

TARTU OBSERVATOORIUM

—

TARTU ÜLIKOOL

—

BIOGEOFÜÜSIKA ÕPPETOOL / KESKKONNAFÜÜSIKA INSTITUUT

LOODUSLIKU ENERGIARESSURSID

Loengukonspekt

Andres Kuusk

Tõravere-Tartu 1995

Sissejuhatus

Loengukursuses tutvustatakse esmaseid energiaallikaid, energia tootmist ja tarbimist nii maailmas kui Eestis. Rohkesti tähelepanu on pööratud alternatiivsetele energiaallikatele.

Loengukursus on mõeldud ennekõige füüsika-keemiateaduskonna noorematele kursustele, aga on jõukohane ja võib huvi pakkuda ka teiste teaduskondade üliõpilastele.

Mai 1995 Tõraveres

A. Kuusk

1 Energiaallikad

Energia Maal on kas Päikeselt EM kiirgusena saabunu, tuumaenergia, geotermaalne energia või univertsumis olemasolev kineetiline energia.

Energiaallikad:

- fossiilsed
- hüdroenergia
- tuumaenergia
- tuuleenergia
- päikeseenergia
- bioenergia
- geotermaalne energia
- tõusu-mõõna energia

Enamuse energiast saame EM kiirgusena Päikeselt, erandiks on geotermaalne energia, tõusu-mõõna energia ja tuumaenergia. Ka Päikeselt EM-kiirgusena Maale jõudnud energia vabaneb Päikesel kergete tuumade sünteesireaktsioonides.

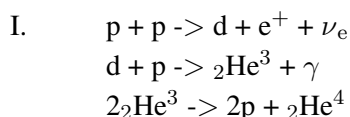
Tuumaenergia

Energia vabaneb raskete tuumade lagunemisel ja kergete tuumade sünteesil.

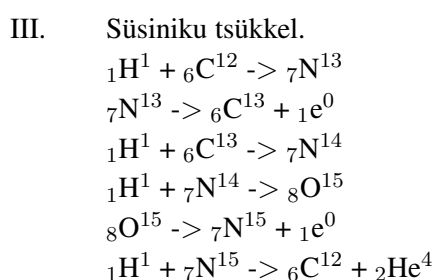
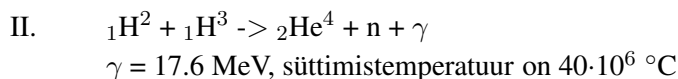
Rasketuude lagunemisel vabanev energia:

- looduslik radioaktiivne lagunemine
- kontrollitav rasketuude lagunemine tuumareaktorites – kontrollitav ahelreaktsioon, $\gamma = 1$
- tuumapomm, rasketuude lagunemise ahelreaktsioon, $\gamma > 1$.

Kergete tuumade liitumisel vabaneb energia vesinikupommis. Seni ei suudeta kergete tuumade sünteesi kontrollida ühest suurema kasuteguriga. Tuntud on mitmed termotuumareaktsioonid, milles vabaneb energia.



kus p - prooton
d - deuteerium
 e^+ - positron
 ν_e - elektron-neutriino
 γ - kvant



Siin ikkagi $4p \rightarrow {}_2\text{He}^4 + 2e^+ + 2\nu_e$, ${}_6\text{C}^{12}$ on katalüsaatoriks, protsessis eraldub ohtrasti energiat, 3.5 MeV/nukleon.

Raskete tuumade lagunemine.

Raskete tuumade lagunemisel eraldub neutroneid, mis interaktsioonis naabruses olevate tuumadega omakorda kutsuvad esile uue lagunemise - see on ahelreaktsioon. Spontaanselt lagunevad Mendelejevi tabeli tagumise otsa elemendid. Üldreegel on, et mida suurem on elemendi järjekorranumber, seda suurem on spontaanse lagunemise tõenäosus. Ahelreaktsiooni tekkeks on vaja üpris spetsiifilisi tingimusi, mis looduses reeglina ei esine. Maa peal teatakse ainult ühte looduslikku tuumareaktorit. Gabonis Oklo uraanimaardlas algas ahelreaktsioon umbes $1.8 \cdot 10^9$ aastat tagasi ja kestis umbes $7 \cdot 10^5$ aastat.

Põhilised lagunemisreaktsioonides energia saamiseks kasutatavad isotoobid on U^{233} , U^{235} , U^{238} , Th^{232} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} . ${}_{92}\text{U}^{238}$ lagunemisel eraldub 0.85 MeV/nukleon, U^{235} lagunemisel eraldub $7.5 \cdot 10^{13}$ J/kg, söe põlemisel eraldub $4 \cdot 10^7$ J/kg. Maale jõuab Päikese termotuuma-energia EM-kiirgusena - 1.35 kW/m² – see on atmosfääriväline kiirgus. Süsteemi Maa-atmosfäär albeedo on $\sim 1/3$.

Ülesanded.

1. Kui palju kiirgab Päike energiat?
2. Kui palju Päikese energiat jääb Maale?
3. Mis saab sellest energiast edasi?

Fossiilsed kütused

1985. a. jagunes energia kogutoodang nafta ekvivalendina:

	Miljonit barrelit / ööp.
	1 barrel = 158.9 l
toornafta	59
süsi	41
looduslik gaas	29
hüdroenergia	9
tuumaenergia	6
muu	22
<hr/>	
kokku	166

Fossiilsed kütused moodustavad kogu energiatootangus rohkem kui 80%, sest ülaltoodud tabelis on ka muu hulgas fossiilseid kütuseid (põlevkivi, turvas). Fossiilsed kütused on niisugused kütused, mis on salvestanud Päikeselt saabuva kiirgus-energia keemilise energiana kauges minevikus. Energia salvestamise aeg ja kestus võib erinevatel kütustel olla väga erinev. Vist kõige vanem fossiilne kütus on põlevkivi. Põlevkivi on tekkinud varases paleozoikumis ~ 500 miljonit aastat tagasi, süsi hilispaleozoikumis 345-225 milj. aastat tagasi. Nafta ja loodusliku gaasi tekkeage ei ole nii üheselt osundatavad. Läbi aegade on (eriti nafta) tekkeviisi hüpoteesid asendunud üksteisega: plankton, taimne päritolu, teke atmosfääris - aerosool, bioloogiline päritolu. Nafta on ühisnimetaja väga erinevatele maapõues leiduvatele vedelatele ja poolvedelatele kütustele, mis erinevad üksteisest nii koostise kui tekkeaja ja tekkeviisi

poolest. Looduslik gaas on suures osas tekkinud koos naftaga, aga on ka ainult gaasi leiukohti. Kuigivõrd tekib looduslikku gaasi pidevalt, aga energeetilises mõttes tuleb looduslik gaas liigitada fossiilseks kütuseks.

Fossiilsete ja alternatiivsete kütuste piirialal paikneb turvas. Turbasse on Päikese kiirgusenergia akumulieritud viimase 10000 aasta kestel. Turvas on ainuke fossiilne kütus, mis ladestub kuigivõrd ka praegu. Turba ladestumiskiirus on võrratult väiksem tema kaevandamise / tarbimise kiirusest.

Kivisüsi. Taimset päritolu must põlev maavara. Kivisüsi on tekkinud kõrgemate taimede orgaanilistest osistest, mis on kuhjunud soodes turbataoliste lasunditena. Rohkesti tekkis kivisütt hilispaleoliitikumis, karboni ajastul 350-300 miljonit aasta tagasi ~ 50-60 miljoni aasta kestel.

Kütteväärtus (eripõlemissoojus) on kuni 36 MJ/kg

Koostis;

kuni 90% on kõrgmolekulaarne orgaaniline aine tihedusega 1.2 - 1.53 Mg/m³
põlevaine koostis: 95% C
6% H₂
15% O₂
5% S
2% N₂

Antratsiit - kõige süsinikurohkem kõva läikiv kivisüsi, milles on 89.5-96.5% põlevainet, tihedus 1.4-1.7 Mg/m₃. Põlevaine eripõlemissoojus on 35 MJ/kg. Antratsiiti on ~3% kogu söevarudest.

Pruunsüsi - kuni 65 miljonit aastat tagasi tekkinud, kivisöe ja turba siirdeaste. Kütteväärtus 8-24 MJ/kg, orgaanilise aine eripõlemissoojus 22.6-31 MJ/kg. Leidub peamiselt põhjapoolkeral.

Nafta - tume õlitaoline põlev vedelik. Tihedus 0.73-1.05 (0.8-0.95) Mg/m³. Kütteväärtus 43.5-46.0 MJ/kg, hangumistemperatuur -60° – -25°C, keemistemperatuur 30-100°C.

Koostis: 82-87% C
11-14% H₂
0.1-5% S
0-1.7% N₂
0-1.2% O₂

Nafta on tõenäoliselt tekkinud mereloomade ja -taimede ning alamate organismide sadestunud jäänustest anaeroobsetes tingimustes.

Maagaas - maakoore tühikuis ja poorseis kihtides sisalduv gaasisegu, sageli esineb koos naftaga ja on osaliselt lahustunud naftas. Võimalik on kahesugune päritolu:

biokeemiline – orgaaniliste ja mineraalsete ainete muundumisel mikroorganismide osavõtul, koosneb metaanist, vesinikust, väävelvesinikust, süsihappegaasist, lämmastikust. Koostis on erinevates leiukohtades erinev;

volkaaniline – enamasti süsihappegaas, lämmastik, vahel ka vesinik.

Loodusliku gaasi kütteväärtus on 32.5-54.5 MJ/m³.

Põlevkivi - settekivim, mis sisaldab veekogude madalamatest organismidest pärinevat vesinikurikast orgaanilist ainet kerogeeni. Tekkis 450-500 miljonit aastat tagasi. Põlevkivi globaalne jaotus on ühtlasem kui naftal. Orgaanilise aine sisaldus ulatub kuni 30-35%, õlisaagis kuni 20-25%.

Kerogeeni koostis:

süsinik	65-80%
vesinik	8-10%
hapnik	7-25%
väävel	1.5-10%
lämmastik	0.5-2.5%

Kütteväärtus 5-20 MJ/kg

Turvas - taimset päritolu sete, mis on tekkinud soos hapnikuvaeses keskkonnas taimejäänuste mitte-täieliku lagunemise tõttu. Koosneb osaliselt lagunenud taimejäänustest ja huumusest. Kuivaines on kuni 50% mineraalaineid. Õhkuiv turvas sisaldab 30-40% vett.

Orgaanilises osas on

- 50-60% süsinikku
- 30-40% hapnikku
- 5- 7% vesinikku
- 1- 3% lämmastikku,

veel ka väävlit, fosforit jt.

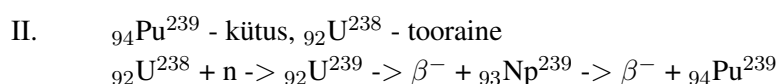
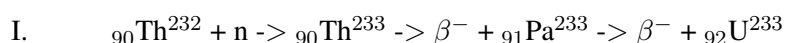
Õhkuiva turba kütteväärtus on 10-15 MJ/kg.

2 Tuumaenergia

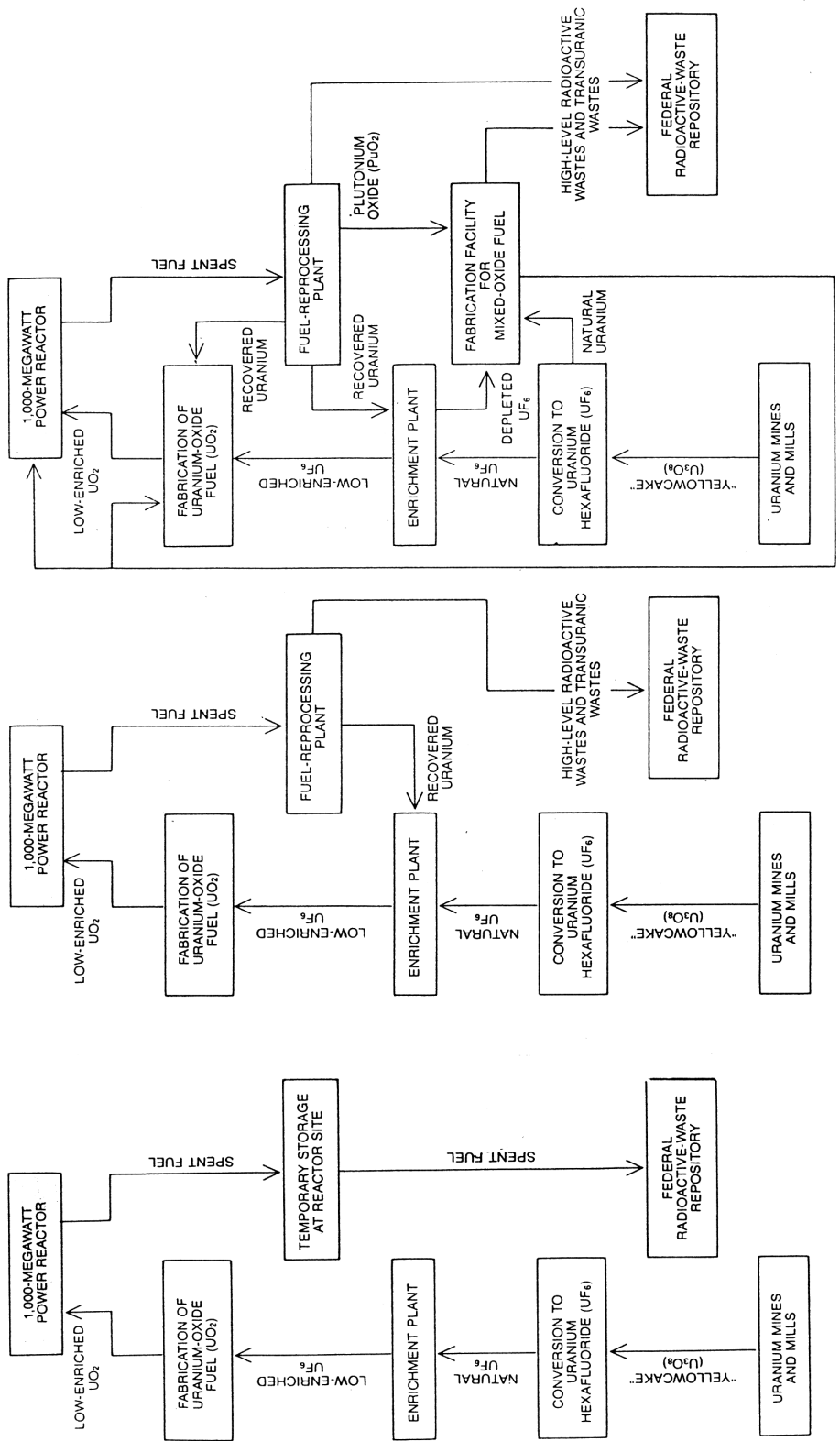
Lisaks spontaansele lagunemisele võivad aatomituumad laguneda ka neutronitega pommitades. Tuumade lagunemise tõenäosus sõltub pommitavate neutronite energiast. Kolm isotoopi - U^{233} , U^{235} ja Pu^{239} lagunevad soojuslike (aeglaste) neutronitega pommitades. Looduses leidub neist U^{235} . Tuuma lagunemisel eralduvad suure energiaga neutronid. Et need omakorda kutsuks esile uue tuumade lagunemise, peab neid aeglustama. Aeglustajana kasutatakse kergeid tuumi - deuteeriumi, grafiiti. ${}_{92}U^{235}$ lagunemisega reaktorid on

- uraan-grafiitreaktor
- grafiit-vesireaktor - aeglustajaks grafiit, soojuskandjaks vesi
- deuteerium-naatriumreaktor - aeglustajaks raske vesi, soojuskandjaks vedel naatrium.

Briider e. paljundusreaktor. Selles leiab aset tuumkütuse laiendatud taastootmine. Siis sisaldab reaktor lisaks lõhustuvatele tuumadele veel tuumatoorainet ${}_{92}U^{238}$ ja ${}_{90}Th^{232}$.



Pildil 1 näeme kolme tuuma-kütuse tsükli (Scientific American, 238(4):52-53).



THREE NUCLEAR-FUEL CYCLES suitable with conventional light-water reactors are shown in these simplified diagrams, adapted from a recent report to the American Physical Society by its study group on nuclear-fuel cycles and waste management. In the prevailing "once through" approach (*left*) the spent fuel rods, which still contain an appreciable amount of fissionable isotopes (principally "unburned" uranium 235 and plutonium 239 produced by the transmutation of the urani-

um-238 nuclei in the fuel are disposed of without reprocessing; disposition of the spent fuel can in principle be either temporary or permanent. In the uranium-recycle option (*center*) the spent fuel is reprocessed to recover only the residual uranium, which can then be enriched in the fissionable isotope U-235 or used as it is to replace some of the virgin natural uranium in the fabrication of new fuel assemblies. In the uranium-and-plutonium-recycle option (*right*) the spent fuel is reprocessed to separate both uranium and plutonium from the wastes. The recovered plutonium can then be combined with uranium having a very low concentration of U-235, in effect substituting the plutonium for some of the U-235 in the normally low-

enriched fuel. Useful mixed-oxide fuels can be made by combining plutonium with uranium derived from a number of different sources, including the normal low-enriched uranium product from an isotope-separation plant, the uranium recovered from spent fuel or the depleted "tails" from a uranium-enrichment plant. It has been estimated that with both uranium and plutonium recycling the industrial operations required to supply enriched uranium could be reduced by about 20 percent in the year 2000 compared with what they would be for either the uranium-recycle or no-recycle options. This saving would of course require the introduction of the costly and complicated fuel-reprocessing and mixed-oxide fuel-fabrication operations.

3 Taastuvad energiaallikad

Eespool toodud ülesannete lahendused.

1. Solaarkonstant on 1.35 kW/m^2 .
Maa keskmine kaugus Päikesest on $149.6 \cdot 10^9 \text{ m} \approx 15 \cdot 10^{10} \text{ m}$.
Sfääri pindala $= 4\pi R^2 = 4\pi(15)^2 \cdot 10^{20} \text{ m}^2 = 2.83 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$.
Siis on Päikese võimsus $= 3.82 \cdot 10^{23} \text{ kW}$.
2. Maa ristlõike pindala $= \pi R^2 = 127.4 \cdot 10^{12} \text{ m}^2 = 1.27 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$
Maale langeb (väljaspool atmosfääri) $1.72 \cdot 10^{17} \text{ W}$.
Kui albeedo on $1/3$, siis maapinnal neeldub $1.15 \cdot 10^{17} \text{ W}$.
Rahvaarv (1985) = 4.84 miljardit = $4.84 \cdot 10^9$.
Seega neeldub maapinnal $0.238 \cdot 10^8 \text{ W} \approx 24 \text{ MW}$ inimese kohta.

Meie jaoks on see taastuv energiaressurs. Taastuv (inimtegevuse ja inimese elueaga võrreldes) on ka ühel või teisel viisil muundunud ja akumulunud Päikese-energia. Neist kõige enam on kasutatav hüdroenergia, tuule-energia, kuigivõrd ka otseselt kasutatav Päikese-energia.

Taastuvate energialiikide võrdlev iseloomustus.

Energia tihedus on üks olulisemaid parameetreid, see määrab kõige rohkem energia kvaliteedi. Teine energia kvaliteedi iseloomustaja on energia muundatavus teisteks energialiikideks. Elektrienergia on kasuteguriga kuni 95% (ja rohkemgi) muundatav teisteks energialiikideks. Elektrit saab odavasti transportida suurtele kaugustele, võimalikud on väga suured energia voo tihedused.

Suure tihedusega ja suhteliselt kergesti mehaaniliseks (kasutatavaks) energiaks muundatav on hüdroenergia - jõgede voolu energia, vee potentsiaalne energia, lainete energia, tõusu-mõõna energia. Hüdroenergia on kasutatav kasuteguriga 60-75%. Suurem on lainete ja tõusu-mõõna energia mehaaniliseks energiaks muundamise kasutegur.

Tuule-energiat saab muundada mehaaniliseks energiaks kasuteguriga ~30%.

Taastuvad soojusenergia allikad on

- päikesekiirgus - kui kasutame soojendamiseks
- bioenergia - kütuseks

Soojusenergia on muundatav mehaaniliseks energiaks kasuteguriga 30-35%.

Taastuvad energialiigid on väikese tihedusega energia allikad:

- päikese kiirgus $\sim 1 \text{ kW/m}^2$
- tuule energia tihedus $\sim 1 \text{ kW/m}^2$ tuule kiirusel 10 m/s

Taastumatu energia tihedus on mitu suurusjärku suurem:

- aurukatlas $\sim 100 \text{ kW/m}^2$
- tuumareaktori soojusvahetajas $\sim 1 \text{ MW/m}^2$.

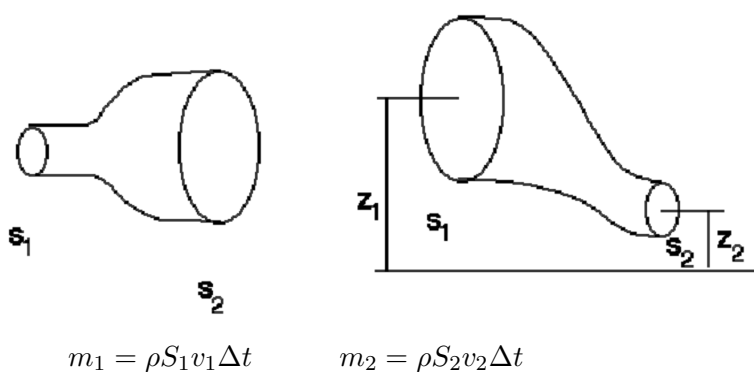
Inimtegevuses vajatakse reeglina väiksemaid energia tihedusi, küll aga on suure tihedusega energia sageli kergemini käsitletav (energia transport, jaotamine).

Taastuvate energialiikide iseärasuseks / iseloomustajaks on lisaks energia tihedusele ja teisendatavusele veel perioodilisus ja taastumisperiood. Mitmed taastuvate energialiikide parameetrid on esitatud tabelis.

Allika	Periood	Määravad parameetrid	Energeetilised parameetrid	Kommentaariid
kiirgus	24h, 1a	vootihedus, langemisnurk	$P \sim I_0 \cos \theta$	ainult päeval, diffuusne voog $\sim 1/5$ otsesest, sõltub pilvisusest
biokütus	1a 5a 100a	mulla kvaliteet, vesi, kulutused hankimisel, kasvatamisel	seotud energia ~ 10 MJ/kg	mets, põllumajandustoodang
tuul	1a	tuule kiirus, kõrgus maapinnast, reljeef	$P \sim v^3$	fluktueerub
∞ hüdroenergia (klassikaline)	1a	paisu kõrgus h, veekulu Q	$P \sim hQ$	reeglina vaja ehitada veehoidla
lained	1a	laine amplituud A, periood T	$P \sim A^2 T$	suure tihedusega ~ 50 kW/m ²
tõus-mõõn	12 ^h 25'	tõusu kõrgus H, basseini pindala S, kogumisala pikkus ja sügavus	$P \sim H^2 S$	kasutatav-kättesaadav mõnedel rannikutel
soojus merest		Δt sügaval ja pinna lähedal	$P \sim \Delta t^2$	väike muundamise efektiivsus

4 Hüdenergia

Kui ei konkretiseerita hüdenergia liiki, siis mõeldakse ikka jõgede / veehoidlate hüdroelektrijaamu. Varem kasutati hüdenergia ka otseselt mehaanilise energia saamiseks – saekaatrid, veskid. Vedeliku voolamise (hüdromehaanika) seaduspärasused määravad hüdenergia, tuuleenergia, lainete energia, tõusu-mõõna-energia, aga ka mitmete päikese-energeetikaseadmete töö. Põhiprintsiibiks on energia ja impulsi jäävus. Olulised on vedeliku mittekokkusurutavus ja viskoossus.



Potentsiaalse energia muutus ja veerõhu poolt tehtav töö võrduvad kineetilise energia muutusega ja energiakadudega hõõrdumisel

$$m g(z_1 - z_2) + [(p_1 S_1) v_1 \Delta t - (p_2 S_2) v_2 \Delta t] = (1/2) m (v_2^2 - v_1^2) + E_{\text{kaod}}$$

Kui on tegemist kokkusurutava voolamisega (gaasid - õhk), siis tuleb arvestada ka kokkusurumisest / paisumisest tingitud muutusi. Impulsi jäävus (liikumishulga jäävus) on Newtoni 2. seaduse üldistus vedelikele:

$$\vec{F} = \rho (S_2 v_2^2 - S_1 v_1^2) \vec{i}$$

\vec{i} – ühikvektor voolu suunas.

Viskoossus tekitab voolavas vedelikus/gaasis tangentsiaalseid jõudusid,

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Viskoossus on määratud vedeliku koostise ja temperatuuriga, ei olene kiiruse gradiendist dv/dy , dimensioon on $[N \cdot s/m^2]$

Turbulentsus. Kui voolamise kiirus ületab Reynoldsi arvuga määratud läve, muutub voolamine turbulentseks,

$$Re = vX/\nu$$

X - karakterne mõõde (toru diameeter)

ν - kinemaatiline viskoossus, $\nu = \mu/\rho$ $[m^2/s]$.

Voolamine muutub turbulentseks kui $Re > 2300$ (Reynoldsi arvu dimensioon on 1).

Turbulentsuse teke suurendab järsult hõõrdumist. Laminaarses voolamises on energia ülekande vooluga risti suunas määratud molekulide vaba tee pikkusega, turbulentses voolamises korral aga pulsatsioonide mastaabiga (= toru diameeter).

Hüdroelektrijaam on pikaaline, tema energiaressurss muutub aeglaselt – kliima muutused ja geoloogilised protsessid on peaaegu ainukesed potentsiaalselt võimalikud faktorid, mis võivad muuta ressursi, viimasel ajal ka inimtegevus. Hüdroelektrijaamast väljastatava energia hulk on kergesti ja kiiresti reguleeritav. Hüdroturbiini kasutegur võib küündida kuni 90%-ni.

Reaktiivne turbiin, see on turbiin, mille rootor on üleni vees. Pöörlemapanev jõud tekib rõhkude vahest turbiini ees ja taga. Reaktiivne turbiin on pööratav, võib töötada ka pumbana.

Aktiivne turbiin – vees on ainult osa labasid, neid lükkab vesi oma kineetilise energiaga.

Langeva vee energia:

$$P = \nu V g H$$

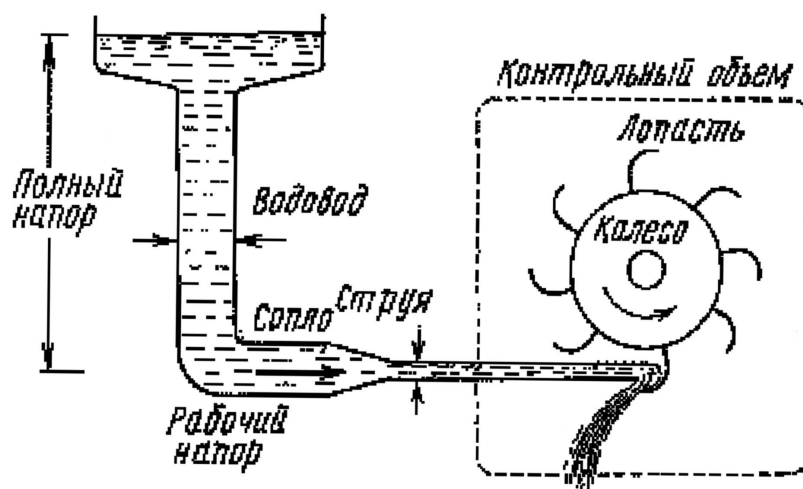
ν – tihedus, V – ruumala, H – kõrgus, g – raskuskiirendus.

Hüdroenergia ressurs on oleneb aastaajast ja sademetest.

Ressursi mõõtmine:

- võimalus tekitada kõrguste vahet – see on määratud reljeefi ja tehniliste võimalustega
- vooluhulk – tuleb mõõta ristlõige ja voolu kiirus.
- NB! Voolu kiirus ei ole kogu voolusängi ristlõike ulatuses ühesugune.

Aktiivne hüdroturbiin kasutab voolava vee kineetilist energiat.



Labale mõjuv jõud on võrdeline vee liikumishulga muutusega ajaühikus

$$\vec{F} = 2 \rho Q (v_j - v_t) \vec{x},$$

Q – veehulk, m^3

\vec{x} – ühikvektor voolu suunas

v_j – voolu kiirus

v_t – turbiini laba kiirus

Võimsus $P = F v_t$

Konstantse voolukiiruse korral on turbiini võimsus maksimaalne kui $v_t/v_j = 0.5$, siis

$$P = (1/2)\rho Qv_j^2.$$

NB! Siin valemis puuduvad kaod, $\eta = 100\%$, vee kiiruse horisontaalkomponent muutub turbiinist väljumisel nulliks.

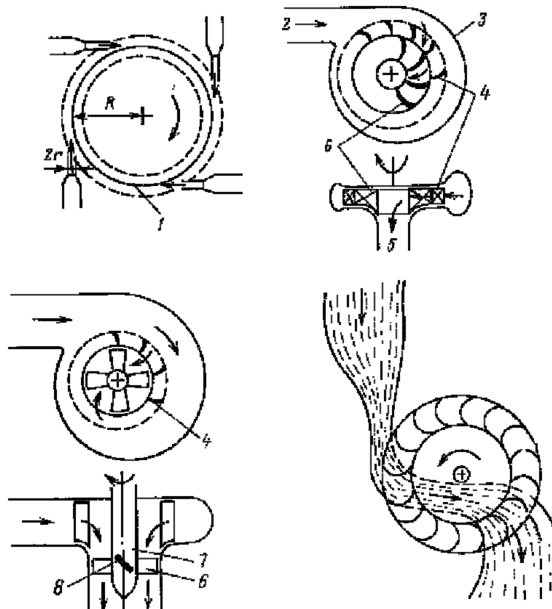
Reaktiivne hüdroturbiin

- sellel on kõik labad kogu aeg vees
- vesi siseneb radiaalselt, väljub telje suunas

Kui reaktiivses turbiinis on vee liikumine valdavalt teljesuunaline, siis on tegemist propelleritüüpi turbiiniga. Propeller-turbiinis tekivad propelleri taga suured hõrendused, mis viivad kavitatsioonini, seetõttu on suurenenud nõuded turbiini mehaanilisele tugevusele. Ka on suurema kasuteguri saamiseks vaja reguleerida labade nurka olenevalt koormusest.

Elektrijaama kasuteguri määravad

- turbiini kasutegur
- generaatori kasutegur
- kaod veejuhtmetes (hõõrdumine, turbulents).



5 Lainetuse energia

Merelainetes on kohutavad energiahulgad, aga nende ärakasutamine on tehniliselt raske. Suureperioodilised ($T \sim 10s$) lained amplituudiga ~ 2 m võivad anda 50–70 kW/m.

Raskused

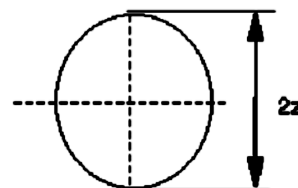
- merelainetus on ülimalt juhuslik väli
- seadmed peavad taluma ka ekstreemseid koormusi
- lainete sagedus on väike ja muutlik, raske toota standardsagedusega vahelduvvoolu

Sügavas vees ($D > \lambda/2$) kahaneb veeosakeste liikumise amplituud sügavusega eksponentsiaalselt, $\lambda = 100$ m korral võib vee sügavaks lugeda $D > 30$ m korral.

Lainetuse amplituud ei olene otseselt lainepikkusest ega lainetuse levikukiirusest. Oleneb ainult tuule tugevusest ja tuule kestusest. Harvad on juhused, et $A > \lambda/10$. Laine murdub, kui pinnakalle ületab $1/7$, siis laine energia hajub.

Vee osakeste liikumine lainetavas vees on ringikujuline. Harmoonilise võnkumise potentsiaalne ja kineetiline energia on võrdsed, potentsiaalne energia on lihtsasti arvutatav. Lainefrondi pikkusühiku kohta

$$h = a \sin kx.$$



Vee mass on $\rho dx dy$, sest $dy = 1$. Laines tõuseb vesi $2z$ kõrgusele, siis tema potentsiaalne energia kasvab

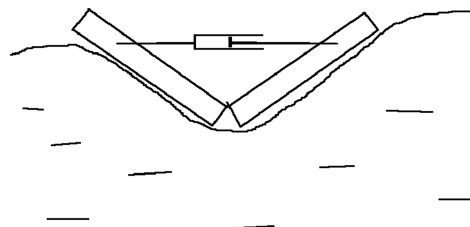
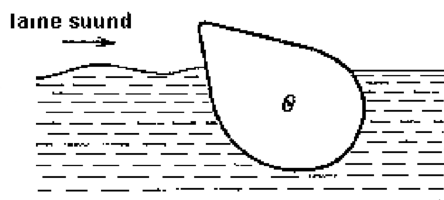
$$E_{\rho,\lambda} = \int_{x=0}^{x=\lambda/2} \int_{z=0}^h \rho dx dz \cdot 2gz = \rho g \int_{x=0}^{\lambda/2} h^2 dx =$$

$$= \rho g a^2 \int_0^{\lambda/2} \frac{(1 - \cos 2kx)}{2} dx = \frac{\rho g a^2 \lambda}{4}$$

Energia tihedus ühikulise lainepikkuste vahemiku kohta on

$$E = E_k + E_p = 2E_p = \frac{\rho a^2 g}{2}$$

Lainete energia kinnipüüdmiseks on põhimõtteliselt võimalik kasutada mitmesuguseid mere pinnal ujuvaid energia muundureid, mis hakkavad lainetuse käes kõikumama.



Teine võimalus on kasutada ära rannikul üles-alla liikuva veesamba energia, et kaitada mingit turbiini. Norras töötab niisugune 500 kW elektrijaam kaljusel rannikul. Mõnes kohas soodustab reljeef lainete fokuseerimist, sellele saab kaasa aidata ka tehisrajatistega.

6 Tõusu-mõõna energia

Tõusu-mõõna kõrguste vahe võib olla kuni 10m. Võnkumise periood $12^h25'$ on tingitud peamiselt Kuu tiirlemisest ümber Maa.

Kui eraldada merest tammiga basseini $S = 10 \text{ km}^2$, siis saame topeltamplituudi $A = 4 \text{ m}$ ja perioodi $12^h25'$ korral keskmise võimsuse

$$P = \rho A^2 S g / 2 = 17 \text{ MW}.$$

Niisuguste elektrijaamade ehitamine on väga töömahukas. Kuna kõrguste vahe on väike, on vaja palju paralleelselt töötavaid turbiine. Komplitseeriv asjaolu on, et voolu kiirus muutub.

7 Tuuleenergia

Õhu liikumise kineetiline energia muundatakse tuuleturbiini pöörlemise energiaks, mida omakorda saab kasutada elektri tootmiseks või mõne konkreetse seadme käitamiseks.

Erinevalt veeturbiinist on tuuleturbiini tiivik vabas õhus. Liikuva õhu kineetiline energia on

$$E = \frac{mv^2}{2} [N \cdot m]$$

kus m – mass, v – kiirus.

Kui liikuva õhu ruumala on V , siis

$$E = \frac{\rho V v^2}{2},$$

kus ρ – õhu tihedus.

Kui tiivik katab pindala A , siis

$$V = Av$$

ja tiiviku võimsus

$$N = \frac{\rho v^3 A}{2} [W].$$

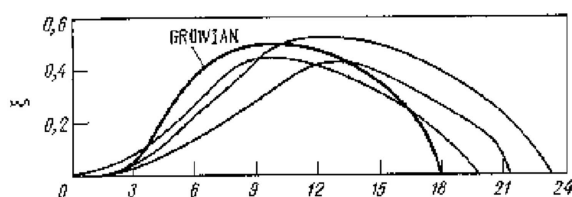
Tiivik ei muunda kogu õhu voolu kineetilist energiat tiiviku pöörlemise kineetiliseks energiaks. Teoreetiline ülempiir on $\sim 16/27$, siis väheneb tuule kiirus umbes 3 korda. Tuulegeneraatori tegelik võimsus on

$$N = \xi \cdot \frac{\rho v^3 A}{2} [W].$$

Efektiivsus ξ on määratud peamiselt tiiviku kiirekäigulisusega $z = u/v$, kus u – tiiviku laba otsa kiirus. Suurtes energiaseadmetes püütakse tiiviku pöörlemisagedus hoida konstantne, eriti on see vajalik vahelduvvoolu generaatori korral. Siis on efektiivsus ξ funktsioon ainult tuule kiirusest v , $\xi = \xi(1/v)$.

Elektri tootmisel tuleb lisaks veel arvestada elektri-generaatori kasutegurit,

$$N_e = \eta(N_e) \xi(v) \cdot \frac{\rho v^3 A}{2}.$$



Tuule-elektrijaamal on mingi maksimaalne võimsus (seda nimetatakse nominaalvõimsuseks), mida generaator saab välja anda. See on määratud agregadi konstruktsiooniga. Kui tuule kiirus kasvab suuremaks kui on vaja nominaalvõimsuse arendamiseks, tuleb tööle lülitada kaitseseadmed, et vähendada efektiivsust ξ .

Tuulegeneraatori käivitamiseks on vajalik mingi minimaalne tuule kiirus. Seega kujuneb tuuleseadme toodetava võimsuse graafik järgmiseks:

$$N = \begin{cases} 0 & v < v_{\min} \\ \eta(N_e)\xi(v)v^3 A & v_{\min} \leq v < v_{\text{nom}} \\ N_{\text{nom}} & v_{\text{nom}} \leq v < v_{\text{max}} \\ 0 & v > v_{\text{max}} \end{cases}$$

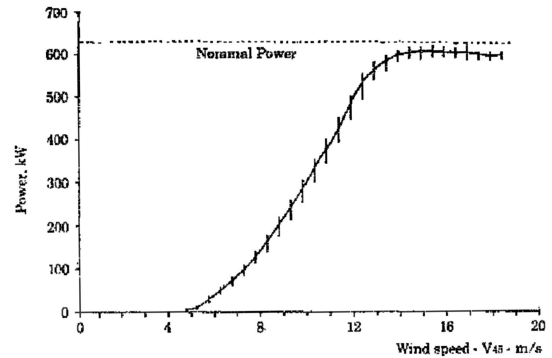
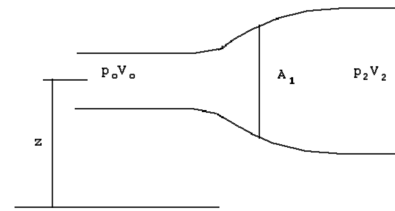


Figure 3. Nibe B. Electrical power output.

Rõhk tiivikule

$$\frac{p_0}{\rho_0} + gz_1 + \frac{v_0^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + gz_2 + \frac{v_2^2}{2}.$$



Vabas õhus $\rho_0 = \rho_2$, ka ei ole kõrguse muutus oluline, seega

$$\Delta p = p_0 - p_2 = (v_0^2 - v_2^2) \frac{\rho}{2}.$$

Maksimaalne rõhk ($v_2 = 0$)

$$\Delta p_{\max} = \frac{\rho v_0^2}{2}$$

ja maksimaalne koormus tiivikule

$$F_{A_{\max}} = \frac{\rho A v_0^2}{2}.$$

Kuivõrd $v_2 \neq 0$, siis

$$F_A \sim 0.6 F_{A_{\max}}.$$

Õhu tihedus on 1.2 kg/m^3 . Tuule kiirusel 10 m/s

$$F_A = \frac{0.6 \cdot 1.2 \cdot 100}{2} = 36 \text{ N/m}^2.$$

Siin ei pea see 0.6 siiski paika. Õhu liikumine on häiritud suurema läbimõõduga 'torus' kui seda on tiiviku diameeter. Seetõttu kasvab efektiivsuskoefitsient tiivikule mõjuva jõu arvutamisel isegi üle 1, võib olla kuni 1.2.

Tiivikule laba pikkusega 10 m rõhub tuule kiirusel $v = 20 \text{ m/s}$ jõud

$$F_{R=10m} = \frac{100 \cdot 3.14 \cdot 1.2 \cdot 1.2 \cdot 400}{2} = 90430 \text{ N} = 9230 \text{ kG}$$

Pöördemoment ei saa olla suurem kui tiivikule mõjuva jõu korrutis tiiviku raadiusega,

$$T_{\max} = F_{\max} \cdot R = \frac{\rho A v_0^2}{2} R.$$

Eespool defineerisime tiiviku kiirekägulisuse, $z = u/v_0 = R\omega/v_0$, siit saame

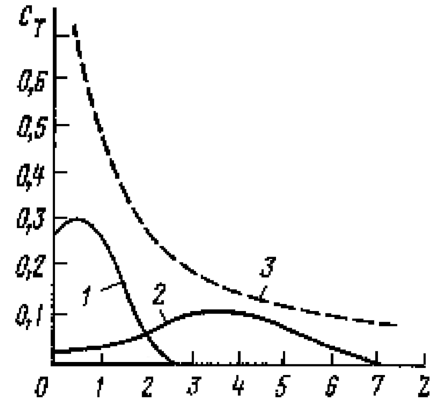
$$T_{\max} = \frac{\rho A v_0^2}{2} \cdot \frac{v_0 z}{\omega} = N_0 \frac{z}{\omega},$$

kus N_0 on õhuvoolu võimsus.

Kättesaadav pöördemoment on

$$T = C_T T_{\max},$$

pöördemomendi koefitsient C_T on funktsioon z -st, ta oleneb tiiviku täitumusest (labade arvust). Joonisel vastab kõver 1 suure labade arvuga tiivikule, kõver 2 väikese labade arvuga kiirekägulisele tiivikule, kõver 3 on teoreetiline piir.



Väikese labade arvuga tiivik on kiirekäguline ja läheneb rohkem teoreetiliselt võimalikule C_T -le. Väikestel kiirustel on niisuguse tiiviku pöördemoment väga väike – tiivik ei pruugi üldse pöörlema hakata.

Tiiviku töörežiimid olenevad labade arvust ja tiiviku kiirusest. Kui labasid on palju ja pöörlemiskiirus suur, liigub laba eelmise laba tekitatud pöörisesse. Kui labasid on vähe ja pöörlemiskiirus väike, läbib suur osa õhku tiiviku tasandi takistusest. Optimaalne tiiviku pöörlemiskiirus oleneb tuule kiirusest. Tiiviku efektiivsus on maksimaalne kui

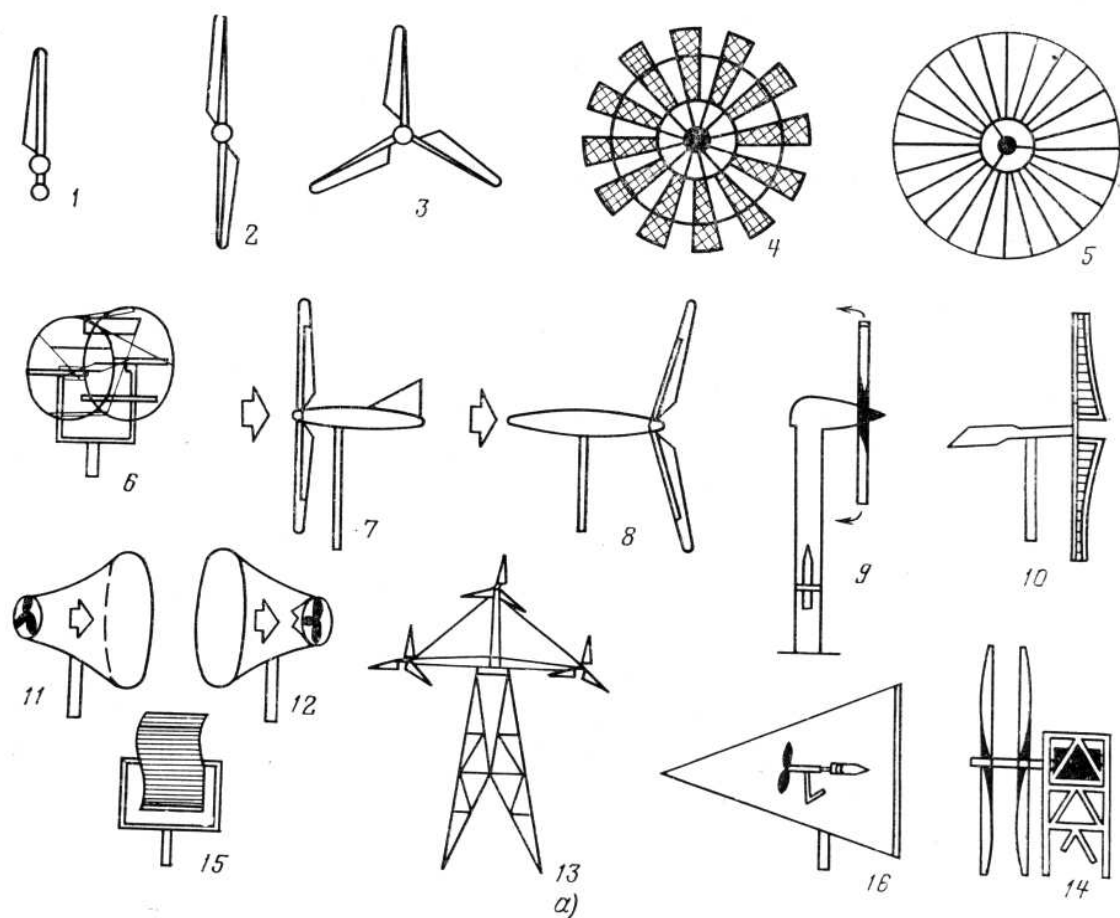
$$z \approx \frac{2\pi R}{n d},$$

kus n - labade arv, d – õhu häirituse karakterne mõõde, $d \approx R/2$ – see on empiiriline tulemus. Seega

$$z_{opt} = \frac{4\pi}{n}.$$

z_{opt} ja efektiivsus C_p olenevad ka tiiviku ataknurgast ja laba profiilist, nii et täpne tiiviku teooria on üpris komplitseeritud.

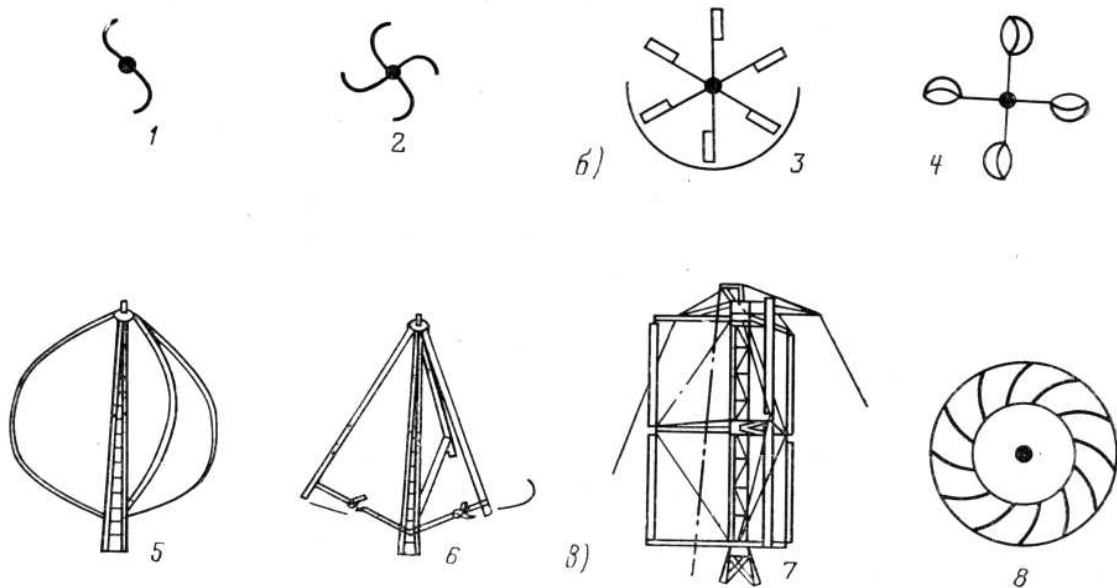
Tuulegeneraatorite tüübid.



Horisontaalse teljega tuulegeneraatorid.

- 1 - 1-labaline
- 2 - 2-labaline
- 3 - 3-labaline
- 4, 5 - hulgalabaline
- 6 - trummel-tiivik
- 7 - lauptiivik
- 8 - sabatiivik

- 9 - pneumaatilise energiaülekandega
- 10 - puritiivaga
- 11 - diffuusoriga
- 12 - kontsentraatoriga
- 14 - vastassuunalised tiivikud
- 15 - Savoniuse rootor
- 16 - tuulekeeriste energiat kasutav.



Vertikaalse teljega tuulegeneraatorid.

1 - Savoniuse rootor

2 - mitme labaga Savoniuse rootor

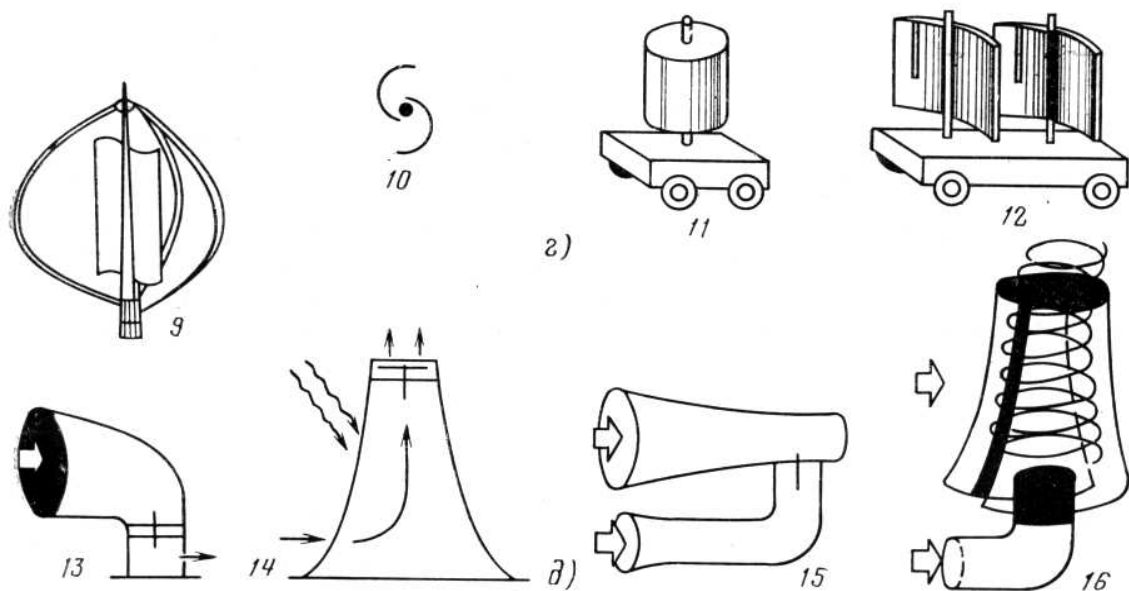
3 - plaat-rootor

4 - kauss-rootor

5, 6 - Darrieus' turbiin

7 - sirgete tiiblabadega rootor

8 - tuuleturbiin



Kombineeritud vertikaalse teljega tuulegeneraatorid.

9 - Darrieus' ja Savoniuse rootor

10 - Savoniuse pilu-rootor

11 - Magnuse efekti kasutatav rootor

12 - kandvate pindadega rootor

13 - deflektoriga tuulik

14 - päikese-tuule-seade

15 - Venturi efekti kasutatav

16 - tuulepööriseid kasutatav.

Tuule parameetrid.

Tuule kiirus ja suund on väga muutlikud. Järgnevatel jonistel on näha tunni keskmised tuulekiirused Norras ja ööpäevane tuule kiiruse käik Ülemistel.

Tuule kiirus kasvab maalähedases kihis kõrgusega logaritmiliselt,

$$v(z) = V \ln\left(\frac{z - d}{z_0}\right)$$

d - karedusparameeter [m] s.o. nivoo, millel $v = 0$.

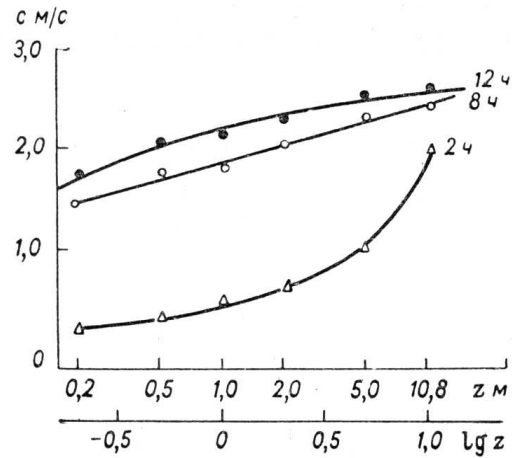
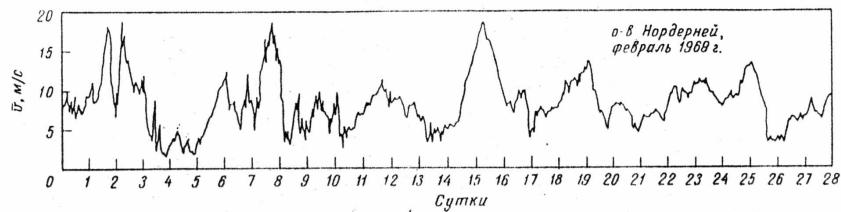
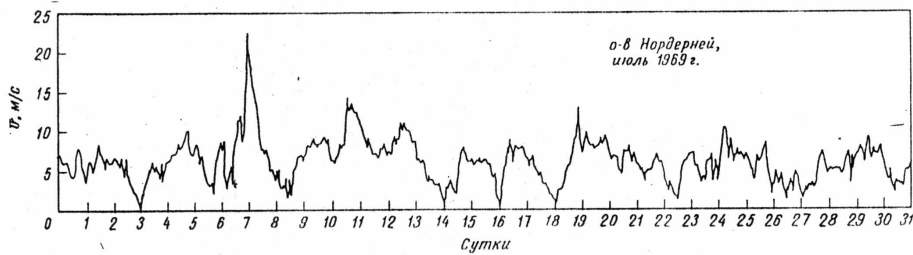


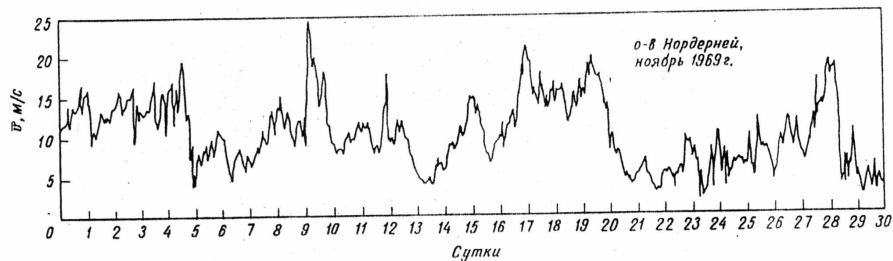
Рис. 23.2. Распределение скорости ветра с высотой при безразличной (8 ч), неустойчивой (12 ч) и устойчивой (2 ч) стратификации приземного слоя атмосферы. Арысь, Казахская ССР, 27 августа 1945 г.



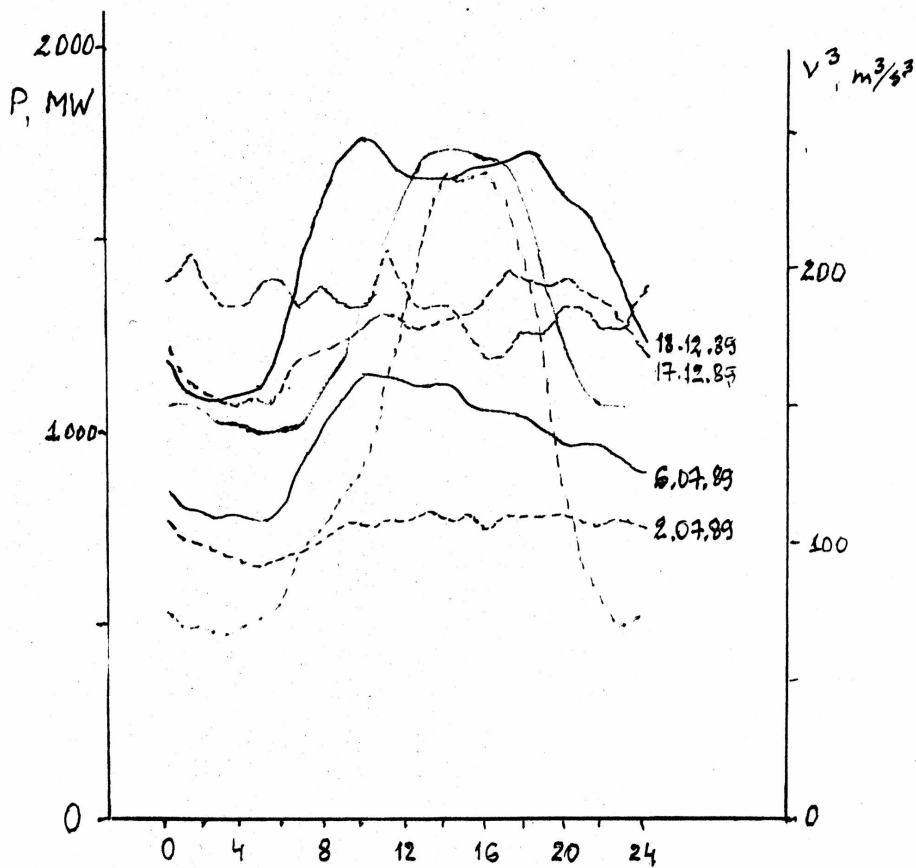
12. Среднечасовые значения скорости ветра.



3. Среднечасовые значения скорости ветра.



14. Среднечасовые значения скорости ветра.



- P tööpäevadel
 - P pühapäevadel
 - v^3 aasta keskmise
 - v^3 juuli
 - v^3 detsember
- } Ülemiste,
h = 11 m
1958 - 1962

Kuivõrd tuule kiirus kasvab kõrguse kasvades, tuleb tiivik panna pika masti otsa. Vaja on arvestada tuule rõhku. Generaatorite paigaldamisel tuleb arvestada reljeefi, tuuled on suured rannikul ja avamerel. Rootsis on ehitamisel 2MW võimsusega tuulegeneraator rannast eemal avamerel. Elektrivõrku tootmisel peab tiiviku pöörlemissagedus olema täpselt sünkroniseeritud – see on suhteliselt lihtsamini teostatav suurtes tuulikutes. Tuulegeneraatorit on hea kasutada ühises võrgus hüdrojaamadega ja/või diiselektrijaamadega – need on kergesti reguleeritava võimsusega. Nii saab kompenseerida tuulegeneraatori võimsuse muutlikkust. Suhteliselt lihtne on tuuleenergiat kasutada vee pumpamiseks, madalalvaliteedilise elektri (stabiliseerimata pinge ja sagedus) tootmiseks kütteks. Hästi sobib kütteks hüdropiduriga tuulik – selle koormuskarakteristik sobib hästi tuuliku poolt arendatava võimsusega.

8 Bioenergia

Biomass, s.t. ained, millest koosnevad taimed ja loomad, koosneb põhiliselt süsiniku orgaanilistest ühenditest. Kui põlemise käigus süsinik ühineb hapnikuga, eraldub soojus. Soojust eraldub ka loomuliku metabolismi (ainevahetuse) käigus. Keemiliste või biokeemiliste protsesside vahendusel võib biomass teiseneda mõneks teiseks paremini kasutatavaks kütuseliigiks. Bioenergia on süsteemi biomass-hapnik keemiline energia, mis esmaselt akumulēerub fotosünteesi käigus. Biomass on oma koostiselt, energiasisalduselt, päritolult, käsitledavuselt väga mitmekesine. Biomass kui kütus või toore kütuse tootmiseks võib olla looduslik, mingi kasvatatud kultuuri kõrvalprodukt (jäätmel), või ka spetsiaalselt kütuse saamiseks kasvatatud.

Mõned näited biomassi energiasisalduse ja koostise kohta.

Puidu kütteväärtus.

25% veesisalduse korral on kuiva puidu kütteväärtus

	$\cdot 10^6$ kJ/rm	MJ/kg
kask	6.41	
mänd	5.32	20.6
lepp	4.90	
haab	4.73	
kuusk	4.56	20.1

Puidu koostis % kuivainest, mänd.

N ₂	0.15
S	0.4
H ₂	6.3
C	51.8
O ₂	41.3
tuhk	0.5
Ca, K	< 1

Põllukultuuride vee- ja mineraalaine sisaldus ning kuivaine kütteväärtus

	H ₂ O, %	tuhk, %	$\cdot 10^6$ J/kg
nisu	28	14	15.8
mais	47	10	15.8
kaer	10	15	
kartul	89	10	
oder	9		
suhkrupeet	80	20	15.8
sorgo	60	16	15.8
riisipõhk	20	18	
suhkruroog	60	16	15.8
hein	11	6.8	
	20	4	17
puuvill	50	19	17.5
jäätmel	8	10	15.8

rukis			
terad	28	15	15.8
põhk	0.8		
vetikad,			

rootaimed – kuivaine juurdekasv 6 g/m² ööpäevas.

Taimede orgaanilises aines on 46-48% süsinikku, suure rasvasisaldusega vetikates kuni 54%. Tuhka on kuivamaataimedes ~5%, vetikates rohkem: 25-50%. Vetikate kuivaine kütteväärtus on 16-19 MJ/kg.

Aastane toodang, kg/m²

puud	0.9-2.8
rohud	1.1-6.8
vetikad tiigis	4.5
laboris	6.8-13.5
pruunvetikad looduses	4.9

Biomassi maksimaalne tootlikkus

Kultuur	Tootlikkus, toores	t/ha·a kuiv	Energia tihedus MJ/kg	Ekvivalent- võimsus, GJ/ha·a
Looduslikud kõlvikud				
aas	7	3		
mets parasvöötmes	14	7	18	130
mets troopikas	22	11	18	200
Söödad				
sorgo, 3 saaki	200	50	17	850
sudaani hein	160	40	15	600
lutsern	40	25		
rukis	30	20		
Toidukultuurid				
mais	30	25		
nisu	30	20		
suhkrupeet	100	50		
riis	20			
õlipalm	50	40		
Energiakultuurid				
eukalüpt	55	20	19	380
pappel	29	18	19	380
vesihüatsint	300	36	19	680
makrovetikad	250	54	21	1100
mikrovetikad	230	45	23	1000
Põllukultuuride jäätmed				
		12-15		

Sekundaarsed biokütused

	Energiatihedus	
	MJ/kg	MJ/l
etanool	30	25
metanool	23	18
biogaas	28	$20 \cdot 10^{-3}$
generaatorigaas	5-10	
puusüsi	32	11
kookosõli	39	36

Kaevandatavad kütused

metaan	55	$38 \cdot 10^{-3}$
bensiin	47	34
petrool	46	37
diiselmootor	46	38
toornafta	44	35
kivisüsi	27	

Põlemine

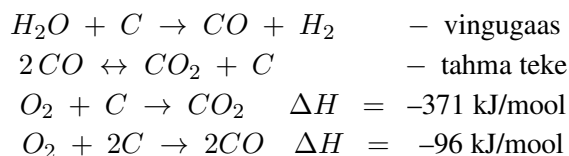
kütus + O₂ → CO₂ + H₂O + tuhk ja teised lisandid

Kõike eralduvat soojust ei saa kätte, osa kulub kütuse ja õhu soojendamiseks põlemistemperatuurini ja viiakse pärast heitgaasidega minema. 25°C → 400°C soojendamiseks kulub

CO ₂	374 J/g
H ₂ O	732
O ₂	364
H ₂ O(25°C) aurustamine	2.44 kJ/g

Maksimaalse soojuse saamiseks on vaja optimeerida õhuga varustatus. Hapniku vajakajäämisel ei ole põlemine täielik, liigse õhuhulga korral viiakse muist sooja asjata minema.

Põlemise keemia on keeruline, protsessid olenevad temperatuurist ja kütuse peenestusest. Peenel kütusel on osakeste pindala kaaluühiku kohta suurem. Põlemine algab pindkihi pürolüüsiga, keemiliste reaktsioonide hulk on suur ja järjekord on keeruline. Kindlasti leiavad aset



Pürolüüs on ainete lagundamine kuumutamise teel. Pürolüüsi saab kasutada biomassist uute kütuste valmistamiseks. Tooraineks võib olla puit, orgaanilised jäätmed, sõnnik, olmeprügi, aga ka kivisüsi või põlevkivi. Pürolüüsi produktideks on gaasid, vedelad kondensaadid - õlid ja vaigud, ning tahke jääk – süsi ja tuhk (šlakk). Gaasigeneraator on pürolüüsiseade.

Joonisel on kujutatud olmeprügi pürolüüsi tehast.

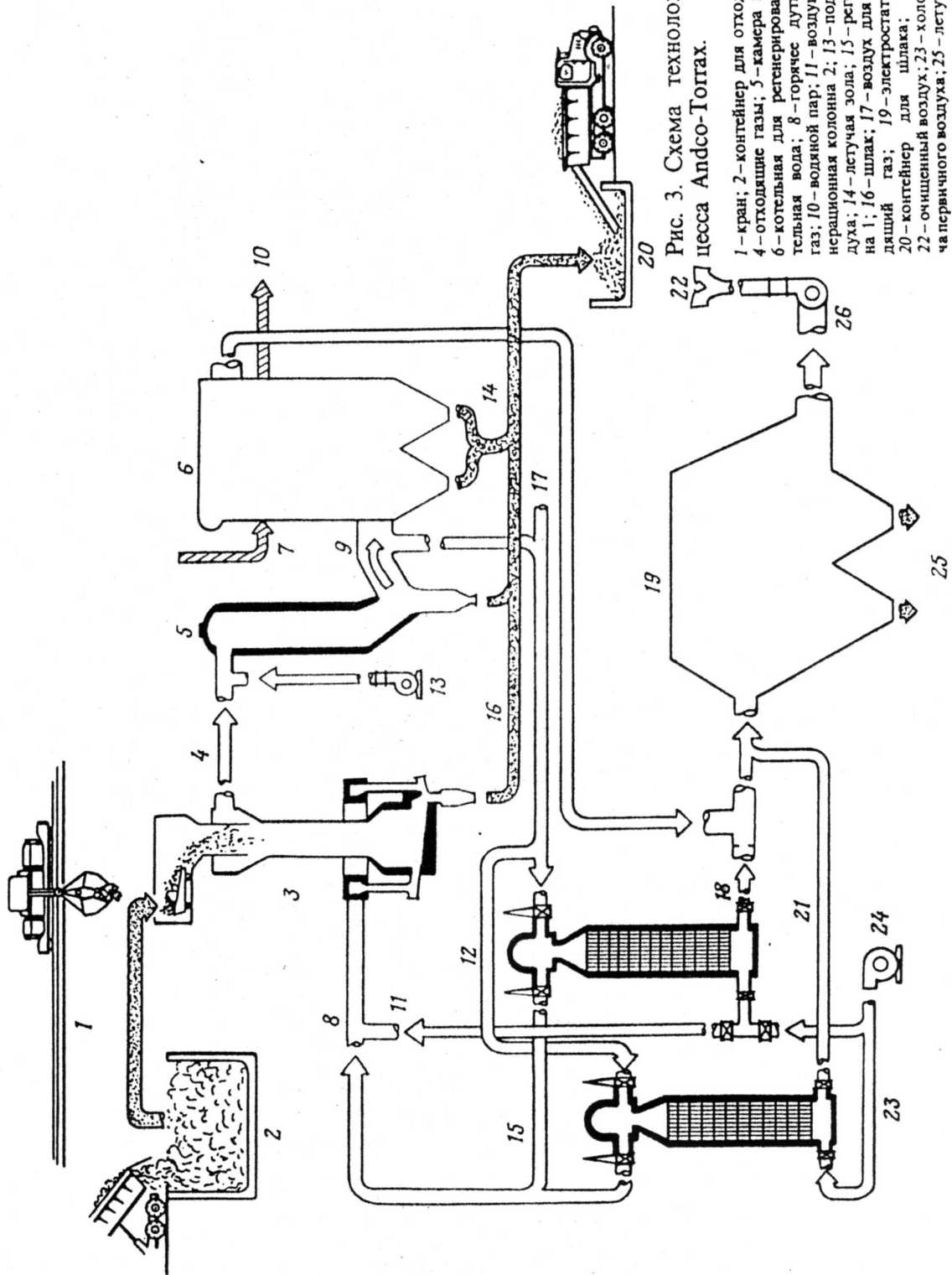


Рис. 3. Схема технологического процесса Andco-Torgaх.

1 - кран; 2 - контейнер для отходов; 3 - газификатор; 4 - отходящие газы; 5 - камера вторичного горения; 6 - котельная для регенерирования тепла; 7 - питательная вода; 8 - горячее дутье; 9 - поступающий газ; 10 - водяной пар; 11 - воздушное дутье; 12 - регенерационная колонна 2; 13 - подвод вторичного воздуха; 14 - летучая зола; 15 - регенерационная колонна 1; 16 - шлак; 17 - воздух для смешения; 18 - отходящий газ; 19 - электростатический осадитель; 20 - контейнер для шлака; 21 - отходящий газ; 22 - очищенный воздух; 23 - холодное дутье; 24 - поддува первичного воздуха; 25 - летучая зола; 26 - воздушная дувка.

1 - kraana; 2 - jäätmete konteiner; 3 - gaasigeneraator; 4 - lahkuvad gaasid; 5 - sekundaarse põlemise kamber; 6 - katel; 7 - toitevesi; 8 - kuum gaas; 9 - saabuv gaas; 10 - veeaur; 11, 13, 17, 23, 24 - õhk; 12, 15 - regeneratsioonikolonnid; 14, 25 - lendtuhk; 16, 20 - šlakk; 18, 21 - lahkuv gaas; 19 - elektrostaatiline filter; 22 - puhastatud õhk.

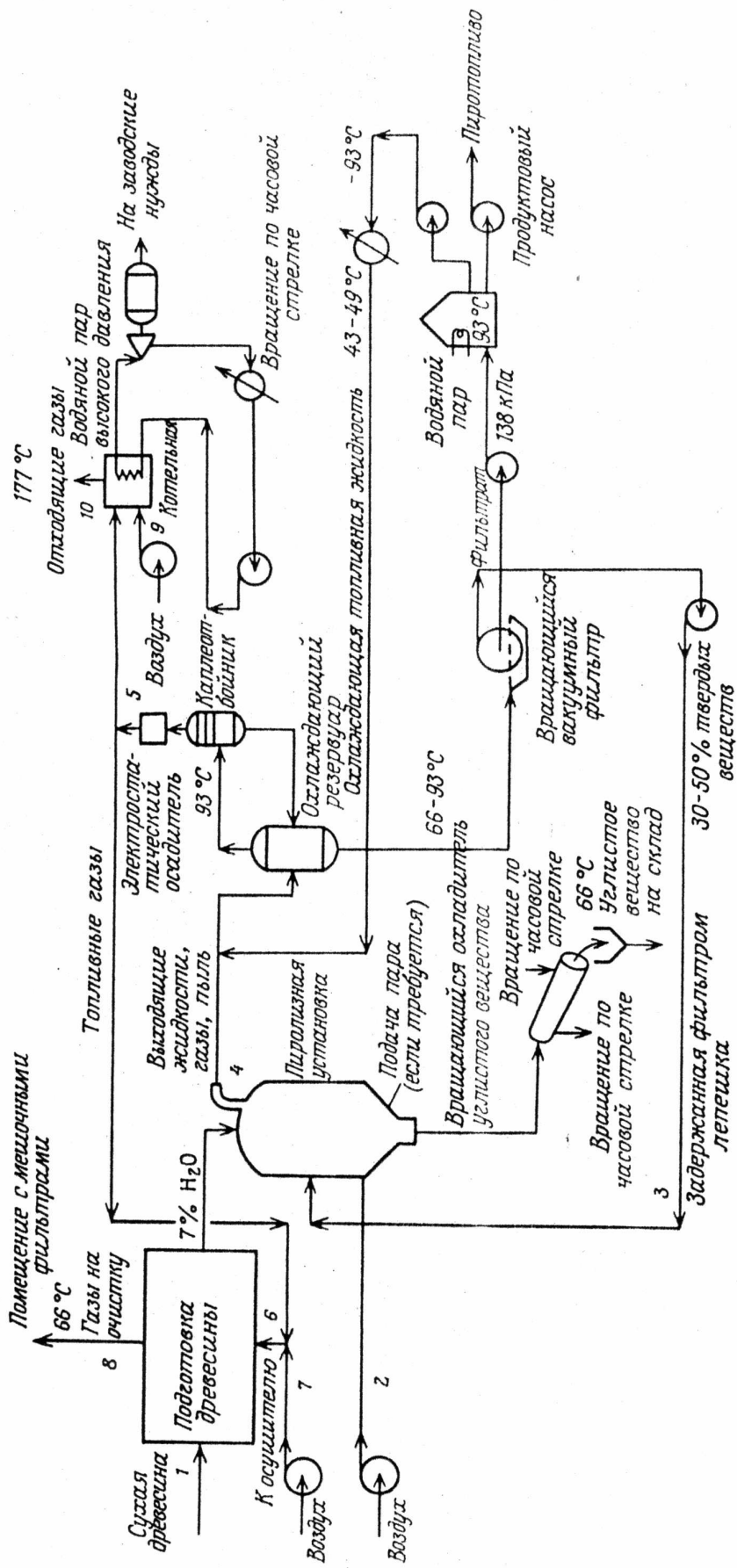


Рис. 3. Схема технологического процесса пиролиза древесины.

Gaasigeneraatori ülaosas prügi kuivab, allapoole vajudes kuumeneb, nii et algab pürolüüs, mille käigus lenduvad põlevad gaasid, järgi jääb söetaoline kuiv pürolüüsi jääkprodukt. See põletatakse samas generaatori allosas, lisades ~1000°C-ni kuumutatud õhku. Alt voolab välja sula šlakk, mis jahtudes tardub tumedaks klaasitaoliseks massiks, mis ei sisalda enam süsinikku. Umbes 90% prügis sisalduvast energiast lahkub gaasigeneraatorist gaasidega - põlevad gaasid ja kuum veeaur. Niisuguses generaatoris tekkinud gaas on peaaegu sama kütteväärtusega kui mõnel muul viisil saadav gaas.

Olmepürgi koostis (USA-s)

paber	45%
puut	4%
tekstiil	1%
plastmass ja kumm	5%
toidujäätmed	25%
tolm ja tuhk	7%
metall	6%
klaas	7%

Šlaki koostis

SiO ₂	45%
Al ₂ O ₃	10%
TiO ₂	0.8%
Fe ₂ O ₃	10%
FeO	15%
MgO	2%
CaO	8%
MnO	0.6%
Na ₂	0.6%
K ₂ O	0.7%
Cr ₂ O ₃	0.5%
CuO	0.2%
ZnO	0.1%

Prügi pürolüüsi seadmeid on juba ehitatud mitmeid:

Buffalo, NY, USA	1971	68 t/ööp	
Luksemburg	1976	3-8.3 t/h	elekter
Grass, Prantsusmaa	1977	3.8-7 t/h	aur
Frankfurt, SLV	1978	4-8 t/h	elekter
Prantsusmaa	1979	5.4-8.3 t/h	elekter

Sooja tootmise kasutegur võib küündida 70%-ni. Mõnikord võib osutuda vajalikuks isakütus (looduslik gaas) protsessi käigus hoidmiseks.

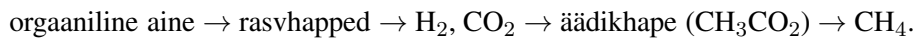
Pürolüüsil põhinevates gaasigeneraatorites saab gaasi (sooja) toota ka spetsiaalselt selleks ette valmis tatud toorainest:

- kivisöest
- põlevkivist
- hakkepuidust

Fermentatsioon = käärimine

Teine võimalus biomassist gaasi saamiseks on fermentatsioon (käärimine). Anaeroobse käärimise käigus lagunevad keerulised orgaanilised ühendid kuni CO_2 ja CH_4 -ni, kusjuures ~90% substraadis olevast energiast jääb metaani sisse. Anaeroobne süsivesinike käärimine ja valkude mädanemine on loodusliku aineriingi tähtis lüli, neid protsesse kasutatakse juba väga ammu reovee puhastamiseks. Kõrgekalorse küttegaasi tootmine sel viisil avastati/leiutati suhteliselt hiljuti.

Orgaanilise aine lagundavad CH_4 -ni põhiliselt bakterid, mingi osa võib olla ka seentel. Substraadi fermentatsioon metaani eraldumisega leiab aset anaeroobsetes süsteemides – setetes, soos (soogaas), mädanevates orgaanilistes jäätmetes. Käärimises osalevad põhiliselt kahte liiki bakterid: termofiilid temperatuuril $45-70^\circ\text{C}$ ja mesofiilid temperatuuril $20-40^\circ\text{C}$. On ka suuremas temperatuurivahemikus ($20-70^\circ$) aktiivseid baktereid. Käärimiseks on vajalik pH 5–8, kui pH < 7, siis on käärimise kiirus väike. Keemilised protsessid käärimisel on väga keerulised ja mitmeastmelised:



Metaani tekib ka veiste maos. Kuna metaan on oluline kasvuhoone-efekti tekitaja, jälgitakse metaani teket looduses. Allikateks on sood, veehoidlad, kariloomad.

Käärimisreaktorit iseloomustab aine (substraadi) vahetumise kiirus. Vaja on aega, et bakterid jõuaks areneda. Liiga kiire aine vahetuse korral võib küll kasvada reaktori tootlikkus m^3 gaasi/reaktori_ruumala, aga gaasi saagis langeb. Olenevalt substraadi koostisest võib vaja minna toitaineid, vitamiine. Suure lämmastiku-sisaldusega tooraine korral võivad tekkida toksilised ained.

Fermentatsioonireaktorid on lihtsamini ehitatavad ja eksploateeritavad kui pürolüüsireaktorid. Kui pürolüüsiprotsessi jaoks on vaja tervet tehast, siis käärimisreaktor võib olla talu või väikefarmi orgaaniliste jäätmete ümbertöötamise seade. Farm tarbib ise suurtes kogustes energiat – bensiini, diiselkütust, elektrit ning katlakütet. Viimast võib toota kohapeal sõnnikust ja söödajäätmetest.

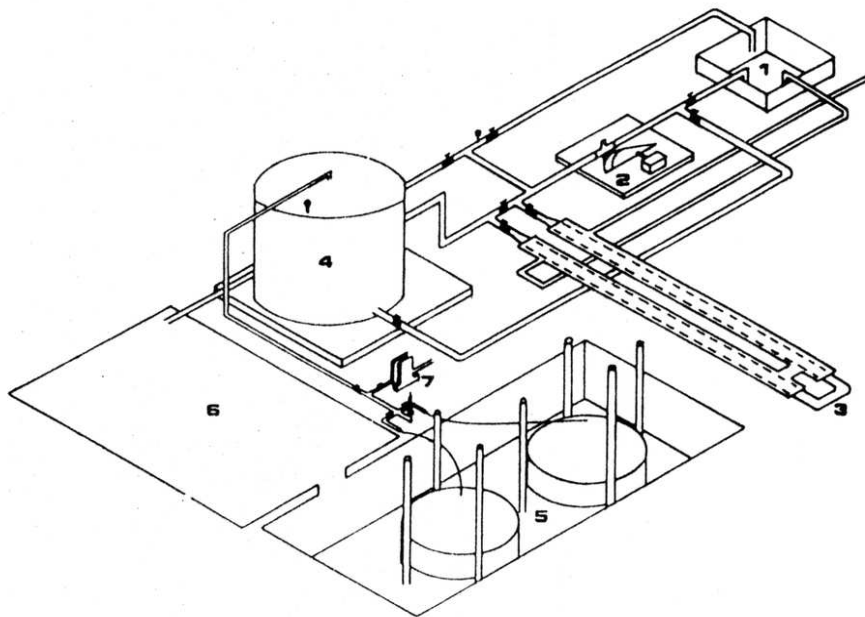


Рис. 5. Изометрическая проекция участка, предназначенного для размещения установки по производству метана.

1 – отстойник; 2 – насос; 3 – теплообменник; 4 – ферментер, или анаэробный перегниватель; 5 – плавающие газосборники; 6 – площадка для сушки; 7 – колонна для отделения H_2S .

Metaani tootmise seade (joonis): 1 - settekast, 2 - pump, 3 - soojusvaheti, et vajaduse korral soojendada, 4 - reaktor (suur plastmasstünn), 5 - ujuvad gaasikogujad, 6 - kuivatusplats, 7 - H₂S eraldamise kolonn – puitlaastud immutatud FeO-ga.

Reaktor töötab paremini, kui ainete vahetub pidevalt või väikeste portsjonitena (1x ööpäevas). Tahenenud sõnnik sobib väetiseks. Kui gaas tarvitatakse ära kohapeal, ei ole vaja kompressorit ega kõrgsurveballoone.

Etanooli tootmine

Hapniku juuresolekul lagundatakse suhkrud mikroorganismide poolt süsihappegaasiks ja veeks. Mõned mikroorganismid lagundavad hapniku puudumisel suhkrud ja teised orgaanilised ühendid nii, et vee asemel tekib etanool C₂H₅OH. Õhu juurdepääsu korral asendub anaeroobne protsess suurema efektiivsusega aeroobse protsessiga ja etanooli teke lakkab. Substraadina sobib igasugune põllumajandussaadus, millel on suur tärklise või suhkrusisaldus (mais, kartul, suhkrupeet, teravili) või tselluloosirohked substraadid (puit, põhk, paber, sõnnik).

Etanooli tootmise efektiivsus on suuresti määratud substraadi ettevalmistusega. See oleneb konkreetsest substraadi koostisest, erinev suhkrurool, kartulil jne. Tselluloosirohke puidu fermentatsioon etanooliks on raske, alles otsitakse võimalusi.

Etanooli tekitav käärimine leiab enamasti aset temperatuuril alla 20°C. Leitud on ka baktereid, kes tegutsevad kõrgemal temperatuuril.

Etanooli tootmise kõrvalsaadused on puhas CO₂ ja tahked jäätmed loomasöödaks.

Energiavõsa

Bioenergia ressursside taastumisperioodid:

mets	60-120 a
lepavõsa	5-15 a
energiavõsa	3-5 a
põllukultuurid	1 a
roostik	1 a

Mitmetel pajuliikidel on suur kasvupotentsiaal esimese 4-7 a kestel. Paju on väga kerge istutada - maasse torgatud ~20 cm pikkune 1-aastase kasvu pulk hakkab kasvama. Pulgad lõigatakse talvel ja hoitakse temperatuuril -2 - -4°C kuni istutamiseni. Niisuguste pulkade vitaalsus ületab 95%.

Maa valmistatakse ette kui põllumaa, pH vahemikus 5.5-6.5. Istutamistihedus 2 pulka/m². Istutamisaastal on vaja teha umbrohutõrjet, et paju ei jääks alla valguskonkurentsis. Esimesel talvel lõigatakse kasvud, et istikud hakkaksid võrsuma. Istandust on soovitatav väetada

teisel aastal	45-60 kg N/ha
kolmandal aastal	100-150 kg N/ha
neljandal aastal	90 kg N/ha

Nelja kasvuaasta järel on enamus kloone valmis esimeseks koristamiseks. Koristatakse talvel kui lehed on langenud, et oleks kergem kuivatada ja transportida, ning nii ei vii lämmastikku põllult ära. Vitste

veesisaldus on koristamisel 50-55%, kui kuivatada vaaludes, võib veesisaldus väheneda 20-25%-ni. Üks istandus on kasutatav 20-30 a.

Energiabilanss 4-a tsükli korral hektari kohta.

	Energiakulu, MWh	Energiasaak, MWh
istanduse rajamine	1.0	48t kuivainet = 216 MWh
väetised	4.0	
koristamine ja hakkimine	7.3	
transport 20km	1.4	
Kokku	13.7	216

Kulutuste struktuur

istanduse rajamine	23%
väetamine ja hooldamine	21%
transport ja hakkimine	28%
koristamine	28%

Pajulodu toimib ka reovete puhastina, niisuguseid katseid tehakse Põlvamaal.

Veel kiirem on süsiniku ringkäik põhu ja energiaheina kasutamisel kütteks. Energiaheina saak (MWh/ha·a) on ~1.5 korda väiksem kui pajuvõsal.

9 Päikese-energia

Päikeselt tuleb energia Maale EM-kiirgusena. Päikese spekter vastab enamvähem 6000°K musta keha kiirgusele.

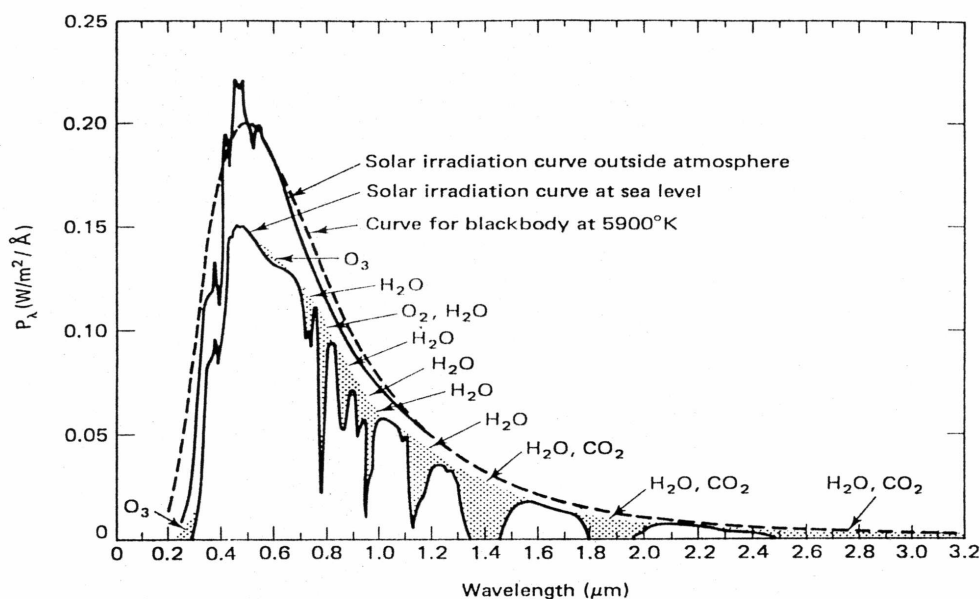


FIGURE 5-2. Spectral distribution curves related to the sun; shaded areas indicate absorption, at sea level, due to the atmospheric constituents shown. [From Valley (ed.), Air Force Cambridge Research Laboratories, *Handbook of Geophysics and Space Environment*, published by McGraw-Hill Book Company, 1965 [51].]

Atmosfääriväline vootihedus on 1365 W/m^2 . Atmosfääriväline kiirgusvoog on määratud Maa orbiidi parameetritega ja koha geograafilise laiussega. Kiirgusvoog maapinnal oleneb lisaks veel atmosfääri läbi-
paistvusest, pilvisusest ja maapinna kaldest. Tõravere Aktinomeetriaamas mõõdetud kiirgusbilansi
komponentide aastane käik iseloomustab meie kiirgusenergia ressursi.

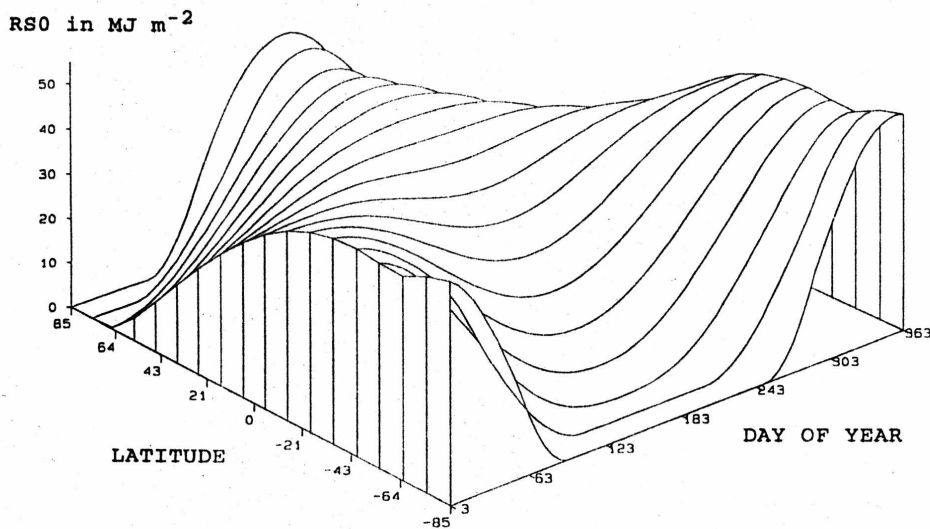
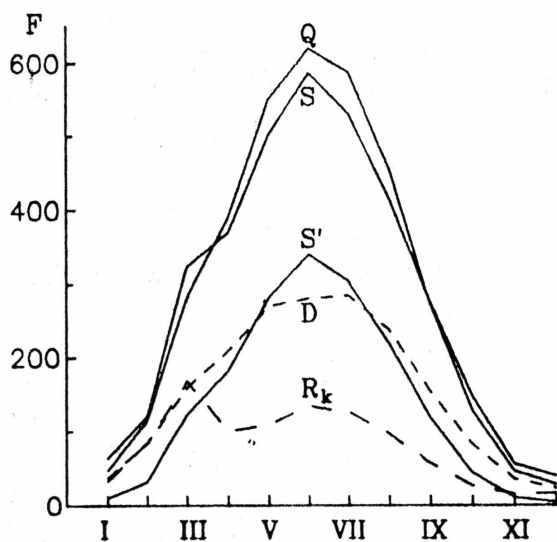


Figure 2. Daily extraterrestrial solar irradiation on a horizontal plane R_{s0} for different latitudes and for all the year.



Joonis 3. Kiirgusbilansi komponentide keskmiste kuusummade (MJ/m^2) aastane käik.

Figure 3. The annual courses of mean monthly values of the radiation budget components (MJ/m^2).

Kõige lihtsam on päikese kiirgusenergiat kasutada soojendamiseks:

- veepaak päikese käes
- kasvuhuone ja kasvu-lava
- soojapüüdev ehitus
- lamedad kollektorid – mustaks värvitud plekkradiaator klaaskasti põhjas
- selektiivsed pinnad omakiirguse vähendamiseks
 - sadestatud tsink
 - must nikkel
 - must kroom
 - mikrokonarustega pind
 - niisuguste pindade optilise diapasooni neelamiskoeffitsiendi suhe kiirguskoeffitsienti
 - soojuskiirguse piirkonnas võib ulatuda kümneni
- keerulisema konstruktsiooniga kollektorid - vaakumkollektorid ja jälgimisseadmetega peeglid.

On ehitatud päikeseahje, milles võib saavutada temperatuuri 3000°C ja rohkem. Prantsusmaal ehitati 1 MW päikeseahi. Sel viisil saab ehitada tavalise auruturbiiniga elektrijaama, kus katelt soojendatakse peeglitega kontsentreeritud päikesekiirgusega.

Saabuv päikesekiirgus on väikese energiatihedusega, seetõttu sobib ta kõige paremini olme-soojusallikaks. Temperatuuri tõustes väheneb järsult lihtsate kollektorite kasutegur. Lihtsad kollektorid sobivad ruumide kütteks ja sooja vee saamiseks.

Teisalt, kui päike paistab, siis polegi sageli vaja kütta, pigem jahutada. Siis langeb energia saabumise kõrgaeg kokku energia vajaduse kõrgajaga. Kõige lihtsamini on päikese-konditsioneerseadmed reaaliseeritavad kasutades absorptsioon-tüüpi külmutusagregaatide.

Päikeseenergia kasutamise kütteks teeb keeruliseks vajadus sooja koguda ja hoida. Akumulaatoriteks saavad olla suure soojusmahtuvusega ehituskonstruktsioonid, veepaagid, tiigid. Siis on enamasti vaja kasutada soojuspumpasid.

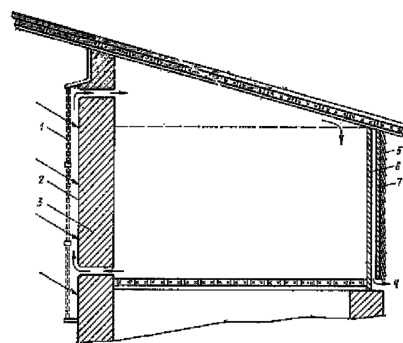
Lõunamaades kasutatakse päikeseenergiat vee magesdamiseks.

Päikese-energeetika seadmete kasutegur

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

T_1 – allika temperatuur, °K T_2 – jahutaja temperatuur

Lihtsates vesoojenduskollektorites on temperatuuride vahe väike, $T_2/T_1 \approx 1$, $\eta = 5\%$, vakumeeritud kollektoril kuni 10-12%.



Fotoelektrilised seadmed

Selle sajandi keskpaigani ei ületanud fotoelektriliste seadmete kasutegur 1%. 1990. aastaks oli ränikristallil fotoelementide kasutegur 28% ja gallium-arseniidi kristallidel 35%.

Ränikristallil fotoelemendi kaod

$h\nu < E_g$	23%
$h\nu - E_g, h\nu > E_g$	33%
peegeldumine pinnalt	1%
kvantsaagis	0.4%
piiratud kontaktide pindala esiküljel	3%
potentsiaali kadu $eV_B < E_g$	20%
– iga neeldunud foton tekitab elektron-auk paari potentsiaalivahega E_g/e , aga ainult osa V_B osaleb välise EMJ tekitamises	
volt-amperkarakteristikust tingitud kaod	~10%

Väiksema kasuteguriga pooljuhtkiled ($\eta \approx 16\%$) on masstootmises odavad, vajaliku aktiivaine hulk on väga väike. Kasutavad suuremat spektri-vahemikku (mitmekihilised kiled, millest iga kiht kasutab ära erineva spektripiirkonna). Amorfse räni baasil fotoelemendid moodustasid 1990.a. 40% kogu fotoelementide toodangust, see oli 1990. a. 40 MW. Elektrienergia hind on ~5 korda kõrgem tavalisest, aga hind langeb väga kiiresti:

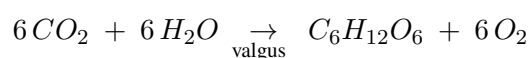
	1kWh hind
1970	60\$
1980	1\$
1990	20-30C
	1 W hind
1974	100\$
1984	1\$

Seni on fotoelektriliste seadmete peamiseks kasutuskohaks kosmoseaparatuur, signalisatsiooniseadmed merel, liiklusemärgid, ilmajaamad raskestilipäasetavates kohtades. Üha rohkem kasutavad fotoelemente väikese võimsusega laiatarbekaupad – kellad, kalkulaatorid.

Päikeseenergia akumulereerimise vajadus on tingitud sellest, et energia vajadus ja energia saabumine ei lange ajas kokku. Akumuleerimisvajadust saab vähendada kombineeritud energiaallikate kasutamisega, Eestis näiteks täiendavad tuul ja päikese kiirgus üsna hästi teineteist. Elektri akumulaatorid on väga kallid ja ei õigusta ennast energeetikaseadmetes. Soojaakumulaatoritena on kasutatavad suure erisoojusega ained - vesi, liitium. Soojaakumulaatorid:

- ehituskonstruksioonid
- päikesetiigid
- liitium – väga kallis.

Päikese- ja tuuleenergia lünki võib täita fossiilsel kütusel töötavate energiaseadmetega, kõige mobiilsemad/reguleeritavad on gaasikütel seadmed. Looduslik päikeseenergia akumulaator on roheline taim. Footoni energia salvestatakse keemilise energiana



Kasutegur on küll üsna väike ~3-4%, aga biomass on ökoloogiliselt puhas toore. Biomassis on süsiniku ringkäigu periood väike. Otsene põletamine ei sobi suurtes energiaseadmetes väikese energiatiheduse tõttu, seepärast on otstarbekas gasifitseerida (pürolüüs, käärimine).

Puhas ja ilmselt perspektiivne päikeseenergia akumulaator on vesinik. Vesinik on puhas kütus, aga suhteliselt raskesti käsiteldav. Vesinik-kütteelement muundab keemilise energia vahetult elektrienergiaks ilma katla ja aurugeneraatorita, kasutegur võib küündida 50-60%-ni. Kütteelement töötab nagu taskulambi patarei, muundades keemilise energia elektrienergiaks. Erinevuseks on, et kütteelemendis täiendatakse aktiivsete ainete varusid pidevalt.

10 Energia tootmine maailmas

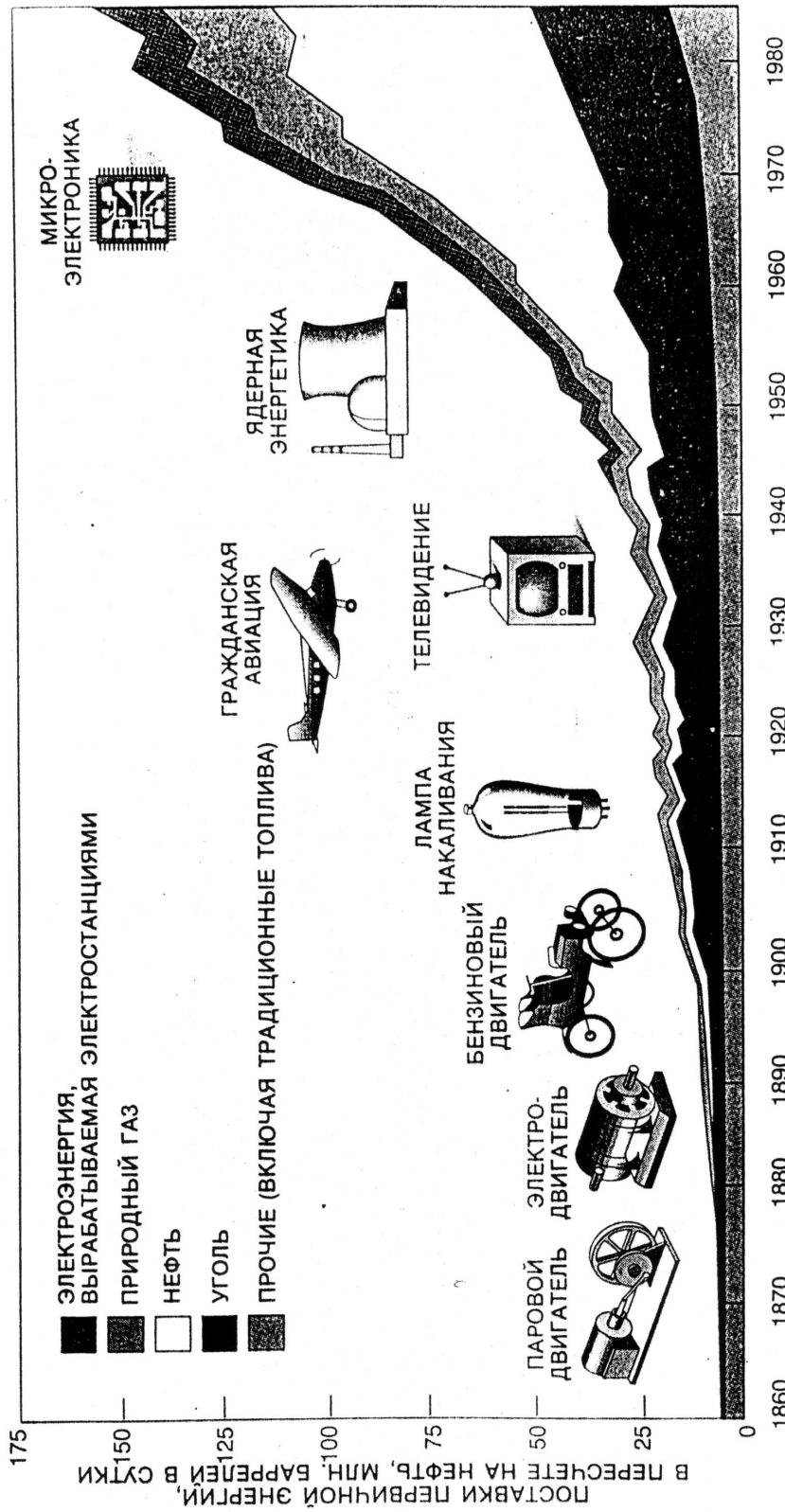
Kuni möödunud sajandi alguseni kasutati ainult kohalikke kütuseid toidu valmistamiseks ja eluruumide kütteks. Aurumasina leiutamise järel 1769 algas kütuse tarbimine mehaanilise energia saamiseks. Aurumasinate laialdane levik 19. sajandi teisel poolel tööstuses ja transpordis (vedurid, laevad) viis vajaduseni võtta kasutusele fossiilsed kütused – ennekõige kivisüsi. Kivisüsi domineeris esmase energiaallikana 1960-ndate aastateni, 1920. a. – 70%. Möödunud sajandi lõpukümnenditel oli juba ohtrasti kasutusel ka looduslik gaas – peamiselt linnade valgustusel. Nafta hakkas domineerima II Maailmasõja ajal ja pärast sõda mootorkütusena. 1970-ndate aastate alguses jõudis nafta tarbimises esikohale, praegu moodustab ~40% maailma energiabilansis. 1957 võeti kasutusele tuumaenergia – Obninsk, NSVL ja Shippingport, USA. Tuumareaktorite arv kasvas üsna kiiresti kuni 1979. a. Three Mile Island'i reaktoriavariini.

Rahvaarv ja energiatarvitus maailmas

	1890	1910	1930	1950	1970	1990
Rahvaarv miljardit inim.	1.49	1.70	2.02	2.51	3.62	5.32
Traditsioonil. kütused, kW/elanik	0.35	0.30	0.28	0.27	0.27	0.28
Tööstuslikud energiaallikad, kW/elanik	0.32	0.64	0.85	1.03	2.04	2.30
Globaalne energiatarvitus, TW/a	1.00	1.60	2.28	3.26	8.36	13.73
Summaarne tööstuslik energiatarve, TW·a	10	26	54	97	196	393

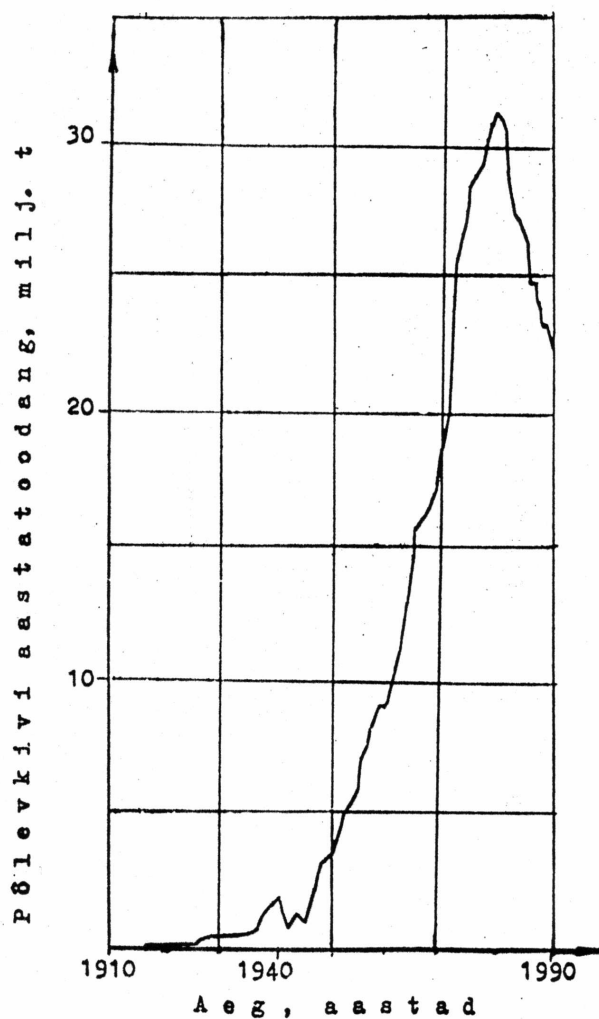
Energia tootmine Eestis.

19. sajandi alguses hakati rajama turbakarjääre. 1880. a. toodeti 300 karjääris kokku 5900 t turvast. Kukruse põlevkivikaevandus hakkas tööle 1876. a. Tööstusliku kütteinena võeti põlevkivi kasutusele 1919. a.



ТЕМПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ первичных форм энергии и относительный вклад различных энергоресурсов отражают развитие техники, а также рост численности населения. Быстрое увеличение объемов добычи нефти после второй мировой войны, например, отражает бурное развитие транспорта и промышленности. Точно так же рост производства электроэнергии в конце 60-х годов сопровождался расширением сектора услуг в структуре экономики. Хо-

тя ископаемое топливо пока еще доминирует в перечне первичных источников энергии, самая большая доля потребления из всех видов топлива приходилась в 1920 г. на уголь и составляла 70%; на нефть такая доля приходилась в начале 70-х годов и составляла 40%. Ожидается, что в дальнейшем для удовлетворения мировых энергетических потребностей будет увеличиваться потребление природного газа, который меньше загрязняет окружающую среду.



Joon. 1. Eesti põlevkivi aastatoodangute graafik.

Kütuste tootmine ja kasutamine Eestis, tuh. t.

	1950	1960	1970	1980	1984	1993
põlevkivi	3500	9200	18900	31300	27400	16471
kütteturvas	470	467	972	918	652	306
turbabrikett	55	100	299	298	220	106
tehisgaas, mln. m ³	173	433	581	453	265	
maagaas						401
kivisüsi						121
masuut						734
küttepetrool						47
põlevkiviõli						180
diislikütus						287
bensiin						142
vedelgaas						7.8
küttepuud, tuh. tm						281
puiduhake						123

Elektri tootmine Eestis, mln. kWh

1950	1960	1970	1980	1984	1994
435	1950	11575	18898	18339	9000

Eesti elektrijaamade võimsus

Narva hüdrojaam	1957	125 MW	
Balti SEJ	1966	1624 MW (1390 MW?)	8x100 MW 4x200 MW 2x12 MW
Eesti Elektri jaam	1973	1610 MW	7x200 MW 1x210 MW
Iru SEJ		460 MW	3x120 MW 1x100 MW

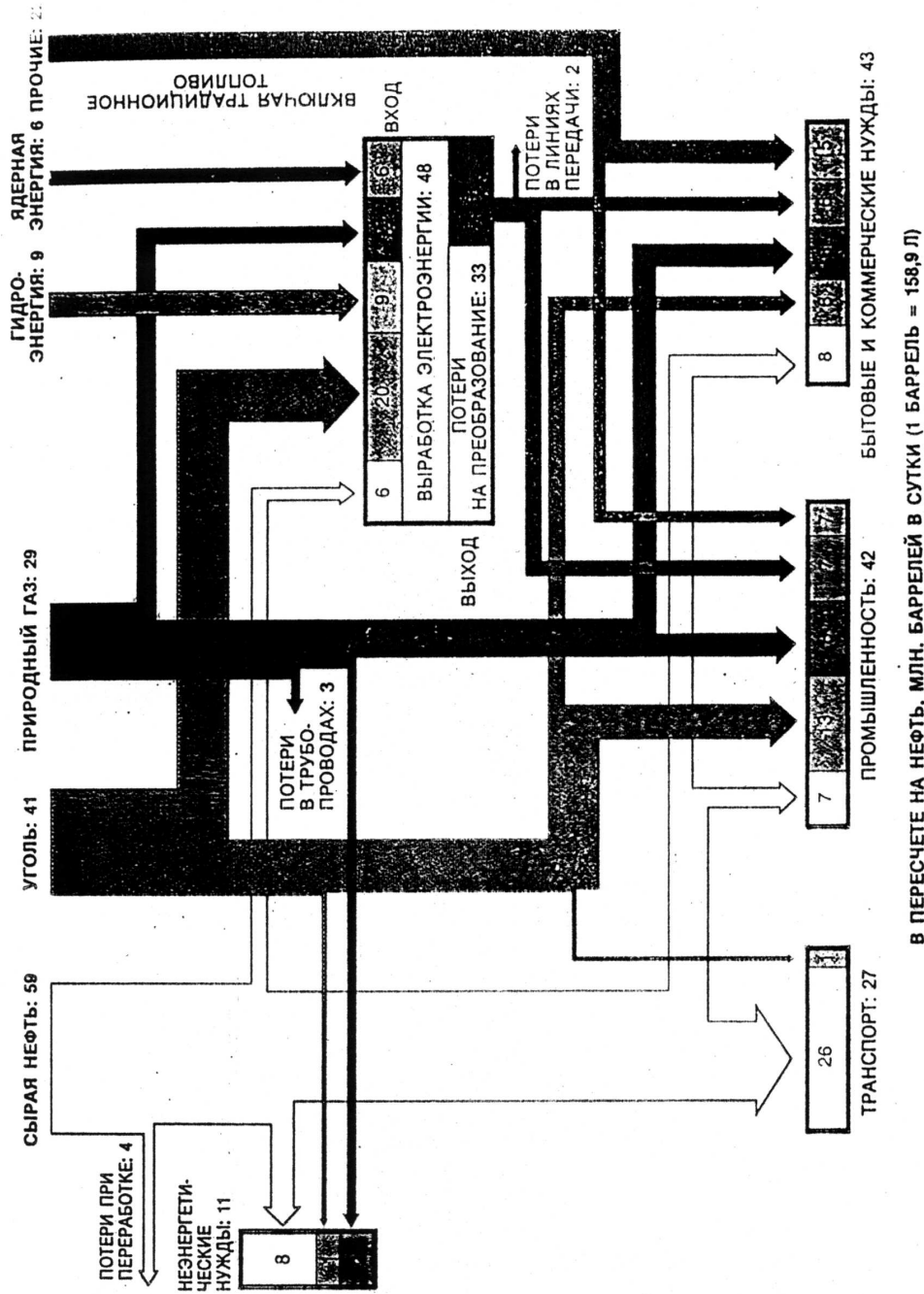
11 Energia kasutamine maailmas

Energia kasutamine maailmas varieerub suurtes piirides nii koguste kui tarbimisstruktuuri poolest. Peamised tarbimist kujundavad faktorid on

- maa arengutase
- maa geograafiline laius
- energiaallikate olemasolu

Primaarse energia kasutamine Eestis 1990. a.

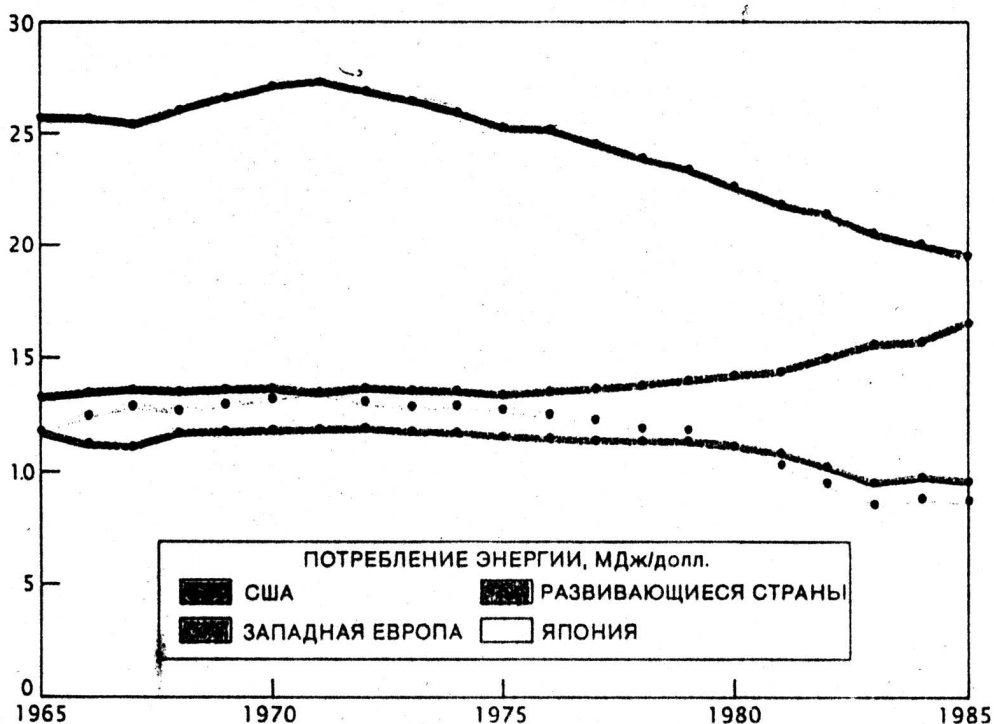
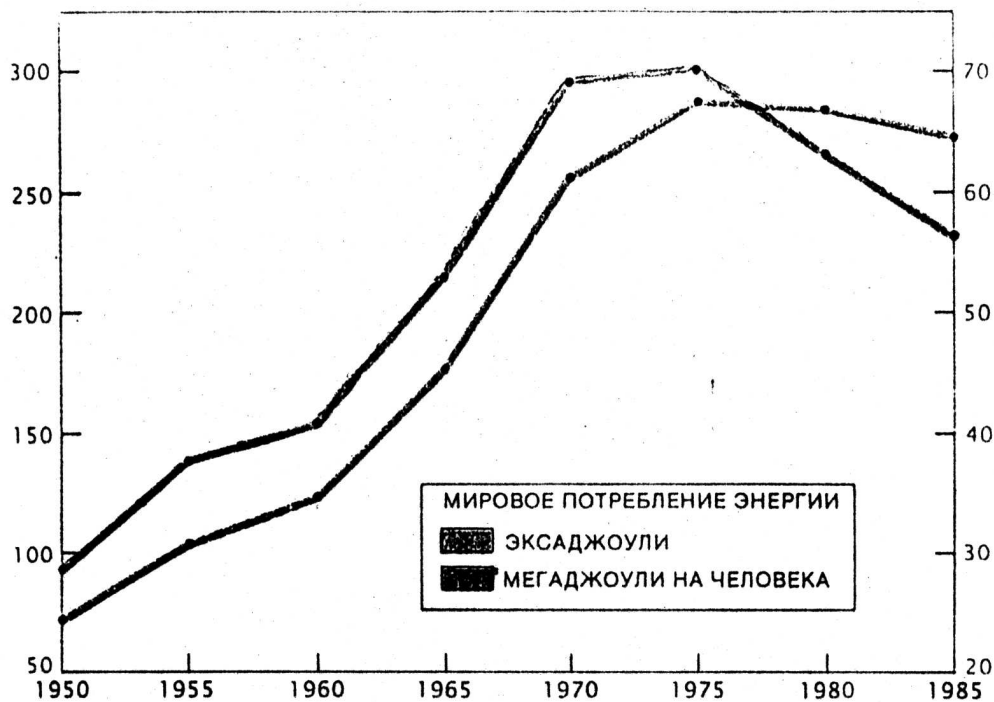
elektri tootmine	54.1%	10%	omatarve
		6.4%	kaod liinides
		43%	'müüdi'
		22%	tööstus
		10%	põllumajandus
		9%	olme, sotsiaalsfäär
tööstus	21%		
põllumajandus	6.8%		
transport	11.6%		
muu	6.5%		



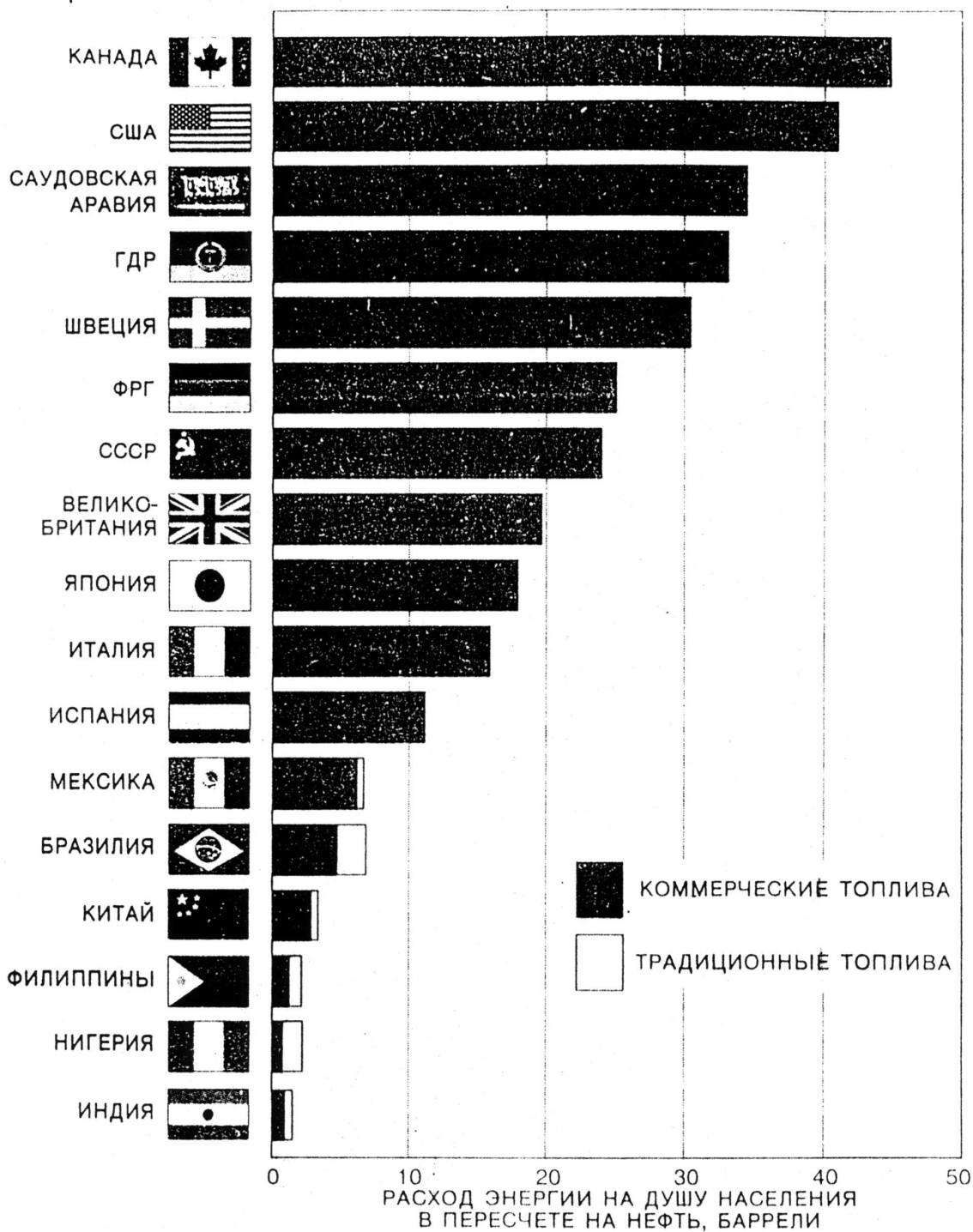
В ПЕРЕСЧЕТЕ НА НЕФТЬ, МЛН. БАРРЕЛЕЙ В СУТКИ (1 БАРРЕЛЬ = 158,9 Л)

МИРОВЫЕ ПОТОКИ ЭНЕРГИИ по состоянию на 1985 г. показывают, что различные виды ископаемого топлива находят широкое применение. Сырая нефть (желтый цвет) очищается на нефтеперерабатывающих заводах, где из нее получают бензин, дизельное горючее и керосин, используемые для транспорта. И нефть, и природный газ (красный) широко используются в промышленности, а также для обогрева жилых и служебных зданий; для производства электрoэнергии эти виды топлива используются в относительно небольших количествах. Большая часть добываемого в мире угля (бледно-серый) идет на нужды промышленности и для производства электрoэнергии. Гидроэнергия, ядерная энергия и другие ее виды (биомасса, солнечное излучение и ветер) составляют 22% в общем объеме первичной энергии. (Цифры приведены в миллионах нефтяных баррелей; 1 баррель = 159 л; 7 баррелей = 1 т.)

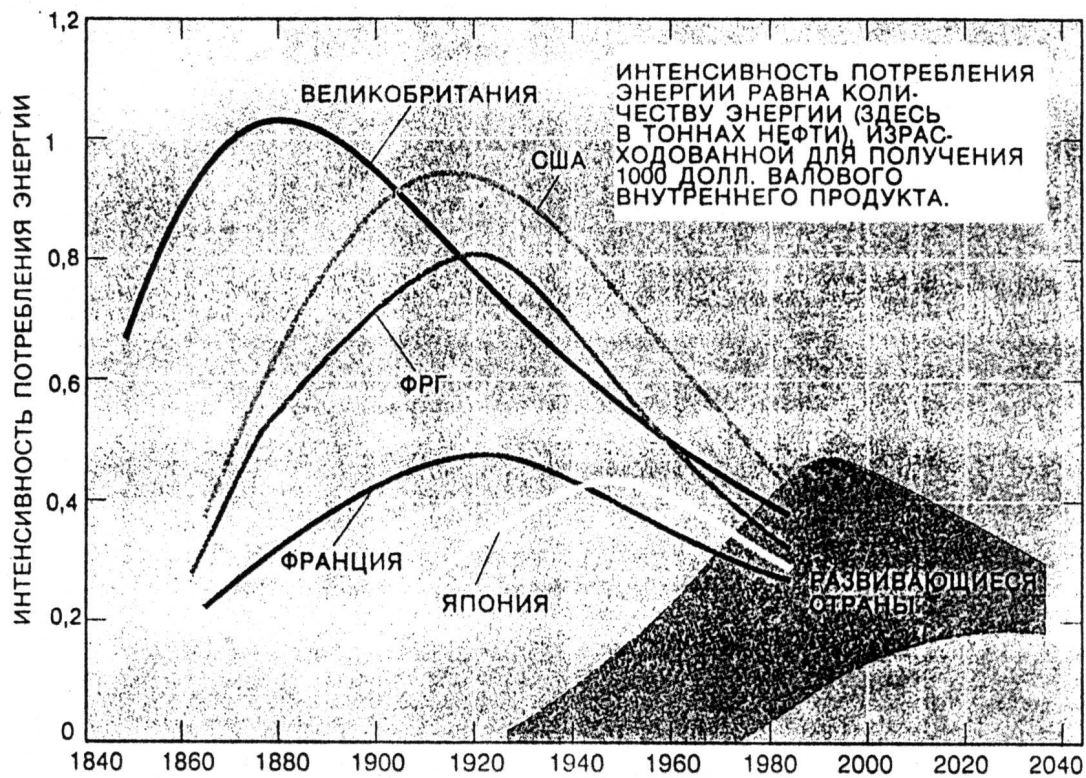
Эта диаграмма иллюстрирует глобальные потоки энергии в 1985 году. Она показывает, как различные виды ископаемого топлива (угль, нефть, газ) и возобновляемые источники (гидроэнергия, ядерная энергия) используются для производства электроэнергии и для различных промышленных и бытовых нужд. Также показаны потери энергии на различных этапах: при переработке, в трубопроводах, при передаче и в процессе преобразования.



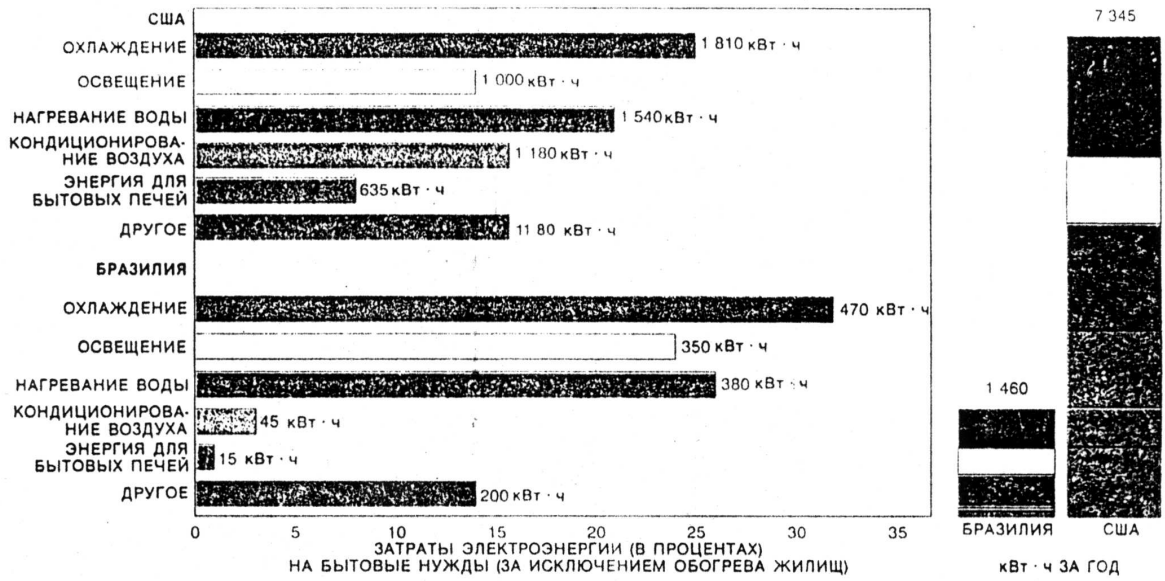
МИРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ (вверху) с 1950 по 1985 г. (синяя линия). Красная кривая отражает мировое потребление энергии на душу населения. На нижнем графике приведено изменение интенсивности энергопотребления (объем потребленной энергии, деленный на величину валового национального продукта) в различных регионах в ценах (долларах) 1985 г. В развивающихся странах рост интенсивности может быть связан с ростом численности населения и увеличением темпов экономического развития. Хотя в США интенсивность снижалась за счет обеспечения экономического роста без повышения энергопотребления, они все же отстают по этому показателю от Европы и Японии.



ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ на душу населения в различных странах сильно колеблется. В США и Канаде оно наибольшее: в 1988 г. на каждого жителя в этих странах потребление энергоресурсов в пересчете на нефть составляло 40 баррелей (6,6 т). В то же время на каждого жителя Нигерии потребление в пересчете на нефть в том же году составляло лишь 2 барреля (~ 0,3 т), в основном в виде традиционного топлива. Относительно высокие показатели душевого потребления в СССР и ГДР отражают недостаточную эффективность распределения и использования энергоресурсов в этих странах.

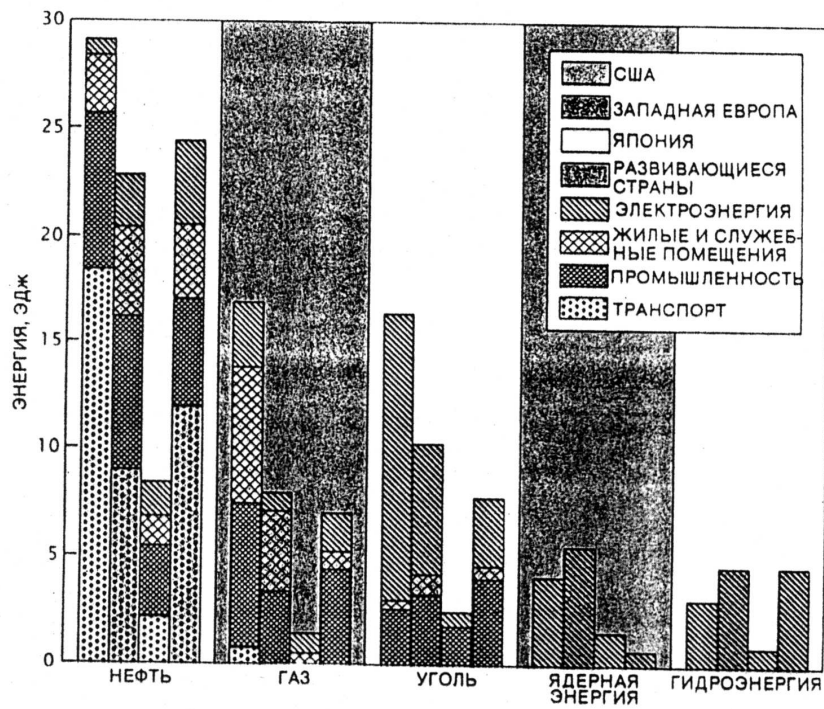


В ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ СТРАНАХ интенсивность потребления энергии (отношение потребляемой энергии к валовому внутреннему продукту) сначала возрастала, затем значительно снизилась. Благодаря достижениям в материаловедении и повышению эффективности использования энергии максимумы интенсивности потребления странами энергии со временем снизились в процессе индустриализации. Развивающиеся страны могут избежать повторения подобной картины за счет более эффективного использования энергии.



В развивающихся странах богатые стремятся следовать образу жизни и нормам потребления энергии, принятым в промышленно развитых странах. Например, в элект-

рифицированных домах Бразилии и США картины потребления электроэнергии примерно одинаковы, хотя в абсолютном выражении они резко отличаются друг от друга.



ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ в разных странах различны, но в большинстве стран производство энергии не обходится без использования ископаемых топлив. Одна только транспортная система США поглощает столько нефти, сколько требуется для удовлетворения всех энергетических потребностей Японии. В развивающихся странах подавляющая доля производимой энергии потребляется промышленностью.

Tuntud varusid jätkub

süsi	1500 a?, 275 a.
nafta	30 a.
gaas	20 a.
uraan 235	100 a.
uraan 238	jätkub kauem, kasutatakse breederites, reaktsiooni tulemusel tekib plutoonium, millest saab teha tuumapommi.

Energia varud Eestis

Põlevkivi	varu	$8 \cdot 10^9$ t
	kasutamiskõlblik	3.2
	kasutatud	1.5
	toodetakse praegu	$16.5 \cdot 10^6$ t/a

1990. a. hinnang oli, et varusid jätkub 25 aastaks, praeguseks on toodang kahanenud umbes 2 korda.

Turvas	varu	$2 \cdot 10^9$ t
	toodetakse	$0.4 \cdot 10^6$ t/a

Puit	tagavara	275 miljonit tm
	juurdekasv	9.03 milj.tm/a
	kütteks	0.4 milj.tm/a

Hüdroenergia

Energeetiline potentsiaal on 20-25 MW, sellest pool Narva jõel Omuti kohal, ülejäänud hajutatud, potentsiaalsed võimsused 50-1000 kW.

Tuuleenergia

Saartel ja rannikul on tuuleenergia potentsiaal $3\text{MW}/\text{km}^2$, kogu vabariigi potentsiaali on hinnatud 4-5 TWh/a.

Biomass

Viimase 20-25 a. jooksul võsastunud 200000 ha põllumaad võiks anda umbes 15% toodetavast energiast (1990. a. hinnang). Metanool võib asendada bensiini.

Päikeseenergia

Eestis karjäärade all olevale pinnale langeb aasta jooksul sama palju Päikese kiirgusenergiat, kui toodavad elektri jaamad.

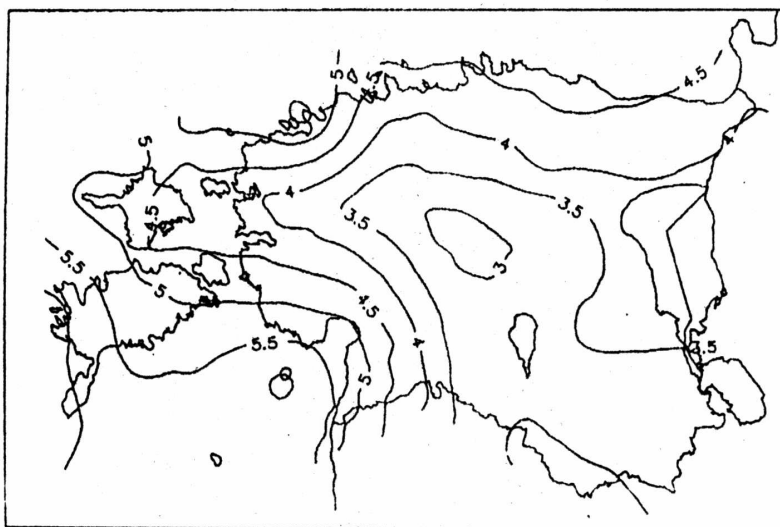
13 Energia tootmise trendid ja perspektiivid

Fossiilsete kütuste põletamisest tingitud süsihappegaasi kasv atmosfääris ja sellega kaasnedavad kliimamuutused ning fossiilsete kütuste tagavarade ammendumine on sundinud otsima teisi võimalusi. Tuumajaamad paistsid olevat väljapääs energiakriisist. AEJ on ökoloogiliselt puhtam ja inimohvreid vähem kuni see töötab korralikult. Tuumareaktorite arv kasvas kiiresti kuni 1979. a. Three Mile Islandi reaktoriavariini. Kuigi Three Mile Islandil ei kaasnenud reaktori purunemisega ulatuslikku radioaktiivset saastumist, tegi see avariid kogu maailma, välja arvatud NSVL, tuumajaamade suhtes ettevaatlikuks. Ühe Tšornobõli reaktori täielik purunemine on võrdne 10 MT pommi plahvatusega. Tšornobõlis pääses välja 4% radioaktiivseid aineid. See läks maksma ~1000 rbl. täiskavanud NSVL elaniku kohta (umbes 5 kuu keskmine töötasu). Aegade jooksul on purunenud kolm tuumareaktorit: 1957 Windscale'is Inglismaal, 1979 Three Mile Islandil USA-s, 1986 Tšornobõlis, 1957 plahvatas radioaktiivsete jäätmete hoidla Kõštõmis Sverdlovski oblastis.

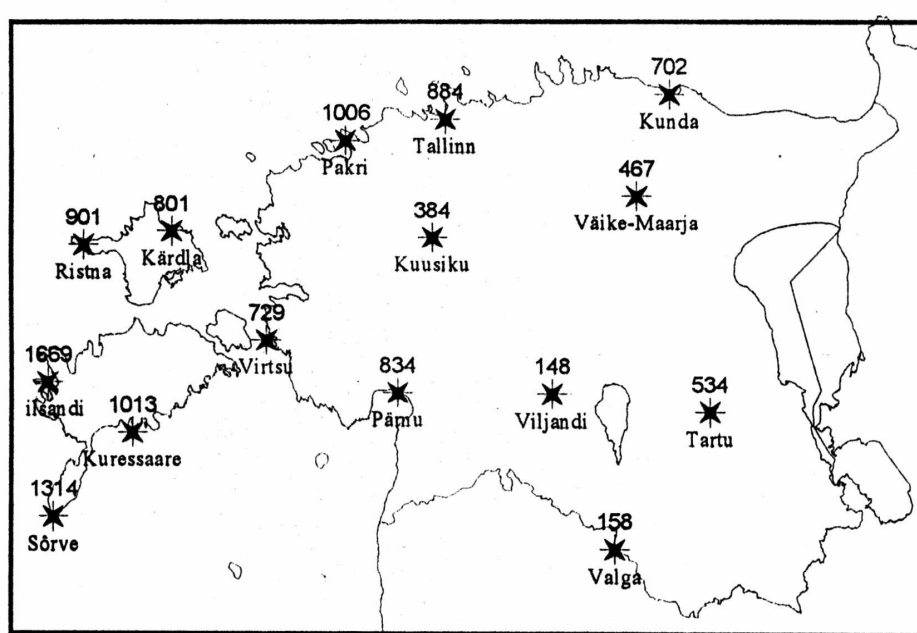
1990. a. andsid tuumajaamad ~12% Maal toodetavast energiast, 1989. a. 16% elektrist. Tuumajaamu on palju Kanadas, umbes pool toodetavast elektrist on seal tuumaelekter, Prantsusmaal ja Belgias 70%, USA-s 20%. Põhjused selleks on erinevad. Neis maades on tavaliste energiaallikate nappus. Ka on energeetika kallis ja suure kapitalimahuga, kord valitud teelt on raske lahkuda. Suurenenud ohutus- ja kekkonnakaitse nõuete tõttu kasvasid AEJ ehituskulud 1970-1990 kuus korda, 1990. a. oli maksumus 4000 \$/kW, ja on mitu korda kõrgemad kui tavalistel elektrijaamadel. Ka AEJ eksploatatsioonikulud on pidevalt kasvanud. USA 110 AEJ eksploatatsioonikulud ületasid 1987. a. tavaliste elektrijaamade omad. AEJ toodab radioaktiivseid jäätmeid, mille aktiivsus on 10^4 korda suurem kui reaktorisse laetaval kütusel. Jäätmete tööstuslikule matmisele on seni asunud ainult Prantsusmaa ja SLV, kõik teised kasutavad ajutisi eksperimentaallahendusi. Jäätmed maetakse kas kivisoola- või graniidilademettesse. Ärakasutatud tuumkütust ei saa lihtsalt maha matta, ta vajab mitme aasta kestel jahutamist ja eralduvate gaaside kogumist. Tuumaelektrijaamas toodetakse elektrit auruturbiinide vahendusel nagu tavalises elektrijaamas, selle kasutegur ei ületa 33%. Seega on AEJ suure saastusohu allikas. Eesti põlevkivi- jaamade kasutegur on 28%, s.t. et niisugused hinnad, et elektriküte on kõige odavam küte, ei saa püsida kaua – tavalise pottkiviahju kasutegur sooja tootjana on ~70%. Lennuki reaktiivmootori turbiini põhimõttel töötava gaasiturbiini kasutegur võib olla kuni 45%.

USA-s annavad Päike, tuul ja vesi 9% energiast. Taanis katab tuuleenergia 2% energiavajadusest. California tuultefarmis kahanes aastail 1982-87 elektri omahind 78-lt sendilt 6-le, Taanis läks tuuleelekter 10 a. jooksul 3 korda odavamaks ja ületas 1989. a. isetasuvuse läve. Sajandi lõpuks plaanivad mitmed Lääne-Euroopa riigid toota 10-15% elektrist tuulegeneraatoritega.

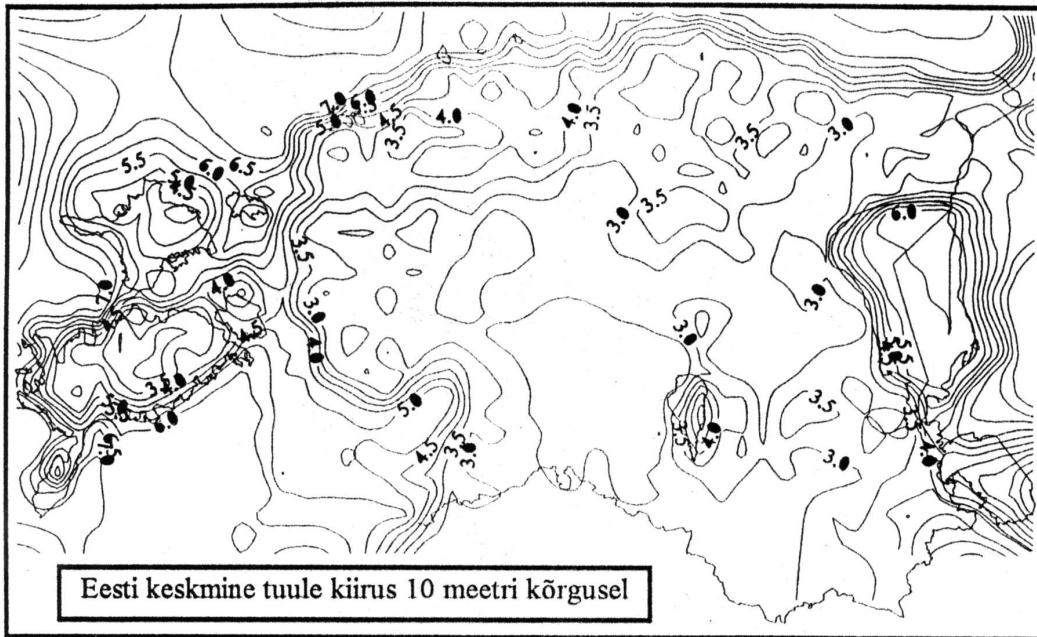
Aasta keskmine tuule kiirus



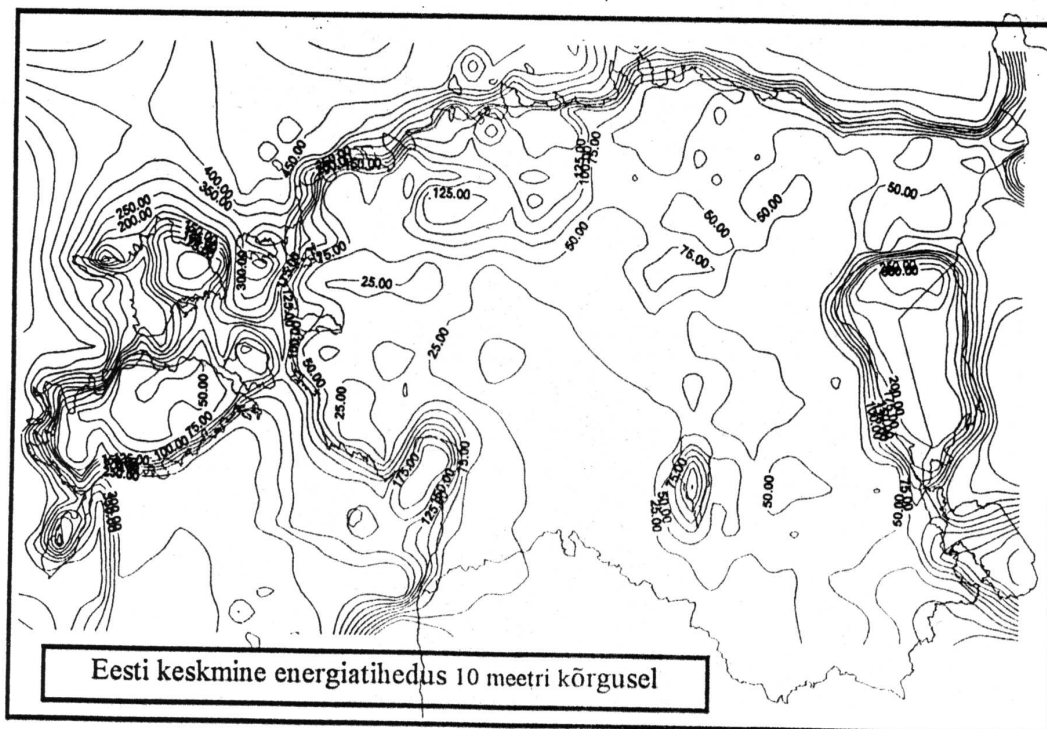
Joonis 1.1: Eesti aasta keskmine tuule kiirus. Kull, 1993.



Joonis 4.3. 450 kW võimsusega tuuleturbiini potentsiaalne aastane elektrienergia toodang (MWh/a).



Joonis 3.1. Aasta keskmine tuule kiirus Eestis.



Joonis 4.1. Tuule keskmine energiatihedus ($W7m^2$) 10 meetri kõrgusel Eestis.

DIE STRAHLENWOLKE ÜBER DER NORDHALBKUGEL

Die Ausbreitung der radioaktiv verseuchten
Luftmassen in den ersten zehn Tagen nach
dem Tschernobyl-Reaktorunglück vom
26. April (Rekonstruktion des amerikani-

schon Atomforschungszentrums Lawrence
Livermore Laboratory in Zusammenarbeit
mit dem Wetterdienst der U.S. Air Force).



27. April 1986



28. April



29. April



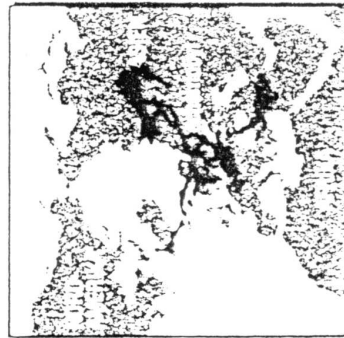
30. April



1. Mai



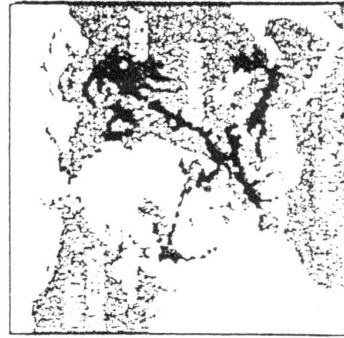
2. Mai



3. Mai



4. Mai



5. Mai



6. Mai

Kirjandus

Energy in Estonia, Latvia, Lithuania. Energy Efficiency and Transfer Technology, Tallinn, 1991, 40 p.

Hoffmann, V. Energie aus Sonne, Wind und Meer, BSB B.G.Teubner, Leipzig, 1990, 155 S.

Kull, A. Eesti tuuleenergia atlase andmestiku moodustamine ja selle territoriaalse muutlikkuse analüüs. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geograafia Instituut, Tartu 1995. 75 lk.

McVeigh, J.C. Energy around the World. An Introduction to Energy Studies. Global Resources, Needs, Utilization, Pergamon, Oxford, 1984, 253 p.

National Geographic, 1981, Special Report: February, 115 p.

Мак-Вейг Д. Применение солнечной энергии, М., Энергоиздат, 1981. 212 с.

Руссак В. Радиационный режим в Тыравере, Препринт А-7 (1987). Таллин, 1987. 52 с.

Соуффер С., Заборски О. (Ред.). Биомасса как источник энергии. М., Мир, 1985. 375 с.

Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии, М., Энергоатомиздат, 1990. 391 с.

Ярас Л., Хоффман Л., Ярас А., Обермайер Г. Энергия ветра. Оценка технического и экономического потенциала, М., Мир, 1982. 256 с.