštite osoba u ratu nuklearnim oružjem.

3. Lični hemiski dozimetar

a) Uloga ličnog hemiskog dozimetra

Radioaktivno zračenje, koje neminovno prati svaku nuklearnu eksploziju, ne može se otkriti nijednim ljudskim čulom. Saznanje ljudi da su izloženi opasnosti koju ne vide, može da dovede do nepotrebne panike. Prema tome, jedan od zadataka ličnog dozimetra je svakako taj da spreči psihičku reakciju i pruži izvestan osećaj sigurnosti onim licima koja takav dozimetar poseduju. Međutim, značaj ovakvog dozimetra je još veći kad se ima u vidu da u sadašnjem momentu ne postoji klinička ili laboratoriska metoda pomoću koje bi se, u roku od nekoliko minuta posle eksplozije, utvrdila količina gama zračenja kojoj je neka osoba bila izložena. Tek posle nekoliko dana moguće je, na osnovu krvne slike, ustanoviti da li je primljena doza iznad ili ispod 200 r. Međutim, da bi se medicinskom osoblju omogućila klasifikacija osoba koje su bile izložene zračenju, potrebno je sredstvo koje će neposredno posle eksplozije dati potrebnu informaciju o primljenoj dozi.

Ovaj zadatak se rešava pomoću hemiskog dozimetra, koji je tako konstruisan da odmah pokazuje da li je organizam lakše, srednje ili teže oštećen.

Znači, hemiski dozimetar treba u slučaju rata da pruži podatke o tome koliku su dozu radioaktivnog zračenja primila lica koja su se nalazila u rejonu dejstva nuklearnog oružja.

b) **Princip i konstrukcija ličnog dozimetra.** — Pod dejstvom zračenja hlorirani ugljovodonici (hloroform, tetrahlorugljenik, trihloretilen i dr.) razlažu se, a kao jedan od produkata toga razlaganja pojavljuje se hlorovodonična kiselina. U oblasti od 0 do 600 r postoji linearna zavisnost između doze zračenja i stvorene hlorovodonične kiseline, pa je merenjem količine HCl moguće doznati dozu zračenja.

Kod hloroforma našlo se rešenje na taj način što se hloroformu dodaje neki obojeni indikator, osetljiv na kiselinu. Kada se pod dejstvom zračenja stvori hlorovodonična kiselina, indikator odmah promeni boju. Količine indikatora se uzimaju tako da do promene boje dođe upravo kod onih doza koje želimo da registrujemo. Tako se napr. obično uzimaju četiri ampule od kojih prva menja boju pri 100 r, druga pri 200, treća pri 300 i četvrta pri 450 r.

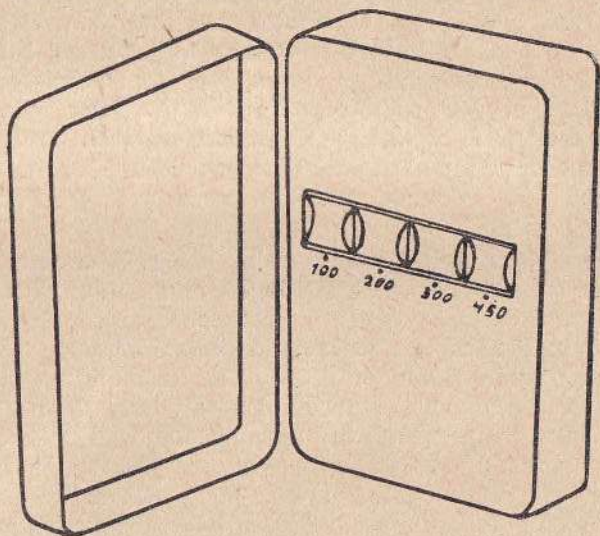
Kao što se vidi, dozimetar je vrlo jednostavan: četiri staklene ampule napunjene hloroformom, kome je dodat rastvor indikatora (obično bromkrezol-crveno). Vodeni rastvor indikatora ne meša se sa hloroformom, nego ga pokriva u vidu tankog prstena. Sem pomenutog sistema dodaje se i oko 0,1% rezorcinola, koji ima ulogu stabilizatora. Ovako pripremljene ampule stave se u kutiju od tankog olova (sl. 8), koja ima otvore kroz koje se vrši čitanje (olovna kutija se uzima zbog zaštite od mekšeg gama zračenja i dnevne svetlosti, koji bi vremenom uticali na sistem slično kao i radioaktivno zračenje). Spolja je potreban još jedan omotač (od plastične mase) koji će štititi sistem od mehaničkih uticaja.

c) **Upotreba dozimetra.** — Posle dejstva zračenja potrebno je otvoriti kutiju i pogledati koja je ampula promenila boju. Ako se, napr. promena dogodila tamo gde piše 300 r (a istovremeno, razume se, i kod svih

nižih doza), to će biti znak da je nosilac dozimetra primio dozu od 300 r. Ovo važi i za ostale doze.

Dozimetar ne treba bez potrebe izlagati svetlosti i visokim temperaturama, jer se u oba slučaja hloroform raspada i bez dejstva zračenja.

Napominjemo da je ovo samo jedan od tipova ličnog hemiskog dozimetra. I ostali se zasnivaju na sličnim principima i slične su konstrukcije. Naprimer, postoji tip hemiskog dozimetra koji ima svega jednu ampulu, koja pri raznim dozama sukcesivno daje različite promene boje. Na samom omotaču dozimetra date su bojene trake (etaloni) sa kojima se upoređuje tečnost u ampuli. Različitim bojama odgovaraju određene doze zračenja.



Slika 8

Iz ovih podataka o hemiskom dozimetru vidi se da je on prihvatljiv kao sredstvo za kontrolu ljudi koji su bili izloženi zračenju prilikom napada nuklearnim oružjem. U sadašnjoj fazi ne postoji pogodniji način masovne kontrole od upotrebe hemiskog dozimetra pa se stoga pridaje veliki značaj njegovom daljem usavršavanju i primeni.