

VELJONNA  
TOODINNA  
ENERGIASITOSTANNA  
ENNERIAJONNAN  
ELETTRIKKONNAN  
EJUKESKONNAN



620.9

L721

V. Loodmaa

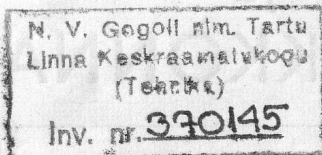
ENERGIAST,  
ELEKTRIAUTOST  
ja  
ELUKESKKONNAST

---

Tallinn · «Valgus» 1980

370145

Kaane kujundanud A. Tali



### Loodmaa, V.

L 72 Energiast, elektriautost ja elukeskkonnast. — Tln.: Valgus, 1980. — 88 lk., ill.

Raamatus käsitletakse mõningaid nüüdisaja inimkonna ees seisvaid energia- ja ökoloogilise kriisiga seotud probleeme. Tutvustatakse teaduse saavutusi ja uusi ideid, mis võimaldaksid toota ja kasutada üha rohkem energiat, ilma et biosfäär selle tagajärjel elamiskõlbmatuks muutuks. Vaadeldakse elektrienergia tootmise võimalusi päikese-, tuule- ja tuumaenergiast ning ookeanide, maasisesest ja fossiilkütuste energiast. Kirjeldatakse transpordivahendite energiaallikaid, kütuseelemente ja akusid ning käsitletakse vesiniku kui tulevikukütusega seotud probleeme.

Raamat on mõeldud keskkoolide vanemate klasside õpilastele, üliõpilastele, inseneridele, õpetajatele ning kõigile, kes tunnevad huvi tehnika arengu ja keskkonnakaitse vastu.

1603000000

L  $\frac{21002-042}{M902(16)-80}$  TL 7-21-79

5(069)

## LUGEJALE

Me elame suurepärasel ja huvitaval ajal. Kõik meie ümber liigub ja areneb üha kiiremini, ka meie ise. Elame teaduse ja tehnika üha kiirema arengu ajastul, inimkonna tormilise progressi ajastul. Oleme optimistid.

Kes on lugenud viimastel aastatel tähelepanelikult ajalehti ja populaarteaduslikke ajakirju, eriti aga teaduslikke väljaandeid, on kahtlemata märganud ka murelikke, isegi pessimistlikke mõtteavaldusi inimkonna tuleviku suhtes. Seda laadi mõtted on tavaliselt ikka seotud mingisuguste kriisidega — energia-, ökoloogilise, hapniku- või mõne muu kriisiga. Sageli küsitakse seejuures, kas tehnikat on ikka arendatud õiges suunas, kas tee, mida mööda liigume, on ainuõige ja parim.

Me elame planeedil nimega Maa, oleme temaga tuhande niidiga seotud. Meie koduplaneet on aga lõpliku suurusega, lõplike õhu-, vee- ja kaevandatavate toorainete varudega. Neid tuleb heaperemehelikult kasutada. Nõukogude inimestelt nõuab seda ka uus konstitutsioon, mille 67. paragrahv ütleb: «Nõukogude Liidu kodanikud on kohustatud hoidma loodust ja kaitsma tema rikkusi.» Maa-keral elab palju erineva arengutaseme ja arusaamadega inimesi ja rahvaid. Iga kildkond, rahvas ja riik arvestab eeskätt oma lähemaid huve. On siis inimese kui liigi huve arvestavad lahendused üldse võimalikud? Arvutused näitavad, et on.

Riikide kooseksisteerimine on kirjeldatav sama matemaatilise mudeliga nagu meeste tegevus paadis. Kuigi igaühel on omad huvid, on kõigi jaoks esmase tähtsusega, et paat ümber ei läheks. Selleks on vaja kõigi liikmete vahel

saavutada mõjus ja püsiv kokkulepe. Mõjusus tähendab, et valitud kokkuleppevariant on igale osanikule kõige kasulikum. Püsivus tähendab kokkuleppe niisugust omadust, et selle rikkuja kaotab rohkem kui teised lepinguosalised. Moskva ülikooli professor J. Germeier tõestas matemaatiliselt, et selline ühe paadi probleemi mõjus ja püsiv lahendus ka tööpoolest eksisteerib. Seda tulemust võib pidada rahvusvaheliste kokkulepete tee õigsuse täpisteaduslikuks tõestuseks.

Üks inimkonna tuleviku prognoosimisega tegelev rahvusvaheline teadlaste rühmitus on tuntud nn. Rooma klubina. Sellesse klubisse kuuluvate teadlaste eestvedamisel tehtud arvutused, aga samuti Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia kirjavahetajaliikme N. Moissejevi maailmamudelid näitavad, et inimkonna piiramatul arenemisel praeguste seaduspärasuste järgi pole enam kaua võimalik. Stiihilist, pimedat progressi peab asendama arukas reguleeritud areng. Tekkivaid kriitilisi situatsioone tuleb hoolikalt uurida ja sellega ei tohi viivitada.

Mis siis üldse on progress? Kõige üldisemalt tähendab see areneva süsteemi kaugenemist algolekust. Akadeemik Ilmar Öpik märgib, et kuigi võõrsõnal «progress» on mitmeid tähendusvarjundeid, mõistame selle all enamasti ikka mingit kvalitatiiivset arengut, aga mitte lihtsat kvantitatiivset kuhjumist. Akadeemik Gustav Naani järgi seisab ühiskonna progress eeskätt tema käsutuses olevate materiaalsete ja vaimsete ressursside (lühidalt negentroopia) pidevas suurendamises. Termodünaamika teise seaduse järgi, mis on looduseaduste seas üks üldisemaid, ei ole negentroopia (informatsiooni, korra, kõrgenivoolise energia) tekkimine väiksemas süsteemis võimalik, ilma et seda ümbritsevas süsteemis tekiks korrapäratuse, kaose (lühidalt entroopia) kasv. Seetõttu kaasnebki progressiga elukeskkonna saastamine, mis saab eriti häirivaks siis, kui kvalitatiiivsele arengule lisandub pidurdamatu kvantitatiivne kuhjumine.

Nagu näete, tõstatab inimkonna areng terve rea keerulisi tehnilisi, bioloogilisi, filosoofilisi jm. küsimusi, mis on omavahel tihedalt läbi põimunud. Selle sasipuntra lahtiharutamise pole kerge. Mõelda on aga vaja. Me peame ennast küll teoinimesteks, kuid see ei õigusta veel arutat rabelemist. Albert Einstein pidas, muide, inimkonna õnnetuseks seda, et tal ei jätku pinke, kuhu järelemõtlemiseks maha istuda. Käesolevas raamatus ei püüta analüüsida

üldnimetatud probleeme kogu nende keerukuses. Tähelepanu on pööratud üksnes mõningatele tehnilistele ja energeetilistele aspektidele.

Inimühiskonna areng ei ole võimalik ilma energiata. Akadeemik J. Artobolevski sõnade järgi on energiatööstus teaduse ja tehnika progressi aluste alus. Valdava osa energiast saab nüüdisühiskond fossiilkütuste põletamise teel. Just see ongi paljude meie aja hädade põhjus. Energia tootmisel on kasutegur väike, hävivad hinnalised maa- varad, väheneb õhu hapnikusisaldus ning suureneb elukeskkonna reostatus. Fossiilkütuste tekkeks on kulunud ligemale miljard aastat, inimkond on aga suuteline need hävitama mõne sajandi jooksul. Termoenergeetika hädad suurenevad sageli ka inimeste rumaluse, kultuurituse, laiskuse või hoolimatuse tõttu. Kõrgesti arenenud kapitalismaade tarbijalik ehk nn. äraviskajate ühiskond raiskab sageli rohkem energiat ning tekitab rohkem jäätmeid, kui see mõistliku elukorralduse juures vajalik oleks.

Teiselt poolt ei tohi ka looduskaitsega üle pakkuda. Selle mõnevõrra äärmuslikuks näiteks on eesti keelde tõlgitud R. Carsoni «Hääletu kevad», mis kutsub mürkkemikaalide täielikule eitamisele. Kritiseerides seda üliiranget seisukohta, märgib Nobeli preemia laureaat N. Borlaug, et inimkond seisab dilemma ees, kas süüa mürgitatud toitu või surra nälga. Loomulikult valitakse kahest halvast parem. On ju mürkide mõju varjatud ja mõnikord isegi vaieldav. Tagasi on tulnud võtta ka liiga ranged «Puhta Õhu Akti» nõuded USA-s. Eks meilgi ole üle pingutatud, püütud näiteks haljastada alasid, mida oleks olnud otstarbekam asfalteerida, ja kuulutatud hunt vaata et kaitset vajavaks liigiks.

Mõistlikuks ei saa pidada ka ühiskonna energiavajaduste rahuldamist fossiilkütuste põletamise teel. Lahendus peitub siin ühelt poolt uute energiaallikate kasutuselevõtmises ning teiselt poolt termilise tehnoloogia asendamises elektrokeemiliselega. Uute energiaallikatena tulevad kõigepealt arvesse tuumaenergia ning looduslike geofüüsikaliste protsesside taastuvad ja mittesaastavad energiavarud, eeskätt päikeseenergia.

Käesolev raamat ongi pühendatud mõningatele energia tootmise ja kasutamise probleemidele. Juttu tuleb juba lahendatud, aga ka veel lahendamata ja isegi põhimõtteliselt vaieldavatest küsimustest. Et energia tootmise, transportimise ning säilitamise ratsionaalseim lahendus on

sageli elektrokeemiline, siis püütakse jõudumööda ka selle valdkonna saavutusi tutvustada. Elektrokeemiat, mida enamik lugejaid seostab vast ainult elektrolüüsi ja akudega, on viimasel ajal hakatud nimetama tulevikuenergeetika võtmeks. Elektrokeemiliselt toodetav vesinik on üha defitsiitsemaks muutuva nafta ja maagaasi kõige tõenäolisem asendaja.

Lugemisel ei maksa siit otsida eriti täpseid andmeid energia tootmise ja tarbimise ega ka fossiilkütuste varude, maakera energiabilansi ning energia tootmise meetodite kasutegurite kohta. Üldiste seaduspärasuste illustreerimiseks piisab suurusjärgu täpsusest. Et sellised andmed on ka soliidsetes ja mahukates käsiraamatutes sageli erinevad ning vasturääkivad, siis on raamatu lõpus toodud nende ajakirjade ja raamatute nimekiri, kust andmed on võetud. Energia mõõtmiseks kasutatakse maailmas väga mitmesuguseid ühikuid. Käesolevas raamatus kasutatakse kilovatt-tundi (kW·h), mis võrdub  $3,6 \cdot 10^6$  džauliga (J), kilokalorit (kcal), mis võrdub  $4,19 \cdot 10^3$  J, ja tingkütuse tonni, mis võrdub  $2,9 \cdot 10^{10}$  J.

Raamatus püütakse lugejale näidata, millised ohud varitsevad inimkonda ja milliseid teid on välja pakutud nendest hoidumiseks. Kuigi mõni idee on realiseerimisküpsusest kaugel, on ta põhimõtteliselt uudne ja huvitav. Loodan, et lugeja leiab siit mõndagi, mis õhutab edasi mõtlema ja lugema. Mõnusat lugemislusti!

Tartu, juuni 1978.

## I peatükk

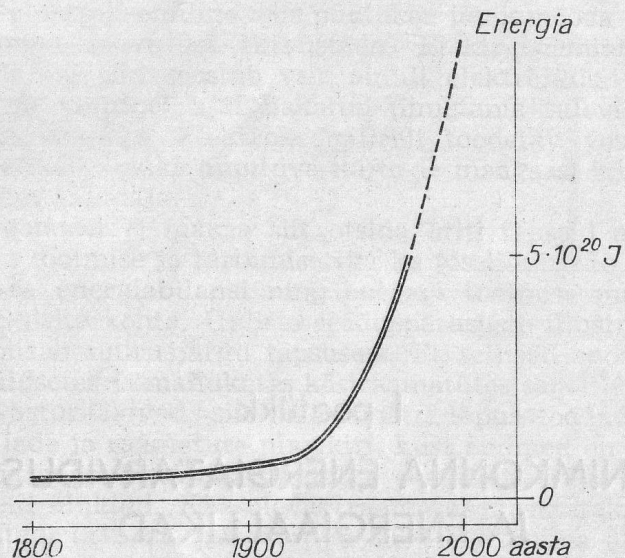
# INIMKONNA ENERGIATARVIDUS JA ENERGIALLIKAD

### 1. KUI PALJU JA MILLEKS ME ENERGIAT VAJAME?

Nüüdisaja inimkonna eksisteerimine ja areng on lahutamatu seotud energia üha suureneva tootmise ja tarbimisega. Toodetava energia hulk on riigi arengutaseme üks olulisemaid näitajaid. Keskmiselt toodetakse maailmas 3000, arenenud kapitalistlikes maades kuni 18 000 ja Indias kõigest mõnisada kilovatt-tundi energiat elaniku kohta aastas. Kogu inimkonna aastane energiatoodang läheneb juba  $10^{14}$  kilovatt-tunnile. Selle tootmiseks kulub aastas ligemale  $10^{10}$  tonni kütust ja  $2 \cdot 10^{10}$  tonni hapnikku. Saab ju inimkond valdava osa energiast ikka veel fossiilkütuste põletamise teel.

Inimkonna energiatarvidus, nagu paljud teisedki tsivilisatsiooni arengut iseloomustavad suurused, kasvab üldjoontes eksponentsiaalse seaduspärasuse järgi. Viimase 20—30 aasta jooksul on inimkond tarvitanud niisama palju energiat kui kogu eelneva arenguloo vältel kokku. Kui areng jätkub sellesama seaduspärasuse järgi, siis on oodata energiatoodangu suisa plahvatuslikku suurenemist — kahekordistumist ligikaudu iga kümne aasta järel.

Toodetud energiast kulutatakse umbes 30% tööstuses, niisama palju transpordis ja elektrienergia tootmiseks ning kõigest 10% mujal. Et tootmist üha enam mehhaniseeritakse ning kontsentreeritumad ja kergemini kättesaadavad



Inimkonna energiatarviduse kasv viimase saja aasta jooksul.

maavarad on sageli juba ära kulutatud, siis energiakulu ühe toodanguühiku kohta aina suureneb. Nii on asi ka põllumajanduses. USA andmed näitavad, et üks põllumajanduses kulutatud kilokalor andis 1945. aastal 3,26 kcal eest toodangut, 1970. aastal aga kõigest 2,52 kcal. (Siin on kõik — töö, väetised, niisutamine, transport ja ka saak — arvestatud energiaühikutes.) Energiamahukas on ka tsiviliseeritud ühiskonna toiduks minevate loomsete valkude tootmine. Näiteks kilokalori toidu tootmiseks kulub riisikasvatuses 0,05 ja puuviljakasvatuses 0,5 kcal, ookeanikalapüügil ja nuumkarjakasvatuses aga 20 kcal. Arvutused näitavad, et kui 12-aastane poiss toituks ainult loomalihast, siis tarvitaks ta aastas 4,5 noorlooma, mille kasvatamiseks kuluks 8211 kg ( $20 \cdot 10^6$  taime) lutserni. Poiss saaks aastas  $1,2 \cdot 10^6$  kcal energiat, lutserni kasvatamiseks kuluks aga  $6,3 \cdot 10^9$  kcal päikeseenergiat.

Inimkonna eksisteerimiseks on eeskätt vaja toitu, energiat ja sobivat elukeskkonda. Energia on nendest kõige olulisem, sest kui on küllaldaselt odavat energiat, on meil rohkem toitu (tänu kõrbete niisutamisele) ja elame puhtas keskkonnas (jäätmete ümbertöötamine ja utiliseeri-

mine). Iseasi on muidugi see, kuidas nii suurt energiahulka elukeskkonda rikkumata üldse toota.

Nüüdisaegne arenenud ühiskond kulutab energiat ja loodusrikkusi sageli ebaotstarbekalt ning tekitab arutult jäätmeid. Eriti selgesti väljendub see USA-s, kus ollakse harjunud suhteliselt odava energiaga. Energiakulutused toodanguühikule on seal 40% suuremad kui umbes samasuguse elatustasemega Rootsis. Kuni inimkonna käsutuses pole piisavalt odavat ja mittesaastavat energiat, on lootus, et küllap inimkond tänapäeva prügimäed tulevikus ära kasutab, ainult enesepete. Tuleb mõista, et mitte ükski bioloogiline liik ei saa eksisteerida oma elutegevuse jääkproduktidest moodustunud keskkonnas.

## 2. ENERGIA JA SELLE ESINEMISVORMID

Ülalöeldust selgus, et inimkonna eksisteerimiseks on energia hädavajalik. Teame ka, et seda energiat pole meie käsutuses sugugi piiramatult ja et sageli väljendub energia nappus koguni kriisina. Teiselt poolt mäletame, et üks looduse põhiseadusi on energia jäävuse seadus, mille kohaselt energia koguhulk on jääv ja energia võib ainult ühest liigist teise üle minna. Järelikult ei huvita meid mitte iga-sugune energia, vaid ainult selline, mis on võimeline tegema tööd. Energiaga on üldse nii nagu O. Lutsu kunst-kärner Soini varandusega, mis pole küll maailmast kadunud, aga mida tema (meie) enam ei saa kasutada. Et need asjad selgeks mõelda, peame lühidalt meenutama mõningaid termodünaamika põhitõdesid.

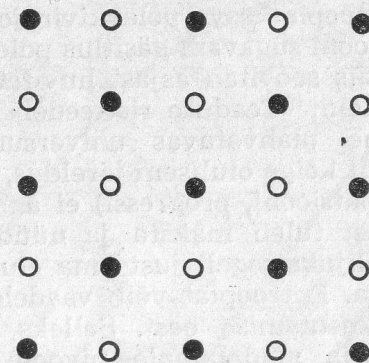
Et energia on väga üldine mõiste, siis pole tema ühene defineerimine lihtne, sest puudub veel üldisem mõiste, mille kaudu seda teha. Seetõttu defineeritakse energiat tavaliselt võimena teha tööd. Nii saame energiat, tööd ja soojust mõõta ühtedes ja nendessamades ühikutes (džaulides, kilokalorites, kilovatt-tundides). Süsteemi (vaadeldava ruumiosa koos selles olevate kehadega) koguenergia koosneb siseenergiast, kineetilisest energiast (kui süsteem ter-vikuna liigub) ja potentsiaalsest energiast (süsteemi asendi energiast maakera gravitatsiooniväljas). Siseenergia mõiste haarab kõikvõimalike süsteemisüsteemide osakeste liikumist ja nendevaheliste sidemete energiad. Osakestevahelistest keemilistest sidemetest tingitud siseenergia on keemiline energia. Töö kujutab endast osakeste suunatud

korrapärast liikumist, soojus aga kaootilist korrapäratut liikumist. Termodünaamikas näidatakse, et kui töö saab alati täielikult soojuseks muutuda, siis madalatemperatuuriliste kehade soojus tööks muutuda ei saa. Selles mõttes on ta kasutu energia.

Termodünaamika kui teadus rajaneb kolmel põhiseadusel, kolmel looduses eksisteerival keelul: energiat kulutamata ei saa tööd (I seadus), soojus ei lähe isevooluliselt külmemalt kehalt soojemale (II seadus) ja absoluutne nulltemperatuur (0 K) on saavutamatu. Esimene põhiseadus keelab igiliikuri, millest kunagi unistasid paljud «suured leidurid». Teine seadus, mis määrab protsesside suuna looduses, teeb võimatuks näiteks maailmameres peituvat tohtu soojushulga muutmise elektrienergiaks.

Termodünaamika teine seadus on üks fundamentaalseid loodusseadusi, mille mõistmine on autori arvates absoluutselt hädavajalik, et meie nüüdismaailma keerukates nähtustes veidigi orienteeruda. See, et soojus spontaanselt külmemalt kehalt soojemale ei lähe, on üldmõistetav (muidu võiks ju kahes kõrvuti olevas veenõus ühe vesi kuumeneda ja teises jäätuda). Omaks võetud on ka arusaam, et soojusmasina kasutegur on põhimõtteliselt väike (ei ületa tavaliselt 40%). Selle kasuteguri piiri kirjeldav entroopia ( $S$ ) mõiste tundub aga juba keerukam. Entroopia muutus on määratud pöördvalt töötavale soojusmasinale antava lõpmata väikese soojushulga ja töötemperatuuri suhtena.

Olgu nüüd entroopia ja soojusmasina kasuteguriga kuidas tahes, hoopiski olulisem ja arusaadavam on entroopia kui korrapäratuse mõõt, entroopia muutus protsesside tõenäosusliku suuna näitajana. Selle mõistmiseks teeme järgmise mõttelise eksperimendi. Olgu meil absoluutselt puhta aine kristall absoluutsel nulltemperatuuril ja olgu meil võimalus kristallivõre tsentrites asuvaid osakesi pildistada. Ühte sellist fotot illustreerib joonis. (NB! Eksperiment on mõtteline ja tegelik pildistamine võimatu.) Absoluutsel nulltemperatuuril oleksid eri hetkedel tehtud fotod identsed, seega makrosüsteemi (kristalli) olekut kirjeldavate mikroolekute (osakeste eri asendite) arv oleks üks. Seda nimetatakse termodünaamiliseks tõenäosuseks ja tähistatakse  $W$ . Kui temperatuur tõuseb, hakkavad osakesed liikuma (kõigepealt võnkuma tasakaaluasendi ümber) ja nende eri asendeid kajastavate fotode arv muutub väga suureks, seda suuremaks, mida suurem on süsteem ja mida



Niisugune võib olla korrapärase kristallivõre tsentrite paigutus

kaootilisem on liikumine (mida kõrgem on temperatuur). Seega kirjeldab reaalse süsteemi (kristalli) olekut väga suur hulk üksteisest erinevaid mikroolekuid  $W$ . Entroopia ja termodünaamilise tõenäosuse vahel valitseb seos  $S = k \ln W$ , kus  $k$  on võrdetegur (Boltzmanni konstant) ja  $\ln$  naturaallogaritmide tähis. Sellest seosest selgub, et mida korrapäratum on mikroosakeste liikumine, seda tõenäolisem on süsteemi olek ja seda suurem on süsteemi entroopia.

Kui väljendada termodünaamika II seadust entroopia kaudu, selgub, et reaalsed isevoolulised protsessid kulgevad alati süsteemi entroopia kasvu suunas. See aga tähendab ju, et kõik läheb isevooluliselt korrast ära, liigub kaose poole. Küberneetika ja informatsiooniteooria kaudu on entroopia mõiste omandanud üldtähtsuse määramatuse korrapäratuse ja informatsiooni puudumise iseloomustajana. Kuidas siis kord, struktuur ja informatsioon üldse võimalikud on? Ega need süsteemis kui tervikus olegi, kuid selle üksikosades küll. Mis on osa ja mis tervik, sõltub probleemist. Maiste nähtuste analüüsil on tervikuks tavaliselt Maa, Päikesesüsteem või Galaktika. Korra ja informatsiooni (neid mõõdetakse entroopia negatiivse väärtusega ehk negentroopiaga) kasvu eest süsteemi mingis osas tuleb tasuda entroopia (kaose) kasvuga süsteemis tervikuna. Kui te näiteks loete seda teksti, ammutate informatsiooni ja loote korda oma ajudes, siis te kulutate selleks mitmesugust energiat, sealhulgas ilmselt ka toa valgustamiseks elektrienergiat, mille tootmine aga tähendab

dab maakera entroopia kasvu põlevkivirajoonis. Et entroopia ja informatsiooni sügavam käsitus pole käesoleva raamatu eesmärk, siis soovitan asjast huvitatuil lugeda näiteks M. Volkenšteini «Teaduse ristteedel»\* või G. Naani artiklit «Inimene plahvatavas universumis»\*\*. Edasise jaoks on meile siit kõige olulisem järeldus, et mitte midagi (energiat, informatsiooni, progressi) ei anna loodus meile tasuta. Kõige eest tuleb maksta ja nüüdisaja inimkond peab maksma kahjuks sageli just oma elukeskkonna halvenemise hinnaga. Entroopiat võib vaadelda lõivuna loodusele energia kasutamise eest. Selleks, et saada tööd, tuleb energia viia madalamale nivoole, degradeerida, hajutada, mis aga tähendabki keskkonna entroopia suurendamist.

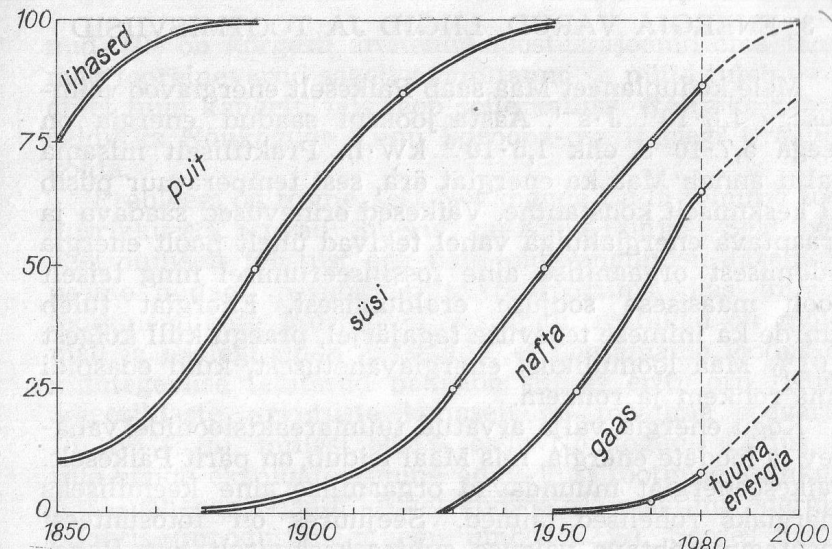
Ülalöeldust järeldub, et see, mida me tegelikult vajame, pole mitte lihtsalt energia, vaid kõrgele nivool olev töövõimeline energia. Teisiti öeldes on see negentroopia. Seda energiaosa, mis olemasolevates kindlates tingimustes võib muutuda kasulikuks tööks, nimetatakse vabaks energiaks. Ülejäänud on seotud energia, milleks on tavaliselt madalatemperatuuriliste kehade soojus. Et töötava süsteemi energia degradeerub, siis tema vaba energia väheneb. Seda tõsiasi väljendab vaba energia miinimumi printsiip, mis on looduse üks olulisemaid ja üldisemaid seaduspärasusi ja mis tähendab, et kõik isevooluliselt kulgevad protsessid vähendavad süsteemi vaba energiat (alandavad energia nivood).

Vaatleme nüüd, millistes vormides energia looduses esineb ja millised on inimese seisukohalt väärtuslikud, s. o. töövõimelised vormid. Inimese jaoks on kahtlemata kõige eelistatumaks energiavormiks elektrienergia, sest seda saab lihtsalt ja peaaegu täielikult tööks ning teisteks energialiikideks muundada. Ka on elektrienergiat hõlpus transportida. Teisi energialiike hinnatakse sageli selle järgi, kui kergesti on nad muundatavad elektrienergiaks.

Makrosüsteemide kui tervikute kineetiline ja potentsiaalne energia on põhimõtteliselt väljaspool konkurentsi, sest nende muutmisel elektrienergiaks või tööks keskkonna entroopia ei kasva. Looduses on selliseks energiaks tuule- ja hüdroenergia. Nende kasutamine ei kahjusta elu-

\* Volkenštein, M. Teaduse ristteedel. — Tln.: Valgus, 1975. — 338 lk.

\*\* Naan, G. Inimene plahvatavas universumis. — Sirp ja Vasar, 1969, 11., 18. ja 25. aprill.



Eri energiaallikate osatähtsuse muutumine USA-s viimase 130 aasta vältel ja prognoosid 2000. aastaks

keskkonda, kuid kahjuks ei kata hüdroenergia varud kaugeltki inimkonna vajadusi, tuuleenergia on aga liiga väikese tihedusega. Keskkonda mittesaastav on muidugi päikeseenergia, kuid sellegi tihedus on madal. Lisaks tehnilistele raskustele ei saa päikeseenergiat ka põhimõtteliselt täielikult tööks muuta.

Valdava osa (üle 90%) energiast saab inimkond kütuse põletamisel. Põletamine tähendab lähteainete keerukate molekulide muutmist süsinikdioksiidiks ja veeks ning seega süsteemi entroopia olulist kasvu. Energia vabaneb seejuures soojusena ja sellest kasuliku töö (elektrienergia) saamisel tuleks suurem osa soojust vastavalt termodünaamika II seadusele hajutada. Järelikult pole see kõige levinum energia tootmise viis mõistlik.

Peale eespool nimetatud vormide esineb energia maa- ja geotermilise, loodete ja tuumaenergiana. Viimase varud on suured ja inimkonna tulevik on selle energialiigiga kindlasti seotud, kuid tuumaenergia, eriti termotuumaenergia rakendamisel tuleb veel lahendada palju probleeme.

Joonisel on esitatud olulisemate energialiikide osatähtsus USA-s viimase poolteise sajandi vältel.



### 3. ENERGIA VARUD, LIIGID JA TOOTMISVIISID

Meie koduplaneet Maa saab Päikeselt energiavoo võimsusega  $1,8 \cdot 10^{17} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ . Aasta jooksul saadud energia on seega  $5,7 \cdot 10^{24} \text{ J}$  ehk  $1,5 \cdot 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$ . Praktiliselt niisama palju annab Maa ka energiat ära, sest temperatuur püsib ju keskmiselt konstantne. Väikesed erinevused saadava ja äraantava energia hulga vahel tekivad ühelt poolt energia sidumisest orgaanilise aine fossiliseerumisel ning teiselt poolt maasisese soojuse eraldumisest. Energiat tuleb juurde ka inimese tegevuse tagajärjel, praegu küll kõigest 0,01% Maa loomulikust energiavahetusest, kuid edaspidi aina rohkem ja rohkem.

Kogu energia, välja arvatud tuumareaktsioonidel vabanev ja loodete energia, mis Maal leidub, on pärit Päikeselt. Päikeseenergiat muundavad orgaanilise aine keemiliseks energiaks rohelised taimed. Seejuures on fotosünteesi kasutegur nähtava valguse suhtes keskmiselt 1%. Roheliste taimede akumulieeritud energia on aluseks kõikide organismide elutegevusele ning nii on tekkinud ka fossiilkütused. Fossiilkütuste tekkimiseks on kulunud ligikaudu  $6 \cdot 10^8$  aastat ning võib arvata, et inimkond tuleb nende kulutamisega toime 300 aasta jooksul. Seda dramatismi inimese ja looduse vahekorras tajusid juba vana aja mõttetargad. Näiteks Lucius Annaelus Seneca on öelnud, et mets kasvab aeglaselt, aga põleb ruttu.

Et valdav osa nüüdistivilisatsiooni poolt kulutatavast energiast saadakse fossiilkütuste põletamise teel, siis vaatleme mõningaid selle tegevusega seotud probleeme. Kui kauaks jätkub kütuseid? Kui kauaks jätkub hapnikku? Millisel määral saastab fossiilkütuste põletamine biosfääri?

Peamised kütused on nafta, kivisüsi ja maagaas, vähem tähtsad põlevkivi ja turvas. Andmed nende maavarade sisalduse kohta maapõues on sageli vastukäivad ja nende tõlgendamisel tuleb arvestada, et kuigi inimkond fossiilkütuseid intensiivselt hävitab, avastatakse ikka veel uusi (ja sageli õige suuri) varusid juurde. Seoses tehnika arengu ja nõudluse kasvuga võetakse eksploatatsiooni ka kehvad maardlad.

Akadeemik V. Kirillini andmetel on meie planeedi fossiilkütuste üldvarud 12 800 miljardit tonni tingkütust, millest kivisüsi moodustab 80%, nafta 10% ja maagaas 10%. Nüüdisajal kasutatavaid varusid peetakse üle kolme korra väiksemateks ja nad on maakeral väga ebaühtlaselt jaotu-

nud. Nii on kõrgesti arenenud tööstusrajoonid oma lähemad toorainevarud sageli ammutanud ja nüüd tuleb toorainet tuua kaugelt, mis teeb selle kalliks. Kahjuks kehtib öeldu ka Nõukogude Liidu Euroopa-osa ja isegi Uraalide kohta.

Probleem on tõsine, sest Nõukogude Liidu tohutud loodusrikkused asuvad Siberis ja Kaug-Põhjas. Seal pole veel oluliselt tööstust ega häid olmetingimusi. Järelikult peame midagi paratamatult transportima, kas inimesi tooraineallikate juurde või vastupidi. Kulukad on mõlemad ja pealegi tuleb arvestada, et põhjamaine loodus on inimtegevuse tekitatud haavade suhtes eriti õrn. Kuigi ameeriklaste arvutuste kohaselt on maailma söevarud  $16 \cdot 10^{12}$  tonni, millest 56,6% asub Nõukogude Liidus, ei tule nende eksploateerimine odav. Just tootmise kulukuse tõttu vähenes sajandi keskel kivisöe osa maailma energiabilansis (moodustab praegu umbes 32%). Seoses naftavarude kiire vähenemisega ja hindade tõusuga on nüüd jällegi oodata kivisöe intensiivsemat kasutamist.

Kõige väärtuslikum fossiilkütus on nafta. Hinnangud tema leidumise kohta maapõues on väga erinevad, kuid kasutatava nafta varud on ikkagi üsna tagasihoidlikud. Avaldub ju kõigile tuntud energiakriis meie nüüdismaailmas eeskätt naftakriisina. Kasutatava nafta varud maailmas ulatuvad ilmselt  $10^{12}$  tonnini. Inimkond on seni tootnud  $5 \cdot 10^{10}$  tonni. On selge, et naftat kuigi kauaks ei jätku, näiteks USA varud on  $4,5 \cdot 10^9$  t ja praegune aastatoodang  $4 \cdot 10^8$  t. Tõsi küll, N. Vassojevitsi andmetel võivad nafta üldvarud maailmas ulatuda  $10^{14}$  tonnini, kuid see on peamiselt nn. mikronafta, mis pole veel maardlateks kondenseerunud.

Kui me ka õpiksime naftat tootma kehvadest maardlatest, tuleks selle põletamist soojuse saamiseks siiski pidada rumaluseks. Juba D. Mendelejev ütles, et nafta põletamine on seesama mis ahju kütmine väärtpaberitega. Ka nüüdisaegne ameerika teadlane R. Lepp on nimetanud nafta sisaldavate unikaalsete ainete põletamist barbaarsuseks ja kuriteoks. Maagaas on varudelt ja kasutamise mugavuselt sarnane naftaga. Tema eeliseks teiste fossiilkütuste ees on väiksem väävlisisaldus, mistõttu põlemisproduktid saastavad atmosfääri vähem. Nii gaasi kui ka nafta kasutamisel peame endale ette kujutama, millist hinda inimkond saadud soojuse eest tegelikult maksab. Igal juhul tasub siin olla kokkuhoidlik.

Vaatlesime mõningaid fossiilkütuse varude ja kasutamise probleeme. Kütused üksi aga ei anna veel energiat, selle vabastamiseks kütusest on vaja hapnikku. On vaja kütus põletada, tema keemiline energia degradeerida, struktuur hävitada. Kas üha intensiivistuva kütuste põletamise tarvis atmosfääris hapnikku jätkub? Vaatleme mõningaid kalkulatsioone.

Hapniku mass atmosfääris on  $1,2 \cdot 10^{15}$  tonni ja selle koguse märgatav muutmine teeks elu Maal võimatuks. Et hinnata atmosfääri vastupidavust inimtegevusele, peaks olema teada selle suurus ning ettekujutus tema tekkest ja stabiilsust mõjutavatest looduslikest protsessidest. Vaba hapnik on fotosünteesi tulemus, mistõttu tema hulk peaks olema ekvivalentne orgaanilise aine koguhulgaga. Et orgaanilise aine varu Maal hinnatakse  $1,6 \cdot 10^{16}$  tonnile, siis peaks hapnikku atmosfääris olema 37 korda rohkem, kui seda tegelikult on. Suurem osa tekkinud hapnikku on kulunud metallide (eriti raua) ja vulkaaniliste gaaside (eeskätt CO ja H<sub>2</sub>S) oksüdeerimiseks. Ülejääk sisaldubki atmosfääris.

Millised protsessid nüüdisajal hapniku hulka atmosfääris muudavad? Kõigepealt muidugi fotosüntees, mis toodab  $3,2 \cdot 10^{11}$  tonni hapnikku aastas. Kuna inimkond kulutab kütuse põletamisel  $2 \cdot 10^{10}$  tonni hapnikku aastas, siis tundub esialgu, et seda jätkub. Mulje on aga petlik, sest inimkond pole mitte ainuke hapniku raiskaja. Suurem osa toodetud hapnikust seotakse uuesti mädanemisel, nii et looduse aastane puhastulu on kõigest  $1,6 \cdot 10^9$  tonni, mis vastab fossiliseeruvale orgaanilisele ainele (näiteks turba ja muda teke). Hapnikku toodavad peamiselt küll troopilised vihmametsad, kuid aine kiire ringkäigu tõttu kulutavad nad oma toodangu peaaegu täielikult ära orgaanilise aine mineraliseerimiseks.

Seega on fotosünteesi ja kõdunemise erinevuse tõttu tekkiv aastane hapniku ülejääk juba praegu kümme korda väiksem kui läheb vaja fossiilkütuste põletamiseks. Peale selle nõuab vulkaaniline tegevus ka tänapäeval keskmiselt  $1,6 \cdot 10^9$  tonni hapnikku aastas. Siit järeldub, et fossiilkütuste põletamist ei kompenseeri looduses miski. Et nende koguaru on suurem kui hapniku hulk atmosfääris, siis on hapnikukriis hoopis tõsisem kui tavaliselt rõhutatav kütusekriis. Kui aastas põletatava kütuse kogus suureneb ikka umbes 5% aastas, on 150 aasta pärast veerand atmosfääri hapnikust ära kulutatud.

Maa hapnikubilansi seisukohalt on puidu ning teiste taimsete ja loomsete produktide (ka näiteks maisivarred ja kaamelisõnnik) kasutamine kütusena eelistatum kui fossiilkütuse põletamine. Asi on selles, et nimetatud produktide oksüdeerimiseks kuluv hapnikuhulk on põlemisel ja mädanemisel ühesuurune. Peale hapniku säästmise on taimsete kütuste eeliseks veel väike väävlisisaldus, mistõttu nende põlemisproduktid saastavad vähem keskkonda. Kuigi taimsete kütuste osatähtsus nüüdisaja inimkonna energiabilansis on kõigest mõni protsent, kutsutakse üha sagedamini üles neid täielikumalt kasutama. Mootorikütust on püütud valmistada isegi põhust.

Me pole veel rääkinud kahjulikest heitproduktidest, mis fossiilkütuste põletamisel atmosfääri paiskuvad, kuid juba eespool toodud andmete alusel peaks olema selge, et energiaallikaid ja tootmisviise oluliselt muutmata ei saa inimkond kaua areneda. Millised kasutatavad energiavormid siis veel olemas on, kui suured on nende varud ja millised on nende kasutamise eelised? Kõigepealt looduslikes geofüüsikalistes protsessides isetaastuva energia ja tuumaenergia varud. Esimeste vaieldamatuks eeliseks on nende puhtus, ohutus biosfäärile, sest nad ei riku isegi maa looduslikku energiabilanssi. Ka tuumaenergeetika ainsaks reostuseks peavad mõned autorid ainult soojust. Meie esmane energiaallikas on Päike. Kuna suurem osa temalt saadud energiat hajub kasutult maailmaruumi, on loomulik, et inimkond katsub seda energiat kinni püüda, temast kasulikke tööd saada. Päikeseenergia arvel on tekkinud ka hüdroenergia, tuuleenergia ja ookeanides peituv osmootne energia. Tuule ja voolava vee energiad olid esimesed, mida inimkond oma teenistusse rakendas, kuid nüüdisaja tarvidusi nad rahuldada ei suuda. Isegi siis, kui rakendatakse kõik maailma hüdroenergiavarud ( $5 \cdot 10^{12}$  kW·h), kataksid nad kõigest 5% inimkonna energiatarbest. Peale päikeseenergia ja tema teisenduste esineb Maal mitteraastava looduslike protsesside energiana veel geotermiline ja loodete energia. Kõigi nende energialiikide kasutamisele on pühendatud käesoleva raamatu kolmas peatükk, nüüd aga vaatleme lühidalt mõningaid tuumaenergeetika probleeme.

#### 4. KAS TUUMAENERGIA KASUTUSELEVÖTT TAGAB ENERGIAKÜLLUSE?

Inimkonna üha kasvava energiatarviduse rahuldamise üheks võimaluseks on tuumaenergeetika. Vabaneb ju tuumkütusest energiat palju kordi rohkem kui niisama suurest kogusest fossiilkütusest. Maailma esimene tuumaelektrijaam lasti käiku 1954. aastal Nõukogude Liidus ja selle võimsus oli 5 MW. 1975. aastaks töötas maailmas juba 26 üle 1000-megavattise võimsusega tuumaelektrijaama. Et toodetava energia omahind on tuumaelektrijaamades viimastel aastatel isegi madalam kui soojuselektrijaamades, USA-s 1976. a. vastavalt 1,5 ja 1,8 senti kilovatt-tund, siis on maailm astunud tuumaelektrijaamade massilise ehitamise ajastusse.

Enamik jaamu kasutab praegu uraani isotoopi  $^{235}\text{U}$ , mida leidub looduslikus uraanis kõigest 0,7%. Ka kulub sellistes jaamades uraani üsna palju. Tuumaenergia kaugem tulevik on seotud paljundusreaktorite ehk breederitega, mis toodavad kõrvuti energiaga ka lõhustuvaid tuumi. Tuumatooraineks võib neis olla uraani looduslik isotoop  $^{238}\text{U}$ . Suure kasuteguri tõttu asendab 1 tonn tuumkütust siis kuni miljon tonni naftat. Kõige enam ahvatlevad termotuumareaktsioonil töötavad jaamad. Nende tooraine — deuteeriumi — varud on praktiliselt piiramatud ja produktid ei ole radioaktiivsed. Kahjuks on nii breederite kui ka termotuumareaktorite rakendamisel veel probleeme, mõningate autorite arvates isegi lahendamatu. Breederite puhul on peamiseks tehniliseks raskuseks protsessi kontrolli alt väljumise (plahvatuse) oht ja sotsiaalseks probleemiks tuumapommi tooraine (näiteks plutoniumi) tootmine. Juhitava termotuumareaktsiooni läbiviimisel on raskuseks plasma säilitamine. «Tokamak-10» abil on nõukogude teadlastel õnnestunud kuuma plasmata elus hoida juba peaaegu sekundi vältel. On projekteeritud «Tokamak-20», mille abil loodetakse tuumasünteesireaktsioonil saada rohkem energiat, kui kulutatakse plasma tekitamiseks. See saaks üleminekuetapiks tehnoloogilistele katsetustele, millele järgneks juba tööstusliku termotuumareaktori ehitamine. Kui praegu moodustab tuumaenergia maailma üldisest energiatoodangust mõne protsendi, siis optimistlike prognooside kohaselt suureneb tema osa 2000. aastaks 25—30%-ni.

Nii et termotuumareaktor, mille tööproduktid pole

radioaktiivsed, tundub ühe mõistlikuma vahendina energiakülluse loomisel. Sellise reaktori ainus reostus on soojus. Lokaalsest ülekuumenemisest loodetakse tuleviku tuumaelektrijaamades üle saada näiteks nii, et reaktorid ehitatakse ujuvatele seadeldistele umbes 10 km kaugusel rannast, kus merevee sügavus on vähemalt sada meetrit. Jahutusvee hea tsirkulatsiooni tõttu pole sel juhul karta ümbruse ülekuumenemist ning vee möödukas soojenemine ja segamine võib ümbritseva mere bioproduktiooni koguni tõsta. Toodetud energia juhitakse kas elektri või vesinikuna maale. On esitatud ka projekte, mille kohaselt tuumaelektrijaama võib paigutada tehiskaaslasele ning energia sealt lühilainelise kiirgusega Maale üle kanda.

Kui oleks küllalt odavat energiat, võiks linn koos ümbritseva tagamaaga moodustada ühtse suletud kompleksi. Selle südameks oleks tuumareaktor, mis toodab elektrit, soojust ja puhast vett. Energiakülluse korral on roiskvesi ja jäätmed elektrokeemiliselt regenereeritavad ning materjalid tsükliliselt kasutatavad. Transport oleks elektriline, mittesaastav. Magestatud merevesi toidaks nii linna kui ka tagamaad. Praegu on põllukultuuride all umbes 10% maismaast, energia ja järelikult ka niisutusvee odavuse korral aga muutuks kasutatavaks veel 37%.

Kas küllusliku energia olemasolu korral võib inimkond ja tema energiatarvidus piiramatult kasvada? Seda siiski mitte. Kui ka reaktorite reostus oleks ainult soojuslik, muutuks seegi kliimale ja biosfäärile ohtlikuks. Nagu eespool märgitud, on Maa loomuliku energiavahetuse võimsus  $10^{17} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$  ja aasta jooksul vahetatav energiahulk  $5,7 \cdot 10^{24} \text{ J}$ . Inimkonna poolt toodetav energia ei tohi ületada 5% sellest, sest vastasel juhul soojeneks Maa ohtlikult ja kliima muutuks pöördumatult. 1970. aastal tootis inimkond  $2,1 \cdot 10^{20} \text{ J}$ , mis on kõigest 0,015% maa aastasest soojuskiirgusest. Kuigi madalatemperatuuriline soojussaast on inimkonna poolt produtseeritavatest kõige vähem ohtlik, võib ta energia intensiivse tootmise korral hakata globaalselt kliimat muutma. Soojuse 25-kordne kasv põhjustab Maa temperatuuri tõusu  $0,3^\circ$  võrra.

## II peatükk

# TERMILINE JA ELEKTROKEEMILINE ARENGUTE

### 1. TERMOENERGEETIKA VILJAD

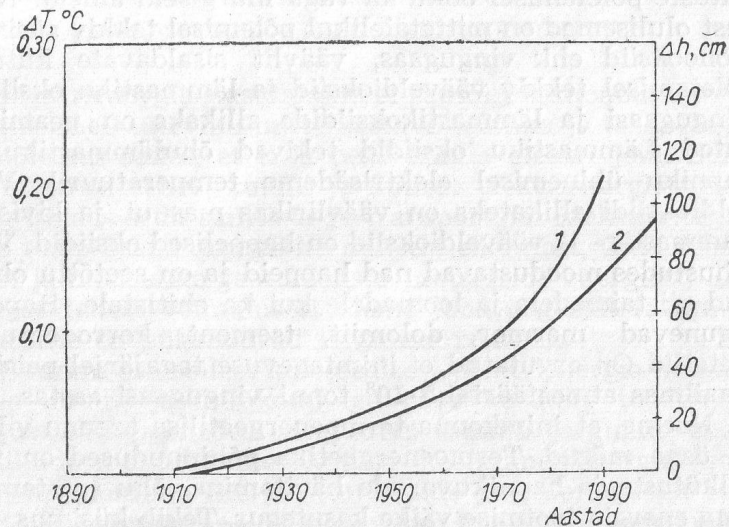
Esimeses peatükis nägime, et inimkonna üha kasvava energiatarbe rahuldamiseks põletatakse tohututes kogustes fossiilkütuseid, samuti kulub ohtlikult palju õhuhapnikku. Peatume nüüd veel põlemisproduktidel ning nende mõjul elukeskkonnale. Teame, et orgaaniliste ainete täieliku põlemise lõpp-produktid on süsinikdioksiid ja vesi. Seejuures paiskub ühe tonni süsiniku põlemisel atmosfääri 3,68 tonni süsinikdioksiidi. Kütuste põletamisel satub õhku ka süsinikoksiidi (vingugaasi), süsivesinikke (naftaproduktide aurustumisel), lämmastiku okside ja vääveldioksiidi. Ka tahkeid põlemisjääke — tuhka ja tahma — paiskub suurtes kogustes õhku. Kõik need produktid mõjustavad biosfääri, vähendavad tema elamiskõlblikkust. See halvendab inimeste elujärge, sest ei saa ju haisva õhu hingamist ega halvamaitselise vee joomist pidada elatustaseme tõusu näitajaks.

Põlemise lõppsaadustest on ainult vesi ohutu, süsinikdioksiidi  $\text{CO}_2$  hulga suurenemine atmosfääris inimtegevuse tagajärjel kätkeb aga tervet rida probleeme. Moodustab ju  $\text{CO}_2$  atmosfääri koostisest 0,03%. Seda on seal kokku umbes  $10^{12}$  tonni ja inimtegevuse tagajärjel lisandub veel  $3 \cdot 10^{10}$  tonni aastas. Süsinikdioksiid on fotosünteesi üks lähteaineid, hingamise lõppsaadus, ning selle sisaldus atmosfääris mõjustab tugevasti kliimat. Tema

ringkäik looduses on üsna pikk ja keeruline. Suur hulk ookeanides lahustunud süsinikdioksiidi kandub aeglaselt ekvaatori poole ja korallid seovad selle lõpuks karbonaatseteks mineraalideks.

Süsinikdioksiidi eriline osa atmosfääris on seotud kasvuhooefektiga:  $\text{CO}_2$  laseb hästi läbi Päikese lähemalainelist kiirgust, kuid peegeldab tagasi Maalt hajuvat pikemalainelist soojuskiirgust. Seetõttu tähendab süsinikdioksiidisisalduse suurenemine atmosfääris kliima üldist soojenemist. Mitmed hüpoteesid seovad temperatuuri kõikumist Maa geoloogilises ajaloos just  $\text{CO}_2$  hulga muutmisega atmosfääris.

Inimtegevuse tagajärjel lisandub Maa looduslikku energia- ja ainevahetuse soojust ja süsinikdioksiidi, mistõttu võib karta, et kliima hakkab pöördumatult soojenema. Nii võib tekkida inimesele ebasobiv kuum niiske kliima. On ju rohelineks põrguks nimetatud Amazonase ürgmetsade asustatus isegi hõredam kui karmikliimalistel põhjaaladel. Igijää pöördumatu sulamise tõttu tõuseks ohtlikult maailmamere veetaseme. Arvatakse, et  $\text{CO}_2$  hulga kahekordistumine atmosfääris toob endaga kaasa keskmise õhutemperatuuri tõusu 3,5 kraadi võrra ja et käesoleva sajandi lõpuks on see 0,5 kraadi. Illustreerime öeldut joonisega.

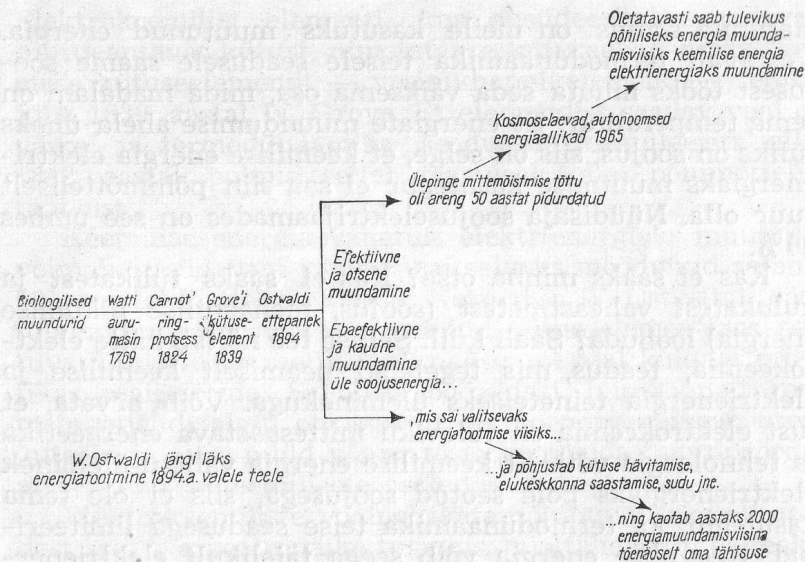


Õhutemperatuuri (kõver 1) ja maailmamere veetaseme (kõver 2) arvutatud tõus  $\text{CO}_2$  hulga suurenemise tõttu atmosfääris

Enamik teadlasi tunneb nüüdisajal muret hoopis kliima üldise jahenemise pärast ja eks meie igapäevased kogemusedki kõnele rohkem sellest. Nii mõõtsin ma 23. juuni hommikul 1977. a. kell 4 oma koduaias heina-kaarel  $-2^{\circ}\text{C}$  ning 1978. a. detsember põrmustas kõik külmarekordid. Usu siis veel kliima üldisse soojenemisse! Kliima võimaliku jahenemise põhjuseks peetakse kütuste põletamisel atmosfääri paiskuvaid tahma- ja tuhaosakesi, mis ei lase päikesekiirtel maapinnani jõuda. Päikesekiirgusele on takistuseks ka pilved, atmosfääris sisalduv vesi. Seoses sellega tuleb arvata, et ka muidu täiesti kahjutu põlemise lõppsaadus vesi on ülehelikiirusega lennukite poolt stratosfääri paisatuna ohtlik. Tahma, tuha ja tolmu kahjulik mõju inimorganismile peaks olema üldmõistetav. Öeldakse ju, et inimeste ja tahma suhetes on kaks võimalust: kas inimesed õpivad tegema nii, et õhku satub vähem tahma, või teeb tahm nii, et maa peale jääb vähem inimesi. Meenutagem kas või kurikuulsaid Londoni sudusid, mis näiteks 1952. aasta talvel röövisid 4 nädala jooksul 4000 inimelu. Tasub mõelda ka tahmale ja tolmu kodulinna õhus. Tartus kipud küll vahel vihma ootama, sest on vist ikka parem, kui kingad on porised ja kops puhas, aga mitte vastupidi.

Peale ülalnimetatud põlemisproduktide satub fossiilkütuste põletamisel õhku ka väga mürgiseid aineid. Nendest olulisemad on mittetäielikul põlemisel tekkiv süsinikmonooksiid ehk vingugaas, väävlit sisaldavate kütuste põletamisel tekkiv vääveldioksiid ja lämmastiku oksiidid. Vingugaasi ja lämmastikoksiidide allikaks on peamiselt autod. Lämmastiku oksiidid tekivad õhulämmastiku ja hapniku ühinemisel elektrisädeme temperatuuril. Vääveldioksiidi allikateks on väävlirikas masuut ja kivisüsi. Lämmastik- ja vääveldioksiid on happelised oksiidid. Vees lahustudes moodustavad nad happeid ja on seetõttu ohtlikud nii taimedele ja loomadele kui ka ehitistele. Hapetes lagunevad marmor, dolomiit, tsement, korrodeeruvad metallid. On arvatud, et inimtegevuse tagajärjel paiskub maailmas atmosfääri  $1,5 \cdot 10^8$  tonni vingugaasi aastas.

Näeme, et inimkonna termoenergeetilise arengu viljad on üsna mõrud. Termoenergeetika põhipuudused on fossiilkütuste ja hapnikuvarude hävitamine, õhu saastamine ning energia tootmise väike kasutegur. Tekib küsimus, kas meil siis teisi võimalusi pole. Selgub, et on, ja seda mõistisid inimkonna helgemad pead juba möödunud sajandil.



Alternatiivina pakuti välja elektrokeemiline arengutee. Nii väitis Wilhelm Ostwald juba 1894. aastal, et kui areneb väheefekttiivne soojuslik ja mitte elektrokeemiline tehnoloogia, põhjustab see paratamatult linnade õhu saastumist.

## 2. ELEKTROKEEMILINE ARENGUTEE

Elektrienergia kasutamine ei saasta keskkonda. Järelikult seisneb tuleviku mittesaastava tehnika ja tehnoloogia põhiolemus selles, et kõik peab käima elektri jõul. Edasi on küsimus selles, kuidas ja millest elektrienergiat toota ning kuidas seda säilitada ja transportida. Elektrienergiat võib toota fossiilkütuste keemilisest energiast, tuumaenergiast ja looduslike geofüüsiliste protsesside energiast. Esimesest kahest võimalusest oleme juba põgusalt rääkinud, viimasele on pühendatud järgmine peatükk.

Suurem osa sellest kolossaalsest elektrienergia hulgast, mida nüüdisaja inimkond iga päev kasutab, toodetakse soojuselektrijaamades. Seejuures toimub järgmine energialiikide muundumine: kütuse keemiline energia  $\rightarrow$  soojus  $\rightarrow$  mehaaniline energia (turbiinide ja generaatorite rootorite pöörlemine)  $\rightarrow$  elektrienergia. Iga ülemineku puhul hajub osa energiat soojusena ümbritsevasse keskkonda.

Hajunud soojus on meile kasutuks muutunud energia. Vastavalt termodünaamika teisele seadusele saame soojusest tööks muuta seda väiksema osa, mida madalam on tema temperatuur. Et energiate muundumise ahela üheks lüliks on soojus, siis on selge, et keemilise energia elektrienergiaks muutmise kasutegur ei saa siin põhimõtteliselt suur olla. Nüüdisaja soojuselektrijaamades on see umbes 40%.

Kas ei saaks minna otse? Kas ei saaks tülikatest ja kulukatest vaheastmetest (soojus, mehaanilise liikumise energia) loobuda? Saab küll. Sellise tee näitab kätte elektrokeemia, teadus, mis tegelebki peamiselt keemilise ja elektrienergia teineteiseks üleminekuga. Võib arvata, et just elektrokeemia on tuleviku mittesaastava energeetika ja tehnoloogia võti. Et keemilise energia vahetu üleminek elektrienergiaks pole seotud soojusega, siis ei ole tema kasutegur ka termodünaamika teise seadusega limiteeritud. Keemilise energia võib seega täielikult elektrienergiaks muuta. Veel enam, juhul, kui reaktsioonisaaduste entroopia on suurem kui lähteainetel, võidakse selle protsessi käigus siin ka osa keskkonnalt saadud soojust elektriks muuta, nii et teoreetiline kasutegur võib ulatuda isegi üle saja protsendi. Nii on see näiteks söe mittetäieliku oksüdeerimise reaktsiooni  $2C + O_2 = 2CO$  korral, kus termodünaamiliselt arvatud kasutegur on 124 protsenti.

Mille poolest siis üleminekud keemiline energia → soojus ja keemiline energia → elektrienergia teineteisest erinevad? Toimub ju mõlemal juhul kütuse oksüdeerimine ja samaaegselt oksüdeerija (näiteks hapniku) redutseerimine. Muutub elementide oksüdatsiooniaste, elektronid lähevad kütuse aatomitelt oksüdeerija aatomitele. Et viimasel on elektronide energianivoo madalam, viis vabanebki osa energiat. Seega seisneb kasuliku töö saamine ikka energia degradeerimises, tema madalamale nivoole üleviimises.

Tavalistel keemilistel reaktsioonidel, sealhulgas ka kütuse põlemisel, pole elektronide äraandmine ja vastuvõtmine ruumiliselt eraldatud ning energia vabaneb soojusena. Põhimõtteliselt on neid reaktsiooni osaprotsesse — oksüdeerumist ja redutseerumist — võimalik teineteisest ruumiliselt eraldada ja lasta kütuse oksüdeerimisel vabanevatel elektronidel mööda juhet oksüdeerijani liikuda. Siis olemegi ehitanud elektrokeemilise elemendi, seadise, mis muudab keemilise energia vahetult elektrienergiaks.

Elektrokeemilist elementi, kus oksüdeeritakse pidevalt juurdeantavat kütust, nimetatakse kütuseelemendiks. Esimese kütuseelemendi — vesinikhapnikelemendi — ehitas juba 1839. aastal W. Grove. Et elemendist saadav vool oli väike ja termodünaamika seadused formuleeriti alles 1842. aastal, polnud sellel avastusel tollal põhimõttelist tähtsust.

Keemilise energia vahetult elektrienergiaks muutmise võimaluse sügavam väärtus sai selgeks möödunud sajandi 90. aastatel H. Helmholtzi, V. Nernsti ja W. Ostwaldi tööde tulemusena. Kahjuks ei suudetud kütuseelementides peituvaid ilusaid teoreetilisi võimalusi tol ajal kuidagi praktikas realiseerida. Seetõttu pöörduski inimkonna areng meie sajandi algul otsustavalt termoenergeetilisele arenguteele ja alles nüüd võime tõsiselt mõelda tagasipöördumisest elektrokeemilisele teele.

Elektrokeemiliste vooluallikate põhipuuduseks oli nendest saadava voolu väike tugevus, mis tähendab, et reaktsioonid elektroodidel kulgesid aeglaselt. Reaktsioonide aegluse peamise põhjuse, nn. ülepinge olemust tol ajal veel ei mõistetud ega osatud selle alandamiseks ka midagi mõjusat ette võtta. Meie sajandi elektrokeemia areng ongi suuremas osas ülepingeteooria areng. Nende uurimistööde tulemusena, mille esirinnas on pidevalt olnud nõukogude elektrokeemikud, eesotsas hiljuti lahkunud akadeemik A. Frumkiniga, võime nüüd rääkida kütuseelementide uuestisünnist.

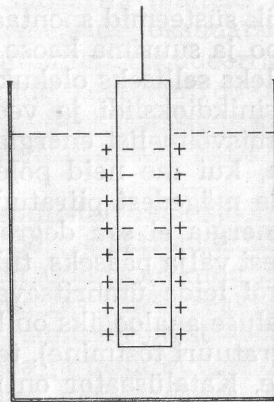
Me elame labiilsete tasakaalude maailmas. Entroopia kasvu printsiibi ja vabaenergia miinimumi printsiibi kohaselt peaksid kõik süsteemid spontaanselt minema madalaima energianivoo ja suurima kaose olekusse. Orgaaniliste ainete korral oleks selliseks olekuks täieliku põlemise lõppsaaduste — süsinikdioksiidi ja vee — teke. Ometigi püsivad degradeerumisvõimelist energiat sisaldavad kütused õhus üsna kaua, kui me neid põlema ei süüta. Oluks võiks võrrelda mägedest piiratud järvega. Ka selle vee potentsiaalne energia ei saa degradeeruda, kui puudub väljavool. Et vesi välja pääseks, tuleb kas tema pinda üle kallaste tõsta või leida ümbritsevas barjääris madal koht. Esimese võimaluse analoogiks on kütuse puhul põlemapanemine (temperatuuri tõstmine), teiseks aga katalüütiline oksüdeerimine. Katalüsaator on nagu osav teejuht, kes leiab väljapääsu mägesid ületamata. Elektrokeemilise protsessi ülepinge ongi sellise barjääri ületamiseks vaja-

liku energia — aktiveerimisenergia — mõõt. Ülepinge alandamiseks on kütuseelemendis vaja kasutada sobivast materjalist (katalüsaatorist) ja sobiva kujuga elektroode.

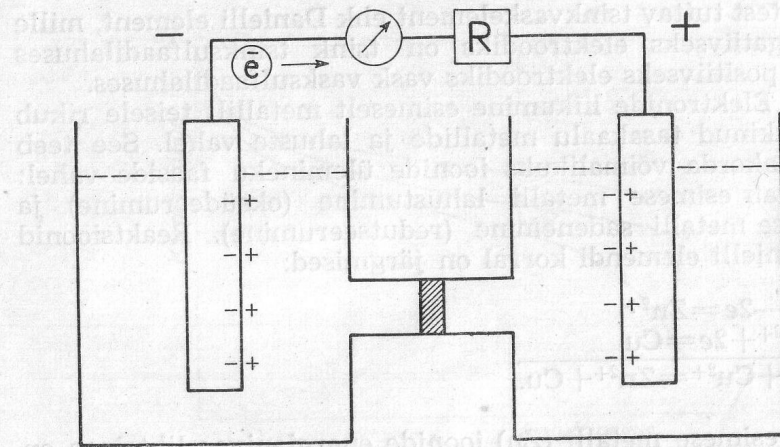
### 3. KUIDAS TEKIB ELEKTROKEEMILISES ELEMENDIS ELEKTRIVOOL?

Elektrokeemilise elemendi töö selgitamiseks vaatleme kõigepealt, mis juhtub, kui metallitükk asetada sama metalli soola lahusesse. Mõlemas kokkupuutuvas faasis — metallis ja lahuses — esinevad sel juhul ühesugused osakesed, metalli positiivsed ioonid  $Me^+$ . Tõsi küll, metalli kristallivõre eripära tõttu võime tema tsentrites asuvaid osakesi vaadelda ka neutraalsete aatomitena, kuid käesoleval juhul pole see oluline. Kui kahes kokkupuutuvas faasis on ühesugused osakesed, peavad nad vastavalt termodünaamika seadustele minema spontaanselt sellesse faasi, kus nende vabaenergia tase (keemiline potentsiaal) on madalam. Oletame, et vaadeldava metalli puhul on selleks faasiks lahus.

Kui positiivne ioon  $Me^+$  läheb metallist lahusesse, jääb metallile üks tasakaalustamata elektron  $e^-$ . Toimuvat protsessi kirjeldab võrrand  $Me - e^- = Me^+$ . Nii on see igaiooni ülemineku korral. Metall omandab negatiivse, lahus aga positiivse laengu ning faaside eralduspinnal tekib



Elektrilise kaksikkihi skeem lahuse ja metalli piirpinnal



Elektrokeemilise elemendi skeem

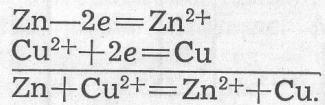
elektriline kaksikkiht. Selle olukorra lihtsustatud mudel on esitatud joonisel. Laengute ruumilise eraldatuse tõttu tekib faaside vahel potentsiaalide erinevus, mida nimetatakse elektrodipotentsiaaliks ( $E$ ). Elektrodipotentsiaalid tingitud ionide energianivoode muutus on vastupidine esialgsele nivoo erinevusele, mistõttu vaadeldud süsteemis ionide energianivood mõlemas faasis peagi ühtlustuvad ja protsess lakkab.

Võtame nüüd mingi teise metalli, mille ionide vabaenergia on lahuses suurem kui lihtaines. Sel juhul kulgeb reaktsioon  $Me^+ + e^- = Me$  ja tekib elektriline kaksikkiht, mis on joonisel 6 kujutatud peegelpilt: metall omandab lahuse suhtes positiivse laengu. Vastupidise märgiga on ka elektrodipotentsiaali väärtus.

Ühendame nüüd vaadeldud süsteemide metallelektroodid juhtmetega ning lahused ioone läbilaskva poorse membraaniga, nagu on kujutatud joonisel. Et esimesel metallil on elektronide ülejääk, teisel aga vajak, siis on elektronide vabaenergia nivoo esimesel metallil kõrgem ja nad hakkavad mööda juhet teisele metallile minema, s. t. juhtmes tekib elektrivool. Loomulikult ei saa vool kulgeda avatud ahelas. Seetõttu tuleb lahused ühendada. Nüüd on vooluring suletud ja voolu, mida metalljuhtmes kannavad elektronid, kannavad lahuses ioonid. Joonisel esitatud elektrokeemilise elemendi näiteks võib olla kooliõpi-

kutest tuttav tsinkvaskelement ehk Danielli element, mille negatiivseks elektrodiks on tsink tsinksulfaadilahuses ja positiivseks elektrodiks vask vasksulfaadilahuses.

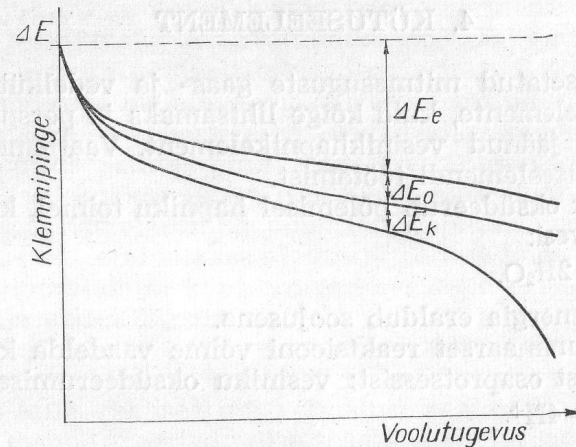
Elektronide liikumine esimeselt metallilt teisele rikub tekkinud tasakaalu metallide ja lahuste vahel. See teeb omakorda võimalikuks ionide ülemineku faaside vahel: algab esimese metalli lahustumine (oksüdeerumine) ja teise metalli sadenemine (reduktseerumine). Reaktsioonid Danielli elemendi korral on järgmised:



Et esimese metalli (Zn) ionide energianivoo lihtaines on teise metalli (Cu) ionide energianivoost kõrgem, siis süsteemi vabaenergia nivoo alaneb. Vabaenergia degradeerunud osa muutub elektrokeemilises elemendis elektrienergiaks, mida saab kasutada vooluahelas olev tarbija (joonisel tähistatud R).

Elektroodipotentsiaali ( $E$ ) väärtus sõltub eeskätt elektrodil reageerivast aineist (metallist), aga ka lahuse koostisest. Et võrrelda erinevaid elektrodimaterjale, on võetud kasutusele elektrodipotentsiaali standardväärtuse mõiste ( $E^\circ$ ), milleks on valitud potentsiaali väärtus lahuses, kus elektrodireaktsioonis osalevate ionide molaarne kontsentratsioon (täpsemini aktiivsus) on võrdne ühega. Kuna elektrodipotentsiaalide absoluutväärtusi ei saa määrata, väljendatakse nende väärtused nulliks valitud potentsiaaliväärtuse (vesinikelektroodi standardpotentsiaali) suhtes. Selles skaalas on pingereas vesinikust vasakul asuvate aktiivsete metallide  $E^\circ$  negatiivse väärtusega, väärismetallide ning oksüdeerijate  $E^\circ$  aga positiivse väärtusega. Danielli elemendis osalevate metallide tsingi ja vase standardpotentsiaali väärtus on vastavalt  $-0,76$  ja  $+0,33$  volti.

Elektronide liikumissuuna välisahelas määrab elektrokeemilise elemendi elektrodide potentsiaalide vahe  $\Delta E$ . Kui ahelat läbiv vool on lõpmata väike, pole ta rikkunud kaksikkihtide tasakaalu metalli ja lahuse piirpinnal ning  $\Delta E$  väärtus on suurim. Seda nimetatakse elemendi elektromotoorjõuks. Tsinkvaskelemendi elektromotoorjõu standardväärtus on 1,09 volti. Reaalse koormusega töötava elemendi klemmpinge on alati elektromotoorjõust väiksem,



Elektrokeemilise elemendi elektromotoorjõu ja klemmpinge erinevuse sõltuvus voolutugevusest mitmesuguste polarisatsioonitüüpide korral

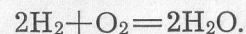
sest elektrodide potentsiaalide väärtused nihkuvad polarisatsiooni tõttu teineteisele lähemale. Et elemendi võimsus avaldub pinge ja voolutugevuse korrutisena, siis on elemendi kasutegur seda väiksem, mida suurema koormusega ta töötab. Seega on elemendi võimsuse ja kasuteguri tõstmiseks oluline vähendada polarisatsiooni. Polaratsioon koosneb kolmest osast: elektrokeemilisest ja oomilisest polarisatsioonist ning kontsentratsioonipolarisatsioonist. Elektrokeemiline polarisatsioon  $\Delta E_e$  ehk ülepinge on neist kõige olulisem ja on seotud elektrodireaktsioonide mehhanismiga. Oomiline polarisatsioon ( $\Delta E_o$ ) on seotud elemendi sisetakistusega ning on elektrolüüdi elektrijuhtivuse ja elektrodide teineteisele lähendamisega oluliselt vähendatav. Kontsentratsioonipolarisatsioon  $\Delta E_k$  on tingitud aineosakeste kontsentratsioonide erinevustest elektrodilähedases ja sellest eemal asuvates lahusekihtides. Viimane polarisatsiooniliik on eriti oluline kütuseelementide puhul. Elektrokeemilise elemendi klemmpinge erinevust elektromotoorjõust ning polarisatsioonitüüpide osatähtsust illustreerib joonis.



#### 4. KÜTUSEELEMENT

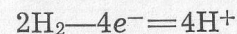
On katsetatud mitmesuguste gaas- ja vedelkütustega töötavaid elemente, kuid kõige lihtsamaks ja perspektiivsemaks on jäänud vesinikhapnikelement. Vaatleme seda tüüpi kütuseelemendi töötamist.

Vesinik oksüdeerub põlemisel hapniku toimel, kusjuures tekib vesi:

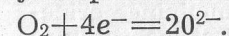


Vabanev energia eraldub soojusena.

Seda summaarset reaktsiooni võime vaadelda koosnevana kahest osaprotsessist: vesiniku oksüdeerumisest

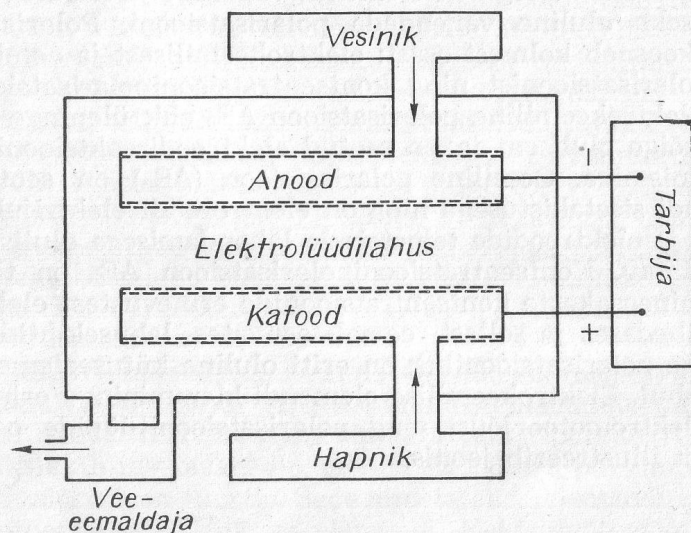


ja hapniku redutseerumisest



Kütuseelemendis on need osaprotsessid ruumiliselt eraldatud ning anoodil kütuse oksüdeerumisel vabanevad elektronid peavad liikuma mööda juhet katoodile, kus neid seovad oksüdeerija aatomid.

Vesinikhapnikelement koosneb kahest elektrolüüdilahuses asetsevast poorsast elektroodist, millest ühe poori-



Kütuseelemendi põhimõtteskeem

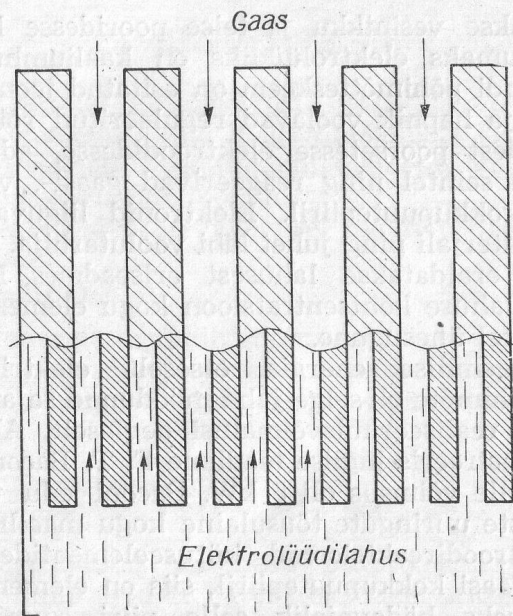
desse juhatakse vesinikku ja teise pooriesse hapnikku. Kõige levinumaks elektrolüüdiks on kaaliumhüdroksiid. Selle elemendi põhimõtteskeem on esitatud joonisel.

Vesinik ja hapnik voolavad reguleeritud rõhu juures reservuaaridest poorsesse elektroodidesse, adsorbeeruvad pooride seintel ning reageerivad gaasi-, vedela- ja tahkefaasi kokkupuutepiiril. Elektronid liiguvad mööda elektroodimaterjali ning juhet läbi voolutarbija. Tekkinud liigne vesi eraldatakse lahusest eriseadmes. Nii püsib elektrolüüdilahuse kontsentratsioon kogu elemendi töötamise aja vältel ühesugune.

Kuigi keemilise energia otseselt elektrienergiaks muutmise põhimõte oli selge juba möödunud sajandi lõpul, uuriti selle realiseerimisvõimalusi aeglaselt. Alles 1959. aastal demonstreeris inglise teadlane F. T. Bacon kütuseelementi, mille võimsus oli 5 kW. Baconi edu tõi kaasa sellesuunaliste uuringute tõusulaine kogu maailmas.

Et elektroodireaktsioonid kütuseelementides kulgevad kolme faasi kokkupuutepiiril, siis on elemendi võimsuse tõstmiseks hädavajalik selle piiri suurendamine. Baconil õnnestuski välja töötada küllalt suure faaside piirpinnaga kahekihiline elektrood. See on kahesuguse suurusega teradest pressitud nikkelelektrood. Suuremad poorid on täidetud gaasiga, väiksematesse aga tungib kapillaartungide tõttu lahus. Sellise elektroodi läbilõiget näeme joonisel. Et vedelik jämedamaid poore ei täidaks, muudetakse nende pind sageli mittemärguvaks.

Kütuseelementidel on nüüdisajal juba olulisi rakendusi, kuid nende laialdasemat kasutamist takistavad vajitava spetsiaalkütuse kallidus, defitsiitsetest väärismetallidest elektroodid, keerukad ja rasked abiseadmed, suhteliselt lühike tööiga ning võimalikust tunduvalt väiksem kasutegur. Kasuteguri vähenemise peapõhjused on elektroodidevahelise pinge langus elemendi töötamisel ning reageerivate ainete kulumine kõrvalprotsessides. Nimetatud raskuste tõttu puudub meie tänavatel ikka veel elektriauto, mis ei saastaks ümbritsevat õhku. Erienergia suure väärtuse (kilovatt-tundide arv massiühiku kohta) tõttu on vesinikhapnikelemendid kasutusel kosmoselaevadel. Nagu näitavad arvutused, on nad kõige otstarbekamaks energiaallikaks keskmise kestuse ning energiatarvitusel kosmoselendudel. Näiteks «Gemini» tüüpi kosmoselaevade varustamiseks 14 ööpäeva jooksul 200 kW·h energiaga peaks parimate tsinkhõbeakude kaal olema 1,5 t,



Kütuseelemendi kahekihilise elektroodi läbilõige

päikesepatareidel 335 kg ning vesinikhapnikelemendil 225 kg. Väga pika töötamisajaga kosmoseobjektidel, nagu kuukulгурitel, on otstarbekam päikesepatarei ja aku kombinatsioon. Vesinikhapnikelementide eeliseks kosmoselaevadel on ka see, et kõrvalproduktina tekib joogivesi. Mitmesuguste kütuseelementide väljatöötamisega tegelevad tänapäeval suured uurijate kollektiivid. Näiteks kulutati USA-s ainuüksi «Apollo» tüüpi kosmoselaevade vooluallikate väljatöötamiseks 250 miljonit dollarit. Arvatavasti muutuvad kütuseelemendid kunagi peamiseks energiaallikateks.

Kosmoselaevade energiasüsteemide väljatöötamisel on hind teisejärgulise tähtsusega, maapealsete objektide korral on aga ökonoomiline külg sageli määrav. Puhast vesinikku tarbivad ning väärismetallidest elektroodidega elemendid on laialdaseks kasutamiseks liiga kulukad. See tuleb kõne alla üksnes siis, kui odavatest materjalidest elektroodidega elemendid suudavad kasutada odavaid kütuseid või muutub vesinik odavamaks.

Odavate kütuste kasutamisel on viimasel ajal saavuta-

tud teatud edu looduslike süsivesinike, eriti aga nende konversioonil tekkiva vesiniku kasutamisega. Kui vesinikhapnikelemendi ideaalne kasutegur on 83% ning parimate elementide reaalne kasutegur on 65%, siis süsivesinike konversioonil saadava vesinikuga töötava vesinikõhkelemendi kasutegur on praktiliselt 27%. See ületab tavalise automootori keskmise kasuteguri kahekordselt.

Huvitav kütuseelementide liik on biokeemilised elemendid, mis töötavad orgaaniliste jäätmete bakteriaalsel oksüdatsioonil vabaneva energia arvel. Elektrolüüdiks on neis elementides tavaliselt merevesi. Kui oksüdeerimisest võtavad osa desulfureerivad bakterid, võib selline element töötada ka anaeroobses keskkonnas. Biokeemiliste elementide töövõimsus on tänini väga väike, sest vooluallika töötingimused ja eluprotsesside kulgemise tingimused on raskesti sobitavad.

On loodud ka vedelkütuseid tarbivaid kütuseelemente, millest näiteks metanoolõhk- ja hüdrasiinõhkelemendid leiavad rakendamist sides ning signalisatsioonis, kus väikestel võimsustel on vaja sageli töötada aastaid. Hüdrasiinhapnikelement suudaks vabalt võistelda ka auto sise-põlemismootoriga, kui ainult hüdrasiin odavam oleks.

Kütuseelemendis on püütud kasutada ka tahket sütt. Anoodreaktsioon on sel juhul  $C + 2H_2O = CO_2 + 4H^+ + 4e^-$  ja elemendi teoreetiline kasutegur 100%. Tavalisel temperatuuril pole sellist elementi sobiva katalüsaatori puudumise tõttu õnnestunud tööle panna. 700–900 °C juures töötavate süsinikhapnikelementide praktiline kasutegur on samuti väikeseks osutunud.

Süsiniku kasutamine madalatemperatuurilistes kütuseelementides on võimalik, kui süsi enne generaatorites süsinikmonooksiidiks muuta. Elemendi anoodreaktsioon on siis järgmine:



Ka need elemendid on veel väherentaablid.

Põhimõtteliselt huvitavad on tehissüdame toitmiseks ettenähtud kütuseelemendid. Kõige julgemad neist on organismi sisseopereeritavad konstruktsioonid. Sellised elemendid töötavad veres leiduva kütuse (glükoosi) ja oksüdeerija (lahustunud hapniku) abil. Ka elektrolüüdiks on veri.

Kütuselementide näol on meil olemas põhimõtteline võimalus muuta kütuse keemiline energia otseselt ja täie-

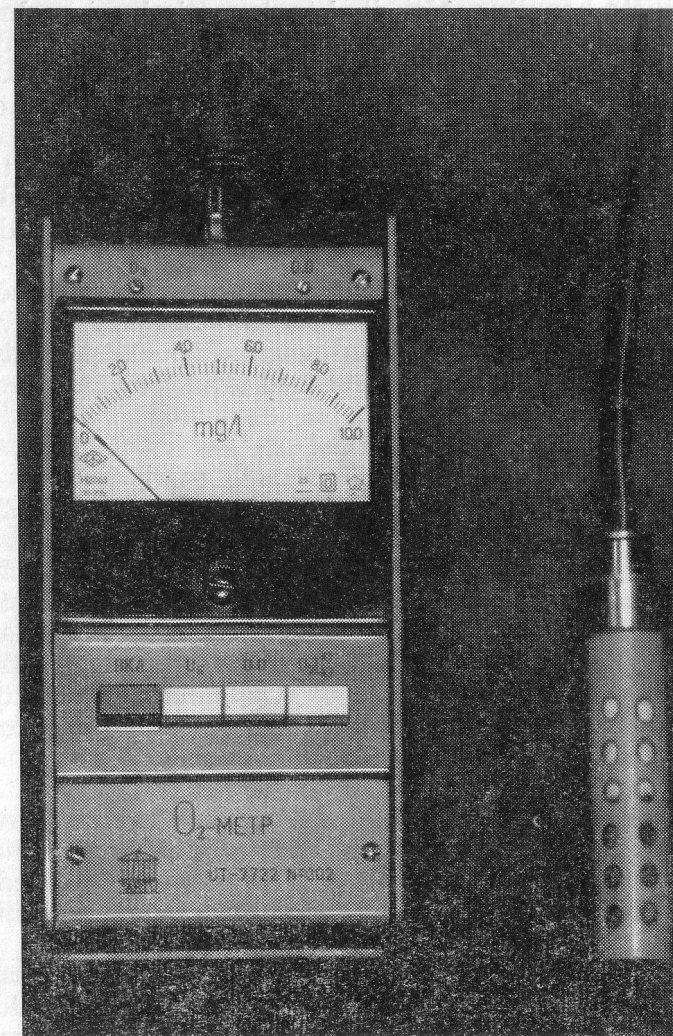
likult elektrienergiaks. Et nüüdisajal on ka tehniline vajadus (ühiskondlik tellimine) selle järele suur, siis võib loota, et see võimalus peatselt ära kasutatakse. Oma osa annavad siin ka Tartu Riikliku Ülikooli elektrokeemikud. Et tänapäevased kütuseelemendid on veel väga kallid, kasutatakse neid peamiselt kosmoses ja sõjatehnikas. Lähemas tulevikus hakatakse neid kasutama autonoomsete energiaallikatena transpordivahenditel ja statsionaarsetest elektrivõrkudest kaugel asuvatel objektidel. Mõeldakse ka suurte statsionaarsete elektrijaamade loomisele. Näiteks on välja töötatud 20-MW võimsusega elektrijaama eelprojekt. Selline jaam vajab vähe pinda (üldpindala 375 m<sup>2</sup>) ega erita keskkonda jääksoojust.

Põhimõtteliselt võib kütuseelemendi ka tagurpidi tööle panna. Välisenergia arvel toimub siis reaktsiooni lõppsaaduste elektrolüüs lähteaineteks. Nii võib kütuseelement töötada akuna ja õhu süsinikdioksiidist puhastajana.

## 5. KESKKONNA SAASTATUSE ELEKTROKEEMILINE MÄÄRAMINE

Selleks, et meie termoenergeetika ja termotehnoloogia poolt saastatud keskkonda puhastama hakata, on kõigepealt vaja kindlaks teha saastatuse aste ning reostusallikas. See ülesanne nõuab aparatuuri, millest oluline osa on elektrokeemiline. Elektrokeemiliste analüsaatorite tööpõhimõtteks on tavaliselt indikaatorelektroodile difundeeruva saastava aine reageerimiseks kuluva elektrihulga mõõtmine. Elektroodile difundeeruva aine kogus on omakorda võrdeline tema kontsentratsiooniga määratavas vedelikus või gaasis. Selliste elektrokeemiliste mõõturite eelis on nende pidev töötamine ja võimalus saada tulemus numbrilise või graafilisena.

Looduslike vete põhiline reostus on sageli orgaanilise päritoluga. Selle põhjuseks on näiteks toiduainete- ja paberitööstuse heitveed. Heitvee puhastamine seisneb tavaliselt reostuse keemilises või bioloogilises oksüdeerimises lahustunud hapniku poolt. Lahustunud hapnik on aga vältimatult vajalik veeloomade, eeskätt kalade eluks. Et reostavate ainete kahjutustamiseks kulub hapnikku, siis on vee reostatuse mõõduks sageli temas lahustunud hapniku vähesus. Siit tuleneb vajadus looduslike ja reovete hapnikusisalduse sagedaseks määramiseks.



TRÜ elektrokeemialaboris ehitatud hapnikumõõtur

Lahustunud hapniku määramiseks sobib kõige paremini elektrokeemiline hapnikumõõtur. See mõõdab vee hapnikusisaldust läbi polümeerse kile difundeeruva ja indikaatorelektroodil redutseeruva hapniku hulga järgi. Kasutatakse polüetüleen- või teflonkilesid, mis lasevad läbi lahustunud gaaside molekule, mitte aga vett. Elekt-

rokeemiliste hapnikumööturite konstrueerimine ja valmistamine on meie vabariigis kõrgel järjel ning neid kasutatakse laialt nii reovete kui ka kalamajanduslike vete kvaliteedi kontrollimiseks. Üks TRÜ elektrokeemialaboris väljatöötatud hapnikumöötur on esitatud fotol.

Kui elektrokeemilised hapnikumööturid on juba töökindlad, siis mitmete õhku saastavate ohtlike lisandite, nagu süsinikmonooksiidi, kloori ja lämmastikoksiidide mööturid on veel katsetamisjärgus. Ka süsinikdioksiidimöötur on väljatöötamisel, ainult et selles ei toimu möötmine mitte elektroodil reageeriva aine hulga järgi, vaid läbi membraani difundeerunud süsinikdioksiidist tingitud indikaatorlahuse happesuse muutuse järgi.

## 6. ELEKTROKEEMILINE TEHNOLOOGIA JA KESKKONNA SAASTATUSE LIKVIDEERIMINE

Paljud protsessid, mis toimuvad praegu kõrgel temperatuuril ja mille käigus tekib ohtralt jäätmeprodukte, on otstarbekam teostada elektrokeemiliselt. Toorainena saab kasutada paljusid tootmisjääke. Mõistagi on kõige paremaks selleks vaja odavat elektrienergiat ja suuremahulist uurimistööd.

Enamik tehnoloogiliste protsesside aluseks on redoksreaktsioonid, mille käigus kulutatakse suurtes kogustes redutseerijaid (sütt, süsinikmonooksiidi, vesinikku, aktiivseid metalle) ja oksüdeerijaid (kloori, osoni, lämmastikhapet). Kõige võimsam redutseerija ja oksüdeerija on aga alalisvool: anoodil toimub oksüdeerimine, katoodil redutseerimine. Seega on keemilise tehnoloogia elektrokeemiliseks muutmine täiesti võimalik.

See avaldub näiteks sulfiidsete mineraalide termotöötlemisel. Pliid, tsinki jt. metalle toodetakse sulfiididest peamiselt maagi oksüdeerimise teel, millele järgneb oksüidi redutseerimine, oksiid on aga energeetiliselt stabiilsem ühend kui sulfiid. Peale energia raiskamise tingib see meetod ka vääveldioksiidi paiskumise atmosfääri. Nendest puudustest on vaba elektrokeemiline tehnoloogia — sulfiidide lahustamine hapetes ning sellele järgnev elektrolüüs.

Peale tootmises tekkivate jäätmeproduktide hulga olulise vähenemise võimaldab elektrokeemiline tehnoloogia vähendada varem tekitatud saastatust jäätmeproduktide ja heitproduktide kasutamise ning hävitamise teel. Roiskvee orgaanilisest

jäägist on tavaliselt 60% tselluloos, mida saab anoodil elektrokeemiliselt oksüdeerida süsinikdioksiidiks. Veel otstarbekam on seda teha kütuseelemendis, kus oksüdatsioonil vabanev energia muudetakse elektrienergiaks. Oksüdatsioonil eralduvat CO<sub>2</sub> saab katoodselt taandada kas metanooliks või formaldehüüdiks. Formaldehüüd moodustab õhulämmastikuga ensüümi abil proteiini.

Anoodse oksüdatsiooni teel võib hävitada kahjulikke ja mürgiseid tootmisjääke, näiteks tsüaniide. Oksüdeerimine võib seejuures olla otsene või kaudne, s. t. viimasel juhul on oksüdeerijaks anoodil eralduv hapnik või kloor. Kaudne elektrolüüs sobib ka olmevete steriliseerimiseks. Enne elektrolüüsi tuleb neile lisada merevett või keedusoola. Elektrolüüsitud merevees hävivad näiteks *coli*-bakterid juba 20 minuti jooksul. Fenoolide sisaldavate heitvete puhastamisel pole see meetod kloorfenoolide tekke tõttu tulemusi andnud.

Jäätmeproduktide kasutamisel ja hävitamisel on jällegi kõige otstarbekam elektrolüüs. Happega segatud jäätmeproduktide elektrolüüsil oksüdeeruvad anoodil orgaanilised ained, katoodile aga sadestuvad metallid. Kui taandamine toimub konstantsel potentsiaalil (potentsiostaatilistel tingimustel), on katoodile võimalik koguda eri metalle, sest iga metall taandub kindlal potentsiaaliväärtusel. Selliselt oleks võimalik vanad prügmäed kaevandusteks muuta ning utiliseerunud autodest metalle taastada. Autoehituses kasutatavatest metallidest koguneb alumiinium lahusesse.

Nüüdisaegne äraviskajate ühiskond tekitab kolossaalsetes kogustes utiliiti. Nii koguti näiteks USA-s 1970. aastal utiliiti 20 miljoni dollari väärtuses. Ka meie tööstus ei saa läbi looduse reostamiseta ja jäätmeproduktide kuhjumiseta. Näiteks toodame aastas 8—10 miljonit tonni šlakki, 100 miljonit kuupmeetrit puidujäätmeprodukte ja äraviskatavat taarat ning 3 miljonit tonni makulatuuri. Osaliselt oleme juba õppinud neid jäätmeprodukte kasutama (näiteks põlevkivituhka). NSV Liidu ehitusmaterjalitööstuse ministri asetäitja A. Boldõrevi arvates on aeg koostada üleliiduline programm «Jäätmeproduktid». Sekundaarse tooraine kasutamisel oleks nii majanduslik kui ka keskkonnakaitseline efekt. Me risustaksime siis vähem oma koduplaneeti ja suurendaksime vähem tema entroopiat.

Eespool oli juttu sellest, mida suudaks anda elektrokeemiline tehnoloogia, kui inimkonna käsutuses oleks piisavalt odavat elektrienergiat. Aga senikaua? Elektrokee-

mia suudab pakkuda lahendusi ka praegu, mil suurem osa elektrienergiast toodetakse fossiilkütustest. Elektriauto hoiaks ära linnade õhu lokaalse saastumise ka praegustes tingimustes. Suured elektrijaamad on ju linnast väljas ja pealegi saab suurte küttekollete korral heitgaase paremini puhastada. Elukeskkonda mittedaastava energia tootmise võimalustele ongi pühendatud meie raamatu järgmine peatükk.

### III peatükk

## ÖKOLOOGILISELT PUHTA ENERGIA TOOTMISE VÕIMALUSED

---

### 1. PÄIKESEENERGIA VAHETU KASUTAMINE

Kõige olulisem, vajalikum ja puhtam kõikidest energialiikidest on päikeseenergia — kõige elava alus Maal. Kuidas me teda ka ei kasutaks, läbi milliste muunduste ka ei degradeeriks, ei riku see isegi Maa energiabilanssi. Lõpuks hajub ta ikka jälle maailmaruumi.

Päikese termotuumareaktor töötab juba väga kaua enam-vähem püsiva võimsusega ja toodab  $1,25 \cdot 10^{34}$  džauli energiat aastas. Maa saab sellest kõigest 0,4 miljardikku ehk  $5,4 \cdot 10^{24}$  J. Maale langeva energiavoo võimsus on  $1,7 \cdot 10^{17}$  J·s<sup>-1</sup>, kuid maapinnani jõuab sellest umbes pool. Võrreldes inimkonna poolt tarbitavaga, on päikeseenergia voo võimsus suur, kuid tema keskmine tihedus on tehnikas kasutamiseks madal ning jaotus ebaühtlane. Siiski koguneb aasta jooksul pinnaühiku kohta üsna soliidne energiahulk, mis näiteks isegi põhjamaises Eestis on ligikaudu  $955 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ , s. o. rohkem kui perekonna aastane energiatarvidus.

On loomulik, et looduse poolt heldelt jagatavat päikeseenergiat on inimkond juba iidsetest aegadest peale püüdnud oma huvides kasutada. Nii olevat Archimedes juba 214. aastal e.m.a soovitanud Sürakuusa kaitsjatel käsipeeglitega suunata kiirgus ründavate roomlaste laevapurjedele, et need süüdata. Kas see õnnestus, pole teada.

Ammusest ajast peale on päikeseenergiat kasutatud ka vee soojendamiseks ja kasvuhoonete kütmiseks. Klaasiga kaetud mustas kastis võib temperatuur lõunapäikese toimel tõusta 300 °C-ni. Reflektoritega koondatud päikesekiired on tõstnud temperatuuri 4000 °C-ni, millest piisab ka kõige raskemini sulavate metallide sulatamiseks.

Nüüdisajal püütakse päikeseenergiat kasutada hoonete kütmiseks, elektrienergia tootmiseks ja mitmeks muuks otstarbeks. Päikeseenergia vahetu muutmine elektrienergiaks on praegu veel kallis ja väheefektiivne, kuid arvestades kogu maailmas selles suunas tehtavaid intensiivseid uuringuid, tulevikus kindlasti realiseeritav.

Päikeseenergiat elektrienergiaks muutvat seadmete kogumit nimetatakse päikeseelektrijaamaks. Väikese võimsusega päikeseplatadeid on juba tükk aega kasutusel kosmoselaevadel ja ka maistel signalisatsiooni- ja side-seadmetel. Juba kolmandal Nõukogudemaa sputnikul 1958. aastal oli päikeseplatad ja see on energiaallikaks ka näiteks Laadoga ja Baikali navigatsiooniseadmetele ning telefonsidele Inglismaa mägistel aladel.

Päikeseplatadeis muundatakse päikeseenergia vahetult elektrienergiaks tavaliselt ränifotoelementide abil. Et fotoelementid suudaksid tavaliste soojuselektrijaamadega majanduslikult konkureerida, tuleb nende praegust hinda sada korda alandada. Seda ülesannet püütakse lahendada mitmeti, näiteks õhukesekihiliste silikoonfotoelementide loomise teel. On asutatud mitmeid suuri uurimiskeskusi ja koostatud rahvusprogramme. Eriti oluline on päikeseplatade kasutuselevõtt elektrita rajoonides, kus elab veel näiteks 96% aafriklastest. Viimasel ajal ilmub sageli teateid uute, efektiivsete ja odavate päikeseplatade väljatöötamise kohta. Nii on vask- ja kaadmiumsulfidkilest energiamuundurite kasutegur 7,8% ja ruutmeetri maksumus kõigest üks dollar. Galliumarseniidi alusel väljatöötatud fotoelementide kasutegur ulatub juba 15—20 protsendini, kuid nende ruutmeeter maksab vähemalt 150 dollarit.

Üks suurejoonelisemaid programme «Päikesepaiste» on koostatud energianappuses vaevlevas Jaapanis. Selle programmi maksumus on 7 miljardit dollarit (triljon jeeni) ning nimi viitab lootusele, et mittesaastava energia kasutamine suurendab päikesepaistelist päevade arvu. Juba 1980. aastaks on planeeritud 1 megavattise võimsusega

fotoelektrilise jaama rajamine, kaugemas perspektiivis on 100-megavattine süsteem (1991. aastaks).

USA fotoelektrilise programmi juht H. R. Blieden loodab, et 1990. aastaks saavutavad nad tipptunnivõimsuseks 5000 MW, aastaks 2000 aga juba 20 000 MW, mis moodustab 2% riigi kogu energiatarvidusest. Intensiivsed uuringud toimuvad ka Lääne-Euroopas. Nii asutas Euroopa Ühisturg uurimisinstituudi Itaalias ning Saksa FV finantseerib üsna mahukat rahvuslikku uurimisprogrammi. Ka Nõukogude Liidus viiakse ellu keskkonda mittesaastavate energiaallikate kasutuselevõtu plaani. On arvatud, et lähema 10—15 aasta jooksul võib meie maal tööle hakata 200 000—250 000 päikese- ja tuuleenergiaseadet kogutoodanguga kuni  $6,8 \cdot 10^9$  kW·h aastas. Esimene rahvusvaheline päikeseenergia kongress toimus 1973. aastal UNESCO egiidi all Pariisis. Fotoelektriliste päikeseelektrijaamade väljatöötamine on keerukas ja kallis üritus. On avaldatud arvamust, et see oleks Lähis-Ida riikidele nende praeguse naftakapitali üks soodsamaid ja perspektiivikamaid paigutamisevõimalusi. Kui kõrbepõu kord naftast tühjaks ammutatakse, lubaksid kõrbe pinda hõlpsalt soojendava Päikese energiat muundavad seadised nendel maalid ikkagi energia eksportijateks jääda.

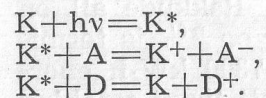
Üks huvitavamaid päikeseenergiat töötavaid süsteeme on USA-s Delaware'i ülikoolis väljatöötatud Delaware'i Päikesemaja (*Solar One*). See eksperimentaalne päikeseelektri ja -küttega. 800 ruutjala suurune katus on paigutatud lõuna suunas 45° nurga all ja koosneb 1200-st fotoelementidest. Kaadmiumsulfidvask(I)sulfid-fotoelementid on asetatud välise akrüül- ja sisemise klaaskihi vahele ning on ühendatud pliiakudega. Rakkude all on soojuskogurid. Kui elektriline kasutegur on 7% ja termiline kasutegur 40%, toodetakse aastas 7300 kW·h energiat ning  $25 \cdot 10^6$  kcal soojust. Ühe kilovatt-tunni omahind on 3,4 senti.

Päikeseenergiat on soojendamiseks ja valgustamiseks tunduvalt lihtsam kasutada kui otseselt elektrienergiaks muuta. Kui päikeseenergiat kasutatakse kütmiseks ja keskmisel temperatuuril toimuvate tehnoloogiliste protsesside läbiviimiseks, on ka kasutegur suurim. Selliseid protsesse on toiduainete- ja tekstiilitööstuses üsna palju. Energianappuse tõttu mõeldi näiteks USA-s välja keerukad peeglite süsteemid, et valgustada «korstna kaudu» varem ilma akendeta ehitatud bürooruume.

Päikesesoojuse arvel tekkinud veeauru energiat võib auruturbiinide abil elektrienergiaks muuta, kuid keerukas abiseadmete võrk teeb selle kalliks. Loomulikult on soojust vaheastmena sisaldava energiamuunduri kasutegur väike, kuid käesoleval juhul pole see määrav, sest muidu muutuks päikeseenergia ilma igasuguse kasutegurita soojuseks.

Päikeseenergia kasutamist vee soojendamiseks ja magistamiseks peetakse perspektiivseks nii meil kui ka raja taga. Maailma esimene päikese-veemagestusseade alustas tööd juba 1883. aastal Tšiilis. Päikeseenergial töötavaid veesoojendeid, -magesteid ja -pumpi toodetakse ja kasutatakse Kesk-Aasia liiduvabariikides. Nii Taškendis kui ka Ašhabadis on eksperimentaalmaaju, mida talvel kütab, suvel aga jahutab Päike. Mehhiko tellis Prantsusmaalt 1000 päikeseenergial töötavat irrigatsioonisüsteemi pumpa.

Päikeselt saab energiat kogu loodus. Päikeseenergia muudetakse keemiliseks energiaks fotosünteesi käigus, kusjuures päikeseenergia kinnipüüdjaks on klorofüll. Kuigi päikeseenergia kasutegur fotosünteesis on ligikaudu 1%, püütakse Maal aasta jooksul kinni  $7 \cdot 10^{21}$  J energiat. Suurema osa sellest seovad ainuraksed vetikad. Fotosünteesi üldine aastatoodang maailmas on  $8 \cdot 10^{10}$  t biomassi. Fotosünteesi esimeses astmes ergastub klorofüll (K) valguskvandi (hv) toimel. Edasi võib ergastatud klorofüll ( $K^*$ ) oma kõrge energiaga elektroni naabermolekulile (A) üle anda ja teiselt naabrilt (D) endale hiljem uue elektroni asemele võtta. Nende protsesside skeem näeb välja järgmine:



Nii tekitatakse välise energia arvel aines laengute ja energia ebauhtlus. Tekkinud kõrge energiaga tsentrid  $A^-$  ja  $D^+$  saavad redoksreaktsioonide ahelate aluseks. Need ahelad viivad vee molekuli lagunemisele vesinikuks ja hapnikuks. Hapnik eraldub atmosfääri, vesinikus talletunud energia aga kasutatakse ära eluprotsessides. Taimedes toimuv vee elektrolüüs ületab oma mahult tuhandeid kordi kõiki tööstuses toimuvaid elektrokeemilisi protsesse. Kõik organismide energiavajadused rahuldatakse fotosünteesis ergastatud elektronide ja tekkinud vesinikuaatomite

energia arvel. Ahela lõpus tekib jälle vesi. Inimorganismis sünteesitakse nii umbes 300 g vett ööpäevas.

Ei ole veel täpselt teada, kuidas toimub elektronide äravõtmine veemolekulide hapnikkudelt, sest hapnikumolekuli ( $O_2$ ) tekkeks on vajalik üheaegselt nelja elektroni üleandmine. On aga teada, et selleks on olemas spetsiifiline katalüsaator, võimalik, et nelja mangaaniaatomit sisaldav kompleks. Sellise katalüsaatori kindlakstegemisel ja individuaalse aina eraldamisel on tohtu praktiline tähtsus.

Nimelt näitavad arvutused, et fotosünteesi esimeses staadiumis — vesiniku ja hapniku tekkimisel — võib kasutegur olla 28%. Seega saaksime loodusliku protsessi printsiipi rakendades toota kolossaalse hulga vesinikuvormis energiat, ühelt ruutkilomeetrilt kõrbepinnalt näiteks võimsuse 50 000 kW. Kõrbeala suurusega  $70 \times 70$  km annaks siis kaks korda rohkem energiat kui Nõukogude Liidu elektrijaamad praegu kokku. Saadud vesinikuenergiat võib kasutada valku ja rasvu tootvate vesinikubakterite metabolismiks. Nii saaks luua isegi suletud ainevahetustsükli, mis on eriti oluline näiteks kosmoselaevadel. Põhimõtteliselt on fotosünteesi võimalik katkestada ka järgmistel astmetel, tootes niiviisi vajalikku kütust või toorainet.

Maailmas toodetakse aastas  $8 \cdot 10^9$  t taimseid toiduaineid. Peale selle on taimne tootmine ka väärtuslik tooraine ja kütus. Kõige selle tootmiseks kulub aga palju maad, tööd ja energiat ning pealegi kahjustab põllumajandus elukeskkonda. Saagikuse looduslik piir oleks nagu fotosünteesi kasuteguriga ette antud. Arvutused näitavad, et fotosünteesi teoreetiline kasutegur ulatub 24%-ni. Ka taimede kunstlikul (mullata) kasvatamisel on kasutegur olnud tublisti üle ühe protsendi. Ühe huvitava intensiivse taimekasvatuseadme — fütodroomi A projekti on esitanud V. Golovin. Tema idee järgi võiks Karakumi rajatav  $100 \times 300$  km suurune fütodroom toita  $4 \cdot 10^8$  inimest ja selle loomine läheks maksma  $6 \cdot 10^{11}$  rubla. Säärane suletud seade oleks ökoloogiliselt puhas, kõik väetised ja mürkemikaalid läheksid siin asja ette ning vihmaveed ei kannaks neid jõgedesse.

Tundub, et Maale suundub inimestele küllaldane kogus päikeseenergiat. Küsimus on ainult selles, mida mõistlikku me tolle energiaga peale oskame hakata. Ometi on olemas projekte ja ideid, mille järgi püütakse Maale suunata veel

rohkem päikeseenergiat. Näiteks soovib USA teadlane K. A. Ehricke viia peeglid Maa tehiskaaslase orbiidile. Niisuguste peeglitega, lunettidega, võib valgustada Maa õist poolt, kusjuures täiskuuheledusega võrdse valgustuse saamiseks peaks peegli pindala olema kõigest  $0,22 \text{ km}^2$ . On esitatud projekt 80-kordse täiskuuheleduse saavutamiseks. Programmi maksumus on  $15 \cdot 10^9$  dollarit, kasu oleks aga tohutu suur. See seisneks eeskätt võimaluses loobuda tänavavalgustusest ning pikendada külvi- ja koristusaegu. Kulutatakse ju tänavavalgustusele praegu aastas  $2 \cdot 10^6$  t naftat. Kunstlikud valged ööd võivad mõnede teadlaste arvates rikkuda ökoloogilist tasakaalu, segada näiteks rändlindude orientatsiooni, kuid projekti autorid loodavad, et suurt segadust siiski ei teki.

Peale öise valgustamise on peeglitega põhimõtteliselt võimalik juhtida Maale ka nii palju lisavalgust, et see on võrreldav loomuliku energiavooga. Lisaenergiavoog kiirendaks fotosünteesi ja suurendaks päikeseelektrijaamade toodangut, kuid ilmselt tõstaks ka ohtlikult Maa keskmist temperatuuri. Mõistlikum tundub siin idee, mille kohaselt orbiidil tiirlevalt päikeseplatvormilt saadav energia transformeeritakse Maale ülikõrgsagedusenergiaks.

Mis siis takistab päikeseenergia otsest kasutamist kasuliku töö saamiseks ja millised on tema praktilise rakendamise perspektiivid? Suurim raskus on energiavoo hajutatus, mistõttu saadava voo intensiivsus ei ületa 1000 vatti ruutmeetrile. Arvestades ka muundurite kasutegureid, saab ööpäevas toota ruutmeetrilt  $0,5\text{--}1,0 \text{ kW}\cdot\text{h}$  energiat. Kui võtta arenenud ühiskonna energiavajaduseks  $50 \text{ kW}\cdot\text{h}$  inimese kohta ööpäevas, on Tartu-suuruse linna energiaga varustamiseks vaja 5 ruutkilomeetrist kollektorit. On seda palju või vähe? Kuidas võtta  $5\text{-km}^2$  pindalaga fotoelement on muidugi kolossaalne ehitis, kuid teiselt poolt näitavad arvutused, et kui ka kõigest 1% USA pinnast oleks kaetud elemendiga, mille töö efektiivsus on 10%, toodetaks seal energiat rohkem, kui praegu vaja läheb. Saksa FV teadlased on esitanud projekti, mille kohaselt  $920\text{-km}^2$  pindalaga Gibraltari laiuskraadil asuv heliojaam suudab rahuldada peaaegu kogu Saksa FV energiavajaduse. Tegemist on termoelektrilise ja elektrokeemilise jaamaga, kus Päike kuumutab musti plaate  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ -ni. Kasutades plaatide ja merevee temperatuuri vahet, genereerivad termoelektrilised elemendid voolu, mis läheb vesiniku tootmiseks vee elektrolüüsil.

Väga suurte päikesekollektorite ehitamisel tuleb arvestada, et see tegevus ei pruugi ökoloogiliselt täiesti ohutu olla. Satuvad ju sel juhul üsna suured seni intensiivselt valgustatud alad pidevasse varju. Millised muutused toimuvad siis taimestiku ja loomastikuga, pole ette teada.

Peale hajutatuse on tõsiseks takistuseks päikeseenergia kasutamisel veel tema ajaline ja ruumiline ebaühtlus. See teeb vajalikuks kallid automaatsed orienteerumisseadmed, mis hoiavad töötavaid pindu kiirgusega risti. Kõige suuremaks takistuseks on teaduse mitteküllaldane areng. Päikeseenergia praktiliseks kasutuselevõtuks on vaja palju tööd ja kalleid seadmeid, kuid mäng on küünlaid väärt.

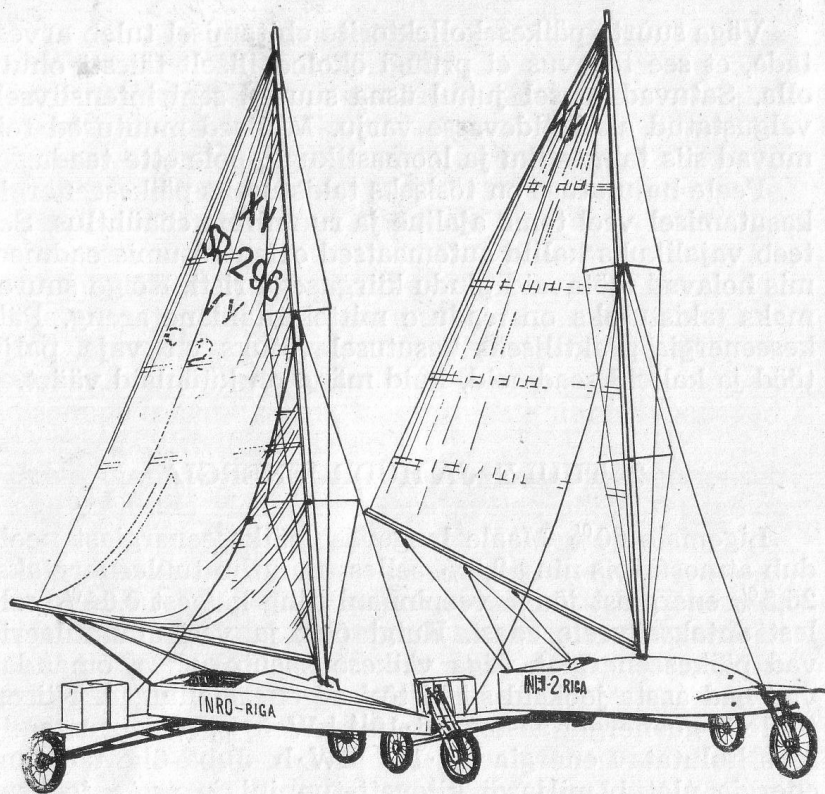
## 2. TUULE- JA HÜDROENERGIA

Ligemale 60% Maale langevast päikeseenergiast neeldub atmosfääris ning 2,5% sellest muutub tuuleenergiaks. 25,5% energiast jõuab veepinnani ning kõigest 0,04% sellest antakse veele edasi. Kuigi õhk ja vesi akumuleerivad päikeseenergiat väga väikese kasuteguriga, omandavad nad aasta jooksul siiski tõsised energiahulgad. Nii on tuule kogenergia aastas  $4,6 \cdot 10^{14} \text{ kW}\cdot\text{h}$  ja vee aurustamiseks kulutatav energia  $3,5 \cdot 10^{13} \text{ kW}\cdot\text{h}$ . Juba ühe tsükloni energia ulatub miljardi kilovatt-tunnini ja aasta jooksul pumbatakse atmosfääri  $435\,000 \text{ km}^3$  vett. Energia pole küll meie oma, kuid siiski on kahju, kui ta kasutult (töök muutumata) hajub. Ületab ju tuule kogenergia sajakordselt inimkonna poolt aastas kasutatava energia.

Päris kasutamata tuule- ja vooluvee-energia muidugi ei jää. Tasapisi on inimkond neid juba hallidest aegadest peale oma teenistusse rakendanud, meenutagem kas või purjelaevu, tuule- ja vesiveskeid ning palgiparvetamist. Tuult on püütud muudki tegema panna, näiteks Eestis möödunud sajandi lõpul viljapeksuagregaatide ringi vedama. Enne Suurt Isamaasõda töötasid meil mitmel pool tuulerattad, mille abil pumbati vett ning genereeriti elektrit nii valgustamiseks kui ka akude laadimiseks. Vahetult pärast sõda, kui elektrienergiast oli karjuv puudus, kirjutati Nõukogude Eesti noorsoo ajaloo kangelaslikud leheküljed Leevaku ja Saesaare hüdroelektrijaama ehitusel.

Kogu võimalikust energiahulgast on praegu rakendatud väike osa. See kehtib eriti tuuleenergia kohta, kuna hüdroenergiat on hoopiski vähem ja seda on ka rohkem





Maismaapurjekas — üks paljudest võimalustest tuuleenergia kasutamiseks

rakendatud. Hüdroelektrijaamad katavad praegu umbes 2% inimkonna energiatarvidusest ja on välja arvatud, et ka hüdroenergia täieliku rakendamise korral ei tõuseks selle osa üle 5%. Nõukogude Liidus suudaksid hüdroelektrijaamad anda 7,8% vajalikust energiast ning ainult mõnedes erandlikes looduslikes tingimustes asuvates riikides annavad nad olulise osa, näiteks Norras 99,7% kogu elektrienergiast.

Termoenergeetika areng möödunud ja käesoleval sajandil tõi kaasa tõsise languse tuuleenergia kasutamises (kadusid ju nii purjekad kui ka tuulikud), nüüdne energia- ja ökoloogiline kriis aga on sundinud inimkonda uuesti tuulelt abi otsima. On ehitatud eksperimentaalseid tuuleelektrijaamu, nailonpurjedega kaubalaevu ja sportlikel

eesmärkidel isegi maismaapurjekaid. Omaehitatud tuule sõidukiga reisis näiteks Riia Meditsiiniinstituudi dotsent R. Gerkes mööda kõrbet Kaspiast Araalini ja saavutas kohati 60—70-kilomeetrise tunni kiiruse.

Põhiraskus tuuleenergia rakendamisel, nagu päikeseenergia puhulgi, on tema väike tihedus, hajutatud ja ajaline muutlikkus. Seetõttu seostatakse tuleviku suurte tuuleelektrijaamade ehitamist eeskätt kõrgemate, püsiva suuna ja kiirusega õhuvoolude energia kasutamiseks. Tuuleenergia kasutegur võib nüüdisgeneraatorites ulatuda 45—47 protsendini. Reas Nõukogude Liidu soodsate tuuleoludega rajoonides on tuule abil toodetud kilovatt-tunni maksumus 2—4 korda madalam vedelkütusel töötavates elektrijaamades toodetud energia maksumusest. Eriti perspektiivsed on tuuleelektrijaamad statsionaarsetest elektrivõrkudest eemal asuvates rajoonides.

### 3. GEOTERMILINE NING LOODETE ENERGIA

Nii maasisest soojust kui ka tõusude-mõõnade energiat püüab inimkond enda heaks tööle panna. Need looduslike geofüüsikaliste protsesside energiad pole pärit Päikeselt, kuid on isetaastuvad ja mittesaastavad. Kuigi tuule- ja päikeseenergiast eksootilisemad, on nende varud üsna suured ja rakendatavus väljaspool kahtlust. Nii hinnatakse loodete võimsust  $3 \cdot 10^9$  ja geomeetrilise energiavoo võimsust  $3 \cdot 10^8$  kilovatile, mis teeb aasta kohta ligemale  $10^{16}$  kW·h energiat.

Geotermilise energia kasutamine on perspektiivne seal, kus ta spontaanselt maapinnale tuleb, s. o. geisrite tegevuspiirkonnas. Sellised piirkonnad on näiteks Island, Itaalia, Uus-Meremaa, Geisrite org USA-s ja Kamtšatkal Nõukogude Liidus. Esimene maapõuest saadavat auru kasutatav masin ehitati Toskaanis (Itaalia) juba 1904 aastal. USA alustas 1973. aastal tööd 360-megavattine jaam. Loodeatakse, et 1985. aastaks on jaamade võimsus 132 000 megavatti. Kamtšatkal töötab Paužetskaja geotermiline jaam ning projekteeritakse jaama, kus töötav aine on freon-12. Asi on selles, et maapinnast väljuva vee temperatuur ei ületa oluliselt  $100^\circ\text{C}$ , mistõttu veeaurul töötav masin on kohmakas ja väikese kasuteguriga. Et freon-12 keemispunkt on  $55^\circ\text{C}$ , siis on tema aururõhk väljuva vee temperatuuril tunduvalt kõrgem ja masina kasutegur parem.

Selle probleemiga puutume veelgi teravamalt kokku neljandas alapeatükis, kus tuleb juttu ookeanide pinnavee soojuse kasutamisest.

Teame, et Maa sisemuse suunas tõuseb temperatuur keskmiselt 1 °C võrra 33 meetri kohta. Seega on võimalik maasisestel tuumareaktsioonidel vabanevat soojust kasutada nii seal, kus ta ise välja tuleb, kui ka mujal. On esitatud nn. geotermilise kaevu idee, mis seisneb selles et üsna sügavale paigutatud torudest juhitakse vesi läbi. Nii saab maasisest soojust «välja pumbata» ja kasutada. Kui vett läbi 5 km sügavusele paigutatud torude pumbata, võib ta kuumeneda 200 °C-ni.

Looded on Maa kui terviku deformatsioonid tema enese ja teiste taevakehade, eeskätt Kuu ja Päikese gravitatsiooniväljade koosmõjul. Loodete tõttu muutub perioodiliselt maailmamere veetase. Veenivoode erinevus tõusu ja mõõna korral ulatub 21 meetrini. Kui mingisse väina, lahe- või jõesuusesse ehitada tamm ja paigutada turbiinid, saab edasi-tagasi voolava vee energiat kasutada. Primitiivseid tõusu-mõõna-vesiveskeid ehitati Inglismaal ja Prantsusmaal juba keskajal.

Maailma suurim loodete elektriyaam (240 MW) asub Prantsusmaal Rance'i jõel. 1980. aastaks projekteeritakse Mont-Saint-Micheli lahte jaam võimsusega  $12 \cdot 10^3$  MW. Nõukogude Liidu esimene loodete elektriyaam töötab Koola poolsaarel.

#### 4. MAAILMAMERE ENERGIA KASUTAMINE

Kuigi ookean on väike, et saada hakkama kogu praeguse inimkonna poolt toodetud saastaga, on temas peituvad tooraine- ja energiavarud inimkonna poolt kasutatavatega võrreldes tohtu suured. Ookeanis peituvate energiavarude kasutatavaks muutmine on vahel isegi põhimõtteliselt raske. Viimasel ajal on pakutud huvitavaid ideid ning on väljatöötamisel mitmeid projekte ookeanist energia kättesaamiseks. Mõningatele sellistele pööramegi järgnevalt tähelepanu. Kuigi enamik projektidest pole veel rakendusküpsed, on nad põhimõtteliselt uudsed ja huvitavad. Esimene neist on seotud troopilise ookeani pinnakihi soojuse kasutamiseega töö saamiseks. Vee erisoojuse ja maailmamere suure mahu ( $1,4 \cdot 10^9$  km<sup>2</sup>) tõttu on

viimase soojusmahutavus suur. Arvutused näitavad, et kui soojuse, mis eraldub maailmamere temperatuuri alandamisel 1 °C võrra, saaks kasutatavaks energiaks muuta, jätkuks sellest praegusele inimkonnale terveks aastaks. 1 km<sup>3</sup> vee soojendamiseks 25° võrra kulub aga 7 korda rohkem energiat, kui toodetakse USA-s ühe päeva jooksul. Selline võrdlus tekitab paratamatult soovi muuta osagi maailmamere vees peituvast energiast elektrienergiaks. Termodünaamika teine seadus ei luba aga ma lalatemperatuurilise keha energiat tööks muuta ega tasal aalulisest süsteemist kasulikku tööd saada. Õnneks pole ookean tasakaaluline süsteem, mistõttu osa temas peituvast energiast on siiski võimalik kasutada.

Soojusmasina kasutegur on määratud soojendi ja jahuti temperatuuride vahega. Troopilise ookeani pinnatemperatuur on umbes 25 kraadi kõrgem kui 1 km sügavusel (ja sügavamal) asuvate veekihtide temperatuur. Projektide järgi on mere pinna- ja põhjakihtide temperatuuride erinevusel töötavate masinate kasutegur tavaliselt 2–3%. Et küllastatud vee aururõhk temperatuuril 25 °C on kõigest 30 torri, siis peaksid sellise soojusmasina mõõtmed sama võimsuse saamiseks olema 10<sup>4</sup> korda suuremad kui tavalisel masinal, kui aga kasutada töötava vedelikuna mitte vett, vaid suurema aururõhuga vedelikke (ammoniaak, propaan), võib masina mõõtmeid oluliselt vähendada. Reas projektides rõhutatakse, et niisuguse soojuselektriyaama põhitoodanguks polegi elektrienergia, vaid hoopis olulisem on siin jahutites kondenseerunud puhas magevesi. Jaama töö teine tähtis tulemus on ookeani bioproduktiooni kasv. Asi on selles, et troopikamere pinnakihid on soojus- ja valgusrikkad, kuid biosüntees on neis aeglustunud toitainete (eeskätt lämmastiku ja fosfori) puuduse tõttu. Neid mineraale on aga põhjakihtides külluses. Kui jaamas pumbatakse mineraalaineterikkad põhjakihid pinnale, siis soodustab see oluliselt bioproduktiooni kasvu. Külmade põhjakihtide pinnaletungimine toimub looduslikult Peruu šelfil, mis tänu Humboldti hoovusele annab kuni 1/5 maailma kalatoodangust.

Esimesena esitas idee troopilise ookeani soojuse kasutamisest elektrienergia tootmiseks prantslane Jacques Darconvalle 1881. aastal. Esimese 22-kilovatise seadme Kuuba rannavetesse ehitas insener Georg Claude meie sajandi 20. aastatel. Ideid arendama ollakse nüüdisajal küll varmad,

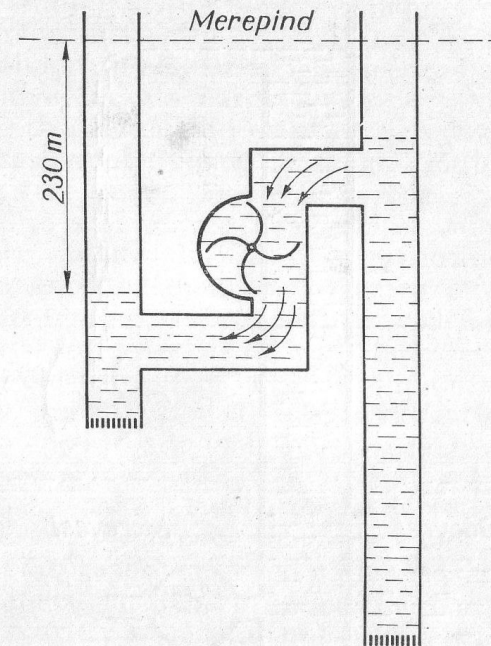
kuid paraku tuleb rentaabli seadise loomiseks ületada terve rida tehnilisi raskusi.

Troopikajõujaamaga sarnaneb põhimõtteliselt ka polaarjõujaam: sobiva ainega, näiteks butaaniga (keemispunkt  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) töötav soojusmasin muudab tööks osa vee jäätumisel vabanevast soojusest.

On esitatud ka projekte, mille kohaselt erinevate aurustumiskiiruste tõttu tekkiv veenivoode vahe võimaldab saada hüdroenergiat meredes. Üks suurejoonelisem omataoliste hulgas on saksa inseneri Sörgeli projekt, mille järgi Vahemeri tuleb tammidega sulgeda. Selle pind hakkab siis langema 1,5 m aastas. Kui Vahemere pind saab Atlandi ookeani pinnast 200 m madalamaks, võib rakendada tööle hüdroelektrijaama võimsusega  $1-1,5 \cdot 10^8$  kW. Seejuures püsivad veetasemed erinevad aurustumise tõttu. Mis aga saaks siis ümbruskonna kliimast? Mõnikümmend aastat tagasi, kui inimkond tundis end looduse suure ümberkujundajana, seda küsimust veel nii teravalt ei esitatud ja taolisi projekte arutati tõsimeelselt.

Mitmed huvitavad ideed ookeanides peituvate energia- ja veevarude kasutamiseks on seotud osmoosinähtusega. Osmoos seisneb teatavasti lahusti (vee) molekulide eelistatud liikumises läbi poolläbilaskva membraani (näit. tsellofaani) lahjemast lahusest kontsentreeritumasse. Osmoosi tõttu lahuste kontsentratsioonid ühtlustuvad, süsteemi vabaenergia väheneb ja vabanev energiaosa ( $-\Delta G$ ) muudetakse kasulikuks tööks. Osmoosi seisukohalt iseloomustab lahuseid osmootne rõhk, mis on seda suurem, mida kontsentreeritum on lahus. Maailmaookeani vee keskmine soolsus on 3,5%, millele vastab osmootne rõhk ligikaudu 23 atm, s. t. puhas vesi tungib läbi poolläbilaskva membraani merevette rõhuga 23 atm, millele vastab veesamba kõrgus umbes 230 m.

Ülalöeldust selgub, et kui mereveele rakendada suuremat rõhku kui 23 atm, peab magevesi hakkama membraanist läbi minema, kuna membraan lahustatud aine osakesi läbi ei lase. Kui nüüd katta üsna pika toru ots poolläbilaskva membraaniga ja sukeldada toru ookeani sügavamale kui 230 m, peab torusse imbuma magevesi. Nii saab ookeanist joogivett energiat kulutamata. Veel enam, kui lasta ookeani kahest erineva pikkusega torust ning nende ühenduskohal asuvast turbiinist koosnev seade, on võimalik saada kasulikku tööd. Selle nn. osmootse pumba tööd illustreerib joonis.

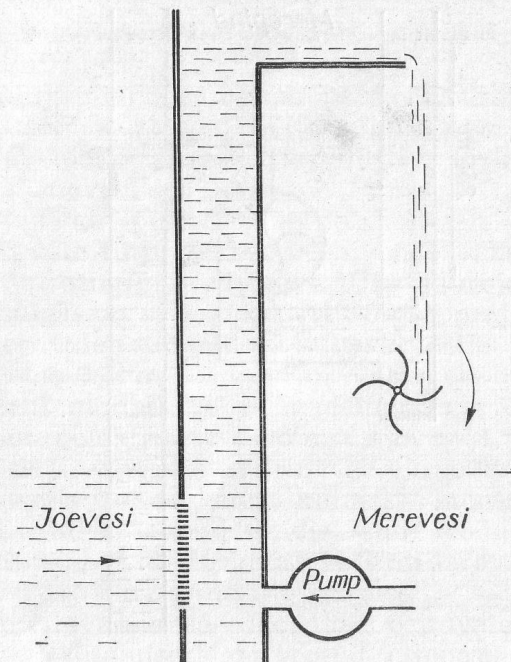


Osmootse pumba skeem

Et soolase vee tihedus on magevee tihedusest 3% suurem, siis tõuseb veesammas torus seda kõrgemale, mida sügavamal on toru ots. Arvutused näitavad, et kui toru ots oleks 10 km sügavusel, tõuseks magevee sammas 33 m üle merepinna. Seda veesammaste erinevast kõrgusest tingitud potentsiaalse energia vahet muudabki osmootne pump kasutatavaks tööks.

Kas selline projekt pole looduseadustega vastuolus, kas ta pole omalaadne *perpetum mobile*? Ei, seda mitte, sest ookean ei ole tasakaaluline süsteem. Reaalses ookeanis on lahustunud soolade kontsentratsioon tänu hoovuste segavale toimele sügavusest praktiliselt sõltumatu. Osmootne pump kasutabki hoovuste kui soojusmasinate energiat, mis on pärit Päikeselt. Seega põhimõtteliselt on osmootne pump tuuleveski ja hüdroelektrijaamaga sarnanev seadeldis.

Omaette probleem on osmootse pumba praktiline rakendus. Nüüdisaegsed sünteetilised membraanid peavad küll vastu tunduvalt suurematele rõhkudele kui 23 atm,



Membraanjõujaama skeem

kuid majanduslikult see seade ennast veel ei tasu, sest mujalt saame energiat odavamalt.

Mereveest magevee eraldamiseks tuleb kulutada tööd. Jõgede suudmetes toimub aga pidevalt vastupidine protsess — magevee segunemine mereveega. Selle isevoolulise protsessi käigus vabaneb energia —  $\Delta G$ , mis vastab vee langemisele 230 m kõrguselt. 1 m<sup>3</sup> magevee segunemisele mereveega vastab osmootne töö  $5,6 \cdot 10^5$  J. Näiteks on USA jõgede koguvoolule vastav maksimaalne segunemisvõimsus  $10^7$  kW, see on võrreldav sealsete jõgede hüdroelektrijaamade koguvõimsusega ja rahuldaks üle ühe miljoni elaniku energiatarviduse.

Membraanjõujaama töötamisel kulub osa saadavast energiast merevee pumpamiseks segukambrisse ning muda ja setete merre suunamiseks. Et veesamba kõrgus segukambris ei ületa samba hüdrostaatilise rõhu tõttu poolt maksimaalselt võimalikust, siis ei ole membraanjõujaama kasutegur ilmselt suurem kui 25%. Membraanjõujaama põhimõttelist tööd selgitab joonis.

Kas selline kunstlik kosk jõesuudmes ei riku ümbruskonna bioloogilist režiimi? Vastuse saab siin anda konkreetsest olukorrast lähtudes. Kui jõesuudmes puudub ulatuslik riimveeala, siis märgatavat loodusliku tasakaalu rikumist ei täheldata. Riimveeala säilitamiseks tuleb ainult osa üldisest vooluhulgast kasutada jõujaamas, osa aga juhtida merre loomulikku teed mööda.

Mage- ja soolase vee segunemisel vabanevat energiat võib tööks muuta ka kontsentratsioonielemendi abil. Kontsentratsioonielement on elektrokeemiline element, milles kaks ühesugust elektroodi asuvad sama elektrolüüdi erinevate kontsentratsioonidega lahustes. Kontsentratsioonid ei ühtlustu nüüd veemolekulide membraanist läbiminekuuga, vaid elektroodireaktsioonide tõttu. Kui kasutada kloriidelektroode (suurema osa merevees leiduvatest sooladest moodustavad ju kloriidid), võib kontsentratsioonielement anda 0,1 volti pinget ja 1670 džauli elektrienergiat 1 liitri seguneva magevee kohta. Veelgi rohkem energiat võib saada magevee segamisel kõrge soolsusega veega, näiteks Surnumere veega.

Üsna suur on ka maailmamere lainetuse energia. Vee lainete koguvõimsus maakeral arvatakse olevat  $9 \cdot 10^7$ — $2,7 \cdot 10^9$  kW. On esitatud rida projekte selle energia kasutamiseks, nagu lainetuse taktis edasi-tagasi võnkuvate labadega või üles-alla võnkuvate parvedega masinad, eri tasanditel asuvatest reservuaaridest koosnev ujumiseadised jne. Reservuaaridel on ühes suunas töötavad siibrid, nii et lained täidavad kõrgemaid ja tühjendavad madalamaid reservuaare. Nii tekitatakse veesammaste kõrguse erinevus. See tööprintsip leiab kasutamist ka loodetelektrijaamades. Esimese 10-megavattise võimsusega laineelektrijaama käikulaskmine on planeeritud Inglismaal 1986. a. Jaapanis töötab juba üle 300 majaka ja poi, mis saavad töötamiseks vajaliku energia lainetuselt. Põhiraskuseks lainete energia kasutamisel on tema ebahühtlus. Mehhanismid peavad suutma tormilainetele vastu pidada, mis teeb nad aga kalliks ja kohmakaks.

Mis kõigest sellest järeldub? Ookean peidab endas mitmeid võimalusi energia tootmiseks looduses kulgevate iseeneslike protsesside arvel. Kui õpime neid võimalusi kasutama, oleme astunud suure sammu, kaitsmaks keskkonda, kus me elame.

## 5. VEEL MÕNINGATEST EKSOOTILISTEST ENERGIATOOTMISE VÕIMALUSTEST

Ühiskonna üha kasvav vajadus energia, eriti elukeskonda mittesaastava energia järele on pannud paljud õpetatud, aga ka õpetamata pead uusi energiaallikaid otsima. Esitatakse mitmesuguseid projekte, millest osa on kasutatavad või vähemalt huvitavad, osa aga suisa fantastilised või lihtsalt sensatsioonimaigulised, nagu näiteks idee kosmilisest naftaookeanist ja Maa-lähedastest mustadest aukudest, mille energiat saaks inimkond kasutada.

Musta augu all mõistetakse tohutu tiheduse ja gravitatsioonijõuga taevakeha, millest ruumi suure kõveruse tõttu mitte mingi kiirus välja ei pääse ja mille kohta me järelikult ka mingit informatsiooni ei saa. Arvamus, et on olemas mustad augud, tuleneb üldisest teoreetilisest maailmamudelitest. 1971. aastal oletati, et võivad eksisteerida ka väikesed mustad augud, millest mõni võib olla Maale üsna lähedal. Kui sellisesse auku saata tuumkütust, peaks auk hakkama kiirgama energiat, mida oleks võimalik Maale üle kanda.

Puit, mis alles sajand tagasi oli valitsevaks kütuseks ja energiaallikaks, katab nüüdisaegse inimkonna energiavajadusest kõigest mõne protsendi. Puidul ja teistel taimsetel kütustel on aga fossiilkütuste ees ka olulisi eeliseid: nende kasutamine ei riku Maa hapniku- ja süsinikdioksiidbilanssi ega saasta atmosfääri vääveldioksiidiga. See tõttu on viimasel ajal koostatud terve rida projekte ja programme taimsetest ja loomsetest produktidest mootorkütuse saamiseks.

Üks tähtsamaid nende seas on Brasiilia alkoholiprogramm. Brasiilia on rikka bioproduktiooniga, kuid praktiliselt ilma naftata maa. Riiklike dotatsioonide abiga on seal loodud olukord, et etanool on bensiinist odavam. Huvitav olukord, kui mõelda, et alles mõnikümmend aastat tagasi pidasime Lebedevi sünteetilise kautšuki tootmise meetodi puuduseks etanooli kasutamist lähteainena. Nii et kõik oleneb olukorrast, kord on toiduained tööstustooraineks liiga kallid, kord jälle saab nafta neist väärtuslikumaks. USA teadlaste arvates on maagaas etanooli sünteesiks juba praegu liiga kallis.

Nobeli preemia laureaat Melvin Calvin teatab, et põõsad *Euphorbia lathyris* ja *Euphorbia tirucalli* annavad mahla, mis on süsivesinike ja vee emulsioon. Esimene liik

kasvab Kalifornias, teine Brasiilias. Põõsad raiutakse maha iga 20 aasta järel ja neid töödeldakse nagu suhkruroogu. Loodetakse saada 1500—7500 liitrit väävlivaba kütteõli aakrilt aastas.

Prantsusmaal on saadud kõrgeväärtuslikku sünteetilist vedelkütust kuivadest maisivartest. Salastatud tehnoloogia järgi loodetakse nii edaspidi toota aastas  $2 \cdot 10^7$  tonni mootorkütust (oktaanarvuga 98).

USA ajakirjades kutsutakse sageli üles tootma vedel- ja gaaskütust puidust, põhust ja teistest taime- ning loomakasvatusjäätmetest. Üks entusiast on koguni arvutanud, et USA lehmad rõhitsevad igal aastal välja  $5 \cdot 10^7$  tonni süsivesinikke, mida saaks kasutada energeetilistel eesmärkidel. Sõnniku ning söödajäätmete bakterioloogilisel lagunemisel eralduvate biogaaside kasutamine on juba reaalsem ja mõningal määral seda Lääne-Euroopa põllumajandusrajoonides ka tehakse.

## 6. MÕNDA ENERGIJA SÄILITAMISEST JA REGENEREERIMISEST

Energia säilitamine ja transport on energiapoliitika olulised osad. Nende probleemide lahendamisel on eriline roll elektrokeemial kui keemilise ja elektrienergia vahendajal. Oleme sellel juba põgusalt peatunud ja peatume seoses vesinikuenergeetika ja keemiliste vooluallikate käsitlemisega ka järgmistes peatükkides. Siinkohal tuleb juttu ainult paarist energia säilitamise viisist — hoorattast ja regeneereerivatest piduritest.

Hooratas on ürgne energia akumuleerimise vahend, milleta ei saa läbi ka tänapäeva sisepõlemismootorid. See on tavaline raske ratas, mis pannakse võimalikult kiiresti pöörlema. Mida suurem on vurr ja mida kiiremini ta pöörleb, seda rohkem energiat ta akumuleerib. Energia, mida hooratas võib koguda, on teoreetiliselt piiramatut. Praktiliselt piiravad seda õhutakistus, hõõrdumine ja materjalide vastupidavus. Esimest saab vältida hooratta vaakumisse paigutamise ja hoorattast energiaallikana kasutavaid autosid, nn. güroautosid kasutatakse juba praegu, kuid nende tegevusraadius on veel väike.

USA teadlane Daniel Renbenhorst on konstrueerinud nn. ülihooratta. See kujutab endast vaakumis pöörlevat erilise konstruktsiooniga hoorattast, mille energiamahuta-

vus on 20 korda suurem kui niisama suurel tavalisel hoo- rattal. 135-kilogrammise ülihoorattaga sõiduauto suudab energiavaru täiendamata läbida niisama palju maad kui tavaline auto paagitäie bensiiniga. Pealegi ei saasta güro- auto keskkonda. Hooratast võib energiaga laadida ükskõik millise mootori abil. 5-meetrise läbimõõduga ülihooratas suutvat akumul eerida 10—20 tuhat kilovatt-tundi ener- giat ja sobib seetõttu elektri jaamades avarienergiaalli- kaks.

Liiklusvahendite energiakasutuse paradoks seisneb sel- les, et sõiduki suure vaevaga saavutatud kineetiline ener- gia tuleb sageli pidurites väärtusetuks soojuseks muuta. Linnaliinibuss, mis peatub iga 400 m järel, kulutab kiiren- duseks (ja pidurdamiseks) 65% kogu tarvitatavast ener- giast. Seetõttu on nn. regenereriva piduri idee praktiliselt oluline. Idee seisneb selles, et pidurid ei muudaks vastu- võetavat energiat mitte soojuseks, vaid mingiks teiseks energialiigiks, mida saaks bussi liikuma hakkamisel uuesti kineetiliseks energiaks muuta. On pakutud välja vedru, akumulaator ja hooratas, kuid kõik need oleksid liiga ras- ked — 10-tonnise bussi korral umbes 4 tonni. Kõige ker- gem tundub olevat kummerekuperaator, mis samades tingi- mustes kaalub kõigest 100—150 kg ja suudab akumul ee- rida kuni  $10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Gaasrekuperaator ja ülihooratas on põhimõtteliselt veel suurema energiamahutavusega. Asja uuritakse.

## IV peatükk

# VESINIKUENERGEETIKA

## 1. TULEVIKUKÜTUS

Eelmistes peatükkides rääkisime sellest, et inimkonna üha kasvavat energiatarvidust rahuldab kõige mugava- mini elektrienergia. Alati pole aga elektrienergia kasuta- mine otstarbekas. On teada, et kõigest üks kolmandik sel- lest kulutatakse elektrimootorite käivitamiseks ja valgus- tamiseks. Ülejäänud kaks kolmandikku kulub ruumide kütmiseks ning tehnoloogilistes protsessides kuumutami- seks. Elektrienergia kasutamine kütmiseks on küll mugav, kuid mitte odav. On ju kasutegur elektrienergia tootmisel soojusenergiast piiratud termodünaamika teise seadusega. Ka on elektrienergia säilitamine ning kaugtransport kulu- kas. Säilitamise ning transpordi seisukohalt on praegu kasutataval naftal ja gaasil olulisi eeliseid.

Kui suured Maa nafta- ja gaasivarud ka poleks, on selge, et kunagi saavad nad paratamatult otsa. Mis neid siis asendab? Tundub, et kõige lihtsam ja perspektiivsem sünteeskütus on vesinik. Vesinik pole põhimõtteliselt uus kütuseliik. Tema tootmise ja kasutamisega energeetiliseks otstarbeks on tagasihoidlikus ulatuses tegeldud juba üsna pikka aega, viimastel aastatel on see probleem muutunud aga globaalselt tähtsaks. On tekkinud energeetikateaduse uus alajaotus — vesinikuenergeetika. Energiaallikaks on siin tavalise vesiniku keemiline energia, mitte raske vesiniku (deuteeriumi) tuumaenergia. Seetõttu ei tohi segi ajada termineid «vesinikuenergeetika» ja «tuumaenergee- tika».

1976. aasta märtsis toimus USA-s Miami ülikoolis esimene ülemaailmne vesinikuenergeetika konverents deviisi all «Külluses puhast energiat inimkonnale!» Konverentsil arutati igakülgset vesiniku tootmist, transpordi ja tarbimisega seotud küsimusi, nii neid, mis on juba praktikaga seotud, kui ka neid, mille lahendamine eeldab tõsist teaduslikku uurimist. Otsustati hakata välja andma ajakirja «Hydrogen Energy» ja moodustati Rahvusvaheline Vesinikuenergeetika Selts.

Keskkonnakaitse seisukohalt on vesinikul vaieldamatu eelis kõigi teiste võimalike sünteeskütuste, nagu metaanooli, ammoniaagi ja hüdrasiini ees, sest ei ta ise ega ka tema oksüdeerimise lõppsaadus vesi pole mürgine. Inimkonnal tuleb õppida vesinikku odavalt tootma ning otsustavalt kasutama.

## 2. VESINIKU TOOTMINE

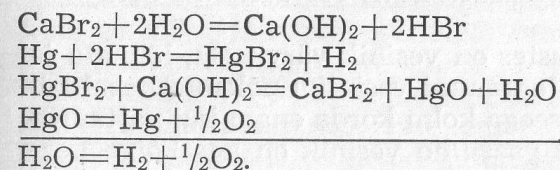
Kõige rohkem vesinikku esineb looduses vee koostises. Seega on mõistlik püüda teda sealt ka toota. See protsess on loomulikult energiamahukas, sest vesiniku põlemisel vabanev energia (286 kJ mooli kohta) tuleb nüüd kulutada. Tulevikus toodetakse vesinikku peamiselt tuuma- ja päikeseenergia abil. Praegusel ajal toodetakse vesinikku enamasti looduslikust gaasist ning kütuse gasifitseerimise produktidest (veegaas ja koksigaas). Elektrolüütiliselt toodetakse vesinikku ainult odava hüdroenergia olemasolu korral (näiteks Norras).

Aatomielektrijaamades võib vesinikku toota nii elektrolüütiliselt kui ka otseselt reaktori soojus- ja radiatsioonienergia arvel. Kui need jaamad ehitatakse mere äärde või merre, laheneb ka elektrolüüsiks vajaliku vee saamise probleem. Veekulu on suuremahulise tootmise korral üsna oluline: iga tonni vesiniku tootmiseks kulub 9 tonni vett. Kui arvestada, et 2000. aastaks on vesinik ainuke kasutatav kütus, kulub seda ainuüksi USA-s ligikaudu  $8 \cdot 10^8$  tonni aastas. Nii suure vesinikuhulga tootmiseks vajatakse üle  $2 \cdot 10^7$  tonni vett päevas. Vee loomulikku ringkäiku looduses ei tohiks see veel mõjustada, sest aurumise teel läheb iga päev atmosfääri tuhandeid kordi rohkem vett ( $1,45 \cdot 10^{12}$  t). Küll tuleb aga arvestada elektrolüüsi kõrvalsaaduste naatriumhüdrosiidi, kloori ja hapnikuga. Iga tonni vesiniku kohta tekib 8 tonni hapnikku.

Vaatamata hapniku suurele tarvidusele tööstuses ja reovete puhastamisel, läheks teda küllaltki palju atmosfääri. See võib esile kutsuda energia kiirema liikumise biosfääris.

Kuigi elektrolüüsil on elektrienergia peaaegu sajaprotsendiliselt muudetav vesiniku keemiliseks energiaks, ei lähe reaktoris vabanev tuumaenergia kaugeltki mitte sellise kasuteguriga elektrienergiaks. Suurem osa tuumaenergiast muutub reaktoris osakeste liikumise kineetiliseks energiaks, osa vabaneb radioaktiivse kiirgusena. Seetõttu püütakse neid energiasid otseselt kasutada vesiniku tootmisel.

Soojust saab otseselt vesiniku tootmiseks kasutada tänu mõningastele mitmeastmelistele keemilistele reaktsioonidele, näiteks kaltsiumbromiidi, elavhõbeda ja vee vahel  $750^\circ\text{C}$  juures toimuvale reaktsioonide tsüklile, mille lõppsaadusteks on vesinik ja hapnik:



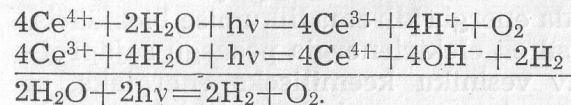
Sama tulemuse annab ka liitiumnitritist, joodist ja veest koosnev süsteem.

Kõige perspektiivsem on vesiniku tootmine veest mitmesuguste räni sisaldavate energiat akumulatsioonide abil, mida toodetakse kõrgahjude šlakist redutseerimise teel. Veega reageerides eraldavad nad viimasest vesiniku. Kahjuks on nende ainete tootmine veel üsna kallis ja keerukas.

Vee lagunemisel reaktoris vabaneva kiirgusenergia toimel (radiolüüsil) tekib vesiniku ja hapniku segu, mille kasutamine ja komponentideks lahutamine on üsna tülikas. Kui tuumareaktoris vabanev lühilaineline kiirgus kutsub esile veemolekulide lagunemise, tekib loomulikult küsimus, kas selleks pole võimeline ka päikesekiirgus.

Et veemolekuli sidemeenergia on suur, siis ei piisa nähtava valguse kvandi energiast vee lagunemiseks. Vee fotolüüsi vastavalt reaktsioonile  $2\text{H}_2\text{O} + 2h\nu = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$  võib esile kutsuda ultraviolettkiirgusega, mille lainepikkus on alla 400 nm. Et aga ultraviolettkiirgus neeldub vees vähe, siis tuleb kasutada sensibilisaatoreid (tundlikustajaid). Tseeriumi soolade kasutamisel sensibilisaatoritena

on vee fotolüüs kulgenud kuni kolmeprotsendilise kasuteguriga. Reaktsioonid kulgevad järgmise skeemi kohaselt:



Fotosünteesi primaarstaadium kujutab endast samuti vesiniku eraldamist veemolekulist. Arvutused näitavad, et kui õnnestuks fotosüntees selles staadiumis peatada, oleks päikeseenergia kasutamine vesiniku tootmiseks üsna efektiivne. Kõrbe üks ruutmeeter toodaks siis 9 mooli (18 g) vesinikku päevas. Selle ahvatleva võimaluse teokstegemisel on esimeseks sammuks sobivate kinnisensüümide tootmine.

### 3. VESINIKU SÄILITAMINE JA TRANSPORT

Tavalistes tingimustes on vesinik värvusetu, lõhnata ja maitseta gaas. Ühe kilogrammi vesiniku põlemisel eraldub 28 000 kcal energiat, seega kolm korda enam kui naftaproduktide põlemisel. Et gaasiline vesinik on aga kõige kergem gaas, siis on 1 m<sup>3</sup> vesiniku põlemissoojus küttegaasi põlemissoojusest ligi kolm korda väiksem. Vedel vesinik on suure erieneergiaga kütus, kuid tema säilitamine on vesiniku madala keemispunkti (−252,6 °C) tõttu keerukas ja kulukas.

Gaasilise vesiniku transport ja säilitamine on analoogiline küttegaasi transpordi ja säilitamisega. Moodustab ju kivisöest toodetavas küttegaasis ka praegu mahuliselt ligi poole vesinik. Gaasilise vesiniku kütteväärtus on küll loodusliku gaasi omast madalam, kuid vesiniku väiksema viskoossuse tõttu on mööda torujuhet edasiantava energia hulk praktiliselt niisama suur. Lisaraskusi võib tekitada vesiniku suur difusioonikiirus, mistõttu tema kaugtransportiks tuleks ilmselt kasutada topeltseintega torusid, mille vahel on mingi inertgaas (argoon, heelium).

Gaasilise vesiniku erilised füüsikalised omadused on tingitud tema molekuli väikestest mõõtmetest: see koosneb kõigest kahest prootonist ja kahest elektronist ning läbimõõt on  $7,4 \cdot 10^{-11}$  m. Mida väiksem on gaasi molekul, seda suurem on tema liikumiskiirus. Seetõttu ongi vesiniku difusioonivõime ja -kiirus tublisti suuremad kui teistel gaasidel.

Vesiniku kaugtransport mööda torujuhet on elektrienergia kaugtranspordist odavam. Peale otsese tulu välditakse nii ka kultuurmaastiku risustamist elektriliinidega. Kuigi oleme harjunud pidama kõrgepingeline arenenud riigi looduspilti kuuluvaks paratamatuks koostisosaks, on see sageli üsna tüütu — takistab märgatavalt põllu- ja metsamaa otstarbekat kasutamist ning tekitab postide ümber põllumassiivis umbrohuseemne kasvandusi. Elektrienergia transport maa-aluseid kõrgepingekaableid mööda on aga veel palju kallim.

Lennukite ja raketite reaktiivmootorite kütuseks sobib vedel vesinik.

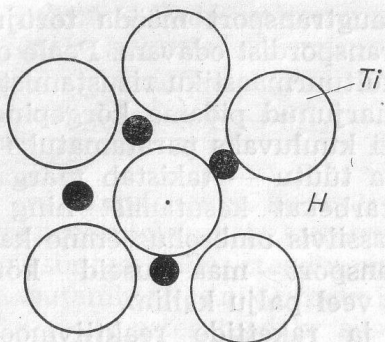
Kosmosetehnika jaoks on nüüdisajal välja töötatud kerged ja vastupidavad krüopaagid vedela vesiniku ja hapniku säilitamiseks. Nende kasutamine autodel ei ole eriti reaalne, sest nad on kallid ning avarii korral plahvatusohtlikud. Vesiniku saamiseks maapealse transpordi tarvis on kaks perspektiivset teed: vesiniku vahetu tootmine energiat akumul eerivate ainete ja vee vahelise reaktsiooni tulemusena või säilitamine hüdriididena.

Energiat akumul eerivate ainete ja vee reaktsioonil tekkinud vesinikuga töötavad autod on juba katsetusel. Selline «Moskvitš» liigub Harkovi tänavatel. See on tõeline imeauto, mille kütusepaagis loksus bensiini asemel vesi. Proovisõite teevad ka hüdriidpaakidega «Žiguli» ja krüopaakidega «Zaporožets».

Kõige lihtsam on gaase säilitada ja transportida balloonides, energia tootmiseks kuluvate suurte vesinikukoguste korral on see aga ebaotstarbekas. Nimelt on standardses 150-atmosfäärises balloonis oleva vesiniku mass alla 1% ballooni massist. Tõsi, Saksa FV teadlased väidavad, et sfääriliste grafiitniitidega armeeritud plastmassist balloonide korral võib suhet tõsta 3%-ni, kuid ka sellest on vähe. Pealegi on sfäärilise ballooni paigutamine autole ebamugav.

Viimastel aastatel on uurijate tähelepanu köitnud vesiniku säilitamise võimalused hüdriididena. Hüdriidid on vesiniku ühendid mitmesuguste elementidega. On tuntud aktiivsete metallide hüdriidid (LiH, KH, CaH<sub>2</sub>), mitte-metallide hüdriidid (SiH<sub>4</sub>, BH<sub>3</sub>) ja raskmetallide muutuva koostisega hüdriidid. Aktiivsete metallide hüdriidid reageerivad intensiivselt veega, eraldades vesinikku. Öhu käes nad süttivad. Boori gaasilisi hüdriide kasutatakse raketikütusena. Vesiniku säilitamise reservuaaridena





Titaanhüdriidi kristallivõre ja vesinikuaatomite paigutus selles tulevad arvesse raskmetallide, eriti titaani, tsirkooniumi ja nende sulamite hüdriidid.

Titaani hüdriidis pole Ti ja H aatomite suhe kindel. Seega pole nad keemilised ühendid selle sõna tavalises tähenduses. Vesinikuaatomid lihtsalt täidavad metalli kristallivõres tühimikke titaaniaatomite vahel. Maksimaalse täitumise korral tuleb iga Ti aatomi kohta kaks H aatomit. Titaan küllastub vesinikuga madalal temperatuuril. Seejuures eraldub soojus. Kuumutamisel metallis lahustunud absorbeerunud vesinik eraldub ja metallivõre läheb tagasi esialgsesse olekusse. Vesiniku absorptsiooni ja desorptsiooni võib korrata piiramatult arv kordi.

Titaani hüdriid pole pürofoorne (ei sütti õhus) ning vesiniku tihedus selles on maksimaalse täitumise korral kaks korda suurem kui vedelas vesinikus. 15 kg kaaluv titaanabsorber võib siduda 6 m<sup>3</sup> gaasilist vesinikku. Seotud vesiniku mass moodustab seejuures 3% titaani massist. Kõikide ülalnimetatud väärtuslike omaduste juures on titaanhüdriidil aga üks oluline puudus: vesinikku hakkab temast väljuma alles temperatuuril 400 °C ja see väljub täielikult 1000 °C juures. Nii kõrgeid temperatuure on auto hüdropaagis raske saavutada. Viimastel aastatel on saadud sellest puudusest vabu hüdriide, mille hulgas kõige olulisem on titaani ja raua segahüdriid TiFeH<sub>x</sub>, kus x võib muutuda nullist kaheni. Raua ja titaani sulam neelab vesinikku toatemperatuuril ja 70% sellest eraldub juba 80 °C juures. Sellisest sulamist hüdriidipaak on transpordivahenditel kasutamiseks üks tulemuslikemaid.

#### 4. VESINIKU KASUTAMINE

Vesinikku toodetakse ja kasutatakse juba praegu väga suurtes hulkades. 1970. aastal toodeti seda maailmas 18 miljonit tonni. Prognooside järgi suureneb vesinikutoodang 1980. aastaks 1,7 korda ja on siis üle 30 miljoni tonni. Suurem osa toodetud vesinikust kasutatakse keemiatööstuse tooraineks (NH<sub>3</sub> ja HCl süntees, küllastumata ühendite hüdrogeenimine). Kütuseks läheb vesinik ainult seguste gaasidega. Tulevikus muutub vesinik universaalseks energiaallikaks, mida kasutatakse mootorikütusena, elektrienergia tootmiseks ning tehnoloogilistes protsessides, näiteks metallide redutseerimiseks oksiididest.

Et vesinik on ökoloogiliselt kahjutu kütus, mis ei mürgita elukeskkonda, siis pakub suurt huvi tema kasutamine transpordivahendite energiaallikana. Siis on kaks võimalust — vesiniku kasutamine bensiini asemel või koos bensiiniga kolbmootorites ja vesinikhapnikelemendiga elektri-auto. Peatume lähemalt esimesel võimalusel.

Vesiniku kasutamine sisepõlemismootorite kütusena ei ole üksnes viimaste aastate probleem. On andmeid, et stationaarsetes soojusmasinates kasutati vesinikku nii üksi kui ka segus naftaproduktidega juba möödunud sajandi lõpul. 1928. aastal kasutati Vahemere ületamisel dirižablil vesinikuga töötavat mootorit. Meie sajandi 30. aastate algul uuriti vesiniku kasutamist automootorite kütusena edukalt Nõukogude Liidus ja Inglismaal.

Erilist edu saavutas Rudolf A. Erreni poolt 1933. aastal konstrueeritud diiselmootor, millesse vesiniku sisseandmine toimus spetsiaalsete düüside kaudu iga survetakti algul. Selline gaasijaotusmehhanism võimaldas mootoril töötada vaheldumisi vesinikul, vedelkütusel ja ka nende segul. Vesinik suurendas mootori kasutegurit ja vähendas müra. Erren katsetas ka sellise mootoriga autobussi. Vesinikku hoiti autobussis 200-atmosfäärise rõhu all balloonides, mille kogukaal oli 5,9% autobussi kaalust. Vesinik suurendas mootori võimsust 20% ja võimaldas diiselmootorit 30% võrra kokku hoida.

Praktiline vesinikkütusega auto sündis blokeeritud Leningradis Suure Isamaasõja rasketel aastatel. Bensiinist oli seal samasugune puudus kui leivastki. Häda sundis olukorrast väljapääsu otsima ning see leiti.

Leningradi kaitsmiseks õhurünnakute eest kasutati vesinikuga täidetud aerostaate, mis ei lasknud vaenlase

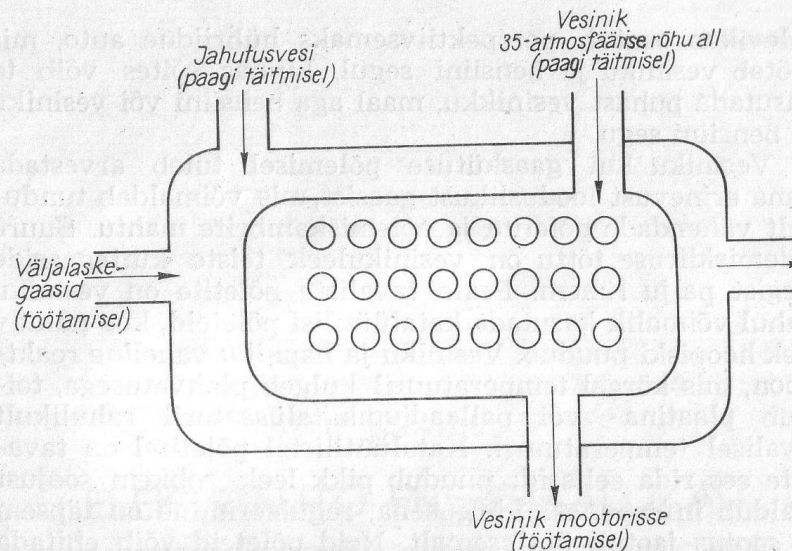
lennukitel pikeerida. Pehme kattega aerostaadi eluiga oli aga lühike, sest sellesse tungis aegapidi õhk. Iga 2—3 nädala järel tuli aerostaat alla tõmmata, tühjaks lasta ja uuesti puhta vesinikuga täita. Selle töö juures kasutati 1,5-tonniseid autosid, kuid bensiini neile ei jätkunud. Siis sündiski idee kasutada vesiniku ja õhu segu allatõmmatud balloonidest mootorikütusena. See segu oli aga peaaegu paukgaas!

Idee autor B. Šelištš mõistis asja ohtlikkust suurepäraselt. Ta paigutas vesinikuballooni ja töötava mootori vahele vesiluku, mis takistas leegi levimist mootorist ballooni. Leningradi õhukaitseteenistuses töötas blokaadi ajal kokku umbes 600 vesinikkütusega autot GAZ-AA. Mõningal määral kasutas seda võtet ka Moskva õhukaitseteenistus. Pärast sõda, kui kütusepuudus ununes, unustati ka vesinikkütusega autod. Tõsiselt hakati nendega uuesti tegelema alles 60. aastate lõpul seoses ökoloogilise ja kütusekriisiga.

Mõeldes vesiniku kasutamisest kütusena, tuleb paljudele kindlasti meelde selle ohtlikkus. Teame ju kõik, et vesiniku ja õhu (hapniku) segu on plahvatusohtlik paukgaas. Küllap on lugejatel õnnestunud laboris demonstreeeritud paukgaasiplahvatusigi kuulda. Aga kas siis teiste kütuste ja õhu segu pole plahvatusohtlik? Kas bensiin ja tuletikud pole oskamatuses kätes äärmiselt ohtlikud? Muidugi on. Vahe on ainult selles, et nende ohtudega oleme harjunud, vesinikus peituv oht on aga uus. Tehnika elektroonilise arengutee tuntud propageerija J. O'M. Bockrise arvates on psüühilised takistused vesinikuenergeetika arendamisel ühed tõsisemad. Vesiniku ja õhu segu plahvatab, kui selles on 4,1—74% vesinikku. Nii lai süttimisvahemik ja suur põlemiskiirus ongi oluliseks eeliseks vesiniku kasutamisel mootorikütusena.

Just tänu vesiniku ja õhu segu suurele põlemiskiirusele on vesinik väga kasulik lisand bensiinile. Isegi siis, kui vesinikku on bensiinis 5%, väheneb bensiinikulu 25—30%. See on suur ökonomia. Vesinik võimaldab töötada lahjemate segudega, mis vähendab oluliselt heitgaaside mürgisust. Täielikuma põlemise tõttu väheneb vingugaasi- ja süsivesinikesisaldus heitgaasides, samuti põlemisel moodustuvate lämmastiku oksiidide hulk. Autode hulka arvestades on inimestele elamisväärse keskkonna tagamisel heitgaaside mürgisuse vähendamisel määratu tähtsus.

Kuidas on arenenud vesiniku kasutamine transpordi-



Titaanraudhüdriidist vesinikupaagi töötamise skeem

vahendite mootorikütusena pärast sõda? Nii meil kui ka mujal hoogustusid sellealased uuringud 60. aastate lõpul. Esimesed õnnestunud katsed bensiinimootorite üleviimiseks vesinikule tehti 1968. aastal Novosibirskis. 1972. aastal kuulutati USA-s välja konkurss autole, mis saastab õhku kõige vähem. 63 osavõtnud masinast võitis konkursi vesinikuga töötav «Volkswagen», mille heitgaasid olid puhtamad kui karburaatorisse sisenev linnaõhk.

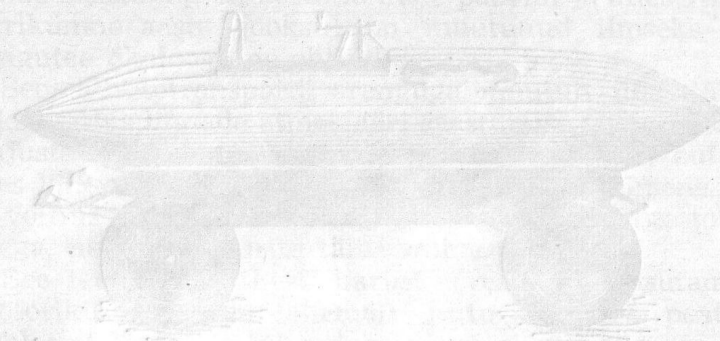
Aastail 1975—1976 ilmusid teated esimeste hüdriidpaakidega autode kohta. Nii paigutati 6-liitrise töömahuga luksusautodele «Pontiac Grand Will» 200 kg kaaluv TiFe-sulamist paak. Laadimise ajal jahutati paaki kraaniveega, töötamise ajal soojendati heitgaasidega. Paagi täielikuks laadimiseks (2,4 kg H<sub>2</sub>) kulus 50 minutit, laadimiseks 75% ulatuses (1,8 kg H<sub>2</sub>) alla 10 minuti. Auto arendas kiirust kuni 145 km/h.

Puhta vesinikuga töötava auto praktikasse juurutamist takistab vesinikupaagi raskus ja vesiniku hind. 65 liitri bensiiniga võrdse koguse vesiniku hüdriidipaak kaalub umbes 1 tonn ning niiviisi saadud võimsusühik on 5 korda kallim kui bensiinist saadud võimsusühik. Tehnika muidugi areneb ja naftaproduktide hinnad tõusevad. Lähimas

tulevikus osutub perspektiivsemaks hübriidne auto, mis töötab vesiniku ja bensiini segul. Linnas sõites võib ta kasutada puhast vesinikku, maal aga bensiini või vesiniku ja bensiini segu.

Vesiniku kui gaaskütuse põlemisel tuleb arvestada tema erinevust looduslikust gaasist, mis võimaldab tunduvalt vähendada põletite ja põlemiskambrite mahtu. Suure põlemiskiiruse tõttu on vesinikuleek teiste küttegaaside leegist palju lühem. Peale tavaliste põletite on vesiniku puhul võimalik kasutada katalüütilisi põleteid, kus nähtav leek hoopiski puudub. Vesiniku ja hapniku vaheline reaktsioon, mis kõrgel temperatuuril kulgeb plahvatusega, toimub plaatina- või pallaadiumkatalüsaatoril rahulikult tavalisel temperatuuril. Katalüütilistel põletitel on tavaliste ees rida eeliseid: puudub pikk leek, rohkem soojust eraldub infrapunase kiirgusena, reguleerimine on täpsem ja soojus jaotub ühtlasemalt. Neid põleteid võib ehitada väga erikujulisi ning monteerida kokku kuumutatava objektiga. Madalatemperatuuriliseks katalüütiliseks põletiks võib näiteks olla platinakatalüsaatorit sisaldav poorne keraamiline plaat, mis asendab toas radiaatorit. Selliste põletite korral ei ole karta lokaalset ülekuumene- mist.

Kui vesinikku on küllaldaselt, pole tema keemilisest energiast elektrienergia ja soojuse saamine keerukas. Pealegi tekib vesiniku oksüdeerumisel puhas vesi. Seega on võimalik praegustesse majadesse suunduvat kolme elu- soont — elektri-, gaasi- ja veejuhet — asendada tulevi- kus ühega, vesinikujuhtmega. See võimalus on eriti pers- pektiivne keskustest kaugel asuvate üksikhoonete korral. Üht niisugust projekti nimetatakse «Kõrbe majaks».



## V peatükk

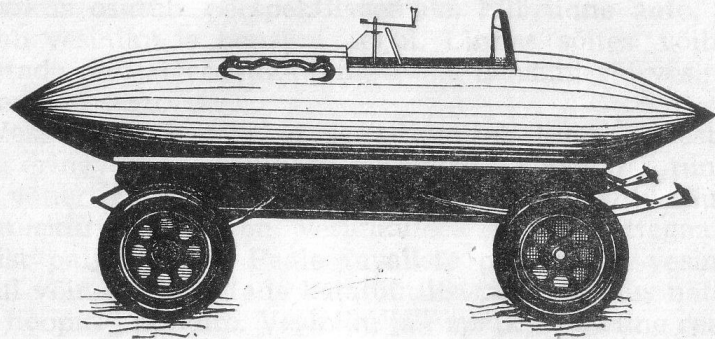
# ELEKTRIAUTO ENERGIAALLIKAD

### 1. AUTO — SÖBER VÕI VAENLANE?

Maailma teedel veereb praegu ligikaudu 300 miljonit autot ning prognooside järgi on neid meie sajandi lõpuks kaks korda rohkem. Need on eeskätt autobussid, veoautod ja perekonna- ehk eraautod. Autodega oleme kõik nii või teisiti seotud. Nad tagavad meile vajaliku liikuvuse ja operatiivsuse, kuid hingavad ka meie eest ära puhta õhu. Seetõttu tekivadki vaidlused auto kasulikkuse, kahju- likkuse ja vajalikkuse üle. Probleemi virisemisega ei lahenda. Ei aita, kui me autot mõne telekommentaatori kombel haisukastiks nimetame. Lahendus on eeskätt teh- nika arengus, auto halbade omaduste muutmises.

Lootmine ainult tehnika arengule oleks aga antago- nistlikule ühiskonnale omane probleemikäsitlus. Meie are- nenud sotsialistlikus ühiskonnas on määrava tähtsusega transpordi ühiskondlik organiseerimine ning iga ühis- konnaliikme teadlikkus. Viimane on sageli kahjuks kogu süsteemi kõige konservatiivsem element. Näiteid selle väite illustreerimiseks peaks igapähele meist küllaga olema. Siinkohal viitan vaid mõningate Tartu bussijuhtide kange- kaelsusele, kes keeldudele vaatamata maniakaalse järje- kindlusega linnaliinide bussijaamas oma «Ikarusi» lõrista- vad ja õhu seal kandis sageli päris hingamiskõlbmatuks muudavad.

Selleks, et selge pilguga transpordivahendite tulevikku vaadata, tuleb kõigepealt omada ülevaadet minevikust.



Jenatzy elektriauto eelmisest sajandivahetusest

Möödunud sajandi lõpul, mil auto oli oma arengutee alguses, olid sisepõlemismootoriga auto ja elektrokeemilise vooluallikaga (tavaliselt pliiakuga) auto võrdvõimelised. Elektrienergiat püüti kasutada transpordivahendite liikumapanekuks juba elektrotehnika arengu algaastatel. Nii proovis B. Jakobi 1839. aastal sõita Neeval galvaanielemendi ja elektrimootoriga töötava paadiga. Esimene elektriauto, Raffardi elektrisõiduk, ehitati isegi mõned aastad enne Daimleri mootorsõidukit. Elektriauto ületas esimesena sajakilomeetrise tunni kiiruse. 1899. aastal saavutas prantslane Camille Jenatzy elektriautol «Alati rahulolematu» tunni kiiruseks 105,85 km ning aasta hiljem isegi 120 km. Ka esimene auto Venemaal oli elektriline. Selle konstrueeris J. Romanov. Möödunud sajandi 90. aastatel kurseeris Peterburis ka tema pliiakudega elektribuss. Kuni autode kiirus ei ületanud 40 km/h ja tegevusraadius 50 km, oli akudega elektriauto igati konkurentsivõimeline. Puhtad, müratud ja lihtsalt käsitsetavad elektriautod olid eriti populaarsed daamidest autojuhtide hulgas. Sädesüütega mootorite kiire areng sajandivahetusel kallutas aga vaekausi otsustavalt bensiinimootoriga auto kasuks. 100-kilomeetrine tunni kiirus muutus nende jaoks tavaliseks ning tänu linnadevaheliste teede paranemisele said reaalseks ka pikemad sõidud. Akude väikese energiamahutavuse tõttu ei olnud võimalik elektriautode tegevusraadiust ja võimsust suurendada. Et läbisõidetud kilomeetri kohta kulutatud energiahulk suureneb peaaegu proportsionaalselt kiirusega, siis ei sobinud elektriautod pikaajaliseks kiireks sõiduks. Sisepõlemismootoritega

autode eelisareng on kestnud meie päevini ja alles viimase paarikümne aasta jooksul on muutunud ilmseks selle arengutee ökoloogiline ohtlikkus.

Seoses autotranspordi arenguga muutub üha tähtsamaks võitlus linnade atmosfääri saastumise vastu, mida on põhjustanud automootorite heitgaasid. Otsingud autoehituses lähevad peamiselt kahte teed mööda. Esimene neist on võitlus sisepõlemismootorite heitgaaside kõrge toksilisusega, nende mootorite täiustamine.

See tee, mille ühest harust (vesiniku kasutamisest mootorikütusena) oli lähemalt juttu eelmises peatükis, probleemi lõplikule lahendusele aga ei vii, sest osa heitgaaside mürgiseid komponente, näiteks lämmastikoksiid, on sädesüüte korral põhimõtteliselt vältimatud.

Ka gaasiturbiin- ja auruautod ei anna põhimõttelist lahendust, kuigi võimaldavad heitgaaside toksilisust tunduvalt vähendada. Nõukogudemaa teedel liigub juba Gorki ning Jaroslavl'i autoehitajate koostööna valminud gaasiturbiinveoauto. Turbiini eelisteks on suurem remondita läbisõidumaa ja väiksemad ekspluatatsioonikulud kui sama võimsusega kolbmootoril.

Viimasel ajal on autoehituse spetsialistid huvitunud ka möödunud sajandi lõpul R. Stirlingi leiutatud mootorist. Kohmakuse, väikese võimsuse ja keeruka reguleerimise tõttu pole aga Stirlingi välispõlemismootor edu saavutanud, kuigi ökoloogilisest seisukohast on ta laitmatu. Võimalik, et eduka täiustamise korral muutub see hügieeniline, müratu ja mis tahes kütusel töötav mootor lähema tuleviku autode südameks. Mootorite täiustamisega tegelevad ju kõik maailma juhtivad autofirmad ja -institiidid.

Heitgaaside mürgisus väheneb, kui autod üle viia vedelgaasile. NSV Liidu rahvamajanduse arendamise põhisuundades aastaiks 1976—1980 on seatud ülesandeks laiendada gaasiballoonautode tootmist esmajoones suurlinnade tarvis. Maagaasil töötavaid veoautosid, sõiduautosid ja busse katsetatakse Gorki, Lvovi ja Likino autotehases. Seoses autode populatsiooni kiire kasvuga suureneb summaarne reostus ikkagi. Pealegi on väga ranged nõuded autode heitgaaside puhtusele majanduslikult ebamõistlikud. Nii tuli USA-s juba taganeda mõningatest autode heitgaaside puhtusele esitatavatest nõuetest.

Radikaalselt võib probleemi lahendada teine tee — loomine sisepõlemismootoritest ning üleminek elektriauto-

dele ja elektrokeemiliste energiaallikate kasutamisele. Elektriauto energiaallikaks on aku, elektrokeemiline element või kütuseelement. Nüüdisaegne tööstus toodab mitut tüüpi akusid ja elektrokeemilisi elemente, kuid auto energiaallikaks ei sobi neist veel ükski kuigi hästi.

Omaette moment elektriauto perspektiivikuse hindamisel on vedelkütuse kokkuhoid. Vedela ja gaasilise loodusliku kütuse varud on igal juhul piiratud, elektrienergiat aga saab põhimõtteliselt toota ammendamatu energiainfoenergiaallikatest (päikesenergia, tuumaenergia).

## 2. KAS SISEPÕLEMISMOTOR VÕI ELEKTROKEEMILINE ELEMENT?

Meie käsutuses olev nüüdisauto on üsna mugav ja kiire sõiduriist. Nagu väidavad psühholoogid, on tema üheks oluliseks eeliseks veel automootori surin. See annab inimesele meeldiva üleolekutunde, teadmise, et need kümned või sajad hobujõud, mis kapoti all tukslevad, alluvad tema tahtele. Selleks, et elektriauto läbi lööks, ei aita ainult tema eelistest keskkonnakaitse seisukohalt, vaid ta peab olemasolevat autot ka eksploatatsiooniliselt ja majanduslikelt näitajatelt ületama. Millised on siin võimalused ja perspektiivid? Mida kujutab endast elektriauto tänapäeval? Mida üldse mõista elektriauto all?

Täiuslik elektriauto on liiklusvahend, millel on üks keemiliste vooluallikate patarei ja elektrimootorid. Vooluallikad võivad olla nii primaarsed kui ka sekundaarsed, tähtis on vaid, et patarei sisaldaks sobiva massi juures küllaldaselt energiat (tagaks normaalse läbisõidu) ning arendaks vajalikku võimsust (tagaks hea kiirenduse). Vaheastmeks elektriauto arengus on sise põlemismootori ja aku kombinatsioon ning kütuseelemendi ja aku kombinatsioon.

Praegused akudega elektriautod ei suuda laadimata sõita üle 100 km. Seetõttu pöörati näiteks 1977. aasta oktoobris Harkovis toimunud üleliidulisel teaduslikul konverentsil erilist tähelepanu autole, millel on nii sise põlemismootor kui ka aku. Väike sise põlemismootor laeb sõidu ajal akusid. Ühe tankimisega läbisõidetava maa pikkuse poolest ei jää see mudel harilikule autole alla.

Millised on nüüdisajal eri sõidukiliikidele esitatavad nõuded? Kasutusosalalt jaotatakse linnas enam liikuvad sõidukid kolme klassi: linnaauto, linnabuss ja perekonna-

auto. Neist kahele esimesele esitatavad nõuded tankimise läbisõidetava maa ja maksimaalse kiiruse kohta on tagasihoidlikumad kui perekonnaautole esitatavad nõuded. Linnaauto ja linnabuss liiguvad tavaliselt ainult linna piires ja seetõttu rahuldab neid maksimaalne sõidukiirus 60 km/h ning tankimata (laadimata) läbisõit 200 km. Perekonnaautol kui universaalsemal peavad need näitajad olema kaks korda suuremad.

Linnaauto all mõeldakse nii inimeste kui kaupade veoks kohandatud suhteliselt väikesi autosid. Nende olulisim eelis on see, et nad võimaldavad täielikult keelata bensiinimootoritega autode liikluse linna keskel, kus reostusohu on kõige suurem. Tundub, et niisugune keeld oleks teretulnud nii Tallinna vanalinnas kui ka Tartu kesklinnas. Väikelinnades, kus elektri jõul liikuv ühiskondlik transport — trammid ja trollibussid — pole majanduslikult otstarbekad, võimaldaksid individuaalse energiaallikaga elektrisõidukid lahendada müra ja reostuse probleeme.

Mitmed firmad on juba asunud väikese kaheistmelise elektritakso väljatöötamisele. Need vähe ruumi võtvad sõidukid, mida võib laenutada iga juhiloaga kodanik, asendaksid eraautosid linnasõidul ning lahendaksid osaliselt ka seisva auto ja tänavate läbilaskevõime suurendamise probleemi. Päeval on nad sõidus, öösel aga, kui liiklus vaibub, ei sega nad tänavatel seistes kedagi.

Ülaltoodud mõtted võivad staažikamaid lugejaid, kes mäletavad veel autolaenutuse läbikukkumist, muidugi muigama panna. Siin tuleks aga arvestada kahte uut asjaolu. Esiteks oleksid elektrisõidukid ehituselt lihtsad ja kasutatavad ainult linna piirides, teiseks puuduksid samatüübilised erasõidukid.

Kuigi transpordi areng meie sajandil on eeskätt seotud sise põlemismootoritega, pole elektriautodest täielikult kunagi loobutud. Aja jooksul sai selgeks, et elektriautode eelised realiseeruvad just linnas töötavate eriautode puhul. Ajavahemikul 1934—1950 stabiliseerus elektriveokite arv 0,5—1 protsendini autode üldarvust maailmas. Meie sajandi 30. aastatel arenes välja ka tehasesisestel vedudel kasutatav elektriveok — elektrikäru.

Linnatranspordi tarvis töötati Nõukogude Liidus juba 1948. aastal välja elektrifurgoonid HAMM-750 ja HAMM-751, mida iseloomustavad järgmised näitajad: Hape- ega ka leelisakude energia ei ületa tänapäeval 0,03

	tühi mass kg	koorma mass kg	aku mass kg	aku ener- gia kW·h	laadimi- seta läbi- sõit km	maksi- maalne kii- rus km/h
HAMI-750	1866	500	800	16,0	55	34,5
HAMI-751	2639	1500	1200	25,2	70	31

kilovatt-tundi kilogrammi kohta. Seepärast kaaluvad 20—30-kilovatise võimsuse ja 100-kilomeetrise päevase läbisõiduga linnaauto akud umbes 600 kg. Linnaauto üldist massi saab mõningal määral vähendada konstruktsiooni nõrgendamise arvel. Akude massi võib vähendada, kui neid on võimalik päeva jooksul laadida (siis, kui juhil on lõuna) või vahetada. Katsed näitavad, et viimane variant sobib vahetuspunktide olemasolu korral paremini. Kuna akude energiatagavara on väike, tuleb püüda kabiini kütmiseks vajalikku energiat kokku hoida — kabiin soojustada.

Ülalöeldust järeldub, et elektriauto loomiseks ei piisa tavalise auto mootori ja bensiinipaakide asendamisest elektrimootori ja akudega. Elektriauto on uut tüüpi auto. Kui tänapäeva auto tugevaks küljeks on universaalsus, siis elektriautol saab selleks spetsiifilisus. Et elektriautot on vaja eeskätt linnas sõitmiseks, siis võib ta olla tavalisest väiksem. Trammitüüpi mootorid on otse veorataste juures. Seega pole vaja kardaaani, diferentsiaali, sidurit jms. Juhtimine muutub lihtsamaks, mistõttu elektriauto juhi kvalifikatsioon võib olla madalam ja järelikult ka koolitamine odavam.

Milline on siis praeguse perekonnaauto lähitulevik? Täiesti roosiline. Perekonnaauto on asendamatu väljaspool linna sõitudel ja puhkusesõitudel. Me ju seome oma kons-titutsioonilist õigust puhkusele üha enam õigusega autole. Linnasisesteks sõitudeks ei sobi ta aga real juhtudel juba praegu, seda vähem tulevikus. Arvutused näitavad, et 98% linnaelaniku argipäevasõitudest saab teha elektriautoga. Perekonnaauto ja kogu linnadevahelise transpordi ülevii-mine elektrilistele jõuallikatele ei ole akude kasutamise korral võimalik akude valmistamiseks kuluva materjali (näiteks plii) piiratud varude tõttu maakeral. Ühe miljoni pliiakuga elektriauto valmistamiseks kulub ju ligikaudu 200 000 tonni pliid ja 35 000 tonni väävelhapet.

Hea ülevaate elektriautode tootmisest ja oikorrast

maailmas annavad Düsseldorfis 1976. aasta sügisel peetud neljanda rahvusvahelise elektrisõidukitele pühendatud sümposiooni materjalid. Neist selgub, et viimastel aastatel on kontaktliinita töötavate elektrisõidukite ehitamisel saavutatud nimetamisväärsed edu. 1975. aastal ehitati maailmas 2480 seeriaelektrisõiduauto. See on muidugi väga vähe, võrreldes nii toodetud sisepõlemismootoriga autode arvuga, kui 1912. aastal toodetud 6000 elektriauto-ga, kuid näitab siiski elektriautode tootmise hoogsat kasvu pärast vahepealseid mõõna-aastaid. Spetsiaalseid elektri-veoautosid toodeti tollel aastal üle 40 000 ja mõningate veoseliikide alal, näiteks piima kojuveol Inglismaal, on need juba praegu haaranud juhtpositsiooni. 1974. aastal läksid käiku ka maailma esimesed elektribussiliinid Kali-fornias ja Düsseldorfis lähedal. 1976. aastal lasti maailmas välja 6000—7000 elektromobiili, millest vähemalt 49 olid üle 20 reisijakohaga elektribussid. On välja arvatud, et tsinkkloorakuga elektriauto läbisõidukilomeeter on juba odavam bensiinimootoriga auto kilomeetrist — vastavalt 8,3 ja 9,4 senti. Mõningate 1976. aasta andmete alusel peetaksegi elektromobiili energiaallikateks tsinkkloor-, tsinknikkel- ja raudnikkelakusid, ei ole aga unustatud ka hoopis sfirema energiasisaldusega naatriumväävelakusid ja kütuseelemente.

Maailmas praegu toodetavad elektriautod võib jaotada kolme klassi: üliminiatuursed karbitaolised linnaautod, kesknise suuruse ja mugavusega autod ning elektriauto-deks ümberehitatud seeriaautod. Enam levinud energia-allikaks on ikka veel pliiaku. Autonoomne laadimiseta läbisõit ei ületa 120 km. Üks nüüdisaegne elektriauto on esitatud kaanepildil.

Millal muutub elektriauto igapäevaseks? Prognoose on väga erinevaid. Arvestades asjaolu, et viimastel aastatel on mitmed valitsused (eeskätt USA-s ja Jaapanis) mõne-võrra suurendanud assigneeringuid sellealastele uurimis-töödele ja projektidele, on praktilisi tulemusi loota ehk juba 80. aastate algul. USA Kongress kohustas näiteks Energiaressursside Arendamise Valitsust laskma 1978. aasta lõpuks välja esimesed 2500 elektrisõiduauto. Nime-tatud valitsus on juba sõlminud rea lepinguid kompanii-dega uute akusüsteemide väljatöötamiseks. Energia sääst-mise huvides püütakse väljatöötatavatel autodel kasutada ka regeneratiivseid pidurisüsteeme.

Arvestades nõukogude elektrokeemiateaduse juhtivat

osa maailmas, võime ka kodumaiseid elektriautosid peagi tänavatele oodata. Juba 1974. aastal ehitati Leningradi Tehnoloogiainstituudis Nõukogude Liidu TA kirjavahe-tajaliikme V. Aleskovski juhtimisel magneesiumõhkele-mendiga auto, mille võimsus on 12 kW ja mis läbib laadi-mata 150 km. Küllap ütlevad selles asjas peagi oma sõna ka meie juhtivad autotehased.

Energiaallikas on elektriauto kõige olulisem ja hinna-lisem osa. Selle arengust sõltub elektriauto uuestisünd. Olemasolevad ja lähema tuleviku elektriautod on seotud akudega. Kaugemas tulevikus on elektriauto energiaalli-kaks primaarne elektrokeemiline element ja eriti selle üks alaliik — kütuseelement. Vaatlemegi nüüd mitme-suguste keemiliste vooluallikatega seotud probleeme.

### 3. KEEMILISED VOOLUALLIKAD

Keemiline vooluallikas ehk elektrokeemiline element on seadis, mis muudab selles toimuvate keemiliste reakt-sioonide energia vahetult elektrienergiaks. Elektrokeemi-lise elemendi olemusel ja kütuseelemendil peatusime juba teises peatükis. Nüüd vaatleme mitmesuguseid keemilisi vooluallikaid ja nende töötamisega seotud probleeme lähemalt. Erilist tähelepanu püüame seejuures osutada süsteemidele, millest võiks saada elektriauto energiaalli-kas. Mitmesuguseid autonoomseid keemilisi vooluallikaid toodetakse nüüdisajal palju. Nende koguvõimsus on suu-rem kui maailma kõigi elektriijaamade võimsus kokku.

Keemilise vooluallika töö võib põhineda igasugusel oksüdeerumis-redutseerimisreaktsioonil. Oluline on vaid see, et reaktsiooni kaht osa — oksüdeerumist ja redutsee-rumist — oleks võimalik teineteisest ruumiliselt eraldada. Kui see õnnestub, saame anoodil kütuse oksüdeerumisel vabanenud elektronid juhtme kaudu katoodile juhtida, kus nad ühinevad redutseerumisprotsessis oksüdeerijaga. Et redutseerumine ja oksüdeerumine toimuvad erinevatel potentsiaalidel, siis liiguvad elektronid elektroode ühenda-vas ahelas. Elektroodide potentsiaalide vahe (pinge), voolu tugevuse ja aja korrutis määrab vabaneva energia suuruse elektrilistes ühikutes.

Et keemilisi vooluallikaid on võrdlemisi palju (pee-takse ju ainuüksi elektriautol rakendamise seisukohalt perspektiivseks üle kolmekümne erineva vooluallika), siis on otstarbekas neid ka kuidagi klassifitseerida. Tavaliselt

tehakse seda tööprintsipi ja ehituse alusel. Protsesside pöördumise järgi jaotatakse vooluallikad primaarseteks ja sekundaarseteks. Primaarne element, näiteks taskulambi-patarei, töötab, kuni tal kütus või oksüdeerija otsa lõpeb. Primaarsete elementide eriliik on kütuseelement, kus redutseerijana ei tööta mitte anoodi materjal, vaid kütust ja ka oksüdeerijat antakse elektroodidele pidevalt juurde. Sekundaarsete elektrokeemiliste elementide ehk akude töövõimet saab laadimise teel taastada. Aku laadimisel sunnitakse tühjenemisel kulutatud kütus tema negatiivsel elektroodil välise energia abil redutseeruma ja taasta-takse samaaegselt kulutatud oksüdeerija varud positiivsel elektroodil. Laadimise käigus muutub elektrienergia akus keemiliseks energiaks, aku tühjenemisel aga uuesti elekt-rienergiaks. Sageli võib üks ja seesama elektrokeemiline süsteem töötada nii primaarse kui ka sekundaarse elemen-dina.

Ehituse järgi kuuluvad elektrokeemilised elemendid mitmesse alaliiki, näiteks vedela elektrolüüdiga ja kuiv-elemendid, sulatatud sooladest, orgaanilise ja tahke elekt-rolüüdiga elemendid, reservelemendid, hermeetilised ele-mendid jne.

Element täidab oma otstarbe üksnes siis, kui tema parameetrid vastavad etteantud väärtustele. Elemente ise-loomustavad olulised parameetrid on näiteks erienergia (ühele massikilogrammile või ruumala ühele kuupdetsi-meetrile vastav energia), erivõimsus, maksimaalne tühje-nemis- ja laadimisvool (amprites elektroodide pinnaühiku kohta), säilivus (isetühjenemise kiirus), laadimisel kulu-tatud elektri- ja energiahulkade tagasiandmise protsent tühjenemisel jms.

Elektriautodel kasutatavatelt vooluallikatelt nõutakse eeskätt kõrget erienergiat ja erivõimsust. Kui energia-allikaks on aku, on olulised ka laadimiskiirus, töösükli arv ja isetühjenemine.

### 4. PRIMAARSED ELEKTROKEEMILISED ELEMENDID

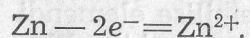
Nagu eespool räägitud, saab elektrokeemilise elemendi koostada põhimõtteliselt iga redokssüsteemi abil. Ele-mendi kasutamisel on kõige olulisem, et tal oleks suur erienergia. Asi on nimelt selles, et kuigi elektrokeemiline element muudab redoksreaktsioonil vabaneva keemilise

energia vahetult elektrienergiaks, vältides seega suurema osa energia soojuseks muutumist, on elemendi massiühikust saadav energia ometi palju kordi väiksem samas hulgas kütuses sisalduvast energiast. Nii võib naftaproduktide kütteväärtus ulatuda 11 000 kilokalorini, s. o. 13 kilovatt-tunnini kilogrammi kohta. Nendes väärtustes ei ole arvesse võetud oksüdeerija (õhuhapniku) massi. Selle arvestamisel muutuksid ülaltoodud väärtused küll mitu korda väiksemaks, kuid oleksid ikkagi tohutud võrreldes 0,03 kilovatt-tunniga, mis sisaldub ühes kilogrammis tavalises pliikakus. Sageli kasutataksegi õelat võrdlust, et kilogrammises akus sisaldub niisama palju energiat kui napsiklaasitäies bensiinis.

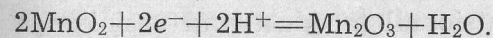
Elektrokeemilise elemendi maksimaalne energia väljendub reaktsioonil üleantud elektronide hulga (elektrihulga) ja elektrodide potentsiaalide vahe (elemendi elektromotoorjõu) korrutisega. Seega on elemendi energia seda suurem, mida rohkem elektrone läheb redutseerijalt oksüdeerijale ja mida erinevamad on elektrodide potentsiaalid. Kuna ühe mooli elektronide üleminekule vastab elektrihulk 96 500 kulonit, siis on mõistetav, et elektrihulk kilogrammi kohta on seda suurem, mida väiksem on reageeriva aine molekulmass. Elemendi elektromotoorjõud on seda suurem, mida tugevam redutseerija ja oksüdeerija elektrodireaktsioonides osaleb. Eespool öeldut kokku võttes näeme, et suure energiaga elektrokeemiliseks elemendiks võib olla näiteks liitiumfluorelement, mille teoreetiline elektromotoorjõud küünib ligikaudu 6 voldini ja erienergia on 6 kW·h/kg. Paraku pole nii ägedalt reageerivate ainete paariga elementi võimalik kasutada.

Esimeseks elektrokeemiliseks elemendiks ja elektrienergia allikaks üldse oli 1799. aastal ehitatud Volta sammas, mis kujutas endast väävelhappelahusega ühendatud tsinkvaskelementi. Üldkasutatav elektrokeemiline element on tsinkmangaandioksiidi kuivelement ehk Leclanché element ehk lihtsalt taskulambipatarei.

Selle negatiivseks elektrodiks on tsink, mis elemendi töötamise käigus oksüdeerub:



Positiivse elektroodi materjaliks on mangaandioksiid, mille redutseerumisreaktsiooni võib kirjeldada näiteks võrrandiga:



Taskulambipatarei konstruktsioon on püsinud muutmatusena juba sada aastat. Tema energia on ligikaudu 1,8 W·h. Alles viimastel aastatel on välja töötatud uued variandid, mille energiasisaldus samade mõõtmete juures on kuni 11,2 W·h («Rubiin-1»).

Kaks korda energiamahukam on tsinkelavhõbeoksiid-element (energia 80—110 W·h/kg), kuid selle kasutamist piirab elavhõbeda kallidus ja mürgisus. Muide, ka tsink muutub üha defitsiitsemaks, mistõttu reas maades (näiteks Indias) uuritakse agaralt, kuidas seda asendada odavama alumiiniumiga. Eespoolkirjeldatud elemendid on väikese võimsusega kuivelemendid. Neid kasutatakse peamiselt taskulampide ja kaasaskantavate raadiote energiaallikatenä. Väga väikese võimsusega elemendid, näiteks 0,45 g kaaluv tsinkelavhõbeoksiid-element, sobivad ka südamestimulaatorite toiteallikaks.

Eelmistest hoopis võimsamad, kuid lühema kasutusega on reservelemendid. Anoodimaterjalina kasutatakse neis nii tsinki kui ka hoopis aktiivsemat magneesiumi ja alumiiniumi. Oksüdeerijaks on pliidioksiid, hõbekloriid või vask(I)kloriid. Voolu tekitav reaktsioon magneesiumvask(I)kloriidelemendis on järgmine:  
 $\text{Mg} + 2\text{CuCl} = \text{MgCl}_2 + 2\text{Cu}$

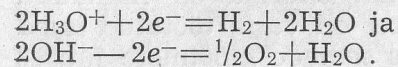
Ilma elektrolüüdilahuseta võib säärane element aastakümneid reservis seista. Vajaduse korral täidetakse element lahusega ning ta on kohe töökorras. Enam kasutatavad on sellised reservelemendid meres töötavatel seadistel, nagu allveelaevadel, torpeedodel ja signaliseerimisvahenditel. Elektrolüüdilahusena kasutatakse siis merevett, mis on ju ligikaudu kolmeprotsendiline keedusoolalahus.

Kõige perspektiivsemad energiaallikad, mida saab kasutada mererikkuste kasutuselevõtuks, on reservelemendid, kus merevesi töötab nii elektrolüüdina kui ka oksüdeerijana. Vesi laguneb ja katoodil eraldub vesinik. Et oksüdeerija massi pole vaja arvestada, siis on säärase elementide erienergia suur. Selles mõttes on nad analoogilised õhku kasutavate süsteemidega, nagu metallõhk-elementid, osa kütuseelemente ja sisepõlemismootorid.

Et jutt läks vee kasutamisele oksüdeerijana, siis peatume veidi lähemalt ka vee kasutamisel lahustina elektrokeemilistes elementides. Vesi on elektrolüüt, kuigi väga



nõrk. Tema omadissotsiatsioonil moodustuvad vesinik- ja hüdroksiidioonid, mis võivad negatiivsel ja positiivsel elektroodil reageerida vastavalt võrranditele:



Need reaktsioonid saavad võimalikuks, kui elektrootide potentsiaalide vahe ületab 1,23 volti. Tänu ülaltoodud reaktsioonide kulgemise raskusele, mida kvalitatiivselt väljendab ülepinge, saab vesilahuseid küll kasutada mõnevõrra suurema elektromotoorjõuga elementides, näiteks vaadeldud Leclanché elemendis (elektromotoorjõud ligikaudu 1,5 volti), kuid väga tugevatest redutseerijatest ja oksüdeerijatest koostatud elementides pole see võimalik. Siis kasutatakse mitmesuguseid mittevesilahuseid.

Magneesium ja alumiinium, mille kasutamisest keemilise vooluallika anoodi materjalina oli juttu eespool, on nii aktiivsed metallid, et nende puhas pind oksüdeerub vee toimel. Seejuures eraldub vesinik ja pind passiveerub. Nimetatud asjaolude tõttu tuleb juhul, kui elektrokeemiliste elementide anoodid valmistatakse magneesiumist või alumiiniumist, lahendada veel rida probleeme. Üks neist on pinna passiveerumine, millest püütakse üle saada mittevesilahuste ja magneesiumi, alumiiniumi ning elavhõbeda sulamite kasutamisega. Kui elavhõbedat lisada kas või kõigest 0,2%, nihkub alumiiniumi potentsiaal vesilahuses ligi 1 voldi võrra negatiivses suunas, mistõttu elemendi energia suureneb tublisti.

Alumiinium- ja magneesiumaanoodide kasutamisel vesi-elektrolüüdiga elementides esineb veel üks tüütu nähtus, mida spetsialistid tunnevad negatiivse diferentsefektina. Asi seisab selles, et mida suurema koormusega element töötab, seda rohkem vesinikku tekib metalli pinna ja vee vahelisel keemilisel reaktsioonil. See on aga asjatu metallikulu. Magneesiumelemendiga elektriauto puhul on eralduvat vesinikku püütud kasutada lisaenergia saamiseks vesinikõhkelemendis.

Elektriauto seisukohalt lähtudes on perspektiivsed mitmesugused metallõhkelemendid ja akud. Sel juhul ei tule oksüdeerija (õhuhapniku) mass arvesse ning saavutatava erienergia väärtus on suurem. Pealegi on sellistes elementides anoodi materjali (kütust) võimalik taastada kas laadimise (sel juhul oleks meil tegu akuga) või lihtsalt anoodi vahetamise teel. On uuritud paljude metallide, nagu

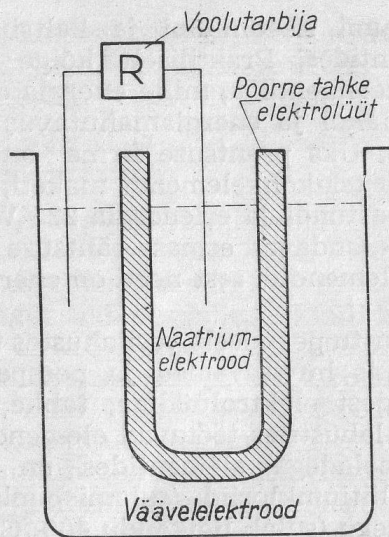
tsingi, alumiiniumi, kaadmiumi ja kaltsiumi kasutamist metallõhkelementides. Praktiliselt kõige kaugemale on jõutud tsinkõhkelemendiga, mille energia on 2,5–3 korda suurem kui pliiakul ja energiamahutavus ulatub 25–30 kilovatt-tunnini. Üks prantsuse firma on näiteks välja töötanud võimsa tsinkõhkelemendi maketi, mille mahutavus on 100 ampertundi ja erienergia 225 W·h/kg. Kaugemas tulevikus omandavad esmase tähtsuse ilmselt alumiiniumaanoodiga elemendid, sest need on energiarikkamad ja odavamad.

Eespool oli juttu peamiselt vesilahustes töötavatest elementidest. Hoopis huvitavamad ja perspektiivsemad on sulatatud sooladest elektrolüüdiga, tahke elektrolüüdiga ja orgaanilistes lahustites töötavad elemendid.

Sulatatud sooladega elementides on elektrolüüdiks tavaliselt kas liitiumkloriid (sulamispunkt 609 °C) või mitme kloriidi segu (sulab ligikaudu 400 °C juures). Seega on tegu kõrgetemperatuuriliste elementidega. Töötavaks redokssüsteemiks võib olla näiteks liitium ja kloor. Vedelast liitiumist (sulamispunkt 186 °C) anood ujub sel juhul elektrolüüdi pinnal. Gaasiline kloor juhatakse mõneatmosfäärisel rõhul poorsest söest katoodi. Niiviisi saadakse erienergia väärtuseks kuni 400 W·h/kg. Peale liitiumi on anoodimaterjalina kasutatud naatriumi ja teisi aktiivseid metalle, oksüdeerijana aga väävlit. Liitiumväävelemendi teoreetiline erienergia on kuni 3000 W·h/kg ja ta võib töötada ka akuna. Selliselt akult on saadud erienergiat üle 400 vatt-tunni kilogrammi kohta ja teda on proovitud rakendada ka elektriautol.

Enamikku tahkete elektrolüütidega töötavaid elemente iseloomustab pikk kasutusiga ja väike võimsus. Hõbekloriid- ja liitiumjodiidelektrolüüdiga elemente kasutatakse signalisatsiooniseadmetes, miniatuurset elemente ka südameergutamisel. Palju võimsamad on mõningad kõrgetemperatuuridel töötavad tahke elektrolüüdiga elemendid ja akud. Kõrgetemperatuurilised tahke elektrolüüdiga elemendid kujutaksid endast nagu tavalise elektrookeemilise elemendi peegelpilti: elektrootid on neis vedelad ja elektrolüüt tahke.

Erilist huvi on võimsa ja energiamahuka tahke elektrolüüdiga vooluallika loomisel pälvinud süsteem naatriumist ja väävlist. See element töötab temperatuuril mitte alla 285 °C ja sulas olekus naatriumist ning väävlist elektrootid on eraldatud tahkest alumiiniumoksiidist elektro-



Tahke elektrolüüdiga naatriumväävelemendi läbilõige

lüüdiga. Elektri juhtivuse parandamiseks aktiveeritakse elektrolüüti naatrium- ja magneesiumoksiidiga. Sellise süsteemi erieneergia on 150 W·h/kg. Sellise elemendi läbilõiget näeme joonisel.

Kõrgetemperatuuriliste vooluallikate kasutamine elektriautodel tekitab mõningaid ohutustehnilisi probleeme. Loodetavasti on lugeja näinud naatriumi reageerimist veega. Kujutage nüüd ette, et naatriumväävelemendiga auto osaleb liiklusõnnetuses ning sula naatrium ja väävel voolavad tänavale. Asi on hoopis hull, kui juhtub vihma sadama. Mõned selle süsteemi kritiseerijad on kõrgetemperatuurilise vooluallikaga auto kasutamist võrrelnud koguni mürsu seljas söitmisega.

Nagu eespool räägitud, kui elemendi elektromotoorjõud ületab 1,23 V, piirab vesielektrolüütide kasutamist vee elektrolüüs. Tavalisel temperatuuril töötavate vedelate elektrolüütidega elementides kasutatakse vee asemel juhul mitmesuguseid orgaanilisi lahusteid. Need peavad olema aprotoonsed, s. o. ei tohi dissotsiatsioonil eraldada vesinikioone, mis võiksid negatiivsel elektroodil gaasiliseks vesinikuks redutseeruda. Peale selle nõutakse, et solvent lahustaks hästi mõnda elektrolüüti, nii et tekiks

hea juhtivusega lahus. Ka reaktsioonisaadused peavad solvendis lahustuma, lähteained (elektroodide materjalid) aga mitte. Kasutatavamad lahustid on näiteks etüleen- ja propüleenkarbonaadid, tetrahüdrofuraan ja mitmesugused amiinid. Elektrolüüdiks on sageli liitiumperkloraat ja anoodimaterjaliks mõni aktiivne metall, eeskätt liitium. Oksüdeerijateks on väävel, broom ja rida raskmetallide halogeenide. Üheks suuremaks erieneergiaga elemendiks on süsteem liitiumist ja väävlis. Edukalt on katsetatud ka liitiumvask(I)kloriid- ja liitiumvasksulfiidelemente.

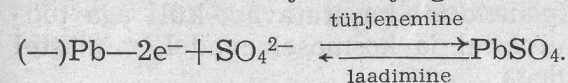
## 5. SEKUNDAARSED ELEMENDID EHK AKUD

Erinevalt primaarsetest elementidest on akudes kulgevad protsessid keemiliselt pöörduvad. Et akusid on võimalik laadida, siis saab neid kasutada korduvalt. Peale suure energia ja võimsuse nõutakse healt akult veel suurt kasutamistsüklite arvu, tugevat laadimisvoolu, suurt laadimisenergia tagastamistegurit tühjenemisel ja väikest isetühjenemiskiirust. Mitmeid redokssüsteeme kasutatakse nii primaarsetes kui ka sekundaarsetes vooluallikates, nagu naatriumväävel, tsinkhõbeoksiid jt. Mingil määral on ka tüüpilised primaarsed elemendid (nagu taskulampipatareigi) laetavad. Akud on energia konserveerimise vahendid. Nad säilitavad elektrienergiat keemilise energia vormis.

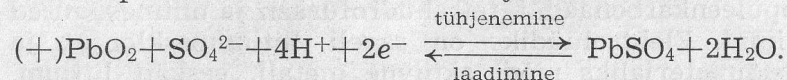
Kuigi teoreetiliselt võib akuna töötada iga pöörduv elektrookeemiline element, kõlbavad selleks tegelikult ainult süsteemid, kus reaktsioonisaadused ja lähteained elektrolüüdis praktiliselt ei lahustu. Seetõttu ongi kasutusel üsna piiratud arv akusid, eeskätt pliiaku.

Pliiaku, mille töötas välja G. Plante 1859. aastal, on põhimõtteliselt jäänud samasuguseks tänini, olgugi et tema parendamiseks on maailmas välja antud üle 20 000 patendi. Kuigi plii suure aatommassi tõttu on aku teoreetiline energiamahutavus 215 W·h/kg ning praktiline kõigest 30 W·h/kg, on tema eeliseks elektrodireaktsioonide suur pöörduvus. Viimasest tulenevad ka suur laadimisvoolu kasutegur ja erivõimsus.

Pliiaku negatiivse elektroodi töötavaks materjaliks on plii, mis aku tühjenemise käigus oksüdeerub pliiisulfaadiks. Protsesse kirjeldab järgmine skeem:

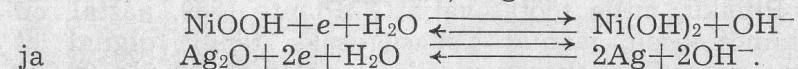


Positiivse elektroodi elektrokeemiliselt aktiivseks aineks on pliidioksiid, mis aku tühjenemise käigus redutseerub samuti pliisulfaadiks. Protsesse kirjeldab skeem



Et elektroodireaktsioonid kulgevad tahke- ja vedel-faasi piirpinnal, siis on nende kiirus sõltuv selle pinna suurusest. Reaktsioonide suurema kiiruse (sellest sõltuvad aku laadimise aeg ja erivõimsus) saavutamiseks tuleb elektroodid teha poorsest materjalist. Poorsus ja plii väike mehaaniline tugevus põhjustavad aga plaatide kõverdumist ja purunemist, seega vähendavad aku tööiga. Plii mehaanilist tugevust suurendavad lisandid, näiteks antimon, kuid siis väheneb ka aku kasutegur. Nagu näha, on ka selle üle saja aasta kasutusel olnud aku juures probleeme veel külluses. Viimasel ajal on avaldatud andmeid antimonlisandi edukast asendamisest kaltsiumlisandiga, mis takistab gaaside eraldumist ülelaadimisel ja muudab aku praktiliselt hooldusvabaks.

Kõrvuti plii-happeakuga on praktikas kasutusel rida leelisakusid, nagu raudnikkel-, kaadmiumnikkel-, tsinknikkel-, tsinkhõbe-, kaadmiumhõbe- jt. akud. Elektrolüüdiks on neis tavaliselt kaaliumhüdroksiidi vesilahus. Negatiivseks elektroodiks on aktiivsem metall (tsink, kaadmium, raud), mis aku tühjenedes oksüdeerub metall(II)hüdroksiidiks. Positiivse elektroodi moodustab vähem aktiivse metalli hüdroksiid või oksiid, mis aku tühjenemisel redutseerub madalama oksüdatsiooniastmega ühendiks või vabaks metalliks, nagu



Nikkelhüdroksiidist positiivse elektroodiga leelisakud pole plii-happeakust põrmugi energiamahukamad ega odavamad, kuid nad on lollikindlamad — ei karda ületühjenemist ega tühjalt säilitamist.

Hõbeoksiidakud on eelmistest tunduvalt energiarikkamad. Tsinkhõbeaku erienergia on kuni 120 W·h/kg. Puudusteks on väiksem töötüklite arv ja hõbeda kõrge hind. Viimase tõttu pole kaadmiumhõbe- ja tsinkhõbeakud maa-pealsetel transpordivahenditel kasutatavad, küll aga töötavad nad hästi lennukitel ja kosmoselaevadel, viimastel koos päikesepatareidega.

Raudnikkelakud on kasutusel lihtsate elektriveokite (kärud, tõstukid) energiaallikatena, kaadmiumnikkelakud aga hermeetiliste miniatuursete energiaallikatena (arvutites, kuuldeaparaatides). Tsinknikkelakud, mille erienergia on kõige suurem (80 W·h/kg), sobivad hästi elektriauto energiaallikateks.

Vedeliku auramine ja ülelaadimisel tekkivad gaasid (vesinik ja hapnik vee elektrolüüsil) on ebameeldivad nähtused ka tavalise autoaku puhul. Miniatuursete akude, lennukiakude ning kosmoses kasutatavate akude korral on need nähtused lausa lubamatud. Seetõttu püütakse muuta akud hermeetiliseks. Harilikke akusid hermetiseerida ei saa, sest ülelaadimisel eralduvate gaaside rõhu tõttu nad lõhkeksid. Tavalisim võtte akude hermetiseerimisel on negatiivse elektroodi aktiivaine ülehulgas võtmine. Sel juhul vesinikku ülelaadimisel ei eraldu, positiivsel elektroodil eralduv hapnik aga difundeerub negatiivsele elektroodile ning reageerib seal aktiivse metalliga. Mõnel juhul, näiteks pliiakudega elektriautos kasutatakse aku korkides katalüsaatorit (plaatinat), mis paneb tekkinud vesiniku ja hapniku tagasi veeks reageerima.

Nagu esitatud materjalist selgub, pole kahjuks ikka veel olemas suure erienergiaga, töökindlat ja odavat akut, mis sobiks elektriauto autonoomseks energiaallikaks. Töö nende probleemide kallal jätkub. Kõrvuti traditsiooniliste akude omaduste parandamisega tegelevad teadlased üsna hoolega ka uute redokssüsteemide kasutuselevõtmisega akudes.

Keemiliste vooluallikate toodang ja energia on viimasel ajal kogu maailmas tublisti suurenenud, näiteks pliiakude toodang aastail 1955—1970 kaks, hermeetiliste kaadmiumnikkelakude toodang kolm ning primaarsete tsinkmangaandioksiidementide toodang kolm korda. Suurenenud on ka toodetud elementide erienergia.

Akude teadusliku uurimise ja tööstusliku tootmise alguseks Nõukogude Liidus võib pidada 1924. aastat, milal Petrogradi Akumulaatorite Trusti juurde loodi Akumulaatorite Kesklabor. Praeguseks on trustist saanud tervet kvartalit hõlmav suurtehas «Leninlik Säde» («Ленинская Искра») ning laborist Üleliiduline Akumulaatorite Teadusliku Uurimise Instituut, mis koordineerib sellealast uurimis- ja projekteerimistööd kogu Nõukogude Liidus.

## LÕPETUSEKS

Selle raamatu lugemisel tutvusite tehnika ja inimkonna arengu mõningate probleemide ja aspektidega. Nägite, et praegusajal ikka veel tormiliselt arenev termiline tehnoloogia pole sugugi ainuvõimalik ega ainuõige. Meie kõigi kohus on vähendada selle tehnoloogia negatiivset mõju kõige olulisemale — keskkonnale, kus me elame. Tehnilisest seisukohast täiusliku lahenduse neile probleemidele annab üleminek elektrokeemilisele tehnoloogiale ning keskkonda mittesaastavate energiaallikate kasutuselevõtt.

Inimene on pidevalt muutuva ja areneva biosfääri koostisosa. Me ei suuda veel biosfääri arenemist ning inimtegevuse mõju sellele küllaldaselt prognoosida. Teame vaid, et inimtegevuse üha tugevnev surve süvendab ökoloogilist kriisi ning võib biosfääri struktuuri degradeerida. Seega oleks ühelt poolt vaja inimkonna survet biosfäärile vähendada, kuid teiselt poolt ei saa me peatada inimkonna arengut. Mõningad arenguga kaasnevad liialdused ja väärnähtused on siiski välditavad.

Käesolevas raamatus vaatlesime tervet rida teaduslik-tehnilisi probleeme, mille lahendamise eesmärk on inimkonna kindlustamine küllaldase energiaga, ilma et see tooks kaasa märgatavaid ebasoodsaid muutusi biosfääris. Nägime, et vaadeldud probleemide lahendamiseks on palju võimalusi. Kuigi mõned neist balansseerivad fantastika piirimail, pole kahtlust, et inimkond leiab nende hulgast (aga võib-olla hoopiski väljastpoolt vaadeldud ringi) sobiva energiaallika. Inimkond on kõigist oma arenguraskustest üle saanud ja küllap saab ka sellest. Võime olla

optimistid, kuid parem siiski, kui oleme hästi informeeritud optimistid.

Paljud teaduslik-tehnilised probleemid on meie ajal kitsa eriala piires välja kasvanud ja kogu ühiskonna probleemideks muutunud. Nende hulka kuuluvad kindlasti ka selles raamatus käsitletud elektriauto ja kütuseelemendi probleemid. Mistahes probleemide edukaks lahendamiseks on eeskätt vaja, et võimalikult paljud inimesed nendest teadlikud oleksid.

Et inimtegevus võib meie ajal elukeskkonnale ja seega ka inimesele endale ohtlikuks muutuda, siis pööratakse üha enam tähelepanu keskkonnakaitsele. Viimase all mõistetakse eeskätt meie maa loodusliku ja majandusliku potentsiaali tugevdamisele ning inimeste heaolu tõstmisele suunatud plaanipärase abinõude süsteemi. Mõistes inimkonna ja tema elukeskkonna suhete kogu keerukust ning tegutsedes arukalt, suudame keskkonnakaitse probleeme ratsionaalselt lahendada ja toota üha rohkem hüvesid, ilma et muudaksime sellega keskkonna elamiskõlbmatuks.

## KIRJANDUS

1. Адабашев И. И. Трагедия или гармония? М., Мысль, 1973. 365 с.
2. Бринкворт Б. Дж. Солнечная энергия для человека. М., Мир, 1976. 287 с.
3. Варыпаев В. Н. Горизонты электрохимии. Л., Энергия, 1975. 40 с.
4. Долматовский Ю. Беседы об автомобиле. М., Молодая Гвардия, 1976. 208 с.
5. Израэлит Г. Б. Энергетика и ее будущее. М., Энергия, 1969. 137 с.
6. Моисеев Н. Н. Проблемы построения мировой модели. — В кн.: Число и мысль. М., 1977, с. 139—175.
7. Плантер В. Ш. Холодное горение. М., Наука, 1972. 112 с.
8. Алексеев Г. Н. Энергия и энтропия. М., Знание, 1978. 192 с.
9. Эрдей-Груз Т. Химические источники энергии. М., Мир, 1974. 278 с.
10. Bockris, J. O'M. Electrochemistry of Cleaner Environments. New York—London, Plenum Press, 1972. 296 p.
11. Pestel, E., Mesarovic, M. Mankind at the Turning Point. New York, 1974. 210 p.
12. Варламов В. Экологически чистая энергия. — Химия и жизнь, 1977, № 11, с. 30.
13. Вассоевич Н., Фельзман Л. Сколько нефти осталось в недрах. — Химия и жизнь, 1977, № 12, с. 59.
14. Добродеев О. Ресурсы свободного кислорода биосферы. — Природа, 1977, № 4, с. 65.
15. Кириллин В. Энергетика — проблемы и перспективы. — Коммунист, 1975, № 1, с. 43.
16. Лидоренко Н. и др. Возобновляющиеся источники энергии — резерв интосикации народного хозяйства. — Коммунист, 1976, № 2, с. 63.
17. Семенов Н. Об энергетике будущего. — Наука и жизнь, 1972, № 10, с. 16 и № 11, с. 25.
18. Черненко М. Водород. Может быть элемент № 1 энергетика будущего. — Химия, 1977, № 9, с. 21.
19. Family World Atlas. Chicago—New York—San Francisco, Rand Mc Nally and Company, 1975. 303 p.

20. Maugh, Th. H. Hydrogen: Synthetic Fuel of the Future. — Science, 1972, 178, 4063, p. 849.
21. Norman, R. S. Water Salination: a Source of Energy. — Science, 1974, 186, 4161, p. 205.
22. Ostwald, W. Die wissenschaftliche Elektrochemie der Gegenwart und die technische der Zukunft. — Zeitschrift für Elektrotechnik und Elektrochimie, 1894, N 3, s. 81 u. N 4, s. 122.
23. Levenspiel, O., Nevers, N. de. The Osmotic Pump. — Science, 1976, 194, 4266, p. 719.
25. Otmer, D. F., Roels, O. A. Power. Fresh Water and Food from Cold, Deep Sea Water. — Science, 1973, 182, 4108, p. 121.
26. Rosenblatt, A. I. Energy Crisis Spurs Development of Photovoltaic Power Sources. — Electronics, 1974, N 4, p. 99.
27. Agur, U. Tuleviku energiaallikad. — Tln., Eesti Riiklik Kirjastus, 1956. 155 lk.
28. Öpik, I. Tehnika progress ja keskkonnakaitse. — Eesti Loodus, 1974, nr. 6, lk. 321.

## SISUKORD

Lugejale	3
I peatükk.	Inimkonna energiatarvidus ja energiaallikad 7
	1. Kui palju ja milleks me energiat vajame? 7
	2. Energia ja selle esinemisvormid 9
	3. Energia varud, liigid ja tootmisviisid 14
	4. Kas tuumaenergia kasutuselevõtt tagab energiakülluse? 18
II peatükk.	Termiline ja elektrokeemiline arengutee 20
	1. Termoenergeetika viljad 20
	2. Elektrokeemiline arengutee 23
	3. Kuidas tekib elektrokeemilises elemendis elektri- vool? 26
	4. Kütuseelement 30
	5. Keskkonna saastatuse elektrokeemiline määra- mine 34
	6. Elektrokeemiline tehnoloogia ja keskkonna saas- tatuse likvideerimine 36
III peatükk.	Ökoloogiliselt puhta energia tootmise võimalused 39
	1. Päikeseenergia vahetu kasutamine 39
	2. Tuule- ja hüdroenergia 45
	3. Geotermiline ning loodete energia 47
	4. Maailmamere energia kasutamine 48
	5. Veel mõningatest eksootilistest energia tootmise võimalustest 54
	6. Mõnda energia säilitamisest ja regenereerimi- sest 55
IV peatükk.	Vesinikuenergeetika 57
	1. Tulevikuküetus 57

	2. Vesiniku tootmine	58
	3. Vesiniku säilitamine ja transport	60
	4. Vesiniku kasutamine	63
V peatükk.	Elektriauto energiaallikad	67
	1. Auto — sõber või vaenlane?	67
	2. Kas sise põlemismootor või elektrokeemiline element?	70
	3. Keemilised vooluallikad	74
	4. Primaarsed elektrokeemilised elemendid	75
	5. Sekundaarsed elemendid ehk akud	81
Lõpetuseks		84

Велло Лоодмаа.

**Об энергии, электромобиле и окружающей среде.**

На эстонском языке. Художник-оформитель А. Тали. Таллин, «Валгус».

Toimetaja M. Slet. Kunstiline toimetaja O. Herodes. Tehniline toimetaja K. Ehte. Korrektor O. Küla.

ИБ № 1351.

Laduda antud 3. 05. 79. Trükkida antud 30. 01. 80. MB-00817. Formaati 84×108/32. Trükipaber nr. 1. Kiri žurnalnaja. Kõrgtrükk. Tingtrükipoognaid 4,62. Arvestuspoognaid 4,66. Trükiarv 7000. Tellimuse nr. 1037. Hind 20 kop. Kirjastus «Valgus», 200090, Tallinn, Pärnu mnt. 10. Trükikoda «Ühiselu», 200001 Tallinn, Pikk t. 40/42.