

**ÜLELIIDULINE POLIITILISTE JA TEADUSALASTE  
TEADMISTE LEVITAMISE ÜHING**

---

---

**STALINI PREEMIA LAUREAAT  
TEHNILISTE TEADUSTE DOKTOR**

**V. P. ROMADIN**

**AATOMIENERGIA  
ENERGEETILINE KASUTAMINE**

**13 (206)**

**EESTI NSV POLIITILISTE JA TEADUSALASTE  
TEADMISTE LEVITAMISE ÜHINGU  
VÄLJAANNE**

---

**EESTI RIIKLIK KIRJASTUS  
TALLINN 1955**



A-17396  
206 II

ÜLELIIDULINE POLIITILISTE JA TEADUSALASTE TEADMISTE  
LEVITAMISE ÜHING

---

Stalini preemia laureaat  
tehniliste teaduste doktor  
V. P. ROMADIN

AATOMIENERGIA  
ENERGEETILINE KASUTAMINE

20380

EESTI NSV POLIITILISTE JA TEADUSALASTE TEADMISTE  
LEVITAMISE ÜHINGU  
VÄLJAANNE

---

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS · TALLINN 1955

Moskvas Uhingu Kesklektoriumis peetud avalike loengute täiendatud ja ümbertöötatud stenogramm

Originaali tiitel:

Лауреат Сталинской премии  
доктор технических наук  
В. П. Ромадин

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Издательство «Знание»  
Москва 1955

Tõlkinud H. Riikoja

2

Tartu Riikliku Ülikooli  
Raamatukogu  
30380

## Esimene loeng

### SISSEJUHATUS

Aatomienergia ja selle praktiliselt rakendatavate vabastusviiside avastamine on inimkonna üheks kõige tähelepanuväärsemaks teaduslikuks saavutuseks. Aatomienergia kasutamine rahulikel eesmärkidel laiendab piiritult inimese võimu loodusjõudude üle ja avab kolossaalsed võimalused tootlike jõudude kasvuks ning ühiskondliku rikkuse suurenemiseks.

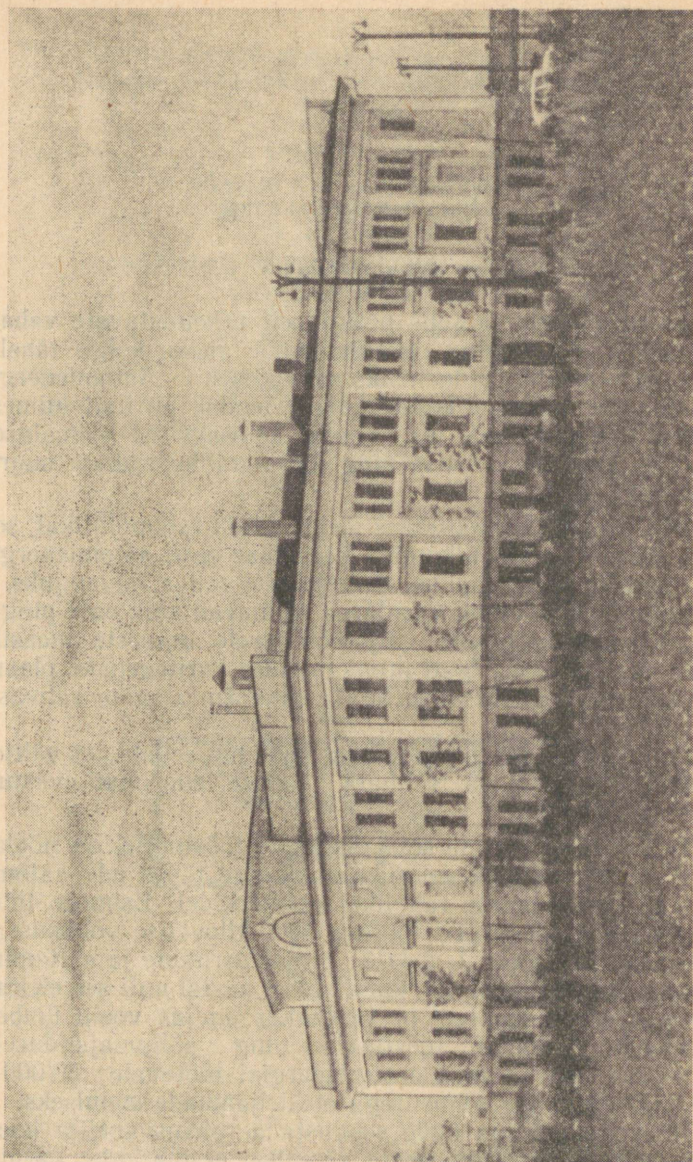
Nõukogude Liit, teostades järjekindlalt rahupoliitikat, seisab aatomi- ja vesinikurelva keelamise eest, aatomienergia kasutamise eest rahulikel eesmärkidel rahva hüvanguks.

Rahu ja inimkonna vaenlased suunavad kõik oma pingutused aatomivahendite väljatöötamisele inimeste massiliseks hävitamiseks, igati propageerides kuritegelikke plaane aatomirelva rakendamise kohta rahuarmastavate rahvaste vastu.

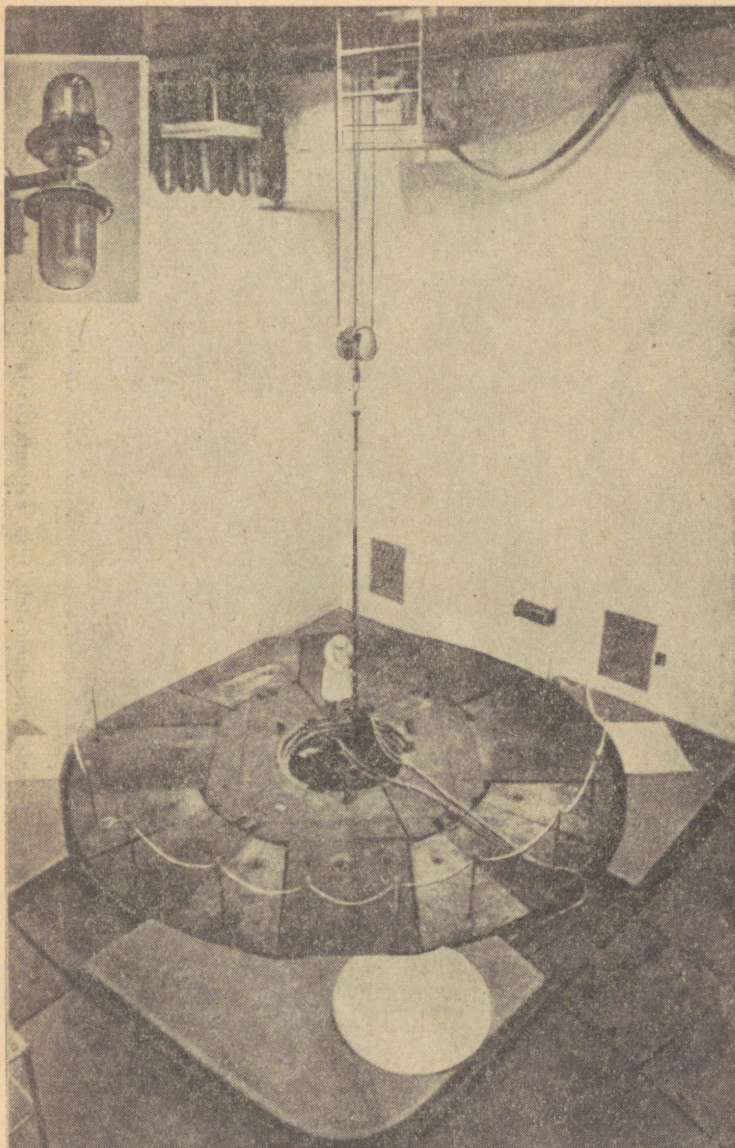
Kogu progressiivne inimkond koondub selleks, et vältida aatomisõja ohtu ja suunata teaduse suurimat avastust rahvaste õnneks.

Tuginedes võimsale sotsialistlikule tööstusele, on nõukogude teadlased ja insenerid saavutanud tõsist edu aatomienergia kasutamises rahulikel eesmärkidel. Esimese tööstusliku, aatomienergial töötava 5000-kilovatise võimsusega elektriijaama (joon. 1, 2 ja 3) projekteerimine ja ehitamine lõpetati edukalt ning 27. juunil 1954. aastal anti see elektriijaam eksploatatsiooni ja ta hakkas andma voolu ümberkaudsete rajoonide tööstusele ning põllumajandusele. Praegu toimuvad tööd aatomienergial töötavate 50 000—100 000-kilovatise võimsusega elektriijaamade loomiseks.

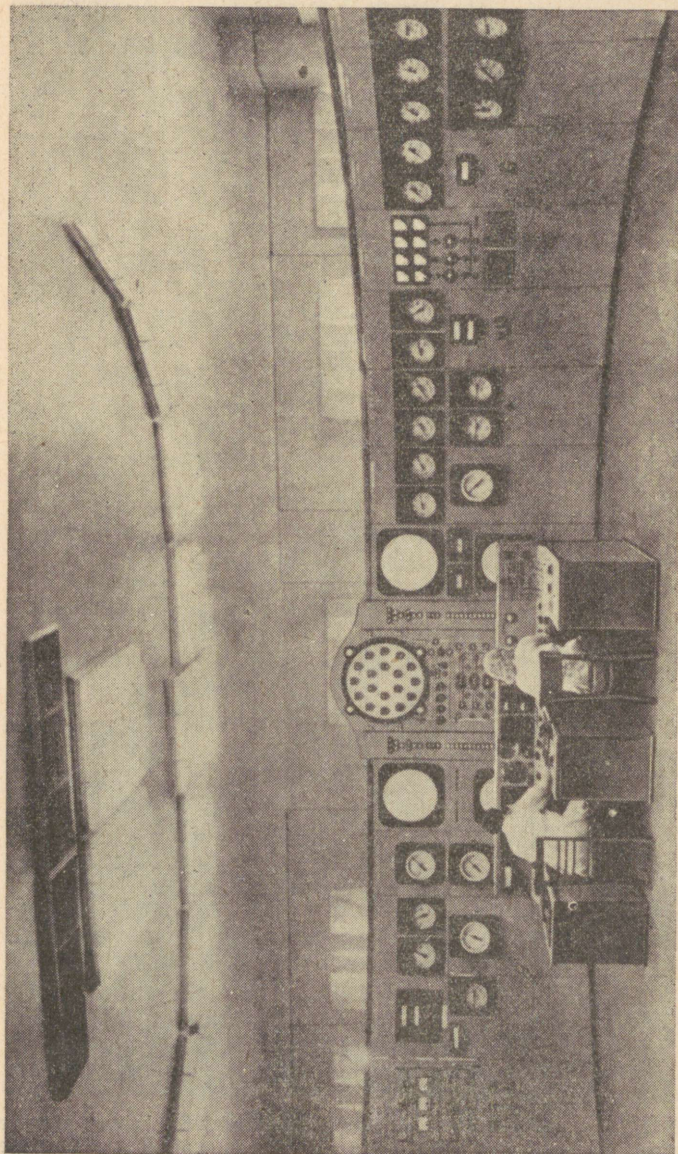
Nõukogude Liidu püüe soodustada rahvusvahelise koostöö arengut aatomienergia rahulikel eesmärkidel kasutamise alal leidis ilmekat väljendust NSV Liidu valitsuse



Joon. 1. NSV Liidu Teaduste Akadeemia aatomelektrijaama hoone.



Joon. 2. Aatomikatel (reaktor), mis on paigutatud NSV Liidu Teaduste Akadeemia aatomielektrijaama hoonesse. Nagu nähtub aatomikatla ülemise osa läbimõõdust, on tema mõõtmed väikesed; aatomikatel paikneb paksu betoonkihi taga, mis kaitseb jaama personali radioaktiivse kiirguse toime eest.



Joon. 3. NSV Liidu Teaduste Akadeemia aatomielekttriiaama aatomikattla ja teiste agregaatide juhtimiseks määratud juhtimispuul.

valmisolekus anda edasi Nõukogude Liidus kogunenud teaduslik-tehnilised kogemused ja teha ettekanne esimese tööstusliku aatomienergia jaama ning selle töö kohta aatomienergia rahulikel otstarbeil kasutamise küsimustes toimunud rahvusvahelisel teaduslik-tehnilisel konverentsil, mis kutsuti kokku käesoleval aastal Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni Peaassamblee 9. istungjärgu otsusel. Samuti võttis meie valitsus vastu otsuse osutada reale maadele teaduslik-tehnilist ja tööstuslikku abi uurimistööde arendamisel aatomienergia kasutamise alal rahulikel eesmärkidel, eriti eksperimentaalsete aatomikatelde ning elementaarosakeste kiirendajate projekteerimisel ja ehitamisel.

Nõukogude teadlased ja insenerid loevad oma tähtsaimaks ülesandeks saavutada seda, et aatomienergia antaks rahuliku ülesehitustöö teenistusse, et teda kasutataks võimsa jõuna, mis aitab kaasa kommunistliku ühiskonna kiiremale ülesehitamisele.

Aatomienergia avab uue ajastu energeetika arengus. Ja me võime olla uhked sellele, et esmakordne aatomienergia rahulik kasutamine tööstuslikus mastaabis kuulub nõukogude teadlastele ja inseneridele.

Iga nõukogude inimese soov teada saada, kuidas on ehitatud ja kuidas töötab maailma esimene tööstuslik aatomienergiajaam, on täiesti loomulik. Ehkki üksikasju selle jaama ehituse kohta pole veel avaldatud, võimaldavad teaduslikus kirjanduses leiduvad materjalid siiski jutustada niisuguste seadmete tegutsemise üldistest põhimõtetest ja ka kaalutleda aatomienergiajaamade võimalikke skeeme ning mõningaid tehnilis-majanduslikke küsimusi.

Käesolev loeng on põhiliselt pühendatud aatomienergia soojus- ja elektrienergia tootmise eesmärgil ehk, nagu öeldakse, energeetilistel eesmärkidel kasutamise probleemile.

Insenerilisest seisukohast tähendab aatomienergia (tuumaenergia) kasutamine uut liiki kütuste rakendamist energeetikas. Selle mõiste täpsustamisega me oma loengut alustamegi.

## TUUMAKÜTUS

Mistahes elemendi aatom koosneb positiivselt laetud tuumast ja negatiivselt laetud elektronidest. Aatomi tuum omakorda on üles ehitatud kahte liiki elementaarosakestest — neutronitest ja prootonitest. Prootonid on positiivselt lae-

tud osakesed; tuuma positiivsete laengute summa võrdub aatomi elektronkesta negatiivsete laengute summaga. See tõttu on aatom tervikuna tavalistel tingimustel elektriliselt neutraalne. Prootonite arv määrab ära elemendi aatomnumbri ja järelikult ka tema keemilised omadused. Neutronid ei kannu elektrilaengut; nende mass on lähedane prootoni massile.

Iga elemendi aatomi tuuma saab iseloomustada kahe suurusega — tuuma laenguga (aatomnumbriga), mis võrdub prootonite arvuga tuumas, ja prootonite ning neutronite arvu summaga võrduva massiarvuga. Antud elemendi kõigil aatomitel on prootonite arv tuumas ühesugune, neutronite arv aga võib ühe ja sellesama elemendi aatomite tuumades olla mitmesugune. Nagu teada, nimetatakse ühe ja sellesama elemendi teisendeid, mis erinevad omavahel neutronite arvu poolest tuumades, isotoopideks.

Energia varud on aatomis jagunenud väga ebaühtlaselt. Põhiliselt on nad seotud tuuma energiaga ja ainult tühisel määral elektronkesta energeetiliste tagavaradega.

Tavalist liiki kütuste põlemise käigus toimuvad keemilised reaktsioonid, kusjuures energia vabanemine on seotud aatomite elektronkestade ümberkujundumisega. Sel teel energia saamiseks tarvitatakse orgaanilisi kütuseid: sütt, naftat, gaasi, põletuspuid.

Kuni viimase ajani ei osatud tuumareaktsioonide energiat kasutada. Alles suhteliselt lühikest aega tagasi leiti viisid tuumareaktsioonidel vabaneva energia kasutamiseks. Kui räägitakse «aatomienergiast», siis mõeldakse just seda tuumaprotsesside energiat; elektronprotsesside energia on sellega võrreldes tühiselt väike.

Tuumareaktsioonidest, milledega kaasneb suurte energiahulkade vabanemine, kasutatakse eelkõige mõnede raskete aatomite tuumade jaotumise ahelreaktsioone. Elementid, mis on võimelised jaotuma, kannavad jaotuvate ehk lõhustuvate materjalide nimetust. Just nemad kujutavadki endast uut liiki kütuseid — tuumakütuseid.

Tänapäeval on ainukeseks looduslikuks lõhustuvaks materjaliks, mis rahuldab ka energeetika nõudeid, uraan 235 ( $U^{235}$ ). Selle isotoobi tuum sisaldab 92 prootonit ja 143 neutronit. Uraanis 235 saab toimuda end ise toetav tuuma jaotumise ahelreaktsioon, s. o. pidev, protsessi intensiivsuse reguleerimist võimaldav energia vabanemine, mis on

tuumakütuse energeetilise kasutamise peamiseks tingimuseks.

Looduslik uraan, s. o. uraan, mida saadakse maakidest, kujutab enesest segu kolmest isotoobist:  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  ja  $U^{234}$ . Uraani 234 sisaldus on tühine (0,006%); uraani 235 leidub 0,712%, ülejäänud koguse (99,282%) aga moodustab uraan 238.

Et energia saamine nõuab küllaldast lõhustuvate materjalide varu, siis kerkis tuumaenergia kasutamise teele esimese ülesandena vajalikus koguses uraani 235 eraldamine enam-vähem puhtal kujul. Käesoleval ajal toimub see keerukas operatsioon peamiselt nn. difusioonitehastes, kus uraani 235 lahutamine uraanist 238 toimub gaasilise uraanheksafluoriidi suurest hulgast üliõhukestest poorsetest (150 000 ava 1 cm<sup>2</sup> kohta) filtritest läbi laskmise teel. Kergemat uraani 235 sisaldavad gaasimolekulid läbivad niisuguseid filtreid kiiremini kui uraani 238 sisaldavad molekulid. Selle operatsiooni paljukordsel kordamisel (umbes 4000 korda) võib saada peaaegu puhast uraani 235.

Kui poleks leitud meetodeid tehislake tuumakütuste saamiseks looduslikest uraani ja tooriumi varudest, siis oleks tuumaenergia tööstusliku kasutamise probleem loodusliku uraani 235 väikese koguse tõttu olnud perspektiivitu. Tehsilikeks tuumakütusteks on praegu plutoonium 239, mis moodustub uraanist 238, ja uraan 233, mida saadakse tooriumist 232.

Kõik need tuumakütuse liigid omavad enam-vähem võrdsed kütteväärtuse näitajaid. Kõige tõenäolisemaks lähemas tulevikus praktiliselt kasutatavaks kütuseks on uraani 238 segu uraaniga 235. Missugused on siis selle kütuse füüsikalised omadused?

Uraan on hele metall, pehmem kui teras, kuid raske — tema erikaal on 18,95. Ta on hõlpsasti mehaaniliselt töödeldav, sepiatav ja traadiks tõmmatav.

Uraan pole haruldane metall. Maa koostes sisaldub teda umbes niisama palju kui vaske; uraani leidub rohkem kui hõbedat, elavhõbedat või joodi; teda on tuhat korda rohkem kui kulda.

Uraan on väga aktiivne hapniku suhtes. Toatemperatuuril on ta püsikindel, kuid juba 100° juures ja üle selle süttib ta hõlpsasti ning põleb ära. Uraani sulamistemperatuur inertses gaasis on 1130°.

Uraani põlemisel tekib iga gramm-molekuli (mooli)

hapniku kohta 256 kilokalorit (kcal) soojust; tooriumi põlemisel võrdub tooriumoksuüdi moodustumise soojus 330 kilokaloriga mooli kohta; söe põlemisel on süsihappegaasi moodustumise soojus umbes 94 kcal/mool. Kui taandada tekkiv soojus kütuse kaaluühikule, siis vabaneb 1 kg süsiniku kohta 7850 kcal, 1 kg uraani kohta aga 1075 kcal soojust. Seega tuleb uraani, kui teda vaadelda keemilise kütusena, lugeda madalasordiliseks kütuseks.

Uraani, tooriumi ja teiste tuumakütusena kasutatavate elementide tuumad osutuvad mittepüsikindlateks (radioaktiivseteks) ja lagunevad iseenesest erisuguse kiirusega. Tuumade püsikindlust iseloomustatakse nende poolestusperioodiga, s. o. ajavahemikuga, mille vältel laguneb tuumade olemasolevast kogusest pool. Kõige püsikindlamad on toorium poolestusperioodiga 13,9 miljardit aastat, uraan 238 poolestusperioodiga 4,5 miljardit aastat ja uraan 235 poolestusperioodiga 710 miljonit aastat.

Tehiskütused on vähem püsikindlad ja omavad seetõttu looduslike isotoopidega võrreldes suhteliselt väikest poolestusperioodi: plutooniumil 239 moodustab see 24 000 aastat, uraanil 233 aga 163 000 aastat.

Et tehiskütuste saamiseks on leitud uraani 238 ja tooriumi 232 peaaegu täielikult ära kasutatavad meetodid, siis toimub lõhustuvatest elementidest tuumaenergia saamise võimaluste arvutamine tavaliselt uraani ja tooriumi varude järgi. Enamik autoreid on ühisel arvamusel selles suhtes, et tuumaenergia varud ületavad kõigi orgaaniliste kütuste energia varu. Tabelis 1 on toodud andmed, milledest järeldub, et kogu energia varu tuumakütustes ületab 22-kordselt kõigi orgaaniliste kütuste energia varud. Teiste allikate järgi on energia varud uraanis ja tooriumis vähemalt 10 korda väiksemad.

Kui pidada silmas, et maailma aastast energia vajadust, kaasa arvatud ka transpordiseadmete vajadused, hinnatakse praegu 3000 miljardile kWh-le, siis piisab uraani ja tooriumi varudest nende ärakasutamisel 25-protsendilise kasuteguriga 43 000 aastaks  $[(0,25 \cdot 519 \cdot 10^{15}) : (3 \cdot 10^{12})]$ .

Söe varud lõpevad niisama intensiivse tarbimise puhul 1760 ja nafta varud 185 aasta pärast. Tegelikult aga, arvestades energeetiliste seadmete ja teiste mitmekesiste kütuse tarbijate arvu pidevat kasvu, annab end nafta varude kokkukuivamine teravasti tunda juba 25—50 aasta ja söe nappus 300—400 aasta pärast.

Mitmesugust liiki kütuste maailma energeetilised ressursid  
(Power Engineering, märts 1954. a.)

Kütuse nimetus	Maailma varud	Energia-sisaldus
Nafta . . . . .	$197 \cdot 10^9 \text{ m}^3$	$2,22 \cdot 10^{15} \text{ kWh}$
Looduslik gaas . . . . .	$15,85 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$	$0,17 \cdot 10^{15} \text{ „}$
Süsi . . . . .	$3482 \cdot 10^9 \text{ t}$	$21,1 \cdot 10^{15} \text{ „}$
Uraan+toorium . . . . .	$26 \cdot 10^6 \text{ t}$	$519 \cdot 10^{15} \text{ „}$
Aasta vältel Maale langev päikese-energia . . . . .		$1500 \cdot 10^{15} \text{ „}$

Tabelis 1 toodud andmete vaatlemisel tõmbab enesele tähelepanu energia kogus, mis siirdub Maale päikesekiirgusena. See on, nagu nähtub, hiiglasuur; selle energia aastane kogus ületab peaaegu 2,75 korda kõik energia varud tuuma- ja orgaanilistes kütustes.

Tuumakütuseid nagu mistahes teistki liiki kütuseid võib iseloomustada nende kütteväärtuse abil. Vaatame, kui suur on tuumakütuste kütteväärtus ja kuidas seda saab määrata.

Tavaliste kütuste kütteväärtuse hindamisel mõõdetakse soojushulk, mis saadakse 1 kg kütuse põletamisel. Seda soojushulka nimetatakse kütuse kütteväärtuseks ehk täpsemalt põlemissoojuseks. 1 kg nafta täielikul ärapõlemisel näiteks vabaneb umbes 10 000 kcal soojust. Seda suurust nimetataksegi nafta kütteväärtuseks. Tuumakütuste kütteväärtust on otstarbekam väljendada kilovatt-tundides (1 kWh on samaväärne 860 kilokaloriga).

Nafta kütteväärtus väljendatuna kilovatt-tundides moodustab 11,6 kWh/kg. Kõrgeväärtuslikel sütel, mille kütteväärtus on näiteks 7000 kcal/kg, on see väärtus 8,14 kWh/kg, moskvalähisel sõel (2540 kcal/kg) — 2,95 kWh/kg jne.

Vaatame nüüd, kui suur on tuumakütuste kütteväärtus.

1905. aastal avastas saksa füüsik Einstein massi ja energia võrdväärsuse seaduse, mis väljendub väga lihtsa valemiga:  $E = m \cdot c^2$ , kus  $m$  on keha mass ja  $c$  valguse kiirus.

Vastavalt sellele seadusele kaasneb keha energia iga muutumisega vastav massi muutumine. Tavalistel keemilistel põlemisreaktsioonidel pole reageerivate ainete massi muutumist praktiliselt võimalik tähele panna. See seletub asjaoluga, et vabanev energia kogus on väga väike ja seetõttu on tühine ka massi muutumine. Näiteks katla töötamisel, kui katla aurutoodang on 230 t tunnis, kütuse kulu 35 t ja õhu kulu 350 t, moodustab energia vabanemisega seotud massi muutumine kokku ainult umbes 0,0075 g. On arusaadav, et seda massi muutumist pole antud kütuse ja õhu kulu puhul võimalik märgata.

Massi ja energia võrdväarsuse seadus ilmneb aga selgesti tuumaprotsessides, mida iseloomustab tuumade energiaetiliste seisundite järsk muutumine ja nende massi märgatav muutumine. Selle seaduse alusel saab arvutada tuumakütuste kütteväärtust. Võrrandist  $E = m \cdot c^2$  järeldub, et  $m = 1$  kg puhul on  $E$  väärtus võrdne 25 miljardi kilovatt-tunniga. See tohutu suur väärtus on nagu 1 kg aine «soojusväärtuse» ülempiiriks.

Oletame nüüd, et aine massi muutus tuumamuunduste tulemusel on  $M_1 - M_2$  (kus  $M_1$  ja  $M_2$  on aine mass enne ja pärast tuumareaktsioone). Suhteline massimuutus  $\Delta m$  on siis  $\frac{M_1 - M_2}{M_1}$ .

Arvestades massi ja energia võrdväarsuse seadust, saame tuumakütuste kütteväärtuse  $Q$  määramiseks järgneva lihtsa avaldise:

$$Q = 25 \cdot 10^9 \cdot \Delta m = 25 \cdot 10^9 \frac{M_1 - M_2}{M_1} \text{ (kWh/kg)}.$$

Seega on tuumakütuste kütteväärtuse määramiseks vaja teada nende suhtelist massimuutust tuumaprotsessides.

Uraani 235 tuumade jaotamise katsetega on kindlaks tehtud, et  $\Delta m = 0,914 \cdot 10^{-3}$ , s. t. suhteline massimuutus võrdub ligikaudu ühe tuhandikuga. Uraani 235 kütteväärtus tuumareaktsioonide rakendamisel peab moodustama 22,9 miljonit kWh/kg (vastavalt eespool toodud valemile  $Q$  arvutamiseks).

Kui võrrelda uraani kõrgeväärtusliku kütusega, mille kütteväärtus on näiteks 8 kWh/kg, siis on näha, et kütusega on uraan peaaegu 3 miljonit korda tõhusam.

Tutvume nüüd veidi lähemalt nähtustega, mis esinevad uraanituumade jaotumisel, ja püüame vastata küsimusele: missugune on seejuures saadava energia olemus.

## URAAITUUMADE JAOTUMISE ENERGIA OLEMUS

Nagu mainitud, on ainukeseks looduslikuks tuumakütteks uraan 235. Selle isotoobi tuum koosneb 235 osakesest (92 prootonist ja 143 neutronist). 92 ühenimeliselt laetud prootoni paiknemist üliväikese ruumalaga tuumas (uraanituuma läbimõõt on  $18,5 \cdot 10^{-13}$  cm) saab seletada ainult mingisuguste eriliste jõudude olemasoluga, mis on võimelised avaldama vastupanu prootonite laengute vahel mõjuvatele elektrilistele tõukejõududele. Niisugusteks jõududeks on nõndanimetatud tuumajõud. Nende jõudude suuruse üle saab otsustada tuumaaaine tiheduse järgi. Selgub, et see tihedus on suurusjärgus  $10^{14}$  t/m<sup>3</sup> (sada tuhat miljardit tonni ühes kuupmeetris). Kui niisuguse tihedusega ainet valmistada postmark, siis kaaluks see umbes 5 miljonit tonni. See arv annab teatava ettekujutuse tuumaaaine tihedusest ja tuumajõudude ebatavalisusest.

Suur hulk positiivselt laetud prootoneid muudab uraanituuma ebastabiilseks. Kui niisugusesse tuuma satub väljastpoolt neutron, siis jaotub tuum kaheks osaks (nõndanimetatud kildudeks), mille massiarvud on kõige sagedamini 95 (strontsium) ja 139 (ksenoon); seejuures vabanevad kaks neutronit. Tuuma jaotumisel võivad tekkida ka teised elemendid, kuid alati moodustuvad seejuures kaks või kolm neutronit. Keskmiselt tekib ühe uraanituuma jaotumisel 2,5 neutronit (olgu tähendatud, et tehiskütuse plutoonium 239 tuumade lagunemisel moodustuvad ühe jaotuva tuuma kohta keskmiselt kolm neutronit).

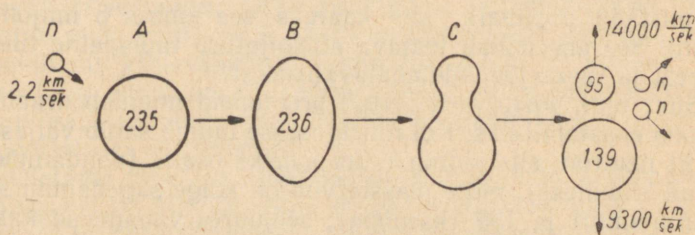
Uraan 235 (ja samuti ka plutoonium 239) on võimeline jaotuma niihästi kiirete neutronite toimetel, mille kiirus on umbes 10 000 km/sek, kui ka aeglaste neutronite toimetel, mille kiirus on umbes 2,2 km/sek (nn. soojuslikud neutronid). Aeglaste (soojuslike) neutronite haaramine uraani 235 poolt toimub aga palju intensiivsemalt ja on seetõttu palju tõenäolisem kui kiirete neutronite haaramine. Seepärast kasutatakse energeetilistes seadmetes (reaktorites), milledes toimub uraani 235 tuumade jaotumine, erilisi aeglustajaid, mis on määratud neutronite esialgse suure kiiruse vähendamiseks soojuslike neutronite kiiruseni.

Mis siis toimub tuumas neutroni neelamisel tema poolt ja miks põhjustab see tuuma lagunemist?

Kujutleme tuuma enne reaktsiooni kerakujulise tilgana (joon. 4, A). Neutron kui elektrilaengut mitte omav osake

saab takistamatult läheneda tuumale, kohtamata vastutoimet prootonite elektriliste jõudude poolt. Kokkupuutel tuumaga neutron neeldub. Seejuures saab tuum tunduva koguse energiat (kui iga tuum, mis sisaldub 1-kilogrammises masiga uraani 235 tükis, neelab neutroni, siis moodustab kogu saadud energia 670 miljonit kcal). Selle lisaenergia ilmumine tuuma nagu vastaks tema kuumutamisele miljardite kraadideni. Energia suurenemine viib tuuma tugevasti ergastatud seisundisse, mis põhjustab tema kuju muutumist.

Mitte eriti suure deformatsiooni puhul, näiteks olles veidi lamenenud (joon. 4, B), pöörduv tuum tuumajõudude mõjul



Joon. 4. Uraani 235 tuuma jaotumise skeem.

oma esialgsesse kerajasse kujusse tagasi, vabastades ühel või teisel teel energia liia. Tuumade püsikindlus säilib seejuures täielikult. Kui aga ergastatud tuuma kuju on muutunud seisundini, mis on näidatud joonisel 4, C, siis hakkavad avalduma elektrilised mõjud, mis deformeerivad tuuma ülemisse ja alumisse ossa koondunud prootonite vahel. Need tõukejõud ületavad nüüd tuuma tõmbejõud ja tuum rebeneb kaheks osaks.

Katselisel teel saadud andmed näitavad, et jaotumisel moodustub ühest kilogrammist uraanist 235 0,989 kg mitmesugust liiki kilde ja umbes 10 g neutroneid. Ülejäänud mass (peaaegu 1 g) on seotud seejuures vabaneva energiaga.

Uraani 235 tuuma poolt neutroni neelamisel saadud energia on seega aktivisatsioonienegiaks (mille väärtus moodustab 3,4% uraani kogu kütteväärtusest), mis võimaldab jaotumisreaktsiooni teostumist. Tuumaprotsesside puhul on aktivisatsioonienegia niisiis energia, mis viib keraja tuuma

jaotumisele eelnevasse mittepüsikindlasse seisundisse (joon. 4, C).

Tuuma jaotumisel vabaneb enne seda tuumajõududega aheldatud elektriliste tõukejõudude potentsiaalne energia, mis põhiliselt muundub kildude kineetiliseks energiaks. Uraanituuma lagunemisel saavutab väike kild, mille massiarv on näiteks 95 (strontsium) ja mis omab 38 prootonit, elektriliste jõudude mõjul kiiruse 14 000 km/sek, kuna raske kild massiarvuga 139 (ksenoon), mis omab 54 prootonit, saavutab kiiruse 9300 km/sek.

Tuumakildude kineetiline energia, mis moodustab 81% reaktsiooni koguenergiast, tingibki uraani kui tuumakütuse kütteväärtuse põhiosa. Seda osakeste energiat saab hinnata temperatuuriskaalaga. Suurima energiaga osakeste kineetiline energia vastab temperatuurile umbes 450 miljardit kraadi.

Uraani 235 tuumade jaotumisel esineb väga oluline nähtus. Nagu eespool tähendatud, moodustuvad uraani 235 tuuma jaotumisel peale kildude ka vabad neutronid (keskmiselt 2,5 neutronit ühe jaotuva tuuma kohta ehk 10 g kilogrammi uraani kohta). Jaotumisel moodustuvate neutronite kiirus on ligikaudu 10 000 km/sek, s. t. eralduvad neutronid kuuluvad kiirete klassi. Need neutronid omakorda neelduvad teistes tuumades, mis põhjustab viimaste jaotumist ja uute neutronite vabanemist jne. See muunduste tsükkel kannab tuuma ahelreaktsiooni nimetust. Kui niisugune reaktsioon areneb laviinitaoliselt, põhjustab ta kütuse plahvatust. Sellel põhimõttel on ehitatud aatomipommid.

See nähtus võib aga kulgeda ka teisiti. Jaotumise ahelreaktsiooni on võimalik reguleerida nii, et igas sekundis jaotuks ainult teatav arv tuumi, mis vastab seadme teatavale võimsusele. Kui näiteks sekundis toimub 31 000 miljardit jaotumist, siis võrdub arendatav võimsus ühe kilovatiga. Ennast ise toetava, püsiva võimsusega reaktsiooni jaoks vajalik tingimus seisab selles, et tuumad, mis haaravad neutroneid ja jaotuvad, annaksid keskmiselt (välja arvatud kõik neutronite kaod) igaüks ühe sekundaarse neutroni, tagades sel teel vastava arvu uute tuumade jaotumise. Niisiis, kui neutronite arv jääb mingi ajavahemiku vältel muutumatuks, siis ka arendatav võimsus jääb konstantseks. Kui aga mingil ajahetkel haaratud neutronite arv osutub kas või natukenegi suuremaks kui selle eel jaotunud tuumade arv, siis hakkab seadme võimsus pidevalt suure-

nema. Kui näiteks haaratud neutronite arv suureneb 0,5% võrra võrreldes selle eel jaotunud tuumade arvuga, siis suureneb neutronite arv ühe sekundiga peaaegu 150 korda. Samal määral suureneb ka seadme võimsus. Et tagada jäävat võimsuse taset, on vaja leida meetod neutronite paljunemise protsessi juhtimiseks.

Tegevate neutronite arvu piiramine saavutatakse eriliste neelajate kasutamisega; seadmete projekteerimisel arvestatakse ka neutronite väljalendamise võimalust. Energeetilistes seadmetes tagatakse seega tuumaprotsesside juhtimine ja reguleeritakse sellega ka arendatava võimsuse suurust.

Vastandina sellele kujutavad aatomipommid enesest seadmeid, milledes kiirete neutronite toimel tekivad uraanis 235 või plutooniumis 239 mittekontrollitavad tuuma ahelreaktsioonid, mis panevad tuumakütuse lagunema miljondike sekundite jooksul, tekitades plahvatuse.

Jaotumise käigus muundub tuumade energia peamiselt kildude kineetiliseks energiaks, mis seejärel antakse väga kiiresti üle ümbritsevatele (peamiselt uraani enese) aatomitele ja molekulidele, mille tagajärjel keskkonna (uraani) temperatuur kiiresti tõuseb. Selle protsessi mehhanism ei erine kvalitatiivselt tavalisest keemilisest põlemisprotsessist. Suur on ainult kvantitatiivne erinevus. On aga täiesti ilmne, et tuumaenergia kasutamise probleemile tuleb vaadata (vähemalt lähemas tulevikus) kui jaotumisel tekkivate kildude kineetilise energia (soojusenergia) ärakasutamise probleemile. Aatomijaamad peavad järelikult olema soojuslikku tüüpi jaamad. See on üks tähtsamaid aatomienergia vabastamisel kulgevate protsesside olemusest tulenevaid järeldusi.

Tuumakütuste kasutamisel tuleb silmas pidada nende väga olulist omapära, nimelt tuumareaktsioonidel tekkivaid radioaktiivsuse nähtusi. Tuumade lagunemise ja ümberkujunemisega kaasneb kalkide gammakiirte ja suure hulga neutronite väljapaiskumine. Elusorganismi sattudes võivad nii ühed kui ka teised avaldada hävitavat mõju.

Suure koguse neutronite organismi sattumisel ilmneb tingitud radioaktiivsus, mille põhjuseks võib olla näiteks organismis alati esineva naatriumi radioaktiivsus. Seetõttu omavad tuumakütuse kasutamisel alati esmajärgulist tähtsust ohutustehnika küsimused ja eelkõige personali kaitsmine neutronite ning gammakiirte suurte voogude eest.

Teeme väikese kokkuvõtte.

Tuumakütustena võib praegu mainida uraani 235, plutooniumi 239 ja uraani 233. Kõiki neid iseloomustab väga suur vabanev energia: umbes 23 miljonit kWh ehk 20 miljardit kcal lõhustuva kütuse ühe kilogrammi kohta.

Energia vabanemine nende uut liiki kütuste kasutamisel toimub ilma kõrvalallikate osavõtuta. Energia vabanemise protsess võib nende elementide tuumade jaotumise ahelreaktsiooni tekkimise tagajärjel olla ennast ise toetav.

Vabanev tuumaenergia avaldub põhiliselt kildude kineetilise (soojuслиku) energiana, mis kandub kiiresti üle ümbritsevate ainete aatomitele ja molekulidele.

\* \*  
\*

Seni oli juttu protsessidest, mis kulgevad raskete elementide, eriti lõhustuvate materjalide klassi kuuluvate elementide tuumade jaotumisel. Kuid esineb ka teistsuguseid protsesse, millede käigus võib vabaneda tuumaenergia. Need on kergete tuumade ühinemise (sünteesi) protsessid, eriti tuumareaktsioonid vesiniku, liitiumi ja teiste kergete elementide osavõtul. Niisuguste, kergete elementide tuumadega toimuvate reaktsioonide omapäraks on nende tuumade väga tugeva ergastamise vajadus. Teisiti öeldes, reaktsioonid saavad kulgeda ainult väga kõrgel, miljonitesse kraadidesse ulatuval temperatuuril (tänapäeval tekivad niisugused temperatuurid lõhustuvate kütuste plahvatamisel). Seetõttu nimetatakse niisuguseid reaktsioone termotuuma-reaktsioonideks.

Termotuuma-reaktsioonidel vabaneb reageerivate ainete kaaluühiku kohta veel rohkem energiat kui tuumade jaotumisel.

Näitena olgu tähendatud, et vesinikutuumadest heeliumituumade moodustumise termotuuma-reaktsioonil vabaneb üle 150 miljardi kcal/kg. Nagu nähtub, on vesiniku kütteväärtus tuumaprotsessidel peaaegu 8 korda suurem uraani kütteväärtusest.

Kui lõhata 1 kg niisugust vesinikkütust mäe all, mille aluse pindala on 1 km<sup>2</sup> ja kõrgus 1 km, siis lendab niisugune 1 miljard tonni kaaluv mägi (eeldusel, et mäel on püramiidi kuju) plahvatuse energia täieliku ärakasutamise puhul 65 m kõrgusele.

Vesiniku rakendamine tuumakütusena ongi vesinikupomide loomise mõtte aluseks. Reageeriva ainenäga ei kasutata tavalist kerget vesinikku, vaid tema isotoope: deuteriumi ( $H^2$ ) ja tritiumi ( $H^3$ ). Reaktsioon nende vesiniku isotoopide vahel kutsutakse esile tuumakütuse — uraani 235 või plutooniumi 239 — plahvatusel saadavate kõrgete (mitme miljoni kraadini ulatuvate) temperatuuride abil.

Käesoleva peatüki lõpus jutustame, kuidugi väga lühidalt, looduslikest protsessidest, millede kulgemine on seotud tuumamuundustega.

Tänapäeval on leidnud üldist tunnustamist vaade, mille järgi Päikese kiirgusenergia vabaneb termotuumareaktsioonide tulemusel, mis kulgevad Päikese sisemuses süsiniku osavõtul (nn. süsinikutsükkel). Süsinik taastub reaktsiooni lõpul ja osutub nagu protsessi katalüsaatoriks, neli vesiniku-aatomi tuuma äga ühinevad heeliumiaatomi tuumaks. Selle termotuumareaktsiooni energeetiline efekt, nagu juba märgitud, on hiiglasuur. Päikese keskmises ulatuses temperatuur umbes 20 miljoni kraadini, aine tihedus äga on 110 korda suurem vee tihedusest (mis vastab rõhule 8 miljardit atmosfääri). Neis tingimustes kulgevad heeliumi moodustumise reaktsioonid suure intensiivsusega. Need reaktsioonid ongi Päikese poolt miljardite aastate vältel kiiratava hiiglasuure energia allikaks.

Igas sekundis muundub Päikesel 564 miljonit tonni vesinikku 560 miljoniks tonniks heeliumiks, mistõttu Päikese mass väheneb 4 miljoni tonni võrra. Järelikult kaalus Päike eile peaaegu 360 miljardit tonni rohkem kui täna. Ei ole äga siiski vaja karta, et Päike oma varude niisuguse pillamise juures varsti «kustub». Päikese mass on niivõrd suur, et mainitud kiirgamisintensiivsuse puhul kaotab Päike 15 miljardi aastaga kõigest umbes ühe tuhandiku oma kaalust.

Tuumaprotsessid kulgevad ka tähtedel. Mõnedel juhtudel äga toimub aatomienergia vabanemine teisiti kui Päikesel. Mõnikord energia varud salvestuvad tähe sisemusse, vabanedes sealt teatavate ajavahemike tagant. See põhjustab tuumaenergia vabanemise pulseerimist ja täht näib meile muutlikuna, s. o. tema heledus muutub perioodiliselt.

Kui energia salvestumine toimub suurtes kogustes, kuid mitte väga suurtes sügavustes, siis vabaneb tuumaenergia plahvatusena, mille tulemusel tähe kest eraldub ja hajub ümbritsevasse ruumi. Sellisel juhul «uueks» nimetatava tähe

niisuguse süttimise puhul vabaneb energia, mille meie Päike kiirgab välja 10 000 — 100 000 aasta vältel. Pärast plahvatust vaibub täht jälle esialgsesse energia salvestamise seisundisse — kuni uue plahvatuseni. Taolisi nähtusi täheldatakse meie Galaktikas kord või kaks aastas.

Veelgi hiiglaslikumaks kujuneb katastroof energia salvestumisel tähe keskmesse. Sel juhul vabaneb plahvatusel veel suurem kogus energiat ja eraldub veel suurem mass. Plahvatust täheldatakse nõndanimetatud «üliuue» tähe süttimisena. Niisugused kosmilised katastroofid on kahtlemata kõige suuremad, mida inimesed on kunagi näinud. Energia, mis «üliuue» tähe plahvatusel vabaneb mõne päeva vältel, võrdub energiaga, mille Päike kiirgab välja 1 miljardi aasta vältel. «Üliuue» tähe heledus kasvab plahvatusel miljardeid kordi ja muutub võrreldavaks kõigi Galaktika tähtede koguheledusega.

Üliuute tähtede süttimist esineb väga harva. Inimkonna ajaloo kestel on niisuguseid süttimisi olnud ainult kolm (1054., 1572. ja 1604. aastal). 1054. aastal süttinud täht on nüüd taevas leitud nõrga tähena, mis asetseb vähikujulise udukogu (tähe poolt välja paisatud materia) keskmes. Täht ise omab erakordselt kõrget temperatuuri — ligikaudu 100 000 kraadi. Kiirguse intensiivsus ulatub hiiglasuure väärtuseni, olles peaaegu 1 miljon korda suurem kui Päikese kiirgus. Missuguste reaktsioonide arvel selline energia vabanemine toimub, seda tänapäeva teadus esialgu seletada ei suuda.

Praegusel ajal, mil teadlased üha rohkem kalduvad hüpoteesile Maa tekkimisest külmast tolmust (mitte aga sulanud massist), saab soojuse olemasolu maakeral seletada ainult eeldusel, et Maa soojusliku seisundi määrab põhiliselt ära energia, mis vabaneb temas sisalduvatest radioaktiivsetest ainetest.

Real juhtudel saab Maa kuumenenud kihtide energiat väga efektiivselt kasutada maa-aluse kuuma auru näol. Itaalias rakendatakse seda meetodit väga laialdaselt. Maa-põue soojuse kasutamiseks sukeldatakse vastavasse (kuni 1 km) sügavusse torud, millede kaudu kerkib üles kuum aur. Auru rõhk ulatub 15—18 atmosfäärini ja temperatuur 140—215 kraadini.

Saadud auru tarvitatakse turbiinide käitamiseks. Maa-aluse auruga töötavate jaamade koguvõimsus on umbes 250 000 kW.

## LÖHUSTUVATE MATERJALIDE TUUMAENERGIA KASUTAMINE ELEKTRIJAAMADES

**Aatomijaamade põhimõttelised skeemid.** Nagu eespool mainitud, moodustab põhilise osa (81%) lõhustuvate materjalide tuumade lagunemisel vabanevast energiast jaotumiskildude kineetiline energia. Kildude esialgne väga suur energia väheneb nende kokkupõrgetel ümbritsevate ainete aatomitega. Ümbritsevate ainete temperatuur tõuseb. Seadmeid, milledes kulgevad niisugused protsessid, nimetatakse tuumareaktoriteks (kirjanduses kasutatakse ka termineid aatomikatel, tuumakatel, uraanikatel ja lihtsalt katel või reaktor).

Reaktoris saadav soojus kantakse mingisuguse soojuskandja (gaasi, vee, vedela metalli) abil väljapoole reaktori piire ja muundatakse ühel või teisel viisil elektrienergiaks.

Vastavalt tehnoloogilistele ülesannetele võib energeetilise aatomiseadme jagada reaks osakondadeks ehk tsehhideks. Nende arv sõltub seadme skeemi keerukusest.

Kõige lihtsama skeemiga aatomijaam (joon. 5, *a*) sisaldab reaktori- (*I*), turbiini- (*IV*) ja elektritsehhi (*V*).

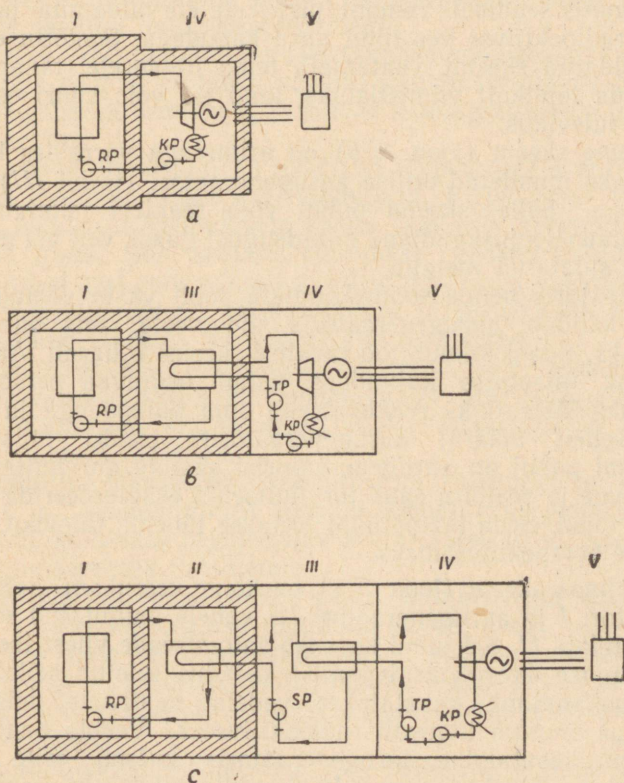
Esimeses tsehhis kandub reaktoris tuumaprotsesside tulemusel vabanev soojus üle veele, mis on jahutajaks. Kuumenedes muutub vesi auruks, mis seejärel läbib elektrigeneraatorit käitava turbiini (tsehh *IV*). Toodetav elektrienergia jaotatakse elektritsehhis *V* tarbijatele.

Aatomienergiaseadmete kirjeldatud skeem on äärmiselt lihtne ning nõuab jaama sisustamiseks minimaalseid kulusi. Soojusprotsesside seisukohast on juhtimine lihtne ja kindel.

Reaktori töö reguleerimise seisukohast aga esineb niisuguse skeemi teostamisel tõsiseid raskusi. See seletub asjaoluga, et neutronite voogude suurus ja jagunemine reaktoris sõltub oluliselt mitte ainult reguleerivate elementide paigutusest, vaid ka keskkondade füüsikaliseist seisundist reaktoris. Eriti muudab neutronite voogu temperatuuri tõusust tingitud materjali tiheduse muutumine. Iseäranis järsult muutub neutronite voog vee muundumisel auruks, mil tema tihedus (eriti madalatel rõhkudel) veega võrreldes järsult muutub. Seetõttu raskendavad reaktori soojusrežiimi muutused (mis näiteks on tingitud generaatori

koormuse muutumisest) tunduval määral tema reguleerimist.

Peale selle tuleb arvestada, et vahetult reaktorist saadav



Joon. 5. Aatomielektijaamade põhimõttelised skeemid:

a — aur tekib reaktoris I ja suunatakse vahetult turbiini IV; b — aur tekib aurugeneraatoris III reaktorist I saabuva vedeliku soojuse arvel; c — aur tekib aurugeneraatoris III soojusvahendajast II saabuva vedeliku soojuse arvel. Tähisted: I — reaktori-tsehh, II — soojusvahendajate tsehh, III — aurugeneraatorite tsehh, IV — turbiinitsehh, V — elektritsehh, RP — reaktori ring-luspump, KP — kondensaadi pump, TP — toitepump, SP — soojusvahendajate pump.

aur on tugevasti radioaktiivne ja nakatab süsteemi neid elemente, milledega ta kokku puutub. Seoses sellega osutub turbiinisaal nagu reaktorgi normaalsel ekspluatatsioonil teenindavale personalile ligipääsmatuks. Sel põhjusel peab

kogu reaktori ja turbiini juhtimine toimuma personali juurdepääsuta seadmetele, s. o. eemalt ja võimalikult kõigi protsesside täieliku automatiseerimisega. Muidugi raskeneb seejuures seadmete remont, pisirikete kõrvaldamine ja võitlus radioaktiivse vee ning auru kadudega. Seetõttu ei saa kirjeldatud skeemi, vaatamata tema lihtsusele, tänapäeval lugeda lõplikult viimistletuks, kuid tal võib suuri eeliseid olla tulevikus.

Teine skeem (joon. 5, *b*) on esimesega võrreldes keerukamaks muudetud erilise aurugeneraatori (tsehh *III*) lisamisega. Selle skeemi puhul võib reaktori jahutamiseks kasutada soojuskandjana mingisugust gaasi, vett või mõningaid sulatatud metalle.

Reaktoris nende soojuskandjate poolt vastu võetud soojus kandub aurugeneraatoris üle veele, mis muundub auruks. Edasi toimub töö tavalise skeemi kohaselt. Aalomi-jaama niisuguse kujunduse puhul osutuvad personalile juurdepääsmatuks reaktoritsehh oma pumpadega ja veidi väiksemal määral aurugeneraatorite tsehh. Niisuguse skeemi puhul on aurugeneraatorist saadav aur mitteradioaktiivne ja seetõttu saab turbiinitsehhi ekspluateerida tavalisel viisil. Seda jaamatüüpi loetakse lähema tuleviku jaoks kõige perspektiivsemaks.

Kolmas skeem (joon. 5, *c*) on kõige keerukam. Selles on reaktori *I* ja aurugeneraatori *III* vahele paigutatud soojusvahendaja *II*. Sel juhul koosneb aatomiseade viiest tsehhist. Niisuguse keerukaks tegemise vajadus seletub sellega, et soojuskandjana kasutatakse vedelat naatriumi, mis töökäigus muutub tugevalt radioaktiivseks. Vedela naatriumi vahetu kasutamine aurugeneraatoris kutsub esile auru tugeva radioaktiivsuse. Peale selle tekib oht naatriumi kokkupuutumiseks veega (see võib põhjustada aurugeneraatori lõhkemist naatriumi ja vee vahelise reaktsiooni ägeda kulgemise tõttu). Aurugeneraatori rivist välja langemine põhjustab ka reaktori purunemise, sest ta jääb sel juhul ilma jahutuseta. Seadme kaitsmiseks ongi lisatud soojusvahendaja *II*.

Reaktoritsehh ja soojusvahendajate tsehh on personalile juurdepääsmatud; ülejäänud tsehhe saab ekspluateerida tavalistes tingimustes. Mainitud jaamatüüp on ilmselt otsarbekas niinimetatud paljundavate reaktorite kasutamise puhul.

Kõigil juhtudel püütakse personalile juurdepääsmatud

ruumid paigutada maa alla, ühtlasi piirates seadmeid pak-  
sude betoonseintega. Boori lisandiga betoon neelab hästi  
neutroneid ja gammakiiri. Nagu mainitud, peab nende tseh-  
hide juhtimine toimuma eemalt ja võimalikult kõigi prot-  
sesside täieliku automatiseerimisega.

Toodud skeemide võrdlemisel tavalise soojuselektrijaama  
skeemiga selgub, et reaktoritseh, soojusvahendajate tseh  
ja aurugeneraatorite tseh osutuvad katelagregaatide tsehhi  
analoogiaks.

Skeemidel joonisel 5 on näidatud tuumaenergia ära kasu-  
tamine aurujõu tsükli rakendamisega. Kirjanduses viida-  
takse mõnikord võimalusele saada reaktoris kõrgerõhulist  
kuuma gaasi, mis seejärel juhitakse gaasiturbiinidesse.  
Käesoleval ajal pole sellised gaasiturbiini tüüpi aatomisead-  
med veel küllaldaselt välja töötatud ja seetõttu on nende  
kasutamine lähemas tulevikus vähe tõenäoline.

Niisugused on üldjoontes põhimõtteliselt võimalikud  
aatomijaamade skeemid. Läheme nüüd üle üksikasjalise-  
male tutvumisele mitmesugust tüüpi reaktoritega ja nende  
kasutamise skeemidega.

**Reaktorite põhitüübid.** Aatomijaama südameks on reak-  
tor, s. o. seade, milles teostub lõhustuvate materjalide  
tuumade jaotumise reguleeritav ahelprotsess ja sellega seo-  
tud tuumaenergia vabanemine.

Real juhtudel püstitatakse peale tuumaenergia vabasta-  
mise ja soojusenergiaks muundamise eesmärgi veel teine  
ülesanne: uute tehis-tuumakütuste — plutooniumi 239 või  
uraani 233 — tootmine. Neil juhtudel kombineerub elektri-  
jaama töö saadavaid tuumakütuseid eraldavate keemia-  
tehaste tööga.

Kasutamiseviisi seisukohast võib reaktorid jagada kolme  
rühma:

1. Reaktorid, mis töötavad küllalt puhaste või rikasta-  
tud lõhustuvate materjalidega ja on kasutatavad ainult  
soojuse või energia tootmiseks. Seda tüüpi reaktoreid nime-  
tame edaspidi puhtenergeetilisteks.

2. Reaktorid, mis töötavad loodusliku või veidi rikasta-  
tud uraaniga ja toodavad mitte ainult energiat, vaid ka  
kuluvat uraani 235 osaliselt asendavat tehis-tuumakütust.  
Neid reaktoreid nimetatakse taastootvateks reaktoriteks ehk  
reaktor-muundajateks (konverteriteks). Tooraineks on neil  
uraan 238 või toorium 232. Vahel nimetatakse niisuguseid  
reaktoreid regeneratiivseteks.

3. Reaktorid, mis töötavad puhaste või rikastatud produktidega kombineeritult uraaniga 238 või tooriumiga 232 ning on arvestatud (peale energia) tehis-tuumakütuste saamiseks suuremas koguses, kui neid töötamisel kulub. Need reaktorid kannavad paljundavate reaktorite ehk lihtsalt paljundajate (briiderite) nimetust.

Reaktori tootlikkust, tema energeetilist või soojuslikku võimsust hinnatakse tavaliselt kilovattides. Reaktori soojusliku võimsuse all mõistetakse kogu soojushulka, mis temas ühe tunni jooksul vabaneb. Kui see suurus tähistada  $Q$ -ga (kcal/h), siis on reaktori soojuslik võimsus  $W_{soojus}$  kilovattides väljendatult  $\frac{Q}{860}$ .

Aatomijaama elektrienergia toodang sõltub reaktori teatava soojusliku võimsuse puhul reaktori enese kasutegurist ( $\eta_r$ ), auruturbiinseadme kasutegurist ( $\eta_{turb}$ ) ja samuti ka kõigi teiste, reaktorit turbiiniga seostavate elementide kasutegurist  $\eta_{tr}$  (auru turbiini «transporteerivate» seadmete kasutegur). Jaama üldine, nõndanimetatud brutokasutegur on siis  $\eta_{bruto} = \eta_r \cdot \eta_{turb} \cdot \eta_{tr}$ .

Peale selle tuleb arvestada, et elektrienergia tootmisel tarbivad jaama mitmesugused mehhanismid  $a\%$  toodetavast elektrienergiast  $W_{el}$ . Seetõttu on võrku antava elektrienergia kogus

$$W_{energ} = W_{el} \cdot \left(1 - \frac{a}{100}\right) \cdot \eta_{bruto} = W_{el} \cdot \eta_{neto},$$

kus  $\eta_{neto}$  tähistab jaama netokasutegurit (s. o. kasutegurit võrku antava elektrienergia järgi);  $\eta_{neto} = \eta_{bruto} \cdot \left(1 - \frac{a}{100}\right)$ .

Kütuse kulu  $B_k$  aatomijaamas, s. o. reageeriva lõhustuva materjali kogus, saadakse reaktori soojusliku võimsuse  $W_{soojus}$  ja kütuse kütteväärtuse  $Q_k$  jagatisena; uraanil 235  $Q_k = 22,9$  miljonit kWh/kg.

Kui näiteks reaktori soojuslik võimsus on 3 miljonit kW, siis moodustab tuumakütuse kulu:

$$B_k = \frac{W_{soojus}}{Q_k} = \frac{3 \cdot 10^6}{22,9 \cdot 10^6} = 0,131 \text{ kg/h.}$$

Reaktori põhielementideks on alljärgnevad.

Reaktoris ühel või teisel viisil paiknev tuumakütus.

Aeglustaja (soojuslike neutronitega töötavates reaktorites), mis vähendab kiirete neutronite energia soojuslikuni, s. o. kiiruseni umbes 2,2 — 2,5 km/sek.

Pegeldaja, mis tagastab reaktorisse sellest välja lenda-  
vad neutronid.

Reguleerimiseseade näiteks neutroneid ahnelt neelavate,  
boori või kadmiumi sisaldavate varraste kujul. Varraste  
sukeldamisel reaktori sisse neutronite paljunemise inten-  
siivsus väheneb ja ahelreaktsioon sumbub. Nende reaktorist  
välja tõmbamisel neutronite voog taastub ja reaktsioon hak-  
kab uuesti kulgema vajaliku jõuga. On võimalikud ka  
teistsugused reguleerimismeetodid.

Torude süsteem, milles voolab jahutav vedelik, mis kan-  
nab soojust reaktorist üle seadme teistesse soojusvahen-  
dajatesse.

## Teine loeng

### LÖHUSTUVATE MATERJALIDE TUUMAENERGIA KASUTAMINE ELEKTRIJAAMADES (järg)

**Puhtenergeetiliste reaktorite kasutamine.** Kirjeldame  
kõige lihtsama, perioodiliselt tegutseva puhtenergeetilise  
reaktori ehitust. Niisuguse reaktori põhiliseks konstruktsi-  
oonielemendiks on suure arvu rööbiti paigutatud torude  
süsteem. Torude kimbud koonduvad ülal ja all kollektori-  
tesse (kogujatesse). Torude ümber paigutatakse õhuke kiht  
tuumakütust — uraani 235 — ja siis grafiidikiht. Ahel-  
reaktsiooni käigus aktiivse kihi ja grafiidi temperatuur tõu-  
seb, tekkiv soojus aga kantakse ära jahutava vedelikuga  
(veega), mis ringleb torude sees (sisemine jahutus).

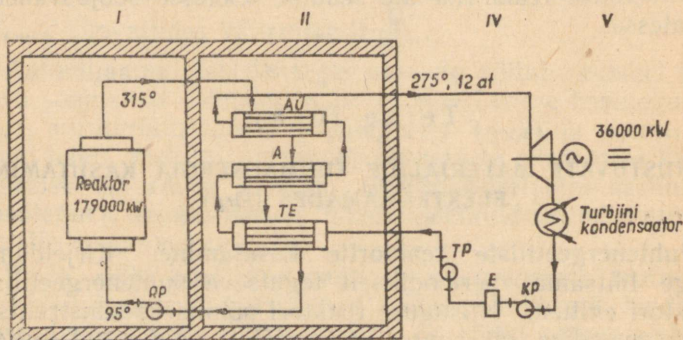
Toome mõningaid arvutuslikke andmeid. Oletame, et  
kirjeldatud skeemi kohaselt projekteeritud reaktor omab  
soojuslikku võimsust 154 miljonit kcal/h (179 000 kW).

Reaktoril on kuubi kuju, mille serva pikkus on 3,05 m ja  
ruumala 28,4 m<sup>3</sup>. Kiirete neutronite aeglustamiseks kasu-  
tatakse puhast grafiiti. Jahutavaks vedelikuks on vesi, mis  
kuumeneb reaktoris 95 kraadilt 315 kraadini; vee rõhk  
on 110 at. Vedeliku keemine reaktoris ei ole lubatav, sest  
jahutava vedeliku tiheduse igasugune muutumine rikub  
reaktori püsivat töörežiimi.

Roostevabast terasest jahutustorude arv on 1000; nende  
siseläbimõõt on 5,08 mm, paksus 0,25 mm ja torudesüsteemi  
samm 96 mm. Üldine küttepind (arvutatuna torude välis-  
läbimõõdu alusel) on 50,8 m<sup>2</sup>. Torud koos neid ümbritseva

1,15 mm paksuse uraanikihiga paiknevad grafiidis. Keskmine grafiidikihi paksus torudel on 22 mm. Uraani kogukaal on 1360 kg.

Temperatuurilang toru ja vee vahel on  $56^\circ$ , torude metallis  $43^\circ$ , uraani ja toru vahel  $94^\circ$ , grafiidi ja uraani vahel  $16^\circ$ . Maksimaalsed temperatuurid on: veel  $330^\circ$ , uraanil  $525^\circ$  ja grafiidil  $540^\circ$ . Ärapõlemise vältimiseks paikneb grafiit inertse gaasi (näiteks heeliumi) keskkonnas. Reaktoris veega täidetud ruumi maht on  $0,0625 \text{ m}^3$ , uraani maht  $0,0735 \text{ m}^3$  ja torude metalli maht  $0,013 \text{ m}^3$ .



Joon 6. Puhtenergeetilise reaktoriga aatomijaama põhimõtteline skeem:

*AU* — aurülekuumendi, *A* — aurustaja, *TE* — aurugeneraatori toitevee-eessoojendi, *E* — turbiini kondensaadi eelsoojendi (ülejäanud tähised samad mis joonisel 5).

Tuleb pöörata tähelepanu suhteliselt mõõdukatele (võrreldes kollete omadega) temperatuuridele reaktoris. Vaatamata sellele võrdub reaktori ühes kuupmeetris tunni vältel tekkiv kogu soojushulk 5,28 miljoni kilokaloriga, mis küttepinna ühe ruutmeetri kohta moodustab väga suure väärtuse (3 miljoni kcal/h). Niisugune küttepinna soojuslik erikoormus ületab paljukordselt erikoormuse tavalistes katelagregaatides.

Soojuslike iseloomustajate selliste suurte väärtuste puhul kujuneb seade väga kompaktselt. Tähtsat osa selles etendab torude väike läbimõõt ja vastav vee läbivoolu kiirus neis.

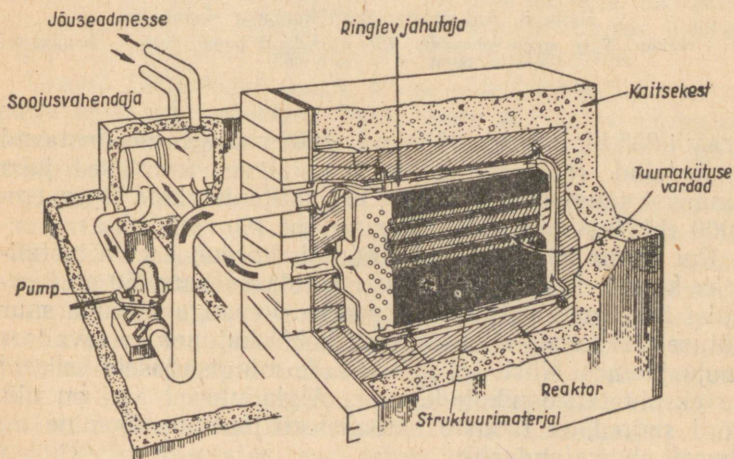
Veel on reaktori jahutajana niihästi positiivseid kui ka negatiivseid külgi. Tema peamisteks eelisteks on suur töö-

kindlus, kättesaadavus ja odavus. Kõrge temperatuuri saavutamiseks ilma keemiseta peab aga vesi omama ka kõrget rõhku, mis teeb torude süsteemi raskeks, halvendab tema tööd suure neutronitekaotuse tõttu terases ja tingib kallite rikastatud tuumakütuste tarvitamist; paksemad terasseinad raskendavad soojuste ülekandumist ja suurendavad süsteemi soojusmahtuvusi. Kirjeldatud reaktoris on kuumutatud vee temperatuur 110-atmosfäärisel rõhul ikkagi suhteliselt madal (315°). Seetõttu ei saavuta ka sekundaarauru (energeetilise auru) parameetrid kuigi suuri väärtusi ja seade töötab väikese kasuteguriga.

Mainitud tüüpi reaktoriga aatomielektrijaama üldskeem on kujutatud joonisel 6. Reaktoris kuumenenud vesi, mille temperatuur on 315°, läbib rühma soojusvahendajaid, milles turbiini kondensaatorist tulev vesi muundub ülekuumendatud auruks rõhuga umbes 12 at ja temperatuuriga 275°. Saadud aur suunatakse turbiini, reaktorist tulev vesi aga jahtub 95°-ni ja pöördub ringluspumba abil uuesti reaktorisse tagasi.

Niisuguse jaama kasutegur on umbes 20%, mistõttu reaktori soojusliku võimsuse puhul 154 miljonit kcal/h (179 000 kW) oleks generaatori elektriline võimsus umbes 36 000 kW.

Joonisel 7 on kujutatud seade samasugust tüüpi reaktori

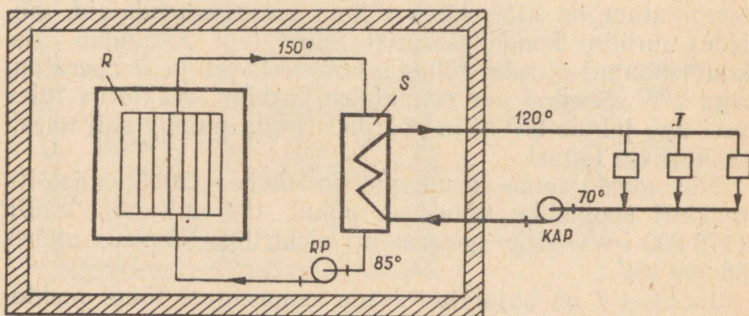


Joon. 7. Horisontaalselt paiknevate tuumakütuse varrestega reaktori ja soojusvahendaja koostöö skeem.

riga, kuid horisontaalselt paiknevate tuumakütuse var-  
rastega.

Kirjeldatud tüüpi reaktor töötab põhiliselt aeglaste neut-  
ronilega. Ta ei ole mugav kestvaks eksploatatsiooniks, sest  
teatava ajavahemiku järel on vaja kogu torude süsteem  
täielikult uuesti ümber laduda. See on vajalik kütuse puhas-  
tamiseks tuumade jaotumise saadustest. Täiuslikumate  
konstruktsioonide puhul nähakse võimalust mõõda ette  
pidev kütuse uuendamine.

Reaktorite puhtenergeetiline kasutamine omab uraani 235  
praeguste hindade puhul majanduslikel kaalutlustel väikesi  
tulevikuväljavaateid. Tõepoolest, kui eeldada, et 1 kg



Joon. 8. Aatomi-kaugküttekeskuse skeem:

*R* — reaktor, *S* — soojusvahendaja, *RP* — reaktori pump, *KAP* — kaugkütte-  
pump, *T* — tarbijad.

uraani 235 hinnaks on näiteks 100 000 rbl., siis moodustavad  
kirjeldatud reaktori ehitamise esialgsed kulutused juba  
ajnuüksi tuumakütuse osas 136 miljonit rubla (peaaegu  
4000 rbl. installeeritud võimsuse ühe kilovati kohta).

Kui jaama kasutegur on 20%, siis võrdub 1 kWh tootmi-  
seks kuluva uraani maksumus (eeldades tema 50-protsen-  
dilist ärakasutamist) 4,37 kopikaga. Peaaegu niisama suur  
kütuse maksumus kilovatt-tuuni kohta kujuneb ka tavalises  
soojusjaamas. Niisiis ei paku seade mingisuguseid eeliseid  
ka eksploatatsioonikulude osas. Algkulutused aga on nii-  
võrd suured, et taoliste aatomielektrejaamade loomine on  
ilmselt ebamajanduslik.

Kõige lihtsam on reaktori poolt toodetava soojuse ära-  
kasutamine elamute kütmiseks, s. o. termofikatsiooni (kaug-

kütte) eesmärgil. Niisuguse kaugkütteskeskuse skeem nähtub jooniselt 8.

Kütteseade koosneb reaktorist *R* ja soojusvahendajast *S*. Vesi kuumeneb reaktoris 150 kraadini. Läbides seejärel soojusvahendajat, ta jahtub, kuumutades vett kaugküttevõrgus 70 kraadilt 120 kraadini. Kuum vesi suunatakse tarbijatesse *T*. Läbi reaktori ja soojusvahendaja surutakse vett selle skeemi kohaselt pumbaga *RP* umbes 20-atmosfäärise rõhu all. Kaugküttepump *KAP* tekitab rõhu 5—7 at.

Personali kaitsmiseks radioaktiivse kiirguse eest on reaktor ja soojusvahendaja ümbritsetud paksude betoonseintega.

**Reaktor-muundajate kasutamine.** Seda tüüpi reaktoreis toimub lisaks energia saamisele veel ka «ärapõleva» kütuse osaline taastootmine. Niisuguste reaktorite suureks eeliseks on neis loodusliku uraani kasutamine, mis on mitu korda odavam kui uraan 235 (loodusliku uraani maksumust metallikangides hinnatakse 300—400 rublale kilogrammi kohta).

Kuid loodusliku uraani kasutamisel kerkib rida raskusi. Tõepoolest, looduslikus uraanis sisaldub isotoopi 235 0,712%, s. o. iga uraani 235 aatomi kohta tuleb ligikaudu 140 uraani 238 aatomit. Seetõttu põrkavad uraani 235 tuumade jaotumisel tekkivad kiired neutronid kokku peamiselt uraani 238 tuumadega. Kui niisugune põrge toimub siis, kui neutronil on alles säilinud esialgne suur energia, siis põhjustab reaktsioon tuuma 238 jaotumise. Seejuures ilmneb lühine (umbes 3%) neutronite arvu suurenemine.

Uraani küllaldaselt suure mahu puhul toimub ka teine, palju huvitavam protsess. Tuumadega 238 kokku põrgates neutronid peaaegu ei neeldu nendes, vaid ainult järk-järgult kaotavad oma energiat ja järelikult ka kiirust. Kui neutroni kiirus väheneb 45—50 kilomeetrini sekundis (20 korda suurem soojuslikust), siis hakkavad uraani 238 tuumad eriti ahnelt neutroneid neelama (see seisund vastab neutronite nõndanimetatud resonants-neelamisele). See kutsub esile keskkonna niivõrd suure vaesumise neutronitest, et nende hulk muutub mitteküllaldaseks uraani 235 tuumade jaotumise ahelreaktsiooni säilitamiseks. Niisiis pole looduslik uraan resonantsi piirkonnas suure neutronite kao tõttu (rakendamata erilisi abinõusid selle kao vältimiseks) tuumakütusena kasutatav, sest temas ei saa toimuda ennast ise toetav uraani 235 tuumade jaotumise reaktsioon. Looduslik uraan sisaldab liiga palju inertset uraani 238 ja see-

tõttu kaotab oma «põlemisomadused». See nähtus meenutab tuhasisalduse kahjulikku mõju tavalises kütuses, mis väga suure tuhasisalduse puhul kaotab oma kütuseomadused.

Arvestades aga seda, et suurim kogus neutroneid läheb kaotsi resonantsi piirkonnas, saab loodusliku uraani «põlemisomadusi» taastada, kui vältida neutronite kokkupõrkeid uraani 238 tuumadega resonantstingimustes. Selleks tuleb neutroneid aeglustada soojuslike kiirusteni (s. o. resonantskiirustest palju väiksemate kiirusteni) erilistes keskkondades, mis ei neela neutroneid või neelavad neid väga vähesel määral. Neid keskkondi nimetatakse aeglustajateks.

Neutronite kiirus väheneb aeglustajas soojuslikuni (2,5 km/sek); niisugused soojuslikud neutronid neelduvad väga intensiivselt uraani 235 tuumades ja väga vähe uraani 238 tuumades. Tänu sellele on tagatud uraani 235 tuumade jaotumise reaktsiooni pidevus.

Parimateks aeglustajateks on raske vesi, grafiit ja berüülium. Grafiit aeglustab halvemini kui raske vesi, kuid ta on palju odavam (raske vee maksumus võrdub ligikaudselt metallilise loodusliku uraani maksumusega).

Grafiidi kasutamisel aeglustajana antakse talle avadega plokkide kuju. Looduslik uraan mahutatakse peente, korrosiooni vältimiseks alumiiniumkestaga kaetud varraste kujul teras- või alumiiniumtorudesse ja paigutatakse neisse avadesse.

Aeglustamise käigus läheb osa neutroneid ümbritsevas keskkonnas (sealhulgas ka kaitsekestas) kaduma ja neeldub risustustes ning reaktori mitmesugustes konstruktsiooniosades. Ülejäänud neutronid neelduvad uraanituumades. Üks osa neist neutronitest kulub uraani 235 tuumade jaotumise ahelreaktsiooni säilitamiseks, teine neeldub uraani 238 tuumades. Viimane reaktsioon omab erilist tähtsust kütuse taastootmise seisukohast.

Uraani 238 tuum haarab soojusliku neutroni ilma jaotumata. Ergastunud tuum vabaneb energia liiast, levitades gammakiiri. Neutron jääb tuuma ja moodustab uraani 239 tuum. Uraan 239 on ebapüsiv (poolestusperiood 23 minutit); minetades elektroni, muundub ta uueks elemendiks — neptuuniumiks. Moodustuv neptuunium on samuti ebapüsiv (poolestusperiood 2,3 päeva); minetades elektroni, muundub ta plutooniumiks 239.

Plutoonium on küllalt püsikindel (poolestusperiood

24 000 aastat). «Kütusena» evib plutoonium samasuguseid omadusi nagu uraan 235.

Aeglustaja kasutamisel «põleb» uraan 235 niisiis vähehaaval loodusliku uraani varrastest välja, kuid ühtlasi moodustub uraani 238 arvel uus tuumakütus — plutoonium. Uraan 238 osutub seega plutooniumi saamise tooraineks, uraan 235 aga uut tuumakütust tekitavate neutronite allikaks. Seejuures kulub ühe plutooniumiaatomi tuuma moodustamiseks üks uraani 238 aatomi tuum.

Kui valmistada segu plutooniumist ja tooriumist 232, siis toimuvad eelkirjeldatutega sarnanevad protsessid ka tooriumituumadega.

Tooriumi 232 poolt neutroni neelamisel moodustub toorium 233. Ergastunud tooriumi 233 tuum levitab gammaikiiri ja vabaneb energia liiast. Pärast kaht üksteisele järgnevat muundumist, millega kaasneb elektronide eraldumine, moodustub küllalt püsikindel uraani 233 tuum (poolestusperiood 163 000 aastat). Uraani 233 omadused tuumakütusena on samasugused nagu uraanil 235. Kirjeldatud reaktsioon annab võimaluse kasutada tehis-tuumakütuste tootmiseks ära ka tooriumi 232 varusid.

Neutronite bilanss reaktsioonil uraaniga 238 kujuneb ligikaudu järgnevaiks: uraani 235 jaotumisel annab iga tuum keskmiselt 2,5 neutronit; üks neutron kulub ahelreaktsiooni säilitamiseks, 0,445 neutronit kulub plutooniumi moodustamiseks uraanist 238 ja 1,055 neutronit läheb mitmesugusel teel kaotsi. Seega võib arvestada, et 1 kg uraani 235 äratarvitamisel saadakse looduslikus uraanis sisalduvast uraanist 238 0,445 kg plutooniumi. Sellega aga protsess veel ei lõpe. Looduslikus uraanis moodustunud plutoonium võtab ise samuti ahelreaktsioonist osa, mille tagajärjel tekivad uued plutooniumituumad.

Eeldame, et 1 kg uraani 235 arvel moodustub 0,445 kg plutooniumi. Lagunedes tekitab see kogus  $0,445 \cdot 0,445 = 0,198$  kg plutooniumi; moodustunud 0,198 kg plutooniumi lagunemisel tekib  $0,198 \cdot 0,445 = 0,088$  kg plutooniumi jne. Selle tulemusel tarvitatakse uraani 235 ja moodustuva plutooniumi ühisel reageerimisel ära järgnev summaarne kogus tuumakütust (uraani 235 ja plutooniumi 239):

$$1 + 0,445 + 0,445 \cdot 0,445 + \dots = \frac{1}{1 - 0,445} = 1,8 \text{ kg.}$$

Et 1 kg «ärápõleva» uraani 235 kohta saadakse 0,445 kg

plutooniumi, siis 1,8 kg kütuse täielikul äratarvitamisel saadakse plutooniumi  $0,445 \cdot 1,8 = 0,8$  kg. Järelikult kokku saadakse 1 kg «ärapõleva» uraani 235 kohta 0,8 kg plutooniumi ja, peale selle, niisama palju «põleb teda ära» reaktsiooni käigus. Plutooniumi saamiseks äratarvitatava uraani 238 kogus moodustab seejuures 1,6 kg. Katsereaktoritega teostatud eksperimentide andmed on näidanud, et 1 kg «ärapõleva» uraani 235 kohta saadakse tõepoolest 0,8 kg plutooniumi, mis on looduslikust uraanist eraldatav keemilisel töötlemisel. Et plutoonium 239 erineb keemiliselt uraanist 238, siis on tema lahutamine looduslikust uraanist hõlpsam ja odavam kui loodusliku uraani jaotamine uraaniks 235 ja uraaniks 238 difusioonimeetodil.

Kütuse taastamise protsessid sellega aga veel ei lõpe. Oletame, et keemiatehases uraanist eraldatud plutoonium pannakse uuesti reaktorisse, kus ta omakorda iga kilogrammi kohta annab 0,8 kg uut plutooniumi. Lõpptulemusena reageerib taoliste operatsioonide rea kordamise arvel 1 kg «ärapõletatud» uraani 235 kohta

$$1 + 0,8 + 0,8 \cdot 0,8 + \dots = \frac{1}{1 - 0,8} = 5 \text{ kg}$$

materjali.

Protsessi kordamisel saadakse 1 kg uraani 235 kohta niisiis juurde 4 kg plutooniumi. Seejuures on aga vajalik rida keemilisi operatsioone plutooniumi eraldamiseks ja puhastamiseks.

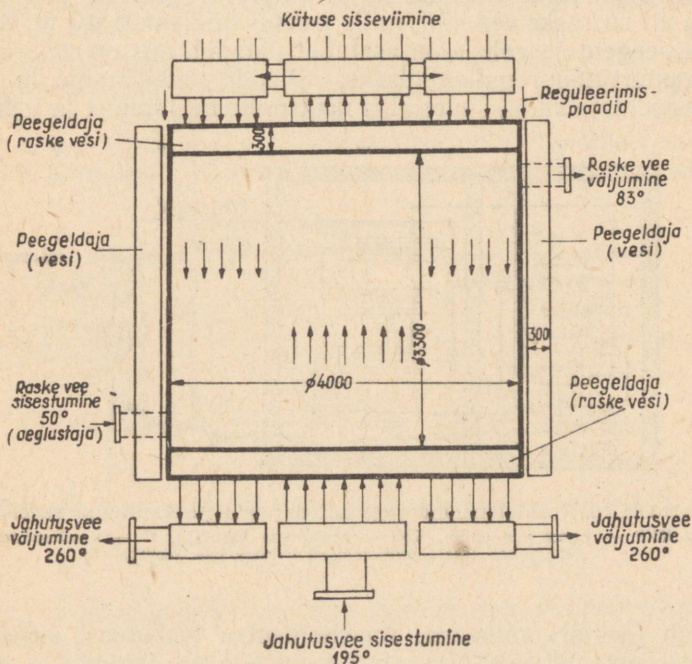
Kütuse kirjeldatud taastootmine võimaldab siiski ainult väikese protsendi uraani 238 ära kasutamist. Et uraani 235 sisaldub looduslikus uraanis 0,712%, siis saab ülalkirjeldatud tsükli teostamisel kasutada looduslikust uraanist ära ainult  $0,712 \cdot 5 = 3,56\%$ .

Reaktorites loodusliku uraani kasutamisel lubatakse tema «ärapõletamist» 1% ulatuses. Seejuures tarvitatakse ära 0,56% uraani 235 (lõppsaaduses sisaldub teda 0,15%) ja 0,44% plutooniumi (lõppsaaduses sisaldub teda 0,44%).

Installeeritud võimsuse 1 kW kohta kuluva loodusliku uraani koguse määrab ära reaktori lakkamatu töötamise kestus. Oletame näiteks, et reaktor töötab neli aastat 7000 tundi aastas, s. o. 28 000 tundi. Selle aja vältel (1 kW võimsuse kohta) toodetava 28 000 kWh kohta tarvitatakse  $28\,000 : 22,9 \cdot 10^6 = 1,22$  g kütust. Ühest kilogrammist looduslikust uraanist lubatakse ära põletada 10 g (1%), järe-

likult tagab 1 kg uraani 4 aasta vältel võimsuse  $10 : 1,22 = 8,2$  kW. Kui reaktori soojuslik võimsus on 500 000 kW, siis peab temasse mahutatava uraani kogus olema  $500\,000 : 8,2 = 61\,000$  kg, s. o.  $61\,000 : 500\,000 = 0,122$  kg/kW.

Joonisel 9 on toodud 4-meetrise läbimõõduga ja 3,3-meetrise kõrgusega (mahuga 41,4 m<sup>3</sup>) alumiiniumpaaki kuju-



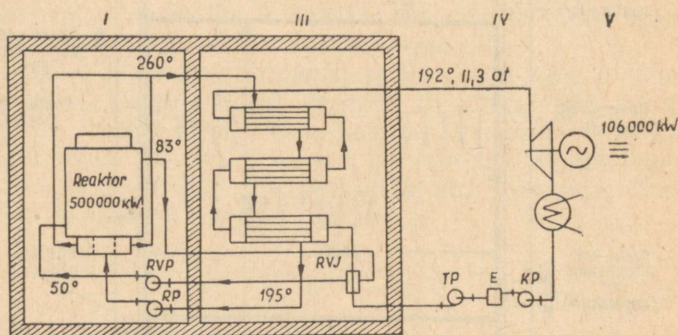
Joon. 9. 500 000-kilovatise soojusliku võimsusega reaktor-muundaja konstruktsiooni skeem (aeglustaja — raske vesi, jahutaja — vesi 70-atmosfäärise rõhu all, kütus — 60 t looduslikku uraani varraste kujul).

tava, 500 000-kilovatist soojuslikku võimsust omava reaktor-muundaja skeem. Selle mahu erikoormus moodustab 12 000 kW/m<sup>3</sup> ehk 10,3 miljonit kcal/m<sup>3</sup>h.

Reaktori jahutussüsteem koosneb suurest hulgast alumiiniumtorudest, mis on suletud alumiiniumplaatide vahele. Torudevaheline ruum on täidetud raske veega, mis täidab neutronite aeglustaja ülesannet. Vesi neelab umbes 7,5% vabanevast soojusest. Raske vee jahutamiseks pumbatakse

teda läbi soojusvahendaja, mida jahutatakse turbiini kondensaadiga. Raske vee temperatuur alaneb seejuures 83 kraadilt 50 kraadile.

Neutronite kao vähendamiseks omab reaktor peegeldajat — reaktori keret ümbritsevat sooladest vabastatud vee kihti, mille paksus on 0,3 m. Vesi on suletud erilistes sektorikujulistesse karpidesse. Reaktori reageeriva osa peal ja all on raske vee kiht, mille paksus on samuti 0,3 m. Kere ja peegeldaja vahele on asetatud plaadid, mis on määratud reaktori töö reguleerimiseks. Plaadi sukeldamine lülitab peegeldaja välja, suurendab neutronite neeldumist ja vähen-



Joon. 10. Reaktor-muundajaga aatomiijaama põhimõtteline skeem:  
 RVP — raske vee pump, RVJ — raske vee jahutaja, E — kondensaadi eelsoojendi (ülejääänud tähised samad mis joonisel 5).

dab reaktori võimsust. Avariiolukorra tekkimisel sukelduvad plaadid täielikult (automaatselt) ja jaotumise ahelreaktsioon lakkab.

Looduslik uraan (60 t) paigutatakse alumiiniumkestadesse suletud metallvarrastena kontsentrilistesse torudesse, mida mööda voolab jahutusvesi.

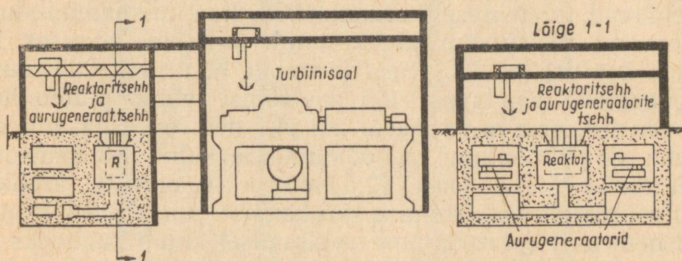
Reaktori jahutamiseks kasutatakse tavalist vett, mis ringleb 70-atmosfäärise rõhu all. Vesi sisestub reaktorisse alt, tema keskosa kaudu, temperatuuril 195°. Ülal läheb vesi rõngakujulisse kogujasse ja laskub reaktori välimisi torusid mööda alla, kogunedes jällegi rõngakujulisse kogujasse; siin on vee temperatuur 260°.

Joonisel 10 on kujutatud kirjeldatud reaktoriga aatomiijaama põhimõtteline skeem. Reaktoris 260 kraadini kuumenenud vesi suundub aurugeneraatorisse. Temale kerkib

vastu turbiini kondensaad. Kondensaadi kuumenemisel tekib aur, mille temperatuur on  $192^{\circ}$  ja rõhk turbiinide eel  $11,3$  at. Aurugeneraatoris jahtub reaktorist saabuv vesi  $195$ — $197$  kraadini. Aur satub edasi turbiini, mille võimsus on  $125\,000$  kW. Seadme brutokasutegur on  $21,2\%$  ja netokasutegur  $20,1\%$ . Jaama oma tarbeks kulub  $5600$  kW ehk  $5,28\%$  arendatavast võimsusest. Jaama elektriline võimsus on  $106\,000$  kW.

Nagu ülalpool märgitud, saab jaam kütusest  $1\%$  ära tarvitades pidevalt töötada nelja aasta ümber energia kogutoodanguga umbes  $3$  miljardit kWh.

Joonisel 11 on kujutatud niisuguse jaama seadmete võimalik paigutus. Reaktor paikneb betoonehitises maa all.



Joon. 11. Reaktor-muundajaga aatomijaama seadmete paigutuse skeem.

Tema teenindamiseks on ette nähtud maapealne hoone kraanaga. Neljast sektsioonist koosnev aurugeneraator paikneb reaktori kõrval samuti betoonruumides. Turbiinisaal kujutab enesest maapealset ehitist, olles teenindatav tavalisel viisil.

**Paljundavate reaktorite (paljundajate, briiderite) kasutamine.** Kirjeldatud reaktor-muundajates uraani  $235$  kulu osaliselt kaetakse uue kütuse — plutooniumi  $239$  — moodustumisega. Tooraineks on seejuures loodusliku uraani koostisse kuuluv uraan  $238$ . Nagu me nägime, tarvitatakse niisuguse taastootmise kõige soodsamatel tingimustel ära ainult  $3,56\%$  looduslikust uraanist. Pärast plutooniumi eraldamist on vaesunud loodusliku uraani jäägid vähe tõhusad edasiseks kasutamiseks niisugustes reaktorites. Seega on niisuguste konstruktsioonide puhul uue tuumakütuse kogumise probleem lahendatud ebarahuldavalt. Seetõttu

pakuvad tunduvalt huvi teist tüüpi, niinimetatud paljundavad reaktorid, millede uus tuumakütus on toodetav vaesunud materjalist ka uraani 238 (või tooriumi 232) peaaegu täieliku äratarvitamise puhul.

Nende reaktorite tööpõhimõte on järgnev. Reaktori keskosas paigutatakse peaaegu puhas uraan 235 või plutoonium 239. Ümberringi asetseb looduslikust uraanist või isotoobi 235 poolest vaesunud uraanist kest. Reaktor töötab kiirete neutronitega ega vaja järelikult mingisuguseid aeglustajaid. Reaktori keskosa — südamiku — ümber moodustub võimas kiirete neutronite voog. Põrgates kokku jahutaja ja teiste kõrvaliste keskkondade tuumadega, neutronid aeglustuvad resonants- või suuremate kiirusteni. Nii-suguses seisundis satuvad nad kesta. Resonantsneutronid neelduvad intensiivselt uraanis 238. Rea tuumamuunduste tulemusel moodustub plutooniumi suuremas koguses, kui põleb ära uraani 235. See tähendab, et uraani 235 tuuma lagunemisel saadavast 2,5 neutronist võtab plutooniumi moodustumisest osa rohkem kui üks neutron. Edaspidi eeldame, et plutooniumi moodustumisele kulub 1,3 neutronit. Neutronite üldkogusest (2,5 neutronit) ei võta järelikult plutooniumi moodustumise protsessist osa (läheb kaotsi) 0,2 neutronit (plutooniumi tarvitamisel kulub kadudeks 0,7 neutronit). Siit nähtub, et paljundavate reaktorite suhtes kujutab neutronite säilitamise probleem väga tähtsat ülesannet.

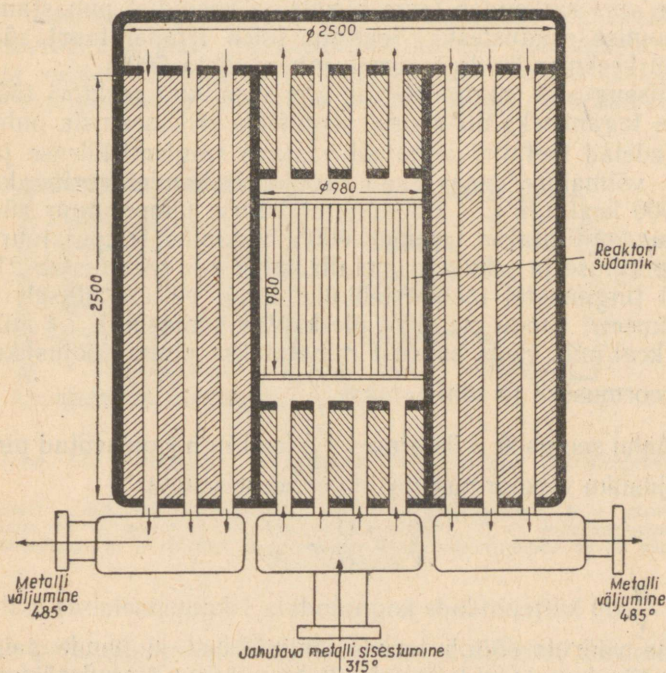
Joonisel 12 on toodud 500 000-kilovatist soojuslikku võimsust arendava paljundava reaktori skeem. Reaktori keskel asetseb tugevalt rikastatud uraanist südamik. See kujutab enesest silindrit läbimõõduga 980 mm ja samasuguse kõrgusega. Südamikku jahutatakse intensiivselt sulametalli abil (südamikus vabaneb 90% kogu soojusest). Südamiku ümber on paigutatud vaesunud või tavalisest looduslikust uraanist kest. Kest on samuti varustatud vastava jahutus-süsteemiga.

Soojuskandjana võidakse kasutada vedelaid metalle, näiteks vedelat naatriumi (naatriumi sulamistemperatuur on  $97,5^{\circ}$ , keemistäpp  $880^{\circ}$ , erikaal  $0,93 \text{ g/cm}^3$  sulamisel ja  $0,74 \text{ g/cm}^3$  keemisel).

Nii-suguse jahutaja kõrge temperatuur annab võimaluse tunduvalt suurendada seadme soojusosa kasutegurit (20 protsendilt 30-le). Sulametallide kasutamine ei nõua suuri rõhkusid isegi kõrgetel temperatuuridel, mistõttu jahutami-

seks kasutatavad torud võivad olla õhukeseseinalised. Naatrium neelab neutroneid suhteliselt nõrgalt, mis paljundava reaktori puhul on väga oluline. Naatriumi kasutamine on aga seotud vajadusega vältida tema kokkupuutumist õhu ja veega.

Reaktor on ette nähtud aastaseks töötamiseks kuise vaheajaga südamikuga ja plutooniumist kõige rohkem küllastatud



Joon. 12. 500 000-kilovalise soojusliku võimsusega paljundava reaktori konstruktsiooni skeem (jahutusvedelik — sulatatud naatrium, kütus — rikastatud uraan).

kesta siseosa vahetamiseks. Reguleerimiseseade asetseb väliskestas. Südamik ja kest paiknevad terrasilindris, mille läbimõõt ja kõrgus on 2,5 m.

Kõige raskemaks ülesandeks on kiirete neutronitega töötava reaktori siseosa jahutamine. Siin vabaneb väga väikeses mahus 90% energiast. Südamik, mille maht moodustab 0,74 m<sup>3</sup>, vabaneb niisugune kogus soojust, mis vastab

soojuslikule võimsusele 450 000 kW ehk 387 miljonit kcal/h. Järelikult erivõimsus, s. o. 1 kuupmeetri kohta arendatav võimsus on  $450\,000 : 0,74 = 610\,000$  kW/m<sup>3</sup>, mis vastab soojuslikule erikoormusele (s. o. tunni vältel 1 kuupmeetris vabanevale soojushulgale) 525 miljonit kcal/m<sup>3</sup>h.

Niisuguse soojushulga eemaldamist raskendab ka see, et kütuse temperatuur ei tohi ületada 665°, sest selle temperatuuri juures läheb uraan üle ühest kristalsest struktuurist teise, mis raskendab tema järgnevat keemilist puhastamist jaotumise saadustest. Seetõttu tuleb temperatuuri südamikku keskmis hoida tasemel, mis ei ületa 600°.

Missugused tingimused on siis vajalikud reaktori töötamise tagamiseks nii suurte soojuslike erikoormuste puhul?

Vedelad metallid annavad vastava ringlemiskiiruse juures võimaluse saavutada soojuslähikandetegurit kuni 10 000 kcal/m<sup>2</sup>h°C. Eeldame, et kütuse temperatuur südamikus säilitatakse tasemel 600°, keskmine temperatuuride vahe kütuse ja jahutava metalli vahel aga moodustab 210°. Neil tingimustel moodustab ühe tunni vältel kütuselt iga ruutmeetri kaudu metallile üle kantav soojushulk 2,1 miljonit kcal/m<sup>2</sup>h. Seda suurust nimetatakse pinna soojuslikuks

erikoormuseks ja tähistatakse  $\frac{Q}{H}$ .

Mahu soojuslik erikoormus  $\left(\frac{Q}{V} \text{ kcal/m}^3\text{h}\right)$  on seotud pinna soojusliku erikoormusega lihtsa seose kaudu:

$$\frac{Q}{V} = \frac{Q}{H} \cdot \frac{H}{V},$$

kus  $\frac{H}{V}$  on küttepindade kogupindala 1-kuupmeetris mahus.

Tema väärtus sõltub torude läbimõõdust ja nende paigutuse tihedusest, mida tavaliselt hinnatakse (torudesüsteemi sammuks nimetatava) torude telgede vahelise kaugusega. Kui samm on võrdne toru 1,5-kordse läbimõõduga, siis saab küttepinna pindala 1 kuupmeetris arvutada avaldusega

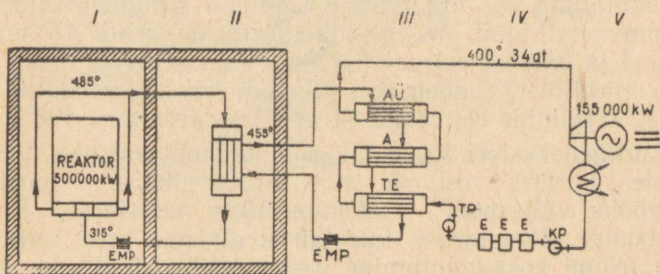
$$\frac{H}{V} = \frac{1400}{d},$$

kus  $d$  on torude välisläbimõõt millimeetrites.

Olgu meie näites torude välisläbimõõt 5,58 mm ja seinapaksus 0,25 mm. Siis  $\frac{H}{V} = \frac{1400}{5,58} = 250$ . Järelikult on mahu soojuslik erikoormus 525 miljonit kcal/m<sup>3</sup>h, mis vastab eri-

võimsusele  $610\,000\text{ kW/m}^3$  (mõlemad arvud ühtivad varemmainitudetega).

Torude paigutuse suure tiheduse, kütuse ja metalli vahel küllali suure temperatuuride vahe ning sulametalli ringlemise vajaliku kiiruse rakendamine tagavad soojuste nõutava ärakandumise ning koos sellega suure soojusliku erikoormuse. See on kahtlemata reaktoriseadmete tähelepanuväärseks eeliseks, mis kujunevad palju kompaktsemateks kui tavalised soojusseadmed. Meenutagem, et tavaliste aurukatelde koldeis tolmukujulise kütuse põletamisel loetakse suureks soojuslikuks erikoormuseks  $250\,000\text{ kcal/m}^3\text{h}$ , mis vastab erivõimsusele  $291\text{ kW/m}^3$ . Seega on antud reak-



Joon. 13. Paljundava reaktoriga aatomijaama põhimõtteline skeem:

*EMP* — elektromagnetiline pump, *AU* — aurufilekuumendi, *A* — aurustaja, *TE* — aurugeneraatori toitevee-eessoojendi, *TP* — aurugeneraatori toitepump, *E* — turbiini regeneratiivse astme eelsoojendid, *KP* — kondensaadi pump.

toris südamiku soojuslik erikoormus 2,1 miljonit korda suurem kivisööga köetavate tolmküttekollete põlemisruumi soojuslikust erikoormusest.

Joonisel 13 on kujutatud kirjeldatud reaktoriga aatomijaama skeem. Vedel metall väljub reaktorist *I*, omades temperatuuri  $485^\circ$ , ja läheb soojusvahendajasse *II*. Soojusvahendajast pöördub  $315$  kraadini jahutatud metall elektromagnetilise pumba *EMP* abil uuesti reaktorisse tagasi. Siin liigub ta esialgu läbi südamiku torude, siis aga läbi kesta jahutussüsteemi, kuumenedes seejuures jälle  $485$  kraadini.

Reaktorist väljuv naatrium osutub tugevalt radioaktiivseks, mistõttu teda ei saa suunata aurugeneraatorisse. Seoses sellega kasutatakse soojusvahendajat *II*, milles reaktori

süsteemi naatrium annab osa oma soojusest ära naatriumile, mis ringleb sekundaarringis, kuumutades teda temperatuurini  $455^{\circ}$ . Selleks, et radioaktiivne naatrium esineda võiva torude lekkimise tõttu ei saaks tungida sekundaarringi, läbib naatrium soojusvahendajas torusid, mis on suletud teiste torude sisse. Sekundaarringi naatrium ringleb vastuvoolu torudevahelises ruumis. Nii puudub vahetu kokkupuude primaar- ja sekundaarringi naatriumi vahel. Lekkimise õigeaegseks avastamiseks ja naatriumi primaarringist sekundaarringi sattumise vältimiseks kontrollitakse spetsiaalselt sekundaarringi radioaktiivsust.

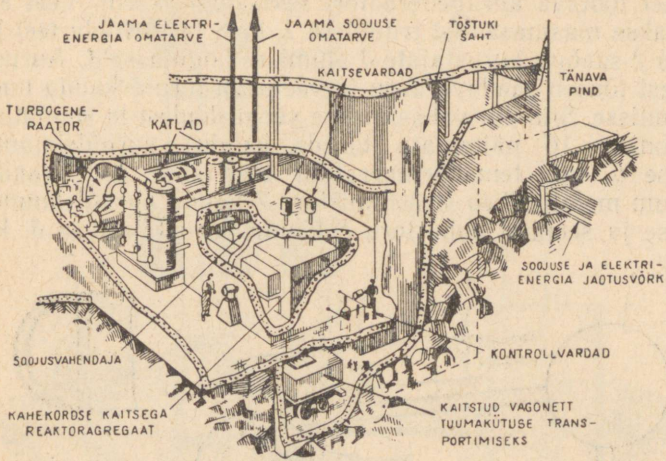
Soojusvahendajast väljub vedel sekundaarringi naatrium kuumutatuna  $455$  kraadini ja suundub aurugeneraatorisse. Kuum metall läbib järgemööda aurülekuumendi  $AU$ , aurustaja  $A$  ja toitevee-eelsoojendi  $TE$ . Aurugeneraatorisse saabub turbiinist kondensaat. Saadav ülekuumendatud aur omab turbiinide eel rõhku  $34$  at ja temperatuuri  $400^{\circ}$ .

Aurugeneraatori torud on samuti kontsentrilised (sisemistes torudes vesi või aur, torudevahelises ruumis — elavhõbe, väljaspool — sekundaarringi naatrium). Konstruktsioon «toru torus» takistab naatriumi vette sattumist (naatriumi kokkupuutumine veega põhjustab ägeda reaktsiooni tõttu plahvatuse). Elavhõbe ei reageeri vee ega naatriumiga; ühtlasi omab ta head soojusjuhtivust ega tekita seega suurt soojuslikku takistust.

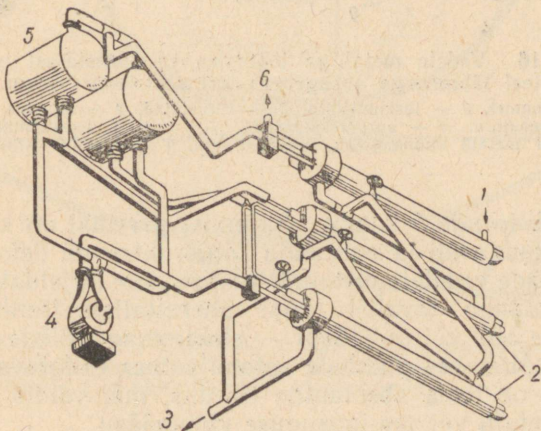
Kirjeldatud skeemi puhul on aurugeneraatorid töötamisel ohutud ja nad võidakse paigaldada katmatult turbiinide vahetusse lähedusse. Soojusvahendaja, mis kannab soojust üle reaktori metallilt aurugeneraatori metallile, peab kui radioaktiivselt ohtlik paiknema erilises ruumis.

Masinasaali, reaktori ja soojusvahendajate tõenäoline asetus allmääraatomielektri jaamas on näidatud joonisel 14. Raudbetoonikihi paksus reaktori ümber on  $1,8$  m, primaarsoojusvahendaja ümber aga  $0,9$  m.

Joonisel 15 on näidatud vedela metalliga töötava aurugeneraatori ühe sektsiooni konstruktsiooni skeem. Kuum metall sisestub aurülekuumendisse sisestumistoru  $1$  kaudu ja, läbinud ta kahe rööbitise voona, laskub aurustajatesse  $2$ , milledest väljub väljumistoru  $3$  kaudu. Vesi läbib aurustajad sundvoolu teel pumba  $4$  abil. Aur läheb trumlitest  $5$  aurülekuumendi torude sarja, millest väljub temperatuuril  $400^{\circ}$  läbi väljumistoru  $6$ .



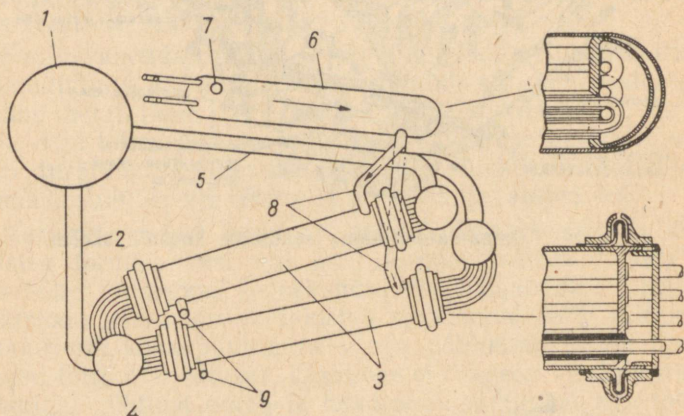
Joon. 14. Allmaa-aatomijaama seadmete koostöö skeem.



Joon. 15. Vedela metalliga töötava, vee aurustajast sundvoolu teel läbinisega aurugeneraatori ühe sektsiooni skeem:

1 — metalli sisestumine, 2 — aurustajad, 3 — metalli väljumine, 4 — pump, 5 — trumlid, 6 — ülekuumendatud auru väljumine.

Joonisel 16 on näidatud vee aurustajast isevoolu teel läbimisel töötava aurugeneraatori sektsiooni skeem. Vesi suunatakse masinasaalist trumliisse 1, kust ta isevoolu teel läbi toru 2 saabub aurustajate 3 alumisse kogujasse 4. Aurustajatest tõuseb saadava auru ja vee segu toru 5 kaudu uuesti trumliisse. Siin aur vabastatakse veepiiskadest ja suunatakse (joonisel 16 näitamata torude kaudu) auruülekuumendisse 6, kus tema temperatuur tõstetakse 400 kraadini. Kuum metall läheb sisestumistoru 7 kaudu auruülekuumendisse ja seejärel kahe toru 8 kaudu aurustajatesse 3, kust



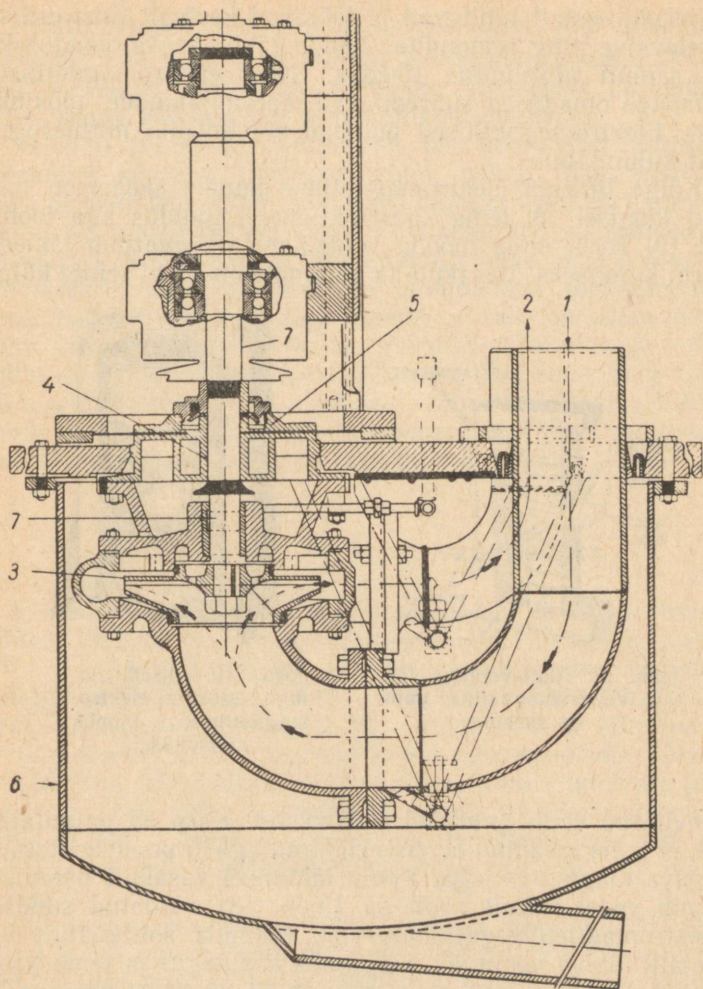
Joon. 16. Vedela metalliga töötava, vee aurustajast isevoolu teel läbimisega aurugeneraatori sektsiooni skeem:

1 — trummel, 2 — laskumistoru, 3 — aurustajad, 4 — alumine koguja, 5 — tõusutoru, 6 — auruülekuumendi, 7 — metalli sisestumine, 8 — torud metalli suunamiseks aurustajatesse, 9 — metalli väljumine.

ta väljub torude 9 kaudu. Skeemist paremal on kujutatud auruülekuumendi ja aurustaja konstruktsiooni detailid.

Kuumade vedelate metallide pumpamine kirjeldatud seadmetes toimub tavalist tüüpi üherattaliste tsentrifugaalpumpade abil või uut tüüpi — elektromagnetiliste — pumpadega. Mistahes pumbale aatomijaamas esitatavaks põhinõudeks on tema absoluutne tihedus, mis väldib radioaktiivse metalli või vee igasuguse väljapääsu.

Vertikaalse võlliga tsentrifugaalpumba tüüpiline konstruktsioon nähtub joonisel 17. Vedel metall saabub pumba ratta juurde alt. Kõogu pump asetseb suletud kattes, millega seade on kaitstud igasuguste metallikadude eest. Eriti hoo-



Joon. 17. Tsentrifugaalpump vedela metalli pumpamiseks:

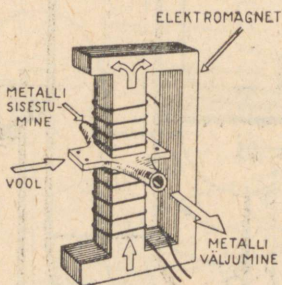
1 — metalli sisestumine, 2 — metalli väljumine, 3 — pumbaratas, 4 — labürinttihend, 5 — tihendava gaasi sisestumine, 6 — kate, 7 — võll.

likalt tihendatakse võlli seinast läbimineku koht. See on varustatud ulatusliku labürinttihendiga ning peale selle juhitakse tihendi ülemisse ossa rõhu all olevat gaasi.

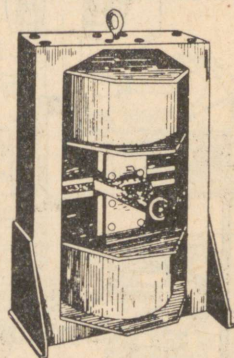
Elektromagnetilised pumbad ei oma pöörlevaid osi, on

hõlpsasti eemalt juhitud ja töötavad kestvalt ilma erilise järelevalve ning remondita. Nende tähtsaimaks omaduseks on samuti absoluutne tihedus. Need elektromagnetiliste pumpade omadused suurendavad aatomijaamade töökindlust. Elektromagnetilised pumbad võivad olla mitmesuguselt kujundatud.

Kõige lihtsam elektromagnetilise pumba skeem on toodud joonisel 18, tema konstruktiivne kujundus aga joonisel 19. Toru, mida mööda voolab metall, avardub lameda karbi kujuliseks. Vasakule ja paremale on karbi seinte külge



Joon. 18. Alalisvooluga töötava elektromagnetilise pumba skeem.



Joon. 19. Alalisvooluga töötava elektromagnetilise pumba välisvaade.

keevitatud voolu juhtivad elektrodid. Karp on paigutatud nii, et tema tasapind on risti elektromagneti poolt tekitatava tugeva magnetiväljaga. Voolu läbimisel vasakult paremale liigub vedel metall nooltega (joon. 18) näidatud suunas. Elektromagneti ergutamise võib toimuda sõltumatult või metalli läbiva vooluga. Et pumba kasutegur ja tema poolt tekitatav surve oleks suurem, peab magnetiväli ning voolu jaotus metallis olema võimalikult ühtlane. Sel juhul suureneb võrdeliselt voolu tugevnemisega. Niisugusel põhimõttel rajaneva pumba võib valmistada kas alalisvoolu või ühefaasise vahelduvvooluga toidetavana.

Kolmefaasise vooluga töötavad elektromagnetilised pumbad valmistatakse kas pöörleva elektromagnetilise väljaga (nagu see esineb tavalistes kolmefaasistes mootorites) või tasapinnaliselt ümberpaikneva väljaga.

Elektromagnetiliste pumpade tootlikkus võib olla kuni 4500 m<sup>3</sup>/h ja rõhk 3 at metalli temperatuuri puhul 300—500°. Elektromagnetiliste pumpade kasutegur on umbes 30%, seega väiksem kui mehaanilistel pumpadel.

Vedelate metallide kasutamine, mis võimaldab häireteta töötamist kõrgetel temperatuuridel, pakub tõsist huvi ka aurujõuseadmete puhul, eriti auru teistkordseks ülekuumendamiseks turbiinide eel seadme kasuteguri suurendamise eesmärgil. Selleks otstarbeks kuumutatakse auru katlas ja suunatakse elektromagnetiliste pumpadega ülekuumenditesse turbiini eel. Niisuguse skeemi eeliseks on väike aururõhu kadu võrreldes tavalise gaasülekuumendusega. Sel juhul esineb ka võimalus mitmekordse ülekuumenduse läbi viimiseks keskmistel ja madalatel rõhkudel. Masina töötamine on palju kindlam. Samuti paraneb ka tema reguleeritavus võrreldes tavalise gaasülekuumendusega.

#### AATOMIELEKTRIJAAAMADE ÕKONOOMIKA

Kirjeldatud paliundav reaktor soojusliku võimsusega näiteks 500 000 kW tagab turbogeneraatori töötamise elektrilise koormusega 155 000 kW. See vastab seadme brutokasutegurile 31%. Jaama omatarbeks kulub 9300 kW (6%). Jaama netokasutegur on 29,1%. Tuleb juhtida tähelepanu turbiiniseadme kasuteguri tunduvalle suurenemisele võrreldes ülalpool kirjeldatud, teist tüüpi reaktoreid omavate jaamadega. See seletub vedelate metallide rakendamisega, mille puhul saadakse suuremate parameetritega (34 at, 400°) auru kui reaktorite jahutamisel kõrgrõhu all oleva veega.

Paljundava reaktoriga jaama aastane toodang 7000 töötunni kohta moodustab ligikaudu 1 miljard kWh; seejuures tarvitatakse aasta vältel ära 153 kg tuumakütust. Uut kütust — plutooniumi — moodustub (iibeteguri puhul 1,3) umbes 200 kg.

Paljundavate reaktorite suhteliselt lühiajalise töötamise vältel koguneb niisugune kogus tuumamaterjali, mis rahuldab kõik inimkonna vajadused energia alal.

Oletame, et ehitatakse kirjeldatud tüüpi aatomijaam võimsusega 150 000 kW. Selle jaama paljundavas reaktoris saadav uus kütus — plutoonium — läheb kohe teistesse reaktoritesse, kus teostatakse uus plutooniumi saamise tsükkel

mainitud iibeteguriga (1,3). Niisugustel tingimustel moodustab plutooniumi kogus  $B_{Fu}$  (tonnides)  $n$  aasta pärast:

$$B_{Fu} = 0,15 \cdot 1,3^n,$$

kus 0,15 on kütuse kogus (tonnides), mis põletatakse aasta vältel esimeses paljundavas reaktoris, ja 1,3 — iibetegur.

Ulatugu nende  $n$  aasta pärast energia toodang aatomi- jaamadades 3000 miljardi kWh-ni (see arv vastab maailma aastasele energia toodangule tänapäeval, kaasa arvatud ka kõik transpordiliigid). Niisuguses koguses energia tootmiseks kulub 435 t aatomikütust (kui jaama kasutegur on 30%).

Kui asetada see arv eelnevasse valemisse, siis saab leida, et niisugune kogus aatomikütust on inimkonna käsutuses 30 aasta möödumisel sellest hetkest, mil alustab tööd esimene paljundav reaktor soojusliku võimsusega 500 000 kW. Kasutades ära looduslikud kaevised — uraani 238 ja tooriumi 232 —, saab seega 30–40 aasta vältel (muidugi vastava võimsusega reaktorite olemasolu puhul) toota niisuguse koguse aatomikütust, mis rahuldab kogu inimkonna vajadused energia alal.

Paljundavad reaktorid, mis võimaldavad üheaegselt saada tehis-tuumakütust ja toota energiat, omavad kõige suuremaid väljavaateid suurtes energeetilistes seadmetes kasutamiseks.

Lugejal, kes esmakordselt saab teada paljundavate reaktorite töötamise omapärast, kerkib tahtmata mõte: kui uraan 235 tekitab «äräpõlemisel» uut kütust suurema koguse energia tootmiseks, kui seda sisaldub äratarvitatud kütuses, siis kas siin ei esine vastuolu energia säilivuse seadusega? Protsessi analüüs näitab, et mingisuguseid vastuolusid siin pole.

Paljundavates reaktorites ei saada energiat «eimillestki»; inimene ainult kasutab ära loodusjõude uute energeetiliste ressursside saamiseks, vabastades ja kasutades seejuures uraani 235 energiat. Energeetilisest seisukohast on uue kütuse tootmine paljundavates reaktorites sarnane tavaliste kütuse saamise viisidega, millede puhul energia, mida kulutatakse näiteks söe kaevandamisele, on alati väiksem kui kütuses sisalduv keemiline energia. Kui näiteks tonni kütuse kaevandamiseks kulub 10 kWh, siis saadud tonnis sisalduv energia moodustab vähemalt 5000–8000 kWh. Selles protsessis pole mitte keegi iialgi näinud energia säilivuse sea-

duse mittekehtivust. Seesama toimub ka paljundavates reaktorites, ainult selle erinevusega, et neis on uue kütuse «kaevandamise» meetodid sootuks teistsugused. See viibki mõnikord eksitusse.

Uued kütuse saamise viisid osutuvad üheks tuumaenergeetika omapäraks. Seoses sellega on tulus juhtida tähelepanu järgnevatele arvudele. Reaktor soojusliku võimsusega näiteks 3 miljonit kW (jaama elektriline võimsus ligikaudu 1 miljon kW), võib kõige tagasihoidlikumate arvestuste kohaselt anda umbes 3 kg plutooniumi ööpäevas (kui iibetegur lugeda võrdseks ühega). Niisuguses koguses tuumakütuse saamine on samaväärne moskvalähise söe kaevandamisega koguses 23 000 t ööpäevas ehk ligikaudu 7 miljonit tonni aastas. Niisuguse söekaevandamise organiseerimine on seotud suurte kaevanduste ehitamise vajadusega. Reaktorites aga on samaväärse koguse energeetiliste ressursside «kaevandamine» tunduvalt lihtsam, isegi kui arvestada kõiki töid vastavate maakide hankimisel ja töötlemisel.

Kivisöe- ja aatomijaamade võrdlemisel elektrienergia tootmise majanduslikkuse seisukohalt on otstarbekas võrrelda ka järgnevaid andmeid. Kui eeldada, et lõhustuva materjali ühe kilogrammi hind on 100 000 rbl., siis on tuumakütuse ärakasutamisel kasuteguriga 30% «kütuse osa» väärtus kilovatt-tunni omahinnas võrdne 1,45 kopikaga. Soojusjaamas aga, kõrgekvaliteedilise kütuse maksumuse puhul 120 rbl. tonni eest, moodustab «kütuse osa» väärtus 4 kop. kilovatt-tunni kohta, kui jaama kasutegur on 37,5%. Loodusliku või rikastatud uraani tarvitamisel kujuneb erinevus nendes arvudes veelgi suuremaks.

Paljundavate reaktoritega aatomijaamade ekspluatatsioonis võib uue kütuse tootmine täielikult katta kõik kulud «ärapõletatud kütuse» osas ja kilovatt-tunni omahinnas muutub «kütuse osa» võrdseks nulliga. Nii tavaliselt arvestataksegi soojusjaamade ja paljundavate reaktoritega aatomijaamade töö võrdlemisel.

Aatomijaamadel on suured esialgsed ehituskulud, mis on põhiliselt seotud ühekordselt reaktorisse paigutatava tuumakütuse suure maksumusega. Tingituna sellest määrab kilovatt-tunni omahinna aatomijaamas ära peamiselt algmaksumus, kuna soojusjaamades sõltub see eelkõige ärapõletatava kütuse maksumusest.

Amortisatsioonikulude vähendamiseks on aatomijaamu

otstarbekas ehitada võimsusega 500 000 kuni 1 miljon kW. Tabelis 2 on toodud võrdlusandmed aatomi- ja kivisõejaama ehituskulude ja nende poolt toodetava elektrienergia omahinna kohta.

Tabel 2

Aatomi- ja kivisõejaama ehitamise ja nende poolt toodetava energia võrdlev maksumus  
(protsentides)

Näitaja	Kivisõe- jaam	Aatomi- jaam
Võimsus (neto) . . . . .	100	210
Uldmaksumus . . . . .	100	140
Installeeritud kW maksumus . . . . .	100	66
kWh omahind . . . . .	100	94
sellest:		
amortisatsioon . . . . .	16	74
kütus . . . . .	60	0
ekspluatatsioonikulud . . . . .	24	20
Energiakulu omatarbeks . . . . .	6—7	5—6

Tabelis on võetud 100%-ks kivisõejaama andmed. Nagu nähtub, on aatomijaama ligikaudu kahekordse võimsuse juures installeeritud kilovati maksumus ja kilovatt-tunni omahind temas väiksem kui kivisõe-tolmuküttega jaamas. «Ärapõletatud» kütuse maksumus aatomijaamas on võetud võrdne nulliga eeldusel, et saadava plutooniumi maksumus võrdub äratarvitatud uraani 235 maksumusega. Arvutused ühesuguse võimsusega jaamade kohta annavad kilovatt-tunni omahinna aatomijaamas 4% võrra kõrgema kui kivisõejaamas.

Tuumakütuse tootmise edasine täiustamine ning aatomijaamade projektide ja nende jaamade ekspluatatsiooni parendamine viib muidugi selleni, et mitte väga kauges tulevikus muutuvad aatomelektrijaamad tavalistele soojusseadmetele tõsisteks võistlejateks.

## AATOMIELEKTRIJAAMADE TÖÖ MÕNED ISEÄRASUSED

Reaktori statsionaarse töötamise korral jääb ajaühikus jaotuvate tuumade arv konstantseks. Järelikult jääb üheks ja selleksamaks «süütavate» neutronite arv ja reaktori võimsus. Niisugust reaktori seisundit nimetatakse kriitiliseks.

Kui ahelreaktsiooni käigus «süütavate» neutronite arv suureneb, siis suureneb ka reaktori võimsus. Vastupidi, kui «süütavate» neutronite arv, näiteks nende kao tõttu, hakkab vähenema, siis väheneb ka reaktori töötamise intensiivsus ja tema võimsus kahaneb.

Reaktori käikulaskmine tähendab tema viimist kriitilisse seisundisse. Vastavalt kütuse äratarvitamisele jaotuvate tuumade arv väheneb, jaotumiskildude arv suureneb (reaktor nagu «ummistuks šlakiga») ja seadme võimsus väheneb. Seega, kui reaktor on antud koormuse juures määratud lakkamatuks töötamiseks pikema ajavahemiku vältel, siis peab esialgne kütuse kogus ületama väärtuse, mille puhul reaktor antud võimsuse juures saavutab kriitilise seisundi. Suurtes reaktorites lubatakse kütuse ärapõlemist 5—10% võrra. Selle väärtuse ulatuses tulebki ette näha esialgset täiendava kütuse mahutamist reaktorisse.

Õeldust järeldub, et lisavõimsust, mida saadakse kütuse liia arvel, tuleb esialgu kompenseerida neutronite voo kunstliku vähendamisega. Seda teostatakse mitmesuguste reguleerimisvahendite, eriti varraste abil, mis on valmistatud näiteks kadmiumi või boori sisaldavatest materjalidest. Mõlemad mainitud ained neelavad ahnelt neutroneid.

Esialgse käivitamise hetkeni püsib regulaator nii, et ahelreaktsiooni ei toimu. Reaktori käivitamiseks asetatakse regulaator ümber niisugusesse asendisse, mille puhul süsteem saavutab oma kriitilise seisundi. Vastavalt kütuse ärapõlemisele muutub regulaatori asend, näiteks kadmiumvardad nihkuvad vähehaaval väljapoole, tagades sellega «süütavate» neutronite arvu konstantsuse, s. o. reaktori võimsuse konstantsuse.

Neutronite arvu konstantsus on seega tähtsaimaks teguriks, mis määrab ära protsesside püsikindluse reaktoris.

Neutronite kaod tekivad mitmel põhjusel.

Neutronid võivad hõlpsasti lennata reaktorist välja, läbides tema seinu. Selle vältimiseks kasutatakse erilisi pee-

geldajaid, mis tagastavad vabanenud neutronid aktiivsesse piirkonda.

Neutronid neelduvad mitmesugustes lisandites, mistõttu suurt tähtsust omab kütuse ja aeglustajate hoolikas puhastamine.

Lagunedes risustub kütus tuumakildudega, mis samuti tunduval määral neelavad neutroneid. Lagunemissaaduste kasvav kogus lämmatab reaktsiooni, reaktor «ummistub šlakiga» ja kustub. Seepärast tuleb kütust perioodiliselt «šlakist» puhastada.

Osa neutroneid neeldub reaktori konstruktsioonielementides, samuti torudesüsteemis ning jahutusvedelikus. Seetõttu peab reaktori konstruktsioon tagama metalli ja jahutusvedeliku minimaalse mahu. See omakorda tingib suuri soojuslikke erikoormusi soojuse reaktorist välja juhtimisel.

Reaktori juhtimine ja tema töö reguleerimine kujutavad enesest keerukaid ja vastutusrikkaid operatsioone. Eriti ei tohi jaotumise ahelreaktsiooni intensiivsuse muutumine olla kohalik, vaid peab toimuma kogu mahu ulatuses, et vältida reaktori ülekuumenemist ja riknemist. Kogu juhtimine peab muidugi olema automaatne.

Aatomijaamad ei vaja oma tööks õhku. See omab suurt tähtsust nende allveelaevadel kasutamise probleemi lahendamisel. Samadel kaalutlustel võib aatomijaamu ilma raskusteta ehitada maa alla.

Aatomijaamad ei mürgita atmosfääri suitsugaaside ega tahmaga. Jaama reaktorid ja elektromagnetilised pumbad töötavad mürata ja vibreerimiseta.

Võrreldes tavaliste soojusseadmetega on kütuse kaaluline kulu aatomijaamades tühine. Seetõttu ei oma transpordi probleem nende suhtes olulist tähtsust. See loob võimaluse paigutada aatomielektrijaamad tarbijate lähedusse, mitte aga kütuse leiupaikade juurde, nagu see esineb kohaliku madalasordilise kütusega töötavate soojusjaamade puhul.

Jaama kestav töötamine kütuse esialgse panuse arvel esitab erilisi nõudeid jaama kõigi osade töökindlusele ja kutsub esile vajaduse kõigi temas toimuvate protsesside juhtimise, reguleerimise ja kontrollimise täielikuks automatiseerimiseks.

Tänapäeva kaugjuhtimise ja automatiseerimise tehnika laialdased võimalused, seadmete suur võimsus ning nii-suguste suurt jõukulu nõudvate protsesside, nagu kütuse etteandmise ja tuha eemaldamise puudumine võimaldavad

äärmuseni vähendada teenindavat personali. Täieliku automatiseerimise puhul võib jaam töötada «luku taga», s. o. olla juhitav mingisugusest kesksest punktist, nagu see toimub rea hüdrotehniliste seadmete puhul.

Tuleb märkida, et aatomijaamade tarbijatele lähendamise võimaluse määrab ära küllaldaste veekoguste olemasolu. Et jaama turbiinisaal töötab tavalise skeemi kohaselt, siis nõuab turbomasinate jahutamine mitte väiksemas koguses vett kui tavalistes soojusjaamades, mis töötavad nendesamade auru parameetritega. Vee olemasolu määrab ära ka aatomiseadmete piirvõimsuse.

Erilist tähelepanu tuleb aatomiseadmete puhul osutada teenindava personali kaitsmisele radioaktiivse kiirguse toime eest. Aatomijaama kõikidesse ruumidesse on paigutatud vastavad indikaatorid, mis näitavad hajunud kiirguse taset. Teenindavat personali tuleb pärast iga vahetust eriliselt kontrollida, kusjuures sellekohaste riistadega tehakse kindlaks iga isiku radioaktiivse nakatuse määr. Radioaktiivsuse tõttu ohtlikesse ruumidesse minekul kasutatakse erirõivastust jne.

Jahutusvedelikud muutuvad kiiresti radioaktiivseks, mistõttu seadmed, milledega need vedelikud kokku puutuvad, nõuavad kaitset, mis aga ühtlasi peab võimaldama ka nendele ligipääsu vaatluste ja remondi otstarbel.

Aatomiseadmete suur radioaktiivsus on nende põhiliseks puuduseks. Seoses sellega tuleb ette näha kõik ettevaatusabinõud, et vältida ümbritseva maa-ala ja veekogude radioaktiivset nakatust. Sellest seisukohast on väga oluline saavutada radioaktiivsete vedelike minimaalseid kadusid jaamas. Mitmesuguste heitvete juhtimine veekogudesse on lubamatu. Nende jaoks tuleb ette näha erilised mahutid, milledes radioaktiivseid vedelikke säilitatakse teatava aja jooksul, et nad kaotaksid oma aktiivsuse ja muutuksid kahjutuks.

## TEISI VIISE AATOMIENERGIA KASUTAMISEKS

Tuumaenergia avastamine kutsub esile unistuse kompaksete võimsate energiaallikate loomisest, nende võimaliku kasutamiseга väiketarbijate toitmiseks. Võib mainida näiteks järgmist skeemi kergete transpordimasinate mootori jaoks. Nagu oli mainitud, algab tuumaenergia vabanemine,

kui süsteem saavutab kriitilise seisundi. Niisuguse seisundi saabumine sõltub reaktori mõõtmeist ja kujust, tema konstruktsioonist, kütuse paigutusest, selle rikastatuse määrast, neutronite kaost jne.

Kujutleme kolviga varustatud silindrit. Silinder täidetakse teatava rõhu all oleva gaasilise tuumakütusega. Niisugune süsteem võib töötada reaktorseadmena, kui eeldada, et ta satub kriitilisse seisundisse gaasi teatud mahuni kokkusurumisel. Selle saavutamiseks on vaja neutronite kao peaaegu täielikku puudumist. Seetõttu peab silinder olema valmistatud materjalist, mis neutroneid hästi peegeldab. Seadme reguleerimisvahendid peavad säilitama energia vabanemist kindla võimsusega, samuti käivitama ja peatama süsteemi. Kahe silindri puhul peaks seade töötama järgneval viisil. Silindris oleva gaasi kokkusurumisel teki- vad gaasis tuumaprotsessid, mis põhjustavad tema jõulist paisumist ja kolvi väljatõukumist. Kui gaas on paisunud vastava mahuni, lakkavad temas tuumareaktsioonid. Kolvi poolt sooritatud tööd kasutatakse ära gaasi kokkusurumiseks teises silindris, kus kulgeb samasugune protsess.

Ühendades mitu niisugust silindrit, oleks võimalik saada mootor, mis töötab automootori taoliselt. Oma võimaluste mõttes on see idee ülimalt veetlev. Tarbib ju auto «Pobeda» 100 000 km läbisõitmiseks 11—15 t bensiini. On hõlpus arvutada, et tuumakütuse tarvitamisel oleks samasuguse maa läbisõitmiseks vaja kokku kõigest 6—8 g kütust. Lubades kütuse ärapõlemist 10% ulatuses, leiame, et mootori lakkamatu töötamise tagamiseks 100 000 km ulatuses tuleb temasse ühekordselt paigutada 60—80 g kütust. Niisuguse kütusevaruga automootor vabastab kütuse eest hoolitsemisest real juhtudel mitmeks aastaks.

Erinevalt kirjeldatud skeemist, mis tänapäeval muidugi kuulub fantaasia valdkonda, tuleb lugeda aatomiseadme loomist, mille põhielemendiks on reaktor, tehniliselt täiesti lahendatavaks ülesandeks. Niisuguses seadmes moodustub reaktoris vabaneva soojuse arvel aur või kuumeneb gaas, mis paneb liikuma auru- või vastavalt gaasiturbiini selle mehaanilise töö tegemiseks, mille sooritamiseks seade on määratud.

Kõige suuremaid väljavaateid pakub niisuguste aatomi- seadeldiste kasutamine laevadel, aga ka seal, kus pole otse- selt inimesi (näiteks lennunduses kaugjuhitavatel lennuki-

tel), sest sel juhul puudub vajadus ehitada rasket kaitset reaktori kiirguse eest.

Tuumakütuse kasutamine võib ilmselt omada suurt tähtsust planeetidevaheliste lendude probleemi lahendamisel.

Suurt huvi pakub põhimõttelt teistsugune tuumaenergia ärakasutamise skeem. See põhineb niinimetatud voltoelektroonisel efektil ja taotleb elektrienergia vahetu saamise eesmärki.

Selleks kasutatakse tehislikku radioaktiivset isotoopi, näiteks strontsiumi 90, mida saadakse jaotumissaadusena tuumareaktorites. Strontsiumi 90 omapäraks on suur elektronide väljakiirgamise intensiivsus. Selle radioaktiivse isotoobi poolestusperiood on 32 aastat. Tema võimet elektrone kiirata kasutatakse ära järgmisel viisil.

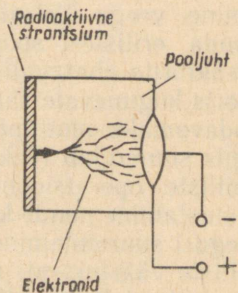
Õhuke (kümnendikesse millimeetritesse ulatuv) strontsiumikiht kantakse kvartsist pooljuhile, mis on selleks otstarbeks eriliselt töödeldud (joon. 20). Töötlemise ülesandeks on kvartsisolaatori muutmine pooljuhiks, milles sisalduvad nõrgalt sidestatud elektronid.

Strontsium minetab ohtralt elektrone, mis omavad suurt energiat ja kvartsplaadikest läbides haaravad pooljuhist kaasa uusi elektrone. Üks strontsiumi elektron haarab kaasa 200 000 uut elektroni. Selle tulemusena tekib vool, mille tugevus on viis miljondikku amprit ja pinge kaks kümnen-dikku volti.

Vaatamata väga nõrgale voolule üksikrakus on juba praegu õnnestunud luua patareisid, mis võivad teenindada väikesi seadmeid (raadioriistu, telefoniseadmeid jt.). Edaspidi kahtlemata osutub võimalikuks saada sel viisil ka suuri võimsusi.

See idee on väga originaalne ja viljakas, sest ta on suunatud tuumaenergia vahetule muundamisele elektrienergiaks.

Tuumaanergeetika on kõige noorem rahvamajandusharu, kuid pole kahtlust, et temale kuulub suur tulevik. Tema areng püstitab teadusele ning tööstusele palju uusi üles-



Joon. 20. Radioaktiivse strontsiumi 90 abil elektrivoolu saamise skeem.

andeid ja probleeme. Laialdane tegevusväli avaneb teadlastele ning inseneridele peaaegu kõikidel teaduse ja tehnika aladel.

Erist huvi vääriavad soojusjuhtivuse küsimused. Reaktorite suur kompaktsus nõuab maksimaalsete soojuslähikandetegurite saavutamist ning kõige ratsionaalsemate konstruktsioonidega reaktorite loomist, milles muutumatu võimsuse puhul oleks vähendatav esialgse kütuse kogus ja sellega ka seadmete maksumus.

Niisugused küsimused, nagu mitmesuguste materjalide käitumine tugeva neutronite voo toimetel; reaktorite jahutamine veega ülekritiilisel rõhul, mis annab võimaluse loobuda erilistest soojusvahendajatest; võitlus korrosiooniga reaktorite ebatavalistes eksploatatsioonitingimustes; reaktoris kogunevate saaduste lahutamise keemiliste protsesside odavamaks muutmine; kütuse sügavam «väljapõletamine», mis suurendab reaktorite töötamiskestust ja vähendab keemiliste operatsioonide arvu; elektromagnetiliste pumpade täiustamine nende kasuteguri suurendamise eesmärgil; iibeteguri suurendamine paljundavates reaktorites kuni teoreetiliste väärtusteni; reaktorite lihtsustatud tüüpide ja nende tootmise tehnoloogiliste meetodite väljatöötamine ning suur hulk teisi probleeme ootavad lahendamist.

Tunduv hulk ülesandeid kerkib paratamatult esile tuumakütuse kasutamisel teistes rahvamajandusharudes, eriti transpordis.

Peaaegu täiesti käsitlemata on senini jäänud termotuuma-reaktsioonide rahulikel eesmärkidel kasutamise probleem.

\* \*  
\*

Ainult inimkond, kes on vabanenud kapitalismi köidikuist, saab täielikult lahendada tuumaenergia rahulikul otstarbel kasutamise probleemi.

Nõukogude Liidus toimuvad edukalt tööd aatomienergia energeetilistel eesmärkidel kasutamise alal. Vaatamata sellele, et meie maa valdab aatomi- ja vesinikurelva tootmise saladust, astub nõukogude rahvas üksmeelselt välja iga liiki massilise hävitamise relva tingimusteta keelamise eest.

Nõukogude Liit loeb oma tähtsaimaks ülesandeks saavutada seda, et aatomi suur jõud kasutataks võimalikult kiiremini ära meie rahva ja kogu inimkonna hüvanguks.

## SISUKORD

### Esimene loeng

Sissejuhatus . . . . .	3
Tuumakütus . . . . .	7
Uraanituumade jaotumise energia olemus . . . . .	13
Lõhustuvate materjalide tuumaenergia kasutamine elektrijaamades . . . . .	20
Aatomijaamade põhimõttelised skeemid . . . . .	20
Reaktorite põhitüübid . . . . .	23

### Teine loeng

Lõhustuvate materjalide tuumaenergia kasutamine elektrijaamades (järg) . . . . .	25
Puhtenergeetiliste reaktorite kasutamine . . . . .	25
Reaktor-muundajate kasutamine . . . . .	29
Paljundavate reaktorite (paljundajate, briiderite) kasutamine . . . . .	35
Aatomielektrijaamade ökonomika . . . . .	45
Aatomielektrijaamade töö mõned iseärasused . . . . .	49
Teisi viise aatomienergia kasutamiseks . . . . .	51

---

Лауреат сталинской премии  
доктор технических наук  
В. П. Ромадин

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Эстонское Государственное Издательство  
Таллин, Пярну маантэ 10

\*

Toimetaja R. Toming

Tehniline toimetaja L. Uuspõld

Korrektorid M. Amon ja S. Aron

Ladumisele antud 17. XI 1955. Trükkimisele  
antud 13. XII 1955. Paber 54×84, 1/16.  
Trükipoognaid 3,5. Formaadile 60×92 ko-  
haldatud trükipoognaid 2,87. Arvuuspoog-  
naid 3,03. Trükiarv 5000. MB-18480. Tell-  
mise nr. 3174. Trükikoda «Tartu Kommunist»,  
Tartu, Ülikooli 17/19.

Hind rbl. 1.60



Rbl. 1.60

A-17346  
            
206

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00463512 6