

A. LITVIN

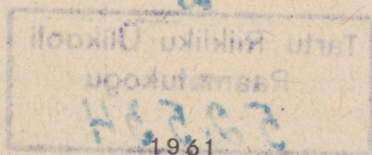


SOOJUS-
ENERGEETIKA
ALUSED

A-23838 III

A. LITVIN

SOOJUSENERGEETIKA ALUSED



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN

6T2
L65

Originaali tiitel:

А. М. Литвин
ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Издание шестое, переработанное и дополненное
Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1958

Tõlkinud H. Märtson

Kunstiliselt kujundanud R. Roos

Raamatus on toodud lühike kokkuvõte soojusenergeetika alustest.

Sissejuhatavas osas kirjeldatakse nõukogude energeetika arenemisteid ja selle erilisi põhijooni.

Raamatus antakse soojusenergeetika teoreetiliste aluste elementaarne kirjeldus — vaadeldakse termodünaamika põhiseadusi ja soojusülekande küsimusi. Suuremat tähelepanu on pühendatud soojusjõuseadmete kirjeldusele ja nende töötamisele ning kütuste põletamise ja vee ettevalmistuse küsimustele. Viimases peatükis vaadeldakse elektri jaama tööd tervikuna ja sidet energiasüsteemiga; küllaldaselt on mahtu jäetud ökonoomikaküsimustele.

Raamat on mõeldud õppevahendiks elektri jaamade töötajate ja kesktehnolise personali (brigadirid, meistrid) ning tööstusettevõtete energiatsehhi mehaanikute ettevalmistamisel.

Raamatu kirjeldavat ja osaliselt ka arvutuslikku osa võib kasutada õppeasutustes, kus soojustehnika kursuse jaoks on eraldatud väiksem arv tunde.

Retsenseerinud I. Mikk



ARHIIVKOGU

EESSONA VIIENDALE TRÜKILE

Õpperaamatut «Soojusenergeetika alused» on alates 1941. aastast antud välja neli trükki, millest viimane ilmus 1949. Ajavahemikus 1951—1953 tõlgiti ja kirjastati seda raamatut mitmetes rahvademokraatiamaades. Raamatu laialdane kasutamine tõendab kahtlematult vajadust õpiku järele, mis elementaarsel kujul käsitleks soojusenergeetika teooriat ja praktikat, sest soojusenergeetika kujutab enesest üht tähtsamat rahvamajanduse haru.

Muudatused, mis toimusid kirjeldatud perioodil soojuslektrijaamade kaadrite ettevalmistamise organiseerimises ja nende personalile esitatavates nõudmistes, samuti ka NSVL lektrijaamades lektrienergia tootmises, sundisid autorit vastavalt toimetuse ettepanekule tunduvalt raamatu sisu muutma. Kõigepealt, arvestades lektrijaamade õppekombinaatide kursustest osavõtjate teadmiste üldist tõusu, lubas autor enesele õiguse jätta raamatust välja üldteaduse harude — matemaatika, mehaanika, keemia — põhi- aluste kirjelduse; sellesse osasse on jäetud ainult see, mis on vahetult seotud esitatava teemaga ja ilma milleta oleks rikutud kirjelduse seost. Teiselt poolt on igal lektrijaama töötajal lektrienergia saamise tehnoloogilise protsessi täpseks mõistmiseks oma tööloigu osas vaja teada ka seda, kuidas toimub see protsess naaberosakonnas ja üldse kogu lektrijaamas. See sundis autorit tunduvalt täpsemalt kirjeldama lektrijaama soojusliku osa põhilise sisseseade tööd.

Arvestades asjaolu, et see raamat on algõpikuks, annab autor nõukogude energeetika arengut käsitledes ka vaadeldavasse teadusalasse kuuluvate seaduste olemused ja mõisted. Seejärel tuuakse materjale, mis puudutavad lektrijaama põhiseadmete tööd, ning järgnevalt kirjeldatakse energiasüsteemi lühidal kujul üldiselt.

Loendatud muudatused võimaldasid raamatu materjali paigutada teisiti, kui see oli eelmistes väljaannetes. Raamatu ülesehitus läheneb siin soojustehnika üldkursusele.

Teema lai haaramine, eriti selle elementaarsel kujul, tegi ülesande autorile eriti raskeks. Seepärast oleksid arvamused, eriti isikutelt, kes raamatut kasutavad õppevahendina, autorile väga kasulikud.

Nagu eelmiseski trükkis, on see raamat määratud õppevahendiks töölistkaadri ja kesktehnilise personali (brigadiride, meistrite) ettevalmistuseks.

Autori arvates võiks raamat olla õppevahendiks nii üldise soojustehnika alal kui ka kõigi tööstusharude ettevõtete vabriku-tehase mehaanikute ettevalmistamisel.

Raamatu kirjeldavat ja osaliselt ka arvutuslikku osa võib kasutada tehnilistes õppeasutustes, kus soojustehnika kursuse jaoks on eraldatud vähe õppetunde.

Suurt abi osutas autorile raamatu toimetamisel Üleliidulise soojustehnika instituudi professor, tehniliste teaduste doktor J. M. Rubinstein, kellele autor avaldab sügavat tänu.

Arvamused raamatu kohta palutakse saata aadressil: Tallinn, Pärnu mnt. 10, Eesti Riiklik Kirjastus, tehnilise kirjanduse toimetus.

EESSONA KUUENDALE TRÜKILE

Käesoleva trüki puhul on autor viiendas trükis alustatud ümbertöötamist jätkanud: lühendatud on sissejuhatavat materjali, mis on seotud elektrijaamade kaadri teadmiste üldise taseme tõusuga. Lühendatud on ka raamatu osi, mis kuuluvad erineva kvalifikatsiooniga personali ettevalmistamisele. Ülesannete lahenduste näited on viidud raamatu lõppu. Tehtud parandused ja ümbertöötamine võimaldas vähendada raamatu mahtu, sellele vaatamata, et on tehtud rida täiendusi, mis peegeldavad suurt progressi energeetika alal NSV Liidus perioodil pärast raamatu viienda trüki ilmumist.

Autor väljendab suurt tänu insener S. M. Schucherile käsikirja hoolika toimetamise eest.

Autor

SISSEJUHATUS

Suure Sotsialistliku Oktoobrirevolutsiooni tulemusena kehtestati Venemaal, maakeral ühel kuuendikul, nõukogude võim, kes seadis endale ülesandeks luua uus, kommunistlik ühiskondlik kord. Selle ülesande lahendamiseks natsionaliseeriti tootmisvahendid ja loodi sotsialistlik suurtööstus.

Tööstuse, põllu- ja kommunaalmajanduse ning transpordi areng, töötajate elukondlike tingimuste parandamine ja kultuuritaseme tõstmine — see kõik on seotud suurte energiahulkade tarbimisega.

XVIII sajandi teisel poolel avastas Vene suurim teadlane M. V. Lomonossov looduse põhiseaduse, mida tuntakse energia jäävuse ja muundumise seaduse nime all. See seadus määrab kindlaks, et looduses leiduvaid energiavarusid ei saa hävitada ega neile uusi juurde luua.

On mitmesugust liiki energiat — soojus-, elektri-, valgus-, mehaanilist, keemilist jm. energiat. Energia jäävuse ja muundumise seaduse põhjal võivad üksikud energia liigid ainult ühest liigist teise üle minna, kuid üldine energia hulk jääb muutumatuks.

Rahvamajanduse haru, mis tegeleb looduses laialdase-malt esinevate energialiikide muundamisega niisugusteks energialiikideks, mida kõige enam kasutatakse, nimetatakse **energeetikaks**.

Kõrgemal tehnikal rajaneva sotsialistliku tööstuse pidevaks kasvuks ja täiustamiseks on suurte energiakooste kasutamine vältimatu. Seepärast ongi NSV Liidus metallurgia, kütusetööstuse ja masinaehituse kõrval tähtsamaks tööstusharuks energeetika.

Looduslikke allikaid, milledest ammutatakse energiat

mitmesuguste rahvamajandusharude vajadusteks, nimetatakse energia varudeks.

Energiavarusid liigitatakse järgmiselt:

- a) vee-energia (hüdroenergia);
- b) kütuse keemiline energia;
- c) päikese kiirgusenergia;
- d) tuuleenergia;
- e) aatomienergia.

Vee-energiat kasutatakse juba iidsetest aegadest vesirataste kaitamiseks vee tõstmisel või vesiveskites.

Kaasaegses tehnikas kasutatakse vee-energiat hüdroelektrijaamades (vene k. ГЭС — гидравлическая электрическая станция) elektrienergia saamiseks ja tehnikaharu, mis tegeleb vee-energia kasutamiseega elektrienergia saamiseks, nimetatakse hüdroenergeetikaks.

Veevarude kasutamise tormilist arengut seletab see, et vee-energiat uuendab pidevalt loodus ise; elektrienergia saamine vee-energia arvel ei ole seotud kütuse kuluga, hüdroelektrijaamade ekspluateerimine ei nõua arvukat teenindavat personali ning nende jõujaamade masinad ja aparaadid lasevad end kergesti automatiseerida. Selle kõige tulemusena on hüdroelektrijaamades toodetud elektrienergia 5—7 korda odavam kui kütuse põletamisega saadud elektrienergia. Kuid veevarude rahvamajanduslik tähtsus ei seisa ainult selles. Veevarude olemasolu puhul ei ole vaja ehitada söekaevandusi, raudteetransport vabaneb kütuse vedamisest, luuakse soodsad tingimused palju elektrienergiat vajavate tööstusharude — kõrgekvaliteediliste ja värviliste metallide tootmine, elektrokeemia jt. — arendamiseks.

Meie sotsialistliku plaanimajanduse maal ei ole hüdroelektrijaamade ehitamise eesmärgiks ainult elektrienergia saamine; samaaegselt lahendatakse ka niisutusülesanded, mis on seotud põllumajanduse arendamisega; lahendatakse veetranspordi, veevarustuse, metsaparvetamise jt. küsimusi; teisiti öeldud — veevarude kasutamine NSV Liidus toimub tihedas koostöös kõigi rahvamajandusharudega ja on, nagu öeldakse, kompleksse iseloomuga.

Tsaari-Venemaal hüdroelektrijaamades toodetud elektrienergia osa võrdus peaaegu nulliga. Nõukogude võimu aastail kasvas hüdroelektrijaamade osatähtsus iga-aastase suure elektrienergiatoodangu kasvu juures pidevalt; hüdroelektrijaamades toodetud energiaosa kasvas 1927. a. kuni

1957. aastani 5,7%-lt 18,7%-le. Maale vajalik ülejäänud energia toodeti kütuse varude arvel. Lähema 10—15 aasta jooksul kasvab elektrienergia tootmine hüdroelektrijaamades veelgi, kuid nagu näitavad NSV Liidu Teaduste Akadeemia Energeetikainstituudi arvutused, ei suurene hüdroelektrijaamades toodetava elektrienergia osatähtsus kuigi tunduval määral, sest kütustest saadava elektrienergia hulk kasvab samuti.

Seega saadakse meie maal suurem osa elektrienergiat maapõuest toodetavate kütuste põletamisest. Niisugusel põletamisel muudetakse kütuse keemiline energia soojusenergiaks.

Elektrijaamu, mis muudavad kütuse põletamisel saadava soojusenergia mehaaniliseks ning selle omakorda elektrienergiaks, nimetatakse soojus-elektrijaamadeks.

Maapõuest saadavaid kütuseid ei kasutata mitte ainult elektrienergia saamiseks. Tohutud hulgad kütuseid kasutatakse mehaanilise energia tootmiseks transpordis (autod, lennukid, vedurid, laevad jne.).

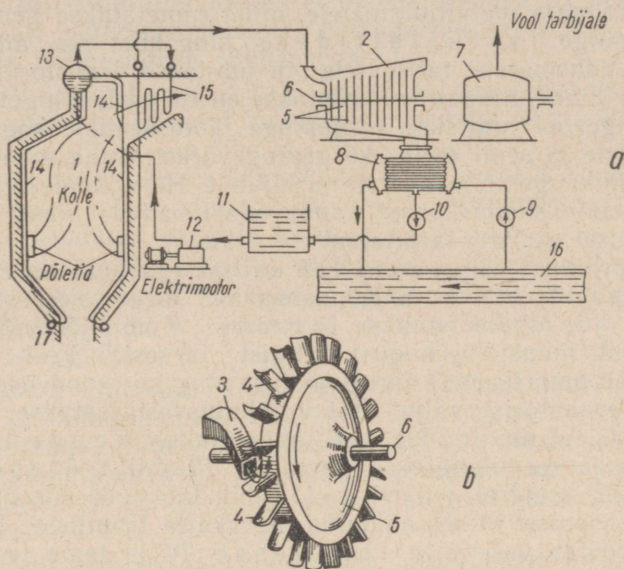
Suured soojuse hulgad kuluvad tööstuse soojuslikkudeks vajadusteks (toitlustusettevõtted, tekstiili-, metallurgia- jt. tööstused), põllumajanduses, elamute ja ühiskondlikkude hoonete kütteks ja ventilatsiooniks, kommunaalvajadusteks (saunad, pesumajad), toidu valmistamiseks jne.

Energeetikaharu, mis tegeleb kütusest põletamise teel saadava soojusenergia tootmisega ja selle muundamisega mehaaniliseks energiaks või soojuse otsese kasutamise, või ka soojuse edasiselt elektrienergiaks muundamisega, nimetatakse soojustehnikaks ehk soojusenergeetikaks.

Vaatleme üldjoontes soojuselektrijaama skeemi ja elektrienergia tootmisprotsessi (joon. 1, a) suures elektrijaamas.

Aurukatla koldes 1 põletatakse kütust, mis puhutakse kivisöetolmuna koldesse läbi põletite. Kütuse põlemisel tekkinud kuumad gaasid kuumutavad aurukatla torusid 14. Torud on täidetud veega, mis voolab neisse kollektorite 17 kaudu katlatrumlist 13. Veest saadav aur tõuseb torusid mööda mullidena üles ja koguneb trumli ülemisse ossa. Siit läheb aur ülekuumendisse 15, mida uhuvad koldest ülekuumendi gaasikäiku tulevad kuumad suitsugaasid. Edasi läbib suitsugaas vee- ja õhuelesoojendid, tuhapüüdja (ei

ole joonisel näidatud) ning väljub korstna kaudu välisõhku. Saadud ülekuumendatud veeauru rõhk ja temperatuur on palju kõrgemad kui meid ümbritseva keskkonna omad, ja seepärast on aurul võime teha tööd. Niisuguse auru kohta öeldakse, et see sisaldab potentsiaalset energiat. Vaadeldavas aurujõuseadmes toimub auru töövõime kasutamine, s. t. potentsiaalse energia kasutamine järgmisel viisil.



Joon. 1 a — lihtsaima soojuselektrijaama skeem; b — auruturbiini tööratas ja üks düüsidest.

1 — aurukatla kolle; 2 — auruturbiin; 3 — düüs; 4 — laba; 5 — ratas; 6 — auruturbiini võll; 7 — elektrivoolu generaator; 8 — kondensaator; 9 — tsirkulatsioonipump; 10 — kondensatsioonipump; 11 — toiteveepaak; 12 — toitepump; 13 — aurukatla trummel; 14 — aurukatla torud; 15 — auruülekuumendi; 16 — veevarustuse allikas (jõgi); 17 — kollektor.

Aurukatla ülekuumendist suundub aur torustikku mööda auruturbiini 2. Läbinud siin ahenevad düüsid 3 (joon. 1, b), aur paisub ja voolab neist välja suure kiirusega; auruturbiini düüsidest muudetakse seega auru potentsiaalne energia kineetiliseks. Edasi läheb aur kõveratele labadele 4, mis on kinnitatud võll-

lile 6 asetatud kettale 5 (võlli osa sellele kinnitatud ketta ja labidatega on näidatud eraldi). Auru kineetiline energia antakse edasi labidatele ja need hakkavad koos kettaga pöörlema. Võlli pöörlemisenergia, s. o. mehaaniline energia, saadakse auru kineetilisest energiast. Auruturbiiniga ühisele võllile on paigutatud elektrigeneraator 7, mis võlli kaudu saadud mehaanilise energia muudab elektriks; viimane läheb isoleerimata metalljuhtmetele, mida nimetatakse generaatori pinge jaotuslattideks ning kust see antakse edasi lähematele tarbijatele või juhitakse transformaatorisse. Transformaatoris tõstetakse elektrivoolu pinget; kõrgepingevool juhitakse kõrgepinge jaotusseadme kogunislattidele ja sealt edasi kõrgepingevõrku, mida mööda ta voolab kaugemal asuvatele tarbijatele. Nii võib elektrit energiat selle saamiskohast kanda edasi sadade kilomeetrite kaugusel asuvate tarbijateni.

Turbiinist väljuv aur läheb erilisse aparati, nn. kondensaatorisse 8. Kondensaatori torude sees voolab vesi, mis sinna antakse pumba 9 abil jõest 16 või mõnest muust veekogust (tiigist, järvest). Vesi võtab torusid ümbritsevalt aurult soojust ning aur kondenseerub. Kondensaatorist välja voolav jahutusvesi lastakse jõkke tagasi. Aurust saadud vett nimetatakse kondensaadiks ja see suunatakse pumba 10 abil toitepaaki 11 ning seejärel pumba 12 abil läbi vee-eelsoojendi, mida joonisel ei ole näidatud, aurukatla trumli. Trumli voolab vesi jälle torudesse 14 ja tema teekond kordub.

Nii muudetakse aurujõuseadmes (soojuselektrijaamas) kütuse keemiline energia elektriks.

Kaht järgmisena nimetatud energiaressurssi — päikest ja tuult — kasutatakse tunduvalt vähem, vaatamata sellele, et need, nagu hüdroressursidki, pidevalt looduses uuenevad ja peaksid sellest vaatepunktist rahvamajandusele pakkuma suurt huvi.

Tehnikavaldkonda, mis tegeleb päikeseenergia tehniliseks otstarbeks vahetu kasutamisega, nimetatakse heliotehnikaks (kreeka sõnast helios, mis tähendab päikest). NSV Liidus tehakse sel alal suurt teaduslikku uurimistööd. On saadud positiivseid tulemusi rea päikeseenergia-soojendite konstruktsioonide praktilisel kasutamisel. Mitmeaastane ekspluatatsioon on näidanud, et nad

võivad vett soojendada kuni 55—60° C. Niisuguste soojendite kasutushooaeg on NSV Liidu Euroopa-osa lõunavööndis 150—270 päeva. Eriti efektiivne on helioseadiste kasutamine NSV Liidu lõunarajoonides.

Et saavutada kõrgemaid temperatuure kui oli nimetatud eespool, tuleb päikesekiired koondada sobiva kujuga peeglite abil ühte punkti (fookusesse); et seejuures päikese liikumisest tingituna fookus ei hajuks, peavad ka peeglid vastavalt päikesele liikuma. Niisuguseid seadmeid võib ehitada mitmesuguse võimsusega.

NSV Liidus katsetati 1956. aastal päikesejõuseadet, mis andis auru 11—13 tonni tunnis parameetritel 30 ata 400° C. Seadme optiline osa koosnes 1293 peeglist, mõõtmetega 3×5 m; need asetsevad vankritel, mis liikusid rööbastel ümber aurukatla; viimane oli ühtlasi ekraaniks, millele olid keskendatud peeglite fookused.

NSV Liidus tehakse ka töid päikese-termoelektrigeneraatorite loomiseks. Termoelektrigeneraatorid on niisugused seadmed, mis muudavad päikeseenergia otsekohe elektrienergiaks.

Kuuma kliimaga rajoonides võib helioseadmeid kasutada ka külmutamiseks, õhu konditsioneerimiseks (konstantse temperatuuri ja niiskusega õhu valmistamiseks) ja eriti põllumajanduses (kuivatid, loomapidamine, puuvilja kuivatamine). Heliotehnika avab laiad teed kütuse kokkuvõiuks.

Tehnikavaldkonda, mis tegeleb tuuleenergia kasutamisega, nimetatakse tuuleenergeetikaks. Tuuleenergia varud on kolossaalsed, kuid nende kasutamine on seotud suurte raskustega, sest tuule tugevus ja suunad on väga muutlikud. Kõige laialdasemalt on tuulemootorid levinud põllumajanduses, eriti kui need töötavad koos hüdroelektrijaamadega. Tänu suure vene õpetlase H. J. Žukovski — aerodünaamika looja — töödele on NSV Liidus välja töötatud kiirekäiguliste tuulemootorite teooria, konstrueeritud niisugused mootorid ning alustatud nende seeriaviisilist tootmist, et kasutada neid peamiselt põllumajanduses ja tohututes Arktika avarustes, kus peaaegu kogu aasta kestel puhuvad tugevad tuuled.

Elektrienergia tööstuslikus tootmises, nagu öeldakse suurenergeetikas, ei ole ei päikese- ega tuuleenergia senini kasutamist leidnud. Tööd selles suunas,

eriti tuuleenergia kasutamise alal, NSV Liidus aga jätkuvad.

Viimastel aastatel on hakanud leidma laialdast kasutamist uus energialiik — aatomi-(tuuma-)energia, mis eraldub aatomituumaga lagunemisel. Energeetikasse on ilmunud uus ala, mille nimetuseks on saanud aatomienergeetika. Sellele vaatamata, et see energeetika haru teeb alles oma esimesi samme, laieneb lähematel aastatel selle energialiigi kasutamine oma iseärasuste tõttu kiiresti nii elektrienergia tootmisel kui ka vahenditult kõigis rahvamajanduse harudes, meditsiinis, bioloogias jm.

Suurtööstuslikus elektrienergia tootmises on kõige suurem tähtsus meie maa kütuse- ja hüdroenergia ressursidel; soojus- ja hüdroelektrijaamade kasutustehnika ja sisseehitused on NSV Liidus saavutanud kõrge täiuslikkuse.

Elektrienergial on revolutsioneeriv toime kõigile rahvamajanduse harudele — põllumajandusele, transpordile ja ehitusele. Elektrienergia soodustab tootlikkuse tõusu, võimaldab ettevõtetes töötajatele luua sanitaarseid ja hügieenilisi tingimusi ning parandab ja kergendab töötajate tööd. Seepärast oligi partei ja valitsuse erilise tähelepanu objektiks elektrienergia juurutamine inimese kõigile tegevus- ja elukondlikele aladele — kogu maa elektrifitseerimisele.

Elektrifitseerimise tähtsust formuleeris lühidalt V. I. Lenin ajalooliseks muutunud loosungis:

«Kommunism — see on nõukogude võim pluss kogu maa elektrifitseerimine.»¹

Tsaari-Venemaad, vaatamata tema tohututele looduslikele rikkustele ja teadusliku mõtte kõrgele tasemele, mis paljudes teaduseharudes välismaisest teadusest ees oli, iseloomustas üldine tööstuse tehniliselt madal arengutase ja sõltuvus välismaisest kapitalist.

Tööstuse madal arengutase määras ka energeetika madala arenemise taseme. Maal mitte ainult ei teatudki midagi elektrist, vaid sageli oli ainsaks valgustusvahendiks peerg. Kapitalistlike maade seas oli Venemaa energiavarustatuse poolest üks viimaseid — elektrienergia tootmise poolest kogu maailmas viieteistkümnnes ning Euroopas seitsmes.

Kõigi elektrijaamade kohta leidis ainult kaks turbiini,

¹ V. I. Lenin, Teosed, 31. köide, lk. 477.

mille suurim võimsus ulatus 10 000 kW ühes agregaadis. Elektriyaamadel oli maksimaalne kasutegur 11—12%, keskmine tingkütuse kulu 1 kWh kohta moodustas 1050 g. Summaarne elektriyaamade võimsus moodustas 1913. aastal 1 098 000 kW ning elektrienergia toodang 2 miljardit kWh aastas.

Peeaaegu kõigi elektriyaamade põhilised sisseseaded olid välismaised ning elektriyaamad ise kuulusid välismaalastele.

Tsaari-Venemaa energeetika purustati 1914.—1918. a. kestnud imperialistliku sõja ning sellele järgnenud kodu-sõja ja välismaise interventsiiooni päevil peaaegu täielikult.

Terava kontrasti Venemaa energeetika seisukorraga kujutasid vene teadusliku ja tehnilise mõtte saavutused, mis jäid tsaari-Venemaal kasutamata, sest Venemaa valitsejad suhtusid teadusesse umbusu ja põlgusega. Tsaari-võim nägi teaduses revolutsiooniliste ideede levitajat; tsaari-Venemaa kaubanduslikud ja tööstuslikud ringkonnad, kes olid seotud välismaise kapitaliga, põlgasid kodumaiseid tehnikaalaseid saavutusi.

Soojustehnilise teaduse alused rajas geniaalne vene õpetlane akadeemik M. V. Lomonossov, kes avastas niinimetatud aine jäävuse seaduse, mida nimetatakse tema nime järgi. M. V. Lomonossovile kuulub ka esimene traktaat elektrist vene keeles. Edasiselt jätkasid M. V. Lomonossovi tööd paljud vene õpetlased (I. A. Višnegradski, D. I. Mendelejev, A. G. Stoletov jt.), kes rikastasid soojustehnikaalast teadust oma avastustega. Vene tehnikute saavutused on suured ka rakendusliku energeetika alal. I. I. Polzunov konstrueeris ja pani töötama esimese aurumasina, mida rakendati tehases. Edasi rajasid oma töödega N. P. Petrov, A. I. Predtetsenski, K. V. Kirsch, V. I. Grinevetski, L. K. Ramzin, M. V. Kirpitšov jt. aurukatelde ja soojusjõumasinate projekteerimise ja ehitamise alused.

Energeetika ja soojustehnikaalane teadus saavutas oma suurima arengu nõukogude perioodil.

Nõukogude võimu organiseerimise esimestest päevadest alates võeti V. I. Lenini initsiatiivil kasutusele rida abinõusid, et arendada elektroenergeetika baase Nõukogudema tööstusrajoonides. Tõsteti esile küsimused rea hüdroelektriyaamade ehitamisest Volgale, Svirile, Imatrale ning Šaturski soojuselektriyaama ehitusest, kuid kodusõda segas nende kavatsuste plaanipärast läbiviimist.

Jaauaris 1920. a. organiseeriti G. M. Kržižanovski juh-
timisel komisjon, mis on laialt tuntud GOELRO-plaani
(vene k. Государственная комиссия по электрификации
России) nime all.

GOELRO-plaani koostamisest võttis osa suur tead-
laste ja inseneride kollektiiv.

Vastavalt V. I. Lenini juhenditele märkis GOELRO-
plaani majanduse üldise arendamisplaani hulgas ära nõu-
kogude energeetika arenemisteed. Erilist tähelepanu pöö-
rati seejuures rasketööstuse arendamisele — metallide
tootmisele, kütuste kaevandamisele, transpordi arendami-
sele, masinahitusele.

Milles siis seisid nõukogude energeetika arendamise
põhisuunad?

GOELRO-plaani mõtte kohaselt pidi nõukogude sotsia-
listlik energeetika arenema tseentraliseeritud
majanduse ülesehitamise teel, mis rajaneks rajooni-
elektrijaamadel. Viimased, olles omavahel ühenda-
tud kõrgepinge-ülekandeliinidega, loovad rajoonide
energiasüsteemid.

Revolutsioonieelsel Venemaal kasutati elektrijaamades
peamiselt kaugeltveetud kalleid kütuseid — naftat
ja parimaid kivisöesorte — Doni basseini ja vahel isegi
Inglismaalt imporditud kivisütt. Meie kodumaa on aga
rikas kohalikkude kütuste — turba, pruunsöe ja
põlevkivi — poolest. Nõukogude energeetika arendamine
suurte, kohalikkude kütustega töötavate elektrijaamade
ehitamisega oli niisuguseks tehniliseks vahendiks, mis soo-
dustas antud rajooni tööstuse arenemist ja oli tähtsaks
strateegiliseks kaitseabinõuks. Ühtlasi vabastas see ka
raudtee liigsetest vedudest.

Eriti tuleb nõukogude energeetikas märkida termo-
fitseerimise osa. Plaan, mis on meie majanduse alu-
seks, loob eriti soodsad tingimused tseentraliseeri-
tult elektri- ja soojusenergia koostoot-
miseks. Meie maal rahvamajanduses kasutusele võetud
termofitseerimise mõte seisabki selles, et võimaldada tohu-
tut kütuse kokkuhoidu ja parandada töötajate elukondlikke
tingimusi.

Taastamise perioodil 1921.—1927. a. suurenes jaa-
made võimsus 1913. aastaga võrreldes 1,6-kordseks ja
elektrienergia tootmine 2,1-kordseks. Sel perioodil ehitati
ja lülitati töösse suurim turbaküttega töötav Šaturski elektri-

jaam, Volhovi hüdroelektrijaam ning rida jaamu Doni kivi-
söebasseinis.

Teine viisaastak (1933.—1937. a.) koos esimese viisaastakuga muutis põhiliselt meie maa majanduslikku ilmet. Rivisse astusid sellised suured elektrijaamad, nagu Stalingradi, Dubrovski ja Sviri elektrijaamad. Elektrijaamade võimsus, võrreldes 1913. aastaga, oli suurenenud 8-kordseks ning elektrienergia tootmise poolest tõusis Nõukogude Liit Euroopas teisele kohale. Sel perioodil sai täis GOELRO-plaani tähtaeg; plaani ülesanne oli ületatud peaaegu kolmekordselt.

Teise viisaastaku jooksul viidi lõpule tööstuse elektrifitseerimine, suurenes raudteede elektrifitseerimine ning pandi alus põllumajanduse elektrifitseerimisele. Elektriseadmete import vähenes järsult ning generaatorite osas lõpetati täielikult.

Partei XVIII kongress (1939. a.) püstitas ülesande suurendada kolmandal viisaastakul veelgi energeetika kasvu NSV Liidus.

See viieaasta plaan jäi täitmata Saksamaa poolt NSV Liidu vastu alustatud sõja tõttu; sellele vaatamata täideti sellest plaanist suur osa. Perioodil kuni sõja alguseni lasti käiku $2,4 \cdot 10^6$ kW uusi võimsusi, s. o. 2,2 korda rohkem kui seda oli 1913. a. üldse.

NSV Liidu majandusliku ülesehituse rahulikud aastad vahetusid kogu nõukogude rahva pingelise võitlusperioodiga saksa fašistlike anastajate vastu. Isamaasõja pidamiseks oli vaja kogu rahva jõupingutust ning mobiiliseerida kogu tööstus, et varustada rinnet relvade, laske-
moona, mürskude ja toiduainetega. Nendes tingimustes, kus energeetika pidi varustama tööstust jõu ja soojusega, kasvas tema osatähtsus veelgi. Energeetika ülesanded esimestel sõja-aastatel raskenesid veelgi seetõttu, et tööstus oli vaja vaenlase poolt ajutiselt okupeeritud rajoonidest ja oblastitest evakueerida ja asustada uutesse rajoonidesse. Kogu maal käis ennenähtamatus mastaabis tööstuse ehitamine ja koos sellega tuli ümber korraldada ka energeetika, esmajärjekorras selles osas, mis tootis elektrienergiat kütuse põletamisega, s. o. soojusenergeetika.

Kolmel sõja-aastal (1942—1944) ehitati 2250 uut suurt tööstusettevõtet, nende hulgas suured Tšeljabinski, Krasnogorski, Besõmjanski, Rõbinski jt. elektrijaamad.

Võit vaenlase üle seadis meie tööstuse ette uued gran-

diossed ülesanded. Need peegeldusid ajaloolises NSV Liidu rahvamajanduse taastamise ja arendamise viieaasta-plaani seaduses aastateks 1946—1950, mis võeti vastu NSV Liidu Ülemnõukogu esimesel istungjärgul 1946. aastal.

Juba 1947. aasta alguseks oli elektrijamaade võimsus taastatud sõjaelsele tasemele ning elektrienergia toodangu poolest saavutas NSV Liit esikoha Euroopas ja teise koha maailmas.

Elektrienergia toodang 1950. aastal — viimasel neljanda viisaastaku aastal — moodustas üle 90 miljardi kWh.

Selle perioodi kvalitatiivse arengu kohta tuleb märkida, et toimus elektrijaamade ja võrkude töö tunduv automatiiseerimine ja kõrgete parameetritega veeauru (100 ata ja 510° C) laialdane juurutamine; tehti rida teaduslikke uurimistöid ülikõrgete parameetritega (300 ata ja 600° C) veeauru kohta; alanes tunduvalt kütuse erikulu (1950. a. oli see 0,539 kg/kWh, s.o. kaks korda väiksem kui 1913. aastal).

Suures enamuses olid elektrijaamad selleks ajaks kõrgepingeliinidega omavahel ühendatud ja moodustasid rajoonide elektrisüsteemid.

Sel perioodil lähenesid mõned süsteemid geograafiliselt üksteisele sedavõrd, et osutus võimalikuks neid omavahel ühendada ja luua seega rajoonidevahelised ühendatud energiasüsteemid. Nii ühendati Gorki, Jaroslavi ja Ivanovski energiasüsteemid Volga võimsate hüdrojõujaamade Uglitški ja Rõbinski kaudu Moskva energiavõrguga. Donbassi, Dnepropetrovski ja Rostovi energiasüsteemid ühendati samuti omavahel.

NSV Liidu rahvamajanduse arendamise viies viieaastaplaan (aastaiks 1951—1955) oli Nõukogude Liidu energeetika edasise arendamise tähtsaks etapiks. Elektrienergia toodang 1955. a. moodustas 170 miljardit kWh, lasti käiku niisugused võimsad hüdrojaamad, nagu Kuibõševi, Kama, Gorki, Mingetšauri ja Ust-Kamenogorski hüdroelektrijaamad ja rida soojuselektrijaamu, nende seas Tšerepetski Riiklik Rajooni-Elektrijaam auruparameetritega 175 ata ja 550° C. Lülitati töösse 950 km pikkune Kuibõšev—Moskva 400 000 V pingega ülekandeliin.

Nõukogude teadlaste ja inseneride töö tulemusena pro-

jekteeriti ja ehitati maailma esimene 5000 kWh võimsusega aatomielektriijaam.

27. juulil 1954. a. anti aatomielektriijaam eksploatatsioonile ja ta hakkas ümbruskonna rajoonide tööstustele ja põllumajandusele voolu andma.

Seega hakati esmakordselt elektrienergiat saama mitte kütuse põletamisest, vaid aatomienergiast — uraani aatomi tuuma jagunemisest.

Aatomielektriijaama käikulaskmisega tehti reaalne samm aatomienergia kasutamiseks rahulikeks eesmärkideks.

Rahvamajanduse arendamise seitsme aasta plaanis (1959—1965) püstitati esmajärjekorraliseks ülesandeks kiirendada elektriijaamade ehitamise tempot, suurendada soojuselektriijaamade võimsust 2,2 ja hüdroelektriijaamade võimsust umbkaudu 2,7 korda. Tõsta elektrienergia tootmist 88% võrra, viies viimase seitseaastaku lõpuks 500—520 miljardi kilovatt-tunnini.

Seitseaastaku suurte tööde hulgas oli ette nähtud lõpetada Kuibõševi, Stalingradi, Votkinski, Kremantšugi hüdroelektriijaamade ehitused; panna käima Irkutski, Novosibirski ja esmajärjekorras Bratski hüdroelektriijaam, mille täisvõimsus on 3 600 000 kW ning alustada Krasnojarski hüdroelektriijaama ehitamist, mille võimsus on 4 200 000 kW. Luua ühtne energiasüsteem NSV Liidu Euroopa-osas; arendada töid ühtse energiasüsteemi loomiseks Kesk-Siberis.

Tootmisprotsesside mehhaniseerimise ja automatiseerimise alal on ette nähtud edasiselt juurutada seadmete automaatset ja kaugjuhtimist ning energosüsteemide kontrollimise ja juhtimise telemehhaniseerimist.

Energia tootmisplaani täidetakse edukalt. Elektrienergiat toodeti 1957. aastal 209,5 miljardit kWh (sealhulgas hüdroelektriijaamades 39,3 miljardit kWh), tingkütuse erikulu moodustas 0,450 kg/kWh. Lõpetatud on Kairak-Kumski (120 000 kW) ja Kuibõševi (2 300 000 kW) hüdroelektriijaamade ehitustööd. Viimasele omistati 1958. a. augustis Vladimir Iljitš Lenini nimi. Lasti käiku Novosibirski ja Irkutski hüdroelektriijaamad. Üldine 1957. a. käiku lastud elektriijaamade võimsus moodustab 5 milj. kW, millest hüdroelektriijaamadele langes 1,5 milj. kW. NSV Liidu Euroopa-osas jätkati ühtse energiasüsteemi loomist ning ülekandeliinide ehitamist Kuibõševi hüdroelektriijaamadele.

mast Uraali ja Stalingradi hüdroelektrijaamast Moskvasse; toimub uute 200 000—400 000 kW võimsusega aatomini energiaga töötavate elektrijaamade ehitamine; projekteeritakse Jenisseile 6 000 000 kW võimsusega hüdroelektrijaamade ehitamist.

Käesoleva seitseaastaku jooksul lahendatakse NSV Liidus rahvamajanduse niisugune ümberkorraldamine, mis võimaldaks lähema 10—15 aasta jooksul lahendada majanduslik põhiülesanne — jõuda järele ja minna mööda eesrindlikest kapitalistlikest maadest tootmisnäitajate poolest ühe isiku kohta ja selle baasil tõsta järsult töötajate elatustaset. Elektrifitseerimise alal nõuab see iga-aastaast elektrini energia tootmist ligikaudu 1 miljardi kWh ulatuses. Niisugust toodangut, nagu näitavad arvutused, võib saavutada ainult esmajärjekorras soojuselektrijaamade ehitamisega, mis nõuab vähem kapitali kulutusi ja on, võrreldes hüdroelektrijaamadega, kiiremini ehitatavad. Samuti tuleb luua kogu maal ühtne energiasüsteem (vene k. lüh. ЕЭС), mis võimaldab kõige efektselt kasutada maa energeetiliselt ja toorainete ressursse. Koos sellega võib saavutada niisugust elektrini energia toodangut ainult järsult alandades elektrijaamade ehituse maksumust ja kütuse kulu toodetava kilovatt-tunni kohta. Kaht viimast tingimust saab täita, kui elektrijaamade ehitusel juurutada massiliselt monteeritava raudbetooni kasutamist ning tunduvalt suurendada elektrijaamadesse installeeritud üksikute agregaatide võimsust. Esialgsed arvutused näitavad, et uute ehitatavate soojuselektrijaamade võimsused peavad kasvama kuni 2400 MW ja nendesse ülesseatavate üksikute turbiinide võimsus peab olema 300—600 MW ning katlad tootlikkusega kuni 900—1800 t/h.

Teaduslikud uurimise ja projekteerimise instituudid ning masinaehituse tehased on asunud niisuguste jõujamade ja nende agregaatide projekteerimisele.

ESIMENE PEATÜKK

TÖÖTAV KEHA JA SOOJUSTEOORIA SEADUSED

1. Mõõtude tehniline süsteem

Igapävases elus ja mitmekesistel tehnika aladel tuleb teha mitmesuguseid mõõtmisi.

Mingi suuruse, näiteks pikkuse, kaalu, pindala, aja jne. mõõtmine tähendab selle võrdlemist teise samaliiki suurusega, mis on võetud antud suuruse mõõtühikuks.

Möödunud sajandil võeti enamikus maades kasutusele nn. mõõtude meetrisüsteem.

Pikkuse ühikuks võeti selles süsteemis meetr (tähistatakse m). Rahvusvahelises Mõõtude Büroos (Pariisis) säilitatakse plaatina ja iriidiumi sulamist valmistatud erilise profiiliga kangi, millele märgitud kahe joone vahe on etaloonmeetriks ehk teiste sõnadega algmeetriks. Selle algmeetri järgi valmistati kõigile riikidele koopiad — etaloonid, mille järgi valmistatakse harilikke «meetreid,» s. o. joonlaudu, mida kasutatakse pikkuste mõõtmiseks.

Väga ebamugav oleks kasutada ainult üht pikkusemõõdu ühikut. Suurte kauguste mõõtmisel kujuneksid saadud arvud väga suureks. Seepärast kasutatakse suuremate pikkuste mõõtmiseks teist ühikut — kilomeetrit (km).

Teiselt poolt oleks aga ka väga ebamugav mõõta väikesi löike meetrites. Seepärast on kasutusele võetud ka meetrist väiksemad mõõtühikud. Need on detsimeeter (dm), sentimeeter (cm) ja millimeeter (mm) (vt. tabel 1 raamatu lõpus).

Järgmine suurus, millel tehnikas on eriti suur tähtsus, on jõud. Igaüks meist on sellest suurusest saanud ettekujutuse otseste kogemuste najal. Kui mingi ese sei-

sab paigal ja seda on vaja liikuma panna, siis tuleb selleks esemele rakendada jõudu. Kui mingi keha liigub teatud kiirusega ja seda liikumiskiirust soovitakse kas suurendada või vähendada, siis peab samuti kehale rakendama jõudu.

Igaüks teab, et kõik kehad maakeral omavad kaalu. See keha omadus — omada kaalu — tuleb sellest, et kõik kehad tõmbuvad maa külge. Jõudu, millega keha tõmmatakse maa külge, nimetame keha kaaluks.

Põhiliseks jõuhikuks ning samuti ka raskusjõu (kaalu) ühikuks on meie praegu õpitavas mõõtude tehnilises süsteemis kilogramm (kg).

Väga suurte jõudude või raskuste mõõtmiseks kasutatakse tonni (t) ja tsentnerit (ts); väga väikeste jõudude mõõtmiseks kasutatakse grammi (g) (vt. tabel 1).

Tehnikas tuleb väga sageli mõõta mõne protsessi kestust. Aja mõõtühikuks on sekund (sek.). Teisteks aja mõõtühikuteks on minut (min.) ja tund (h).

Kui vaadelda suurusi, millega meil tehnikas tuleb sageli tegemist teha, siis näeme, et neid võib kujundada juba varem tundmaõpitute abil. Seepärast nimetatakse pikkust, jõudu ja aega põhisuurusteks ning kõiki ülejäänuid tuletatud suurusteks.

Vaatleme mõningaid tuletatud suurusi, millega tuleb sagedasti tegemist teha, ja nende mõõtühikuid mõõtude tehnilises süsteemis.

Erikaaluks nimetatakse aine kaalu, kui ainet on võetud üks mahuühik. Et tehnikas kasutatakse sageli mahuühikuks 1 m^3 ning kaalu mõõdetakse kilogrammides, siis aine erikaaluks nimetatakse selle aine 1 m^3 kaalu kilogrammides. Nii näiteks on terase erikaal $7800 \text{ kg } 1 \text{ m}^3$ kohta. Ilmselt on sel juhul mõõtühikuks kasutatud niisugust erikaalu, mille puhul 1 m^3 kaalub 1 kg (tähistus kg/m^3). Seega on terase erikaal $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$. Ainete erikaalude väärtusi võib leida tabelitest (vt. tabel 2); seejuures peab olema märgitud, millistes ühikutes on erikaalu mõõdetud. Sageli antakse tabelites erikaal ka teistes ühikutes, näiteks g/cm^3 , ning tehnilistel mõõtmistel peab ka oskama erikaalu väljendada ühikus kg/m^3 . Selleks tuleb g/cm^3 väljendatud erikaalu korrutada arvuga 1000; saadud arv ongi erikaal ühikus, milleks on kg/m^3 . Kuid $1 \text{ t}/\text{m}^3 = 1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1 \text{ kg}/\text{dm}^3$.

Erimahuks nimetatakse mingi aine mahtu, kui aine hulk moodustab mingi kaaluühiku; kui kaaluühikuks on

võetud kg ning mahtu mõõdetakse m^3 -ga, siis erimahuks nimetatakse aine 1 kg mahtu kuupmeetrites; sel juhul on keha erimahu ühikuks m^3/kg .

Kui aine erikaal on teada, siis võib erimahu leida, jagades arvu üks erikaaluga; kui vee erikaal (temperatuuril $4^\circ C$) on $1000 kg/m^3$, s. t. $1 m^3$ vett kaalub $1000 kg$ ehk $1 t$, siis vee erimaht (temperatuuril $4^\circ C$) võrdub

$$1 : 1000 = 0,001 m^3/kg.$$

Saadud arv näitab, et $1 kg$ vett hõivab ruumala, mille suurus on üks tuhandik kuupmeetrit.

Jõu mõistega on vahetult seotud rõhu mõiste, mida soojustehnikas kasutatakse näiteks siis, kui tahetakse isoleerida auru olekut aurukatlas; niisuguse oleku üle võib otsustada selle järgi, millise jõuga rõhub aur teatud mõõdetega pindalale; siit järeldame, et rõhuks nimetatakse seda jõudu, mis mõjub ühele pinnaühikule. Pinna mõõtühikuks kasutatakse tehnikas ruutmeetrit (m^2), jõuühikuks — kilogrammi. Seepärast on $1 kg$ rõhk $1 m^2$ pinnale võetud rõhuühikuks ning seda tähistatakse kg/m^2 . See mõõtühik on aga väga väike ja selle kasutamisel rõhuühikuna tuleks rõhu mõõtmiseks näiteks aurukateldes teha tegemist väga suurte arvudega. Seepärast kasutatakse suurte rõhkude puhul teist mõõtühikut. Selleks jõuühikuks on samuti võetud jõud $1 kg$, kuid pindalaks on võetud $1 cm^2$. Seda ühikut tähistatakse kg/cm^2 (kilogramm ruutsentimeetritele).

Pindala $1 cm^2$ on $1 m^2$ pindalast $10\,000$ korda väiksem; seepärast on rõhu $1 kg/cm^2$ puhul ühele ruutmeetrisele pindalale mõjuv jõud $10\,000 kg$. Tähendab rõhk $1 kg/cm^2$ on $10\,000$ korda suurem kui rõhk $1 kg/m^2$. Teiste sõnadega

$$1 kg/cm^2 = 10\,000 kg/m^2.$$

Seetõttu et rõhk $1 kg/cm^2$ on ligilähedane selle rõhuga, millega maakera ümbritsev õhk oma kaaluga (merepinna) mõjub kõigile kehadele, nimetatakse seda mõõtühikut tehniliseks atmosfääriks ehk lühiduse mõttes lihtsalt atmosfääriks (at).

Kui näiteks öeldakse, et rõhk katlas on $20 at$, siis tähendab see, et katlas oleva auru olek on niisugune, mis mõjub katla pinna igale ruutsentimeetrile jõuga $20 kg$.

Sagedasti mõõdetakse rõhku mõne vedeliku samba

rõhu kaudu. Seejuures tuleb silmas pidada, et 1 tehniline atmosfäär (1 kg/cm^2) võrdub 735,6 mm kõrguse elavhõbeda samba rõhuga temperatuuril 0°C või 10 m kõrguse veesamba rõhuga.

Jõu mõistega on seotud veel üks suurus — töö. Kui aur rõhub kolvile ja paneb selle liikuma, siis öeldakse, et aur teeb tööd. Ka raskuse tõstmisel tehakse alati tööd. Mida rohkem kaalub raskus ja mida suurem on kõrgus, millele see raskus on tõstetud, seda rohkem ilmselt on ka tehtud tööd. Seega on töö mõiste alati seotud jõu rakendamisega kehale ja selle keha liikumisega, millele see jõud on rakendatud.

Selleks et tööd mõõta, on kokku lepitud lugeda tööühikuks niisugust tööd, mida teeb jõud 1 kg, kui raskus liigub 1 m võrra. Seejuures tuleb aga tingimata silmas pidada, et jõud peab olema suunatud samas sihis, milles toimub liikumine. Seda tööühikut nimetatakse kilogramm-meetriks ja tähistatakse kgm.

Töö arvutamine aga ei räägi veel midagi sellest intensiivsusest, millega seda tööd tehti. On ilmne, et suur töö, mis tehti ära väga pika aja jooksul, võib olla vähem intensiivne kui väike töö, mis tehti väga lühikeses ajavahemikus. Et otsustada intensiivsuse üle, millega tehti tööd, on vaja teada, kuipalju tehti tööd mingis ajavahemikus, näiteks 1 sekundi jooksul. *Ajaühiku kestel tehtud tööd nimetatakse võimsuseks.* On ilmne, et võimsuse mõõtühikuks on niisugune võimsus, mille puhul 1 kgm tööd tehakse 1 sekundi kestel ja seda tähistatakse kgm/sek. See mõõtühik on väga väike. Praktikas kasutatakse ühikut, mis on 75 korda suurem kui 1 kgm/sek; seda mõõtühikut nimetatakse h o b u j õ u k s ja tähistatakse hj, seega

$$1 \text{ hj} = 75 \text{ kgm/sek.}$$

Võimsuseühiku nimetus «hobujõud» pärineb neist aegadest, kui töö tegemiseks kasutati loomade jõudu.

Energeetikas on laialdaselt levinud ka teised mõõtühikud — v a t t (W), k i l o v a t t (kW) ja m e g a v a t t (MW), kusjuures $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ ja $1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW}$.

Kilovati ja eespool esitatud võimsuse mõõtühikute vahel valitseb järgmine suhe:

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ hj} = 102 \text{ kgm/sek.}$$

2. Valem, sõltuvus, tabel, graafik

Selleks et mitmesugustes arvutustes leida mõne suuruse väärtust, tuleb teada selle arvutamise reegleid. Et leida näiteks mingi kütusehulga maksumust, on vaja teada selle hulga kaalu ja hinda, s. o. kütuse kaaluühiku maksumust. Kütuse maksumus võrdub siis kütuse hinna ja kütuse kaalu korrutisega. Seda arvutamise reeglit võib kirjutada järgmiselt:

$$\text{kütuse maksumus} = \text{kütuse hind} \times \text{kütuse kaal.}$$

Niisugune kirjutusviis on aga väga kohmakas. Selle lühendamiseks tähistatakse arvutamise reeglis esinevad suurused mingite tähtedega. Kui kütuse maksumus tähistada A , kütuse hinda tähega a ning kütuse kaalu tähega G , siis kütuse maksumuse arvutamise reegel kirjutatakse järgmiselt:

$$A = aG.$$

Niisugust avaldust võib nimetada kütuse maksumuse arvutamise valemiks antud suuruste a ja G kaudu.

Valemiks nimetatakse täheliste tähistustega väljendatud reeglit mingi suuruse arvutamiseks teiste tuntud suuruste kaudu.

Valemi järgi arvutamise näitena toome keha kaalu ja mahu arvutamise. Kasutades erikaalu ja erimahu mõisteid, võime püstitada järgmise reegli:

1. Keha kaal võrdub keha maht korrutatud erikaaluga ehk keha kaal võrdub tema maht jagatud erimahuga.

Kui tähistada keha kaal — G , keha maht — V , erikaal — γ (kreeka täht gamma) ja erimaht — v , siis võib reegli kirjutada järgmise valemi kujul:

$$G = V\gamma; \quad (1)$$

$$G = \frac{V}{v}. \quad (2)$$

2. Keha maht võrdub keha kaal korrutatud erimahuga ehk keha maht võrdub keha kaal jagatud erikaaluga.

Kasutades juba tarvitusele võetud tähiseid, võime 2. reegli väljendada järgmiste valemitega:

$$V = Gv; \quad (3)$$

$$V = \frac{G}{\gamma} \quad (4)$$

Otsitava suuruse (seisab tavaliselt valemi vasakul poolel) arvutamiseks tuleb valemi paremal poolel seisvate suurustega teha mitmesuguseid tehteid.

Kui valem mõne suuruse arvutamiseks on tuletatud, siis tavaliselt näidatakse, millistes mõõtühikutes tuleb valemisse kuuluvate tegurite väärtused asendada. Kui sellele ei ole otseselt viidatud ning näiteks valemis (1) on erikaal võetud g/cm^3 , siis maht tuleb võtta cm^3 -tes ja saadava kaalu ühikuks on sel juhul g. Kui näiteks valemis (3) on erimaht võetud m^3/kg , siis tuleb kaalu ühikuks võtta kg ja saadava mahu ühikuks on siis m^3 .

Kui me sooviksime nüüd valemi kujul avaldada seda, mis varem oli öeldud töö ja võimsuse kohta, siis tuleks toimida järgmiselt. Tähistame tööd tähega W , jõudu — P , liikumisteedkonda — s , võimsust — N ja aega tähega t . Töö arvutamise reegel ehk teiste sõnadega töö arvutamise valem kirjutatakse järgmiselt:

$$W = Ps \quad (5)$$

ning võimsuse arvutamise valem

$$N = \frac{W}{t}. \quad (6)$$

Väga ülevaatliku sõltuvuse suuruste vahel võib saada graafilise kujutamise teel. Et sellest viisist paremini aru saada, võtame järgmise näite. Olgu mõne keha erikaal $\gamma = 2 \text{ g/cm}^3$. Siis selle keha kaalu sõltuvust tema mahust võib kujutada valemina

$$G = 2V. \quad (7)$$

Et seda valemit väljendada graafiliselt, teotseme järgmisel viisil. Võtame kaks teineteisega perpendikulaarset joont, mis väljuvad punktist O (joon. 2), ning kanname horisontaalsele joonele joonlõikudena mahu väärtused ning vertikaalsele teljele kaalude väärtused. Selleks tuleb vaadeldud suuruste kohta eelnevalt mastaabi suhtes kokku leppida. Vastaku mahu joonel 5 mm pikkusele joonlõigule 1 cm^3 ja kaalu jaoks 5 mm pikkusele joonlõigule 1 g. Siis valitud mastaabi kohaselt vastavad 1, 2, 3, 4 cm^3 -le

joonlõigud 5, 10, 15, 20 mm; ning raskustele 1, 2, 3 g vastavad joonlõigud 5, 10, 15 jne. millimeetrit. Kanname need joonlõigud läbi *O* tõmmatud horisontaaljoonele mahtude tähistamiseks ning vertikaaljoonele kaalude tähistamiseks. Lõikude otsad tähistame kriipsudega ja kirjutame nende juurde horisontaalsele sirgele mahtude ja vertikaalsele sirgele kaalude väärtused. Et oleks näha, millised suurused kummalegi sirgele on kantud, kirjutame mahtude joone juurde tähte *V* ja kaalude joone juurde *G*. Kummagi tähe juurde kirjutame mõõtühikud, milles kummatki suurust mõõdame.

Edasi leiame keha 1 cm³ kaalu. Valemi (7) põhjal on see kaal

$$G = 2 \cdot 1 = 2 \text{ g.}$$

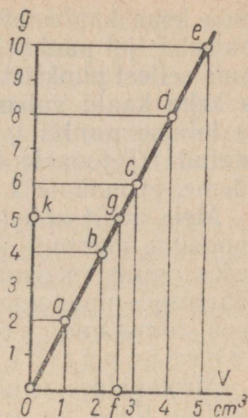
Selleks et saadud tulemust kujutada meie joonisel, püstitame kaks ristjoont — ühe sellest punktist, mis vastab meie mahule, ja teise sellest punktist, mis vastab selle mahu järgi leitud kaalule 2 g. Nende ristjoonte lõikepunkt *a* näitab, et keha mahuga 1 cm³ kaalub 2 g.

Leiame nüüd 2 cm³ kaalu. Valemi (7) järgi on see kaal:

$$G = 2 \cdot 2 = 4 \text{ g.}$$

Selleks et meie joonisel kujutada saadud arvutuse tulemust, püstitame nüüsi kaks ristjoont — ühe sellest punktist, millele vastab meie maht 2 cm³ ning teise sellest punktist, mis vastab kaalule 4 g. Nende ristsirgete lõikumise kohas saame otsitava punkti *b*. Samasugusel viisil leiame punktid *c*, *d*, *e* jne., mis näitavad mahtude 3, 4, 5 cm³ kaalu. Ühendades punktid *a*, *b*, *c*, *d*, *e* saame joone, mis annab graafilisel kujul keha kaalu olenevuse keha mahust vastavalt valemile (7).

Niisuguse graafiku abil võime leida keha kaalu ka mõne teise mahu väärtuse puhul. Olgu meil näiteks vaja



Joon. 2. Suurustevahelise sõltuvuse kujutamine graafiliselt.

leida keha kaal mahu $V=2,5 \text{ cm}^3$ puhul. Leiame horisontaalsel teljel punkti f , mis vastab mahule $2,5 \text{ cm}^3$ ja püstitame sellest punktist perpendikulaari; selle perpendikulaari ja keha kaalu valemi (7) kohaselt iseloomustaval joonel ae leiame punkti g . Tõmmates sellest punktist ristjoone kaalude G joonele leiame punkti k , mille asukoha järgi näeme, et mahule $2,5 \text{ cm}^3$ vastab keha kaal 5 g .

Meie poolt konstrueeritud horisontaalset joont, millele kandsime mahtude väärtused, nimetame abstsissiteljeks, ning vertikaalset joont, millele kandsime kaalude väärtused, nimetame ordinatteljeks. Mõlemat joont koos nimetame koordinaatideks, ja punkti O — koordinaatide alguspunktiks.

Meelevaldse punkti g jaoks võetud löiku Of ja sellega võrdset löiku kg nimetatakse punkti g abstsissiks ning löiku fg ja sellega võrdset löiku Ok nimetatakse punkti g ordinadiks.

Sõltuvuse graafik valemi (7) järgi osutus sirgeks. Kuid alati ei ole nii. Suuruste vaheline sõltuvus võib osutada kõverjooneks. Edaspidi tutvume ka niisuguste sõltuvustega.

3. Energia ja selle liigid, energia muundumine.

Energia jäävuse ja muundumise seadus.

Energia mõõtühikud. Soojuse hulga arvutus

Igapäevases elus kohtume igal sammul mitmesuguste energiaavaldustega. Lendav kivi, liikuv auto, pöörlev võll — kõik need esemed omavad energiat. Igasugune liikuv ja järelkult ka energiat omav keha võib teha tööd. Nii võib liikuv aur, liikuv vesi või tuul panna pöörlema mitmesuguseid mehhanisme. Siit me näeme, et keha energia avaldub tema võimes teha tööd.

Igapäevastest tähelepanekutest märkame, et energiat esineb mitmesuguste liikidena. Nii on meie poolt vaadeldud, teatud suunas liikuva keha (kivi, auto, võlli) liikumisenegia mehhaaniline energia.

On teada, et kõik kehad koosnevad vähimatest nähtamatutest osadest — aatomitest. Aatom koosneb tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest. Tuum omakorda koosneb prootonitest ja neutronitest, millede vahel mõjuvad tohutud sidejõud, nii et tuum kujutab endast nagu üht tervikut.

Aatomid võivad ühineda suuremateks, kuid siiski veel väga väikesteks ja nähtamatuteks osakesteks — molekulideks, mis on alalises, korrapärasel liikumises. See molekulide liikumine on erilise energialiigi — soojusenergia avalduseks. Mida intensiivsemalt toimub kehas molekulide liikumine, seda rohkem soojusenergiat omab keha.

On ka teisi energialiike, nagu elektrienergia, mida võime näha igapäevases elus tööstuses ja majapidamises, keemiline energia, mis tuleb ilmsiks keemiliste reaktsioonide ajal (seejuures purustatakse need jõud, mis seovad aatomeid molekulideks), aatomienergia, mis eraldub siis, kui õnnestub luua niisugune olukord, mille juures aatomi tuum jaguneb osadeks. Viimasel juhul purustatakse tuumasisesed sidejõud, millega kaasneb tohutul hulgal energia eraldumine.

Kõik energialiigid jaotatakse kahte suurde klassi — kineetiliseks ja potentsiaalseks energiaks. Kineetilist energiat nimetatakse ka liikumisenergiaks. Nii on lendav kivi, liikuv molekul, pöörlev rihmaratas, voolav vesi, kõik kineetilise energia avaldused. Teiselt poolt, näiteks, kuhugi kõrgel asuvasse järve kogunenud vesi, vaatamata sellele, et ta ei liigu, omab siiski potentsiaalset energiat. Seda energiat võib kasutada, s. o. võib saada tööd, kui lasta sellest järvest vett välja voolata ja panna vesiveski ratast ringi ajama. Kütuse keemiline energia on samuti potentsiaalne energia. Seda saab kasutada, kui kütust põletada, s. o. tekitada kütuse põlevellementide ühinemisreaktsiooni õhuhapnikuga, mille juures eraldub soojust. Liikuva kolviga silindris asuv teatud rõhuga aur omab samuti potentsiaalset energiat. Seda saab kasutada, kui lasta auru paisuda, s. o. anda kolvile võimalus liikuda ja teha tööd. Sedasama potentsiaalset energiat võib kasutada, kui lasta auru ava kaudu välja voolata madalama rõhuga keskkonda.

Vaadeldes mitmesuguseid energialiike, näeme nende juures üht tähelepanuväärset omadust ja nimelt, *energia omadust muunduda ühest liigist teiseks*. Tõepoolest. Suure kiirusega lendav kivi, põrgates vastu seina, peatub. See tähendab seda, et kivi mehaaniline energia kaob, kuid seejuures nii kivi ise kui ka sein soojenevad. Alasile langev vasar kuumeneb ise ja kuumutab eset, millele ta

lööb. Ilmunud soojusenergia tekib siin kadunud mehaanilise energia arvel.

Vastupidist juhtu — soojusenergia muundumist mehaaniliseks — näeme näiteks auto liikumisel. Soojusenergia eraldub bensiini põlemisel auto mootoris ning samas muutub osa soojusenergiat mehaaniliseks, mis avaldubki auto liikumises.

Majapidamises näeme me igal sammul elektrienergia muundumist valgusenergiaks (elektrilamp) või soojuseks (elektrikeetja, triikraud). Tööstuses näeme elektrienergia muundumist mehaaniliseks energiaks. See muundumine seisab selles, et elektrimootor, mis saab elektrivõrgust elektrienergiat, paneb käima tööpingi, mille liikuvad osad saavad mehaanilist energiat elektrimootori võllilt. Selle energiaga teebki pink tööd.

Teaduslikult õige ettekujutus soojusest määratleti võrdlemisi hiljuti. Alles XVII sajandi keskel valitses Lääne-Euroopas niinimetatud flogistoni-soojuseaine teooria. Selle teooria järgi määras keha soojusliku oleku kaalutu ja nähtamatu soojuseaine — flogistoni — üleminek ühelt kehalt teisele. Üks esimesi, kes selle teooria kummutas, oli M. V. Lomonossov 1744. aastal.

M. V. Lomonossov arvas, et kõik loodusnähted on omavahel seotud ja üksteisest tingitud. Sellest lähtudes püstitas ta materia ja liikumise jäävuse seaduse, mida nimetatakse Lomonossovi seaduseks: «... kõik looduses esinevad muutused toimuvad selliselt, et niipalju, kui ühelt kehalt ära võetakse, samapalju antakse teisele kehale juurde. Seega, kui materiat ühes kohas väheneb, siis sama palju tuleb seda teises kohas juurde... See üldine loodusseadus laieneb ka liikumise seadustele, et keha, mis oma jõuga liigutab teist keha, kaotab seda enese juures selle võrra, mida teine keha juurde saab.»¹

Selle seaduse laiendamine ja kohandamine soojusnähtustele toimus alles saja aasta eest. Möödunud sajandi keskpaigas tegeles rida õpetlasi ühe energialiigi teiseks muutmise uurimisega. Täpsed mõõtmised nendel muundamistel kadunud energia kohta näitasid, et teatud hulga kadunud energia asemel tekib alati teatud kindel hulk teistliiki energiat. See oli põhjuseks, et loodi energia

¹ М. В. Ломоносов, Избранные философские произведения. Госполитиздат, 1950, стр. 344.

jäävuse ja muundumise seadus, mille olemus seisab selles, et *energiat ei looda ja ta ei kao jäljetult, vaid muutub ühest energialiigist teiseks rangelt määratud vahekorras.*

M. V. Lomonossovi eespoolnimetatud tööde järgi teaduses kasutusele võetud seadust kohandati mitme teise teadlase poolt. Lõpliku kuju sai see Mayeri töödega 1842. aastal. Seda aastat loetaksegi energia jäävuse ja muundumise seaduse teadusesse viimise ajaks.

Energia jäävuse ja muundumise seadus koos mitmete teiste avastustega XIX sajandil aitas tõestada looduse ja ühiskonna tunnetamise marksistlikku dialektilist meetodit, mis vaatleb loodust ja ühiskonda ühtse tervikuna, kus nähted sõltuvad üksteisest ja on üksteisest tingitud.

Ka V. I. Lenin nägi energia jäävuse ja muundumise seaduse tohutut filosoofilist tähtsust proletariaadi maailmavaate tõestamiseks. Ta nimetas seda seadust «materialismi põhialuste kindlaksmääramiseks.»¹

Energia mõõtühikuid võib tuletada võimsuse mõõtühikute, kilovati või hobujõu abil. Energia mõõtühikuks võib võtta niisuguse energiahulga, mida ühe kilovatische võimsusega energiaallikas toodab (või kasutab tarbija) ühe tunni jooksul. Niisugust energiahulka nimetatakse kilovatt-tunniks ja tähistatakse kWh. (Tunni rahvusvaheliseks tähiseks on võetud täht h.) On ilmne, et samasuguse energiahulga võib toota 2-kilovatine energiaallikas poole tunni jooksul või 5-kilovatine ühe viiendiku tunni jooksul.

Samasugusel viisil on kindlaks määratud ka teine energiamõõtühik — hobujõutund (hjh), mis on niisugune energiahulk, mida toodab ühe hobujõuline energiaallikas ühe tunni kestel; kWh ja hjh on kõige sagedamini kasutatavad energia mõõtühikud.

Energia hulga arvutamiseks võib koostada järgmise valemi: kui võimsus on N ja aeg t , siis energia hulk E võrdub:

$$E = Nt. \quad (8)$$

Vastupidi, energiaallika (või tarbija) võimsust N võib arvutada alltoodud valemi järgi:

$$N = \frac{E}{t}. \quad (9)$$

¹ V. I. Lenin. Teosed, 14. kd., lk. 308.

Juba enne energia jäävuse ja muundumise seaduse avastamist määrati kindlaks soojusenergia (soojuse) mõõtühikuks niisugune soojuse hulk, mis kulub 1 kg vee soojendamiseks 1°C võrra. Niisugust soojuse hulka nimetatakse suureks ehk kilokaloriks (tähistatakse kcal).

Mehaanilist energiat mõõdetakse tavaliselt samade mõõtühikutega kui töödki, s.t. kilogramm-meetritega (kgm).

Vastavalt energia jäävuse ja muundumise seadusele toimub energia muundumine rangelt määratud kogustes; järelikult peab energia mõõtühikute vahel olema kindel seos. Katselisel teel on leitud, et

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgm.}$$

Seda arvu nimetatakse soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks.

Ja vastupidi,

$$1 \text{ kgm} = \frac{1}{427} \text{ kcal.}$$

Seda arvu nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks. Varem oli p. l. öeldud, et 1 kW = 102 kgm/sek, kuid 1 h = 3600 sek; seepärast

$$1 \text{ kWh} = 102 \cdot 3600 = 376\,000 \text{ kgm}$$

ehk

$$1 \text{ kWh} = 376\,000 : 427 = 860 \text{ kcal,}$$

ning

$$1 \text{ hjh} = 860 : 1,36 = 632 \text{ kcal.}$$

Erinevad ained nõuavad nende temperatuuri tõstmiseks erineval hulgal soojust. Nii näiteks kulub 1 kg terase soojendamiseks 1°C võrra ainult 0,11 kcal, s. o. peaaegu 10 korda vähem kui 1 kg vee soojendamiseks 1°C võrra.

Sel juhul öeldakse, et terase erisoojus on 10 korda väiksem kui vee oma. Seega võib öelda, et aine erisoojuseks nimetatakse soojuse hulka, mis kulub 1 kg aine temperatuuri tõstmiseks 1°C võrra. Ainete erisoojused on toodud käsiraamatutes (vt. tabelid 3 ja 4 raamatu lõpus). Erisoojust tähistatakse tähega c;

vee jaoks on $c = 1$ kcal/kg^o C;
terasel on $c = 0,11$ kcal/kg^o C.

Siin toodud erisoojust tähistavast arvust paremal pool seisab erisoojuse mõõtühik kcal/kg^o C (kilokalorit ühe kilogrammi ja ühe kraadi kohta).

Kui aine erisoojus on teada, siis ei ole raske arvutada soojuse hulka, mis kulub selleks, et soojendada ükskõik millist hulka ainet ükskõik millisele temperatuurile. Kui tähistada seda soojuse hulka tähega Q ning soojendatava keha kaalu tähega G , siis selleks, et keha kuumutada temperatuurilt t_1 temperatuurile t_2 , tuleb viia kehasse soojust

$$Q = Gc(t_2 - t_1) \text{ kcal.} \quad (10)$$

Teiselt poolt, et jahutada keha temperatuurilt t_1 temperatuurile t_2 , tuleb eemaldada soojust

$$Q = Gc(t_1 - t_2) \text{ kcal.} \quad (11)$$

4. Aine agregaatolek. Aine üleminek ühest agregaatolekust teise

Ained võivad looduses esineda kolmes agregaatolekus — tahkes, vedelas ja gaasilises.

Tahked kehad (näiteks süsi, teras, kummi) võivad alal hoida oma kuju, sest nende molekulid paiknevad üksteisele suhteliselt lähedal ning nende molekulide vahel mõjuvad tugevad sidejõud.

Vedelikkudes (näiteks vees, elavhõbedas) asetsevad molekulid samuti üksteise läheduses, kuid molekuli vahelised sidejõud on siin nõrgemad. Vedelikkude omaduseks on võtta anuma kuju, millesse nad on valatud, ja nad ei avalda oma kuju muutmisel peaaegu mingisugust vastupanu. Seejuures on vedelikul oma maht; teiste sõnadega, millist kuju me vedelikule ka ei annaks, jääb selle koguse maht ikka üheks ja samaks. Selles võib veenduda, kui valada sama hulk vedelikku erineva kujuga, kuid võrdse mahuga anumatesse.

Gaasilisel ainel (näiteks õhul) on molekulidevahelised sidejõud nõrgad. Molekulid on siin üksteisest tunduvalt suurematel kaugustel ja on pidevalt alalises liikumises. Nagu vedelikulgi, ei ole gaasil kindlat kuju ning ta võtab

enesele selle anuma kuju, milles ta asetseb. Kuid vedelikust erinevalt ei ole gaasil kindlat mahtu ja ta püüab hõivata võimalikult suurema ruumala. Kui viia teatud hulk gaasi mõnesse suurde ruumi, siis jaguneb gaas väga kiiresti kogu selles ruumis ühtlaselt laiali. Kui balloonis olevat gaasi lasta või pumbata välja, siis täidab ballooni jäänud gaas selle ühtlaselt.

Tahket, vedelat või gaasilist olekut nimetatakse aine agregaatolekuks. Üks ja sama aine võib esineda kolmes agregaatolekus. Näiteks jää, vesi ja aur. Suure panuse andis teadusele kehade oleku kohta M. V. Lomonossov. XVIII sajandi keskpaiku arendas ta reas oma tööd õpetust ainete molekulaarkineetilisest olekust (s.o. sellest, et aine koosneb molekulidest, mis on alalises liikumises) ja rakendas seda õpetust paljude nähtuste selgitamiseks, näiteks keemias ja soojusõpetuses.

Paljud keemilised elemendid võivad looduses esineda nn. v a b a s o l e k u s ning niisuguseid ühest keemilisest elemendist moodustatud aineid nimetame lihtaineteks. Nii on lihtaineteks lämmastik, hapnik, vask, hõbe jne.

Paljude ainete molekulid koosnevad erisugustest aatomitest. Niisuguseid aineid nimetatakse lihtaineteks ning nad kujutavad enesest mitme keemilise elemendi ühendit.

Aatomite ja molekulide kaalud on äärmiselt väikesed ja praktiliselt oleks ebamugav iga kord arvestada, millise osa grammist nad moodustavad. Seepärast kasutatakse teaduses erilist viisi, mis seisab järgmises: vesiniku aatomi kaal (kõige kergem aatomite hulgast) loetakse võrdseks ühega ning teiste elementide aatomkaalud näitavad, mitu korda on nende elementide aatomid vesiniku aatomist raskemad. Seda arvu nimetatakse elemendi a a t o m k a a l u k s.

Keemiliste elementide nimetusi on hakatud tähistama antud elemendi ladinakeelse nime järgi ühe või kahe tähega. Nii tähistatakse lämmastikku selle ladinakeelse nimetuse nitrogenium järgi tähega N, vesinikku selle nimetuse hydrogenium järgi H, hapnikku — oxygenium O, seatina (pliid) nimetuse plumbum järgi Pb.

Raamatu lõpus tabelis 5 on toodud andmeid peamiste soojustehnikas ettetulevate keemiliste elementide kohta.

Aine koostist iseloomustatakse tema keemilise vale-

miga, mis näitab, millistest elementidest ta koosneb ja kui palju aatomeid kuulub antud aine igasse molekuli. Nii on vee valem H_2O . See valem räägib sellest, et vee molekul koosneb kahest vesiniku ja ühest hapniku aatomist. Hapniku keemiline valem on O_2 , mis tähendab, et üks hapniku molekul koosneb kahest hapniku aatomist. Süsihappegaasi keemiline valem on CO_2 , s.o. süsihappegaasi molekul koosneb ühest süsiniku aatomist ja kahest hapniku aatomist.

Teades aine keemilist valemit ja tema koostises olevate elementide aatomkaalusid, võime leida molekuli kaalu, mis näitab, mitu korda antud aine molekulid on raskemad vesiniku aatomist. Nii on vee (H_2O) molekulkaal:

$$2 \cdot 1 + 16 = 18.$$

Siin on $2 \cdot 1$ kahe vesiniku aatomi kaal ja 16 — ühe hapniku aatomi kaal. Süsihappegaasi CO_2 molekulkaal, mille määrame samal viisil, on

$$12 + 2 \cdot 16 = 44.$$

Paljudes soojustehnilistes arvutustes osutub soodsamaks kasutada aine hulga mõõtühikuks kilomooli. *Aine kilomool on nii palju ainet kilogrammides, kui suur on selle aine molekulkaal.* Kui süsihappe molekulkaal on 44, siis üks kilomool süsihappegaasi kaalub 44 kg. Tabelis 6 on toodud nende ainete molekulkaalud, mida läheb vaja soojustehnilistes arvutustes.

Nähte hulgas, mida meil tuleb vaadelda ja tundma õppida, esineb selliseid, kus reaktsioonist osavõtvad ained kaovad, kuid nende asemele tulevad teised ained, mis oma omadustelt erinevad kaduma läinud ainetest. Näitena võib nimetada kütuse põlemisprotsessi. Iga kütuse koostisse kuuluvad süsinik, vesinik, lämmastik jm. ained. Kütuse põlemisel aga saadakse hoopis teised ained — süsihappegaas, veeaur jt.

Nähteid, mis kaasnevad uute ainete tekkimisega, nimetatakse keemilisteks reaktsioonideks.

Reaktsioonist osavõtvate ainete kaaluliste koguste täpne uurimine võimaldas avastada aine jäävuse seaduse, mis kõlab: *reaktsiooni astuvate ainete kaal on alati võrdne saadud ainete kaaluga.* Selle seaduse avastas XVIII sajandil M. V. Lomonossov.

On teada, et kuumutamisega võib paljud tahked ained muuta vedelateks ja vedelad ained gaasilisteks.

Tahke aine üleminekut vedelasse olekusse nimetatakse sulamiseks. Vedela aine vastupidist üleminekut tahkesse olekusse nimetatakse tardumiseks või hängumiseks. Temperatuur, mille juures toimub sulamine, on erisugustel ainetel erinev, kuid ühe ja sama aine puhul on ta täiesti kindel suurus. Aine tardumine toimub samal temperatuuril kui sulaminegi.

Selleks et tahke aine sulaks, on seda alguses vaja kuumutada sulamistemperatuurini. Sulamisprotsess ise nõuab ka teatud kindla hulga soojust. Seda soojuse hulka nimetatakse sulamissoojuseks ja mõõdetakse kcal/kg.

Kogu sulamisprotsessi kestel jääb sulava aine temperatuur püsivaks.

Koostame selleks valemi, et arvutada soojuse hulka, mis kulub 1 kg tahke aine sulatamiseks. Olgu selle aine temperatuur t_1 ning sulamistemperatuur t_s ; kui aine erisoojus on c , siis soojuse hulk, mis kulub aine kuumutamiseks sulamistemperatuurini, on $c(t_s - t_1)$. Kui selle aine sulamissoojus on m (võetakse tabelist 7 raamatu lõpus), siis 1 kg aine sulatamiseks vajalik kogu soojus

$$Q = c(t_s - t_1) + m. \quad (12)$$

Aine vedelast olekust gaasilisse olekusse ülemineku protsess (seda nimetatakse aurustumiseks) toimub samuti ühe ja sama aine puhul täiesti kindlal temperatuuril, kuid sõltub seejuures suurel määral sellest, millise rõhu all on vedelik. Vesi muutub auruks rõhul 1 ata temperatuuril ligikaudu 100°C , kuid rõhul 10 ata hakkab vesi keema alles temperatuuril 179°C .

Seega on vaja selleks, et muuta vett auruks, kõigepealt kuumutada võetud veehulk keemistemperatuurini. Selleks et keeva vett muuta edasi auruks, tuleb jätkata soojuse juurdejuhtimist. Kui selle juures rõhk jääb püsivaks, siis soojuse juurdejuhtimine ei tõsta temperatuuri, vaid soojus kulub kõik vee muutmiseks auruks. Soojuse hulka, mis kulub selleks, et muuta 1 kg vett auruks, nimetatakse aurumissoojuseks (latentseks soojuseks) ja tähistatakse tähega r . See oleneb samuti sellest, millisel rõhul toimub aurustumine. Vee puhul on 1 ata juures $r = 539$ kcal/kg.

Nüüd ei ole raske arvutada üldist soojusekulu selleks, et muuta auruks 1 kg vett, mille temperatuur on $t^{\circ}\text{C}$. Kui antud rõhu korral keemistemperatuur on t_k , siis soojuse hulga võime leida valemi järgi

$$Q = c(t_k - t) + r, \quad (13)$$

kus c on vee erisoojus; madalamate rõhkude puhul võib võtta $c = 1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$.

Tabelis 8 raamatu lõpus on toodud mõnede ainete keemistemperatuurid ja nende aurustumissoojused.

5. Gaaside omadused. Gaasi rõhu ja temperatuuri mõõtmine

Vaatleme lähemalt ainete üleminekut vedelast olekust gaasilisse rõhul 1 ata, mis on ligilähedane meid ümbritseva õhkkonna rõhule merepinnal. Nagu juba oli öeldud, muutub vesi sel juhul gaasiliseks temperatuuril 100°C (täpsemalt $99,1^{\circ}\text{C}$ juures); kui veeaurult, mille temperatuur on 100°C , võtta soojust ära, siis võib see aur muududa veeks. Teine vedelik, näiteks eeter, keeb rõhu 1 ata puhul temperatuuril 35°C . Gaasilist eetrit temperatuuril 35°C võib muuta soojuse ärajuhtimise teel vedelikuks. Selleks, et muuta vedelaks ammoniaakgaasi, mida kasutatakse külmutusseadmetes, tuleb, kui ta viibib atmosfääri rõhul, jahutada enne temperatuurini $-33,5^{\circ}\text{C}$. Lämmastik, mis on õhu peamiseks koostisosaks, tuleb jahutada temperatuurile -196°C , hapnik kuni -183°C ning heelium kuni -269°C .

Toodud andmetest näeme, et ühed gaasid (veeaur, eeter) muutuvad atmosfääri rõhul kergesti vedelaks, teised aga (hapnik, lämmastik, heelium) — raskesti, ja nõuavad seejuures erilisi tingimusi.

Tehnikas on hakatud neid gaasilisi aineid, mis atmosfääri rõhul kergesti veelduvad, nimetama auruks, neid aga, mis veelduvad raskesti — gaasideks.

Gaasidel, kuna nad on väga kaugel vedelast olekust, on molekulidevahelised sidejõud sedavõrd nõrgad, et neid võib jätta arvestamata. Selline eeldus kergendab tunduvalt gaaside tundmaõppimist, ning seadusi, millelele nad alluvad, on võrdlemisi kerge avaldada. Niisuguseid gaase nimetatakse ideaalseteks gaasideks.

Teine lugu on aurudega. Nendel on sidejõud küllalt suured, mida ei tohi sellepärast arvestamata jätta. Aurude omadused erinevad ideaalsete gaaside omadustest.

Soojustehnikas tuleb meil tegemist teha mitmesuguste gaaside ja aurudega. Neid on soodne kasutada soojuste transportimiseks suurtele vahemaadele ning mitmesugusteks tehnoloogilisteks protsessideks — kuivatamiseks, keetmiseks, kuumutamiseks; eriti soodsad on nad selleks, et muuta soojusenergiat mehaaniliseks energiaks. Seepärast tulebki meil üksikasjaliselt tutvuda gaaside ja aurude omadustega.

Gaasilist ainet, mida tarvitatakse ükskõik millises soojustehnilises protsessis, nimetatakse termodünaamikas **töötavaks kehaks**.

Soojustehnikas tuleb meil tegemist teha gaasidega, mis esinevad õhus ja põlemisproduktides; need on hapnik, lämmastik, süsihappegaas, veeaur jne.

Põlemiseks vajalik hapnik võetakse atmosfääriõhust.

Õhk kujutab enesest mitmesuguste gaaside segu. Peamiselt koosneb õhk kahest gaasist — hapnikust ja lämmastikust; esimest on kaalu järgi 23,2% ja mahuliselt 21,0%; teist kaaluliselt 76,8% ja mahuliselt 79,0%. Peale nende leidub õhus ka veel teisi gaase — näiteks süsihappegaasi ja veeauru.

Väga tähtis ülesanne soojustehnikas on veeaurul. Seda kasutatakse töötava kehana aurumasinates, auruturbiinides ja kütte otstarbel. Niisugusel juhul ei ole veeaur kaugel vedelast olekust ega oma seetõttu ideaalse gaasi omadusi, ning seepärast toimub tema tundmaõppimine iseseisvalt. Veeaur kuulub ka põlemisproduktide koostisse. Sel juhul on ta aga vedelast olekust kaugel ja on seepärast gaasiliste omadustega. Samuti võime gaasina vaadelda õhus leiduvat veeauru.

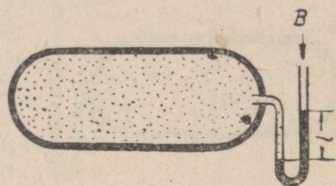
Anumasse suletud gaas avaldab selle seintele ühtlast rõhku. See rõhk on molekulide löökide tulemus nende põrkamisel vastu anuma seinu.

Gaasi olekut iseloomustavad rida suurusi. Neid suurusi nimetatakse gaasi oleku parameetriteks. Gaasi rõhk on üks suurusi, mis iseloomustab tema olekut, seega on rõhk üks gaasilise oleku parameetreid.

Olgu anumal (joon. 3) gaas. Läbi anuma seinu ulatugu kõver toru, mille teine ots on lahti ja milles asub

vedelik. Seejuures ilmneb, et vasakult surub torus olevale vedelikule gaas ning paremalt atmosfäärirõhk.

Atmosfäärirõhk, teisiti väljendatud baromeetriline rõhk on muutlik ja oleneb ilmastikust. Normaalseks loetakse niisugust rõhku, mis tasakaalustab 760 mm kõrguse elavhõbedasamba temperatuuril 0°C (viide elavhõbeda temperatuurile on tehtud seepärast, et selle erikaal oleneb temperatuurist, ja 760 mm kõrgune elavhõbedasammas mõnel teisel temperatuuril omab teistsugust kaalu ja mõjub oma põhjale teistsuguse rõhuga).



Joon. 3. Anumas oleva ülerõhu mõõtmine.

Kui vedelik paikneb kõveras torus selliselt, nagu näidatud joonisel (joon. 3), s. o. et selle parempoolne sammas

on kõrgem kui vasakpoolne, siis näitab see, et rõhk anumaskes on suurem kui atmosfäärirõhk. Vedelikusammaste kõrguse erinevus toru harudes näitab, et anumaskes valitsev rõhk ületab atmosfääri rõhu vedeliku samba kõrguse l võrra. Teiste sõnadega kujutab vedeliku samba kõrgusega l mõõdetav rõhk anumaskes valitsevat ülerõhku atmosfäärirõhu suhtes. Kui nüüd ülerõhule, mida tähistame tähelga $p_{\bar{u}}$, lisada baromeetriline rõhk, mida tähistame tähelga B , siis saame gaasi üldise rõhu anumaskes. Seda nimetatakse absoluutseks rõhuks ja tähistatakse tähelga p_a . Seega võime kirjutada

$$p_a = p_{\bar{u}} + B. \quad (14)$$

Tavaliselt on aurukateldes ülerõhk $p_{\bar{u}}$ tunduvalt suurem kui B ; seepärast neil juhtudel baromeetrilist rõhku täpselt ei mõõdetata, vaid ülerõhule lisatakse lihtsalt l at.

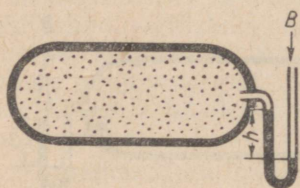
Kui näiteks manomeeter näitab 10 at, siis absoluutrõhk on 11 at.

Riista, millega mõõdetakse ülerõhku, nimetatakse manomeetrikaks. Seepärast nimetatakse sageli ülerõhku ka manomeetriliseks rõhuks.

Joonisel 3 kujutatud manomeetrit nimetatakse vedelikmanomeetrikaks ja seda kasutatakse väikeste rõhkude mõõtmiseks.

Võib ka juhtuda, et vedelikmanomeetri ühendamisel

gaasi sisaldava anumaga võtab vedelikusammal joonisel 4 näidatud kuju, s. t. vedelikusammal ulatub vasakus harus kõrgemale kui parempoolses. See tähendab, et toru parempoolse samba vedelikult mõjuv baromeetiline rõhk on suurem kui anumal oleva gaasi absoluutne rõhk, ning gaasi absoluutne rõhk ja vedeliku samba kõrgus h tasakaalustavad baromeetrilise rõhu.



Joon. 4. Hörenduse mõõtmine anumal.

Teiste sõnadega mõõdab vedeliku samba kõrgus h seda rõhku, mille võrra anumal oleva gaasi rõhk jääb madalamaks baromeetrisest rõhust. Seda puudujääki kuni baromeetrisest rõhuni nimetatakse vaakuumiks ehk hõrenduseks (ka alarõhuks). Kui vaakuumi tähistada tähega h , siis võime eespoolöeldu põhjal kirjutada:

$$p_a + h = B. \quad (15)$$

Teisiti võib seda kirjutada ka järgmiselt

$$p_a = B - h. \quad (16)$$

Riista, millega mõõdetakse vaakuumi, nimetatakse vaakuummeetriks. Katelseadmetes mõõdetakse niisuguste riistadega tõmmet, ja seepärast nimetatakse seal neid tõmbemõõtjateks.

Selleks et saada anumal oleva gaasi absoluutset rõhku, kui see on kõrgem atmosfäärirõhust, tuleb manomeetri näidule liita baromeetri näit. Kui anumal oleva gaasi rõhk on atmosfäärirõhust madalam, siis tuleb vaakuummeetri näit baromeetri näidust lahutada.

Seejuures tuleb meeles pidada, et

$$1 \text{ at} = 735,6 \text{ mm Hg-sammast}$$

$$1 \text{ at} = 10\,000 \text{ mm vs} = 10 \text{ m vs.}$$

Kui mingit rõhku, mis on väljendatud vedelikusamba kõrgusega, tahetakse ümber arvutada atmosfääridesse või selle osadesse, siis tuleb elavhõbedasamba näit jagada arvuga 735,6 ja veesamba näit mm jagada arvuga 10000.

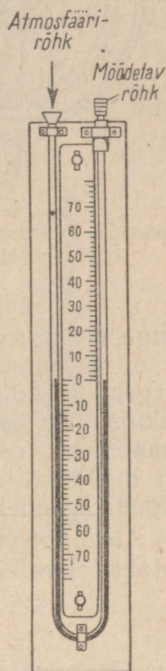
Nagu oli seletatud eespool, kasutatakse väikeste ülerõhkude ja hõrenduste mõõtmiseks vedelikmanomeetreid (vaakuummeetreid). Niisugune manomeeter (joon. 5) kuju-

tab enesest U-kujulist mõlemast otsast lahtist toru, mis on täidetud vedelikuga (veega või elavhõbedaga); vahel on need torud 0,8 kuni 1 m pikkused. Nad kinnitatakse lauale, mille küljes on jaotustega skaala. Vedelikku valatakse U-toru-manomeetrisse tavaliselt nii palju, et nivoo ulatuks nulljaotuseni. Joonistel 3 ja 4 on näidatud niisuguste riistade ühendamine anumatega, milles mõõdetakse rõhku.

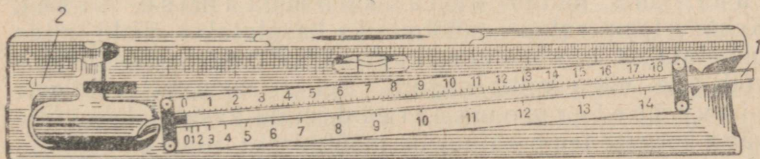
Selleks et väikeste ülerõhkude ja hõrenduste mõõtmisel saavutada suuremat täpsust, tehakse manomeetri toru üks haru kallakuna. Sellisel viisil on enamasti valmistatud kõik aurukatelde kollete ja suitsukäikude tõmbemõõtjad. Niisugused tõmbemõõtjad (joon. 6) täidetakse piiritusega, mis on paremaks nähtavuseks värvitud. Toru 1 ühendatakse mõõdetava agregaadiga külge, toru 2 on lahtine. Kaldtoru kõrval olev skaala on enamikul juhtudel ehitatud nii, et jaotused annavad hõrenduse mm vs. Kui toru 1 ühendada kohaga, kus gaasi rõhk on madalam (ehk hõrendus selles kohas suurem), ja toru 2 ühendada kohaga, kus rõhk on suurem (ehk hõrendus väiksem), siis näitab riist rõhkude erinevust (või, mis on sama mis hõrenduste vahe). Sel juhul nimetatakse riista

diferentsiaal-tõmbemõõtjaks. Tõmbemõõtja õigeks ülesseadmiseks on riist varustatud vesiloega, mis on monteeritud tõmbemõõtja aluslaua külge.

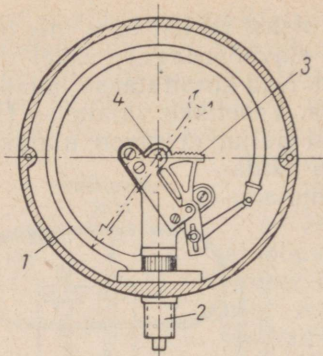
Suurte ülerõhkude mõõtmiseks kasutatakse vedru-toru-manomeetreid. Kõige enam levinud on



Joon. 5. Vedelikmanomeeter.



Joon. 6. Kaldtoruga tõmbemõõtja.



Joon. 7. Bourdoni toruga manomeeter.

Bourdoni manomeeter (joon. 7). See koosneb kõverast torust 1, mis töötab vedruna. Selle toru üks ots on avatud ja ühendatakse manomeetri kere nipli 2 abil keskkonnaga, mille rõhku mõõdetakse. Teine vedrutoru ots on kinni joodetud. Avatud ots on kohtkindel, kinnine ots aga vaba ja sidestatud liigendite abil hammasülekan- dega, mis koosneb sektorist 3 ja joonisel näitamata hammasrattast; viimase küljes on kinni osuti 4. Manomeetri ühendamisel katla või torusti-

kuga mõjub vedrutorule katla ja atmosfääri rõhkude vahe, s. o. vedrutoru on ülerõhu mõju all. See rõhk püüab toru sirgeks suruda ja toru vaba ots liigub; seejuures hakkab liikuma ka sektor 3 ning koos sellega hammasrattas ja manomeetri osuti. Liikumine on seda suurem, mida suurem on mõõdetav rõhk. Manomeetrile kantud skaalalt saab lugeda mõõdetavat rõhku.

Absoluutrõhku, mida mõõdetakse atmosfäärides, tähistatakse tavaliselt ata; kui näiteks on kirjutatud

$$p=10 \text{ ata,}$$

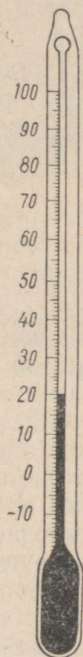
siis tähendab see, et absoluutrõhk on 10 at. Ülerõhku tähistatakse atü; kui näiteks on kirjutatud

$$p=4 \text{ atü,}$$

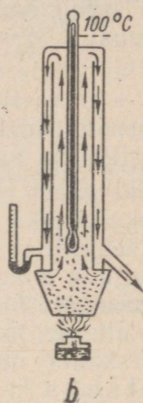
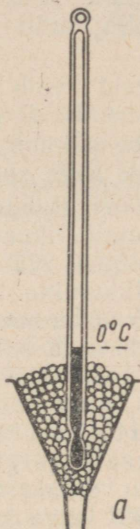
siis tähendab see, et ülerõhk on 4 at.

Gaasi oleku parameetrite hulka kuulub ka temperatuur, mis näitab keha kuumutamise astet. Kehade temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse riistu, mida nimetatakse termomeetriteks. Termomeetrite ehitus võib olla väga mitmesugune. Selles raamatus vaatleme elavhõbe termomeetreid, mida kasutatakse mitte väga kõrgete temperatuuride mõõtmiseks, ning elektrilisi püromeetreid kõrgemate temperatuuride mõõtmiseks.

Vedeliktermomeetrite ehitus põhineb kehade omadusel paisuda kuumenemisel ja tõmbuda kokku jahtumisel. Kirjeldame elavhõbetermomeetri ehitust (joon. 8). Peenesse torusse, mille alumine ots on jämedam, valatakse elavhõbedat ja paigutatakse sulavasse jäässe (joon. 9). Elavhõbedat tase tähistatakse numbriga 0° (null kraadi). Seejärel paigutatakse see toru (joon. 9, b) keeva vee aurusse (atmosfäärirõhul). Elavhõbe torus paisub ja tema nivoo tõuseb uude



Joon. 8. Elavhõbetermomeeter.



Joon. 9. Termomeetri püsivtäppide määramine.

kõrgemasse asendisse. Uus tase märgitakse arvuga 100° (sada kraadi). Vahemik 0 ja 100 vahel jaotatakse 100 osaks; selleks kasutatakse erilist nn. rahvusvahelist termodünaamilist skaalat. Seda nimetatakse niiviisi sellepärast, et ta on võetud kasutusele kogu maailmas ja põhineb termodünaamika põhiseadustel, seejuures ei ole termomeetril saadud jaotused üksteisega täpselt võrdsed; iga niisugust jaotust nimetatakse kraadiks. Nii saadakse temperatuuri sajakraadiline skaala (sentikraadskaala), mida nimetatakse ka Cel-

siuse skaalaks ja tähistatakse °C. Kui nüüd meie poolt ehitatud termomeeter asetada näiteks vedelikku, mille temperatuuri tahame mõõta, ja elavhõbeda sammas tõuseb näiteks 20-nda jaotuseni (joon. 8), siis see tähendab, et selle vedeliku temperatuur on 20° C.

Seega on Celsiuse skaala algpunktiks jää sulamistapp. On olemas ka teisi skaalasid (Reamür, Fahrenheit), kuid NSV Liidus neid ei kasutata.

Termomeetri skaalajaotusi, kui kasutada sama rahvusvahelist termodünaamilist skaalat, võib pikendada ka 100°-st kõrgemale ja 0°-st allapoole. Temperatuuri tähistamiseks alla nulli kasutatakse märki — (miinus).

Elavhõbetermomeetreid võib kasutada temperatuuride -39° ja ligikaudu $+550^{\circ}$ C vahemikus. Madalamatel temperatuuridel elavhõbe külmub, kõrgematel temperatuuridel tekivad aga klaasis liiga suured pinged.

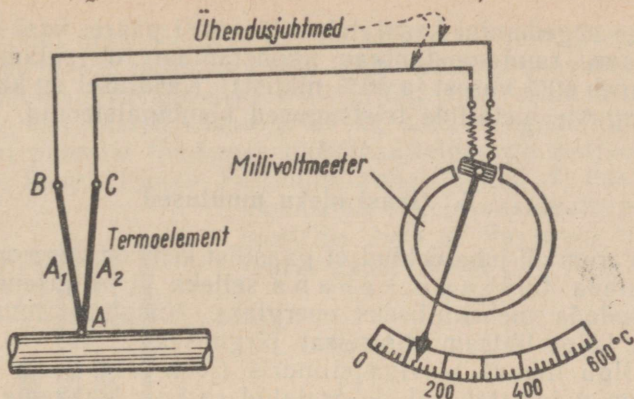
Kui gaasi temperatuuri alandada, siis hakkavad selle molekulid ikka aeglasemalt liikuma. Arvutustega on kindlaks tehtud, et temperatuuril 273° alla nulli peab lõppema igasugune molekulide liikumine. Seda seni praktikas veel saavutamata olekut võib võtta uueks temperatuuri arvestamise aluseks ja nimetada seda nulliks. Erinevalt sajakraadise skaala nulltapist nimetatakse seda olekut absoluutseks nulliks, ning kogu skaalat temperatuuride absoluutskaalaks. On ilmne, et jää sulamistapp absoluutskaala järgi on 273° , ja igasugune keha, mille temperatuur sajakraadisel skaalal on t° , on absoluutskaala järgi 273° võrra kõrgem ning negatiivseid temperatuure absoluutskaala järgi ei esine. Nagu mõlema skaala kirjeldusest nähtub, erinevad sajakraadine ja absoluutskaala teineteisest ainult temperatuuri arvestamise algustäpi poolest.

Kui tähistada temperatuuri absoluutskaala järgi tähega T ja sajakraadise skaala järgi t , siis on nende vahel järgmine sõltuvus:

$$t = T - 273; \quad (17)$$

$$T = t + 273. \quad (18)$$

Temperatuure, mida arvestatakse absoluutsest nullist, tähistatakse °K. Kui näiteks on kirjutatud $T = 500^{\circ}$ K, siis tähendab see, et temperatuur on 500° temperatuuride abso-



Joon. 10. Termoelektriline püromeeter (termopaar).

luutskaala järgi. Sajakraadise skaala järgi vastaks sellele valemil (17) järgi temperatuur

$$t = T - 273 = 500 - 273 = 227^{\circ} \text{C}.$$

Kuna elavhõbetermomeetreid saab kasutada suhteliselt madalate temperatuuride mõõtmiseks, siis kõrgete temperatuuride mõõtmiseks kasutatakse teisi riistu. Nende hulgas on laialdaselt levinud termoelektrilised püromeetrid (termopaarid), mis võimaldavad mõõta kõrgemaid temperatuure ja kanda nende näidud kauge vahemaa taha. Termopaari ehitus on toodud joonisel 10. Võetakse kaks erinevast metallist traati A_1 ja A_2 ning joodetakse või keevitatakse nende otsad A kokku; kaks teist otsa C ja B ühendatakse traatjuhtmete abil elektrilise mõõteriistaga — millivoltmeetriga. Kui nüüd ots A ühendada kõrge temperatuuriga kehaga (meie juhul — toru, mille külge on joodetud ots A), või asetada kõrge temperatuuriga keskkonda, mille temperatuuri tahetakse mõõta, ning on võetud kasutusele abinõud, et temperatuur punktides B ja C ei muutu, siis saame juhtmetes elektrivoolu, mis paneb riista osuti seda enam hälbima, mida kõrgem on temperatuur kohas A . Riistadel on sageli skaalad, mis võimaldavad temperatuuri lugeda otse mõõteriista skaalalt.

Termopaaride valmistamiseks ei sobi iga metallidepaar.

Kõige sagedamini kasutatakse järgmisi paare: vask-konstantaan, raud-konstantaan (konstantaan on sulam, mis koosneb 60% vasest ja 40% niklist)¹. Kasutusel on ka mitmesuguste metallide teistsugused kombinatsioonid.

6. Gaasi oleku muutused

Varem oli juba öeldud, et gaasilist keha on väga soodne kasutada töötava kehana selleks, et soojusenergiat muundada mehaaniliseks energiaks. Niisuguse muundamise kõige lihtsam viis seisab järgmises.

Olgu liikuva kolviga silindris (joon. 11) gaas. Kolvi liikumist takistab kolvile asetatud raskus. Hakkame gaasile soojust juurde juhtima — kuumenemisel gaas paisub ja tõstab raskust. Seega teeb gaas oma paisumisel raskust tõstes tööd, mille tõttu raskuse potentsiaalne energia suureneb. See energia (mehaaniline) tekkis soojusenergia arvel, mida juhiti juurde gaasile.

Gaasilistel kehadel on soojenemisel kõige suurem paisumine ja seetõttu osutuvad nad energia muundamisel kõige soodsamateks töötavateks kehadeks.

Kui gaas mõnda oma parameetrit järk-järgult muudab, siis öeldakse, et toimub gaasi oleku muutumise protsess.

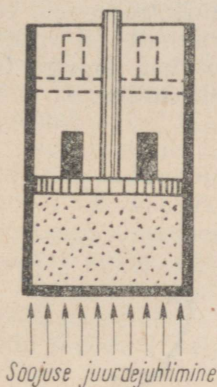
Oleku muutumise protsesside uurimisel on väga oluline teada, kuidas mõjub ühe parameetri muutumine teisele, näiteks kuidas muutub gaasi rõhk erikaalu muutumisel ja vastupidi.

Sageli kasutatakse selleks graafilisi võtteid, mille põhimõtet me kirjeldasime juba p. 2. Antud juhul, s. t. selleks et kujutada rõhu ja erimahu muutumise olenevust, kasutame nn. p v -diagrammi. Niisugune nimetus on tuletatud seepärast, et abstsissiteljele kantakse erimahu v ja ordinaatteljele gaasirõhu p väärtused. Näitame, kuidas niisuguse diagrammi abil kujutatakse gaasi olekut ja gaasi oleku muutumise protsessi.

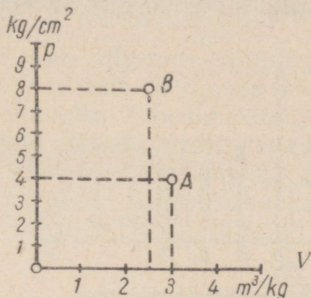
Joonisel 12 on kujutatud p v -diagramm, mida võib näha koordinaattelgede juurde kirjutatud tähtedest. Lepime kokku mastaabi suhtes. Vastaku erimahule 1 m³/kg telje-

¹ Nimetatud paarid leiavad kasutamist temperatuuril kuni 600°. Kõrgemal temperatuuril kasutatakse kromel-alumel (kuni 1100°C) ja plaatina-plaatinaroodium (kuni 1600°C) termopaare. Toim.

lõik 6 mm ning rõhule 1 kg/cm^2 teljelõik 3 mm. Oletame, et gaasi olekut, mida me graafiliselt kujutada soovime, iseloomustavad parameetrid $v=3 \text{ m}^3/\text{kg}$ ning ordinaatteljel punkt, mis vastab rõhule $p=4 \text{ at}$, s. o. 4 kg/cm^2 . Kummastki punktist tõmbame koordinaattelgedega ristjooned. Nende kahe ristjoone lõikumine annab punkti A , mis iseloomustab sellele vastavate parameetrite $p=4 \text{ at}$ ja $v=3 \text{ m}^3/\text{kg}$ juures gaasi olekut.



Joon. 11. Soojusenergia muundumine mehaaniliseks gaasi soojendamisel liikuva kolviga silindris.



Joon. 12. Gaasilise keha oleku kujutamise graafiliselt.

Lahendame vastupidise ülesande. Olgu samal diagrammil antud punkt B . Tuleb kindlaks teha, milline gaasi olek sellele vastab. Selleks laseme sellest punktist kaks perpendikulaari — ühe abstsissiteljele ja teise ordinaatteljele. Nende ristjoonte lõikumiskohtadest abstiss- ja ordinaattelgedega loeme mastabi järgi, et sellele punktile vastab gaasi olek

$$p=8 \text{ at};$$

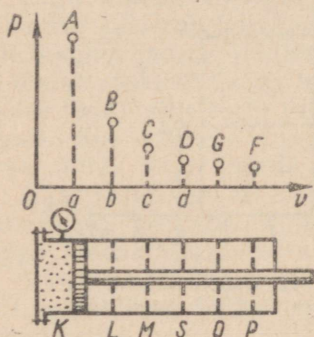
$$v=2,5 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Seega iseloomustab punkt p - v -diagrammis gaasi teatud olekut.

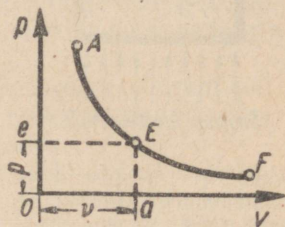
Näitame nüüd, kuidas graafiliselt saab kujutada peale gaasi oleku ka oleku muutumise protsessi ja nimelt gaasi rõhu olenemist tema erimahust.

Asetsegu kolviga silindris 1 kg gaasi (joon. 13). Paigutame silindri kohale p - v -diagrammi. Erimahtude soodsamaks mastaabiks valime abstsisssteljele niisugused lõigud, mis vastaksid silindri kõrguse osadele, millesse mahub vaadeldava gaasi 1 kg (silinder on joonisel 13 paigutatud horisontaalselt, nii et selle kõrgust loetakse vasakult paremale).

Seega kui silindri osa kõrgus, milles asetseb gaas, võrdub näiteks lõiguga KL , siis p - v -diagrammil on silindri maht, ja tähendab ka gaasi maht, kujutatud lõiguga Ob ; mahule, mille kõrgus on KM , vastab lõik Oc jne.



Joon. 13. Gaasi oleku muutuse graafiline kujutamine.



Joon. 14. Silindris oleva gaasi oleku muutumise protsessi kujutamine.

Möödetagu gaasi rõhku tema algolekus selleks valitud mastaabis joonlõiguga Aa . Seega iseloomustab punkt A gaasi olekut silindris. Kui nüüd lasta gaasi paisuda, siis gaasi olek muutub. Selleks et kujutada graafiliselt gaasi oleku muutumise protsessi, nihutame vähehaaval kolvi ja määrame manomeetri abil, milline rõhk valitseb silindris kolvi mitmesuguste üksteisele küllalt lähedaste asendite puhul. Olgu need asendid L, M, S, Q, P (joonisel on nad kujutatud punktidenä). Kolvi nende asendite jaoks võime siis märkida punktid, mis iseloomustavad gaasi olekut. Olgu meie joonisel nendeks punktideks A, B, C, D, G, F . Seega me näeme, et gaasi paisumisel tema rõhk langes. Kuna rõhu langemine toimus sujuvalt, siis võime punktid A, B, C, D, G, F ühendada sujuva kõveraga (seda on teh-

tud teisel joonisel joon. 14) ja seega joon AF näitab meile rõhu muutumist, kui muutub erimaht, ehk teiste sõnadega iseloomustab see kõver gaasi oleku muutumist. Nüüd võime kõvera AF järgi igasuguse erimahu väärtuse juures (s. t. igasuguse kolvi asendi puhul) leida rõhu väärtuse. Olgu näiteks vaja teada, milline rõhk vastab erimahu väärtusele, mida mõõdame lõigu Oa pikkusega. Selleks tõmbame punktist a perpendikulaarjoone aE kuni lõikumiseni kõvera AF . Lõikumiskohast E laseme perpendikulaari ordinaatteljele; saame punkti e . Nüüd võime arvude järgi, kui need on ordinaatteljele märgitud, leida otsitud gaasi rõhu suuruse.

Neil juhtudel kui kõver AF peab selgitama ainult parameetrite muutumise iseloomu ja nende arvulised väärtused ei ole vajalikud, siis ei märgita koordinaattelgedele mastaapi. Joonisel 14 on toodud näiteks protsessi iseloomustav kõver, ilma et p ja v väärtused oleksid märgitud.

Graafilisel teel on mugav kujutada kõige mitmekesisemaid gaasi oleku muutuse olenevusi. Edaspidi tuleb meil seda moodust palju kasutada.

7. Gaasi oleku muutumise protsessid jääval mahul ja jääval rõhul

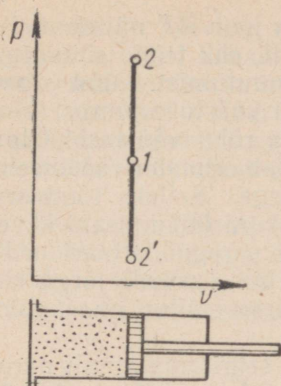
Vaatleme nüüd kõige tähtsamaid gaasi oleku muutumise protsesse. Esmajärjekorras vaatleme, mis juhtub gaasiga sel puhul, kui talle juhtida soojust juurde või ära ilma mahtu muutmata.

Oletame, et kolviga silindris on gaas (joon. 15) ja mingil viisil hoitakse kolbi kogu aeg ühes ja samas asendis. Seega asuks gaas nagu mõnes kinnises balloonis.

Gaasi kuumutamise või jahutamise protsessi nimetatakse sel juhul oleku muutumise protsessiks jääval mahul; seda tähistatakse $v = \text{const}$; siin täht v tähendab erimahu; sõna const on võetud ladina sõnast constantus ; mis tähendab püsivat.

Gaasile soojuse juurdejuhtimine suurendab sel juhul molekulide liikumiskiirust, mistõttu gaasi temperatuur ja rõhk tõusevad; vastupidiselt, soojuse ärajuhtimine gaasilt alandab nii temperatuuri kui ka rõhku. Näitame gaasi oleku muutumise iseloomu p - v -diagrammil (joon. 15).

Selleks, nagu varemgi, kanname üles punktid, mis näi-



Joon. 15. Gaasi oleku muutumise protsess jääval mahul ($v = \text{const}$).

juhtimise korral (jahutamisel) aga alla. Seega kujutab joon 1—2 soojendamise protsessi, joon. 1—2' aga gaasi jahutamise protsessi, kui $v = \text{const}$.

On kindlaks tehtud, et gaasile soojuse juurde- ja ärajuhtimisel protsessis, kui $v = \text{const}$, muutub rõhk proportsionaalselt absoluuttemperatuuriga. Kui absoluutne algtemperatuur on T_1 , lõpptemperatuur T_2 ning algrõhk p_1 ja lõpprõhk p_2 , siis valitseb nende suuruste vahel sõltuvus

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (19)$$

See olenevus tähendab, et lõpprõhk on nii mitu korda suurem (või väiksem) algrõhust, kui palju kordi absoluutne lõpptemperatuur on kõrgem (või madalam) absoluutsest algtemperatuurist. Selle olenevuse kaudu võib leida igasuguse rõhu või temperatuuri, kui ülejäänud kolm suurust on tuntud (vt. joon. 10). Tuleb ka silmas pidada, et p_1 ja p_2 on absoluutrõhud, ja arvutustes tuleb mõlemad väärtused väljendada ühtedes ja samades mõõtühikutes (mm Hg või at).

Vaadeldud protsessi iseärasuseks on see, et gaas ei tee oleku muutumisel tööd. See tuleb sellest, et gaasi maht on püsiv. Nagu varem oli öeldud, sooritab gaas tööd ainult neil juhtudel, kui jõudude rakenduspunkt liigub, mida siin aga ei juhtu, sest kolb jääb liikumatuks.

Gaasi oleku muutumise protsessil jääval mahul on prak-
 tikas suur tähtsus. Mõnede sise põlemismootorite silindri-
 tesse antakse tööprotsessis põlevgaasi ja õhu segu (niisugust
 segu nimetatakse k ü t t e s e g u k s); kui niisugune
 segu elektrisädeme abil süüdatakse, siis kütus põleb sil-
 mapilkselt ja eraldunud soojus läheb tekkinud põlemispro-
 duktide kuumutamiseks.

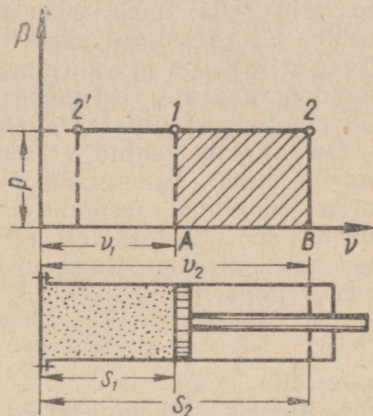
Seejuures toimub põlemis-
 produktide kuumenemise
 protsess nii kiiresti, et kolb
 selles silindris, milles toi-
 mub põlemine, ei jõua veel
 märgatavalt liikuda; see-
 pärast võib lugeda, et põle-
 misproduktide kuumene-
 mine toimus jääval mahul,
 s. o. $v = \text{const}$.

Soojuse hulk, mis jääva
 mahuga protsessil kulub
 gaasi kuumutamiseks või
 jahutamiseks, määratakse
 p. 3 toodud valemi järgi.
 Siin tuleb ainult täienda-
 valt lisada, et iga protsessi
 jaoks kehtib oma erisoo-
 jusarvväärtus. Ja nimelt kasutatakse jääva mahuga prot-
 sessi puhul erisoojust jääval mahul. Seda tähistatakse c_v .
 Selle mõned väärtused on toodud raamatu lõpus tabelis 4.

Olgu nüüd liikuva kolviga silindris gaas, mille olekut
 p - v -diagrammis iseloomustab punkt 1 (joon. 16). Hakkame
 gaasi kuumutama; see paisub, säilitades seejuures rõhu p
 ning sundides kolbi paremale liikuma.

Kui kolvi varre külge ühendada mingi masin, näiteks
 pumba kolb, siis teeb gaas paisumisel tööd — antud juhul
 vedeliku tõstmiseks. Gaasile vastavalt soojust juurde juh-
 tides võime saavutada seda, et rõhk jääb kogu protsessi
 kestel püsivaks, s. t. manomeetri näit kogu protsessi kes-
 tel ei muutu.

Gaasi niisugust kuumutamise protsessi nimetatakse
 oleku muutumise protsessiks jääval rõhul ehk isobaariliseks
 protsessiks; seda tähistatakse järgmiselt: $p = \text{const}$. Gaasi
 rõhk kogu protsessi kestel ei muutu ja seepärast kujuta-
 takse seda protsessi p - v -diagrammis sirgega, mis on paral-



Joon. 16. Gaasi oleku muutumise
 protsess jääval rõhul ($p = \text{const}$).

leelne abstsisteljega; kui kolb jõuab punktiirjoonega näidatud asendini, siis lõppolekut kujutatakse diagrammil punktiga 2 ja seega kogu protsessi kujutab joon 1—2. Seda joont nimetatakse *i s o b a r i k s*.

Kui gaasi jääval rõhul ei kuumutata, vaid jahutatakse, siis peab kolb liikuma vasakule. Sel juhul gaas töö ei tee, vaid seda tuleb teha väljastpoolt, et gaasi kokku suruda. Ka käesoleval juhul kujutatakse jahtumisprotsessi sirgega, mis on paralleelne abstsisteljega, kuid sirge suundub vasakule, sest gaasi maht jahutusprotsessi vältel kahaneb. Seega kujutatakse jahtumisprotsessi sirgega 1—2'.

On kindlaks tehtud, et vaadeldud protsessis suureneb gaasi erimaht kuumutamisel nii mitu korda, kui mitu korda suureneb absoluuttemperatuur, ning jahtumisel väheneb gaasi erimaht nii mitu korda, kui palju kordi alaneb absoluuttemperatuur. Matemaatiliselt väljendatakse seda järgmiselt:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (20)$$

Sõltuvust (20) nimetatakse *G a y - L u s s a c i* seaduseks.

Gaasi erikaal vastupidi sellel kuumutamise protsessil (teiste sõnadega gaasi paisumisel) väheneb nii mitu korda, kui palju kordi suureneb absoluuttemperatuur, ning jahtumisel (s. t. kokkusurumisel) suureneb gaasi erikaal nii mitu korda, kui palju kordi alaneb absoluuttemperatuur. Matemaatiliselt kirjutatakse seda järgmiselt:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (21)$$

Ei ole raske arvutada tööd, mida teeb gaas paisumisel, kui tema rõhk jääb püsivaks. See võrdub gaasi rõhu ja mahu suurenemise korrutisega:

$$\omega = p(v_2 - v_1). \quad (22)$$

Siin tähistab täht ω gaasi tööd, p — gaasi absoluutrõhku protsessi vältel ning v_2 ja v_1 gaasi erimahtu protsessi alguses ja lõpus. Tuleb tingimata pidada silmas, et tavaliselt mõõdetakse mahtu kuupmeetrites ning rõhku atmosfäärides. Sel juhul kui tahetakse kinni pidada mõõtühikute õigest vahekorrast, tuleb rõhu väärtus avaldada kg/m^2 , s. o. atmosfääride arv korrutada arvuga 10 000. Kor-

rutamisel saadud väärtus näitab tööd kilogramm-meetrites kilogrammi gaasi kohta.

Uurime p - v -diagrammist protsessi $p = \text{const}$ üksikasjalisemalt. Joonisel on see kujutatud joonega 1—2. Pindala selle joone all on viirutatud; see on nelinurk 1—2—B—A—1, mille küljed on: protsessijoon 1—2, abstsissitelg ning ordinaadid 1—A ja 2—B, mis lähevad läbi protsessi alguse (punkt 1) ja lõpu (punkt 2). Nelinurga pindala on alus korrutatud kõrgusega. Siin on nelinurga aluseks joon AB; jooniselt on näha, et seda mõõdetakse gaasi erimahu suurenemisega paisumisel, s. o.

$$AB = v_2 - v_1.$$

Nelinurga kõrguseks on lõik, mis kujutab rõhku p ; kui seega nelinurga 1—2—B—A—1 pindala tähistada tähega S, siis

$$S = p(v_2 - v_1).$$

Võrreldes seda avaldist töö valemiga (22), võib veenduda, et mõlemal juhul on paremal pool üks ja sama avaldis. Siit võib teha väga tähtsa järelduse: *protsessi kujutava joone all oleva kujundi pind määrab p - v -diagrammis gaasi poolt tehtud töö.* Seda seadust tuleb meil edaspidi kogu aeg kasutada. Üksikasjalistes kursustes tõestatakse, et see jääb kehtima peale isobaarilise protsessi ka igasugusel teisel gaasi oleku muutumise protsessil.

Soojuse hulk, mis kulutatakse gaasi kuumutamiseks või jahutamiseks, arvutatakse p. 3 toodud valemitega; seejuures tuleb kasutada erisoojust jääval rõhul, mida tähistatakse tähega c_p ; mõned selle väärtused on toodud tabelis 4. Näitame siin, et c_p on alati suurem kui c_v . Selle põhjused on järgmised. Nagu juba teada, on erisoojus niisugune soojuse hulk, mida on vaja juhtida juurde gaasile, et tõsta tema 1 kg temperatuuri 1° C võrra. Mõlemaid vaadeldud protsesse võrreldes näeme, et protsessil $p = \text{const}$ tehakse tööd, sel ajal kui protsessil $v = \text{const}$ mingit tööd ei tehta. On ilmne, et kui mõlemal juhul õnnestus soojendada gaasi 1° C võrra, siis kulus soojust esimesel juhul rohkem, ja võrreldes protsessiga $v = \text{const}$, kulus lisasoojus töö tegemiseks. Tähendab c_p on suurem kui c_v .

Arvutades protsessist osa võtva gaasi kuumutamiseks või jahutamiseks kulunud soojuse hulki, antakse sageli gaasi mahud rõhul 760 mm Hg ja temperatuuril 0° C (nn.

normaaltingimustel). Sel juhul on vaja gaasi erisoojus võtta 1 m^3 kohta nimetatud rõhul ja temperatuuril. Niisugust erisoojust nimetatakse mahuliseks erisoojuseks. Selle mõõtühikuks on $\text{kcal}/\text{nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$, kus täht n tähendab, et 1 m^3 gaasi on võetud normaaltingimustel.

Gaasi oleku muutumise protsess jääval rõhul on soojustehnikas väga laialt levinud. Näitame tema kasutamist tähtsamatel juhtudel.

On mootoreid, milledes kasutatakse soojuse juurdejuhtimist töötavale kehale jääval rõhul. Need on nn. diiselmootorid, mida me vaatleme hiljem.

Aurukateldes kuumutavad kuumad gaasid vett ja muudavad selle auruks. Nagu gaasi jahtumise, nii ka vee kuumutamise protsess toimub püsival rõhul.

Soojusvahetusaparaatides (aurustajad, eelsoojendajad, kondensaatorid) toimuvad jahutamise ja soojendamise protsessid püsival rõhul.

8. Gaasi oleku muutumise adiabaatilised ja isotermilised protsessid

Tehnikas on suur tähtsus niisugustel gaasi oleku muutumiste protsessidel, kus paisumisel või kokkusurumisel ei toimu gaasi ja välise keskkonna vahel mingit soojusevahetust; teiste sõnadega, niisugusel gaasi oleku muutumisel ei juhita gaasile soojust juurde ega juhita seda temalt ära.

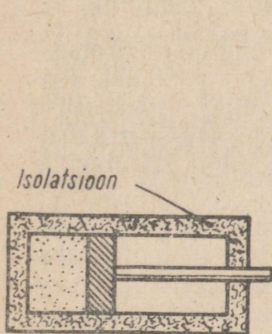
Ligilähedaselt saab niisugust protsessi korraldada selliselt, et kolb ja silindri seinad isoleeritakse materjalidega, mis halvasti juhivad soojust (joon. 17).

Gaasi oleku muutumise protsessi, mille puhul gaasi ja välise keskkonna vahel ei toimu soojusvahetust, nimetatakse *adiabaatiliseks*.

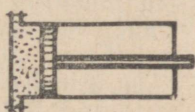
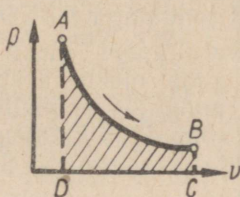
Joonisel 18 p - v -diagrammis toodud kõver AB näitab, kuidas muutub gaasi rõhk mahu suurenemisel (gaasi paisumisel), kui gaasile paisumisel ei juhita soojust juurde ega juhita soojust ära. Teiste sõnadega iseloomustab p - v -diagrammis kõver AB gaasi oleku muutumise adiabaatilist protsessi: seda nimetatakse *adiabaadiks*. Joonisel 19 on kujutatud vastupidine juhus — gaasi kokkusurumise adiabaatiline protsess.

Adiabaatilisel paisumisel teeb gaas tööd, mis seisab selles, et gaasi rõhk ületab kolvile mõjuva välisrõhu. Mille arvel

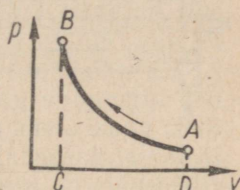
seda tööd tehakse? Energia jäävuse ja muundumise seaduse alusel ei saa energiat tekkida «ei millestki», vaid peab ilmuma mõne teise energia liigi kadumise arvel. Tähelepanelikumal vaatlemisel avastamegi niisuguse muutumise. Kui toimub gaasi paisumine, siis liigub kolb silindris vasakult paremale (joon. 17). Samas suunas liiguvad molekulid tabavad kolbi ja annavad selle vastu põrgates osa oma energiast ära; seepärast lendavad nad pärast põrkamist kolvist eemale väiksema kiirusega. Molekulide liikumisenergia väljendub gaasi nn. sisemise soojusenergiana. Molekulide kiiruse kahanemisel,



Joon. 17. Gaasi paisumine isoleeritud seintega silindris.



Joon. 18. Gaasi adiabaatiline paisumine.



Joon. 19. Gaasi adiabaatiline kokkusurumine.

mis tekkis molekulide energia kandumisest kolvile, alaneb ka gaasi sisemine soojusenergia. Seega tekkis kolvi liikumise mehaaniline energia (mille arvel tööd tehti) gaasi sisemise soojusenergia osalise kadumise arvel.

Varem oli räägitud, et gaasi temperatuuri iseloomustab molekulide liikumine. Mida suurem on antud gaasi molekulide liikumiskiirus, seda kõrgem on gaasi temperatuur. Siit võib järeldada, et kui gaasi adiabaatilisel paisumisel molekulide kiirus langeb, siis tähendab see seda, et langeb ka temperatuur.

Kui toimub gaasi adiabaatiline kokkusurumine, siis gaasi soojuslik energia suureneb ja järelikult tõuseb ka tema temperatuur. See toimub seepärast, et molekulidele vastu liikuv kolb annab temaga kokkupõrkavatele

molekulidele osa oma energiast ning seetõttu lendavad nad kolvist eemale suurema kiirusega ja see põhjustab gaasi sisemise soojusenergia suurenemise. Adiabaatilisel paisumisel teeb gaas seega tööd oma sisemise soojusenergia arvel ja seepärast tema temperatuur alaneb. Adiabaatilisel kokkusurumisel läheb komprimeerimiseks kulunud töö siseenergia suurendamiseks ja seetõttu gaasi temperatuur tõuseb. Mis puutub rõhusesse, siis adiabaatilisel paisumisel see väheneb ja kokkusurumisel suureneb.

Gaasi tööd mõõdetakse siin, nagu isobaarilise protsessi puhulgi, pindalaga selle kõvera all, mis kujutab gaasi oleku muutuse vaadeldud protsessi. Joonisel 18 mõõdetakse seda tööd viirutatud pindalaga *ABCD*.

Mõlemal eelneval gaasi oleku muutuse protsessil jäi üks või teine gaasi oleku parameeter püsivaks: isokoorilise protsessi puhul — erimaht, ning isobaarilise puhul — rõhk. See võimaldas kumbagi protsessi graafiliselt kergesti kujutada (sirgetena). Sel juhul kasutasime *p**v*-diagrammi.

Ka adiabaatilisel gaasi oleku muutumise protsessil esineb niisugune gaasi oleku parameeter, mis jääb püsivaks. Seda gaasi oleku parameetrit nimetatakse *e n t r o o p i a k s* ja tähistatakse tähega *s*. Ta erineb oluliselt neist parameetritest, mis on meile juba tuntud. Sel ajal kui mõlemat eelmist parameetrit võisime mõõteriistadega mõõta, siis seda parameetrit võime ainult arvutada. Peale selle on mõlemal eelneval gaasi oleku parameetril kergesti arusaadav füüsikaline mõte, samal ajal kui entroopia niisugust lihtsat füüsikalist mõtet ei ole.

Seda suurem tähtsus on aga sellel mõistel soojustehnikas, sest ta kergendab paljusid arvutusi. Nagu juba oli öeldud, arvutatakse entroopia väärtust matemaatiliselt. Nende andmete abil koostatakse graafikud (diagrammid), mida kasutataksegi arvutamistel. Niisuguste arvutustega tutvume edaspidi.

Tehnikas on adiabaatilisel gaasi oleku muutusel suur tähtsus. Olgugi et mootorite silindrite seinad ei ole alati isoleeritud, kuid paisumine ja kokkusurumine toimub silindrites nii kiiresti, et soojusvahetus gaasi ja silindri seinte vahel, millède kaudu soojus läheb väliskeskkonda, on suhteliselt väike ja seda võib arvestamata jätta. Seepärast võib mootorites töötavate kehade (gaasi, auru) pai-

sumist ja kokkusurumist neil juhtudel lugeda adiabaatiliseks.

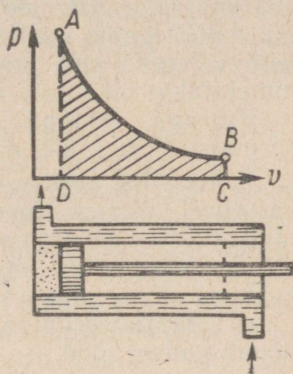
Kujutame nüüd enesele ette, et gaas paisub silindris, mis on ehitatud nii, et selle seinu uhitakse tugevasti veega (joon. 20).

Kui anda gaasile võimalus paisuda, siis ta teeb tööd; seejuures, kui gaasile väljastpoolt soojust mitte juurde juhtida, siis tehakse seda tööd molekulide energia arvel, mille juures molekulide kiirus väheneb ja gaasi temperatuur langeb. Kuid seinu energiliselt kuuma veega uhtudes väldime gaasi jahtumist ja saavutame seda, et gaasi temperatuur jääb kogu aeg ühesuguseks. Seejuures antakse veelt gaasile soojust. Kolvi tagasiliikumisel, s. o. gaasi kokkusurumisel välisjõu toimel püüab gaasi temperatuur tõusta, kuid silindri uhtumisel külma veega võib gaasilt soojust ära juhtida, nii et gaasi temperatuur jääks püsivaks. Seega antakse paisumisel soojust veelt gaasile ning kokkusurumise ajal vastupidiselt — gaasilt veele, nii et kokkusurumise kui ka paisumise ajal jääb gaasi temperatuur ühesuguseks. Niisugust gaasi oleku muutumise protsessi nimetatakse isotermiliseks.

Kui gaasi algolekut p v -diagrammis kujutada punktiga A (joon. 20) ja jälgida seda, mis toimub gaasi rõhuga, siis võib tähele panna, et see väheneb ja isotermilist protsessi kujutab kõver AB , mida nimetatakse isotermiks.

Katselisel teel võib kindlaks teha järgmist: isotermilisel paisumisel alaneb gaasi absoluutne rõhk nii mitu korda, kui mitu korda suureneb tema erimaht; ja vastupidi, isotermilisel kokkusurumisel tõuseb gaasi absoluutne rõhk nii mitu korda, kui mitu korda väheneb tema erimaht; matemaatiliselt võib mõlemat olenevust kirjutada järgmiselt:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (23)$$



Joon. 20. Gaasi oleku muutumise isotermiline protsess.

Selles võrduses tähistatakse tähtedega p_1 ja v_1 vastavalt rõhku ja erimahtu algolekus ning tähtedega p_2 ja v_2 vastavalt rõhku ja erimahtu protsessi lõpul.

Siin toodud olenevust gaasi absoluutrõhu ja tema erimahu vahel nimetatakse Boyle - Mariotte'i seaduseks.

Ka siin, nagu eelmisteski protsessides, kujutab oleku muutust kujutava kõvera alune pindala tööd. Kui seega isotermilise protsessi oleku muutust kujutada p v -diagrammis kõveraga AB (joon. 20), siis näitab viirutatud pindala $ABCD$ gaasi poolt tehtud tööd. Seda pindala võib eriliste valemite abil arvutada või mõõta riista abil, mida nimetatakse planimeetrikks.

Kui aga, vastupidi, toimub gaasi isotermiline kokkusurumisprotsess, siis on selleks vaja kulutada välist tööd.

Isotermilist protsessi rakendatakse masinates, mis on kasutusel õhu kokkusurumiseks. Niisuguseid masinaid nimetatakse kompressoriteks. Neil juhtudel, kui õhu kokkusurumise lõpul on vaja sama temperatuuri mis kokkusurumise alguses, tuleb kasutada jahutamist; niisugune komprimeerimine on kasulik ka selle poolest, et see nõuab vähem tööd.

Nagu edaspidi näeme, on isotermilisel protsessil suur teoreetiline tähtsus sisepelemismootorite uurimisel.

9. Veeaur. Veeauru is-diagramm

Varem me juba rääkisime, et veeaur leiab tehnikas laialdast kasutamist. Neis olekutes, nagu teda kasutatakse aurumasinates, on auru kerge muuta vedelaks, erinevalt paljudest teistest gaasilistest kehadest, mida normaalsetel tingimustel on vedelasse olekusse viia väga raske.

Looduses esineb vesi vedeliku kujul. Selleks et vett muuta auruks, on vaja kulutada soojust. Nagu juba oli öeldud, nimetatakse seda protsessi aurustamiseks. Soojustehnikas on sellel eriti suur tähtsus ja seepärast vaatleme seda üksikasjalisemalt.

Igaüks on näinud vee muutumist auruks, kui see keeb pajas või teekannus. Siin kulgeb aurustumise protsess atmosfääri rõhul. Tehnikas toimub veeauru saamine atmosfääri rõhuga võrreldes nii madalatel kui ka üsna kõrgetel rõhkudel.

Olgu silindris kolvi all 1 kg vett; kolb avaldab veele rõhku p (joon. 21). Hakkame veele soojust juurde juhtima. Seejuures jätame kolvile vabaduse liikuda, et rõhk jääks kogu aeg võrdseks algrõhuga p . Vee soojenemisel selle maht natuke suureneb ja tõuseb ka temperatuur. Kui temperatuur on saavutanud teatud väärtuse, mis oleneb rõhust p , siis hakkab vesi keema, ja edasisel soojuse juurdejuhtimisel hakkab muutuma auruks. Vee auruks muutmise protsessi kestel suureneb maht tugevasti, kuid vee ja saadava auru temperatuur, suurele soojuse juurdelismisele vaatamata, jääb p ü s i v a k s. See jätkub seni, kuni viimane veetilk on auruks muutunud. Auru temperatuur jääb kogu aeg samaks kui keemise alguseski.

Auru olekut kolvi all, kui seal on ka keeva vett, iseloomustatakse järgmiselt: etteantud rõhu puhul ei saa auru poolt hõivatud mahusse paigutada ei rohkem ega vähem auru kui seal on. Ja tõepoolest, kui me sellel rõhul võtaksime natuke suurema mahu ja vastavalt suuremal hulgal auru ning püüaksime samal püsival temperatuuril mahtu vähendada algmahuni, siis rõhk ei suureneks, nagu see sünnib ideaalse gaasi puhul, vaid osa auru muutuks vedelikuks ja me saaksime esialgse auru koguse tema algmahust. Kui me aga sama rõhu juures võtaksime väiksema mahu ja vastavalt vähem auru, ning muutmatal temperatuuril suurendaksime mahu esialgse suuruseni, siis rõhk ei väheneks nagu ideaalsete gaaside puhul, vaid osa vett muutuks auruks ja me saaksime esialgse koguse auru selles mahus. Kui auru kogust teatud temperatuuril ja ettenähtud mahul ei saa ei suurendada ega vähendada, siis öeldakse, et aur küllastab seda ruumi, milles ta viibib, ning auru ennast nimetatakse küllastunud auruks.

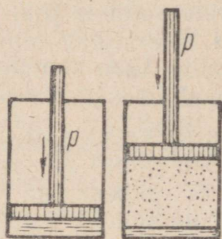
Kui küllastunud aur on segunenud keeva veega, siis seda segu nimetatakse niiskeks küllastunud auruks. Kui keemisel muuta kõik vesi auruks, siis saame kuiva küllastunud auru.

Kuiva auru kaalulist kogust 1 kg niiskes auras nimetatakse auru kuivusastmeks ja tähistatakse tähega x . Seega kui öeldakse, et niiske auru kuivusaste $x=0,95$, siis tähendab see, et 1 kg auru sisaldab 0,05 kg keeva vett ja 0,95 kg kuiva küllastunud auru.

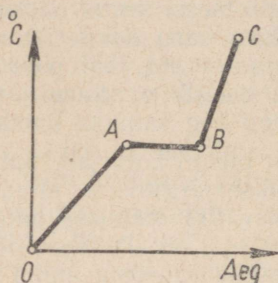
Temperatuuri, mille juures vesi hakkab keema ja mis säilib ühesugune kuni selle momendini, kuni aurub vii-

mane veetilk, nimetatakse keemistemperatuuriks ehk küllastustemperatuuriks. Seda tähistatakse tähega t ja indeksiga s , s. t. t_s .

Keemistemperatuur (küllastustemperatuur) oleneb vedelikule mõjuvast rõhust; mida kõrgem on rõhk, seda kõrgem on küllastustemperatuur. Tabelis 9 raamatu lõpus on toodud küllastustemperatuuride väärtused mitmesugustel rõhkudel.



Joon. 21. Aurumisprotsess.



Joon. 22. Temperatuuri muutumine aurustumisprotsessil.

Kui jätkata jääval rõhul auru kuumutamist, kuni viimane veetilk on aurustunud, siis hakkab auru temperatuur tõusma; suureneb samuti ka auru maht. Seejuures saadud auru nimetatakse ülekuumendatud auruks; seega võib öelda, et *ülekuumendatud auruks nimetatakse niisugust auru, mille temperatuur on kõrgem kui küllastustemperatuur antud rõhul.*

Kui kujutada diagrammil, kuidas muutub temperatuur soojuse juurdejuhtimisel, siis saame niisuguse graafiku, mis on kujutatud joonisel 22. Joon OA näitab temperatuuri tõusu vee soojendamisel kuni keemiseni, joon AB näitab püsivat temperatuuri vee muutumisel auruks; joon BC iseloomustab ülekuumendatud auru temperatuuri tõusu.

Elektrijaamades saadakse ülekuumendatud auru aurukateldest (aurukatelde kirjeldust vt. tagapool p. 20). Katlasse tuleb teatud temperatuurini ettesoojendatud vesi; siin kuumeneb ta kütuse põletamisest saadud soojuse mõjul kuni küllastustemperatuurini ning muutub seejärel auruks. Seejärel saadetakse aur katla erilisse seadmesse, nn. *ülekuumendisse*, kus ta lisatava soojuse toimel muutub

ülekuumendatud auruks. Sellisel kujul läheb ta aurumasinasse või -turbiini. Kui tootmisel (näiteks tehases) ei vajata ülekuumendatud, vaid küllastunud auru, siis katlale ülekuumendit ei ehitata.

Näitame, kuidas on võimalik arvutada soojuste hulka, mis on vajalik selleks, et saada etteantud parameetritega auru. Olgu silindris vesi, mille temperatuur on 0°C . Kuna vee erisoojus on $1 \text{ kcal/kg } ^{\circ}\text{C}$, siis 1 kg vee soojendamiseks 1°C võrra on vaja soojust 1 kcal , ning selleks, et soojendada vett 0°C kuni mingi temperatuurini, tuleb kulutada nii mitu kilokalorit soojust, kui mitme kraadini on vaja vett kuumutada.

Seda soojuste hulka, mis kulutati vee soojendamiseks jääval rõhul temperatuurilt 0°C kuni mingi auru olekuni, nimetatakse entalpiaks (kreeka sõnast kuumutama) ja mõõdetakse kcal/kg. On ilmne, et keha entalpiat temperatuuril 0°C loetakse võrdseks nulliga. Õeldu põhjal näeme, et vee entalpia i ükskõik millisel temperatuuril võrdub arvuliselt selle temperatuuriga, s. o.

$$i = t. \quad (24)$$

Kui näiteks vee temperatuur on 90°C , siis kulus tema soojendamiseks 0°C kuni 90°C 90 kcal/kg , s. o. vee entalpia

$$i = 90 \text{ kcal/kg.}$$

Küllastustemperatuurini t_s kuumutatud vee entalpiat tähistatakse tähega i , millele on lisatud ülakoma, s.t. i' . Järelikult

$$i' = t_s. \quad (25)$$

Siiski tuleb meeles pidada, et see reegel ei anna täiesti täpseid väärtusi vee entalpia kohta (eriti kõrgetel temperatuuridel), sest siis on vee erisoojus tunduvalt suurem kui $1 \text{ kcal/kg } ^{\circ}\text{C}$. Täpsemaid väärtusi võib leida tabelist 9, kus viiendas lahtris on toodud vee entalpia, kui vesi on kuumutatud keemistemperatuurini, mis on toodud sama tabeli esimeses vertikaallahtris (vt. raamatu lõpus).

Kui soojendamiseks ei võetud 0° -ne vesi, vaid näiteks 30° -ne, siis selle vee entalpia algolekus on 30 kcal/kg ja selleks, et teda soojendada 90° , pole vaja kulutada 90 , vaid ainult 60 kcal/kg ; seega me näeme, et veele antava soojuste hulk võrdub entalpiate vahega; kui lõplikku entalpiat

tähistada i_2 , algentalpiat i_1 ning soojuse hulka, mis kulub soojendamiseks jääval rõhul q_p , siis

$$q_p = i_2 - i_1. \quad (26)$$

See reegel on õige ka sel juhul, kui pärast jääval rõhul kuumutamist ei saa me vee, vaid küllastunud või ülekuumendatud auru. Seega selleks, et osata leida soojuse hulka, mis kulub auru saamiseks jääval rõhul, on vaja osata arvutada auru entalpiat mitmesugustel olekutel.

Kuiva küllastatud auru entalpia võib välja arvutada järgmise arutluse põhjal. Sellest oli juba räägitud, et kuiva küllastunud auru saamiseks tuleb vesi kuumutada keemistemperatuurini; pärast seda lisatud soojus ei põhjusta enam temperatuuri tõusu, vaid kulub vee muutmiseks auruks samal temperatuuril, milleni oli tõusnud keev vesi; seejuures tuleb mõningal määral soojust juurde juhtida, mis oleneb sellest, millisel rõhul toimub aurustumine; seda soojuse hulka nimetatakse aurustumissoojuseks ja tähistatakse tähega r .

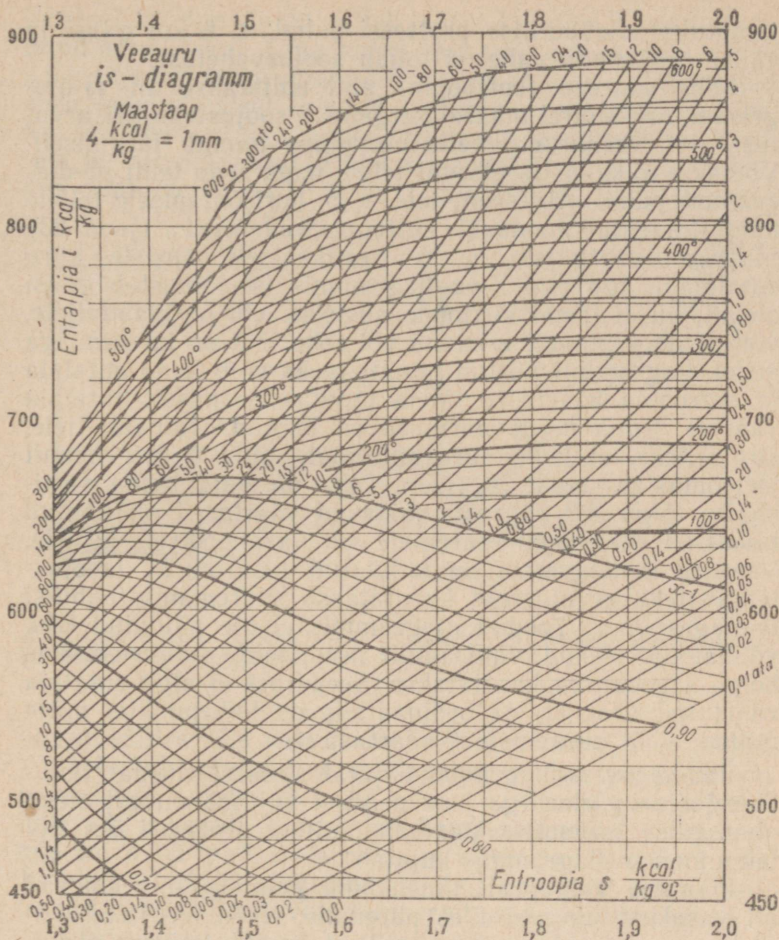
Seega et saada 1 kg kuiva küllastunud auru 0° -sest veest, tuleb alguses talle juhtida soojust i' , et viia teda keemistemperatuurini, ja seejärel lisada veel r kcal/kg selleks, et muuta keev vesi kuivaks küllastunud auruks. Seega tuleb 0° -sest veest 1 kg kuiva küllastunud auru saamiseks kulutada $(i' + r)$ kcal/kg; järelikult võib kuiva küllastunud auru entalpia (seda tähistatakse tavaliselt i'') väljendada valemiga

$$i'' = i' + r \text{ kcal/kg.} \quad (27)$$

Auru saamiseks mitmesugustel rõhkudel kuluva soojuse r väärtused on toodud tabelis 9; samas tabelis on toodud ka i'' väärtused.

Raske ei ole ka arvutada entalpiat niiskel aurul, mille kuivuse aste on x . Selleks et saada niisugust auru, tuleb 1 kg vett kuumutada algul keemistemperatuurini, milleks talle tuleb juurde juhtida i' kcal/kg soojust. Edasi selleks, et saada niisket auru kuivusastmega x , tuleb 1 kg vee hulgast muuta auruks x kg. Kui 1 kg keeva vee muutmiseks kuivaks küllastunud auruks kulub r kcal/kg, siis x kg keeva vee muutmiseks auruks kulub rx kcal soojust. Üldse kulutatakse siis $(i' + rx)$ kcal/kg. Siit võib niiske auru entalpia avaldada valemiga

$$i = i' + rx \text{ kcal/kg.} \quad (28)$$



Joon. 23. is-diagramm.

Selleks et saada ülekuumendatud auru, nagu oli juba varem öeldud, tuleb kuivale küllastatud aurule lisada soojust. Seda soojuste hulka ei ole raske arvutada, kui on teada auru erisoojus ja temperatuur, milleni kavatsetakse auru kuumutada. Lihtsam on siiski ülekuumendatud auru entalpiat määrata graafikute või tabelite järgi. Selle määramist käsitatakse edaspidi.

Oleku parameeter entroopia (vt. p. 8) jääb muu-

tumatuks adiabaatilise protsessi puhul, s. t. kui gaasi ja välise keskkonna vahel ei toimu soojusvahetust.

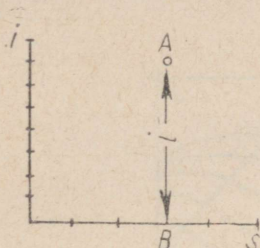
Selle suuruse (entroopia) abil ehitatakse nn. *is*-diagramm, mis suurel määral kergendab soojustehnilisi arvutusi, eriti veeauruga. Selle ehitamine toimub järgmiselt. Võetakse kaks ristiasetsevat telge, nagu seda tehti *pv*-diagrammi puhul. Abstsissteljele, s. o. horisontaalsele teljele kantakse teatud mastaabis entroopia väärtused s (joon. 23) ning ordinaatteljele, s. o. vertikaalsele sirgele auru entalpia i . Iga punkt *pv*-diagrammis iseloomustab gaasi olekut, nii et lastes ristjoone abstsiss- või ordinaatteljele, võib leida vastavalt erimahu või rõhu. Nii on ka siin: iga sellel diagrammil võetud punkti jaoks võib leida entalpia ja entroopia väärtused. Meid huvitab peamiselt entalpia väärtus. Kuna need väärtused on kantud ordinaatteljele, siis selleks, et leida auru entalpiat, mida *is*-diagrammil iseloomustab punkt A (joon. 24), on vaja teada vertikaalse lõigu AB suurust; vastavad väärtused on kantud tavaliselt diagrammi paremale või vasakpoolsele küljele. Veeauru *is*-diagramm on kujutatud joonisel 23 (soojustehnilisteks arvutusteks kasutatakse suuremastaabilisi *is*-diagramme). Toodud diagrammis ei ole näidatud kõik võimalikud olekud, vaid ainult need, mida soojustehnikas kõige sagedamini kasutatakse. Seepärast ei alga entalpia väärtused abstsiss- ja ordinaattelgede lõikepunktis mitte nullist, vaid suurematest väärtustest.

Vaadeldav *is*-diagramm kujutab enesest tihedat ristuvate joonte võrku. Iga joon nendest kujutab mingit oleku muutumise protsessi. Vaatame, millist protsessi üks või teine joon *is*-diagrammis kujutab.

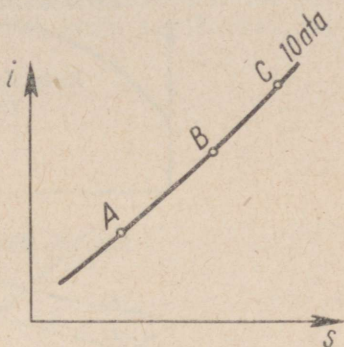
Pöörame kõigepealt tähelepanu joontele, mis lähevad alt vasakust nurgast üles paremale. Need on *isobaarid*, s. o. jooned $p = \text{const}$, millest igaüks kujutab olekumuutumise protsessi jääval rõhul. Iga isobaar vastab teatud rõhule, mis on diagrammil joonte juurde kirjutatud. Joonisel 25 on kujutatud 10 ata isobaar. See tähendab, et punktid A, B, C , nagu teisedki punktid sellel joonel, iseloomustavad auru, mille absoluutrõhk $p = 10$ ata, kuid iga sellel joonel asuva punkti puhul on entalpia erinev.

Edasi pöörame tähelepanu paksule kõverale joonele, mis läheb peaaegu keskelt üle diagrammi vasakult paremale. Selle joone parempoolse otsa juurde on kirjutatud $x = 1$. See joon on eraldi kujutatud *is*-diagrammi skitsil

joonisel 26. Iga punkt sellel joonel kujutab kuiva küllastatud auru olekut. Seda nimetatakse ülemiseks piirkõveraks. Juba varem oli öeldud, et kuiva küllastunud auru kuumutamisel muutub see ülekuumendatud auruks. Siit järeldub, et iga punkt, mis asub ülemisest piirkõverast ülevalpool, kujutab ülekuumendatud auru; iga punkt, mis asub allpool ülemist piirkõverat, kujutab auru



Joon. 24. Auru oleku kujutamine *is*-diagrammis.



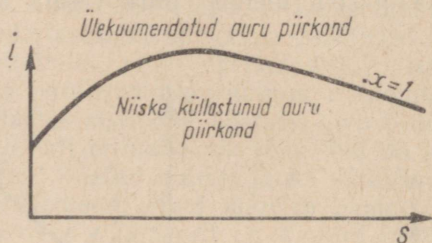
Joon. 25. Isobaar $p=10$ ata.

olekut, milles kõik vesi ei ole veel aurustunud, s. o. niiske küllastunud auru olekut. *is*-diagrammi ülemisel poolel on jooned, mis kujutavad isoterme ($t=\text{const}$ jooni). Need lähevad vasakult paremale. Temperatuuride väärtused, mis vastavad igale isotermile, on kirjutatud joonte juurde. Joonisel 27 on *is*-diagrammi skitsil näidatud mõned isotermid nendele vastavate temperatuuride väärtustega.

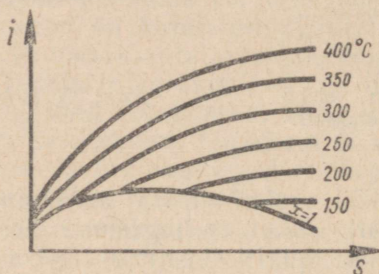
Niiske küllastunud auru piirkonnas on rida vasakult paremale minevaid kõverjooni. Mõned neist on näidatud skitsil joonisel 28. Need jooned iseloomustavad auru üht ja sama kuivuse astet ($x=\text{const}$). Mõnel on nende väärtused kirjutatud joone parempoolse otsa juurde. Kui võtta näiteks punktid A, B, C, siis igaüks neist iseloomustab auru, mille kuivuseaste $x=0,95$ on ühesugune kõigis neis punktides.

Nende joonte jaoks, millede juurde ei ole x väärtust kirjutatud, on seda kerge leida naaberjoonte abil. Näiteks asub punkt K ligilähedal joonele $x=0,93$.

Diagrammi alumisel poolel, mis kujutab küllastunud auru olekut, puuduvad isothermide jaoks eri jooned; need satuvad kokku isobaaridega. See on seepärast, nagu varem oli seletatud, et küllastunud auru puhul vastab igale rõhule täiesti kindel temperatuur. Ja seepärast, kui küllastunud auru oleku muutusel rõhk ei muutu, siis ei muutu ka tem-



Joon 26. Ülemine piirkõver.

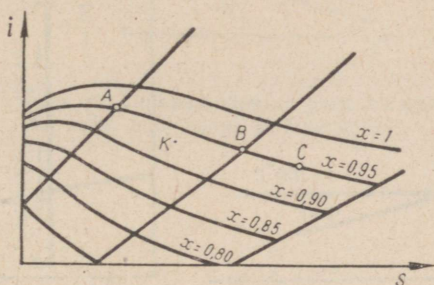


Joon. 27. Isothermid *is*-diagrammis.

peratuur. Kui *is*-diagrammi niiske küllastunud auru piirkonnas on antud mõni punkt *A* (joon. 29) ja on vaja leida temperatuuri väärtus, mis vastab sellele punktile, siis tuleb isobaari mööda minna küllastuskõverani ja sealt lugeda ära isothermi väärtus. See ongi see temperatuur, mis vastab kogu isobaarile, millel see punkt asetseb. Võttes näiteks isobaari $p=1$ ata, leiame temperatuuri väärtuse $t=100^{\circ}\text{C}$.

Lõpuks on *is*-diagrammil adiabaadid, s. o. jooned, mis iseloomustavad auru oleku muutusi ilma soojuse juurdevõi ärajuhtimiseta. Varem oli öeldud, et adiabaatilisel protsessil jääb entroopia muutumatuks ning selleks, et

is-diagrammil kujutada mingis punktis *A* (joon. 30) algavat adiabaatilist protsessi, tuleb läbi selle punkti tõmmata vertikaalne sirge, mis on paralleelne ordinaatteljega. On ilmne, et selle sirge iga punkt tähistab üht ja sama entroopia väärtust. Seejuures on punktist *A* üles punkti *C* poole minev protsess adiabaatiline kokkusurumine ning punktist *A* punkti *B* poole alla minev — adiabaatiline paisumine, sest et esimesel juhul rõhk kogu aeg kasvab, teisel juhul aga kahaneb.



Joon. 28. Samakuivuseastmejooned.

Adiabaatiline protsess (s. o. protsess, kus $s = \text{const}$) on soojustehnilistes arvutustes väga levinud. Selle protsessi kerge käsitlemine *is*-diagrammis (sirge joonena) näitab, kuivõrd soodne on entroopia mõiste kasutusele võtmine nende arvutuste teostamiseks.

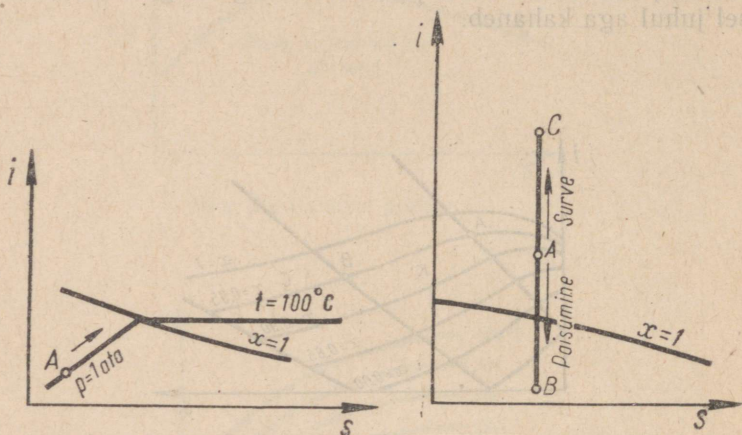
Mõnikord on *is*-diagrammile kantud isokoorid, s. o. jooned, mis iseloomustavad protsesse jääval mahul. Kui neid jooni ei ole nagu joonisel 23, siis arvutatakse niiske auru erimaht valemil järgi

$$v = v''x \quad (29)$$

(v'' väärtused võetakse tabelist 9). Selles valemis on v — niiske auru otsitav erimaht; v'' — kuiva küllastunud auru erimaht samal rõhul, ning x — auru kuivuse aste.

Ülekuumendatud auru erimahud võetakse spetsiaalsetest tabelitest.

Määrame nüüd *is*-diagrammi abil entalpia väärtuse aurule, mida iseloomustavad järgmised andmed — rõhk $p=30$ ata ja temperatuur $t=300^{\circ}\text{C}$. Selleks leiame punkti, mis iseloomustab antud olekut *is*-diagrammis. See peab



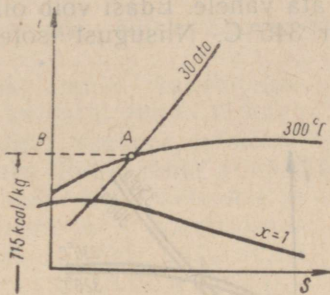
Joon. 29. Niiske auru temperatuuri määramine *is*-diagrammi abil.

Joon. 30. Adiabaatiline protsess *is*-diagrammis.

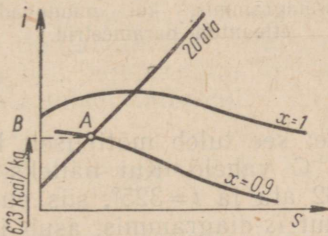
ilmselt asuma isobaari 30 ata ja isotermi 300°C (joon. 31) lõikepunktis. Tähistame selle punkti tähega A. Punkt A asub ülevalpool kuiva küllastunud auru kõverat ja see näitab, et auru on antud olekus ülekuumutatud. Selleks et määrata auru entalpiat, tuleb lasta ristjoon ordinaatteljele, millele on kantud entalpia väärtused, s. o. tõmmata punktiirjoon AB ja leida, millisele väärtusele vastab punkt B. Leiame *is*-diagrammilt (joon. 23), et punktile B vastab entalpia väärtus 715 kcal/kg.

Edasi vaatleme niiske küllastunud auru parameetrite arvutamist. Olgu vaja leida auru entalpia, kui auru parameetrid $p=20$ ata ja $x=0,9$. Selleks otsime diagrammil seda olekut iseloomustava punkti, milleks (joon. 32) on punkt A, mis asub isobaari $p=20$ ata ja joone $x=0,9$ lõikepunktis. On ilmne, et see punkt iseloomustab antud auru olekut, sest ta asub üheaegselt isobaaril 20 ata ja

kuivuseastme kõveral $x=0,9$. Selleks et leida selles punktis auru entalpia, laseme ristjoone ordinaatteljele ja punktis B leiame, et auru entalpia on 623 kcal/kg .



Joon. 31. Ülekuumendatud auru parameetrite määramine i -s-diagrammil.



Joon. 32. Niiske auru oleku parameetrite määramine i -s-diagrammil.

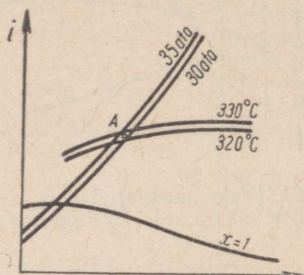
Erimahu arvutamiseks kasutame valemit (29):

$$v = v'' \cdot x.$$

Tabelist 9 leiame antud juhu jaoks, et $v'' = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$. Asetame selle valemisse (29) ja saame:

$$v = 0,1 \cdot 0,9 = 0,09 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Vahel võib olla antud mingi parameetri väärtus, mis *is*-diagrammis ei ole märgitud. Nii võib olla antud rõhk 23 ata, niisugust isobaari *is*-diagrammis ei leidu. Sel juhul tuleb vastav ligilähedane joon kujutada mõtteliselt isobaaride 20 ja 25 ata vahele. Edasi võib olla näiteks antud auru temperatuur 345° C. Niisugust isotermi *is*-diagram-



Joon. 33. Auru oleku leidmine *is*-diagrammis, kui puuduvad etteantud parameetrid.

mis samuti ei ole; see tuleb mõtteliselt kujutada isotermide 340° ja 360° C vahele. Kui näiteks on antud auru parameetrid $p=32$ ata ja $t=325^\circ$, siis punkt, mis iseloomustab seda olekut *is*-diagrammis, asub isobaaride 30 ja 35 ata ning 320° ja 330° C vahel. On ilmne, et see on punkt A joonisel 33.

Edaspidi me näitame, et elektrijaama ökonoomsus on seda suurem, mida kõrgemad on kasutatava veeauru temperatuur ja rõhk. Seetõttu on hakatud NSV Liidus partei ja valitsuse juhendusel kasutama ikka kõrgemaid auru parameetreid.

Elektrijaamade põhisiseseadete projekteerimisel nõutakse konstruktoritelt kõrgete ja ülikõrgete parameetritega auru füüsikaliste omaduste tundmist. Nende teaduslike ülesannete lahendamiseks tegeleb NSV Liidus rida instituute ja esmajärjekorras F. E. Dzeržinski nimeline Üleliiduline Soojustehnika Instituut (ВТИ), Moskva Ener-

geetikainstituut (МЭИ), I. I. Polzunovi nimeline Katla ja Turbiini Keskinstituut (ЦКТИ) ning NSV Liidu Teaduste Akadeemia G. M. Kržičanovski nimeline Energeetika-instituut.

10. Niiske õhk. Niiske õhu Id-diagramm

Atmosfääriõhk, mida kasutatakse reas seadmetes (kompressorid, kuivatid jne.) töötava kehana, sisaldab alati teatud hulgal veeauru, mistõttu seda nimetatakse niiskeks õhuks. Rõhk, mida atmosfääriõhk (baromeetiline rõhk) avaldab kõigile kehadele ja esemetele, kujutab enesest kõigi niiske õhu koostisosade rõhkude summat, seehulgas ka veeauru rõhk, mida antud juhul nimetatakse veeauru partsiaalrõhuks (s. t. osarõhuks) õhus; see on ilmselt õhu antud temperatuuri juures proportsionaalne auru kaalulise kogusega õhus.

Antud õhu temperatuuri juures võimalik maksimumaalse auru kogus õhus ja järelikult ka maksimumaalse auru partsiaalrõhk esinevad siis, kui aur õhus on küllastunud olekus. Seda kogust on võimalik määrata tabeli 9 abil. Kui võtta näiteks õhk, milles auru partsiaalrõhk $p=0,04$ at, siis osutub see maksimumaalse auru kogusega õhuks (küllastunuks) niisugusel juhul, kui auru ja järelikult ka õhu temperatuur on $28,6^{\circ}\text{C}$. Niisuguse auru erikaal sama tabeli andmetel:

$$\gamma'' = \frac{1}{v''} = \frac{1}{35,5} = 0,0282 \text{ kg/m}^3;$$

järelikult, maksimumaalselt võimalik auru hulk 1 m^3 niiskes õhus temperatuuril $t=28,6^{\circ}\text{C}$ on $0,0282 \text{ kg}$ ehk $28,2 \text{ g}$. Õhu teisel temperatuuril, näiteks kui $t=100^{\circ}\text{C}$, on see sama tabeli andmetel $\frac{1}{1,73} = 0,598 \text{ kg/m}^3$ ehk 598 g ühes m^3 õhus. Auru hulka 1 m^3 õhus nimetatakse niiske õhu absoluutseks niiskuseks.

Õhku, mis antud temperatuuril sisaldab maksimumaalselt võimaliku koguse veeauru, nimetatakse küllastatud õhuks. Nagu juba oli öeldud, on ka aur selles küllastunud. Kui õhu antud temperatuuril selles sisalduv aur on ülekuumendatud, siis tähendab see, et selle auru erimaht on suurem ning erikaal väiksem kui samal temperatuuril oleval

küllastunud aurul. Järelikult, *ülekuumutatud auru kogus ühes m³ õhus ei ole antud õhutemperatuuri puhul maksimaalne*. Niisugust õhku nimetatakse küllastamatuks.

Kui küllastamata õhku jääval rõhul jahutada, siis võib õhus oleva auru viia küllastunud olekuni. Seejuures saavutatud õhutemperatuuri nimetatakse *kastepunkti*ks.

Õhus oleva auru koguse suhe maksimaalselt võimalikku auru kogusesse samal temperatuuril, ehk: auru partsiaalrõhu suhet maksimaalselt võimalikku partsiaalrõhusele samal temperatuuril nimetatakse õhu relatiivseks niiskuseks ja tähistatakse kreeka tähega φ (fii).

Seega

$$\varphi = \frac{p_n}{p_m}, \quad (30)$$

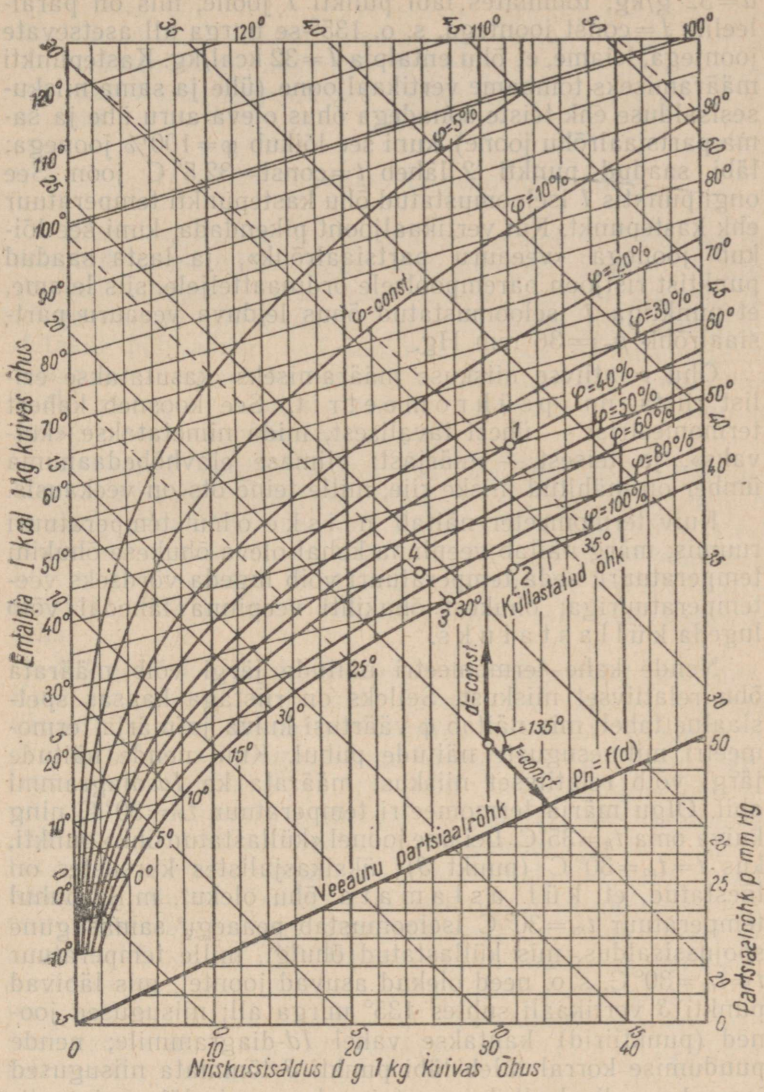
kus p_n — auru partsiaalrõhk niiskes õhus;

p_m — auru maksimaalselt võimalik partsiaalrõhk samal temperatuuril (s. o. auru partsiaalrõhk küllastunud õhus).

Niiske õhu tähtsateks karakteristikuteks on tema niiskusesisaldus ja entalpia. Niiskusesisaldust (tähistatakse tähega d) mõõdetakse auru hulgaga, mis tuleb niiskes õhus leiduva 1 kg kuiva õhu kohta; õhu niiskusesisaldus ühel ja samal baromeetrilisel rõhul on proportsionaalne temas sisalduva auru partsiaalrõhuga. Õhu entalpiat J mõõdetakse samuti soojuse hulgaga, mis tuleb niiskes õhus sisalduva kuiva õhu 1 kg kohta.

Õhukarakteristikuid on kerge määrata nn. Ramzini Id -diagrammi abil (joon. 34). Selles on horisontaalsele joonele kantud niiskusesisalduse d väärtused, ordinaatteljele vasakule entalpia J ning parempoolsele ordinaatteljele õhus oleva auru partsiaalrõhud p_n (mm Hg). Sellele diagrammile on kantud $\varphi = \text{const}$ jooned; kõik ühel niisugusel joonel asetsevad punktid iseloomustavad ühe ja sama relatiivse niiskusega õhku. Samal diagrammil on ka isotermid ($t = \text{const}$ jooned). On vaja ainult silmas pidada, et ühesuguse entalpia jooned ($J = \text{const}$) asetsevad vertikaaljoone suhtes 135°-se nurga all (vt. joon. 34).

Võtame punkti I ja määrame niiske õhu parameetrid, mida see punkt iseloomustab. Selles punktis lõikuvate $\varphi = \text{const}$ ja $t = \text{const}$ joonte väärtuste järgi leiame, et õhu temperatuur $t = 50^\circ \text{C}$ ja relatiivne niiskus $\varphi = 40\%$. Lastes



Joon. 34. Ramzini 1d-diagramm.

ristjoone horisontaalteljele, leiame, et õhu niiskusesisaldus $d=32$ g/kg; tõmmates läbi punkti 1 joone, mis on paralleelne $J=\text{const}$ joontega, s. o. 135° -se nurga all asetsevate joontega, leiame, et õhu entalpia $J=32$ kcal/kg. Kastepunkti määramiseks tõmbame vertikaaljoone (ühe ja sama niiskusesisalduse ehk teiste sõnadega õhus oleva auru ühe ja sama partsiaalrõhu joone) kuni see lõikub $\varphi=100\%$ joonega; läbi saadud punkti 2 läheb $t=\text{const}=32,5^\circ\text{C}$ joon. See ongi punktis 1 iseloomustatud õhu kastepunkti temperatuur ehk kastepunkt. Kui vertikaaljoont pikendada, kuni see lõikub joonega «veeauru partsiaalrõhk», ja lasta saadud punktist ristjoon parempoolsele ordinaatteljele, siis leiame, et punktiga 1 iseloomustatud õhus leiduva veeauru partsiaalrõhk $p_n=36$ mm Hg.

Õhu relatiivse niiskuse määramiseks kasutatakse erilist riista, nn. psühromeetrit. See koosneb kahest termomeetrist — ühest tavalisest, mida nimetatakse «kui-vaks», ja teisest — märjast; viimase elavhõbedaanuma ümber on mähitud niiske riie, mille teine ots on veekaasis.

Kuiv termomeeter näitab niiske õhu temperatuuri ruumis; märg näitab veepinna kohal oleva õhukese õhukihi temperatuuri; seda temperatuuri võib lugeda võrdseks veetemperatuuriga; õhukest õhukihti veepinna lähedal võib lugeda küllastatuks.

Nende kahe termomeetri näitude järgi võib määrata õhu relatiivset niiskust. Selleks on riistaga kaasas spetsiaalne tabel, mis näitab φ väärtusi kuiva ja märja termomeetri mitmesuguste näitude puhul. Kuid nende näitude järgi võib relatiivset niiskust määrata ka Id -diagrammi abil. Olgu märja termomeetri temperatuur $t_m=30^\circ\text{C}$ ning kuiva oma $t_k=35^\circ\text{C}$. Leiame joonel «küllastatud õhk» punkti, kus $t=t_m=30^\circ\text{C}$ (punkt 3); üksikasjalistes kursustes on tõestatud, et küllastamata õhu olekut, mille puhul temperatuur $t_m=30^\circ\text{C}$ iseloomustab peaaegu samasugune soojussisaldus, mis küllastatud õhulgi, mille temperatuur $t=t_m=30^\circ\text{C}$, s. o. need olekud asuvad joontel, mis läbivad punkti 3 vertikaali suhtes 135° nurga all; niisugused jooned (punktiirid) kantakse vahel Id -diagrammile; nende puudumise korral tuleb läbi punkti 3 tõmmata niisugused jooned paralleelselt $I=\text{const}$ joontega, mis lähevad vertikaali suhtes 135° nurga all. Punkt, mis vastab meie poolt vaadeldud õhu olekule, asub sellel joonel ja leitakse selle lõikamisel $t_k=35^\circ\text{C}$ joonega. Ilmselt on see meie juhul

punkt 4. Sellest läbimineva $\varphi = \text{const}$ jõe järgi leiame, et vaadeldud õhu olekul on relatiivne niiskus $\varphi = 70\%$. Õhu ülejäänud karakteristikud võib leida varem näidatud viisil.

Id-diagrammi abil saab lahendada tähtsaid kuivatus-aparaatidesse ja muudesse seadmetesse puutuvaid ülesandeid.

11. Termodünaamika esimene seadus

Käesoleva raamatu alguses oli öeldud, et looduses on tohutud varud mitmesugust liiki energiat: kütuse-, hüdro- ja tuule-energiat. Neist looduslikest energiavarudest on kõige suurem tähtsus kütuse keemilisel energial, mis muudetakse põletamise teel soojusenergiaks. Soojusenergiast saadakse soojusjõuseadmetes mehaanilist energiat. Elektrienergia saadakse neis seadmetes mehaanilise energia edasise muundamise teel.

Esimesed soojusjõumasina, millede abil õnnestus kütuse keemilise energia arvel võrdlemisi ökonoomselt saada mehaanilist energiat, ilmusid XVIII sajandi teisel poolel. Venemaal ehitas 1766. a. I. I. Polzunov ja mõni aeg hiljem Inglismaal J. Watt, kumbki omaette eraldi, aurumasina, mida kasutati vahetult tehase seadmete käitamiseks.

Sel ajal ei osatud veel nende masinate tööd arvutada. Kuid aja jooksul, kui nende kasutamine laienes, muutus väga oluliseks saada mehaanilist energiat võimalikult väiksema kütusekuluga. Nende küsimustega hakkasid tegelema uurijad-füüsikud ja insenerid. Soojusenergia mehaaniliseks ja mehaanilise energia soojusenergiaks muutmise nähtuste pikaajalisel uurimisel ja vaatlemisel tehti kindlaks kaks termodünaamika põhiseadust, milledele need nähtused alluvad. Teadus soojusenergiast ja soojusenergia muundamisest teisteks energialiikideks kannab nimetust **t e r m o d ü n a a m i k a**. Käesolevas raamatus vaadeldakse soojusenergia muundamist mehaaniliseks energiaks soojusjõumasinate abil; niisuguseid muundamisi käsitava teaduse teoreetilist osa nimetatakse aga **t e h n i l i s e k s t e r m o d ü n a a m i k a k s**.

Energia jäävuse ja muundumise seadus teeb kindlaks hulgalise vahekorra mitmesuguse kvaliteediga energialiikide vahel. Matemaatilise avaldise kujul, s. o. võrdusena väljendatuna nimetatakse seda **t e r m o d ü n a a m i k a**

esimeseks põhiseaduseks. Seega on termodünaamika esimene põhiseadus energia jäävuse ja muundamise seaduse teine nimetus.

Oli juba kindlaks tehtud, et kui mingi protsessi võimasina töö tulemusel kadus 1 kcal soojust, siis selle arvel tekkinud energiaga saab teha 427 kgm tööd. Tuletame meelde, et seda vahekorda nimetatakse soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks ning tähistatakse tähega E . Seega,

$$E = 427 \text{ kgm/kcal.}$$

Täpselt samuti, kui kaob 1 kgm mehaanilist energiat, tekib 1/427 kcal soojust; seda suhet nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks ja tähistatakse tähega A . Seega

$$A = \frac{1}{427} \text{ kcal/kgm.}$$

Õeldu põhjal võib termodünaamika esimest põhiseadust soojuse ja mehaanilise energia suhtes väljendada järgmiselt: *vastastikusel muutumisel vastab kaduvale soojusenergiale kindel kogus mehaanilist energiat ja vastupidi.*

Niisugune on esimese seaduse sisu. Antud suhte abil võime arvutada energia hulga vastastikusel muutumisel.

Kui gaasile juhtida soojust juurde, siis, nagu see üldjuhul on toodud näites 17, kulub soojus osaliselt gaasi soojendamiseks ja osaliselt töö tegemiseks. Ei ole tingimata vajalik, et jaotus oleks niisugune, nagu see oli toodud näites. Olenevalt antud tingimustest võib jagunemine olla väga mitmesugune. Soojusenergia, mis kulub gaasi soojendamiseks, antakse edasi gaasi koostises olevatele molekulidele, ehk teisiti öeldult kuluvad gaasi siseenergia suurendamiseks. Tähistame siseenergiat protsessi algul tähega U_1 ja lõpul tähega U_2 . Siis soojuse kogus, mis kulub siseenergia muutmiseks, võrdub $U_2 - U_1$; seda vahet tähistatakse ΔU (siin Δ on kreeka täht delta). Seega

$$U_2 - U_1 = \Delta U. \quad (31)$$

Tähistame gaasi poolt tehtud tööhulga tähega W . Selleks et siseenergia muundamiseks ja töö tegemiseks kulunud soojushulki liita, tuleb mõlemad suurused väljendada ühtedes ja samades mõõtühikutes. Siseenergia muu-

tuste mõõtmiseks kasutatakse tavaliselt kcal, töö jaoks aga kgm. Selleks et neid suurusi liita, tuleb W korrutada töö termilise ekvivalendiga $A = \frac{1}{427}$; sel juhul on töö AW väljendatud kcal. Seega siseenergia muutmiseks ja töö tegemiseks kulunud soojus moodustab $\Delta U + AW$. Termodünaamika esimese seaduse põhjal moodustabki see summa soojuse hulga, mis juhiti juurde gaasile. Kui seda soojusehulka tähistada tähega Q , mõõtes teda kcal, siis võime kirjutada:

$$Q = \Delta U + AW. \quad (32)$$

Seda võrdust nimetatakse termodünaamika esimese põhiseaduse matemaatiliseks väljenduseks. Seda loetakse järgmiselt: *gaasile juurdejuhitud soojus kulub gaasi siseenergia muutmiseks ja tööks.*

Juhul kui soojendatakse ideaalset gaasi, võib ΔU väärtused valemi (12) järgi kirjutada

$$\Delta U = Gc_v(t_2 - t_1). \quad (33)$$

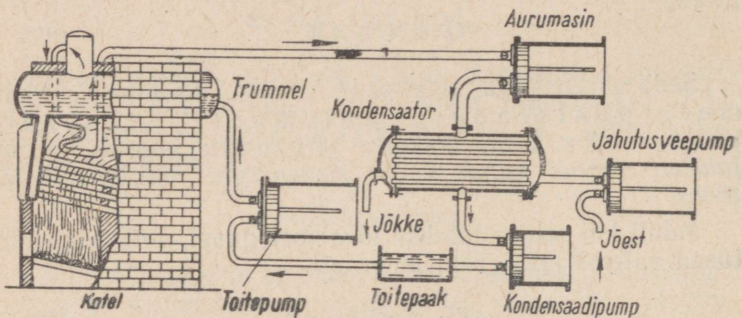
Valemist on näha, et ideaalse gaasi siseenergia muutmist määratakse gaasi temperatuuride vahega ning erisoojus võetakse jääval mahul.

12. Termodünaamika teine seadus

Termodünaamika esimene seadus määras kindlaks ainult vahekorrad mitmesugust liiki energiahulkade muundumisel. Sellest aga, millisel teel võib saavutada niisugust muutumist ja kas see on alati võimalik, ei olnud räägitud. Neid küsimusi lahendab termodünaamika teine seadus.

Vaatlused näitavad, et soojusenergia muundumisel mehaaniliseks ja mehaanilise energia muundumisel soojuseks valitseb oluline erinevus. Jälgime algul mehaanilise energia muundumist soojuslikuks. Selleks vaatleme näiteks treipinki. Pinki nõuab teatud hulgal mehaanilist energiat, mis juhitakse temasse transmissioonilt või elektrimootorilt (elektrimootori võlli pöörlemise mehaaniline energia saadakse elektrienergiast, mis tuleb mootori mähistes

elektrivõrgust). Suurema osa saadud mehaanilisest energiast kulutab pink treiteraga laastu lõigates töö tegemiseks; seejuures muundub tera hõõrdumisest metalli vastu see osa mehaanilisest energiast soojuseks. Peale selle kulutatakse teatud hulk mehaanilist energiat hõõrdumiseks hammasrataste vahel ja laagrites, mis seetõttu kuumenevad. Selle tulemusel muutub kõik pingi poolt saadav energia soojusenergiaks.



Joon 35. Aurujõu-seadme skeem.

Vaatleme nüüd soojusenergia muutmist mehaaniliseks, mis toimub erilistes masinates, nn. soojusjõumasinates. Edaspidi vaatleme paljude niisuguste masinate töötamist üksikasjalisemalt. Siin aga pöörame tähelepanu ainult nende töö peamisele küljele ja seame nimelt üles tingimused, mis on vajalikud selleks, et muuta soojusenergia nendes masinates mehaaniliseks. Selleks vaatleme niisuguseks muundumiseks vajaliku seadme lihtsustatud skeemi, mis on kujutatud joonisel 35. Kütuse põlemise toimet toodab katel veeauru; torustiku kaudu juhitakse veeaur aurumasinasse silindrisse. Erinevalt joonisel 1 toodud skeemist on siin jõumasinaks aurumasin (vt. edaspidi p. 25).

Kui masina silindrisse lasta kogus auru, siis toimub silindris auru paisumine. Seejuures liigub kolb äärmisest vasakpoolsest asendist parempoolsesse. Paisumisel kaotab aur osa temale katlas antud soojusenergiast; kaduva soojusenergia asemel tekib kolvi liikumise mehaaniline energia. Pärast seda hakkab kolb äärmisest parempoolsest

asendist liikuma äärmisesse vasakpoolsesse asendisse ja tõukab auru kondensaatorisse; viimases võetakse suur osa auru soojusest jahutusvee abil ära ja aur kondenseerub veeks (kondensaadiks), mis esialgu saadetakse pumba abil toitepaaki ja sealt jälle pumba abil aurukatlasse. Üheaegselt tuleb aurumasina silindrisse uus kogus auru.

Niisugune ongi põhiliselt soojusenergia mehaaniliseks energiaks muutmise skeem. Siin, nagu öeldakse, on kirjeldatud soojusjõumasina üht tsüklit, mille all mõistetakse töötava keha oleku muutumist ajaperioodil, mille kestel algolekust lähtunud töötav keha pöörduv samasse olekusse tagasi. Aurumasina töötamisel toimub niisuguste tsüklite kordumine, mistõttu teda nimetatakse perioodiliselt töötavaks masinaks. Sellest nimetusest tuleb aru saada niisuguses mõttes, et masin töötab perioodide kaupa (tsüklitega), mis võivad korduda nii kaua kui soovitakse, see ongi niisuguse masina tähtsamaks omaduseks. Sissejuhatuses vaadeldud soojusjõuseadme skeem erines siintoodust selle poolest, et sealne masin oli teistsuguse konstruktsiooniga, nimelt turbiin; kuid ka seal on täidetud masina töötamise põhitingimused — töötamise pidevus ja töötava keha pöördumine esialgsesse olekusse. Seetõttu, vaatamata konstruktiivsetele erinevustele, kuulub ka turbiin üpi masin perioodiliselt töötavate masinate hulka.

Perioodilise tööga masinate juures võime märkida järgmist iseärasust. Töötav keha, mille abil toimub soojusenergia muutmise mehaaniliseks, peab saama soojust. Selleks on olemas soojuse allikas (meie juhul — kuumad gaasid katlas); seda nimetatakse soojuse andjaks ning vahest ka soojuse ülemiseks ehk kuumaks allikaks. Saagu töötava keha ühe tsükli jooksul Q_1 kilokalorit soojust. Osa sellest soojusest muutub masina silindris mehaaniliseks energiaks. Soojuse ülejäänud osa, olgu see Q_2 , võeti töötavalt kehalt ära kondensaatoris ega saadud muuta mehaaniliseks energiaks. Keha, millele anti soojus Q_2 (meie juhul — külma vesi kondensaatoris), nimetatakse soojuse vastuvõtjaks ning vahest ka soojuse madalaks ehk külma allikaks.

Seega õnnestub perioodiliselt töötavates masinates

muuta mehaaniliseks energiaks ainult vahet $Q_1 - Q_2$ (kuid mitte kogu soojust Q_1).

Termodünaamika esimese seaduse põhjal saadakse sellest vahest 427 ($Q_1 - Q_2$) kgm mehaanilist energiat. Kogu seda energiat ei saa aga tegeliku masina võllilt kasutada, sest osa sellest läheb kaduma. Käesoleval juhul vaatleme aga teoreetilist masinat, millel ei esine mehaanilise energia kadusid. Niisugust masinat nimetatakse ideaalseks masinaks.

Saagu töötav keha kõrgemalt allikalt ühe tsükli jooksul 100 kilokalorit soojust ning andku ta 80 kilokalorit madalamale allikale. Seega läheb soojuse näol 20 kilokalorit kaduma ning see osa muutub mehaaniliseks tööks. Vastavalt termodünaamika esimesele seadusele 1 kcal soojusenergia muutmisel mehaaniliseks energiaks saadakse 427 kgm tööd. Kogu saadud mehaanilise energia hulk moodustab:

$$20 \cdot 427 = 8540 \text{ kgm.}$$

Tekib loomulikult küsimus, kas ei saaks vältida soojuse andmist külmale allikale, vaid viia töötav keha algolekusse mingil teisel teel, näiteks surudes töötanud aur kokku vajaliku rõhuni kompressoris (masinas, mis on gaasiliste kehade kokkusurumiseks). Osutub, et mitte, sest selleks tuleks kulutada suur hulk energiat ja soojusjõumasina töö oleks seega väga ebaökoonoomne. Soojuse eemaldamist kondensaatoris ja auru muutmist veeks kasutatakse sellepärast, et siis energia kulu töötava keha aurukatlasse tagasipöördumiseks on kõige minimaalsem, sest vedelikke on pumpade abil võrdlemisi kerge pumbata.

Perioodilise tööga masinates ei saa mehaaniliseks tööks muuta kõike soojust, mis saadakse mingist allikast. See lause moodustabki termodünaamika teise seaduse sisu.

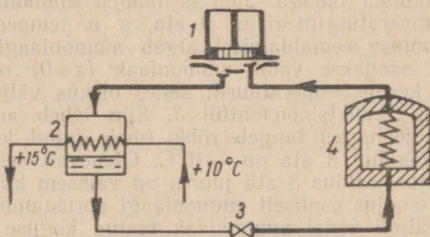
On ka teisi skeeme, mille järgi masinad töötavad. Mõnes neis näiteks heidetakse aur atmosfääri ning katlasse läheb selle asemel värske vesi. On mootoreid, milles töötavaks kehaks ei ole veeaur, vaid gaasid. Kuid kõigi nende skeemide juures on vajalik nii soojuse andmine kui ka äravõtmine töötavalt kehalt ehk teiste sõnadega, kõik nad kinnitavad asjaolu, et soojusmasinas on võimatu muuta mehaaniliseks tööks kõike soojusenergiat, mis saadakse kõrgemalt soojusallikalt.

Kuna töötav keha ühelt allikalt soojust saab, teisele aga seda annab, siis peab nendel allikatel olema erinev temperatuur. Seega seab teine termodünaamika seadus üles tingimuse, et soojusenergia muundumine mehaaniliseks saab toimuda perioodiliselt töötavas masinas siis, kui on olemas temperatuuride vahe.

Teades soojuse hulka, mis juhiti töötavale kehale kõrgemast soojusallikast (Q_1), ja soojuse hulka, mis muudeti mehaaniliseks tööks ($Q_1 - Q_2$), võime hinnata soojuse tööks muutmise täiuslikkuse astet. Selleks tuleb teada, millise osa moodustab ($Q_1 - Q_2$) võrreldes soojusega Q_1 , s. o. tuleb teada jagatist $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$. Seda jagatist nimetatakse termiliseks kasuteguriks ja tähistatakse kreeka tähega η (eeta) indeksiga t , s. o. η_t . Järelikult

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (34)$$

Seega näitab termiline kasutegur töötavale kehale kõrgemalt allikalt antud soojuse hulgast seda osa, mis muudetakse ideaalses masinas mehaaniliseks energiaks.



Joon. 35a. Külmutusseadme skeem.

Teist termodünaamika seadust, mis tuli ilmsiks soojusjõuseadmete vaatlemisel, võib leida ka rea teiste nähtuste juures. Nende hulgas tuleb kõigepealt märkida tehnikas laialt kasutusel olevaid külmutusseadmeid. Nende ülesandeks on hoida mõnes ruumis või seadmes temperatuur madalam kui ümbritsevas keskkonnas.

Kõige sagedamini kasutatakse külmutusseadmetes töötavaks kehaks kergesti keevaid vedelikke. Niisuguste vedelikkude hulka kuuluvad ammoniaak, süsihappegaas, freoon jne. Laiemalt on nende hulgas levinud ammoniaak, mille keemistemperatuur atmosfääri rõhul on -35°C . Rõhu tõusul, nagu teada, keemistemperatuur

tõuseb. Nii on ammoniaagi keemistemperatuur rõhul 3 ata -10°C , rõhul 9 ata aga 20°C . Nende temperatuuride võrdlemisel vee keemistemperatuuriga võib veenduda, et ammoniaagil on see tundvalt madalam.

Vaatleme ammoniaagiga töötava külmutusseadme tööd (joon. 35 a) ja selgitame, milles väljendub teise termodünaamika seaduse rakendamine.

Olgu ruumis 4 ettenähtud temperatuur -5°C ja see on antud juhul madalam ümbritseva keskkonna temperatuurist. Selleks et ruumis sellist temperatuuri hoida, tuleb temast pidevalt soojust eemaldada, mis ümbritsevast keskkonnast läbi seinte sisse tuleb. Selle soojuse ärajuhtimine toimub järgmisel viisil. Ammoniaagi kuiv küllastunud aur rõhul ligikaudu 3 ata ja sellele vastaval temperatuuril -10°C läheb kompressorisse 1. Nii nimetatakse masinat, mida kasutatakse gaaside kokkusurumiseks. Kokkusurumine toimub kompressoris elektrivõrgust saadava energia arvel, milleks kompressori võlliga on ühendatud elektrimootori võll. Kolvi ülestõusmisel avaneb sisselaske (parempoolne) klapp ja ammoniaagiaurud lähevad kompressori silindrisse. Kui kolb jõuab äärmisse ülemisse seisus, siis sisselaske klapp sulgub, kolb liigub tagasi ja surub ammoniaagi kokku; viimase temperatuur ja rõhk tõusevad ning saadakse ülekülmendatud ammoniaagi aur. Kui rõhk on tõusnud etteantud väärtuseni (meie juhul umbes 9 ata), avaneb väljalaskeklapp ja ammoniaagiaurud lähevad kompressori silindrist välja; seejärel väljalaskeklapp sulgub ja protsess kordub algusest peale. Kompressorist väljuv aur läheb jahutisse (kondensaatorisse) 2. Siin uhutakse spiraalitoru, mille sees liigub ammoniaagi aur, veega, mis võetakse mingist looduslikust veevallikast — järvest, jõest või tiigist, mille vee temperatuur võrdub ümbritseva keskkonna omaga. Jahutis langeb ammoniaagi temperatuur küllastustemperatuurini rõhul 9 ata, s. o. temperatuurile 20°C , ning edasise soojuse eemaldamisel algab ammoniaagi kondenseerumine. Seejuures saadakse vedel ammoniaak ($x=0$) rõhul 9 ata ja sellele vastaval keemistemperatuuril; selles olekus väljub ammoniaak jahutist ja läheb reduktsioonventiili 3. Siin läheb ammoniaak läbi ahendatud ava; seejuures langeb rõhk (meie juhul kuni 3 ata) ja temperatuur, mis rõhul 3 ata on -10°C . Olenevalt sellest, et vedela ammoniaagi soojussisaldus 3 ata juures on väiksem kui 9 ata juures, läheb eraldunud soojus osaliselt ammoniaagi aurustamiseks ja reduktsioonventiilist väljub vedel ammoniaak teatud koguse auruga, mille kuivuse aste on 0,1—0,12. Niisuguses olekus läheb niiske küllastunud aur jahutatavasse ruumi. Kuna õhu temperatuur selles ruumis on kõrgem kui ammoniaagil ($-5 > -10$), siis kandub õhu soojus ammoniaagile; selle soojuse arvel toimub ammoniaagi aurumine ning kuivuse aste suureneb (meie juhul kuni $x=1$). Selle tulemusel muutub ammoniaak kuivaks ja küllastunuks ning läheb niisugusel kujul kompressorisse; seejärel tsüklil kordub. Niiviisi kantakse jahutusruumi seintest läbitulnud soojus edasi ammoniaagile ning jahutatava ruumi temperatuur ei tõuse.

Külmutusseadme tööd analüüsides näeme, et ammoniaagi poolt jahutuskambris madalal temperatuuril (-10°C) saadud soojus antakse hiljem edasi jahutusveele, mille temperatuur on kõrgem ($10-15^{\circ}\text{C}$). Igapäevastest kogemustest teame, et soojus ei lähe iseenesest ehk loomuliku protsessi toimel külmemalt kehalt soojemale, kuid see, mis toimub külmutusseadmes, et räägi meie igapäevastele

kogemustele vastu, sest siin ei lähe soojus madalama temperatuuriga kehalt kõrgema temperatuuriga kehale iseenesest, loomuliku protsessiga, vaid kompressori töö tulemusel, mis vajab mehaanilist energiat. Seega võib igapäevaste kogemuste põhjal, mida tõestab külmutusseadme töötamine, öelda: *soojus ei saa madalama temperatuuriga kehalt kõrgema temperatuuriga kehale minna iseenesest*. See on siin termodünaamika teise seaduse teine formuleering.

Näitame, et mõlemad formuleeringud on ühtsed.

Nagu külmutusseadegi, nii on ka perioodilise protsessiga mootor määratud selleks, et teostada protsessi, mis iseenesest, s. o. loomulikult ei toimuks. Ja tõepoolest, igapäevastest kogemustest me teame, et mehaaniline energia muutub hõõrdumisel soojuslikuks. See protsess, nagu soojuse üleminek soojemalt kehalt külmemale, on loomulik protsess. Vastupidine protsess, soojusenergia üleminek mehaaniliseks, ei toimu aga iseenesest; selle läbiviimiseks on vaja küllalt suur osa soojust edasi anda külmale allikale ning ainult seetõttu toimub soojusjõuseadmes sunniviisiline soojuse ülemineku protsess mehaaniliseks energiaks. Seega räägib termodünaamika teine seadus (olguigi et tuletatud erinevate seadmete töötamisest) mõlemal juhul sellest, milliseid tingimusi tuleb täita, et oleks võimalik teostada sunniviisiliselt toimuvaid protsesse, ehk teiste sõnadega tõestab termodünaamika teine seadus seda, et loomulikud protsessid ei saa vastupidises suunas iseenesest toimuda. Lühidalt väljendatult on see mõte järgmine: *loomulikud protsessid ei ole tagastatavad*. Viimane väide ongi termodünaamika teise seaduse üldistatud formuleering.

Rääkides kahest vaadeldud seadmest, tuleb märkida, et nendes toimuvad protsessid on teineteisele vastupidised, nii et külmutusseadet võib vaadelda vastupidisena soojusjõuseadmele.

Ja tõepoolest, soojusjõuseadmes luuakse mehaanilist energiat ning sellega kaasneb soojuse üleminek kõrgema temperatuuriga allikalt madalama temperatuuriga allikale; külmutusseadmes toimub vastupidiselt soojuse q_2 üleminek madalama temperatuuriga kehalt kõrgema temperatuuriga kehale, kuid selleks tuleb kulutada mehaanilist energiat.

Seega väidab termodünaamika teine seadus, et rida nähtusi ei saa toimuda iseenesest. Ta on tuletatud meid vahetult ümbritseva looduse nähtuste vaatlemisest ja kehtib seaduspäraselt ainult nende nähtuste kohta.

Reaktsionäärid ja usklikud, olles idealistliku maailmavaatega, püüavad termodünaamika teist seadust kasutada selleks, et «teaduslikult» põhjendada maailmaprotsessi kulgemist.

Nende ettekujutuse järgi löi mingi «vaim» ehk jumal — nagu teda nimetatakse — väga ammu maailma ja edaspidi, võib-olla mitte väga varsti tuleb maailma «lõpp», s. o. kogu maailma surm. Seda ettekujutust püüavad nad põhjendada termodünaamika teise seadusega. Nende arutlused viivad järgmisele. Kõik maailma protsessid toimuvad selliselt, et soojus läheb kõrgema temperatuuriga kehadele madalama temperatuuriga kehadele ja temperatuurid seejuures ühtlustuvad. Järelikult saabub silmapilk, kui temperatuurid on soojuslike protsesside tõttu ühtlustunud ja soojuslike protsesside kulgemine lakkab. Seda maailma olekut nimetavad nad «soojusesurmaks»; usu väitel ongi see maailma «lõpp». On ilmne, et kunagi oli temperatuuride vahe maksimaalne; seda momenti nad nimetavadki maailma «alguseks».

Need pessimistlikud järeldused maailmaprotsessi ühesuunalise kulgemise kohta leiavad kapitalistlike maade idealistlikus teaduses kuni seni ajani kasutamist oma reaktsioonilise ideoloogia tõestamiseks. Materialistlik teadus lükkab ümber nende vaated, käsitledes nähtusi aine ehitusest lähtudes.

Aine molekulaar-kineetiline teooria, mida arendasid paljud teadlased, alustades M. V. Lomonossoviga, näitab, et esitatud formuleeringus kehtib teine termodünaamika seadus suurest arvust molekulidest koosnevate kehade kohta, s. t. niisuguste kohta, mis vahetult meid ümbritsevas keskkonnas asetsevad ega või seda laiendada kogu maailmale, mille atmosfäär on tunduvalt hõredam ning temperatuur madalam. Katsetega ja teoreetiliselt on tõestatud, et kehaes, mis koosnevad väikesest arvust molekulidest, võivad kulgeda niisugused protsessid, mis suure arvu molekulidega kehaes iseenesest ei toimu. Seega ei ole seaduspärane laiendada termodünaamika teist seadust kogu maailmale.

Friedrich Engels ütleb «soojusesurma» kohta: «Seega tuleme me järeldusele, et maailmaruumi kiiratud soojusel peab olema võimalik mingil teisel teel — teel, mille kindlakstegemine on kunagi tulevikus loodusteaduse ülesandeks, — muundada seda mõneks teiseks liikumisvormiks, mille puhul too saab uuesti keskenduda ning hakata uuesti aktiivselt funktsioneerima.»¹

Mõned viimaste aastate avastused annavad põhjust oletada, et maailma kaugetes keskkondades avastatud nähetel ei ole niisugust kulgu, nagu meid ümbritsevates kehaes, mis koosnevad suurest arvust molekulidest. Seega on termodünaamika teisel seadusel piiratud tähtsus ja tal, nagu öeldakse, ei ole absoluutset iseloomu.

Mis puutub niisugusse väitesse, et maailm oleks nagu kunagi loodud, siis kummutab selle nõukogude kosmogoonia — teadus, mis uurib taevakehade ja nende süsteemide päritolu ja arengut. Juhindudes dialektilise materialismi meetoditest, näitasid nõukogude teadlased teoreetiliste kaalutluste ja vaatluste najal, et tähtede kujunemisprotsessid on leidnud aset alati ja jätkuvad ka meie päevil. Maailma protsessid ei lähe seega «algusest» — «lõpuni», vaid toimuvad igavesti. Nende töödega on kummutatud paljude välismaiste teadlaste väited tähtede üheaegsest tekkimisest teatud epochil.

Pöördudes tagasi väite juurde, et termodünaamika teine seadus ei ole absoluutne, tuleb seejuures alla kriipsutada, et suurest hulgast molekulidest koosnevate kehade, s. t. niisuguste puhul, mida me kohame igapäevases elus ja tehnikas, ei ole selle seaduse kehtivuses mingit kahtlust; seepärast oleksid viljatud igasugused katsed ehitada masinat, mille kohta ei kehtiks termodünaamika teine seadus.

¹ Ф. Энгельс, Дialeктика природы, 1948, стр. 20.

13. Carnot' ringprotsess

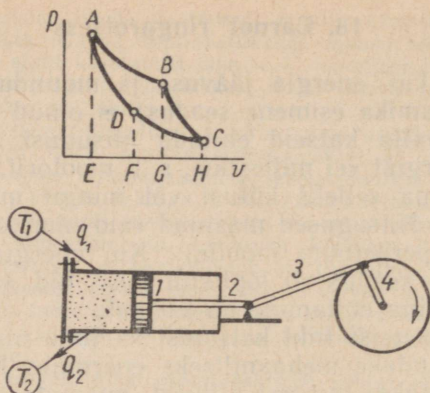
Varem, kui energia jäävuse ja muundumise seadus (termodünaamika esimene seadus) ei olnud laiemalt tuntud, tehti palju katseid ehitada niisugust masinat, mis toodaks energiat «ei millestki», s. t. mootorit, mis toodaks energiat, ilma selleks kütust või mingit muud energiat kasutamata. Niisugused masinad said nimetuse «igavesed masinad» (perpetuum mobile). Kui energia jäävuse ja muundumise seadus oli lõplikult tõestatud, sai selgeks, et igavese masina ehitamine on võimatu.

Esines ka teist liiki katsetusi — luua niisugune mootor, mis muudaks mehaaniliseks energiaks kogu soojuse, mis talle antakse mingist allikast, andmata aga seejuures soojust madalama temperatuuriga allikale. Niisugune masin võimaldaks kasutada tohutud hulgad soojusenergia sisemisi varusid, näiteks merede ja ookeanide vee soojust. Kauaaegsed praktilised kogemused masinate ehitamisel, mis viisid termodünaamika teise seaduse avastamisele, näitasid, et niisuguse perioodiliselt töötava masina ehitamine on võimatu.

Masin, mille põhimõte on vasturääkiv termodünaamika teisele seadusele, sai nimetuse teise liigi perpetuum mobile, ning masin, mis oli vastuolus esimese termodünaamika seadusega — esimest liiki perpetuum mobile.

Masinate projekteerimisel püütakse selle poole, et need kulutaksid iga toodetud mehaanilise energiaühiku kohta võimalikult vähem kütust. Seepärast on suur praktiline tähtsus küsimusel, millise maksimaalse osa saab töötavale kehale kõrgemast soojusallikast juurdejuhitud soojusest muuta mehaaniliseks energiaks. Selle küsimuse lahendas prantsuse õpetlane ja insener Sady Carnot 1824. aastal. Ta näitas, millise tsükli peab läbi tegema töötav keha, ehk teiste sõnadega, kuidas peab muutuma tema olek mootoris, et soojuse muutumine mehaaniliseks energiaks oleks maksimaalne. Koos sellega näitas ta ka, kuidas määrata niisuguse tsükli termilist kasutegurit.

Carnot' ringprotsess on järgmine (joon. 36). Olgu ideaalse mootori silindris kolvi all 1 kg töötavat keha. Ülemine ja alumine allikas on joonisel 36 tähistatud ringidega. Olgu ülemise allika absoluutne temperatuur T_1 ning alumise oma T_2 . Alguses saab töötav keha ülemiselt



Joon. 36. Carnot' ringrotsess.

soojusallikalt soojust nii, et gaasi temperatuur jääks kogu aeg võrdseks allika temperatuuriga T_1 , teiste sõnadega, töötava keha paisuks isotermiliselt. Selguse mõttes kujutame töötava keha oleku muutust p - v -diagrammis, mille paigutame silindri kohale. Joon AB kujutab enesest töötava keha paisumist isotermilisel protsessil. Punktis B lõpeb soojuse isotermiline juurdejuhtimine ja edasi paisub töötava keha adiabaati mööda. Tuleb eeldada, et silinder on sel ajal mõlemast soojusallikast ja välisest keskkonnast hästi isoleeritud ega vaheta nendega soojust. Joon BC kujutab p - v -diagrammis töötava keha adiabaatilist paisumist — see läheb järsemini kui AB . Sellega lõpebki töötava keha paisumine. Kogu selle isotermilise ja diabaatilise paisumise kestel tegi töötava keha tööd, mida saab mõõta pindalaga $ABCHEA$. See töö antakse kolvi 1 , kolvi varre 2 , kepsu 3 ja vända 4 abil edasi masina võllile ning pannakse see pöörlema. Selleks et oleks võimalik töötava keha paisumist uuesti korrata, tuleb kolb viia oma algasendisse. Nüüd teeb seda juba võll, mis pöörleb töötavalt kehalt saadud energia arvel, ja tõukab kolvi 1 ülekandelementide 4 , 3 ja 2 kaudu vasakule. Seejuures toimub esialgu töötava keha isotermiline kokkusurumine joont CD mööda. Sellega kaasub soojuse võtmine töötavalt kehalt ning andmine madalamale soojuseallikale T_2 . Pärast isotermilist kokkusurumist surutakse töötavat keha kokku adiabaati mööda (joon DA), milleks võllil

tuleb veel tööd teha. Üldist tööhulka, mis kulub töötava keha kokkusurumiseks, mõõdetakse pindalaga $ADCHEA$. Seega lõpeb üks periood ehk, nagu öeldakse, tsükkel, ning töötav keha võib seda uuesti alustada. Ühe tsükli kestel andis töötav keha paisumisel võllile tööhulga, mille suurst saab mõõta pindalaga $ABCHEA$, ning kokkusurumisel tegi võll tööd, mida mõõdab väiksem pindala $ADCHEA$. Nende pindalade vahe on $ABCD$, ja kujutab endast tööd, mida kogu tsükli kestel tegi masin. Seda tööd võib kasutada transmissiooni abil tööpinkide käitamiseks või elektrienergia tootmiseks.

Carnot arvutas siin kirjeldatud tsükli termilise kasuteguri. Selleks tuleb arvutada soojushulgad Q_1 ja Q_2 , et kasutada valemit (34). Kuid see pole hädavajalik. Nagu näitas Carnot, võib tema poolt esitatud ringprotsessi termilist kasutegurit arvutada ka ringprotsessist osa võtvate soojusallikate absoluuttemperatuuride kaudu. Nimelt võib Carnot' ringprotsessi termilise kasuteguri leida valemiga

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (35)$$

kus T_1 — kuuma soojusallika absoluuttemperatuur ja
 T_2 — külma soojusallika absoluuttemperatuur.

Toodud valemist on näha, et termiline kasutegur on seda suurem, mida väiksem on murd $\frac{T_2}{T_1}$; et see murd oleks vähima väärtusega, on vaja, et T_2 oleks võimalikult väike ning T_1 võimalikult suur.

Selle valemi abil võime kindlaks teha, millega võrduks aurujõuseadme termiline kasutegur, kui ta töötaks Carnot' ringprotsessi järgi. Aurujõuseadmetes kasutatakse külma allikaks, millele töötav keha oma soojuse annab, jõgede või järvede vett, mille aasta keskmiseks temperatuuriks võib lugeda 10°C . Seejuures on masinast väljuva töötava keha temperatuur natuke kõrgem; seda võib hinnata võrdseks 30°C . Seega $T_2 = 30 + 273 = 303^\circ\text{K}$. Kõrgeim töötava keha (veeauru) temperatuur, mida praegusel ajal kasutatakse, on ligikaudu 600°C , s. o. kaasaegsete aurujõuseadmete puhul $T_1 = 600 + 273 = 873^\circ\text{K}$. Kui asetada nüüd saadud väärtused valemisse (35), saame Carnot' ringprotsessi jaoks aurujõuseadmes

$$\eta_t = 1 - \frac{303}{873} = 0,652.$$

Toodud arvutusest on näha, et maksimaalne osa soojust, mida saab muuta tööks Carnot' ringprotsessil, moodustab antud temperatuuridel 65,2%.

Ringprotsesside üksikasjalik teoreetiline uurimine näitab, et ei ole võimalik leida niisugust ringprotsessi, mille järgi töötamisel soojusallikate antud temperatuuride puhul võiks termiline kasutegur olla kõrgem, kui seda õnnestub saada soojusallikate samadel temperatuuridel Carnot' ringprotsessi järgi. Seejuures võib tõestada, et Carnot' ringprotsessi kasutegur ei olene sellest, milline on töötav keha, s. t. kas selleks on üks või teine gaas, aur jne.

Kuid tegelikult ehitada masinat, mis töötaks täpselt Carnot' ringprotsessi järgi, ei ole võimalik, sest on raske ja vahel isegi võimatu teostada täpselt isotermilisi ja adiabaatilisi protsesse. Peale selle esineb masina töötamisel rida vältimatuid soojuskadusid — kiirgusega, auru läbilaskest ja hõõrdumisest, mis samuti vähendavad soojuse hulka, mida võiks muuta tööks. Seepärast on aurujõuseadmetel, milledega toodetakse elektrienergiat, tegelikult tunduvalt madalamad kasutegurid kui eespool arvatud.

Edaspidi näidatakse lähemalt, milliseid abinõusid nõukogude soojusenergeetikas rakendatakse, et teha kütuse soojuse kasutamist tõhusamaks.

14. Soojusvahetusaparaadid

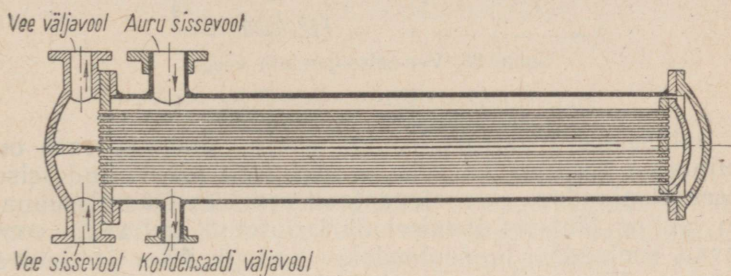
Käesoleva raamatu alguses oli viidatud, et soojusenergiat ei kasutata laialdaselt mitte ainult mehaaniliseks energiaks (ja seejärel elektrienergiaks) muundamisel, vaid teda on vaja ka soojendamiseks. Väga paljud tööstuslikud protsessid vajavad soojust. Neil juhtudel on tavaliselt soojuskandjaks gaasiline või vedel keha. Gaasilise soojuskandjana kasutatakse suuremalt jaolt kütuse põlemisaadusi või veeauru. Vedelatest soojuskandjatest kasutatakse kõige sagedamini vett.

Soojust võib vahetult üle kanda soojendava ja soojendatava keha segamise teel; kuid soojendada võib ka ilma segamata — sel juhul asetseb soojendatava ja soojendava keha vahel hästi soojust juhtiv vahesein.

Mõnikord aga toimitakse vastupidi ning püütakse saavutada seda, et soe keha ei annaks soojust ümbritsevasse

keskkonda; nii ümbritsetakse näiteks torud, milledes voolab veeaur, halvasti soojustjuhtivate isolatsioonmaterjalidega.

Aparaate, milledes toimub ühtede kehade soojendamise teiste kehade poolt läbi eraldava seina, nimetatakse soojusvahetusaparaatideks. Nii on aurukatel keerukaks soojusvahetusaparaadiks, milles kütuse põlemisel eraldunud soojus antakse edasi veele ja aurule. Teiseks näiteks soojusvahetusaparaatidest võib nimetada boilereid, milles vee soojendamine kütteks või muudeks elukondlikeks vajadusteks toimub auru või kuumema veega.



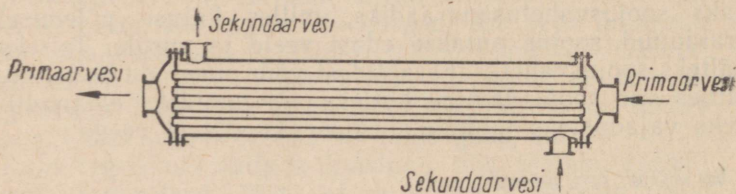
Joon. 37. Vee-eelsoojendaja auruga.

Soojusvahetusaparaadi näiteks on ka kondensaator, millest me rääkisime aurujõuseadme ja külmutusmasina kirjeldamisel.

Joonisel 37 on kujutatud soojusvahetaja, mida kasutatakse vee soojendamiseks auru abil. Vesi voolab soojusvahetajasse vasakpoolse kaane alumise stutsi kaudu alumisse veekambrisse ja sellest edasi alumisse torudekimpu. Voolanud läbi torude parempoolsesse veekambrisse, suundub vesi ülemist torudekimpu mööda tagasi vasakpoolse kaane ülemisse veekambrisse ning väljub ülemise stutsi kaudu. Soojendav aur tuleb soojusvahetusaparaati ülevalt ja ümbritseb torusid. Andnud oma soojuse torude seinte kaudu veele, aur kondenseerub ning kondensaat lahkub soojusvahetusaparaadist alumise stutsi kaudu. Kirjeldatud tüüpi soojendajat kasutatakse soojuselektrikeskjaamades, tööstusettevõtete kütteseadmetes ja majades neil juhtudel, kui soojendavaks kehaks on aur. Samasugust konstruktsiooni võib kasutada ka neil juhtudel, kui

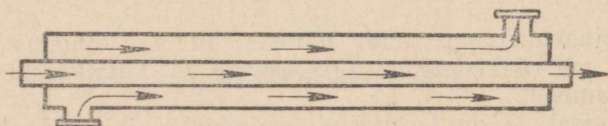
soojendavaks kehaks on vesi ning soojendatavaks on samuti vesi.

Teist tüüpi soojusvahetaja on kujutatud joonisel 38. Siin liigub primaarne, s. o. soojendav vesi torude sees ning sekundaarne (soojendatav) väljaspool torusid.



Joon. 38. Vee-eelsoojendaja veega.

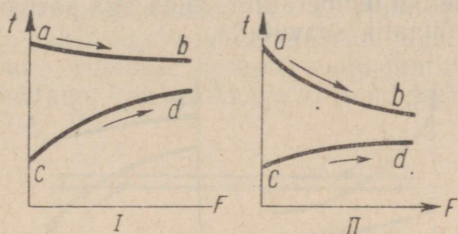
Lihtsaima konstruktsiooniga soojusvahetusaparaat on kujutatud joonisel 39. Siin on üks toru paigutatud teise sisse. Soojendava ja soojendatava vedeliku liikumissuunal on oluline tähtsus; joonisel 39 kujutatud aparaadis voolavad soojendav ja soojendatav vedelik ühes ja samas suunas. Niisugust aparaati nimetatakse p ä r i v o o l u a p a r a a d i k s.



Joon. 39. Pärivoolu soojusvahetusaparaat (toru torus).

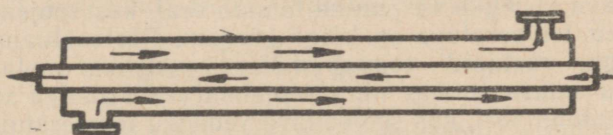
Kujutame soojendava ja soojendatava vedeliku temperatuurid graafiliselt. Olgu mõlemal juhul selleks vedelikuks vesi. Abstsissiteljele kanname soojusvahetajas vee poolt läbitud kauguse. Ordinaatteljele kanname vee temperatuurid vastavalt tema liikumisele. Siin kirjeldatud paralleelvooluga aparaadis muutuvad temperatuurid selliselt, nagu kujutatud joonisel 40. Soojendava vee (kõver *ab*) temperatuur langeb, soojendatava vee temperatuur aga seejuures tõuseb, nagu näidatud alumise kõveraga *cd*. Olenevalt ühe või teise vedeliku hulgast võivad need kõverad muuta oma iseloomu (selle poolest erinevadki juhud I

ja II joonisel 40), kuid alati paiknevad nad nii, et alumine kõver ei jõua kunagi ülemiseni, s. o. päri vooluga soojusvahetusaparaadis ei saa väljuva soojendava ja väljuva soojendatava vee temperatuurid võrdseks.



Joon. 40. Temperatuuride muutumine päri voolu soojusvahetusaparaadis.

Sageli ehitatakse niisuguseid soojusvahetusaparaate, kus soojendav ja soojendatav vesi liiguvad vastupidistes suundades. Niisuguseid aparate nimetatakse vastuvooluaparaatideks. Kui joonisel 39 kujutatud aparatis vahetada soojendatava vee sisse- ja väljavoolukohad, siis saame joonisel 41 kujutatud vastuvooluga

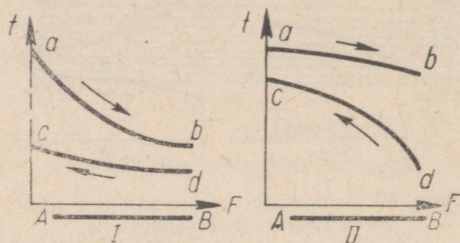


Joon. 41. Vastuvoolu soojusvahetusaparaat.

soojusvahetusaparaadi. Kujutame selles aparatis soojendava ja soojendatava vedeliku temperatuuri muutusi graafiliselt. Nagu ennegi, kujutame abstsissiteljel aparatis vee poolt läbitud kauguse (joon. 42). Olgu aparadi telg joonisel kujutatud joonega AB ; loeme punkti A soojendava vee ning punkti B soojendatava vee sissevooluks. Sel juhul kujutavad vete temperatuuride käike jooned ab ja dc . Joon ab näitab, et soojendava vee temperatuur langeb, joon dc aga näitab, et soojendatava vee temperatuur tõuseb. Muutes ühe või teise vee hulka, võime teatud piirides

muuta soojendava ja soojendatava vee väljumistempera-
tuuri (selle poolest erinevadki joonisel 42 juhud I ja II).

Selle soojusvahetusaparaadi erinevuseks võrreldes päri-
vooluaparaadiga on see, et soojendatava vee väljumis-
temperatuur võib olla kõrgem kui aparaadist väljuva soo-
jendava vedeliku temperatuur, mida aga pärivoolu aparaad-
is ei ole võimalik saavutada,



Joon. 42. Temperatuuride muutumine vas-
tuvoolu soojusvahetusaparaadis.

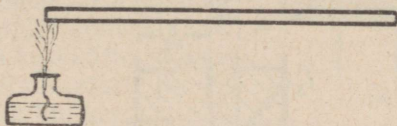
Sellest võib aru saada joonise 42 vaatlemisel. Vastu-
vooluaparaadis voolab soojendatav vedelik soojendavale
vastu, seejuures kohtub ta oma liikumisel ikka kõrgema
ja kõrgema temperatuuriga soojendavat vedelikku. Soo-
jendatava vedeliku väljumine toimub seal, kus soojendava
vedeliku temperatuur on kõige kõrgem. Pärivooluaparaad-
is aga, vastupidi, toimub mõlema vedeliku voolamine
ühes ja samas suunas ning soojendatava vedeliku välju-
mine toimub seal, kus soojendava vedeliku temperatuur on
kõige madalam.

15. Soojuse levimise viisid

Vaatleme soojuse levimise protsessi üksikasjalisemalt.
Võtame tahke keha ja hakkame seda ühest otsast kuumu-
tama (joon. 43). Keha temperatuur selles kohas tõuseb.
See tähendab, et keha selles osas, mida kuumutatakse,
hakkavad molekulid energilisemalt võnkuma kui ülejäänud
kohtades. Naabermolekulide vastu tõukudes annavad kuu-
mutatava tahke keha molekulid osa oma energiast neile
edasi. Nii toimub keha enam kuumenenud osalt soojus-
energia edasikandumine keha vähem kuumenenud osale.

Seda soojuste levimise viisi nimetatakse soojusjuhtivuseks. See on tahkes kehas ainsaks soojuste levimise viisiks.

Nagu kogemused näitavad, on läbi seina minev soojuste hulk Q võrdeline ajaga τ , seina pinnaga F , temperatuuride vahelise seina äärmistel pindadel $t_s^I - t_s^{II}$ (joon. 44), pöördvõrdeline seina paksusega s ja oleneb seina materjali omadustest. Viimane võetakse arvesse soojusjuhtivuse teguriga, mida tähistame kreeka tähega λ (lambda).



Joon. 43. Soojuste levimine tahkes kehas (soojusjuhtivus).

Soojustejuhtivuse tegur λ määrab kindlaks soojushulga, mis kandub 1 tunni jooksul läbi 1 m^2 suuruse ja 1 m paksuse seina, kui äärmiste seina pindade temperatuuride vahe on 1°C .

Seega soojushulk Q on arvutatav valemiga

$$Q = \lambda \frac{t_s^I - t_s^{II}}{s} F \tau \text{ kcal.} \quad (36)$$

Tavaliselt läbi seina kandunud soojuste hulk arvutatakse 1 m^2 pinna kohta 1 tunnis. Seejuures saadud soojuste hulka nimetatakse soojusvooks, mis avaldub järgmiselt

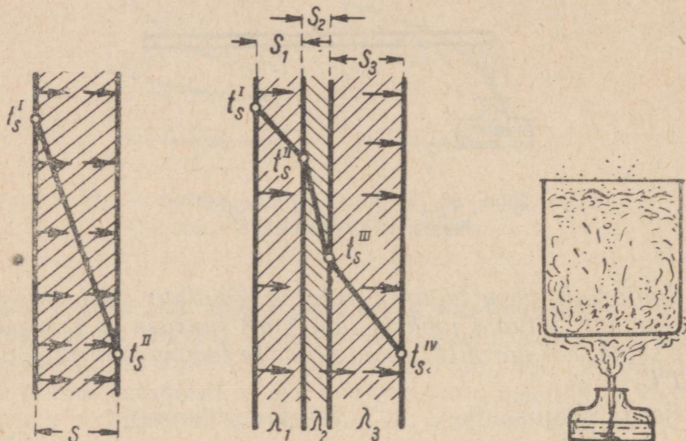
$$q = \frac{t_s^I - t_s^{II}}{\frac{s}{\lambda}} \text{ kcal/m}^2\text{h.} \quad (37)$$

Nimetajas seisvat murdu $\frac{s}{\lambda}$ nimetatakse termiliseks takistuseks.

Kui sein on mitmekihiline, nagu näidatud joonisel 45, siis säilitab valem (37) oma kuju; niisuguse seina termiline takistus arvutatakse nagu üksikute kihtide termiliste takistuste summa, ja valem saab järgmise kuju

$$q = \frac{t_s^I - t_s^{II}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} \text{ kcal/m}^2\text{h.} \quad (38)$$

Soojuse levimine juhtivuse teel on vedelikkudes ja gaasides väike. Tunduvalt mõjutab soojuse levimist vedelikkudes ja gaasides liikumise iseloom. Vedelik ja gaas võivad voolata rahulikult, paralleelsete jugadena või kihtidena, ilma mingisuguste keeristeta. Niisugust voolamist nime-



Joon. 44. Soojuse vool läbi ühekihilise tasapinnalise seinä.

Joon. 45. Soojuse vool läbi mitmekihilise tasapinnalise seinä.

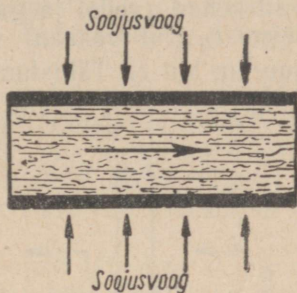
Joon. 46. Loomulik konvektsioon vedelikus.

tatakse laminaarseks voolamiseks. Seda tuleb ette väga peentes torudes ja väikeste kiiruste puhul ning peamiselt suure viskoossusega vedelikkudes (õli, nafta). Enamikel soojustehnikas käsitatavatel juhtudel ei voola vedelikud rahulikult, vaid üksikud joad segunevad üksteisega. Niisugust keeristega voolamist nimetatakse turbulentseks voolamiseks.

Olgu anum as vesi ja kuumutatagu seda altpoolt (joon. 46). Kui vee alumised kihid soojenevad, siis nendes kihides olev vesi paisub ja muutub kergemaks kui ülemiste kihtide vesi, mille temperatuur on madalam. Selle tule-

musel hakkavad raskemad ülemised kihid liikuma alla ja alumised kergemad kihid üles. Liikumisel segunevad soojemad veekihid külmematega ja annavad soojust neile üle. Niisugust soojuste levimise viisi nimetatakse konvektsiooniks.

Kirjeldatud juhust nimetatakse loomulikuks konvektsiooniks. Siin toimub vee liikumine soojenemisel tekkinud erikaalude vahe tõttu. Liikumine on seda intensiivsem, mida intensiivsem on soojendamine. Õhu loomulik konvektsioon ilmneb näiteks keskkütte radiaatori juures. Radiaatori juures olev soojem õhk kui kergem tõuseb üles ning asemele voolab raskem külm õhk. Nii tekib õhu liikumine ning õhu külmade ja soojade jugade segunemine.



Joon. 47. Sundkonvektsioon vedelikus.

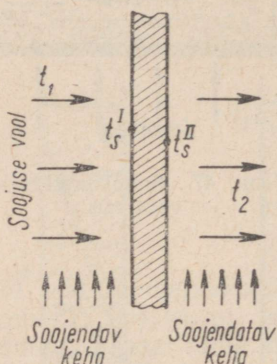
Teistsugune soojuste levimine konvektsiooni teel toimub vedeliku või gaasi voolamisel torustikus. Liikugu pumba poolt surutav vesi torus, mida ümbritsevad kuumad gaasid (joon. 47). Kui siin voolamine on turbulentne, siis toimub soojuste üleandmine peamiselt seetõttu, et toru keskelt väljapoole liikuvad külmad joad segunevad pidevalt kuumade jugadega, mis said soojust toru seintelt ja liiguvad toru keskkoha poole. Ka siin tekib seega soojuste levimine konvektsiooni teel.

Kuna vedelik pannakse käesoleval juhul liikuma mingi välise ergutaja (pump, ventilaator) toimetel, siis niisugust voolamist torus nimetatakse sundvoolamiseks ning soojuste konvektsiooni **sundkonvektsiooniks**.

Kui voolamine torus ei ole turbulentne, vaid laminaarne, siis soojuste levimist kuumade ja külmade jugade segunemisest ei esine. Sel juhul, nagu nägime tahke keha puhul, kandub energia ühelt molekulilt teisele, s. o. soojuste ülekanne toimub niisugusel juhul soojuste juhtivuse teel nagu tahkes kehas. Soojuste niisugune ülekanne on palju vähem intensiivne kui konvektsiooni puhul.

16. Soojusvahetuse peamised juhud

Vaatleme lähemalt soojuse üleandmise protsessi ühelt kehalt teisele läbi eraldava vaheseina. Niisugune juhus on kujutatud joonisel 48. Siin on kummalgi pool seina erinevad kehad (vedel ja gaasiline); olgu ühe temperatuur t_1 , teisel t_2 . Kui vasakul voolab soojendav keha, siis t_1 on suurem kui t_2 . Tähistame seina temperatuuri vasakul t_s^I ning paremal t_s^{II} . Selle tõttu, et $t_1 > t_2$, tekib soojuse vool



Joon. 48. Soojuse läbikanne (soojusvahetus) läbi eraldava vaheseina.

vasakult paremale (joonisel on see suund näidatud horisontaalsete nooltega). Vasakul, vedelikus on temperatuur kõige kõrgem vooluse keskel ning alaneb seina suunas. Täiesti seina lähedal toimub vedeliku voolamine takistuse tõttu väga aeglaselt ja seepärast, isegi sel juhul, kui voolamine on kogu vedelikus turbulentsne, kujuneb seina lähedal väga õhukene kiht, kus vedelik liigub laminaarselt. Seda kihti nimetatakse vedeliku piirikihiks. Vooluse keskosas on temperatuur jugade segunemise tõttu peaaegu üleni ühtlane. Piirikihis, kus segunemist ei esine, on temperatuuri alanemine tuntavam.

Vasakult paremale liikuv soojusvoog kandub algul vasakpoolsele seinapinnale soojuskandja kokkupuutumise tagajärjel seinaga, edasi levib soojus soojusjuhtivuse teel läbi seina vastaspoolse seina pinnani ning soojendatava keskkonna kokkupuutumisel seinaga toimub soojuse ülekanne seina parempoolselt pinnalt soojendatavale keskkonnale.

Soojustehnikas on antud siin kirjeldatud nähtustele järgmised nimetused. Soojuse üleandumist soojendavalt keskkonnalt (vedelikult või gaasilt) seinale nimetatakse soojuse ülekandeks. Samuti nimetatakse ka soojuse üleandumist seinalt soojendatavale keskkonnale (vedelikule või gaasile).

Soojuse ülekanne iseloomustab soojuse ülekande

tegur, mida tähistame kreeka tähega α (alfa). Soojuse ülekandetegur näitab soojuse hulka, mis antakse seinalt keskkonnale (või vasutupidi) 1 tunni jooksul 1 m² pinnalt, kui temperatuuride vahe seina ja keskkonna vahel on 1° C.

Soojuse ülemineku kogu nähet soojendavalt keskkonnalt (vedelikult või gaasilt) soojendatavale (vedelikule või gaasile) läbi eraldava seina nimetatakse soojuse läbikandeks.

Soojuse läbikannet iseloomustab soojuse läbikandetegur, mida tähistatakse tähega k . Soojuse läbikandetegur näitab soojuse hulka, mis kantakse soojendavalt keskkonnalt üle soojendatavale 1 tunni jooksul läbi 1 m² seina, kui soojendava ja soojendatava keskkonna temperatuuride vahe on 1° C.

Kui kogu pindala, millest soojust läbi kantakse, on F , soojendava keha keskmine temperatuur on t_1 ning soojendatava keha keskmine temperatuur on t_2 , siis soojuse hulk, mis soojendavalt kehalt kantakse soojendatavale, määratakse järgmise valemi järgi

$$Q = kF(t_1 - t_2) \text{ kcal/h.} \quad (39)$$

Kui on tarvis määrata soojusvahetusaparaadi pindala suurust teatud soojuse hulga läbikandmiseks, siis kasutatakse valemit

$$F = \frac{Q}{k(t_1 - t_2)}. \quad (40)$$

Arvutustes kasutatakse $t_1 - t_2$ asemel nn. keskmist temperatuuride vahet Δt_k .

Juhul kui mõlema vedeliku temperatuur ei muutu suurel määral, võib mõlema vedeliku jaoks võtta keskmise aritmeetilise temperatuuri; siis

$$\Delta t_k = \frac{t'_1 + t'_2}{2} - \frac{t''_1 + t''_2}{2} = t_1 - t_2. \quad (41)$$

Siin märk ' kuulub esimese vedeliku ning märk '' teise vedeliku kohta; indeks 1 tähendab algtemperatuuri ning 2 — lõpptemperatuuri. Saadud väärtust Δt_k nimetatakse aritmeetiliseks keskmiseks temperatuuride vaheks.

Kui temperatuur ühes neist vedelikkudest muutub märgatavalt (täpsemalt: kui soojusvahetusaparaadi otstes

vedelikkude temperatuuride suurema vahe ja väiksema vahe suhe on suurem kui kaks), siis valemit (41) kasutada ei ole soovitatav. Sel juhul leitakse Δt_k päri- või vastuvoolu soojusvahetusaparaatidele mõnevõrra keerukama valemiga või erilisest graafikust. Sel viisil leitud Δt_k väärtust nimetatakse keskmiseks logaritmiliseks temperatuuride vaheks.

Arvutused näitavad, et vastuvoolu-soojusvahetusaparaatidel Δt_k on suurem kui päri- või vastuvoolu soojusvahetusaparaatidel soojuskandjate samadel aparaati sisenemise- ja väljumistemperatuuridel. Seetõttu saadakse ka vastuvoolu aparaatidel soojusvahetuspinna väiksemad kui päri- või vastuvoolu aparaatidel. Selles seisabki vastuvoolu aparaatide eelis.

Soojusvahetusaparaatide arvutamisel on tähtis teada soojuse läbikandetegurit.

On ilmne, et soojuse ülekande soojendavalt keskkonnalt soojendatavale on seda parem ja seda kõrgem ka läbikandegur, mida paremini toimub soojuse ülekandumine soojendavalt keskkonnalt seinale, mida parem on seina soojusjuhtivus, mida väiksem on seina paksus ja mida parem on soojuse ülekande seinalt soojendatavale keskkonnale.

Kui tähistada: soojuse ülekandegur soojendavalt keskkonnalt seinale α_1 , soojuse ülekandegur seinalt vedelikule α_2 , seina soojusjuhtivustegur λ ning seina paksus s , siis soojuse läbikandegur k tasapinnalise seina jaoks määratakse valemiga

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{Ch.} \quad (42)$$

Kõverpinnalise (näiteks toru) seina jaoks on valem natuke keerukam, kuid sageli kasutatakse ka neil juhtudel valemit (42), sest tekkiv erinevus ei ole suur.

Teguri k väärtused olenevad mitmesugustes aparaatides peamiselt sellest, milliseid soojuskandjaid kasutatakse. Näiteks ruumi õhu soojendamiseks määratud keskkütte radiaatori puhul loomuliku konvektsiooniga on $k=5-9$ kcal/m²°Ch; joonisel 37 kujutatud soojusvahetusaparaadil (aur-vesi) on $k=1000-4000$ kcal/m²°Ch. Madalrõhukatelde veetorudel $k=20-60$ kcal/m²°Ch.

Nagu näha valemist (42), on soojuse läbikandeguri arvutamiseks vaja teada suurusi α_1 , α_2 ja λ . Viimast suurust

(soojusjuhtivuse tegurit λ) määratakse võrdlemisi lihtsalt. Seetegur oleneb ainult sein materjali omadustest. Käesoleval ajal on katsetega küllaldase täpsusega määratud peaaegu kõigi soojustehnikas ette tulevate materjalide soojusjuhtivused. Neid võib leida käsiraamatutest. Nii lihtne aga ei ole soojusülekande tegurite α_1 ja α_2 määramine. Siin ei piisa ainult materjalide tundmisest, millede vahel toimub soojusülekanne kokkupuute teel. Teguri α väärtus ei olene ainult nende omadustest, vaid ka tahke keha mõõtmetest ja kujust ning vedela või gaasilise keha liikumise tingimustest, peamiselt liikumise kiirusest (mida suurem kiirus, seda suurem on α). Suurt mõju avaldavad α väärtusele ka liikuva keha oleku parameetrid (temperatuur, erikaal) ja niisugused omadused, nagu viskoossus ja soojusjuhtivus. Sein materjalist aga α sisuliselt üldse ei olene.

Ühtede ja samade kehade jaoks võib α väärtus olla väga erinev. Seda võib näha järgmistest ligilähedastest α piirväärtustest kcal/m² ° Ch:

gaasidel	5—200
vedelikkudel	100—6000
kondenseeruva aurul	5 000—15 000
keeval veel	2 000—8 000

α väärtus määratakse katseliselt. Kuid selleks, et kindlaks teha, kuidas oleneb α suurus kõigist tingimustest, on vaja teha tohtu hulka katseid. Aegamööda koguneb andmeid soojuse ülekande arvutuseks kõige mitmekesisemate juhtude ja erinevate aparatuuride kohta. Need on kogutud spetsiaalsetesse raamatutesse ja käsiraamatutesse.

Soojuse ülekande uurimisel osutab suurt abi niinimetatud sarnasusteooria, mis võimaldab laiendada üksikuid katseid antud nähte suuremale grupile. See vähendab tunduvalt katsete arvu. Pealegi võimaldab sarnasusteooria ka seda, et katseid pole vaja teha aparatuuridel enestel, millede kohta väärtust tahetakse määrata, vaid vähendatud ja lihtsustatud mudelitel.

Soojustehnika jaoks on sellel suur tähtsus, sest tegelikkuses kasutatavad aparatuurid on keerukad ja suured ning nende ehitamine katsete läbiviimiseks nõuab suuri kulutusi ja kestaks kaua. Katsete teostamine mudelitel on tunduvalt lihtsam ja vähem aega nõudev.

Sarnasusteooria alused Venemaal loodi eelmise sajandi

lõpul prof. V. L. Kirpitšovi poolt (1845—1913). Kuid täielikult arenes see teooria välja XX sajandil. Nõukogude õpetlaste koolkond, eesotsas akad. M. V. Kirpitšoviga, lõi soojusesarnasuse teooria, mis mitmeti on selles suunas ees välismaisest teadusest. Selle teooria põhjal lahendasid meie teaduslikud uurimisinstituudid, minnes iseseisvat teed, rea keerukaid soojusvahetuse probleeme katelagregaatides, ahjudes ja muudes soojusvahetusaparaatides.

NSV Liidus tegeldakse soojuse ülekande nähete ja ülekande tegurite uurimisega ning soojusseadmete mudeleerimisega NSVL TA G. M. Kržižanovski nimelises Energeetikainstituudis, F. E. Dzeržinski nimelises Üleliidulises Soojustehnikainstituudis (ВТИ), I. I. Polzunovi nimelises Katelde ja Turbiinide Keskinstituudis (ЦКТИ) ning reas teistes asutustes ja instituutides.

P. 15 toodud arutlustest on näha, et soojus võib kehas levida kas soojusjuhtivuse (tahketes kehades, vedelikudes ja gaasides) või konvektsiooni teel (ainult vedelikudes ja gaasides).

Soojuse ülekande nähete vaatlemisel me nägime, et soojus võib ühelt kehalt teisele kanduda nende kehade kokkupuutumise teel. Nii läheb soojus soojendavalt vedelikult seinale kokkupuutumisel seinaga, samal viisil toimub soojuse üleminek seinalt soojendavale vedelikule.

Kuid soojuse üleminek vahetu kokkupuute teel ühelt kehalt teisele ei ole ainsaks soojuse ülekande viisiks. Näiteks tunneb inimene kolde ukse ees seisest ukse avamise puhul soojust. Et selles veenduda, et soojuse tundmist ei tekita ümbritsev õhk, võib mõõta õhu temperatuuri; osutub, et see jääb ühesuguseks enne kui ka pärast ukse avamist. See soojuse tunnetamine näitas, et kuuma kütusekihi ja kolde avatud ukse ees seisva inimese vahel toimus soojusvahetus vaatamata sellele, et siin mingit kokkupuudet ei esinenud. Eriliste katsetega võib tõestada, et niisugune soojuseülekande toimuks ka siis, kui küdeva kütusekihi ja kolde ees seisva inimese vahel ei oleks õhku.

Kütuse hõõguva kihi ja inimese vahel toimuva soojuseülekande olemus seisab järgmises. Kütuse põlev kiht saadab igas suunas soojuse kiiri, mis jõudes inimesele, tekitavad temal soojusetunde. Soojuse kiired kannavad eriliiki energiat, mida nimetatakse kiirguseenergiaks. Samasugusel viisil kandub Maale ka päikeseenergia. Päi-

keselt lähtunud kiired läbivad kogu Päikese ja Maa vahelise ruumi ning jõudnud maapinnale, võetakse viimase poolt vastu. Maad ümbritsev õhk soojeneb maapinnaga kokkupuutest.

Meie poolt varem vaadeldud soojusvahetuse juhul tekib kiirgav soojusenergia põleva kütuse soojusenergia arvel. Jõudnud inimeseni, muutub kiirgusenergia uuesti soojusenergiaks. Sellest on tingitudki soojusetunne.

Soojuse üleminekut ühelt kehalt teisele soojuskiirte abil nimetatakse soojusvahetuseks kiirguse ehk radiatsiooni teel. Kiirgusega soojusvahetuse üksikasjaline uurimine näitab, et looduses kõik kehad saadavad ümbritsevasse keskkonda soojuskiiri ja kiirgavad energiat.

Soojuse hulk, mis ühe tunni jooksul tahke keha pinnalt kiirgab, oleneb suurel määral tema temperatuurist. See on võrdeline kiirgava keha absoluuttemperatuuri neljanda astmega ja seda võib arvutada järgmise valemiga:

$$Q = CF \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ kcal/h.} \quad (43)$$

Selles valemis F on keha pindala m^2 ning C nn. keha kiirgustegur.

Kiirgustegur on erinevatel kehadel erinev. See oleneb keha pinna omadustest ja iseloomust. Sileda pinnaga kehadel (poleeritud metallil) näiteks on kiirgusvõime väike. Nendel on madal kiirgustegur, mille arvuline väärtus võrdub 0,1—0,3 kcal/ $m^2h^\circ K^4$. Vastupidi, kareda pinnaga kehad (katelde terastorud, tellisest müür) kiirgavad energiat tugevasti; nende kiirgustegur ulatub kuni 4 kcal/ $m^2h^\circ K^4$ ja rohkem. Mõnedel kehadel, nagu tahm, paber ning mõned värvid, ulatub kiirgustegur peaaegu suurima võimalikuni, s. o. 4,9, mis, nagu näitab teooria, võib olla ainult ettekujutataval «absoluutselt mustal kehal».

Mitmesuguste kehade kiirgustegurid on katsetega kindlaks määratud ja toodud käsiraamatutes.

Arvutame näiteks 1 m^2 tellisseina poolt kiiratud energia, kui seina temperatuur $t = 727^\circ C$. Valemi (48) järgi saame:

$$Q = 4 \cdot 1 \left(\frac{727 + 273}{100} \right)^4 = 4 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 = 40\,000 \text{ kcal/h.}$$

Temperatuuril $t = 227^\circ C$ on müüritise poolt kiiratud energia

$$Q = 4 \cdot 1 \left(\frac{227 + 273}{100} \right)^4 = 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 = 2500 \text{ kcal/h,}$$

ja toa temperatuuril $t = 27^\circ\text{C}$ on kiirgamine hoopis väike:

$$Q = 4 \cdot 1 \left(\frac{27 + 273}{100} \right)^4 = 4 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 324 \text{ kcal/h.}$$

Neist näidetest on näha, et soojusvahetus kiirguse teel on eriti suur kõrgetel temperatuuridel ja seepärast soojustehnikas, kus paljud protsessid toimuvad kõrgetel temperatuuridel (katelde kolded, ahjud), on soojuse ülekandel kiirguse teel suur tähtsus.

Kui soojuskiired langevad tahkele kehale, siis mitte kõik neis sisalduv energia ei neeldu kehas, ega muundu soojuseks. Teatud osa kehale langevast energiast peegeldub selle pindadelt ümbruskonda. Ainult absoluutselt must keha neelab kõik temale langeva kiirguse. Reaalsetel kehadel on neeldumine seda suurem, mida suurem on nende eneste kiirgustegur.

Soojuse ülekandel kahe keha vahel kiirguse teel kiirgab kumbki neist energiat (seda enam, mida kõrgem on ta temperatuur) ja osa sellest võtab vastu teine keha. Selle tulemusel see keha, mille temperatuur on kõrgem, annab soojust ära, madalama temperatuuriga keha aga saab soojust juurde.

Kiirgamisvõimelised ei ole mitte ainult tahked kehad ja vedelikud, vaid ka mõned gaasid. Gaaside hulka, milledega meil soojustehnikas tuleb kokku puutuda ja mis kiirgavad energiat, kuuluvad veeaur ja süsihappegaas. Need gaasid esinevad kütuse põlemissaadustes. Kui põlemissaadused liiguvad katla suitsukäikudes, siis ei anna nad soojust küttepindadele ainult kokkupuute, vaid ka kiirgamise teel.

TEINE PEATÜKK

KATELAGREGAAT

17. Aurukatelde kütus ja selle kasutamine. NSV Liidu kütusevarud

Soojuselektrijaamades elektrienergia saamisel on lähteaineks kütus. Kütuse põlevementide ja õhuhapniku keemilise ühinemisreaktsiooniga kaasneb soojuse eraldumine. Seejuures saadakse gaasilised põlemisgaasid, mis sisaldavad suurema osa põlemisel eraldunud soojusest. Edasiselt toimuvad selle soojusega mitmesugused muudatused, mille lõpptulemusena saadakse elektrienergia.

Kütused võivad olla tahked, vedelad ja gaasilised. Suurtes elektrijaamades kasutatakse enamikul juhtudel tahket kütust.

Ühes ja samas agregaatolekus esinevad kütused erinevad omaduste poolest suurel määral. Nendest omadustest sõltub suurel määral nii kollete konstruktsioon, milles neid kütuseid põletatakse, kui ka katla konstruktsioon, milles antud liiki kütust kasutatakse.

Kütuse omaduste hindamisel tuleb kõigepealt teada selle elementaarkoostist, s. o. teada, millistest elementidest ta koosneb ja millisel hulgal ta neid sisaldab. Kütuste elementaarkoostist määratakse laboratooriumis. Kütuste elementaarkoostise ligilähedased keskmised andmed mitmesuguse päritoluga kütuse kohta on toodud käsi- raamatute tabelites.

Põletamiseks katla koldesse minevat kütust nimetatakse töö- ehk tarbimiskütuseks.

Tarbimiskütus koosneb järgmistest elementidest: süsinikust (C), vesinikust (H), lämmas-

tikust (N) ja hapnikust (O). Peale nende elementide, mis moodustavad kütuse põhi- ehk nagu öeldakse orgaanilise aine, kuuluvad kütusesse veel ebasoovitavad lisandid, milleks on väävel (S), tuhk (A) ja vesi ehk niiskus (W). Sulgudes olevad tähed ei tähista ainult koostisosi, vaid näitavad ka protsentides nende kaalulist kogust kütuses; kui need tähed kuuluvad tarbimiskütusele, siis pannakse neile üles täht *t*. Seega kirjutatakse tarbimiskütuse koostis protsentides järgmiselt:

$$C^t + H^t + N^t + O^t + S^t + A^t + W^t = 100\%. \quad (44)$$

Kütuse põlevateks elementideks on süsinik, vesinik ja osaliselt ka väävel. Süsiniku ja vesiniku sisaldusest peamiselt olenebki 1 kg kütuse põlemisel eralduv soojuse hulk.

W^t määrab kütuse üldise niiskusesisalduse; seda jaotatakse jäävaks (hügrokoopseks) ja väliseks niiskuseks. Väline niiskus on niisugune niiskus, mille kütus kaotab loomulikult kuivatamisel õhu käes. Seejuures kütusesse jäänud vee hulk määrab tema jääva niiskuse. Kütuse üldniiskus ulatub vahel kuni 60%. Suure niiskusesisaldusega kütuste ratsionaalseks põletamiseks kasutatakse erilise konstruktsiooniga koldeid.

Niiskuse hulk kütuses oleneb suurel määral selle hoidmisest. Seepärast antakse sageli ka kütuse kuivaine koostis protsentides. Sel juhul asetatakse iga elemendi tähistuse juurde täht *k* ja saadakse:

$$C^k + H^k + N^k + O^k + S^k + A^k = 100\%. \quad (45)$$

Kui tarbimiskoostis on tuntud, siis on kerge määrata ka kütuse kuivaine koostist; iga elemendi jaoks, nagu näiteks süsiniku jaoks, tehakse ümberarvutus järgmise lihtsa valemi järgi:

$$C^k = C^t \frac{100}{100 - W^t}. \quad (46)$$

Kütuses sisalduvad mittepõlevad mineraalsed lisandid (savi, lubi jne.) moodustavad põlemisel tuha, kusjuures selle paakunud tükke nimetatakse šlakiks ehk räbuks. Tuha omadus ühel või teisel temperatuuril sulada, s. o. minna üle vedelasse olekusse, on kütuse oluliseks karakteristikuks, mida kollete ja katelde projekteerimisel tuleb arvesse võtta. Olenevalt tuha sulamistempe-

ratuurist määratakse ka kolde soojuslik režiim kütuse põlemisel. Nõukogude Liidu elektriijaamades kasutatavad kütused on võrdlemisi madala tuhha sulamistemperatuuriga ja see asjaolu on tekitanud palju raskusi nende kütuste põletamisel. Kütuse mineraalsed lisandid ulatuvad vahest kuivaines kuni 50%.

Sageli antakse kütuse koostis ilma tuhka ja niiskust arvestamata. Seda koostist nimetatakse tinglikult kütuse põlevaineks, olgugi, et selle koostises hapnik ja lämmastik ei ole põlevad elemendid.

Põlevaine koostist võib kirjutada nii:

$$C^p + H^p + N^p + O^p + S^p = 100\%. \quad (47)$$

Kütuse põlevateks elementideks on C, H ja osaliselt S. Niiskus ja tuhk ei ole kütuses soovitud ja moodustavad selle ballasti, ballasti hulka kuulub ka väävel. Suur osa väävlist ei võta põlemisest osa. Ülejäänud väävliosa põlemisel tekkiv väävli gaas SO_2 on kahjulik inimese tervisele, katla metallile ja jõujaama ümbruse haljasalade taimestikule.

Süsinikuisaldus mitmesuguste tahkete kütuste põlevaines moodustab 50—95%, vesinikuisaldus 1—6% ning väävlisaldus 0—8%.

Kui kuumutada kütust ilma õhu juurdepääsuta, siis eralduvad temast gaasid ja aurud. Neid nimetatakse kütuse lenduvateks komponentideks ehk lendosadeks. Pärast lendosade eraldumist jääb järele tahke aine — koks. Lendosade hulka väljendatakse (ilma veeauruta) protsentides põlevmassi suhtes ja tähistatakse V^l . Lendosade hulgal on oluline tähtsus kütteseadmete projekteerimisel ja seepärast on see kütuse tähtsaks iseloomustajaks.

Koksi iseloomul on oluline tähtsus küsimuse lahendamisel, millisele ettevõttele saata seda või teist liiki kütust. Kui kütus annab tiheda paakuva koksi, siis nimetatakse seda koksi suvaks kütuseks ja see suunatakse ainult koksitahastele, kus sellest toodetakse koksi, mida vajatakse malmi sulatamisel. Elektriijaamadele antakse katelde kütmiseks eelkõige niisugust kütust, mida teistes ettevõtetes või tehnoloogilistel protsessidel kasutada ei saa. Niisugust kütust nimetatakse energeetiliseks kütuseks. Enamikul juhtudel on see madalastordiline kütus.

Kütuse tähtsamaks ja iseloomustavamaks näitajaks on tema põlemisväärtus, mille all mõistetakse soojuse hulka, mis eraldub 1 kg kütuse täielikul põlemisel, s.o. niisugusel põlemisel, mille juures põlemissaadustesse ei jää põlevaid elemente. Kogu kütuse põlemisel vabanenud soojus läheb põlemissaadustesse ning kasutatakse hiljem ära gaaside jahtumisel.

Kütuse põlemisel läheb temas leiduv vesi üle gaasilisse olekusse — muutub vee auruks, selleks aga kulub osa kütuse põlemisel eraldunud soojusest.

Olenevalt sellest, millises olekus on vesi põlemissaadustes pärast jahtumist, kas veena või auruna, tehakse vahet põlemis- ja kütteväärtuse vahel (nimetatakse vastavalt ka ülemiseks kütteväärtuseks ja alumiseks kütteväärtuseks). Kui põlemissaadused jahutatakse niivõrd madalale temperatuurile, et veeaur kondenseerub veeks ja vabastab aurumissoojuse, siis nimetatakse kütuse põlemisel eraldunud soojuse hulka kütuse põlemisväärtuseks — ülemine kütteväärtus. Kui põlemissaadused pärast jahtumist sisaldavad oma koostises veeauru ja seetõttu aurustumissoojus jääb kasutamata, siis kütuse põlemisel saadud soojust nimetatakse (alumiseks) kütteväärtuseks. On ilmne, et põlemisväärtuse ja kütteväärtuse vahe kujutab enesest seda soojushulka, mille moodustab põlemissaadustes sisalduva kogu veeauru aurumissoojus. Põlemissaadustesse satub vesi tarbimiskütuse veest ning kütuse vesiniku ja hapniku ühinemise (vesiniku põlemise) tulemusel.

Katelseadmetest lahkuvad gaasid niisugustel temperatuuridel, mille juures nendes sisalduv veeaur ei kondenseeru, ning seepärast lahkub koos nendega soojus, mis kulus auru tekitamiseks. Seega saame me kütuse põletamisel katelseadmetes kasutada ainult kütuse kütteväärtust. Tarbimiskütuse puhul tähistatakse seda Q_k^t (venek. tähistus Q_H^p).

Tabelis 10 on toodud mõnede kütuste kütteväärtused.

Põlemisväärtust määratakse laboratooriumis katseandmete põhjal, mida saadakse kalorimeetrilise pommil abil. Põlemisväärtust ja kütteväärtust võib ka välja arvutada. Kütteväärtuse arvutamise valemid koostas väljapaistev vene keemik D. M. Mendelejev mitmesuguste kütuste hoolika uurimise põhjal. Tarbimiskütuse kütte-

väärtuse arvutamiseks tuleb teada kütuse koostist. Valemil on järgmine kuju:

$$Q_k^t = 81C^t + 246H^t + 26(S^t - O^t) - 6W^t. \quad (48)$$

Varem oli öeldud, et kütuse niiskus oleneb tema hoidmise tingimustest, ning ühe ja sama kuivaine koostise puhul võib olla erinev. Sellest olenevalt muutub ka tarbimiskütuse kütteväärtus. Vahel antakse ka kuiva massi kütteväärtus. Sel juhul arvutatakse tarbimiskütuse (mille niiskus on W^t) kütteväärtus järgmise valemiga:

$$Q_k^t = Q_k^k \frac{100 - W^t}{100} - 6W^t. \quad (49)$$

Tahkete kütuste hulka kuuluvad puit, turvas, pruunsüsi, kivisüsi, antratsiit.¹ Kõik need kütuseliigid on omavahel sarnased selle poolest, et nad koosnevad ühest ja samast põhiaainest — puidurakkudest. Ühe kütuseliigi muundumine teiseks toimus keemiliste protsesside toimel paljude sajandite jooksul, nii et loendatud kütuseliikidel tehakse vahet nende geoloogilise vanuse järgi. Kõige noorem loendatud kütuste reas on puit, kõige vanem — antratsiit. Allpool on toodud tabel, mis iseloomustab kütuste tähtsamaid omadusi. Nagu näha, väheneb kütuste geoloogilise vananemise kestel nende lendosade protsent. Teiselt poolt antratsiit — olles kõige vanemaks kütuseks — sisaldab kõige kõrgema protsendi süsinikku. Seega kaasub kütuse vananemise protsessiga tema rikastumine süsiniku poolest.

Siin on loendatud ainult tahkete kütuste liigid. Kütus-

Kütuse liik	Vt%	Koksi iseloom	A ^k %	W ^t %	Q _k ^t kcal/kg
Puit	85	Kobe	1	40	2450
Turvas	70	Pulbrikujuline	11	40—50	2000—2600
Pruunsüsi	30—60	Pulbrikujuline	15—35	20—40	2500—4200
Kivisüsi	8—40	Mitmesugune	10—25	5—15	5000—6800
Antratsiit	4	Pulbrikujuline	14	6—8	5000—6000

¹ Tahkete kütuste hulka kuuluvad ka põlevkivid, kuid oma päritolu poolest ei kuulu nad loendatud kütuste hulka.

tena kasutatakse mõnel juhul ka vedelaid kütuseid, näiteks masuuti, mis on naftatöötlemise jääkprodukt. Viimastel aastatel hakatakse NSV Liidus üha enam kasutama tehnoloogilistes protsessides ja energeetikas gaasilisi kütuseid — looduslikku gaasi ja gaase, mida saadakse mõne tootmisprotsessi jääkproduktina.

Üksikute agregaatide või soojuselektrijaama tööd hinnatakse sageli kütuse kulu järgi selles agregaadis või elektrijaamas toodetud toodanguühiku kohta. Nii näiteks iseloomustab katla tööd kütuse kulu ühe tonni toodetud auru kohta, elektrijaamas — kütusekulu ühe kilovatt-tunni kohta. Kuid niisuguseid näitajaid ei saa katelagregaaadi ja elektrijaama omavahelise töö võrdlemiseks kasutada, kui nende poolt kulutatud kütuste kütteväärtused on erinevad. Niisuguse võrdlemise võimaldamiseks on kasutusele võetud tingkütuse mõiste. Selle all mõistetakse niisugust kütust, mille kütteväärtus on 7000 kcal/kg, ning kõik näitajad väljendatakse niisuguse tingkütuse kulu kaudu ühe toodanguühiku kohta.

Tingkütuse kulu võib leida tuntud tegeliku kütuse kulu ja kütteväärtuse järgi järgmise valemiga:

$$B_{ting} = \frac{B_{teg} Q_k^t}{7000}; \quad (50)$$

kus B_{teg} on tegeliku kütuse kulu;

B_{ting} on tingkütuse kulu.

Avaldise lugejas on ilmselt soojuse hulk, mis eraldub B_{teg} kg kütuse põletamisel; jagades seda arvuga 7000, saadakse tingkütuse hulk, mis vastab põletatud kütuse B_{teg} hulgale.

Maa kütusevarudel on oluline tähtsus tema industrialiseerimisel.

Tsaari-Venemaa kivisöe- ja naftaühingute poliitika oli suunatud ainult kõrgeväärtuslike kütuseliikide kasutamisele, mis viis selleni, et vaatamata tohutute kütusevarude olemasolule ei pääsenud maa alalisest kütusenäljast ja vedas kivisütt sisse üha suuremates kogustes. On teada, et Peterburgi varustati Cardiffi kivisöega. Seejuures levitati väidet, et Venemaa olevat kütuste poolest vaene.

Nõukogude valitsuse ajal läbiviidud kütuste leiukohtade uurimistööd kummutasid väited maa kütuseressurside puudulikkuse kohta. Nõukogude Liidul on tohu-

tud kütusevarud, mis võivad tagada tööstuse tormilise arengu, ning maa industrialiseerimise tulemused juba realiseeritud viisaastakute jooksul on seda veenvalt tõestanud.

Eriti on viimaste aastate uurimistööde tulemusel avastatud uusi rikkalikke mitmesuguste kütuste (süsi, nafta, gaas) leiukohti. Maapõues leiduvate söevarude, metsade koguse ning turbarabade poolest on Nõukogude Liit maailmas esikohal, naftavarude poolest aga üks esimesi.

Tsaari-Venemaal oli üksainus kütusebaas — Donetsi kivisöe basseini. Käesoleval ajal on Nõukogude Liidu peale Donbassi rida võimsalt arenenud kivisöe basseine, millel on nii üleliiduline kui ka rajoonidevaheline tähtsus. Siia kuuluvad Kuznetski (Siberis), Karaganda (Kasahstanis), Petšoor (Vene NFSV), Kansk-Jenissei ja Irkutski-Tserjomhovski (Siberis) ja rida teisi söebasseine. Söe geoloogilised varud 1917. a. moodustasid 230 miljardit tonni, 1957. aastal 8670 miljardit tonni.

Rahvamajanduse huvide seisukohast vaadatuna tuleb kütused jaotada kohalikeks ja kaugelt veetavateks.

Kohalikkude kütuste hulka kuuluvad kütused, mida on ebamajanduslik või ebaotstarbekas vedada kaugete maade taha. Niisugusteks kütusteks on esmajärjekorras madalal sordilised kütused, millel on palju ballasti ja madal kütteväärtus, ja teiseks niisugused, millede tagavarad on piiratud ja mida jätkub küllaldaselt ainult kohalikkude vajaduste rahuldamiseks.

Nende kõrval kasutatakse reas tööstusharudes ka kaugelt veetavaid kütuseid, mida saadakse suurtest söebasseinidest ja veetakse suurtele kaugustele tarbija juurde raud- või veeteedel.

Kohalikku kütust on kõigis Nõukogude Liidu rajoonides; näiteks: Valgevenes, Põhja-Venemaal, Siberis ning Kesk-Venemaal — pruunsöelademed; Leningradi oblastis, Volga ääres ja Eestis — põlevkivilademed.

Kohalikkude kütuste kaevandamise ja kasutamise arendamisel on suur rahvamajanduslik tähtsus, sest see vabastab raudteed kütuste vedamisest kaugetele maadele ja soodustab rajooni majanduslikku arenemist. Koos sellega on ka kohalikkude kütuste kaevandamise arendamisel sõjaline tähtsus. Tsaari-Venemaa arendas äärmiselt aegla-

selt kohalikkude kütuste kaevandamist. Elektriijaamad aga töötasid kõik sisseveetaval kõrgesordilisel kütusel — naftaga, doni- või impordeeritud söega. Seejuures ei määratud kõrgesordilise kütuse põletamist mingid majanduslikud kaalutlused, mis oleksid olnud kasulikud maa rahvamajandusele, vaid doni sütt ja kaukaasia naftat valitsevate monopolistlikkude ühingute (kelle aktsiatest suurem osa oli välismaalaste käes) poliitika. Nõukogude Liidu kütusealane poliitika erineb põhiliselt revolutsioonieelse Venemaa ja kapitalistlikkude maade omadest. Juba kõige esimestes korraldustes maa majanduse arendamiseks rõhutati kütuste «mitte-esmaklassiliste» sortide kasutamist¹. See seisukoht võeti aluseks GOELRO-plaanile. Sama ülesanne — kasutada kohalikke kütuseid — on tähtsal kohal ka partei ja valitsuse direktiivides kõigi rahvamajanduse arendamise viisaastaku plaanide kohta. Juba esimese viisaastaku aastatel tõusis Nõukogude Liit turba tootmise, elektriijaamades turba kasutamise ja põletamise tehnika alal esikohale maailmas. Juba siis leidis laia leviku turba tootmine hüdraulilisel meetodil, mille töötas välja GOELRO komisjoni üks liige insener R. E. Klasson, kelle nime järgi nimetati esimene suur turbal töötav elektriijaam «Elektroperedatša». 1928. aastal võetakse tarvitusele uus turba tootmise meetod — freesimine, mille pani ette nõukogude insener M. N. Karlin. See meetod seisab selles, et umbes 20 mm paksune turbakiht freesitakse lahti. Freesid veetakse traktorite abil. Ohuke lahthifreesitud turba kiht kuivab kiiresti ja kuivanult kogutakse lahthine turba kiht vastavate kogumismasinatega aunadesse, kust hiljem viiakse jõujaama.

Kohalikkude kütuste tootmise arendamise riigikaitse-line tähtsus ilmnes Suure Isamaasõja ajal. Kui Donetsi kivisöebassein oli vaenlase poolt ajutiselt okupeeritud ning side Kaukaasia naftatootmise kohtadega raske, ei jäänud elektriijaamad kütuseta, sest nad töötasid kohalikkude kütustega. Kaugelt veetava kütuse kasutajaid hakati varustama teistest söebasseinidest.

Üheaegselt kohalikkude kütuste tootmise ja kasutamise arendamisega püstitatakse ja lahendatakse Nõukogude Liidus ülesannet kaugeleveetavate kütuste tootmiseks ja kasutamiseks rajoonidevahelistest ja üleliidulistest kütusebaasidest. Niisugust ülesannet saab põhjendada sellega, et

¹ V. I. Lenin, Teosed 27. köide, lk. 289.

esiteks ei rahulda kohalik kütus sageli antud rajooni kütusevajadusi, ning teiseks on kohalikud kütused sageli madalaväärtuslikud, mis ei rahulda tarbijaid, kes vajavad kõrgesordilist või eriliste omadustega sütt. Nende hulka kuuluvad raudteed kui kütusetarbijad, metallurgia, gaasitööstus ja kommunaaltarbijad. Seega baseerub sotsialistlik plaanimajandus kütusepoliitikal, mis lähtub vajadusest arendada nii kohalikkude kui ka kaugelt veetavate kütuste kaevandamist.

Sõe kaevandamise poolest on NSV Liit praegu esimesel kohal maailmas.

Viimase kümne aasta jooksul on tugevasti kasvanud loodusliku gaasi tootmine, mille suuri varusid leidub Põhja- ja Alam-Volga rajoonides, Lääne-Ukrainas, Põhja-Kaukaasias, Siberis ning Kesk-Aasias. Märkatavalt on arenenud ka gaasi tootmine tahketest kütustest ning kõrvalproduktina nafta saamisel.

Gaasilisel kütusel on teiste kütuste ees olulisi eeliseid. Seda on kerge torusid mööda transportida, kerge põletada kateldes ja lõpuks on ta tahketest kütustest hügieenilises mõttes parem, sest lahkuvate suitsugaasidega ei lendu korstnast kaasa tuhka, mis saastaks ümbruskonda.

Nende eeliste tõttu on gaasi transportimine kasulik suurtele kaugustele, mis avab gaasilise kütuse kasutamiseks avarad perspektiivid. 1943. aastal võeti eksploatatsiooni Buguruslan—Kuibõševi-vaheline 180 km pikkune gaasijuhe. 1945. aastal hakati ehitama Saraatov—Moskva-vahelist 850 km pikkust gaasijuhet, mis lasti käiku 1946. aastal. 1948. aastal asusid töösse gaasijuhtmed Dašava—Kiiev, pikkusega 525 km, ja Kohtla-Järve—Leningrad, 1952. aastal Kohtla-Järve—Tallinn; 1957. aastal Stavropol—Moksva 1300 km pikkuse ja 710 mm läbimõduga esimene järk, gaasijuhe Šebelinka—Dnepropetrovsk, Muhhanovo—Kuibõšev jt.; Stavropoli gaasijuhtmelt on hakatud ehitama Serpuhhovast 880 km pikkust harujuhet Leningradini. 1958. aastal lõpetati teise võimsa gaasijuhtme — Stavropol—Moskva — ehitamine.

Viimastel aastatel tehakse soojustehnika alal uurimistööd selleks, et leida ratsionaalsemaid meetodeid kütuste gaasistamiseks, s. o. tahkete kütuste muutmiseks gaasiliseks erilistes seadmetes, mida nimetatakse gaasigeneraatoriteks.

Kütuste gaasistamine annab võimaluse (neil juhtudel, kui see on kasulikum) võtta aurumasina asemel kasutusele sise põlemismootori.

Gaasistamisest rääkides tuleb teada, et esimesena maailmas võeti Nõukogude Liidus kasutusele niinimetatud kivisööe maa-alune gaasistamine. See gaasistamise moodus seisab selles, et kütus muudetakse gaasiks maa all, lademes, ning maapinnale voolab juba valmis gaas.

Nafta on kõige mitmekesisemate keemiaproduktide saamise hinnaliseks tooraineks. Toorel kujul naftat Nõukogude Liidus ei põletata, vaid saadetakse nafta ümbertöötamistehastesse. Kuna nafta on lähteaineks ka lennuasjanduses kasutatavatele kütustele, siis on tal suur sõjaline tähtsus ning ta kujutab enesest strateegilist toorainet. Nagu oli märgitud, seisab Nõukogude Liit nafta varude poolest maailmas ühel esikohal. Vanad nafta leiukohad asetsevad peamiselt Kaukaasias; nõukogude võimu aastatel on avastatud suured naftalademed ka teistel Nõukogude Liidu aladel, peamiselt hiigla maa-alal Uraali ja Volga vahel, mis oma tähtsusest võrduvad Kaukaasia omadega ja on seepärast saanud nimetuse «Teine Bakuu». Rikkalikke naftalademeid leidub Lääne-Ukrainas, Sahhalinis ja Kesk-Aasias.

Viimastel aastatel on leitud efektiivsed moodused tahkest kütusest vedelkütuste tootmiseks; käesoleva seitseaastaku jooksul laieneb see keemiatööstuse haru veelgi. Tehisbenssiini saamise tehnika on saavutanud kuni 50—55% saagise lähteaine põlevmassi kaalust. Tooraineks kasutatakse mitmesuguseid kivisööesorte; laialt kasutatakse selleks otstarbeks ka põlevkivi. Saadud kõrgevärtuslik tehisbenssiin on tähtis lennuväe vajadusteks.

Rahvamajanduse arendamise seitsme aasta plaan püstitab kütusetööstusele uued austavad ülesanded: 1965. aastaks on tootmismahd nähtud ette järgmiselt: sütt 600—612 miljonit tonni (130%, võrreldes 1958. aastaga), naftat 230—240 miljonit tonni (210%), gaasi 150 miljardit m³. Nagu eelnevatel viisaastakutel, ületab nafta ja gaasi tootmise tempo söekaevandamise arengutempo, mida võib seletada nende kütuseliikide suurte leiukohtade avastamisega kui ka nende kütuste tootmise ja leiukohtade odavama eksplua-

teerimisega. Selle tulemusel võib märkida vedel- ja gaaskütuste kasutamise osatähtsuse suurenemist energeetikas ja soojusjõujaamade ehitamise eelistamist hüdrojõujaamade ees.

Kütuste tootmist NSV Liidus iseloomustab alltoodud tabel.

Aasta	Ting- kütust kokku milj. t.	Selle hulgas (loomulikus kaalus)			
		sütt milj. t	naftat milj. t.	turvast milj. t	gaasi miljardit m ³
1913	42	29,1	9,2	1,7	
1940	203,1	165,9	31,1	33,2	
1950	209,4	261,1	37,9	36,0	
1955	435,0	391,1	70,8	51,8	
1957		463,0	98,3	54	20,2
1972		650—750	350—400		270—320

18. Kütuse põlemine. Gaasisegud.

Kütuse põlemisel saadakse põlemissaadused — suitsugaasid, mis peamiselt koosnevad süsihappegaasist, lämmastikust, hapnikust ja veeaurust.

Hapnik esineb looduses õhu koostisosana. Hapniku keemiline valem on O_2 , ta on värvitu ja lõhnata gaas, mille erikaal on natuke suurem kui õhul.

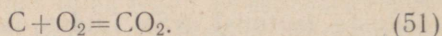
Hapnik ühineb energiliselt rea ainete (süsinikuga, vesinikuga jt.); asetleidva reaktsiooni puhul eraldub soojust.

Lämmastiku keemiline valem on N_2 . See on värvitu, maitsetu, lõhnatu gaas. Lämmastikku saab ainult väga raskesti panna teiste ainete ühinema.

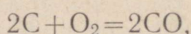
Süsihappegaasi (keemiline valem CO_2) ja veeauru (H_2O) saadakse põlemisel koldesse viidud kütuse põlevaine ja õhu hapniku ühinemisreaktsiooni tulemusena. Vaatleme nende hulgast tähtsamaid reaktsioone.

Ainete hapnikuga ühinemise protsessi nimetatakse hapendumiseks (oksüdeerumiseks) ja saadud ainet hapendiks (oksüüdiks). Aine põlemine on hapendumine, mis toimub kõrgel temperatuuril.

Süsinik, mis eluta looduses esineb mitmesuguste kütuste koostisosana, ühineb põlemisel hapnikuga, moodustades süsihappegaasi. Reaktsioon kirjutatakse järgmiselt:

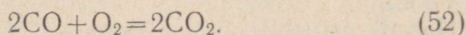


See tähendab, et süsiniku aatomi ühinemisel hapniku molekuliga saadakse süsihappegaasi molekul. Reaktsiooniga kaasub suure hulga soojuse eraldumine (≈ 8000 kcal 1 kg süsiniku kohta). Selle valemi järgi toimunud põlemist nimetatakse täielikuks põlemiseks. Süsiniku puudulikul põlemisel ei saada süsihappegaasi, vaid süsinikhapendit (vingugaas). Sel juhul toimub reaktsioon järgmiselt:



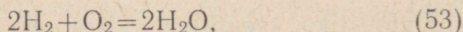
s. t. kaks süsiniku aatomit ja hapniku molekul (koosneb kahest aatomist) moodustavad kaks süsihappendi CO (vingugaasi) molekuli. Selle reaktsiooniga kaasub ka soojuse eraldumine, kuid juba väiksemal hulgal (2500 kcal 1 kg süsiniku kohta).

Vingugaas on põlev gaas. Hapnikuga ühinemisel tekib täieliku põlemise saadus — süsihappegaas — reaktsiooni järgi:



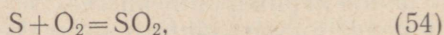
Teiste ainete põlemisreaktsioonidest näitame vesiniku ja väävli põlemisreaktsioone.

Vesiniku põlemine toimub järgmise valemi järgi:



millest on näha, et kaks vesiniku molekuli ühinevad ühe hapniku molekuliga ja annavad kaks molekuli vett.

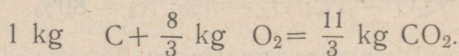
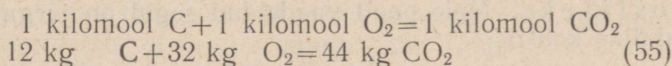
Väävli põlemine toimub valemi järgi:



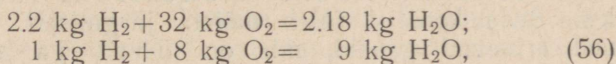
s. o. väävli aatom ja hapniku molekul moodustavad põlemisel väävliugaasi molekuli SO_2 . Kolme viimase reaktsiooniga kaasneb samuti soojuse eraldumine.

Nagu varem oli öeldud, kasutatakse soojustehnilistes arvutustes erilist aine hulga mõõtühikut — kilomooli.

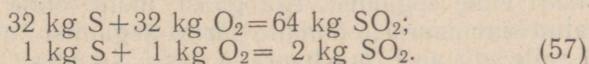
Selle mõõtühiku kasutamise eelis tuleneb sellest, et erinevate ainete moolid sisaldavad ühesuguse arvu molekule. Seepärast kehtivad reaktsioonidest osavõtvate ainete keemilised valemid nii üksikute molekulide kui ka moolide kohta. Näiteks valemit (51) võib lugeda nii: 1 kilomool süsinikku ja 1 kilomool hapnikku annavad 1 kilomooli süsihappegaasi. Väljendame selle kilogrammides. Tabelile 5 vastavalt kaalub 1 kilomool süsinikku 12 kg, 1 kilomool hapnikku 32 kg ning 1 kilomool süsihappegaasi 44 kg. Kuid valemit (51) võib lugeda ka nii: 12 kg süsinikku ja 32 kg hapnikku annavad 44 kg süsihappegaasi. Kui me ei võta reaktsiooni jaoks süsinikku mitte 12 kg, vaid 1 kg, siis ilmselt tuleb võtta ka hapnikku 12 korda vähem ning ka süsihappegaasi saadakse samuti 12 korda vähem. Seega vajab 1 kg süsinikku $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$ kg hapnikku ja reaktsioon annab $\frac{44}{12} = \frac{11}{3}$ kg süsihappegaasi. Seletatut võib kirjutada järgmiselt:



Kui vaadelda samuti vesiniku põlemist, siis tabeli 6 abil võib koostada järgmised kaalulised suhted:



s. o. 1 kg vesinikku vajab oma põlemiseks 8 kg hapnikku ja reaktsioon annab 9 kg veeauru. Väavli põlemine annab järgmised kaalulised vahekorrad:



Viimasest valemist on näha, et 1 kg väavli põlemiseks kulub 1 kg hapnikku ja reaktsioon nende hulkade vahel annab 2 kg väavlisgaasi.

Valemid (55), (56) ja (57) võimaldavad kütuse etteantud koostise puhul arvutada, kui palju hapnikku on vaja

1 kg-le kütusele juurde juhtida selle põletamiseks ja kui palju tekib mingit gaasi põlemisel. Põlemiseks vajalikku hapnikku leidub atmosfääriõhus. Seega oleneb põlemissaaduste koostis põletatava kütuse koostisest ja põlemiseks juurdejuhitava õhu hulgast.

Suitsugaasi koostist võib avaldada 1 kg suitsus sisalduvate gaaside kaaluliste kogustega. Kui näiteks öelda, et põlemissaaduste kaaluline koostis on

$\text{CO}_2 - 0,12; \text{H}_2\text{O} - 0,03; \text{O}_2 - 0,05; \text{N}_2 - 0,80,$
siis tähendab see, et 1 kg põlemissaadustes on 0,12 kg süsihappegaasi, 0,03 kg veeauru, 0,05 kg hapnikku ja 0,80 kg lämmastikku. Kui gaasi kaalulised osad liita, siis saadakse üks:

$$0,12 + 0,03 + 0,05 + 0,80 = 1.$$

Seega kujutab enesest suitsus leiduva iga gaasi kaaluline osa iga vastava gaasi kaalu suhtet suitsu kogu kaalusse.

Niisugusel viisil antud gaasi koostist nimetatakse suhteliseks kaaluliseks koostiseks.

Kui koostis on antud 100 kaaluühiku kohta, siis nimetatakse seda protsendiliseks kaaluliseks koostiseks. Meie poolt vaadeldud segul on järgmine kaaluline koostis:

$$\text{CO}_2 - 12\%; \text{H}_2\text{O} - 3\%; \text{O}_2 - 5\%; \text{N}_2 - 80\%.$$

Kõige sagedamini antakse gaasisegu koostis 1 m³ kohta; siis näitab iga arv vastava gaasi mahulist osa 1 m³ gaasisegus. Niisugusel viisil antud gaasisegu koostist nimetatakse suhteliseks mahuliseks koostiseks. Seda koostist tuleb mõista järgmiselt. Võtame mõned erinevad gaasid, mis on ühel ja samal rõhul ja temperatuuril. Kui nüüd neid gaase segada nende summaarses mahus, s.o. nende mahtude summaga, mida nad üksikult hõivasid, siis saadakse segu, mille rõhk ja temperatuur on samad, mida gaasid omasid üksikult enne segamist. Iga gaasi maht enne segamist jagatud summaarsele mahule pärast segamist kujutab enesest selle gaasi mahulist osa segus.

Kui näiteks on antud segu mahuline koostis:

$$\text{CO}_2 - 0,14; \text{H}_2\text{O} - 0,08; \text{O}_2 - 0,06; \text{N}_2 - 0,72,$$

siis see tähendab, et 1 m³ gaasi kohta tuleb:

$$\text{CO}_2 - 0,14 \text{ m}^3; \text{H}_2\text{O} - 0,08 \text{ m}^3; \text{O}_2 - 0,06 \text{ m}^3; \text{N}_2 - 0,72 \text{ m}^3.$$

Niisugused mahud hõivaksid need gaasid, kui neid õnnestuks üksteisest vaheseinte abil eraldada; seejuures oleks igal üksikul gaasil sama rõhk ja temperatuur, mis oli segul. Gaaside mahuliste osade summa annaks ühe:

$$0,14 + 0,08 + 0,06 + 0,72 = 1.$$

Kui mahuline koostis on antud 100 mahuühiku kohta, siis nimetatakse seda mahuliseks protsendiliseks koostiseks.

Kui gaaside segu on antud mahuliselt:

$$\text{CO}_2 - 14\%; \text{H}_2\text{O} - 8\%; \text{O}_2 - 6\%; \text{N}_2 - 72\%,$$

siis tähendab see, et 100 m³ gaasi kohta tuleb 14 m³ CO₂, 8 m³ H₂O, 6 m³ O₂ ja 72 m³ N₂.

Segus levib iga gaas kogu mahule, kuid neil on nüüd väiksem rõhk kui enne segamist. Rõhku, mis on igal gaasil segus, nimetatakse gaasi partsiaalrõhuks.

Daltoni seaduse järgi *gaasisegu rõhk võrdub gaasisegus olevate üksikute gaaside partsiaalrõhkude summaga.*

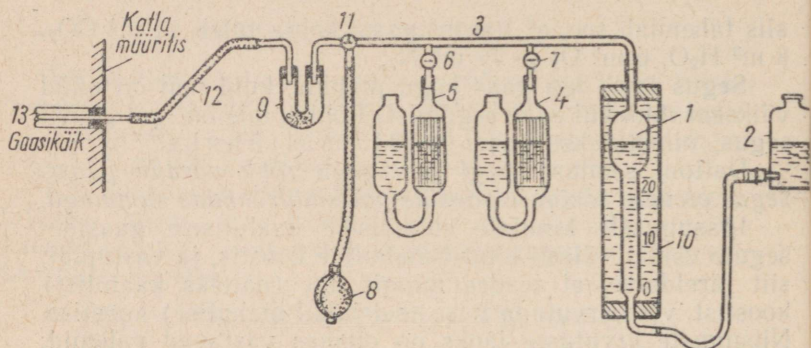
Igasugusele kindlale suhtelisele kaalulisele gaasisegule vastab täiesti kindel mahuline koostis, ja vastupidi; siit järeldame, et teades mingit üht (näiteks kaalulist) koostist, võib arvutada teise (sel juhul mahulise) koostise. Niisuguste arvutuste jaoks on olemas vastavad valemid, mis on toodud tehnilise termodünaamika kursustes.

Gaasisegu soojendamisel ja jahutamisel kulutatavate soojuse hulkade arvutamine toimub valemitega, mis on varem toodud p. 3. Seejuures tuleb ainult *c* asemel võtta gaasisegu erisoojus. Viimane leitakse järgmiselt: segus esineva iga komponendi erisoojus korrutatakse vastava osaga segus ja need korrutised liidetakse. Saadud summa ongi gaasisegu erisoojus.

Suitsugaaside koostise järgi võib otsustada, kui õigesti kulgeb kütuse põlemise protsess aurukatla koldes, ja järelikult teha kindlaks, kas ei toimu kütuse asjatut põletamist.

Gaasi koostise määramiseks on vastavad mõõteriistad — *gaasianalüsaatorid*. Nende hulgas on laialt levinud Orsat'-tüüpi käsi-gaasianalüsaator (joon. 49). See koosneb mõõtebüretist 1, mis on ühest otsast ühendatud sulgvedelikuanumaga 2 ja teisest otsast jaoturuga, nn. kammiga 3; kahest absorbeerimispiipetist 4 ja 5, mis on kammiga ühendatud kraanide 6 ja 7 kaudu; impallist 8, filtrist 9, silindrilisest veemantlist

10 ning kolmekäigulisest kraanist 11. Vedelikuanum 2 on büretiga ühendatud kummivooliku abil. Anuma 2 ülestõstmisel aetakse vesi anumast büretti, allalaskmisel voolab vesi anumasse tagasi. AbsorbeerimispiPETID täidetakse keemiliste reaktiividega — anum 4 on kaaliumhüdrosüüdi lahus, mis absorbeerib süsihappegaasi CO_2 , ning pipetis 5 pürogallushappe lahus, mis absorbeerib hapnikku. Kolmekäiguline kraan võimaldab kolm järgmist ühendust: suitsukäik—mõõteriist, suitsukäik—atmosfäär (läbi imipalli) ning mõõteriist—atmosfäär (läbi imipalli). Imipall on pumbaks, mille abil saab gaasikäigust imeda gaasi.



Joon. 49. Käsi-gaasianalüsaator.

1 — mõõtebürett; 2 — sulgvedeliku anum; 3 — kamm; 4 ja 5 — absorbeerimispiPETID; 6 ja 7 — kraanid; 8 — imipall; 9 — filter; 10 — veesilinder; 11 — kolmekäiguline kraan; 12 — kummitoru; 13 — metalltoru.

Mõõtebürett on ümbritsetud veesilindriga 10, mille ülesandeks on hoida gaasi temperatuur mõõtebüretis ühtlasena. Bürett on ehitatud selliselt, et selle peenemasse ossa mahub 20 mahuosa ning jämedamasse 80 mahuosa gaasi. Analüsaator on kummitoru 12 kaudu ühendatud metalltoruga 13, mis on viidud suitsukäiku, kust toimub uuritava gaasikoguse võtmine.

Analüsaatoriga töötamine seisab peamiselt järgmises. Eelnevalt imetakse imipalli abil mõõteriista suitsukäiguga ühendavasse torusse ja filtrisse uuritavat gaasi. Järgmisena puhutakse läbi jaotustorustik, selleks veeanuma 2 allalaskmise teel imetakse mõõtebüretti gaasi ja järgnevalt anum 2 ülestõstmisega surutakse see gaas läbi kolmik-

kraani ja imipalli atmosfääri — nii toimitakse paar korda. Seejärel imetakse mõõtebüretti 100 mahuühikut uuritavat gaasi ja ühendatakse mõõtebürett absorbeerimispipetiga 4 ja surutakse uuritav gaas anuma 2 ülestõstmisega absorbeerimispipetti 4, milles leiduv kaaliumhüdroksüüdi lahus neelab gaasis leiduva süsihappegaasi. Neeldunud süsihappegaasi hulk määratakse järelejäänud gaasi mahu järgi, mis määratakse mõõtebüretis samal (atmosfääri) rõhul, mil toimus proovitava gaasiportsjoni sissevõtmine. Pärast seda kui süsihappegaasi maht on kindlaks määratud, ühendatakse mõõtebürett jaotuskammi kaudu absorbeerimispipetiga 5 ja surutakse järelejäänud gaas pipetti, milles leiduv pürogallushappe lahus absorbeerib hapnikku; kui on ilmne, et kõik hapnik on absorbeeritud, siis mõõdetakse uuesti järelejäänud gaasi kogust, ja kahanemise järgi otsustatakse analüüsimiseks võetud gaasi hapnikusisaldus. Nii määratakse CO_2 ja O_2 sisaldus kütuse põlemissaadustes. Täieliku põlemise korral on see küllaldane, et otsustada, kas kütuse põlemine toimub õigesti.

Elektrijaamades varustatakse katlad tavaliselt automaatsete gaasianalüsaatoritega, mis teevad pidevalt gaasi analüüsi ja kirjutavad selle lindile. Lint võetakse kord ööpäevas maha ja otsustatakse üleskirjutise järgi, kas kütuse põlemisrežiim oli õige.

Kütuse põlemine koldes on keerukas keemiline protsess, mis nõuab õiget organiseerimist. Esmajoones on vaja juhtida juurde vajalik õhuhulk.

Reaktsiooni keemiline valem võimaldab arvutada omavahel keemilisse reaktsiooni astuvate ainete ja saadavate ainete hulki. Käesolevas punktis toodud põlemise põhi-võrrandite järgi võib arvutada õhu hulka, mis on vajalik selleks, et toimuks kütuses oleva süsiniku, vesiniku ja väävli põlemine. Arvutatud õhuhulka nimetatakse teoreetiliselt vajalikuks õhuhulgaks ja tähistatakse V_0 . Seda mõõdetakse kuupmeetrites 1 kg koldesse antava kütuse kohta, ning selle õhu hulga mõõtühikuks on nm^3/kg (täht n asetatakse m^3 ette selle tähistamiseks, et õhu mahtu mõõdetakse normaaltingimustes, s. t. rõhul $p=760$ mm Hg ja $t=0^\circ\text{C}$).

Kui juhtida koldesse ainult teoreetiliselt vajalik õhu hulk, siis on raske tagada tema hapniku täielikku ühinemist kütuse põlevate komponentidega, sest võimatu on saavutada täielikult ühtlast kütuse ja õhu segunemist.

Süsiniku põlemine toimuks puudulikult ning katlast väljuvad gaasid sisaldaksid süsinikoksüüdi (vingu) ja hapnikku, mida ei kasutatud põlemisel ära. Et vältida puudulikku põlemist, tuleb õhku juhtida koldesse teatud liiaga. Niisugust õhuhulka nimetatakse tegelikuks õhuhulgaks ja tähistatakse tähega V_{teg} . Selle mõõtühikuks on samuti nm^3/kg .

Kui nüüd tegelik õhuhulk jagada teoreetiliselt vajaliku õhuhulgaga, siis saame nn. liigõhutegurit, mis on tähtis kütuse põlemisprotsessi iseloomustav tegur. Seda tegurit tähistatakse kreeka tähega α (alfa). Seega

$$\frac{V_{teg}}{V_0} = \alpha, \quad (58)$$

$$\text{millest } V_{teg} = \alpha V_0. \quad (59)$$

Järgnevalt on toodud lihtne valem, mille järgi saab arvutada ligikaudselt vajalikku õhuhulka nm^3/kg ühe või teise madala kütteväärtusega kütuse põletamisel:

$$V_0 = \frac{1,1 Q_k^t}{1000} \text{ nm}^3/\text{kg}. \quad (60)$$

Aurukatelde tööpraktika on teinud kindlaks kõige kasulikuma õhuliia, mis on vajalik kütuse õigeks põletamiseks. Kui liigõhutegur on väike, siis süsinik ei põle täielikult ja tekib kadu keemiliselt mittetäielikust põlemisest. Kui anda aga liiga palju õhku, siis vaatamata sellele, et süsiniku põlemine on täiuslik, kuumeneb koldesse juhitud liigõhukogus asjatult, alandab kolde temperatuuri ja viib lahkuvate suitsgaasidega soojust ära. Seega on vaja anda õhku niisuguses koguses, et ei tekiks kadu keemiliselt mittetäielikust põlemisest ning kaod lahkuvate gaasidega oleksid minimaalsed. Iga kütuse ja koldetüübi jaoks on praktiliste kogemustega ja arvutuse teel tehtud kindlaks kõige kasulikumad α väärtused. Teades α väärtust ja arvutanud valemi (60) järgi V_0 , võib valemi (59) järgi arvutada V_{teg} . Kui koldesse antava õhu kogus on õige, siis saadakse täieliku põlemise saadusena kindel hulk süsihappegaasi CO_2 ning süsinikoksüüd CO puudub (peaaegu) täielikult. CO sisaldust, mis näitab puudulikku põlemist, võib samuti kindlaks määrata natuke keerukama konstruktsiooniga gaasianalüsaatoriga.

Arvutuse teel määratakse see maksimaalne süsihappegaasi hulk (tähistatakse $\text{CO}_{2\text{max}}$) gaasis, mis

tekiks täielikul põlemisel teoreetiliselt vajaliku õhuhulgaga. Mitmesuguste kütuste jaoks on need väärtused toodud tabelis 11. Küllaldase täpsusega vastab tegeliku ja teoreetilise õhuhulga suhtele maksimaalse ja tegeliku süsihappegaaside suhe põlemissaadustes, s.o.

$$\frac{V_{teg}}{V_0} = \frac{CO_2 \max}{CO_2} \quad (61)$$

Kui esimene suhe annab liigõhuteguri, siis tähendab, ka teine suhe iseloomustab liigõhutegurit koldes; seega

$$\frac{CO_2 \max}{CO_2} = \alpha \quad (62)$$

ehk

$$CO_2 = \frac{CO_2 \max}{\alpha} \quad (63)$$

Kui kütus sisaldab suurel hulgal väävlit, siis valem (63) on süsihappegaasi ja väävlisgaasi summa määramiseks. Seda summat tähistatakse RO_2 ; seega $SO_2 + CO_2 = RO_2$; järelikult

$$\frac{RO_2 \max}{RO_2} = \alpha \quad (64)$$

Murru (64) lugeja võib määrata antud kütuse jaoks tabelist 11, nimetaja aga gaasi analüüsiga. Seega võib valemi (64) järgi arvutada töötava katla α , sellega koos V_{teg} ja anda hinnangu selle kohta, kui õige oli põlemisrežiim.

Tehes katla käikude mitmesugustest kohtadest võetud gaasist analüüsi, võib otsustada katla müüritise seisukorra üle. Kui α piki suitsukäike suureneb, siis näitab see, et toimub õhu sisseimemine müüritise ebatihedustest. Need ebatihedused on kahjulikud, sest nende kaudu sisseimevad õhuhulgad alandavad gaaside temperatuuri, nende arvel aga heitegaaside hulk suureneb ja suurenevad kaod lahkuvate gaasidega.

19. Koldeseadmed

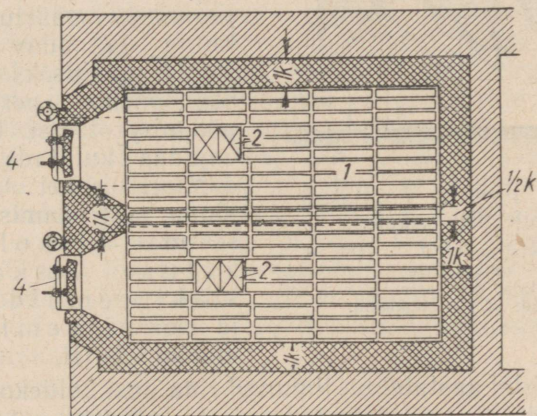
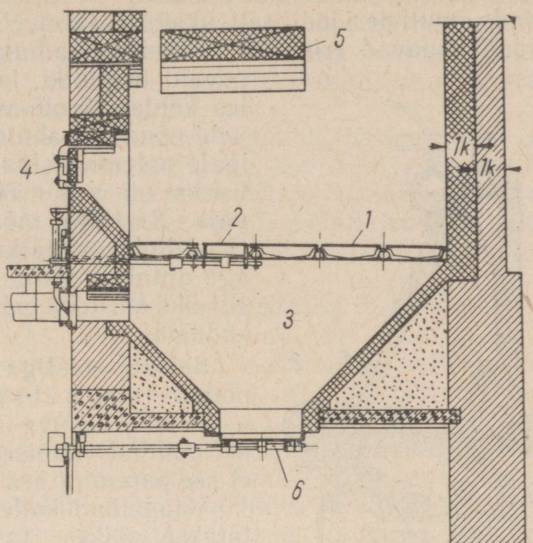
Katelseadme üheks vastutusrikkamaks elemendiks on kolle, milles toimub kütuse põlemine.

Kütuse põlemisel võib eristada kolme perioodi, mis lähevad ühest üle teiseks ja mida nimetatakse põlemise staadiumideks. Kütuse tulekul koldesse toimub süttimise staadium. Sel perioodil toimub kütuse soojenemine (kuumenemine) ning seejuures lagunemine tahkeks osaks — koksiks — ja lenduvateks aineteks. Kui lendosad kuumenevad süttimistemperatuurini ($600\text{--}750^\circ\text{C}$), siis nad süttivad ja algab teine periood — põlemise staadium, kuid lendainete eraldumisprotsess jätkub (kuni 1000°C); sel perioodil toimub ka koksi põlemine. Erinevalt protsessi esimesest staadiumist, mis võib toimuda ilma õhu juurdepääsuta, nõuab teine staadium kõige suuremat hulka õhku, eriti alguses, kui lendosade eraldumine toimub tormiliselt. Vastavalt põlevate elementide väljapõlemisele jäävad nii gaasilises kui ka tahkes osas järele mittepõlevad elemendid. Gaasilises osas on selleks lämmastik, süsihappegaas jne. ning tahkes osas tuhk. Põlemine läheb üle oma lõppjärku — järelpõlemise staadiumi. Sel perioodil on õhuvajadus tunduvalt väiksem.

Põhiliselt eristatakse kolded kihtpõlemise ja kamberpõlemise (leekpõlemise) kolleteks. Kihtpõlemise kolletes asetseb kütus kihina restil. Neid jaotatakse omakorda seisvate ja liikuvate restidega (mehaanilised) kolded. Joonisel 50 on toodud laialt levinud seisva, nn. plaanrestiga seadistatud pruunsöekolle. Rest on koostatud erilistest malmlattidest — piidest, millede vahel on pilud õhu läbipääsemiseks. Teistel juhtudel valmistatakse restid ka mitmesuguse kujuga plaatidena. Mõned neist restidest (plaatidest) valmistatakse pööratavana. Niisugust plaati aeg-ajalt pööratakse ja pööramisel tekkinud avade kaudu eemaldatakse restile kogunenud šlakk. Kütuse sisseviskamine toimub käsitsi kolde ukse kaudu. Tuhk ja šlakk langevad läbi resti tuhapunkrisse, kust need perioodiliselt ära koristatakse.

Koldes on tellistest võlv, mis ulatub üle kogu laiuse. Võlvi ülesanne on vähendada kütuse kuuma kihi kiirgust katla torudele ja omakorda saata kiirgussoojust kütuse kihile. Nii see kui ka teine asjaolu soodustavad temperatuuri tõusu koldes ja seega intensiivsemat põlemisprotsessi kulgemist.

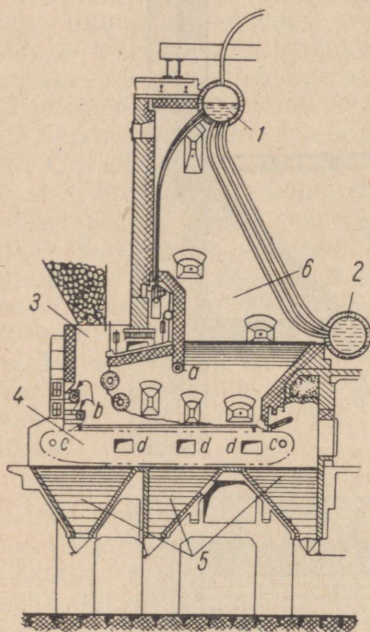
Kirjeldataud kolde omapäraks on kütuse perioodi-



Joon. 50. Käsitsi teenindatav plaanrest pruunsöe põletamiseks.

1 — restipiid; 2 — pööratavad restilülid räbu eemaldamiseks; 3 — tuha- ja räbupunker; 4 — kütteks; 5 — küttekihi kattevõlv; 6 — sulgur.

line sisseviskamine ja seetõttu põlemisprotsessi staadiumid kulgevad samuti perioodiliselt, üksteise järel. Nagu varem oli öeldud, nõuavad erinevad põlemise staadiumid erinevaid õhuhulki, kuid selles koldes ei ole võimalik neid nõudeid rahuldada, et igale põlemise staadiumile tuleks nii palju õhku kui vaja. Seetõttu mõnel perioodil õhku ei jätku, teisel aga antakse seda liigselt. Nii üks kui teine põhjustab kadusid.



Joon. 51. Prof. T. F. Makarjevi kolle tükk-turbale.

1 ja 2 — katlatrumlid; 3 — šaht; 4 — kettrest; 5 — tuhapunkrid; 6 — kolde-ruum; a — tala; b — astmed; c — keti-rattad; d — õhukastid.

Seisva restiga kolle nõuab roobitsemist — restil asuva kütuse perioodilist läbisegamist, et see paremini ära põleks.

Vaadeldud kollet kasutatakse väikese tootlikkusega kateldes, ning tema peamiseks väärtuseks on lihtne ja odav ehitus. Kolde puuduseks on ebaökonoomsus perioodilise põlemisprotsessi tõttu ja vajadus kulutada teenindamisel suurt füüsilist jõudu, sest peamised protsessid — koldesse kütuse viskamine, šlaki eemaldamine ja roobitsemine toimuvad käsitsi.

Viimastel aastatel on ilmunud rida uusi koldekonstruktsioone seisvate restidega. Peamiseks püüdeks uute kollete konstrueerimisel on mehhaniseerida rida protsesse, mis nõuavad käsitsi tööd. Nende kollete hulgas tuleb märkida rooplaticga kollet, kus rooplatt viib kütuse koldesse ja eemaldab põlemisel tekkinud šlaki ja tuha. Niisuguses koldes on kõik protsessid mehhaniseeritud.

Kuid seisva restiga kolded, isegi siis kui nad on varustatud seadmetega kõigi protsesside mehhaniseerimiseks, ei

sobi kütuse põletamiseks suurtes elektrijaamades kasutatavate katelseadmete kolletes. Neis elektrijaamades kasutatakse teisi — suure tootlikkusega koldeid. Kihispõletamise kolletest vaatleme elektrijaama suure võimsusega katla kollet turba põletamiseks.

Joonisel 51 on kujutatud niisugune kolle, mis kannab prof. T. F. Makarjevi nime, kes selle kolde konstruktsioone välja töötas. Kolle on sobitatud katlale, mille kaks trumlit 1 ja 2 ning eesmist torude kolme rida on näha joonisel. Kolle koosneb šahtist 3, kettrestist 4, tuhapunkrist 5 ja kolderuumist 6.

Šaht 3 (eelkolle) on määratud turba ettevalmistamiseks põlemiseks. Siin toimub turba eelkuivatamine. Šahti alumisse ossa on asetatud malmtalad, millede jahutamiseks nende sees voolab vesi. Talad on väljastpoolt vooderdatud talade kujule vastavate tellistega. Niisuguseid kive nimetatakse vormkivideks. Need talad moodustavad astme *b*, mille peal turvas süttib. Tekkivad kuumad gaasid tungivad läbi turbakihi ning, möödudes jahutustalast *a*, suunduvad kolderuumi. Kuivatatud turvas, langedes alla oma raskuse toimele, satub kettrestile. Rest kujutab endast kahte kolde äärtel asetsevat paralleelset ketti, mis omavahel on ühendatud põikribadega (biimidega). Viimaste külge on kinnitatud vahetatavad restilülid. Mõlemad ketid liiguvad üle ketirataste *c*, millised paarikaupa on ühendatud võllidele. Üks võllidest on elektrimootoriga ringiveetav.

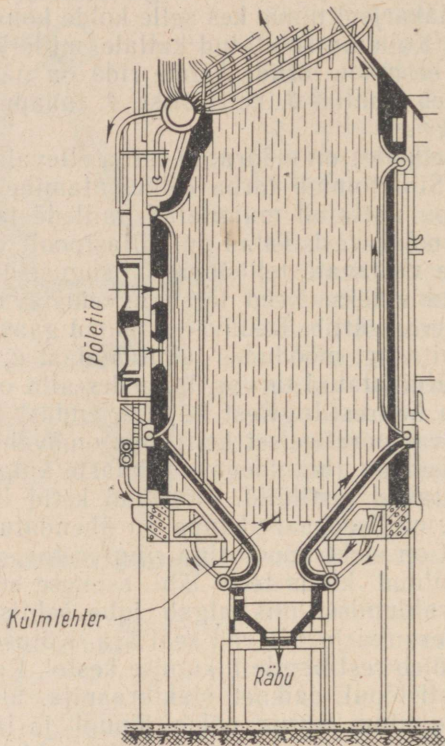
Restile tulnud kütus teeb läbi esimese staadiumi — lendosade eraldumise, mis algab juba šahtis. Lendosad lähevad kolderuumi ja põlevad seal ära. Kütuse tahke osa — koks — põleb restil selle liikumise kestel. Parempoolsel osal, s. t. resti lõpul, paikneb šlakikraapija. Siin peetakse kütust natuke kinni, kütus põleb lõpuni ja järelejäänud paakunud tuhk — šlakk — variseb šlakipunktrisse, kust ta eemaldatakse.

Põlemisõhk antakse resti alla tsoonidesse *d*. Õhu juurdejuhtimise kanalitel (joonisel ei ole näidatud) on siibrid, millega saab reglueerida õhu juurdevoolu resti erinevatesse kohtadesse.

Makarjevi kolle töötab ka väga niiske turba puhul, kui niiskus ulatub 50—55%.

Nagu näha, toimuvad selles koldes kõik kolm põlemisstaadiumi üheaegselt, kuid kolde erinevates kohtades. Ei esine perioodilisust ei kütuse sisseandmisel ega põlemisel.

Turba põletamise tehnika arenes edasi. Edukalt põletatakse freesturvast hõljuvas olekus A. A. Šeršnevi süsteemi kolletes ja niinimetatud süvikveskiga (šahitveskiga) kolletes (joon. 54).



Joon. 52. Kivisöe-tolmukolle.

Mehaanilise restiga koldeid kasutatakse ka pruunsöe põletamiseks, kui need ei ole liiga tuharikkad ega väga niisked. Viimasel juhul ei ole ettevalmistussähti vaja.

Kivisöe tootmisel muutub osa sellest peeneks. Peenikest kivisütt on suure võimsusega kihtpõlemise koldes raske põletada ja seepärast kasutatakse teist põletamise moodust — ruumis põletamist nn. kamberkol-

letes. Suured tükid, mis satuvad peene söe hulka, peenestatakse eelnevalt erilistes masinates — purustajates.

Põlevkivi, pruunsütt, kivisütt ja antratsiidi tolmu põletatakse kamberkolletes. Niisuguse põletamise olemus seisab järgmises. Peenike kütus jahvatatakse erilistes masinates — veskites — peenima pulbri kujuliseks — tolmuks. Tolmkütus puhutakse õhu abil läbi eriliste seadmete — põletite — suurde kolderuumi, kus ta süttib ja põleb lennul leegina. Sellest saigi see viis oma nimetuse — kamberpõletamine.

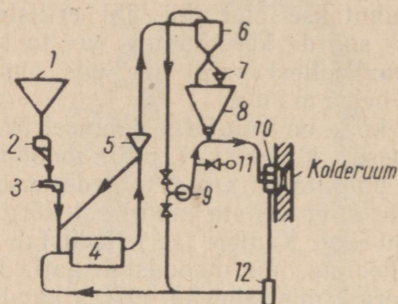
Niisugune kolle on kujutatud joonisel 52. Nagu näeme, kujutab ta enesest kambrit, mille moodustavad seinad. Piki seinu on paigutatud torud, milledes voolab vesi. Seda on tehtud selleks, et kaitsta müüritust kõrgetemperatuurilise leegi mõju eest. Kambri lae moodustab katla trumleid ühendav torudekimp, mis moodustab katla küttepinna. Ka kõik jahutustorud, mis lähevad mööda kambri seinu, moodustavad samuti katla küttepinna ja neid toidetakse veega katla alumisest trumlist. Kambri alumine osa kujutab enesest šlakilehtrit, mis on kujundatud kaldseintest, mida samuti jahutatakse veetorudega. See on niinimetatud külmlahter. Siin jahtuvad ja muutuvad tahketeks tükkideks sulanud šlaki vedelad tilgad ning mis kogutakse külmlahtri alla ehitatud šlakišahti.

Vasakus seinas paiknevad üksteise kohal põletid.

Peale kirjeldatud granuleeritud šlaki eraldamisega kollete on viimastel aastatel arendatud kamberkoldeid vedelšlaki eraldamisega. Sel juhul tekitatakse kolde allosas šlakilehtri asemel eriliselt asetatud põletite abil kõrge temperatuuriga tsoon, mille puhul šlakk jääb vedelasse olekusse. Vedel šlakk koguneb kolde alumisse ossa nn. šlakivanni, kust ta spetsiaalse ava kaudu läheb šlakikambrisse, mis on täidetud veega. Siit, nüüd juba tahkel kujul, šlakk eemaldatakse.

Tolmu valmistamiseks on mitu moodust, mis valitakse jahvatatava kütuse ja katlamaja iseärasuste järgi. Individuaalse tolmu valmistamise korral on igal katlal oma tolmuvalmistamise seade, nagu näidatud joonisel 53. Siin tuleb teatud tükisuurusega kütust punkrist 1 isevoolu teel automaatskaalule 2 ja edasi taldriktoitjale 3. Kui kütus ei ole väga niiske, saadetakse see

toitjast veskisse 4, kuhu torust 12 tuleb kuum õhk. Veski toimub teatud määral kütuse kuivatamine ja muutmine tolmuks. Siin jahvatatud kütus kantakse õhujoa poolt veskilt välja ja ta läheb separaatorisse 5, milles toimub valmis tolmu eraldumine jämedamatest õhuga kaasa toodud kütuse tükkidest. Need jämedamad tükid langevad



Joon. 53. Tolmuvalmistamise skeem.

1 — sõepunker; 2 — automaatkaalud; 3 — taidriktoitja; 4 — veski; 5 — separaator; 6 — tsükloon; 7 — tigu; 8 — tolmu punker; 9 — ventilaator; 10 — põleti; 11 — plahvatusklapp; 12 — õhk õhuelsoojendist.

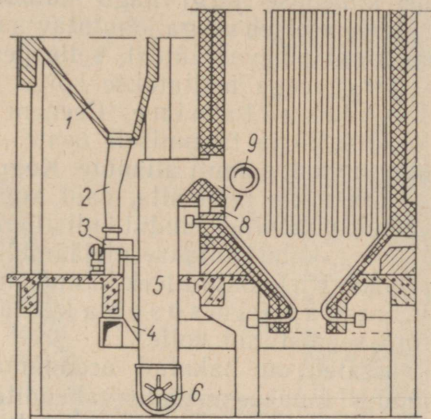
alla, nagu näidatud noolega, ja lähevad uuesti veskisse. Valmis tolmu läheb tsüklooni 6; siin toimub õhu ja tolmu eraldumine. Tolmu langeb isevoolu teel harutoru kaudu alla ja antakse tigu 7 abil tolmu punkrisse 8. Ventilaator 9, mis võtab õhku tsükloonist, puhub selle põletisse 10. Siia antakse ka punkrist tolmu ja torust 12 õhku, mis on ette soojendatud õhu eelsoojendis. Tekitatud põlemisõhu ja kütuse segu — aerosool — läheb läbi põletite katla kolderuumi, kus ta ära põleb.

Mõnede kivisöesortide tolmu võib plahvatada. Et plahvatus ei põhjustaks suuri vigastusi, on torustikule paigutatud kaitsesklapp 11. Plahvatusel tekkivad gaasid pääsevad läbi õhukese, kergesti puruneva klappiseina välja.

Kui kütamiseks kasutatakse niisket kivisütt ja veski ei saa seda küllalt kuivaks, siis kuivatatakse seda enne veskisse laskmist. Edasine lõplik kuivatamine toimub veskis.

Pruunsöe, freesturba ja põlevkivi põletamisel on laialt kasutamisel nn. šaht-veskiga kolded (joon.

54), milles samuti rakendatakse kamberpõletamise moodust. Nende kollete omapäraks on lihtne ehitus, suur tootlikkus ja väike energiakulu kütusetolmu tootmiseks. Selle kolde puhul tuleb kütus punkrist 1 toru 2 mööda läbi toitja 3 ja harutoru 4 veskisse 6. Veskisse juhitakse ka kuuma õhku, mis kuivatab kütust. Sama õhk kannab tolmu kaasa ja viib ta läbi ambrasuuri 7 koldesse. Tolmu separeerimine toimub šahtis 5.



Joon. 54. Šahthveskiga kolle.

1 — söepunker; 2 — söe pealevoolutoru; 3 — kütusetoitja; 4 — kütuse harutoru veskisse; 5 — šaht; 6 — šahthveski; 7 — ambrasuur; 8 — sekundaarrõhu sissevool; 9 — sissekütmise seadis.

Suurtes seadmetes kasutatakse kivilisõe ja antratsiidi jahvatamiseks kuulveskeid. Pruunsõe, freesturba ja põlevkivi jahvatamiseks kasutatakse löökoimega veskeid. Esimeste, väikese kiirusega pöörlevate trumlite sees on teras- või malmkuulid, trumlistesse juhitakse juurde ka kütus. Trumli pöörlemisel kuulid veerevad ja peenestavad kütuse. Valmis tolmu kantakse välja trumlist läbivoolava kuuma õhuga, sama õhu arvel toimub ka kütuse kuivatamine. Löökoimega veskites (nn. šahthveskites) toimub sõe jahvatamine kiiresti pöörlevate vasarate abil.

Mehaaniliste restidega kolded on vähem tootlikud kui kamberkolded. Nende tootlikkuse suurendamiseks ja sor-

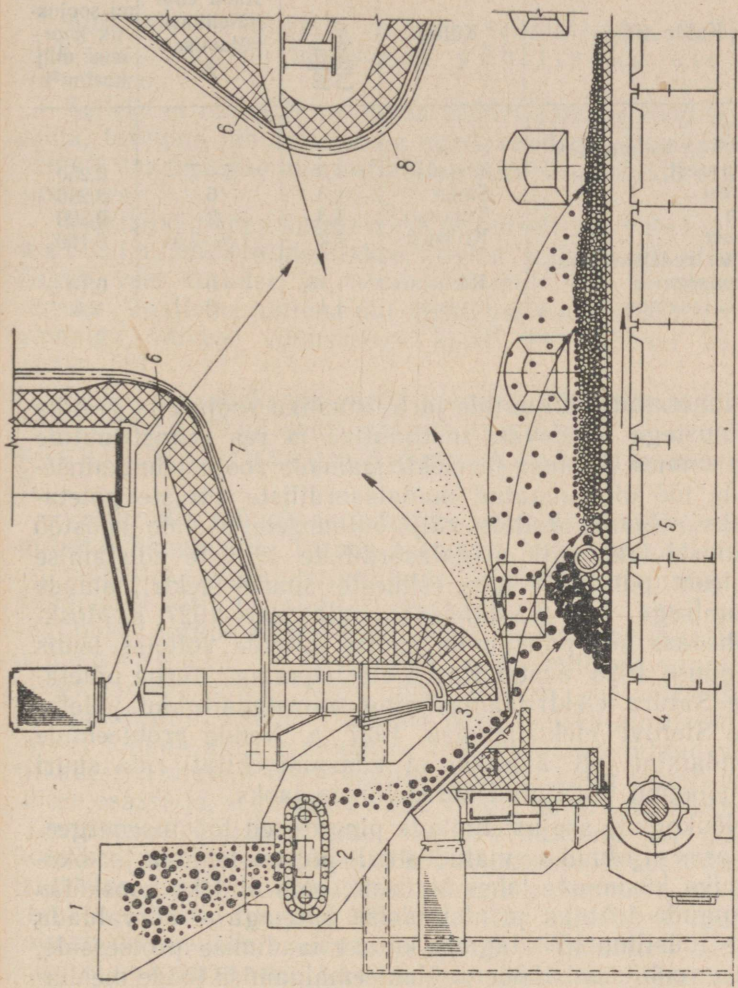
teerimata söe kasutamisevõimaluste selgitamiseks teostatud uurimistööde alusel loodi БТИ leek-kihtpõlemise kolle, milles kiht- ja kamberpõletamise viisid on ühendatud. Niisugune kolle on näidatud joonisel 55.

Kütus viiakse koldesse pneumaatilise viskese admeaga, milles söetükkide koldesse viskamine toimub suruõhu abil. Kütuse koldesse paiskamisel toimub tema sorteerimine. Kõige peenem kütus läheb otse kolderuumi ja põleb lennul, jämedamad tükid aga langevad restile ja paigutuvad sellele jämeduse järgi nagu näidatud joonisel. Kolde eesmises osas asetseb veega jahutatav süütetala. Süütetala peab kinni põlevat kütust, selle peale koguneb värsket kütust ning seega tekitatakse kõige intensiivsem süütemoodus — altsüütamine. Peenem kütus, mis langeb resti keskmisele ja tagumisele osale, laskub põlevale kütusekihile ja saab samuti altsüüte. Kogu põlemiseks vajalik õhk ei anta mitte resti alla, vaid ainult osaliselt, nii et restil toimub põlemine puudulikult; lõplik põlemine toimub kolderuumis, kuhu antakse ülejäänud põlemisõhk, nn. «sekundaarõhk». Kirjeldatud leek-kihtpõlemise kolle on kaks korda suurema võimsusega kui tavaline sama suure kettrestiga seadistatud kolle.

Viimastel aastatel on hakatud arendama keeriskoldeid. Nendes luuakse eriliste vahenditega püsivad keerised — gaasi ja õhu segu ringliikumine koos kütusega (kütuseks on kivisöetükid 0,5—5,0 mm või ka niisugused kütused, nagu freesturvas ning toiduainete- või puidutööstuse jäätmed, jämedusega 5—50 mm). Kütuseosade koldes viibimise aeg, erinevalt leekkolletest, on nendes kolletes piiramatu ja kestab kuni kütuse osakese täieliku ärapõlemiseni. Keeriskolded (tsükloon-tüüpi kolded) võimaldavad suurt kolde forsseerimist, mis loob soodsad tingimused šlaki eraldamiseks vedelal kujul.

Mitmesuguste kollete võrdlevad ekspluatatsioonilised karakteristikud on toodud alljärgnevas tabelis.

Kütuse põletamisega ning katelde ja jõumasinate ehitamisega seotud küsimuste lahendamiseks on NSV Liidu organiseeritud rida teadusliku uurimise instituute. Nende seas tuleb märkida: NSV Liidu Teaduste Akadeemia G. M. Kržižanovski nimelist energaetika instituuti (ЭНИИ), F. E. Dzeržinski nimelist Üleliidulist Soojustehnika Instituuti (БТИ) ning I. I. Polzunovi nimelist Katelde ja Turbiinide Keskinstituuti (ЦКТИ).



Жооп. 55. Каеаеетмелине ВТИ леек-киһиспöлемисе колле.

1 — тåйтеколу; 2 — краптоитја; 3 — лиугплаат; 4 — кеттест; 5 — сүүттетала; 6 — секундааррöһу дүүс; 7 —
 есиекраан; 8 — тагаекраан.

Kolde tüüp	Kütus	Liigõhu tegur	Kaad ebatäielikust põlemisest %	Kolderuumi soojuslik koormus milj. kcal/m ³ h
Käsitsi teenindatav plaanrest	Kivisüsi	1,4	6—7	0,250
Kettrest	Sama	1,3	6	0,250
Sama	Turvas	1,3	2	0,300
Kamber	Kivisüsi	1,2	1,5—2,5	0,160
Kamber vedelšlaki eraldamisega	Kivisüsi	1,15	0	0,18
Keeris-tsükloon	Kivisüsi	1,1	0	2,4

Nimetatud instituutide ja tööstusliku soojusenergeetika küsimustega tegelevate instituutide ja rea eriinstituutide ning samuti tööstuse ja elektriijaamade soojustehnikainserneride töö oli suunatud madalasordiliste kütuste põletamiseks sobivate kollete väljatöötamisele. Nende koostöö tulemusel lahendati madalasordiliste kütuste põletamise probleem põhiliselt juba esimeste suurte elektriijaamade ehitamisega, s. o. taastamisperioodil 1920—1927. a. Moskvalähedase söe põletamine suurte katelde kolletes leidis lahenduse 1926. aastal Kaširi elektriijaamas; turba põletamine Šatura elektriijaamas ning antratsiiditolmu põletamine Šterovi elektriijaamas 1927. a. Nende probleemide lahendamine oli aluseks, et edaspidi ehitati rida suuri elektriijaamu nimetatud kütuseliikide jaoks.

Nõukogude soojustehnikute pingutused tööstusenergeetika osas ei olnud suunatud ainult põlemistehnika ja -ökonoomika küsimuste lahendamisele, vaid olid ka kooskõlas nõukogude tehnika printsiipiaalse suunaga — kõrvaldada raske füüsiline töö: tagada kütuse laadimise protsesside, kütuse roobitsemistöde ja šlalieemaldamise tööde mehhaniseerimine väiksemate katelseadmete juures, s. o. organiseerida neil kateldel sama süsteemiline mehhaniseerimine kui suure võimsusega kateldel. Käesoleval ajal on tööstusenergeetikas kasutamisel rida koldeid, millede juures need küsimused on edukalt lahendatud.

20. Aurukatlad

Aurukateldes toimub veeauru valmistamine. Soojus-
elektrijaamades on aurukatlad põhiliseks sisse-
seadeks.

Selleks et edaspidi vaadelda elektrijaamade tööd tervi-
kuna, tutvume lühidalt nende agregaatidega. Uksikasjali-
semalt vaadeldakse aurukatlad ja aurujõumasinaid erikir-
janduses.

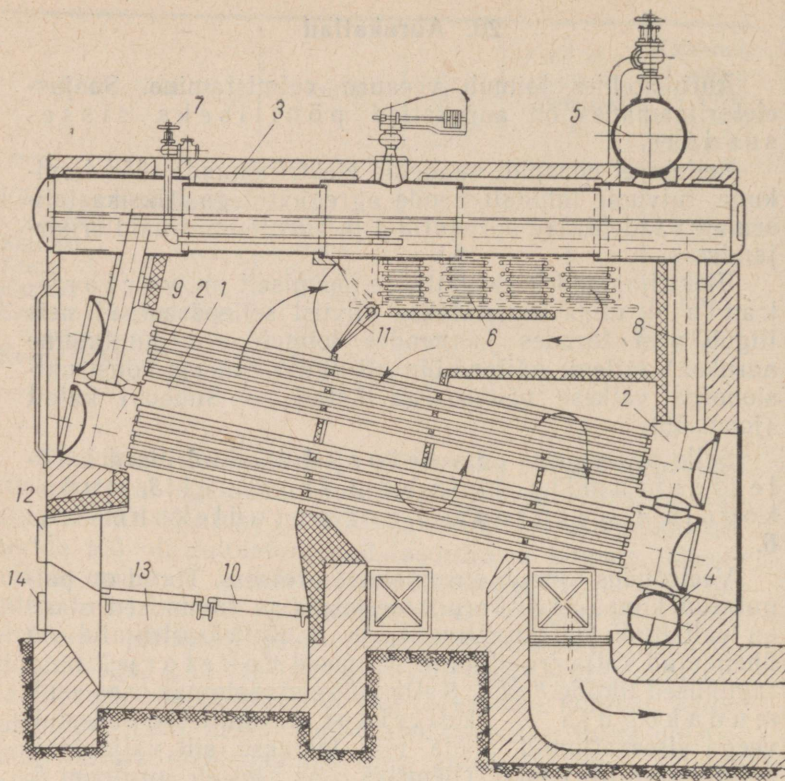
Elektrijaamades kasutatakse peamiselt nn. v e e t o r u -
katlad, mida nimetatakse niiviisi sellepärast, et neis
liigub vesi torudes ja nendes toimub vee muutumine
auruks. Vaatleme näitena üht niisugust vanema konstrukt-
siooniga väikese võimsusega katelt — Šuhhovi katelt
(joon. 56).

Selle peaosadeks on v e e t o r u d 1, silindrilised kol-
lektortrumlid ehk karbid 2, trummel 3, muda-
koguja 4, aurutoom 5 ning auruülekuumendi
6.

Veetorudes toimub aurustamise protsess. Torud on pai-
gutatud kimpudena. Torude eesmised ja tagumised otsad
on valtsitud kollektortrumlitesse 2. Kollektortrumlid on
ühendatud katla trumliga 3; eesmised v a h e t o r u 9 ning
tagumised torude 8 abil. Katla kõige madalamas osas asub
mudakoguja — kollektor 4, millesse sadestub
veega sissesattunud muda, mis lastakse siit välja läbi-
puhumisventiili kaudu. Ülemises osas asetseb aurutoom 5,
milles toimub auru eraldumine temaga kaasa tulnud vee-
tilkadest. Toitevesi tuleb ventiili 7 kaudu katla trumli ees-
misse osasse ja, segunenud katla veega, läheb toru 8 kaudu
tagumistesse kollektoritesse. Torudes tekkinud aur läheb
koos keeva veega eesmistesse kollektoritesse ja sealt katla
trumlistesse, kus aur koguneb katla trumli pealmisesse osasse
vee kohal. Katla trumlist läheb aur läbi aurutoomi, milles
toimub veepiiskade eraldumine aurust, ühendustoru kaudu
auru ülekuumendisse 6. Siin saab aur täiendava
koguse soojust, kusjuures auru rõhk ei muutu, kuid tem-
peratuur tõuseb; seega muutub ta siin ü l e k u u m e n d a -
t u d a u r u k s.

Joonisel 56 kujutatud katel on väikesevõimsuseline ja
varustatud käsitsiteenindatava plaanrestiga.

Põlemisõhk tuleb uksest 14 t u h a r u u m i 13 ning lii-
gub läbi restilülide 10 ja neil asetseva kütusekihi koldesse.



Joon. 56. Šuhhovi katla lõige.

1 — veetorud; 2 — kollektortrumlid; 3 — trummel; 4 — mudakoguja; 5 — auru-
toom; 6 — auru ülekuumendi; 7 — ventiil; 8 — vahetorud; 9 — torud; 10 — plaan-
rest; 11 — siiber; 12 ja 14 — ukсед; 13 — tuharuum (restialune).

Kuumad gaasid tõusevad üles, ja pöördudes ümber spetsiaalselt paigutatud vaheseina, läbivad nooltega näidatud teekonna. Ülekuumendit läbivate gaaside koguse reguleerimiseks on siiberklapp 11. Joonisel punktiiiriga näidatud asendi puhul ei läbi gaasid ülekuumendit üldse. Siibri ükskõik millise vahepealse asendi korral võib ülekuumendist läbi lasta niisuguse osa gaase, mida soovitakse, ja sellega saab reguleerida ülekuumendatud auru temperatuuri.

Katlast lähevad suitsugaasid välja korstna kaudu, mis joonisel ei ole näidatud.

Šuhhovi katlaid seati üles väikese võimsusega elektri- jaamadesse (umbes 3000—5000 kW), peamiselt tehaste jõuamadadesse, ning tehnoloogilise auru tootmiseks.

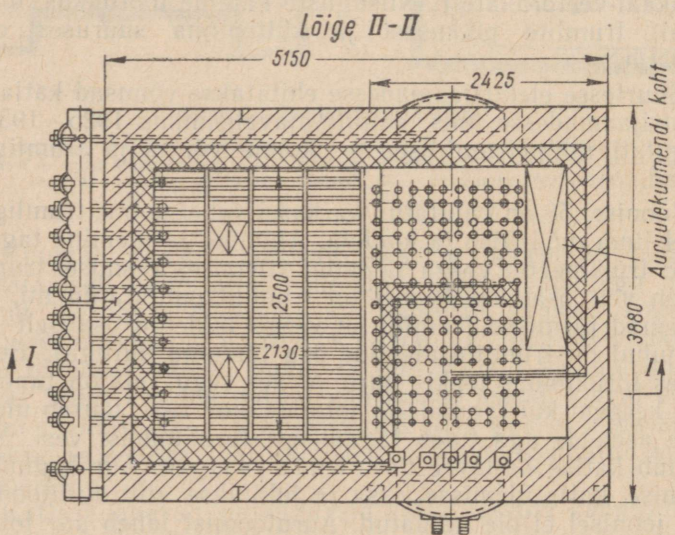
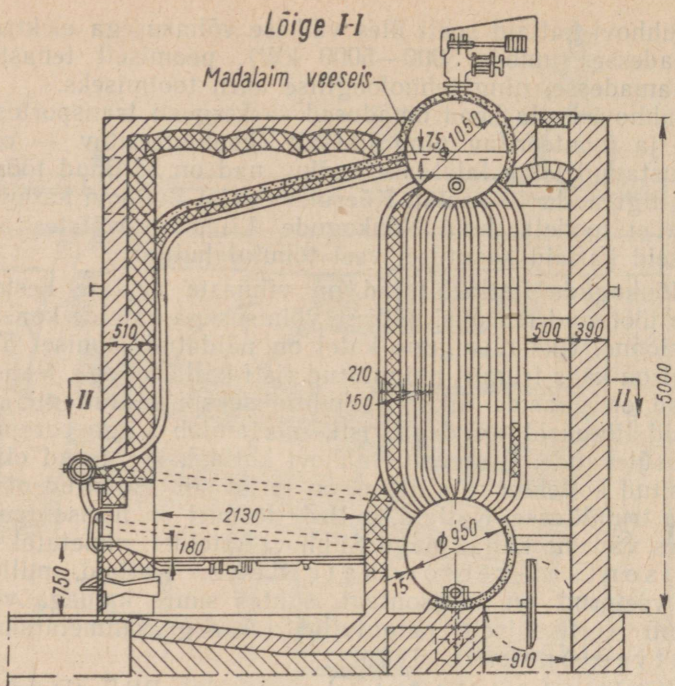
Šuhhovi katla head omadused — kergesti transporteeritav ja monteeritav ning lihtsalt ekspluateeritav — on soodustanud tema laialdase leviku: nad on säilinud tööstuses ligikaudu 50 aastat. Käesoleval ajal Šuhhovi katlaid enam ei toodeta, kuid Nõukogude Liidu ettevõtetes on selliseid katlaid kasutusel veel tohutul hulgal.

Nõukogude katlaehitajad on viimaste aastate kestel välja töötanud rea uusi väikese võimsusega katelde konstruktsioone. Üks niisugune katel on näidatud joonisel 57. Sellel on kaks trumlit paigutatud risti katla teljega. Vaheseinad on gaaside liikumise juhtimiseks asetatud nii, et gaasid liiguksid torudega risti, mis annab kõige parema soojusülekanne. Erinevalt Šuhhovi katlast, kus torud olid valtsitud kollektortrumlitesse, on torud siin valtsitud otse katla trumlitesse. Katlaid, millede torudel on horisontaali suhtes väikene kallak nagu Šuhhovi kateldel, nimetatakse horisontaal-veetorukateldeks. Katlaid, milles veetorud on horisontaali suhtes suure kaldega või koguni vertikaalselt paigutatud torudega, nimetatakse püstveetorukateldeks.

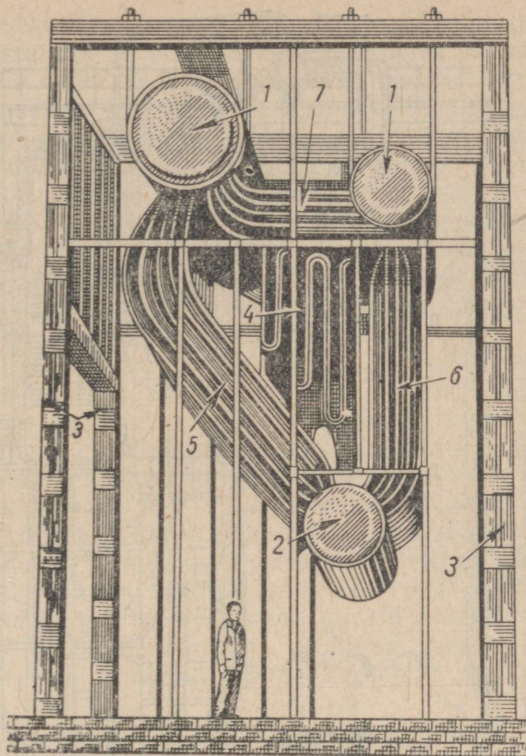
Kirjeldatud katelt tähistatakse margiga BBД (Dobrini vertikaal-veetorukatel). Niisuguste katelde tootlikkus, olenevalt trumlite pikkusest ja küttepinna suurusest, on 2—6 t/h.

Suurtesse elektrijaamadadesse ehitatakse võimsad katlad. Elektrijaamadadesse, mis ehitati ajavahemikus 1925—1935, paigutati mitmetrumlilised — kolme või nelja trumliga katlad.

Joonisel 58 on kujutatud karkassi vahel kolme trumliga katel ilma müüritise ja koldeta. Alumine ja ülemine tagumine trummel on veega täidetud. Ülemises eesmisel trumlis on vett osaliselt (vahel on trumlid paigutatud nii, et mõlemad ülemised trumlid on veega täidetud osaliselt — sel juhul on trumlite ülemine osa täidetud auruga). Eesmisel torukimbus tekkiv auru ja vee segu, mis on tunduvalt kergem kui tagumistes torudes olev vesi, tõuseb üles, selle asemele aga tuleb tagumisest torukimbust vesi. Nii toimub katlas katlavee tsirkulatsioon. Aur koguneb eesmise katla ülemisse ossa ja juhitakse siit aurutoomi, mis joonisel ei ole näidatud. Aurutoomist läheb aur toru-



Joon. 57. ВВД-üsteemi vertikaal-veektorukatel.



Joon. 58. Kolme trumliga katel.

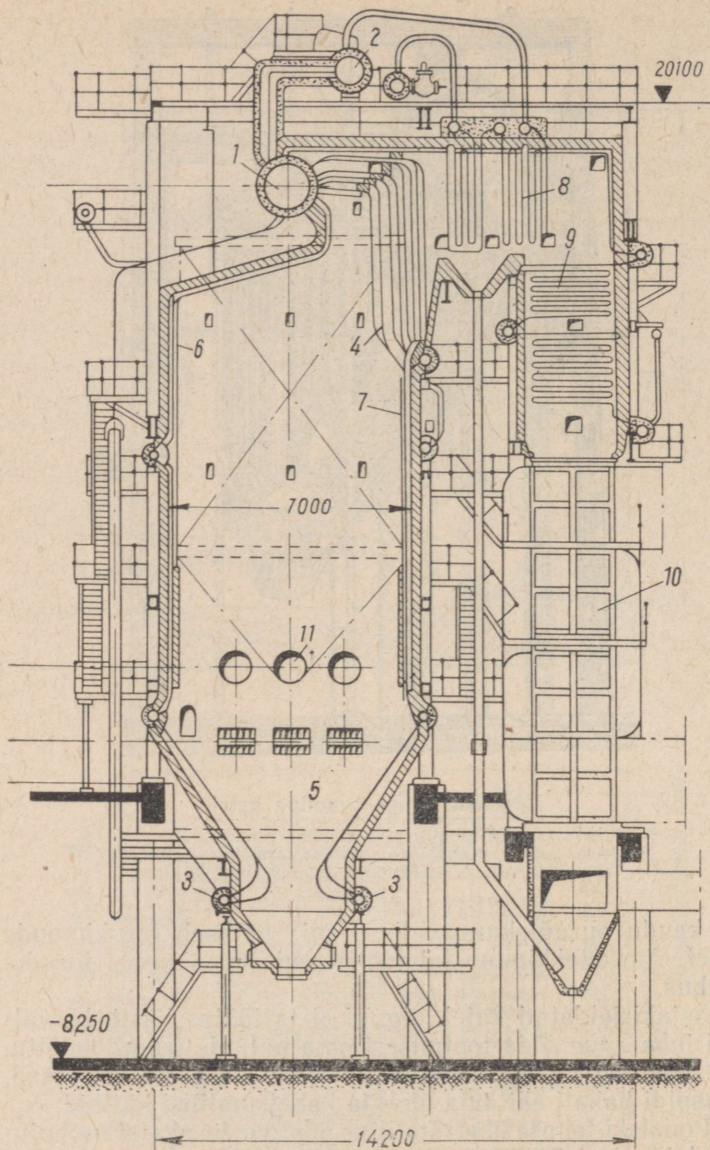
1 — kaks ülemist trumlit; 2 — alumine trummel; 3 — karkass; 4 — ülekuumendi; 5 — eesmine torukimp; 6 — tagumine torukimp; 7 — ülemiste trumlite ühendustorud.

sid kaudu auruülekuumendisse, mis paikneb torukimpude vahel. Auru tekkimine toimub peamiselt esimeses torudekimbus.

Äsjakirjeldatud katel, olgugi et ta töötas hästi, kõrvaldati juba enne sõda tootmisest oma paljude trumlite tõttu, sest trumlid on katla kõige kallimad ja raskemad osad. Edaspidi hakati ehitama ühe- ja kahe-trumlilisi katlaid.

Podolski tehase ühetrumliline püst-veektorukatel on kujutatud joonisel 59.

Põhiliselt moodustavad selle katla küttepinna torud, mis paiknevad mööda kolde seinu. Need torud moodustavad nn. e k r a a n i d (6 ja 7) ning seetõttu nimetatakse niisu-



Joon. 59. Ühe trumliga keskrõhukatel Põdolski S. Ordžonikidze nime-
lisest tehast.

1 — katlatrummel; 2 — aurukoguja; 3 — kollektor; 4 — torudekimp; 5 — kül-
lehter; 6 ja 7 — ekraanid; 8 — aurülekuumendi; 9 — ökonomaiser; 10 — õhuel-
soojendi; 11 — põletid.

guseid katlaid ekraankateldeks. Ekraanides toimub vee aurustamine ja koos sellega kaitstakse ka kolde seinu leegi mõju eest. Vesi tuleb vee-eelsoojendist katla trumlisse 1 ja sellest laskuvtorude kaudu kollektoritesse 3 (kollektorid on paksuseinalised torud, milledesse kogu pikkuse ulatuses ühendatakse katlatorud); ekraanitorudes tekkinud aur läheb trumlisse, koguneb selle aururuumi ja juhitakse sellest edasi aurutoomi 2 ning sellest ülekuumendisse 8.

Ekraankatlad paistavad silma suure tootlikkuse poolest, sest nendes kasutatakse väga efektiivselt kuuma leegi kõrget temperatuuri, mis soodustab kiirgussoojuse ülekanne küttepindadele (vt. punkt 16).

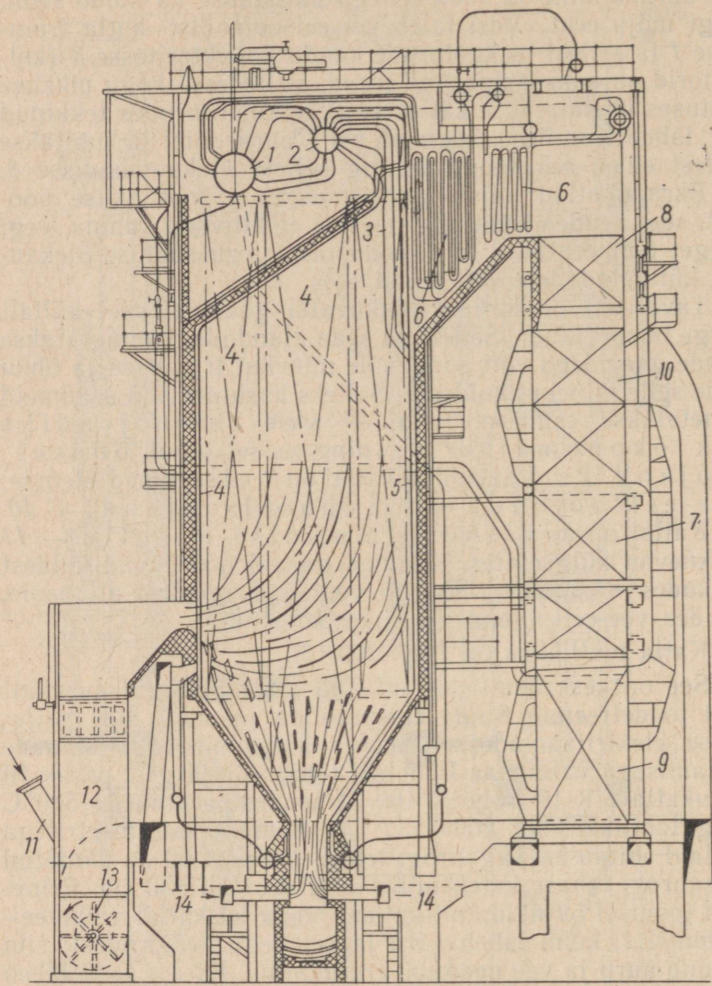
Tavaliselt on katlast lahkuvatel gaasidel veel küllalt kõrge temperatuur. Selleks et seda alandada, kuumutatakse nende gaasidega vett enne selle minekut trumlisse ja õhku enne selle minekut koldesse. Selleks kasutatavaid seadmeid nimetatakse esimesel juhul — vee-eelsoojendiks ehk ökonomaiseriks ning teisel juhul õhueleelsoojendiks. Vaadeldud katlal on need seadmed olemas: vee-eelsoojendi — 9 ja õhueleelsoojendi — 10.

Katlal on kivisöetolmu kolle. Põletid — 11 paiknevad külgeintes. Kuumad gaasid pöörduvad koldest lahkudes ülekuumendisse ja voolavad seejärel allapoole, läbides vee-eelsoojendi ja õhueleelsoojendi.

Katla tootlikkus on 160—200 t/h.

See on keskrõhu-katel (32—35 ata). Selliseid aurukatlaid toodeti enne Suurt Isamaasõda ja seati üles paljudesse elektriijaamadesse. Seoses kõrgrõhu-elektriijaamade ehitamisega valmistas Podolski tehas sõjajärgsel perioodil aurukatla ПК-10 rõhule 100 at ja temperatuurile 510°C ning tootlikkusega 200—230 t/h. Samade parameetritega katlaid ehitab ka Taganrogi tehas. Joonisel 60 on näidatud Taganrogi tehase katel, mille tootlikkus on 230 t/h. Erinevalt joonisel 59 näidatud katlast on sellel katlal väike eeltrummel 2, kuhu läheb auru ja vee segu veetorudest; siin toimub auru ja vee peamine eraldumine. Pärast seda läheb aur aururuumist pealmiste torude kaudu ning vesi alumiste torude kaudu vastavalt trumli 1 auru — resp. veeruumi. Seetõttu on vesi peatrumlis suhteliselt rahulikumas olekus.

Kõigile trummelkateltele on ühiseks jooneks töötava keha liikumise organiseerimise moodus katlas. See liikumine tekitatakse eesmistest ja tagumistest torukimpudes valitseva vee erikaalu vahe tõttu, nagu oli märgitud kolme-



Joon. 60. Taganrogi tehase kõrgrõhu trummelkatel TII-230 freesturba ja kiviõetolmu põletamisega šahtveskiga koldes.

1 — peatrummel; 2 — vahele lülitatud trummel; 3 — tagaekraani tõusutorud;
 4 ja 5 — ekraanid; 6 — ülekuumendi; 7 ja 8 — ökonomaiseri esimene ja teine aste;
 9 ja 10 — õhuelsoojendi esimene ja teine aste; 11 — kiviõe juurdevool; 12 —
 šaht; 13 — veski; 14 — õhu sissevool.

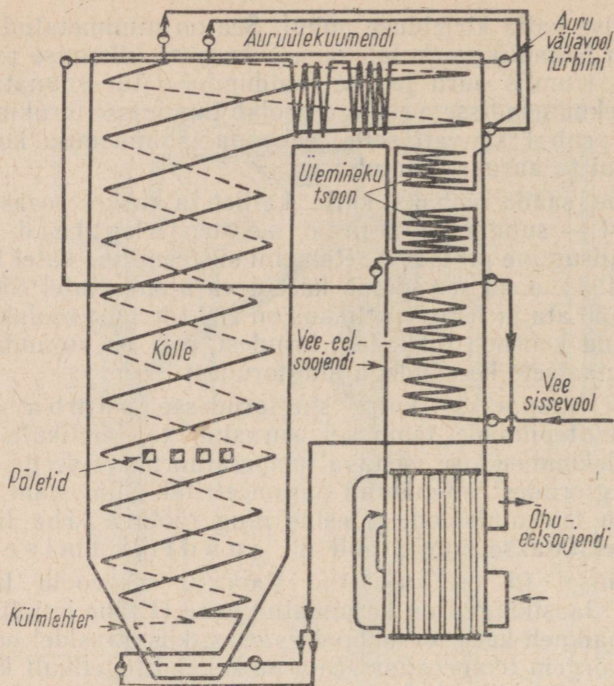
trumliilise katla kirjelduse puhul. See on niinimetatud vee ja auru loomulik tsirkulatsioon. Niisuguse liikumise puhul toimub trumliis auru ja vee eraldumine. Aur suunatakse auruülekuumendisse, vesi aga voolab tagumisse torukimpu. Seega peab 1 kg vett selle teekonna läbima mitu korda, enne kui ta auruks muutub.

Püüe saada vabaks katla kallist ja raskest osast — trumlist — sundis looma nn. otsevoolukatlaid. Esimene niisugune prof. L. K. Ramzini süsteemiline katel lasti käiku 1933. a. ja see töötab käesoleva ajani. Katel töötab rõhul 130 ata ja tema tootlikkus on 200 t/h. Otsevoolukatla küttepind koosneb pikkadest torudest, mis on kujundatud horisontaalsete keerdudega siugtorudest.

Vesi suunatakse katla siugtorudesse pumba abil. Katla küttepindade läbimisel aurustub ta täielikult, aur saab ülekuumenduse vastava temperatuurini ja seega väljub siugtorudest ettenähtud parameetritel. Siin enam loomulikku tsirkulatsiooni ei esine ning töötava keha liikumine tekitatakse pumba abil nn. sundliikumisenä.

Joonisel 61 on kujutatud Ramzini otsevoolu katla skeem. Gaasikäigud on kujundatud vene II tähe kujuliselt. Kolle paikneb katla vasakpoolses osas, kus gaasidel on ka kõige kõrgem temperatuur. Siin paiknevad tegelikult katla enese torud, milles toimub vee kuumutamine ja aurustamine. Koht, kus lõpeb vee muutumine auruks, on torudele kõige ohtlikum, sest siin toimub vees lahustunud soolade eraldumine ning sadestumine torude seintele. Niisugust küttepinna osa nimetatakse üleminekutsooniks. Kuna sadenenud soolad võivad kõrgetel temperatuuridel saada torudele ohtlikuks, siis üleminekutsoon viiakse harilikult katla parempoolsesse ossa, kus gaaside temperatuur on madalam, ja sel juhul seda küttepinna osa nimetatakse välja viidud üleminekutsooniks.

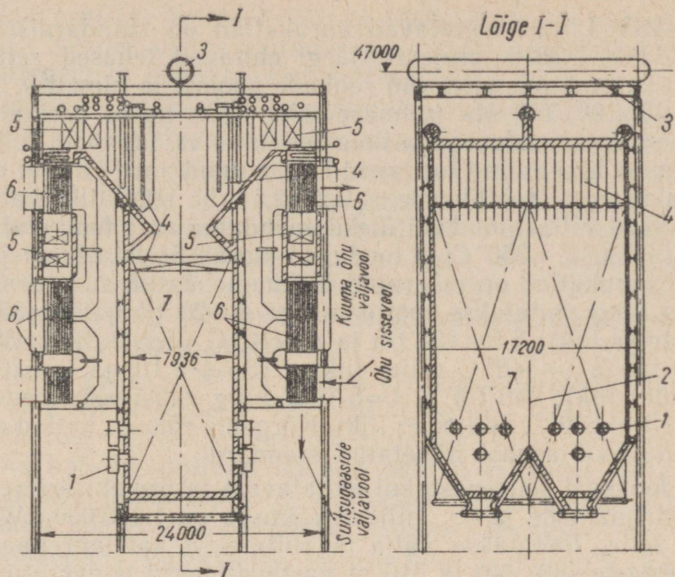
Vaatamata sellele ettevaatusele loetakse otsevoolukateldes katlavees soolade sisaldust lubamatuks, sest neid ei ole võimalik kõrvaldada selliselt, nagu see sünnib trumelkateldes, kus katlas nendest kohtadest, kuhu koguneb kõige suurema sooladekontsentratsiooniga vesi, eemaldatakse see ventiilidega varustatud eriliste äravoolutorude kaudu. Seda toimingut nimetatakse katla läbipuhumiseks. Seepärast tuleb otsevoolukateldes lisatoiteveeks kasutada ainult kondensaati või keemiliselt sooladest puhastatud vett (vt. p. 21). Kui elektrijaamas on nii trum-



Joon. 61. Ramzini 230 t/h tootlikkusega otsevoolukatla skeem.

mel- kui ka otsevoolukatlad, siis toimub katelde toitmine selliselt, et otsevoolukatlad toidetakse ainult kondensaadiga ning kogu keemiliselt puhastatud lisatoitevesi suunatakse hariliku katla trumliisse.

Töötava keha, s. o. vee ja auru liikumine toimub otsevoolukatlas järgmiselt. Vesi tuleb ökonomaiserisse ning läheb ettesoojendatult katla vasaku poole kollektoritesse. Skeemil on kujutatud kaks kollektorit. Hargnedes kahte harusse tõuseb vesi torusid mööda üles ja läheb väljumiskollektoritesse, millest see suunatakse üleminekutsooni. Üleminekutsoonist läheb töötav keha juba teatud määral ülekuumenenud auruna auru ülekuumendisse. Ülekuumendis toimub auru edasine kuumenemine ning edasi läheb aur siit kollektorisse ja sellest turbiini. Gaasid liiguvad algul koldes üles, suunduvad paremale ning möödudes



Joon. 61a. Plokk-katel ТП-90 tootlikkusega 500t/h, 140 ata; 570° C.

1 — kiviõetolmu põleti; 2 — kahepoolne ekraan; 3 — trummel; 4 — auru-ülekuumendi; 5 — vee-eelsoojendi; 6 — õhuelsoojendi; 7 — kolle.

auruülekuumendist laskuvad parempoolsesse gaasikäiku, kus uhuvad üleminekutsooni, veeökonomaiserit, õhu eelsoojendit ja lähevad edasi läbi tõmbeventilaatori korstnasse.

Suure Isamaasõja aastatel olid otsevoolukatlad kasutusel paljudes Uraali jõujaamades. Ehitamise lihtsus võimaldas neid toota jaama ehituspaigal. Seepärast, ning võrdlemisi lihtsa montaaži tõttu, õnnestus üsna lühikese ajaga lülitada töösse rida turbogeneraatoreid elektrienergia tootmiseks relvatööstusele.

Sõjajärgsetel aastatel jätkati töid otsevoolukatelde täiustamise alal. Kuna otsevoolukatelidel ei ole loomulikku tsirkulatsiooni, siis on nad kõige sobivamad töötamiseks ülikõrgedel aururõhkudel (üle 150 ata), kui auru ja vee erikaalude erinevus on väike. Auru jaoks, mille rõhk ületab kriitilise (225 ata), on otsevooluprintsiip ainuvõimalik. Sõjajärgsetel aastatel on ehitatud katsekatel rõhule 300 ata ja 600° C ning suuri otsevoolukatlaid ülikõrgete auru parameetritega elektriyaamade jaoks.

NSV Liidus ehitatavad aurukatlad on standardiseeritud. GOCT-3616 projekti järgi ehitavad tehased seitset liiki katlaid, mis erinevad rõhkude poolest ja nimelt 9, 14, 24, 40, 100, 140 ata (viimase rõhu jaoks kahes variandis: vaheülekuumendusega ja ilma selleta — vt. tagapool p. 32). Esimest liiki katlad toodavad küllastunud auru ja neid ehitatakse auru tootlikkusega 0,2—2,5 t/h; teist liiki katlad annavad küllastunud või ülekuumendatud auru temperatuuril $t=250^{\circ}\text{C}$ — 350°C ja toodavad auru 2,5—20 t/h; ülejäänud aurukatlad on määratud ülekuumendatud auru saamiseks ning ehitatakse tootlikkusega 4—20 t/h ja $t=435^{\circ}\text{C}$ (kolmas liik); 6,5—120 t/h ja $t=440^{\circ}\text{C}$ (neljas liik); 85—430 t/h ja $t=540^{\circ}\text{C}$ (viies liik); 210—480 t/h ja $t=570^{\circ}\text{C}$ (kuues liik); 640 t/h ja $t=570^{\circ}\text{C}$ ning vaheülekuumendus kuni $t=570^{\circ}\text{C}$ (seitsmes liik). Kõrgema rõhuga katlad ehitatakse väljaspool nimetatud standardi.

Jooksva seitseaastakul ehitatavate ja projekteeritavate elektriyaamade jaoks, millede võimsus on 1 000 000 kW ja üle selle, töötatakse välja ja ehitatakse katelagregaadid rõhkudele 140, 240 ja 310 at vastavalt auru temperatuuridega 570, 580 ja 655°C ning auru tootlikkusega kuni 1800 t/h. Iga niisugune katel varustab üht turbiini, moodustades bloki «katel-turbiin». Taganrogi katlatehas juba ehitas katelagregaadi tootlikkusega 430 t/h parameetritel 140 at ja 570°C . Küttepindade paigutus on tehtud vene П tähe sarnaselt. Sama tehase on hakanud valmistama katlaid (joon. 61 a) tootlikkusega 500 ja 640 t/h samadel auruparameetritel bloki jaoks turbiinidega vastavalt 150 000 kW ja 200 000 kW. Erinevalt eelnevast on aga need katlad projekteeritud Т tähe kujuliselt. Niisuguse konstruktsiooni korral on ülekuumendi (osaliselt) ning õhu- ja vee-eelsoojendid paigutatud sümmeetriliselt kahte gaasikäiku kummalegi poole kollet.

Viimase kahe katla kolded erinevad nendest, mida vaadeldi eespool. Erinevus seisneb selles, et nende kolle on jaotatud kaheks pooleks torudest vaheseinaga, mis on lülitatud katla üldisesse katlavee tsirkulatsioonisüsteemi. Need torud võtavad kiirgussoojust vastu mõlema koldepoole leegilt, ja on saanud nimetuse kahepoolne ekrään. Podolski katlaehitustehas valmistas samade auruparameetritega otsevoolu-katla tootlikkusele 640 t/h blokis töötamiseks turbiiniga 200 000 kW. Valminud on projekt katlale 710 t/h rõhule 310 at ja temperatuurile 655°C ning valmis-

tatakse projekte kateldele 900 ja 1800 t/h rõhule 240 at ja 580° C. Nende katelde ehitamisega tõuseb NSV Liidu soojusenergeetika uuele kõrgemale tasemele.

Seega ehitatakse Nõukogude Liidus mitut tüüpi katlaid selleks, et rahuldada elektrijaamade ja kommunaal- ning tööstusettevõtete vajadusi. Nõukogude katlaehituse iseärasus seisab kõrge ökonoomsusega ja suure tootlikkusega katelseadmete loomises madalasordiliste suure niiskuse ja tuha sisaldusega kütuste kasutamiseks. See nõukogude katlaehituse suund on loomulikult tingitud NSV Liidu kütusepoliitikast, mis arvestab nende kütuste laialdasemat kasutamist elektrijaamades.

Seoses gaasi ja naftatootmise arenemisega NSV Liidus löid katlaehitustehased rea mitmesuguse tootlikkusega katelde tüüpe gaasi ja masuudi kütmiseks ning nende hulgas ka katlaid, millised on ette nähtud lahtistes jõujaamades kasutamiseks, s. o. sarnastes jõujaamades, kus täielikult või osliselt puuduvad jõujaama hooned.

Nõukogude suurkatelde ehituse teine iseloomulik joon seisab selles, et luuakse uusi katelde tüüpe, mida saab pärast, juba varem ettenähtud ümbertegemistega kohandada töötamiseks teisele kütuseliigile. Mõned niisugused nn. kütuse jaoks unifikatsioonid standardised katlatüübid valmistati elektrijaamade tarvis.

Katla töö tähtsamat külge — tema ökonoomsust — määratakse tavaliselt soojusbilansist; selles on üksikud soojuse kulu liigid näidatud eraldi osadena kogu soojusest, mis eraldub põlemisel. Ainult see osa soojusest, mida nimetatakse kasulikuks soojuseks, antakse edasi töötavale kehale, s. t. kasutatakse vee muutmiseks auruks antud parameetritel. Ülejäänud osa soojust moodustab kaod.

Kasulikku soojust võib kergesti arvutada järgmiste arutluste põhjal.

Soojuse andmine töötavale kehale toimub jääval rõhul; seega on valemi (26) järgi 1 kg aurule antud soojuse hulk võrdne katlast väljuva auru entalpia i_a ja katlasse tuleva toitevee entalpia i_v vahega. Kui katlalt saadava auru hulk on D kg/h, siis kasuliku soojuse hulk

$$Q_1 = D(i_a - i_v) \text{ kcal/h.} \quad (65)$$

See soojus saadakse kütuselt. Kui kütuse kulu on B kg/h ja kütteväärtus Q_k^f , siis kogu soojuse hulk, mis eraldub põlemisel, moodustab BQ_k^f kcal/h. Kuid kogu soojust ei anta aurule, sest katelseadmes esineb mitmesuguseid soojuskadusid.

Tavaliselt on soojuskadude hulgas kõige suurem osa tähtsus soojuskaol lahkuvate suitsugaasidega. Kuumad gaasid, mis tekivad põlemisel, uhtunud küttepindu, lahkuvad katlast veel küllalt kõrgel temperatuuril, mis suurtes elektrijaamades on tavaliselt $120\text{--}140^\circ\text{C}$. Selle temperatuuri edasist alandamist katla küttepinna suurendamise teel (viimases suitsukäigus asetsevad katla küttepindu nimetatakse järelküttepindadeks) ei loeta kasulikuks, sest soojendava ja soojendatava keha temperatuuride vahe on väike ja katla ehituseks kuluva metalli kulu tõuseks erakordselt suureks. Peale selle võiks lahkuvate suitsugaaside temperatuuri ülemäärane alandamine põhjustada suitsugaasis sisalduva veeauru ja väävlisgaasi kondenseerumise, mis kutsuks esile katla järelpindade korrodeerumise. Seepärast soojus, mida oleks võidud saada, kui gaasid oleksid oma väljumistemperatuurilt jahutatud välisõhu temperatuurile, moodustab kao. Seda nimetatakse kaoks lahkuvate suitsugaasidega ning tähistatakse Q_2 . Suurtes elektrijaamade kateldes moodustavad kaod lahkuvate suitsugaasidega $5\text{--}8\%$ üldisest soojuse hulgast, mis võib eralduda kütuse põlemisel.

Soojuse kadu esineb ka koldes kütuse põletamisel. Põlemise reaktsioon võib areneda nii, et põlemissaadustesse jääb põlevaid gaase, näiteks süsihapendit ehk vingugaasi CO. See tuleb sellest, et koldes valitseb õhupuudus või õhk seguneb halvasti põlevate elementidega. Sel põhjusel saamata jäänud soojust nimetatakse kaoks keemiliselt puudulikust põlemisest, mida tähistatakse Q_3 . Puudulik põlemine võib esineda ka sel põhjusel, et väikesed põlemata kütuse osakesed kantakse kas heitegaasidega katelseadmest välja või osaliselt viiakse kaasa šlakiga ja varisevad läbi resti koos tuhaga. Sellel põhjusel tekkinud soojuse kadu nimetatakse kaoks mehaaniliselt puudulikust põlemisest ja tähistatakse Q_4 . Elektri jaamades suurtes kolletes, olenevalt kütuse sordist ja selle põletamise viisist, moodustab $Q_3=0\text{--}1,5\%$ ja $Q_4=1\text{--}4\%$.

Soojuse kadusid põhjustab lõppeks ka see, et katla välispiirete temperatuur on kõrgem kui ümbritseval keskkonnal ja ta annab soojust ära nii konvektsiooni kui ka kiirguse teel. Seda kadu tähistatakse Q_5 ja nimetatakse jahtumiskaoks. Elektriyaamade suurtel kateldel on see kadu täiskoormusel 0,3—0,8%.

On ilmne, et võetud tähistuste puhul võib katla soojusbilanssi väljendada järgmise võrdusega:

$$BQ_k^t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \text{ kcal/h.} \quad (66)$$

Kuikateliseadme kasutegurit tähistada tähega η_k , mille all mõeldakse katlas töötavale kehale antud soojuse Q_1 suhet kogu soojusesse, siis

$$Q_1 = BQ_k^t \eta_k. \quad (67)$$

Võrrutades valemid (65) ja (67), võime kirjutada:

$$D(i_a - i_v) = BQ_k^t \eta_k. \quad (68)$$

Võrrand (68) kujutab enesest kateliseadme soojuslikku põhivõrrandit. Selle järgi arvutatakse töötava katla η_k , kui kütuse kulu B ja katla poolt toodetud auru hulk D on katselisel teel määratud; projekteeritavale katlale arvutatakse selle kaudu kütuse kulu, kui auru tootlikkus on ette antud ja katseliste andmete kaudu on teada kasutegur η_k .

Kasuteguri määramiseks saame võrrandist (68) valemi

$$\eta_k = \frac{D(i_a - i_v)}{BQ_k^t}. \quad (69)$$

Katelde ekspluateerimine nõukogude elektriyaamades on saavutanud suure täiuslikkuse. Heades elektriyaamade katlamajades ulatub kasutegur 88—92%.

Neil juhtudel, kui katlad toodavad ühe ja samasuguste parameetritega auru ja kasutavad üht ja sama kütust, võib katelde omavaheliseks võrdlemiseks kasutada palju lihtsamat näitajat kui kasutegur, ja nimelt kütuse aurustusarvu I :

$$I = \frac{D}{B} = \frac{\text{kg auru tunnis}}{\text{kg kütust tunnis}}. \quad (70)$$

See suurus näitab, millisel hulgal saadakse auru, kui koldes põletatakse 1 kg kütust.

Kui katlad kasutavad erinevaid kütuseid ja annavad erinevate parameetritega auru, siis arvutatakse kütuse kulu ümber tingkütusele, kasutades valemit (50), ning katlast saadud aur viiakse üle niinimetatud normaalaaurule, mille all mõistetakse auru soojussisaldusega 640 kcal/kg. Selleks arvutatakse valemi (65) järgi katlas aurule antud soojuse hulk, jagatakse see arvuga 640 ja saadakse katla normaalauru tootlikkus D_n :

$$D_n = \frac{D(i_a - i_v)}{640} \text{ kg/h.} \quad (71)$$

Normaalauru aurustusarv 1 kg tegeliku kütuse kohta on:

$$I_{n.teg} = \frac{D_n}{B_{teg}} = \frac{D(i_a - i_v)}{640 B_{teg}}. \quad (72)$$

Normaalauru aurustusarv 1 kg tingkütuse kohta määratakse valemiga:

$$I_{n.ting} = \frac{D_n}{B_{ting}} = \frac{D(i_a - i_v)}{640 B_{ting}}. \quad (73)$$

Kui katlad kasutavad üht ja sama kütust, kuid toodavad erinevate parameetritega auru, siis võib aurustusarvu määrata tegeliku kütuse suhtes.

21. Vesi ja selle ettevalmistamine katelde toitmiseks

Soojuselektrijaama töösüklis teeb vesi tavaliselt läbi ringprotsessi; seega peaks veehulk tsükli kestel jääma püsivaks. Tegelikult ei ole see aga nii, sest osa vett (2–3%) läheb kaduma aurukatelde läbipuhumisel, auruna abi- ja majanduslikkudeks otstarveteks ning samuti ebatiheduste kaudu, ning seda kadumaläinud veeposa tuleb täiendada. Eriti suured veekaod (kuni 50%) esinevad nendes elektrijaamades, mis annavad soojust välistele tarbijatele kütteks ning tehastele ja vabrikutele tehnoloogiliseks otstarbeks.

Oma ringkäigu erinevates osades on vee kvaliteet

(koostis) erinev ning sellest olenevalt omab ka eri nime-tusi. Veevarustuse allikast (jõgi, tiik, meri) võetud ja veel ettevalmistamata vett nimetatakse tooreks veeks. Pärast ettevalmistust (keemilist või termilist), kui vett kasutatakse kadude täiendamiseks, nimetatakse seda lisa-veeks. Lisavesi ning kondensaat turbiinist ja välistelt tar-bijatelt tulevad kokku toitepaaki. See segu saadetakse katla toiteks ja seda nimetatakse toiteveeks. Katlas see seguneb sealoleva veega ning soojuse juurdejuhtimisel aurustub. Katlas keevat vett nimetatakse katlaveeks.

Toores vees, ehk nagu seda ka nimetatakse, loodus-likus vees leidub palju mitmesuguseid lahustunud ja lahustumatuid (mehaanilisi) lisandeid. Lisandite olemas-olu üle teatud normi tekitab vee soojendamisel ja keemisel soojust halvasti juhtiva katlakivi kihi küttepindadel, kutsub esile vee vahutamise katla trumlis ning soolade kaasaminekū auruga.

Katla torude seinte metall katlakivi olemasolu puhul kuumeneb üle, tema tugevus langeb ja see toob enesega kaasa ohtlikkudel juhtudel torude vigastused — välja-paisumised ja praod. Koos sellega põhjustab ta katlast väljuvate gaaside temperatuuri tõusu ja ühtlasi kütuse ülekulu. Lisandite olemasolu vees mõjutab ka auru-ülekuumendi ja turbiini tööd.

Katlavee piiskadega kaasaviidud soolad sadestuvad ülekuumendi seintel kui ka auruturbiini läbidatel, mistõttu tekib vigastusi ülekuumendi torude seintel; ja ahenevad auru läbivooluavad ning väheneb turbiinide võimsus ja ökonoomsus. Lahustunud gaaside (hapniku, süsihappe-gaasi jt.) olemasolu vees põhjustab katla metalli ja torus-tiku korrosiooni. Võib öelda, et pooled elektrijaamades ettetulevad avariid ja äpardused on põhjustatud toitevee režiimi rikkumisest. Seepärast on elektrijaama personali tähtsamaks mureks eemaldada veest kahjulikke lisandeid ning viia nende sisaldus eksploatatsioonis lubatud nor-mini. Soojusjõujaamades on lisavee valmistamiseks vee-puhastusseadmed.

Vee omaduste näitajate hulgas on üks tähtsamaid vee üldine karedus, mis iseloomustab temas lahustunud kaltsiumi- ja magneesiumisooli.

Veel võrdlemisi hiljuti mõõdeti karedust leppelise ühi-kuga, mida nimetati kareduse kraadiks ja tähis-tati (°). Ühes liitris vees sisalduvat 10 mg (milligramm=

= $\frac{1}{1000}$ g) kaltsiumoksüüdi (CaO) või 7,19 mg magneesiumoksüüdi (MgO) vastas 1° karedusele.

Käesoleval ajal on kareduse ühikuks võetud niisugune karedus, mille juures 1 liiter vett sisaldab 28 mg kaltsiumoksüüdi või 20 mg magneesiumoksüüdi. Kumbki neist kogustest kujutab enesest selle aine ekvivalentk aalu¹ ja, olles väljendatud milligrammides, nimetatakse milligrammekvivalentiks. Seega on üldkareduse mõõtühikuks 1 milligrammekvivalent ühes liitris vees (tähistatakse 1 mg-ekv/l), kusjuures

$$1 \text{ mg-ekv/l} = 28 \text{ mg/l CaO};$$

$$1 \text{ mg-ekv/l} = 20 \text{ mg/l MgO}.$$

Ei ole raske teha kindlaks sidet vana ja uue karedusühiku vahel. Ilmselt on

$$1 \text{ mg-ekv/l} = \frac{28}{10} = \frac{20}{7,19} = 2,8^\circ$$

ehk

$$1^\circ = \frac{10}{28} = \frac{7,19}{20} = 0,356 \text{ mg-ekv/l}.$$

Väikeste kareduste mõõtmiseks kasutatakse ühikuna mikrogrammekvivalenti liitri kohta (tähistatakse $\mu\text{g-ekv/l}$), mis moodustab ühe tuhandiku ühest mg-ekv/l. Seega on

$$1 \text{ mg-ekv/l} = 1000 \mu\text{g-ekv/l}.$$

Vahel kasutatakse ka suuremat kareduse mõõtühikut — grammekvivalenti liitri kohta (1 g-ekv/l), kusjuures

$$1 \text{ g-ekv/l} = 1000 \text{ mg-ekv/l}.$$

Vett loetakse pehmeks, kui selle üldkaredus on 1,1—3,5 mg-ekv/l (~ 4 — 10°) ja kõvaks, kui üldkaredus on 7 mg-ekv/l (20°) ja üle selle.

Kaltsiumi ja magneesiumi mitmesugustele sooladele mõjub vee soojendamine erinevalt. Mõned neist (näiteks süsihappesoolad ehk bikarbonaadid) lagu-

¹ Nii nimetatakse keemilise ühendi molekulkaalu jagatist tema valentsiga (valents määrab vesinikuaatomite arvu, mis ühinevad antud elemendiga, või vesinikuaatomite arvu, mis ta vahetab antud ühendis). Kuna kaltsiumi aatomkaal on 40, magneesiumil 24, hapnikul 16, ning magneesiumi ja kaltsiumi valents on 2, siis kaltsiumoksüüdi 1 mg-ekv = $\frac{40+16}{2} = 28$ ning magneesiumoksüüdi

$$1 \text{ mg-ekv} = \frac{24+16}{2} = 20 \text{ mg}.$$

nevad juba soojendamisel; saadud ühendid moodustavad katlakivi või sadenevad pureda kõntsase sademena, mida nimetatakse mudaks ehk slammiks. Vee karedust, mida määratakse nende soolade kaudu, nimetatakse karbonaatseks kareduseks. Teised kaltsiumi- ja magneesiumisoolad moodustavad keetmisel katlakivi; see toimub siis, kui vee aurustumisel nende soolade kontsentratsioon kasvab ja vesi muutub nendest küllastunuks. Karedust, mida määravad kaltsiumi ja magneesiumi viimati mainitud soolad, nimetatakse mittekarbonaatseks kareduseks.

Karbonaatse ja mittekarbonaatse kareduse summa moodustab vee üldkareduse.

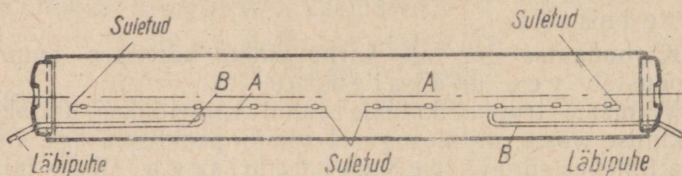
Võimsate trummelkatelde puhul võideldakse katlakivi tekkimise vastu mitmesugusel viisil, peamiselt aga lisatava toitevee sügava pehmemdamisega. Üheks laialt levinud pehmemduse meetodiks on vee filtreerimine läbi eriliste ainete — kationiitide; seejuures annab vesi katlakivi moodustavad lisandid ära ning saab nende asemel kergestilahustuvad ained, mis sadestuvad välja mudana. Kationiidina kasutatakse sulfosütti; nii nimetatakse eriliselt töödeldud kivisütti; samaks otstarbeks kasutatakse ka mõningaid kunstvaike. Niisuguste ja keerukamate kationeerimise skeemidega, mida eriti kasutatakse kõrgendatud ja kõrgrõhukatelde juures, saavutatakse peaaegu täielik lisatoitevee pehmemdamine, nii et jääkkaredus on 0,007—0,011 mg-ekv/l, s. o. 7—11 µg-ekv/l (~0,02—0,03°).

Kuid sellest ei ole veel küllalt. Katlakivi moodustavad lisandid võivad sattuda katlasse ka lisatoitevee kõrvalt ja nimelt jahutusveega läbi kondensaatori ebatiheduste ning kondensaadiga soojuse välistest tarbijatest. Nende katlakivi moodustavate ainete vastu võideldakse sel teel, et kontrollitakse kondensaatorite tihedust ja lisatakse katla trumliisse fosforhapunaatriumi sooli. Astudes reaktsiooni katlasse tunginud lisanditega, moodustavad nad ühendid, mis on katlast kergesti eemaldatavad (mudana). Neil juhtudel, kui välistarbijad annavad tagasi madalakvaliteetset kondensaati, tuleb seda pehmemdada.

Sedamööda, kuidas vee keemisel tekib auru, suureneb ka katla vees soolade-sisaldus; see võib põhjustada vee vahutamise trumli. Aur, viies enesega kaasa väikesel hulgal katlavett, viib kaasa ka selles leiduvaid sooli ning

mõned soolad lahustuvad aurus. Selle tagajärjel halveneb katlas toodetud auru kvaliteet. Auruga kaasaminevate soolade hulk on seda suurem, mida rohkem sisaldab katla-
vesi sooli.

Et vältida liigset soolade kogunemist, eemaldatakse pidevalt trumlist osa vett, mis sisaldab palju sooli. Nagu juba oli öeldud, nimetatakse seda katla läbipuhumiseks. Läbipuhumine toimub trumli nendest kohtadest,



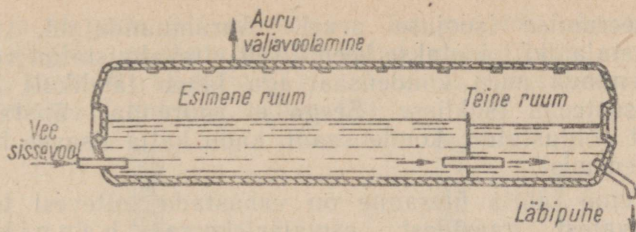
Joon. 62. Veekogumistorud aurukatla trumlis.

A — läbipuhutava vee kogumistorud; B — väljapuhetorud

mis on küllalt kaugel toitevee sissevoolukohtadest, selleks ülesseatud veevõtutorudest, nagu näidatud joonisel 62. Läbipuhutava vee hulk elektrijaamades moodustab 1%, kuid ulatub mõnes katlas kuni 5—7% katla toiteveest. Et läbipuhutava vee temperatuur on kõrge, siis võetakse tarvitusele abinõud selle soojust ära kasutamiseks.

Peale pideva läbipuhumise tuleb soolade eemaldamiseks katlast eemaldada ka muda. Selleks toimub katla alumisest osast ja ekraanitorude kollektoritest perioodiline muda väljapuhumine 1—2 korda vahetuses.

Selleks et vältida soolade kaasainemist auruga, s. o. et parandada auru kvaliteeti, kasutatakse mitmesuguse konstruktsiooniga mehaanilisi separeatoreid, mille ülesandeks on takistada veetiljade kaasainemist auruga, mis läheb katla trumlist aurülekuumendisse. Peale selle on auru kvaliteedi parandamiseks NSV Liidus välja töötatud originaalne meetod niinimetatud astmeliseks vee aurustamiseks aurukatlas; selle meetodi põhimõte seisab selles, et katla trummel on jaotatud vaheseinaga kaheks osaks (joon. 63). Toitevesi tuleb esimesse osasse; teist osa toidetakse esimesest osast, mis saab nagu intensiivsema sisemise läbipuhumise; väljapuhumine toimub ainult teisest osast. Katla niisuguse toitmise orga-



Joon. 63. Katla trummel vaheseinaga vee astmeliseks aurustamiseks.

niseerimisega väheneb katlatrumli esimeses osas soolade sisaldus. Kuna suurema osa auru eraldumine toimub katla esimeses osas, siis on antud juhul auru kvaliteet parem kui nendes kateldes, kus aurustumine ei toimu astmeliselt.

Neil juhtudel, kui vesi peale karedussoolade sisaldab naatriumi- või räni sooli, kasutatakse kõrgetel ja ülikõrgetel parameetritel töötavates elektrijaamades niinimetatud keemilist sooladeeraldamist koos räni eraldamisega. Saadud lisatoitevesi läheneb oma puhtuselt kondensaadile ja seda võib kasutada kõrgrõhu katelde toiteks.

Kui toorvesi sisaldab väga suurel hulgal sooli, ja kui mingil muul põhjusel ei saa lubada toitevee keemilist töötlemist (näiteks otsevoolumkatelde puhul — vt. punkt 20), võetakse kasutamisele põhimõttelt teised lisavee töötlemismeetodid. Lisavei aurustatakse niinimetatud aurustajates rõhul, mis küünib ainult mõne atmosfäärini. Saadud aur kondenseeritakse ja kondensaat, mis on puhas lisanditest, saadetakse katla toiteks. Soolad jäävad sel puhul aurustajasse ja eemaldatakse sellest läbipuhumise abil. Selleks et tagada aurustaja küttepindadele vajalikku puhtust, toidetakse seda keemiliselt ettevalmistatud veega. Seega ei lange aga elektrijaamades veepehmenusseadmed ära, vaid muutuvad ainult lihtsamaks, sest aurustajad ei esita toitevee kvaliteedi suhtes nii ranget nõudeid.

Sel juhul kui välised tarbijad kasutavad suurel hulgal auru ega anna kondensaati tagasi, kasutatakse niinimetatud aurumundajaid. Nendes valmistatakse tarbijale vajalik aur elektrijaama turbiinist võetava aurukon-

denseerumise soojuse arvel. Aurumuundajaid, nagu aurustajaidki toidetakse keemiliselt ettevalmistatud veega, soojendava auru kondensaati aga läheb täielikult katla toitesüsteemi tsüklisse. Seega ei suurenda välistarbija poolt põhjustatud kondensaadi kadu katla lisavee hulga suurenemist.

Teine tähtis ülesanne on vabastada toitevesi temas leiduvatest gaasidest, esmajärjekorras hapnikust ja süsihappegaasist. Need gaasid, astudes metallidega keemilisse ühendusse, söövitavad metalli. Söövitusprotsessi — korrosiooni — all kannatavad elektrijaama kõik pea- ja abiseadmete metallpinnad, mis puutuvad kokku degaseerimata vee või auruga.

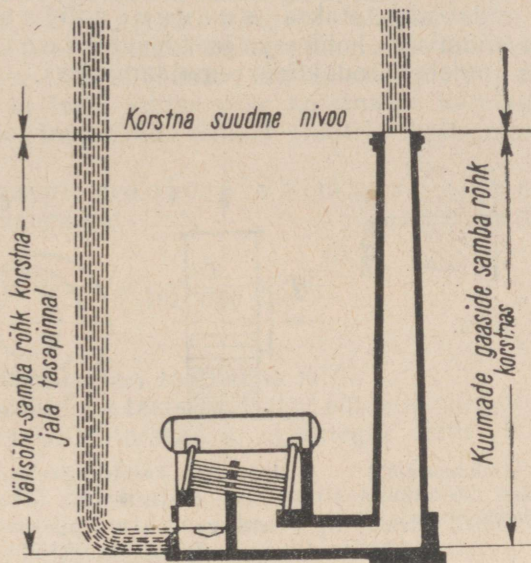
Gaasidest puhastatud vesi neelab õhust kergesti hapnikku ja süsihappegaasi. Seepärast peab elektrijaama kogu veesüsteem olema hermeetiliselt kinnine. Vees olevate gaaside eemaldamiseks kasutatakse deaeraatoreid. Termilisel deaereerimisel kuumutatakse vesi deaeraatoris keemistemperatuurini; seejuures on vee lahustunud gaasidel võimalus eralduda vee kohal olevasse ruumi, kust gaasid eemaldatakse. Käesoleval ajal kasutatakse suurtes elektrijaamades deaeraatoreid, mis töötavad peaaegu atmosfäärirõhu lähedasel rõhul või kuni 3—6 at surve all; viimastes kuumutatakse vesi kuni 130—160° C. Lisabinõuna kasutatakse vahel ka hapniku keemilist eemaldamist spetsiaalsete reagentide abil või lastes vett läbi filtri, mis on täidetud teraslaastudega.

22. Tõmbeseadmed, armatuur, kontroll-mõõteriistad

Koldesse tulev õhk ja kütuse põlemisel tekkinud gaasid kohtavad oma liikumisel takistusi. Suurt takistust avaldab õhule ka kütusekiht, millest õhk peab koldesse tulekul läbi minema. Selleks et ületada neid takistusi ja anda liikuvatele gaasidele vajalikku kiirust, tuleb luua gaaside liikumistekonnal rõhkude vahe.

Rõhkude vahet võib tekitada kõigepealt korstnaga, nagu näidatud joonisel 64. Korstna suudme tasapinnal on atmosfääri rõhk igal pool ühesugune, kuid maapinnal katla uste ees ja korstna sisemuses on rõhk aga erinev, sest külma õhu samba kaal on suurem kui kuumadel gaasidel korstnas. Seega on baromeetiline rõhk kat-

lamaja põranda pinnal kõrgem kui gaaside absoluutne rõhk koldes; nende rõhkude vahet, nagu teada, nimetatakse kolde hõrenduseks; kateldes nimetatakse seda hõrendust tõmbeks (joon. 65).



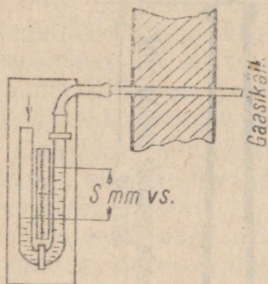
Joon. 64. Loomulik tõmme, mis tekitatakse korstna abil.

Tõmbe mõjul voolab õhk läbi ukse tuharuumi, ületab kütusekihi takistuse ning liigub seejärel pärast põlemisprotsessist osavõtmist suitsugaaside näol gaasikäikudes edasi korstna suudme poole. On ilmne, et mida kõrgem on gaaside ja mida madalam õhu temperatuur ning mida pikem on korsten, seda suurem on tõmme. Kui S on tõmme, H — korstna pikkus meetrites, γ_{δ} ja γ_g — õhu ja gaaside erikaalud kg/m^3 , siis

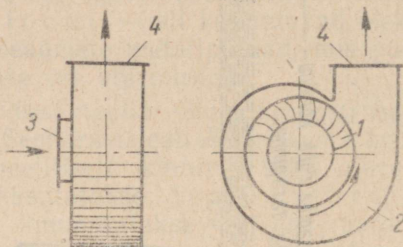
$$S = H(\gamma_{\delta} - \gamma_g). \quad (74)$$

Valitud mõõtühikute korral on S ühikuks kg/m^3 ; kuna rõhk kg/m^2 võrdub 1 mm kõrguse veesamba rõhuga, siis saadud S väärtust ja koos sellega ka tõmme mõõdetakse veesamba kõrgusega millimeetrites.

Elektrijaamade suurte katelde jaoks, mis on suurte mõõtmetega ja millel on suur takistus, ei piisa korstna poolt tekitatavast tõmbest. Selleks et niisugustes kateldes organiseerida õhu ja gaaside liikumist, kasutatakse erilisi masinaid, mida nimetatakse surveventilaatoriteks (õhu andmiseks koldesse) ja tõmbeventilaatoriteks (põlemisproduktide eemaldamiseks).



Joon. 65. Hõrenduse mõõtmine lõõris U-kujulise tõmbemõõtjaga.



Joon. 66. Tsentrifugaalventilaatori skeem.

1 — labadega ketas; 2 — kest; 3 — imemisava; 4 — surveava.

Ventilaatorist väljuva õhu rõhk on atmosfääri rõhust kõrgem ja seepärast nimetatakse ventilaatori poolt tekitatud rõhkude vahet ülerõhuks; tõmbeventilaator, nagu korstengi, tekitab hõrenduse, seepärast nimetatakse tõmbeventilaatori poolt tekitatud hõrenduste erinevust tõmbeks.

Ventilaator (tõmbeventilaator joon. 66) koosneb ketast 1, millele on külge kinnitatud labidad, ja kestast 2. Kesta küljes on imitoru 3 ja survetoru 4. Ketas on kinnitatud völliile, mis pannakse pöörlema elektrimootoriga energia arvel, mida viimane saab elektrivõrgust. Ketta pöörlemisel tekitatakse imitoru juures hõrendus, mille tõttu gaasid (väljast õhk või suitsulõõrist põlemissaadused) voolavad imitorusse ja sealt edasi labidatevahelisse ruumi ning väljuvad ventilaatorist survetoru kaudu. Surveventilaatoril voolab imitorusse õhk, ning survetoru kaudu, mis on ühendatud torustiku abil aurukatla õhu-eelsoojendiga, läheb seejärel viimasest kuum õhk põle-

titesse, veskisse (tolmkütte korral) või restide alla (kihis-põletamise korral). Surveventilaatori ühendusskeem on näidatud joonisel 67. Tõmbeventilaatori imitoru ühendatakse (joon. 68) katla suitsukäigu alumise osa külge (õhu eelsoojendi taha), survetoru aga — korstnajalga. Tõmbeventilaator peab suitsukäikudega olema niiviisi ühendatud, et vajaduse korral saaks tõmbeventilaatorit siibritega eraldada, ja lasta suitsu otse korstnasse katelagregaadi töötamiseks loomulikul tõmbel (näiteks katla sissekütmisel).

Ventilaatori mootori võimsust võib arvutada järgmise valemiga:

$$N = \frac{VS}{102 \cdot 3600 \eta} \text{ kW}, \quad (75)$$

kus

V on ventilaatori tootlikkus m^3/h ;

S — arvutuslik takistus, kg/m^2 ehk mis võrdub mm vs. ;

η — ventilaatorseadise kasutegur, mis võib olla 0,5—0,85.

Aurukatla normaalseks töötamiseks ja töö järele valmistamiseks on vaja rida seadmeid ja riistu. Nendeks seadmeteks on katla armatuur ja kontrollmõõteriistad (vene k. КИП).

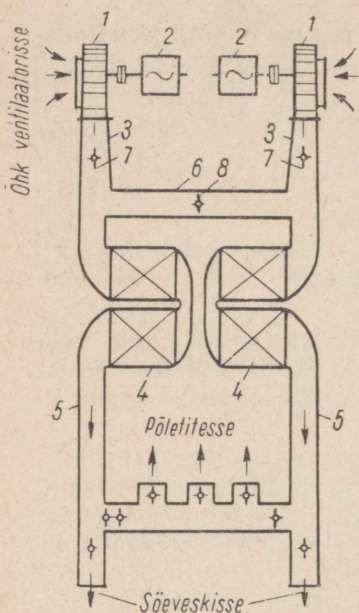
Rõhku katlas mõõdetakse manomeetriga (joon. 7), mis on katlatrumliga ühendatud kolmekäigulise kraani abil, et oleks võimalik ühendada kontrollmanomeetrit. Manomeetri skaalale on kantud punane joon, mis näitab antud katla lubatud piirrõhku.

Manomeetrid asetatakse ka auruülekuumendile ja vee-eelsoojendile ehk ökonomaiserile.

Et rõhk ei saaks tõusta üle lubatava, on iga katel varustatud vähemalt kahe kaitseklapiga, mis avanevad automaatselt ja lasevad liigse auru atmosfääri, kui rõhk katlas ületab lubatud piiri.

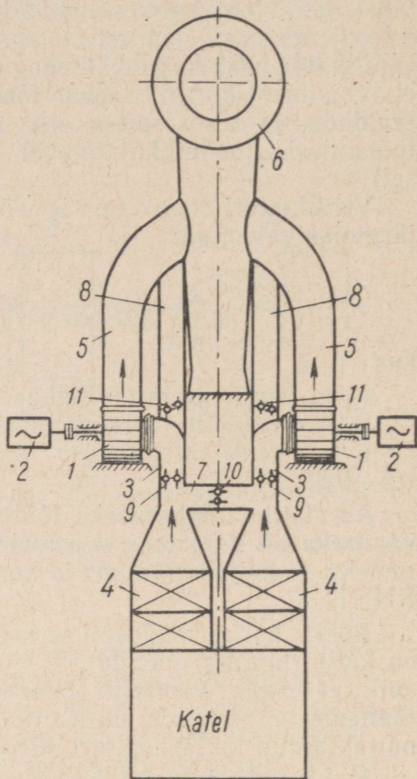
Igale toitetorustikule asetatakse katla ette sulgventiil ja tagasilöögiklapp; esimene on katla eraldamiseks toitemagistraalist, teine ei lase vett voolata tagasisuunas, ja on selleks, et hoida vett katlas juhul, kui toitetorustikus rõhk langeb. Tagasilöögiklapi järelevaatuse võimaldamiseks asetatakse sulgventiil sellest trumlile (või ökonomaiserile) lähemale, nagu näidatud jooni-

sel 69. Koos sellega on ka skeemil kujutatud võimalus vee-eelsoojendi (ökonomaiseri) väljalülitamiseks, mis saavutatakse ventiilide 1 ja 4 sulgemisega.



Joon. 67. Katelagregaadi ventilaatoriseadme skeem.

1 — ventilaatorid; 2 — elektrimootor; 3 — külma õhu torud; 4 — õhuelsoojendi; 5 — kuuma õhu torud; 6 — ülevoolu õhutoru; 7 ja 8 — drosselklapid.

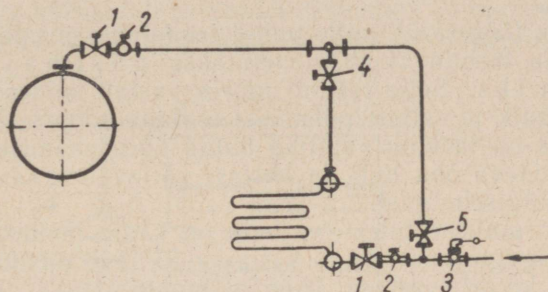


Joon. 68. Katelagregaadi tõmbeadme (kahe ventilaatoriga) skeem.

1 — tõmbeventilaatorid; 2 — elektrimootorid; 3 — suitsukäigud; 4 — õhuelsoojendi; 5 — suitsukäigud; 6 — korsten; 7 — suitsu ülejuhtimistoru; 8 — otselõõr; 9, 10 ja 11 — drosselklapid.

Katla veepinna taseme jälgimiseks on veeseisuklaas kolme kraaniga, millest esimene on ühendamiseks veeruumiga, teine — ühendamiseks aururuumiga ja kolmas veeseisuklaasi läbipuhumiseks.

Peale veeseisuklaasi on katla trummel vahel varustatud ka kahe proovikraaniga, millest üks on ühendatud aururuumiga, teine veeruumiga. Veeseisuklaasi purunemise korral saab katlatrumlis oleva vee taseme määramiseks kuni uue klaasi panemiseni kasutada proovikraane.



● Joon. 69. Katla toiteskeem.

1 — ventiil; 2 — tagasilöögiklapp; 3 — reguleerimisklapp;
4 ja 5 — ümberlülitamise ventiilid.

Katelagregaadi eraldamiseks auruvõrgust peab ta olema varustatud sulgventiili või siibriga. Selleks et katlast eemaldada muda ja suure soolade kontsentratsiooniga vett, on katla kollektori ja trumli külge paigutatud läbipuheventiil. Peale selle on katel varustatud eraldi väljalaskearmatuuri ga, et eemaldada katlast vett remontide puhul.

Katla töö jälgimiseks on üles seatud mitmesugused kontrollmõõteriistad (КИП), millede hulka kuuluvad termomeetrid ja termopaarid auru, vee ja gaaside temperatuuri mõõtmiseks mitmesugustes kohtades, tõmbemõõtjad tõmbe mõõtmiseks gaasikäikudes, gaasianalüsaatorid, aurumõõtjad, veemõõtjad jt. Mõned mõõteriistad on varustatud seadmetega näitude automaatselt üleskirjutamiseks paberile.

23. Katelagregaadi automaatse reguleerimise printsiibid

Aurukatla ülesanne on anda püsiva rõhu ja temperatuuriga auru võimalikult ökonoomselt, ning hulgal, mille määrab aurutarbija koormus, mis võib olla väga muutlik.

Katla töörežiimi, mille puhul toodetakse nii palju auru kui palju tarbija vajab, nimetatakse püsijäänud režiimiks. Selle režiimi juures vastab koldesse antud kütuse hulk ja sellest põlemisel eralduv soojuse hulk sellele, mis on tarvilik vajaliku hulga auru saamiseks. Koldesse mineva õhu hulk ja katlast väljuvate gaaside hulk oleneb kütusehulgast.

Kui trumlisse tulev vee hulk on kaalu poolest võrdne auru hulgaga, mis lahkub katlast, siis jääb püsijäänud režiimi korral veetase trumlis muutumatuks. Püsivaks jääb katlas ka auru rõhk, mis on võrdne selles katlas normaalse aururõhuga.

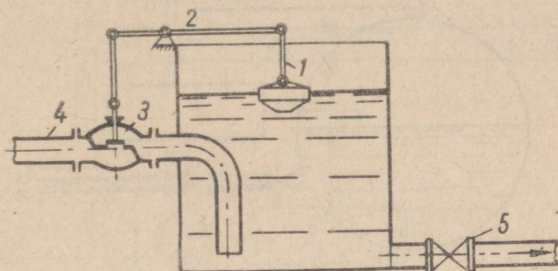
Kui tarbija hakkab võtma auru rohkem, kui toodab katel, siis on püsijäänud režiim rikutud. Rõhk katlas ja vee tase trumlis hakkavad langema. Selleks et olukorda taastada, peab kütja põlemise koldes viima vastavusse suurenenud aurutarbimisega. Selleks suurendab ta kütuse ja selle põlemiseks vajalikku õhuetteannet, suurendab tõmmet ja toitevee etteannet katlatrumlisse. Pärast kõiki neid abinõusid võtab veetase katlas oma endise seisu, auru rõhk katlas tõuseb ja katla töörežiim muutub uuesti püsivaks. Katla režiimimuutus võib toimuda ka vastupidises suunas — auru võtmine katlast võib väheneda. Nii toimub katla töö käsitsi reguleerimine.

Püüe asendada inimese töö, kus see võimalik, mehhanismide ja masinate tööga, sundis looma katelagregaatide automaatse reguleerimise, mille juures katla töörežiimi muutmine toimub rea automaatselt töötavate seadmete abil.

Katelseadmete automaatse reguleerimise esimeseks ülesandeks on töötingimuste kergendamine. Niisuguse keeruka agregaadi juures, nagu seda on katel, asendatakse automaatse reguleerimise korral inimese pingeline töö automaatse reguleerimise süsteemi elementide töötamise järele valvamisega. Teenindava personali arv vähe-

neb, millel NSV Liidu tormiliselt areneva tööstuse tingimustes on väga suur tähtsus.

Käsitsi reguleerimisega võrreldes tõstab automaatne reguleerimine agregaaadi ökonoomsust ja vähendab avarii võimalusi, sest automaatne reguleerimine mõjutab agregaaadi režiimi kiiremini ja täpsemalt kui käsitsi reguleerimine ning kõrvaldab personali eksimuste võimalused katla režiimi ootamatul muutmisel või avarii likvideerimisel.



Joon. 70. Reservuaari täitmise reguleerimise skeem.

1 — ujuk; 2 — hoob; 3 — reguleeriv klapp; 4 — toiteliin;
5 — siiber.

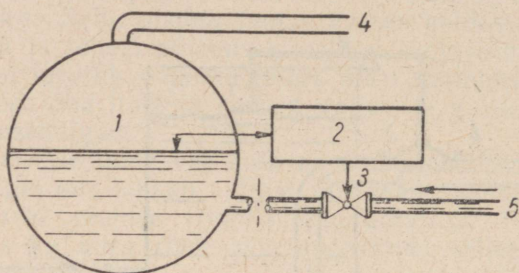
Automaatreguleerimine nõuab teenindavalt personalilt kõrgemat kvalifikatsiooni ja tõsist asjatundlikkust, ning seepärast selle sisseseadmine elektrijaamadesse soodustab kultuurilise taseme tõusu ja seega ka füüsilise ja vaimse töö olulise vahe likvideerimist.

Trummelkateldes on automaatse reguleerimise süsteem korraldatud kolme üksteisest konstruktiivselt sõltumatu regulaatoriga. Nendeks on ülekuumendatud auru temperatuuri, põlemisprotsessi ja katla toitevee regulaatorid.

Lihtsaim skeem mingi reservuaari veega toitmise reguleerimiseks on toodud joonisel 70. Selles on 1 — ujuk, mis muudab oma asendit paagis oleva vee taseme muutumisel; 2 — hoob, mis annab toime (impulsi) edasi reguleerivale klapile 3; 4 — toru, millest vesi voolab paaki; 5 — siiber torustikul, millest toimub vee väljavool paagist.

Kui vee väljavool siibri 5 kaudu suureneb, siis langeb koos vee tasemega ka ujuk 1, mis põhjustab sellega klapi 3

tõusu ja koos sellega vee paaki voolamise intensiivistumise ja veetaseme taastumise. Vee väljavoolu vähenemisel läbi siibri 5 ujuk 1 tõuseb, klapp 3 laskub allapoole ja seetõttu vee tase taastub. Trummelaurukateldes ei kasutata vee taseme impulsi edasiandmiseks ujukit. Tavaliselt on ujuki asemel teised seadmed, kuid üldiselt antakse ikkagi impulss veepinnalt klapile, millega muudetakse klapi läbivoolu-ristlõiget. Joonisel 71 on näidatud trummelkatla



Joon. 71. Üheimpulsilise toiteregulaatori skeem.

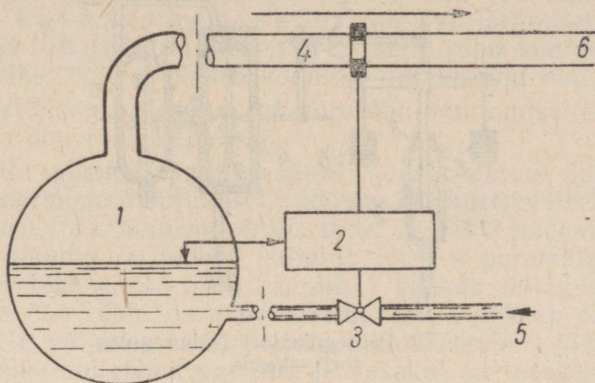
1 — katla trummel; 2 — toiteregulaator; 3 — toiteklapp; 4 — aur katlast; 5 — toiteliin.

toitel kasutatava niinimetatud üheimpulsilise reguleerimise skeem. Sellel on nooltega näidatud impulsside suunad. Põhiliselt vastab joonis 71 eelnenud skeemile. Auru kulu ja vee juurdevoolu bilansi rikkumise puhul antakse vee muutuva taseme toime edasi reguleerijale ja sellelt edasi toiteklapile.

Vee taseme muutumised trumlis olenevad suurel määral sellest, kui suur on trumlis vee maht; muutumised toimuvad seda kiiremini, mida väiksem on vee maht.

Nagu kogemused on näidanud, võib üheimpulsilisi reguleatoreid edukalt kasutada kateldes, millede trumli vee maht on suur ja millede tootlikkus on väike. Suure tootlikkusega ja väikese veemahuga trumliga kateldel ei piisa üheimpulsilisest reguleerijast ning seepärast lisatakse sellele veel üks reguleerijale mõjuv impulss — nimelt katla aurukulu. See impulss saadakse järgmisel viisil. Kui torustikku asetada diafragma, mille keskel olev ava on väiksema läbimõõduga kui toru läbimõõt, siis auru voolamisel on rõhk diafragma ees kõrgem kui selle taga. Seejuures on rõhkude vahe seda suurem, mida rohkem

auru läbib toru. Seega iseloomustab rõhkude vahe torust läbi voolava auru kogust ja võib olla impulsiks regulaatorile. Joonisel 72 on näidatud kaheimpulsilise toiteregulaatori skeem; nagu näha, saab toiteregulaator kaks impulssi — vee tasemelt ja aurutorule ülesseatud diafragmalt. Need impulsid liidetakse ja vee juurdeandmine järgneb koormuse muutumisele täpsemalt kui üheimpulsilise regulaatori puhul.



Joon. 72. Katla kaheimpulsilise toiteregulaatori skeem.

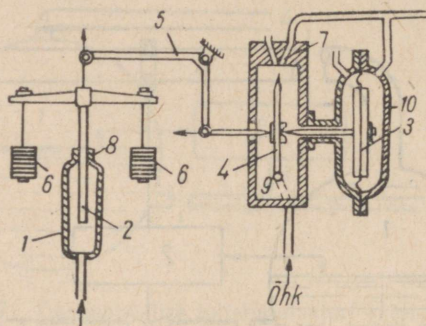
1 — katla trummel; 2 — toiteregulaator; 3 — toiteklapp; 4 — aur katlast; 5 — toiteliin.

On olemas keerukamaid ja koos sellega ka täpsemaid reguleerimise viise, mille puhul regulaatorile saadetakse impulss ka vee hulgalt, mis saadetakse katla trumliisse. Ka siin kasutatakse rõhu muutumist vee voolamisel läbi diafragma, mis on üles seatud katla trumli toititorustikule. Kolmas impulss saadetakse samuti regulaatorile ja liidetakse kahe teise impulsi.

Järgmine tähtis lõik on koldes kütuse põlemise protsessi reguleerimine. Põlemine peab püsima jäänud režiimil toimuma selliselt, et eraldunud soojuse hulk oleks just küllaldane katelagregaadis auru tootmiseks, mida vajab antud momendil tarbija. Selleks on vaja koldesse anda teatud koguses kütust ja õhku ning eemaldada katla gaasikäikudest põlemisel tekkivad põlemisgaasid — suitsugaasid. Kui põlemisprotsessil eraldunud

soojuse ja auru kulu vahel ei ole õiget proportsiooni, siis muutub katlas esmajärjekorras aururõhk.

Siit järeldub, et põlemisprotsessi juhtiv regulaator peab saama impulsi, kui auru rõhk katlas muutub. Niisugust regulaatorit nimetatakse rõhu- ehk pearegulaatoriks. Niiviisi nimetatakse teda sellepärast, et temalt omakorda saadetakse impulsid kütuse regulaatorile ja õhuregulaatorile.



Joon. 73. Pearegulaatori (rõhuregulaatori) skeem.

1 — metallanum; 2 — varras; 3 — membraan; 4 — joatoru; 5 — hoob; 6 — raskused; 7 — kanal; 8 — anum; 9 — telg; 10 — anum.

Kirjeldatud toimimiste järjekord pole ainus; kasutada võib ka muud järjekorda.

Põlemisregulaatoreid on mitut liiki. Näitena vaatleme skemaatiliselt hüdraulilist süsteemi.

Pearegulaatori skeem on toodud joonisel 73. Rõhu muutumisel antakse impulss metallist anumasse 1 ning antakse edasi vardale 2, mis saab puksis 8 üles-alla liikuda. See impulss kantakse hoova 5 abil edasi joatorule 4, mis saab joonise tasapinnaga risti oleva telje 9 ümber pöörduda paremale ja vasakule. Joatorusse voolab õhk teatud ülerõhu all. See nõndanimeetatud komandeeriv õhk võetakse õhukanalist, mille kaudu õhku juhatakse koldesse; joatorust voolab õhk välja suure kiirusega. Joatoru suudme kohal asetseb kanal 7, kuhu tulebki komandeeriv õhk, kusjuures selle rõhk kanal 7 oleneb joatoru suudme asendist kanali 7 suhtes. Kui joatoru on kaldunud maksimaalselt paremale,

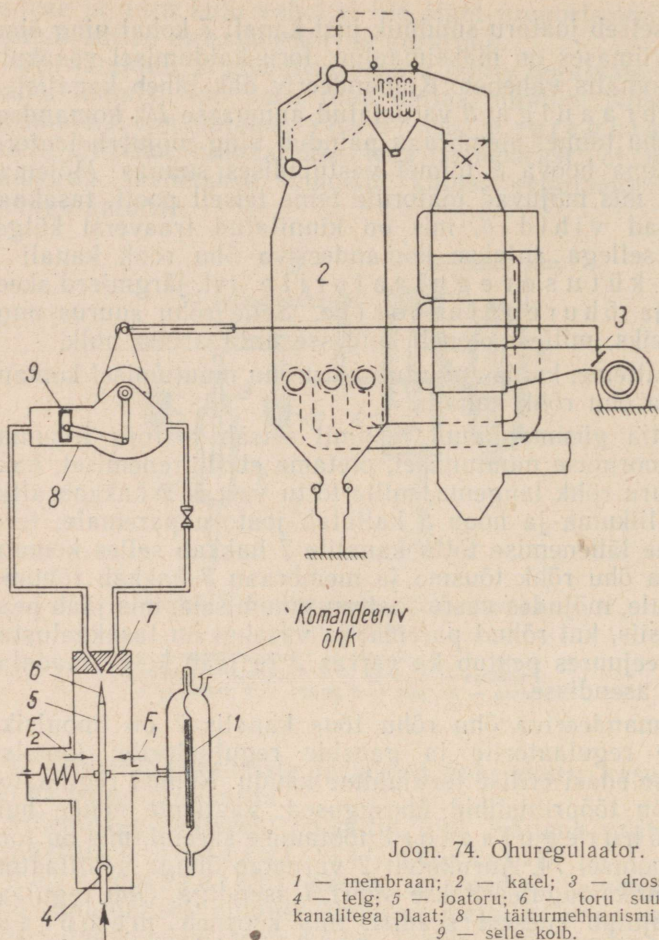
siis asetseb joatoru suudmik just kanali 7 kohal ning õhurohk viimases on maksimaalne; toru kaldumisel vasakule rõhk kanalis väheneb. Komandeeriv rõhk läheb kanalist 7 membraaniga 3 varustatud anumasse 10; komandeeriva õhu toimel membraan paindub ning mõjutab joatoru pöörduma hoova 5 toimel vastupidises suunas. Mõlemat jõudu, mis mõjuvad joatorule teine teiselt poolt, tasakaalustavad vihid 6, mis on kinnitatud traaversi külge. Koos sellega antakse komandeeriva õhu rõhk kanali 7 kaudu kütuse regulaatorile (vt. järgmised skeemid) ja õhuregulaatorile. Selle rõhu suurus ongi impulsiks, millest oleneb koldesse antava õhu hulk.

Vaatleme, kuidas muutub aururõhu muutumisel komandeeriva õhu rõhk kanalis 7.

Katla püsijäänud režiimil seisab joatoru liikumatult; koormuse muutumisel, oletame et suurenemisel, hakkab auru rõhk langema, mille tõttu varras 2 hakkab alla poole liikuma ja hoob 5 kallutab joatoru paremale; toru suudme lähenemise tõttu kanalile 7 hakkab selles komandeeriva õhu rõhk tõusma ja membraan 3 hakkab rõhuma vasakule, mõjudes vastu joatoru liikumisele, mis jääb peatuma siis, kui rõhud paremal ja vasakul on tasakaalustatud. Seejuures peatub ka varras 2 ja jääb kõige madalamasse asendisse.

Komandeeriva õhu rõhu tõus kanalis 7 on impulsiks kütuse regulaatorile ja gaaside regulaatorile; impuls antakse edasi erilise torujuhtme kaudu. Nendel regulaatoritel on tööprintsibid ühesugused; vaatleme nende hulgast õhuregulaatori töötamise skeemi, mis on toodud joonisel 74. Aurukatelt 2 varustab õhuga ventilaator. Õhu hulka reguleeritakse siibri 3 asendiga. Õhu regulaator kujutab enesest seadist, mis koosneb membraanist 1, joatorust 5 ja täiturmehanismist 8. Joatoru, nagu pearegulaatorgi, saab pöörduda ümber telje 4 paremale ja vasakule. Sellesse antakse eraldi pumba abil rõhu all 4—5 at õli, mis väljub torust suure kiirusega.

Katla püsima jäänud režiimil asetseb joatoru 5 membraani jõu toimel ühelt poolt ja vastavalt reguleeritud vedru toimel teiselt poolt keskmises asendis. Selle režiimi rikkumisel, näiteks auru rõhu vähenemisel katlas, suureneb, nagu juba öeldud, membraani kambrisse antava komandeeriva õhu rõhk ja membraan kaldub vasakule. Selle tõttu kaldub ka joatoru vasakule, lähe-



Joon. 74. Õhuregulaator.

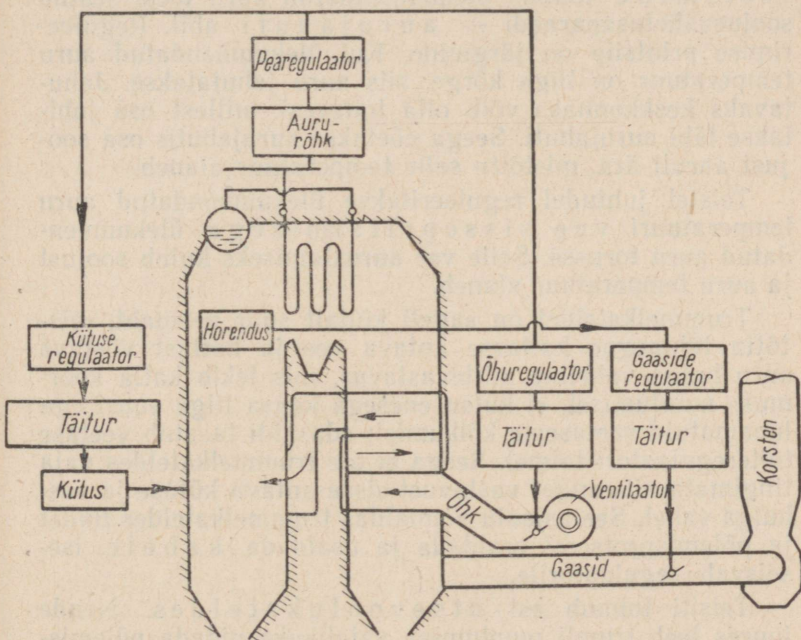
1 — membraan; 2 — katel; 3 — drosselklapp;
4 — telg; 5 — joatoru; 6 — toru suue; 7 —
kanalitega plaat; 8 — täiturmehhanismi silinder;
9 — selle kolb.

nedes seega vasakule kanalile plaadis 7 ja eemaldub parempoolses kanalist. See põhjustab täidesaatva mehhanismi 8 vasakpoolses ruumis rõhu tõusu ja parempoolses rõhu langemist; selle mõjul liigub kolb 9 paremale ja seab sellega sidestatud kangide süsteemi abil siibri 3 niisugusse asendisse, kus õhu juurdevool koldesse suureneb. Auru rõhu suurenemise puhul katlas hakkavad regulaatori elemendid liikuma vastupidises suunas. Reguleerimise protsess jätkub seni, kuni auru rõhk katlas on taastatud.

Suitsugaaside väljaimemine katlast toimub tõmbeventilaatori abil; selle töötamine peab olema niisugune, et säiliks vajalik hõrendus, ja nimelt 1—2 mm vs. kolde ülemises osas katla igasuguse koormuse puhul.

Suitsugaaside regulaator, erinevalt kütuse ja õhu regulaatorist, saab iseseisva impulsi kolde ruumi ülemise osa hõrenduselt.

Joonisel 75 on näidatud katlagregaadi põlemisprotsessi reguleerimise skeem tervikuna. Sellel on joonte ja nooltega näidatud, kust võetakse impulsid regulaatorite jaoks ja nende mõjumise suunad. Nagu skeemil näidatud, saadab ülekuumendist väljuva auru rõhk impulsi pearegulaatorile, milles komandeeriva õhu rõhk muutub, kusjuures ta auru rõhu vähenemisel suureneb ja, vastupidi, auru rõhu tõusmisel väheneb. Komandeeriv õhk tuleb kütuseregulaatorisse, mille jaoks on impulsiks komandeeriva õhu rõhu muutus. Selle impulsi toimel paneb kütuseregulaator töösse



Joon. 75. Katlagregaadi põlemisregulaatori skeem.

täidesaatva mehhanismi, mis omakorda mõjutab kütuse toiteseadist. Analoogilisel viisil mõjutab komandeeriv õhk ka õhuregulaatorit. Suitsugaaside regulaator, nagu juba oli öeldud, saab impulsi kolde hõrendusest.

Vaadeldud reguleerimissüsteem ei ole ainus. On olemas ka teisi süsteeme — elektromehaanilisi ja elektronsüsteeme. Impulsi edasiandmise viis katla aururõhult täiturmehhanismile ning täiturmehhanismid ise oma konstruktsioonilt on erinevad, kuid printsiip parameetrite muutumist kasutada impulssideks jääb endiseks. Neid süsteeme vaadeldakse erikursustes ja see nõuab elektrivoolu kasutamiseviiside tundmist mitmesuguste mehhanismide liikumapanemisel.

Kirjeldatud reguleerimisskeemide rakendamise määravad kütuse põlemisprotsessi iseärasused. Kõige lihtsamalt toimub põlemise reguleerimine vedelate ja gaasiliste kütuste puhul. Kõige keerukam on reguleerimine tahkete kütuste kasutamise korral, eriti kihispõletamisel.

Ülekuumendatud auru temperatuuri reguleerimine toimub ülekuumendatud auru teele seatud soojusvahetusaparaadi — aurujahuti abil. Reguleerimise printsiip on järgmine. Kui ülekuumendatud auru temperatuur on liiga kõrge, siis auru jahutatakse. Jahutavaks keskkonnaks võib olla toitevesi, millest osa juhitakse läbi aurujahuti. Seega võetakse aurujahutis osa soojust aurult ära, mistõttu selle temperatuur alaneb.

Teistel juhtudel reguleeritakse ülekuumendatud auru temperatuuri vee sissepritsimisega ülekuumendatud auru torusse. Selle vee aurustamiseks kulub soojust ja auru temperatuur alaneb.

Trummelkateldel on sageli küllalt suur veemaht, mistõttu lühiaegne katlasse antava vee ja katlast võetava auru hulga vaheline mittevastavus, mis tekib katla koorumuse muutumisel, ei kutsu enesega kaasa liiga suuri ega lubamatuid veetaseme kõikumisi; edaspidi taastub veetase toiteregulaatori toimel. Seega ei ole trummelkateldes vaja tingimata nii ranget vastavust sisse antava kütuse ja vee hulga vahel. See asjaolu võimaldas trummelkateldes toidet ja põlemisprotsessi eraldada ja usaldada kahele iseseisvale regulaatorile.

Teisiti toimub asi otsevoolukateldes. Nende juures teeb trumli puudumine vajalikuks pidada põlemisprotsess ja katla toitmine ranges vastavuses. Otsevoolu-

katelde eksploatatsiooni kogemused näitavad, et katla koormuse ja koldesse antava kütusehulga õige vahekorra puhul isegi väike hälvimine katla toites põhjustab ülekuumendatud auru temperatuuri viivitamatu muutuse. Seepärast toimub otsevoolukateltes kütuse ja vee sisseandmise sidestatud reguleerimine rõhuregulaatori toimel. Kuna aga rõhu muutumine oleneb katla koormusest, siis reguleeritakse sellega katla koormuse ja veega toitmise vahekorda ainult ligikaudselt. Täpsemaks reguleerimiseks võetakse impulss auru temperatuuri muutumisest, millega täiendavalt reguleeritakse kas ainult kütuse sisseandmist või ainult katla toitmist. Peale selle on eraldi regulaatorid õhu ja tõmbe jaoks. Ülekuumendatud auru veelgi täpsemaks reguleerimiseks kasutatakse ühtlasi ka vee sissepiserdamist pärast ülekuumendit.

KOLMAS PEATÜKK

SOOJUSJÕUMASINAD

24. Soojusjõumasinate liigitus töötava keha ja tööprintsibi järgi. Sisepõlemismootorid

Soojusjõumasinateks nimetatakse masinaid, milles kütuse põletamisel saadud soojusenergia muudetakse mehaaniliseks energiaks. Soojusjõumasinad liigitatakse töötava keha ja selle tööprintsibi järgi masinas, viimasest oleneb masina konstruktiivne lahendus.

Soojusjõumasinates on töötav keha gaasilises olekus, sest et gaas võib muuta suurtes piirides mahtu ning mahu muutmisel, nagu oli öeldud 6. punktis, tehakse tööd.

Gaasilist töötavat keha võib saada kahel printsiipiaalselt erineval viisil. Ühel juhul toimub kütuse põlemine masina sees, ning tekkinud põlemissaadused on masinas töötavaks kehaks. Teisel juhul põleb kütus väljaspool masinat aurukatla koldes. Katlas muudetakse vesi veeauruks ja saadetakse torujuhtmeid mööda masinasse.

Oma füüsikaliselt loomuselt on need kaks gaasilist keha teravalt erinevad. Põlemissaadusi on raske vedelasse olekusse viia ja seepärast võib neid vaadelda kui ideaalseid gaase, s. t. rakendada nende kohta Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lyssac'i seadusi. Katlast saadav veeaur, vastupidi, läheb jahutamisel uuesti vedelasse olekusse, mistõttu teda ideaalse gaasina vaadelda ei saa. Niisuguses olekus olevat gaasilist keha nimetatakse reaalseks gaasiks, ja eespool mainitud seadusi tema kohta rakendada ei tohi. Arvutusi, mis on seotud veeauru kui

töötava kehaga soojusjõumasina-tes, tehakse punktis 9 kirjeldatud tabelite ja diagrammide järgi.

Nii on siis soojusjõumasina-tes töötavateks kehadeks ideaalne gaas (põlemissaadused) või veeaur.

Nii üks kui teine töötav keha omab pärast tekkimist palju kõrgema rõhu ja temperatuuri kui ümbritsev keskkond, ning nad mõlemad on võimelised tegema tööd; järelikult omavad nad potentsiaalset energiat.

Töötava keha potentsiaalset energiat võib muuta masina võlli pöörlevaks mehaaniliseks energiaks mitmesugusel viisil. Ühel juhul tuleb töötav keha silindrisse, milles liigub kolb, ja paisub siis. Paisumistöö antakse edasi kolvile, mis vântmehhanismi abil on ühendatud mootori vântvõlliga. Nii tekib võlli pöörlemise mehaaniline energia, mis kasutatakse ära elektrigeneraatoris või mõnes muus masinas. Masina kolb liigub edasi-tagasi, s. o. liigub vahelduvalt kord ühes, kord teises suunas. Töötav keha heidetakse pärast paisumist atmosfääri või suunatakse uuesti ringprotsessi. Kirjeldatud masinat nimetatakse kolbmasinaks.

Kolbmasinas on töötavaks kehaks ideaalne gaas või veeaur. Kui töötavaks kehaks kasutatakse ideaalset gaasi, siis nimetatakse masinat sise põlemismootoriks. Niisuguse nimetuse on ta saanud seepärast, et kütuse põlemine toimub mootoris eneses. Kui töötavaks kehaks kasutatakse veeauru, siis nimetatakse seda masinat aurumasinaks.

Töötava keha potentsiaalset energiat võib kasutada ka mõnel teisel teel. Düüsidest väljavoolamisel, nagu seda oli seletatud joonise 1 kirjelduses, muutub potentsiaalne energia gaasilise keha liikumise kineetiliseks energiaks, mis antakse edasi masina võllile kinnitatud ketta küljes olevate labidate labadele. Labidate liikumine põhjustab võlli pöörlemise. Kirjeldatud masinat nimetatakse turbiiniks (ladinakeelsest sõnast turbo — ringliikumine).

Kui töötavaks kehaks kasutatakse ideaalset gaasi, siis nimetatakse niisugust mootorit gaasiturbiiniks, ning veeauru kasutamise korral — auruturbiiniks.

Rohkem erinevad kirjeldatutest niinimetatud reaktiivmootorid. Nendes on töötavaks kehaks kütuse põlemissaadused. Potentsiaalne energia muudetakse siin, nagu turbiinideski, liikumise kineetiliseks energiaks, mida

ei kasutata aga pöörleva, vaid kulgeva liikumise saamiseks, näiteks lennukil, raketil, autol jne.

Arutletu põhjal võime koostada soojusjõumasinate jaoks järgmise tabeli:

Töötav keha	Masina tüüp		
	Kolbmasin	Turbiin	Reaktiivmootor
Ideaalne gaas	Sisepõlemismootor	Gaasiturbiin	Reaktiivmootor
Veeaur	Aurumasin	Auruturbiin	—

Sisepõlemismootorid töötavad vedela või gaasilise kütusega.

Kasutatavateks vedelkütusteks on esmajärjekorras naftasaadused: bensiin, petrooleum, soolaarõli, masuut. Kõigil neil kütustel on oma eraldi klassifikatsioon, ja olenevalt omadustest kasutatakse neid erinevates masinates. Vedelkütuseid saadakse ka mõnedest tahke kütuse sortidest (vt. punkt 17).

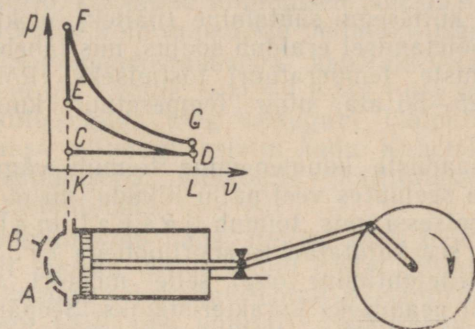
Vedelkütuse tähtsaks omaduseks, mille järgi neid kõigepealt eristatakse, on nende auruvus. Mõned neist — bensiin ja petrooleum — auruvad madalal temperatuuril kergesti ja seepärast on mootori töötamiseks vajaliku küttesegu, s. o. kütuse aurude ja õhu segu valmistamine võimalik väljaspool mootori silindrit. See väline segumoodustamine toimub mootori erilises seadmes — karburaatoris. Mootoreid, mis kasutavad niisugust segu valmistamise viisi, nimetatakse karburaatormootoriteks.

Raskestiauruvad kütusesordid vajavad aurustumiseks kõrgemaid temperatuure; selleks protsessiks soodsamat olukorda võib luua mootori silindri sees, kus toimubki aurustumine; niisugust segu valmistamise viisi nimetatakse sisemiseks segumoodustamiseks.

Küttesegu valmistamise viis mõjustab suurel määral mootori konstruktsiooni. Välise segumoodustamisega mootoreid kasutatakse nende suhteliselt kerge kaalu tõttu kergel transport- ja veoseadmetel (lennuk, auto, traktor). Sisemise segumoodustamisega mootorid on konstruktsioonilt raskemad ja neid on seepärast soodsam kasutada stat-

sionaarsetes seadmetes ja laevadel. Kuid viimastel aastatel on sisemise segumoodustamisega mootoreid hakatud kasutama ka mõnedel transpordiseadmetel.

Vaatleme protsessi, mis toimub välise segumoodustamisega mootori silindris. Algul võtame mootori silindris toimuvaid keerukaid nähteid lihtsustatud kujul, et pöörata tähelepanu mootori töötamise printsiibile; seega vaatleme mootori töötamist teoreetiliselt, s. o. vaatleme teda nn. ideaalse masinana.



Joon. 76. Sisepõlemismootori ringprotsess soojuse juurdejuhtimisega jääval mahul.

Joonisel 76 on toodud niisuguse mootori silindri elementaarne skeem, ning selle kohal lihtsustatud diagramm rõhu muutumisest gaasi mahu muutumisel silindris.

Kui kolb oma esimesel käigul liigub paremale, siis voolab silindri kaanele paigutatud sisselaskeklapi A kaudu silindrisse küttesegu — õhk koos kütuse aurudega.

Rõhk silindris on seejuures peaaegu püsiv ning mahu muutumine kolvi ja silindri kaane vahel moodustab diagrammil joone CD. Kui kolb jõuab äärmisesse parempoolsesse asendisse, siis klapp A sulgub. Seejärel hakkab kolb liikuma paremalt vasakule ja surub seejuures küttesegu kokku. Kokkusurumine toimub küllalt kiiresti ja teoreetiliselt vaatlemisel võib eeldada, et soojuse vahetust gaasi ja silindri seina vahel ei toimu. Teisiti öeldes, võib oletada, et kokkusurumine toimub adiabaatiliselt. Seejuures tõuseb rõhk 6—12 ata, ning temperatuur kuni

400—600° K. Komprimeerimisprotsess toimub diagrammil joont *DE* mööda. Kui küttesegu algmahtu tähistada V_1 ning mahtu pärast kokkusurumist V_2 , siis algmahu suhe lõppmahusse näitab seda kui mitu korda vähenes küttesegu maht kokkusurumisel. Seda suhet nimetatakse survestmeksi ja tähistatakse kreeka tähega ϵ , nii et

$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2}. \quad (76)$$

Kui kolb on jõudnud äärmisesse vasakpoolsesse asendisse, siis toimub küttesegu süütamine (näiteks elektrisädemega). Segu põletamisel eraldub soojus, mis läheb tekkivate põlemissaaduste temperatuuri tõstmiseks. Rõhk tõuseb seejuures 25—50 ata, ning temperatuur kuni 2000—2300° K.

Põlemissaaduste kuumenemine toimub väga kiiresti. Kolb ei jõua seejuures veel palju liikuda, nii et seda võib võtta kui protsessi, mis toimub jääval mahul. Diagrammil on see kujutatud isokoorijoonega *EF*. Niisugune soojuse juurdejuhtimine ongi selle mootori töötamisel ringprotsessi peamiseks karakteristikaks. Seepärast nimetataksegi seda tsükli ringprotsessiks soojuse juurdejuhtimisega jääval mahul (ehk kiire põlemisega mootori tsükliks).

Edasiselt paisub gaas *adibaadi* järgi (joon *FG*), ja kolb liigub jälle vasakult paremale. Kui kolb jõuab äärmisesse parempoolsesse seisule, avaneb väljalaskeklapp *B* ja gaasid lahkuvad silindrist; seejuures langeb rõhk suuruseni, mis vastab punktile *D*. Seejärel hakkab kolb liikuma paremalt vasakule ja tõukab silindrisse jäänud gaasid välja.

Kui kolb on jõudnud oma vasakpoolsesse äärmisesse asendisse, lõpeb tsükkel ja võib alata uuesti.

Kogu tsükli kestel läbib kolb teekonna kaks korda vasakult paremale ja kaks korda paremalt vasakule, s. o. kokku neli käiku, ehk nagu öeldakse, neli takti. Niisugust mootorit nimetatakse neljaktiiliseks. Kõigist neljast taktist saadi tööd ainult ühe, kolmanda ajal, mis pani kolvi liikuma ja vääntvõlli pöörlema. Ülejäänud kolme takti ajal liigub kolb aga hoorattaga varustatud vääntvõlli pöörlemise varal. Hoortasse on salvestatud mehaanilist energiat eelmisest tsüklist, või teiste silindrite

kolbide töö arvel, mis on ühendatud sama vääntvõlliga. Mõnikord toimub põlevgaasi sisselaskmine ja heitgaaside väljapuhumine erilise pumba abil, mille ülesanne seisab selles, et tõugata kiiresti välja põlemissaadused ja täita silinder värske seguga. Siis langevad ära iseseisvad sisselasketaktid ja põlemissaaduste väljalasketaktid, ning mootor muutub kahetaktiliseks. Neljataktilises mootoris toimub tsükkel vääntvõlli kahe pöörde kestel, kahetaktilises ühe pöörde kestel. Seetõttu on kahetaktilised mootorid, kui muud tingimused jääksid samaks, peaaegu kaks korda võimsamad kui neljataktilised.

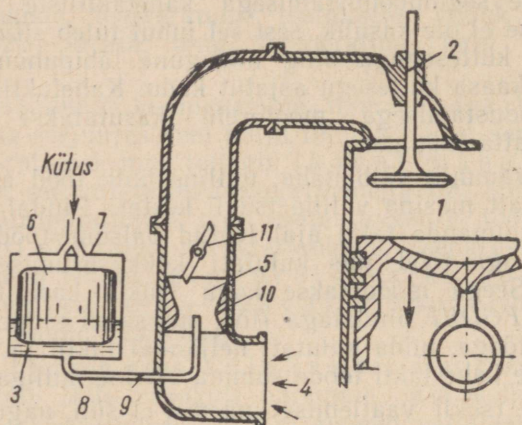
Välise segumoodustamisega kahetaktiliste mootorite ehitamine ei ole kasulik, sest sel juhul tuleb silindrid läbi puhuda kütteseguga ning niisugune läbipuhumine toob endaga kaasa küttesegu asjatut kadu. Kahetaktilisi välise segumoodustamisega mootoreid kasutatakse mõnedel mootorratta tüüpidel.

Diagrammilt võib näha, milline hulk tööd anti tööta-
valt kehalt masina võllile tsükli kestel. Pindala *KFGLK* näitab kolmanda takti ajal tehtud paisumistööd, pindala *EDLKE* aga tööd, mis kulutati kokkusurumiseks teisel taktil. Seega mõõdetakse kogu tsükli kasulikku tööd kujundi *FGDEF* pindalaga (töö, mis saadi esimesel taktil, võrdub tööga, mida kulutati neljandal taktil ja seepärast on nende kahe takti tööde summa võrdne nulliga).

Selle tsükli vaatlemisel näeme, et siin, nagu Carnot' ringprotsessiski, *mõõdetakse töötava keha poolt mootoris tehtud tööd tsükli poolt kujutatud diagrammi pindalaga.*

Nagu oli mainitud, valmistatakse kirjeldatud mootoris küttesegu väljaspool mootorit — karburaatoris. Vaatleme lihtsat karburaatorit (joon. 77), mis on määratud töötama mootoril, mille pöörete arv on püsiv. Toodud skeemil on: 1 — osa mootori silindrist koos kolviga; 2 — mootori sisselaskeklapp; 3 — karburaatori ujukiruum; 4 — õhu sissevool; 5 — karburaatori segukamber; 6 — ujuk, mille küljes on nõelklapp. Ujuki ülesandeks on hoida bensiini tase ujukiruumis püsival kõrgusel. Nõelklapp suleb augu 7, kui bensiini juurdevoolu ujukikambrisse on vaja katkestada, ja avab selle, kui ujukiruumi on vaja bensiiniga täita. Ujukiruum ja segukamber on ühendatud toruga 8, millel on kalibreeritud ava ehk düüs 9. See toru suubub teise torusse, mille ristlõige on ahenev kohas 10, mida nimetatakse segukoonuseks.

Seisva mootori puhul bensiini torust 8 välja ei voola, sest selle ots ulatub segukambris natuke kõrgemale kui bensiini tase ujukiruumis. Mootori töötamisel, kui kolb liigub alla, voolab õhk segukoonusesse, läbib selle aheneva ristlõike suure kiirusega ning tekitab toru suudme kohal hõrenduse. Bensiin hakkab torust välja voolama, haaratakse õhuga kaasa, pihustatakse ja aurustub. Avatud klapi kaudu voolab saadud küttesegu mootori silindrisse. Segu hulka reguleeritakse seguklapi 11 asendi muutmisega.



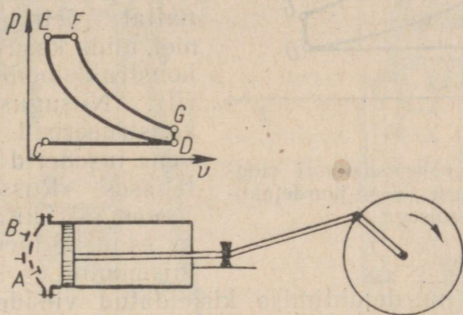
Joon. 77. Lihtsaim karburaator.

1 — mootori silinder ühes kolviaga; 2 — mootori sisselaskeklapp; 3 — karburaatori ujukiruum; 4 — õhu sissevool; 5 — segukamber; 6 — õõnes ujuk nõelklapiga; 7 — bensiini sissevool; 8 — toru; 9 — düüs; 10 — segukoonus; 11 — klapp.

Vaatleme nüüd teist sisepõlemismootorit (joon. 78), mille iseloomustavaks tunnuseks on soojuse juurdevool töötavale kehale j ä v a l r õ h u l.

Kolvi liikumisel vasakult paremale ei imeta sellises mootoris läbi imemisklapi *A* sisse mitte küttesegu, vaid õhku (joon *CD*). Kui kolb jõuab äärmisesse parempoolsesse seis, siis sisselaskeklapp sulgub ja järgmisel taktil, kui kolb liigub paremalt — vasakule, surutakse õhk kokku (joon *DE*). Seejuures tõuseb rõhk 30—40 ata ning temperatuur kuni 800—900° K. Kolmanda takti alguses avaneb pihusti, et sisse lasta kütust. Vedel kütus pihusta-

takse silindrisse ja süttib siin iseenesest. Seejuures kandub eraldunud soojus põlemissaadustele, mistõttu nende temperatuur tõuseb kuni $1700\text{--}1900^\circ\text{K}$; kütust juhitakse sisse teatud aja vältel ja ta põleb järk-järgult; selle järgi nimetataksegi seda tsüklit ringprotsessiks soojuse juurdejuhtimisega jääval rõhul (aeglase põlemisega mootorite tsüklik). Diagrammil on see osa kolmandast taktist kujutatud sirgega EF , mis on paralleelne abstsissiteljega. Punktis F lõpeb kütuse sisse-

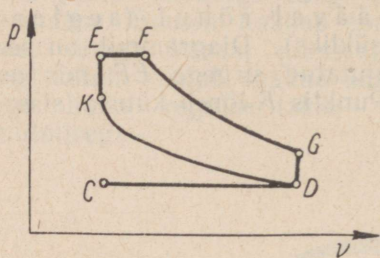


Joon. 78. Sisepõlemismootori ringprotsess soojuse juurdejuhtimisega jääval rõhul.

andmine ja gaasid paisuvad ilma töötavalt kehalt soojust ära juhtimata, s. o. edasine paisumine kolmanda takti ajal toimub teoreetiliselt adiabaaati mööda; diagrammil on see kujutatud joonega FG . Kui lõpeb kolmas takt, siis avaneb väljalaskeklapp B ja gaasi rõhk langeb järsku atmosfäärirõhuni; see on diagrammil kujutatud joonega GD . Järgmisel kolvi liikumisel paremalt vasakule, s. o. neljanda takti ajal, toimub silindrist põlemissaaduste väljatõukamine (joon DC). Nii lõpeb kirjeldatud tsükkel. Ka siin võib laadimiskompressori kasutusele võtmisega nelja takti asemel toime tulla kahe taktiga.

Sisemise segumoodustamisega mootorid on just sobivad kahetaktilistena, sest nende läbipuhumine toimub õhuga. Seda tüüpi väga kiirekäigulised mootorid ehitatakse aga neljataktilistena, sest kahe takti kestel ja suure pöörlemiskiiruse puhul ($1500\text{--}3000$ p/min) on kahetakti mootorit raske korralikult läbi puhuda ja silindrit õhuga täita.

Kirjeldatud tsükli järgi töötavaid mootoreid nimetatakse diiselmootoriteks oma konstruktori insener Rudolf Dieseli järgi, kes esitas selle ringprotsessi ja võttis osa niisuguse mootori esialgse konstruktsiooni väljatöötamisest.

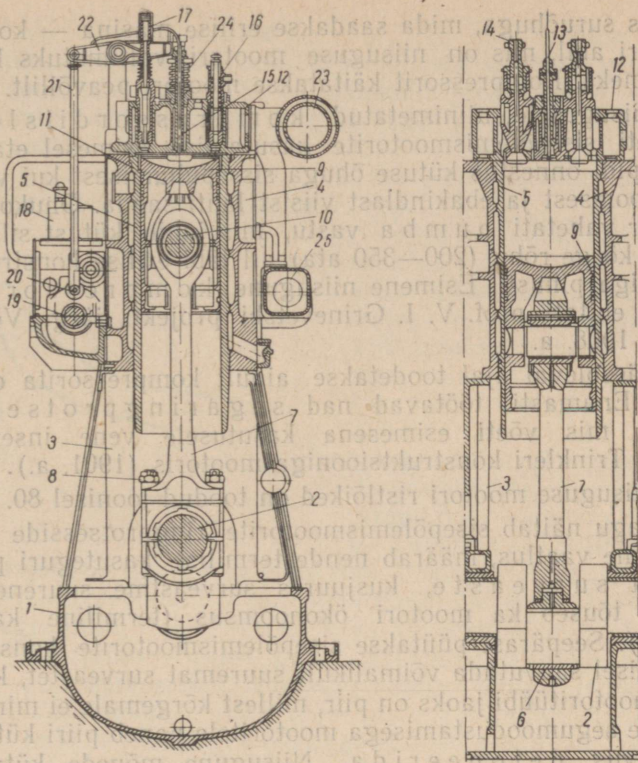


Joon. 79. Sisepõlemismootori ringprotsess soojuse sega-juurdejuhtimisega.

Edasisel konstruktiivsel arendamisel saadi sisepõlemismootor, mis töötab küllalt ökonoomselt ja kasutab kütuseks toornaftat (petrooleumi asemel, mida kasutati esialgse konstruktsiooniga mootoril). Niisuguse mootori konstrueerisid esimestena vene insenerid aastal 1899 tehases «Russki Diisel». Venemaal ehitati 1908. a. ka esimene laeva sisepõlemismootor.

Soojuse juurdejuhtimise kirjeldatud viiside üksikasjaline võrdlemine näitab, et soojuse juurdejuhtimine jääval mahul on kütusekulu seisukohalt kasulikum kui soojuse juurdejuhtimine jääval rõhul; kuid nagu jooniselt on näha, tõuseb niisugusel soojuse juurdejuhtimisel järsult rõhk. Seepärast hakati diislites kasutama mõlemat moodust ja organiseeriti soojuse juurdevool järgmiselt: algul toimub see jääval mahul, ja kui rõhk tõuseb niisuguse väärtuseni, millest üle minna ei ole soovitatav (45—60 ja vahel ka 160 ata), siis jätkatakse soojuse juurdejuhtimist jääval rõhul. Saadud ringprotsessi nimetatakse segaringprotsessiks. Niisugune ringprotsess on kujutatud joonisel 79. Sellel on endiselt CD — õhu sisseimemine, DK ja FG adiabaatilised kokkusurumise ja paisumise protsessid, KE — soojuse juurdejuhtimine jääval mahul ja EF — soojuse juurdejuhtimine jääval rõhul.

Sisepõlemismootoreid eristatakse küttesegu süüteviisi järgi. Selle tunnuse järgi tehakse vahet välise süüte ja isesüttimise ehk kompressioonsüüte vahel. Välise segumoodustamisega mootorites, millesse imetakse küttesegu, ei ole temperatuur pärast kompressiooni kõrge ja süütamine toimub välise allika abil, tavaliselt elektrisädemega, mis tekita-



Joon. 80. Kompressorita diiselmootori ristlõiked.

1 — alusraam; 2 — väntvõll; 3 — tug; 4 — silinder; 5 — silindrihülss; 6 — kepsu alumise pea liud; 7 — keps; 8 — kepsupolt; 9 — kõlb; 10 — kolvisõrm; 11 — kolvirõngad; 12 — silindripea; 13 — sisselaskeklapp; 14 — väljalaskeklapp; 15 — pihusti; 16 — kaitseklapp; 17 — käivituskapp; 18 — kütusepump; 19 — jaotusvõll; 20 — tõukurirull; 21 — tõukurivarras; 22 — nookur; 23 — väljalaskekollektor; 24 — klapivedru; 25 — õhukollektor.

takse mootori plokikaande keeratud süüteküünla elektroodide vahel.

Sagedasti kasutatakse sädeme saamiseks erilist kõrgepinge generaatorit — magnetot.

Diiselmootorites toimub kütuse isesüttimine. Selleks tuleb õhu komprimeerimise protsessil enne kütuse sisseandmist saavutada kõrge temperatuur, mis ületaks komprimeeritud õhu sekka pihustatava vedelkütuse süttimistemperatuuri. Kütuse sissepritsimine toimub mõnes

diisliis suruõhuga, mida saadakse erilise masina — kompressori abil, mis on niisuguse mootori vältimatuks lisa-seadmeks. Kompressorit kaitatakse mootori peavõllilt.

Niisuguseid, niinimetatud kompressoridiisleid toodeti sisepõlemismootorite kasutamise esimesel etapil. Edaspidi õnnestus kütuse õhuga sissepuhumisest kui vähe ökonoomselt ja ebakindlast viisist lahti saada. Õhukompressor vahetati pumba vastu, mis juhib kütust silindrisse kõrge rõhu (200—350 ata) all läbi erilise konstruktsiooniga pihusti. Esimene niisugune kompressorita diisel ehitati prof. V. I. Grinevetski projekti järgi Venemaal 1908. a.

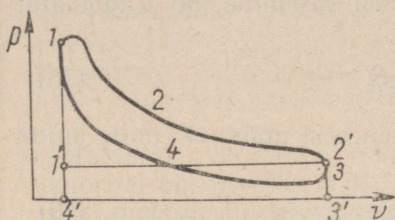
Käesoleval ajal toodetakse ainult kompressorita diisleid. Enamasti töötavad nad segaringprotsessi järgi, mis võeti esimesena kasutusele vene inseneri G. V. Trinkleri konstruktsiooniga mootoris (1901. a.).

Niisuguse mootori ristlõiked on toodud joonisel 80.

Nagu näitab sisepõlemismootorite ringprotsesside teoreetiline vaatlus, määrab nende termilise kasuteguri peamiselt surveaste, kusjuures surveastme suurenemisega tõuseb ka mootori ökonoomsus (termiline kasutegur). Seepärast püütakse sisepõlemismootorite konstrueerimisel saavutada võimalikult suuremat surveastet, kuid iga mootoritüübi jaoks on piir, millest kõrgemale ei minda. Välise segumoodustamisega mootoritele paneb piiri kütuse kalduvus detoneerida. Niisugune mõnede kütuste juures ilmnev nähe põleda õige kiiresti, plahvatuse sarnaselt, millega kaasuvad tugevad tõuked ja löögid, võib põhjustada avariid. Kütuse kalduvust detoneerida iseloomustatakse iga kütuse puhul näitajaga, mida nimetatakse *oktaanarv*uks. Mida väiksem on see arv, seda kergemini kaldub kütus detoneerima. Selleks et välise segumoodustamisega mootorites detonatsiooni vältida, ei kasutata surveastet üle 5—8. Sisemise segumoodustamisega ja isesüütega mootorites — diislites panevad surveastme suurendamisele piiri konstruktiivsed ja ökonoomilised kaalutlused. Rõhu kasv, mis tuleb surveastme suurenemisest, nõuab tugevama seintega silindreid ning teiste detailide mõõdete suurendamist ja põhjustab mootori raskenemise. Samuti suurenevad hõõrdumiskaod. Seepärast, vaatamata termilise kasuteguri kasvule, ei ole surveastme suurendamine üle teatud piiri enam kasulik.

Mootori võimsus, s. o. töö, mis mootor teeb ajaühikus, on erinev, olenevalt sellest, millises mootori osas seda mõõdetakse. Selle vaatekoha järgi tehakse vahet indikaator- ehk sisemise ning efektiiv- ja elektrilise võimsuse vahel.

Sisemine võimsus on see võimsus, mida töötav keha arendab mootori silindris.



Joon. 81. Indikaatordiagramm.

Erilise riista, nn. indikaatori abil saab seda võimsust kolbmasinates mõõta. Seepärast nimetataksegi seda sisemist võimsust indikaatorvõimsuseks. Nimetatud riista abil võetakse töötaval mootoril diagramm, mida nimetatakse indikaatordiagrammiks. Selle ordinaatteljele on kantud gaaside rõhk mootori silindris, abstsissiteljele kolvi poolt liikumisel kujundatud maht.

Indikaatordiagrammil (joon. 81) on kaks kõverat: ülemine kõver 1—2—3 kujutab enesest gaasi paisumist, alumine kõver 3—4—1 kompressiooni. Indikaatordiagrammiga joonestatud pindala mõõdab gaasi tööd mootori silindris, niinimetatud indikaatoritööd. Spetsiaalse riista, nn. planimeetri abil, või mõnel muul viisil, võib selle pindala suuruse kindlaks teha. Kui nüüd sama pindala kujutada ristkülikuna, mille alus on indikaatordiagrammi pikkune, siis selle ristküliku kõrgus mõõdab nn. keskmise indikaatorrõhu kõrgust. Kui seega f — indikaatordiagrammi pindala mm^2 , l — diagrammi pikkus mm ning m (mm/at) on indikaatori vedru mastaap, mis näitab kui palju muutub vedru pikkus ühe atm rõhu puhul, siis võib keskmist indikaatorrõhku väljendada järgmise valemiga:

$$p_i = \frac{f}{lm} \text{ at.} \quad (77)$$

Kui joonisel 81 on 1—2—3—4—1 indikaatordiagramm, mis on võetud töötaval mootoril, ning 1'—2'—3'—4'—1' on sama suure pindalaga ristkülik, siis lõigud 1'—4' ja 2'—3' mõõdavad indikaatori vedru mastaabis keskmist

indikaatorrõhku. On ilmne, et niisugune fiktiivne ja ühe kolvikäigu kestel ühtlane kolvile mõjuv gaasirõhk annaks sama hulga tööd, mis muutuv tegelik gaasirõhk.

Niiviisi määratakse töötava mootori keskmine indikaatorrõhk. Seda teades võib arvutada ka indikaatorvõimsust. Algul määratakse tsükli kestel gaasi töö, mida võib määrata jõu ja teekonna korrutisena, kui F on kolvi pindala, ja S — kolvi käik, siis Fp_i on püsiv jõud, mis mõjuks kolvile, ning gaasi sisemine töö (indikaator-töö) L_i tsükli kohta

$$L_i = Fp_i S. \quad (78)$$

Siin kujutab korrutis FS enesest mahtu V , mille kujundab liikumisel kolb, seega

$$L_i = V \cdot p_i, \quad (79)$$

millest

$$p_i = \frac{L_i}{V}. \quad (80)$$

Saadud avaldis näitab, et keskmist indikaatorrõhku võib määrata kui tööd, mida teeb gaas silindri sees kolvi poolt kujundatud mahu ühiku kohta.

Sisemine (indikaator-) võimsus kahetaktilise mootori jaoks pöörlemiskiirusel n p/min, määratakse valemiga

$$N_i = Fp_i S n = V p_i n. \quad (81)$$

Selles avaldises esinevad suurused tuleb võtta vastavates mõõtühikutes. Kui F mõõtühikuks on m^2 , p_i — kg/m^2 , S ühikuks m , n ühikuks p/min, siis

$$N_i = \frac{V p_i n}{60 \cdot 75} \text{ hj}. \quad (82)$$

Neljataktilise mootori jaoks, milles tööprotsess toimub vääntvõlli kahe pöörde kestel, vastab

$$N_i = \frac{V p_i n}{60 \cdot 75 \cdot 2} \text{ hj}. \quad (82a)$$

Diiselmootoritel on $p_i = 5,5 - 7$ at, karburaatormootoritel $p_i = 5 - 10$ at.

Kuid kõike tööd, mis gaas mootori silindris tegi, ei ole võimalik ära kasutada. Osa sellest tööst kulutatakse mootori koostöötavate osade hõõrdumise ületamiseks, laadimispumpade käitamiseks ning silindri täitmiseks kütteseguga. Ja sellepärast mootori võllilt saadav võimsus, mida nimetame efektiivvõimsuseks (tähistatakse N_e), on alati väiksem kui indikaatorvõimsus N_i . Töötava mootori efektiivvõimsust saab määrata katselisel teel. Vahekorda

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (83)$$

nimetatakse mehaaniliseks kasuteguriks. Mootoritel on $\eta_m = 70 - 85\%$.

Kui mootori efektiivvõimsust kasutatakse elektrienergia saamiseks, siis on kerge mõõta elektrilist võimsust, mida toodab elektrigeneraator. See on väiksem kui mootori efektiivvõimsus, sest kogu mehaaniline energia ei lähe elektrienergia saamiseks, vaid osa muutub soojuseks ja läheb asjatult kaduma. Mootori ja generaatori võllid on ühendatud siduri või rihmülekande abil. Esimesel juhul esinevad kaod ainult generaatoris — selle mähiste soojendamiseks ja hõõrdumiseks laagrites. Elektrilise võimsuse N_{el} ja mootori efektiivvõimsuse N_e suhet nimetatakse generaatori kasuteguriks

$$\eta_g = \frac{N_{el}}{N_e} \quad (84)$$

Kui korrutada valemite (83) ja (84) liikmed, siis saame

$$N_{el} = N_i \eta_m \eta_g \quad (85)$$

See valem näitab mootori indikaatorvõimsuse ja elektrilise võimsuse vahekorda.

Rihmajami korral tuleb arvesse võtta ka selle kadusid.

Mootori võllilt saadavat võimsust, s. o. efektiivvõimsust mõõdetakse tavaliselt hobujõududes; kui jutt käib mootori võllilt võetava võimsuse kohta, siis räägitakse «efektiivhobujõududest». Kui mootori võimsus on 50 efektiivhobujõudu (h_j), siis tähendab see, et võimsust 50 hj võib saada mootori võllilt.

Kui mingi mootori kohta on efektiivne kasutegur teada,

siis võib leida kütuse kulu efektiivhobujõutunni kohta järgmise valemi abil.

$$b_e = \frac{632}{Q_k^t \eta_e} \text{ kg/hj}_e. \quad (86)$$

Toodud valemi mõtte saab selgeks järgmise arutelu põhjal: Q_k^t on kütuse kütteväärtus, s. o. see soojuse hulk kilokalorites, mis vabaneb 1 kg kütuse täielikul põlemisel; kuna η_e arvestab seda soojuse hulka, mis muutub mehaaniliseks energiaks, siis korrutis $Q_k^t \eta_e$ annab kilokalorites selle soojuse hulga, mis muutub tööks mootori võllil, kui põletatakse ära 1 kg kütust. Kuna 1 hobujõutunni saamine mootori võllil on samaväärne 632 kcal mehaanilise energia saamisega, siis on ilmselt vaja 1 hobujõutunni jaoks kulutada nii palju kilogramme kütust, kui mitu korda läheb korrutis $Q_k^t \eta_e$ arvusse 632. Seda võib teada saada, kui jagada 632 korrutisega $Q_k^t \eta_e$. Nii on toimitudki valemis (86).

Vastupidi, kui katselisel teel on kütuse kulu efektiivse hobujõu kohta leitud, siis võib efektiivse kasuteguri arvutada valemiga

$$\eta_e = \frac{632}{b_e Q_k^t}. \quad (87)$$

Seda valemit võib seletada järgmisel viisil: korrutis $b_e Q_k^t$ kujutab endast soojuse hulka kilokalorites, mis kulub ühe efektiivse hobujõu saamiseks; tähendab, et teada seda osa soojusest, mis muutub tööks võllil, s. o. η_e , on vaja jagada 632 korrutisega $Q_k^t b_e$. See ongi mootori efektiivse kasuteguri väärtus.

Mootori võimsuse reguleerimine vastavalt tarbija koor-musele toimub klapi abil, mis reguleerib mootori silindrisse antava kütuse (küttesegu) hulka. Kui mootor peab töötama püsiva pöörlemiskiirusega (näiteks elektrigeneraatori käitamisel), siis toimub reguleerimine automaatselt. Selleks kasutatakse Watti tsentrifugaalregulaatorit (vt. punkt 25).

Vaatleme nüüd üldjoontes, milleks kulub mootori silindris põlemisel eraldunud soojusenergia, ehk teiste sõnadega, koostame mootori s o o j u s b i l a n s i.

Nagu me nägime, muutub osa soojust mootori võlli pöörlemise mehaaniliseks energiaks. Ülejäänud osa, s. o. see osa soojusenergiast, mis ei muutunud võlli pöörlemise mehaaniliseks energiaks, moodustab kaod.

Mootorist lahkuvaid gaase, olgugi et nad on kõrge temperatuuriga, mehaanilise energia saamiseks enam ei kasutata ja selles mõttes on nende soojuslik energia kaduma läinud. Neid kadusid nimetatakse ka d u d e k s h e i t g a a s i d e g a.

Osa põlemisel eralduvast soojuse energiast kantakse välja mootori jahutusveega. Seda soojust ei kasutata samuti mehaanilise energia saamiseks ja loetakse sellepärast kadudeks. Seda kadu nimetatakse k a o k s j a h u t u s v e e g a. Lõpuks läheb osa soojust kaduma ümbritsevasse keskkonda, ning soojendab masina-ruumi õhku.

Kui võtta põlemisel eraldunud soojus 100%, siis on keskmise ökonoomsusega, sisemise segumoodustamisega ja isesüttimisega mootori puhul soojuse jagunemine alltoodud punktide järgi järgmine:

mehaaniliseks energiaks muundub	32%
kaod jahutusveega	28%
kaod lahkuvate gaasidega ja ümbritsevasse keskkonda	32%
kaod hõõrdumiseks ja õhu pumpamiseks (kompressor)	8%
Kokku:	100%

Sisepõlemismootorite ökonoomsuse ja nende töötamise põhinäitajate kohta võib üldise ettekujutuse saada järgmisest tabelist:

Mootori tüüp	Surveaste ε	η_e	Kütuse kulu efektiivse hobujõutunni kohta g/hj_e
Kompressorita neljataktiline dii- selmootor	13—16	0,32—0,39	160—185
Kompressorita kahetaktiline dii- selmootor	13—16	0,31—0,35	180—200
Karburaatormootor	4,5—6	0,18—0,24	250—350

25. Aurumasinad

Soojusjõumasinatest leiutati esimesena aurumasin. XV—XVII sajandil kasutati niisuguseid masinaid vee üles pumpamiseks või kaevandustest vee välja pumpamiseks; esimesed aurumasinad olid väga algelised.

Esimese kolbaurumasinatehasemehhanismide ja töömasinate vahenditult käitamiseks ehitas andekas mehaanik-leiutaja, esimene vene soojustehnik I. I. Polzunov.

Pärisorjusliku Venemaa tingimustes ei saanud I. I. Polzunovi leiutis areneda. Pärast mõnekuulist töötamist jäeti masin tühise katlaavarii tõttu juba pärast Polzunovi surma seisma ega võetud enam kasutusele.

Mõni aeg hiljem konstrueeris kolbaurumasin Inglismaal J. Watt.

Kolbaurumasin on lihtsa ehitusega ja kindla ning pika töö-eaga. Ta võimaldab küllalt suurt ülekoormamist ja teda võib käivitada koormuse all. See tegi aurumasinat kasutamise eriti sobivaks raudteel, kus ta pikka aega püsis ainsa jõumasina.

Laialt on levinud lokomobiilid, s. o. niisugused agreaadid, kus aurukatel ja aurumasin on kokku ehitatud.

Tuleb märkida, et viimastel aastatel on raudteel hakatud auruveidureid asendama ökonoomsemate mootorveduritega, mis on varustatud diiselmootoritega.

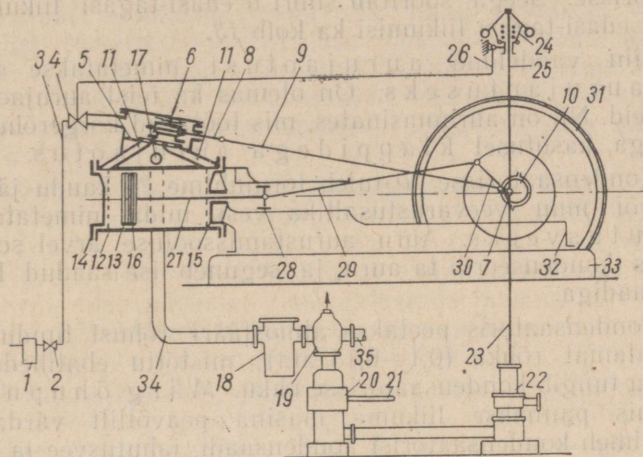
Elektrijaamades ei kasutata juba ammu enam kolbaurumasinat, sest nad on kohmakad ja väheökonoomsed.

Vaatleme lühidalt kolbaurumasinat tööprintsipi. Näiteks toome ühesilindrilise kahepoolse töötamisega kolbaurumasinat, s. o. niisuguse, kus aur töötab kolvi mõlemal poolel.

Niisuguse masina skeem on kujutatud joonisel 82. Veeaur tuleb aurukatlast läbi vee-eraldaja 1 ja sulgventiili 2 aurutoru 3 mööda ja läbi reguleerklapi 4 siibrikarpi 5. Selles liigub edasi-tagasi siiber 6, mille paneb tööle masina peavõll 7; viimasega on siiber ühendatud siibri varre 8 ja kepsu 9 abil. Siibrikeps 9 on ühendatud rõnga kaudu kettaga 10, mis asetseb ekstsentriliselt masinavõllil 7 ja mida seepärast nimetatakse ekstsentrikuks.

Masina põhiliseks osaks on silinder 12, milles aset-

seb kolb 13. Silindril on kaks kaant — eesmine kaas 15 ja tagumine kaas 14. Kolb on varustatud elastsete rõngastega 16, mis raskendavad auru pääsemist ühelt kolvi poolelt teisele poole.



Joon. 82. Uhesilindrilise kahepoolse töötamisega aurumasina skeem.

1 — vee-eraldaja; 2 — sulgventiil; 3 — torujuhe; 4 — reguleerklapp; 5 — siibrikarp; 6 — siiber; 7 — masina peavõll; 8 — siibrivars; 9 — siibrikeps; 10 — ekstsentrik; 11 — auru sisselaskekanal; 12 — masina silinder; 13 — masina kolb; 14 — silindri tagumine kaas; 15 — silindri eesmine kaas; 16 — kolvirõngad; 17 — auru väljavoolukanal; 18 — õlieraldaja; 19 — kolmekäiguline kraan; 20 — segamiskondensaator; 21 — jahutusvee sissevool; 22 — märg õhupump; 23 — märgõhupumba varras masina peavõllilt; 24 — tsentrifugaalregulaator; 25 — regulaatori võll; 26 — hoob; 27 — kolvi vars; 28 — ristpea; 29 — keps; 30 — vânt; 31 — hoo-
ratas; 32 — raam; 33 — alusplaat; 34 — auru äravoolutoru.

Joonisel kujutatud asendi puhul läheb aur siibrikarbist läbi vasakpoolse aurukanali 11 silindri vasakule poolele ning auru paisumistöö toimel liigub kolb vasakult paremale; seejuures voolab aur, mis on silindri parempoolses otsas, läbi parempoolse aurukanali 11 siibri-alusesse ruumi, sealt läbi auru väljavoolukanali 17 heitaurtorusse 34, ning suundub läbi õlieraldaja 18 ja kolmekäigulise kraani 19 kondensaatorisse 20.

Kolvi tagasikäigul (paremalt vasakule) tuleb värsk aur siibrikarbist silindri parempoolsesse otsa. Läbitöötanud auru tõukab kolb silindri vasakust poolest läbi vasakpoolse kanali kondensaatorisse 20.

Nagu näha, on auru tööperioodid silindri ühes ja teises otsas ajaliselt nihutatud: kui värske aur tuleb silindri ühte poolde ja teeb seal tööd, siis teisest silindri poolst suundub aur läbi aurukanali siibri alla ja sealt kondensaatorisse. Seega sooritab siibri 6 edasi-tagasi liikumise tõttu edasi-tagasi liikumisi ka kolb 13.

Siin vaadeldud aurujaotust nimetatakse siiberaurujaotuseks. On olemas ka teisi aurujaotusseadeid. Nii on aurumasinates, mis töötavad kõrgerõhulise auruga, kasutusel klappidega aurujaotus.

Kondensaatorisse 20 tuleb torujuhtme 21 kaudu järve, jõe või muu veevarustusallika vesi, mida nimetatakse jahutusveeks. Auru aurustamissoojuse arvel soojenedes kondenseerib ta auru, ja seguneb ise saadud kondensaadiga.

Kondensaatoris peetakse atmosfääri rõhust tunduvalt madalamat rõhku (0,1—0,15 ata), mistõttu ebatiheduste kaudu tungib kondensaatorisse õhku. Märghõupump 22, mis pannakse liikuma masina peavõllilt varda 23 abil, imeb kondensaatorist kondensaadi, jahutusvee ja õhu segu.

Masina poolt antav võimsus peab vastama tarbija poolt vajatavale energiale, ehk nagu öeldakse, koormusele. Seejuures seatakse üles tingimus, et masina võll peaks igasuguse koormuse puhul tegema ajaühikus ligikaudu ühe ja sama palju pöördeid (millele masin on arvestatud). Masina pöörete arvu püsivust ja masina võimsuse vastavust koormusele kohandatakse automaatselt. Kui energiavajadus väheneb, kuid masina võimsus jääb endiseks, siis hakkab masina võlli pöörlemiskiirus suurenema, sest liigne võimsus läheb masina pöörlevate osade kineetilise energia suurendamiseks. Antud masina jaoks normaalne pöörlemiskiirus taastatakse tsentrifugaalregulaatori 24 abil. Pöörete arvu suurenemisel lähevad regulaatori vihid laiali ja võllil 25 istuv muhv tõuseb ülespoole. Võll 25 pannakse pöörlema masina peavõllilt. Muhviga ühendatud varras 26 tõmbab regulaatoriklapi 4 koomale. Klapist läbi voolava auru hulk väheneb; seega hakkab masin vastavalt tarbija vähenenud koormusele töötama väiksema võimsusega. Tarbija koormuse kasvamisel toimub vastupidine protsess: masina pöörete arv hakkab langema ning regulaator suurendab auru sisse-

voolu masinasse, mistõttu masina võimsus kasvab ja muutub võrdseks tarbija suurenenud koormusega.

Mitte alati ei tööta aurumasinad kondensaatoritega. Selle puudumise korral lastakse aur silindrist läbi toru atmosfääri — masin töötab siis, nagu öeldakse, vasturõhuga. Masinast väljuva auru rõhk on sel puhul atmosfääri rõhust natuke kõrgem. Niisugune töötamine on vähem kasulik, kui kondensaatori olemasolu puhul, sest tunduv osa auru potentsiaalsest energiast jääb kasutamata.

Kolvi 13 edasi-tagasi liikumine antakse kolvivarre 27 abil, mis on ühendatud ristpeaga 28, kepsu 29 ja vända 30 kaudu edasi ja muudetakse võlli 7 pöörlevaks liikumiseks. Võllile on kinnitatud hooratta 31, mille ülesandeks on tasakaalustada masina käiku, mis saavutatakse hooratta suure massiga. Masina raam 32 on kinnitatud vändamendi 33 külge.

Põllumajanduses, üksikutes väikestes ettevõtetes, mis pole ühendatud elektrivõrguga, ning ehitusplatsidel kasutatakse edukalt kombineeritud, enamasti transporditavaid agregate — lokomobiile, mis kujutavad enesest agregati, milles kolb-aurumasin, katel ja abimehhanismid on kokku ühendatud.

Elektrijaamade jõumasinate hulgas domineerivad auruturbiinid, mille tööprintsip, nagu oli seletatud eespool, seisab alguses auru potentsiaalse energia muundamises auru kineetiliseks energiaks ja seejärel, viimase muundamises võlli pöörlevaks liikumiseks.

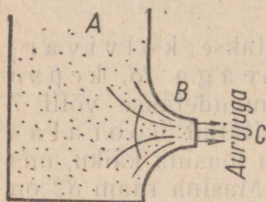
Turbiinid jaotatakse oma ülesannete järgi kondensatsiooniturbiinideks, mille ülesandeks on ainult elektrienergia tootmine, ning termofikatsiooniturbiinideks, mis peale energia tootmise rahuldavad tarbijate soojuse vajadusi kuuma vee või auru andmisega tsentraliseeritud korras. Käesolevas punktis vaadeldakse kondensatsiooniturbiine.

Vaatleme alguses potentsiaalse energia muutumise protsessi auru liikumise kineetiliseks energiaks.

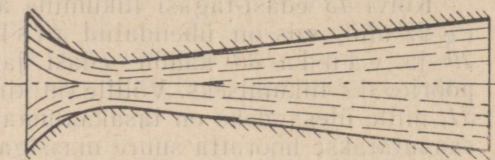
Voolaku aur anumast *A* (joon. 83) keskkonda *C* läbi kanali, mida nimetatakse düüsiks (*B*). Minnes anumas *A* valitseva rõhu alt madalama rõhuga keskkonda *C* aur paisub, s. t. auru maht suureneb ja ta voolab düüsist välja suure kiirusega. Järelikult on sellel aurul suur kinee-

tiline energia. Seega muutub auru potentsiaalne energia düüsis *B* auru kineetiliseks energiaks.

Kitsenevast düüsis, nagu on kujutatud joonisel 83, väljuva gaasi või auru voolamist iseloomustab järgmine iseärasus. Kui gaasi rõhk reservuaaris *A* ja keskkonnas *C* on võrdne, ei ilmne mingit voolamist. Rõhu langedes keskkonnas *C* gaasi kiirus ja väljavoolava gaasi hulk suurenevad, kuid siiski ainult niikaua, kuni rõhk



Joon. 83. Auru väljavool.



Joon. 84. Laienev düüs.

keskkonnas muutub võrdseks ligilähedaselt poole anumas *A* valitseva rõhuga. Seejuures saadud gaasi kulu nimetatakse maksimaalseks kuluks ja kiirust kriitiliseks kiiruseks. Edasine gaasi rõhu alandamine keskkonnas *C* ei võimalda saavutada ei suuremat gaasi kulu ega suuremat väljavoolu kiirust. Kriitilisest väljavoolu kiirusest suuremate kiiruste saamiseks (kuni 1000 m/sek) kasutatakse erilise kujuga düüse. Eesmine osa on neil düüsidel natuke kitsenev, tahapoole aga düüs laieneb (joon. 84). Neid düüse nimetatakse laienevateks düüsideks ehk Lavalidüüsideks.

Lavalidüüsi niisugune kuju on seletatav kiiruse muutumise iseloomuga auru mahu suurenemisel läbi düüsi voolates. Rõhu langemisel (ligikaudu) poole võrra kasvab auru kiirus suuremal määral kui maht ja düüsi ristlõige peab vähenema; edasisel paisumisel, vastupidi, kasvab maht kiiremini kui kiirus ja düüs peab laienema. Düüsil peab olema laienev osa ainult sel juhul, kui rõhk keskkonnas, millesse aur voolab, on väiksem nn. kriitilisest rõhust, mis on ligikaudu võrdne poole algrõhuga. Kui rõhk pärast düüsi on võrdne või kõrgem kriitilisest rõhust, siis düüsil peab olema ainult ahenev osa.

Düüsiist välja voolavat auru võib kasutada töö tegemiseks. Selleks juhitakse aur erilistele ketta külge kinnita-

tud labidate labadele. Niisugust seadist oli kirjeldatud joonisel 1, a. Sellel olid: 3 — düüs, millest aur välja voolab; 4 — labidad, mis on kinnitatud kettale 5. Ketas on kinnitatud võllile 6. Labidate labade vahelises kanalis liigub aur kõverjooneliselt, mille kestel, nagu mehaanikast teada, tekib tsentripedaaljõud, mis on rakendatud kõverjoonelist liikumist kujundavale kehale, antud juhul aurule. Vastavalt Newtoni kolmandale seadusele tekib reaktsioonijõud, käesoleval juhul tsentrifugaaljõud, mis on rakendatud auru liikumist juhtivatele labadele. Tsentrifugaaljõud paneb labidad liikuma, nendega koos ka ketta, ja võlli pöörlema.

Niiviisi saadakse võlli mehaaniline pöörlemisenergia, milleks muutub suurem osa auru kineetilisest energiast, kuna aur väljub turbiinist tunduvalt väiksema kiirusega, kui tal oli labidate labade vahele tulekul või kui labidatega ketas oleks liikumatu.

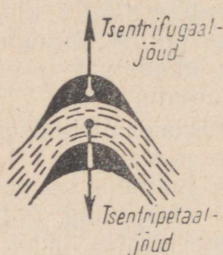
Tehnikas tuleb tegemist teha kahesuguse liikumisega. Ühel juhul huvitab meid keha liikumine maa peal liikumatute esemete suhtes. Seda liikumist nimetatakse absoluutseks liikumiseks ning mingi keha kiirust nende liikumatute esemete suhtes absoluutseks kiiruseks. Teisel juhul võib meid huvitada nende samade kehade liikumine teiste kehade suhtes, mis omakorda on liikuvad; sel juhul nimetatakse seda suhteliseks (relatiivseks) liikumiseks.

Näiteks võtame inimese liikumise laeva pardal. Liikugu inimene laeva liikumise suunas laeva parda suhtes kiirusega 2 m/sek ning laeva liikumise kiirus olgu samuti 2 m/sek. On ilmne, et inimese suhteline liikumise kiirus on 2 m/sek, absoluutne kiirus (kalda suhtes) aga 4 m/sek. Vaatleme nüüd kiirusi siis, kui inimene, olles jõudnud laeva ninasse, pöördub seal ringi ja sammub endise kiirusega laeva liikumisele vastassuunas. On ilmne, et inimese suhteline kiirus on endine, s. o. 2 m/sek. Millega aga võrdub tema absoluutne kiirus sel ajal, kui ta liigub laeva ninast ahtri poole? Kuna laev liigub samuti kiirusega 2 m/sek, kuid nüüd juba inimese liikumisega vastupidises suunas, siis on ilmselt inimese absoluutne kiirus, s. o. kiirus kalda suhtes, võrdne nulliga.

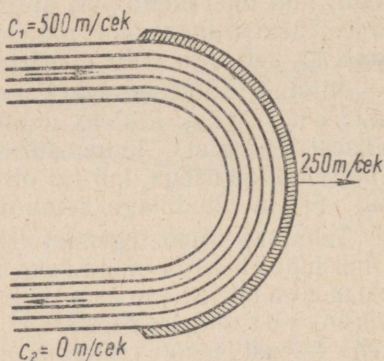
Selleks et selgitada enesele aurujoa kineetilise energia ülekandmist labidatele, vaatleme aurujoa liikumise lihtsusstatud juhtu mööda labida laba (joon. 86) ja jälgime, kui

das muutub auru kiirus labida liikumisel. Seejuures võib juttu olla auru absoluutsest kiirusest (turbiini liikumatu düüsi või kere suhtes) ja suhtelisest kiirusest (turbiini liikuva labida suhtes).

Voolaku labida labale suunduv aurujuga düüsist välja absoluutse kiirusega 500 m/sek ning labida kiirus samas suunas olgu 250 m/sek. On ilmne, et auru suhteline liikumiskiirus on $500 - 250 = 250$ m/sek (võrrelda näitega ini-



Joon. 85. Tsentripetaal- ja tsentrifugaaljõud auru liikumisel labidate labade vahel.



Joon. 86. Absoluutse kiiruse muutumine auru liikumisel liikuvate labidate labade vahel.

mese liikumisest laeva pardal). Nii on lugu, kui aurujuga ja labidas liiguvad ühes ja samas suunas. Edasi liigub aur piki labida laba mööda kõverjoonelist teekonda, pöörduv tagasi ja lahkub labalt otse vastupidises suunas selle liikumisega. Kui ta suhteline kiirus on sama, s. o. 250 m/sek, ja labidas liigub endise kiirusega, siis võrdub ilmselt auru absoluutne kiirus nulliga.

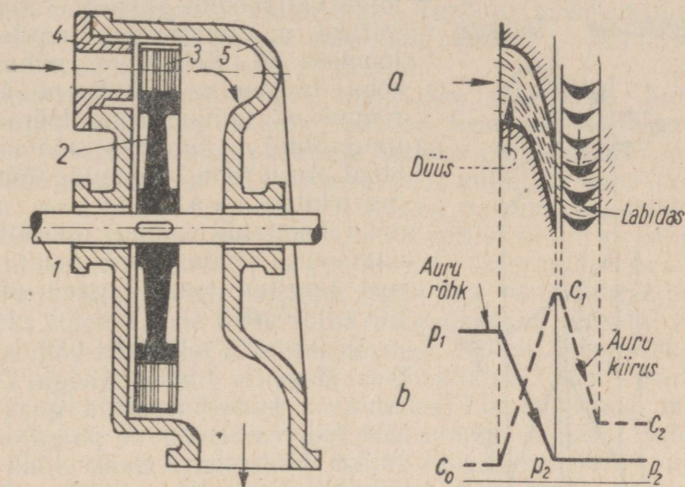
Seega kaotas aurujuga liikumissuuna muutmisel oma absoluutse kiiruse, s. o. oma kineetilise energia. See energia anti üle labidate abil turbiini võllile.

Tegelikult ei välju aur nullkiirusega, vaid mingi väikese absoluutkiirusega, mis on palju väiksem kui see, millega ta voolas labidate labadele.

Joonisel 87 on näidatud lihtsaima turbiini lõige. Töölabidatega ketas on paigutatud liikumatusse kesta 5.

mille seinad moodustavad kanalid auru väljumiseks turbiinist, nagu see on näidatud nooltega.

Töötamisviisi järgi tehakse vahet aktiiv- ja reaktiivturbiinide vahel.



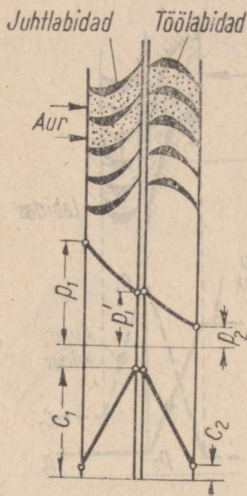
Joon. 87. Turbiini lõige.

1 — võll; 2 — ratas; 3 — labid; 4 — düüs; 5 — kere.

Aktiivturbiiniks nimetatakse niisugust turbiini, milles aur paisub enne seda, kui ta läheb turbiini töörotta labidatele. Kui teha lõige läbi düüsi ja töölabida laba, ja laotada nad joonise tasapinnale, siis saame kujutise, mis on näidatud joonisel 87, a. Sellel on 4 — düüsi lõige, 3 — labade rea lõige. Lõike joonise alla on paigutatud rõhkude ja absoluutkiiruste muutumise graafik (joon. 87, b). Graafikust on näha, et rõhk (kujutatud täisjoonega), mis alguses on p_1 , langeb düüsis rõhuni p_2 ja jääb edaspidi labadel püsivaks (s. o. rõhk enne ja pärast labasid jääb samaks); niisuguseid turbiine nimetatakse seepärast ka püsiva rõhuga turbiinideks. See saavutatakse sellega, et labade vahe tehakse (peaaegu) muutumatu ristlõikega. Rõhu langemisel düüsis suureneb auru absoluutne kiirus kiiruselt c_0 kuni kiiruseni c_1 (katkeline joon) ja seejärel, läbinud töölabidate labad,

alaneb kiiruseni c_2 , kusjuures auru voolu suund muutub peaaegu vastupidiseks.

Reaktiivturbiinides toimub auru paisumine nii enne auru jõudmist töölabidate labadele kui ka labadel enestel, mis saadakse sellega, et töölabidate kanalite ristlõige väljavoolul aheneb. Rõhu ja kiiruse muutumine on näidatud joonisel 88. Sellelt on näha, et rõhu langemine rõhult p_1 kuni rõhuni p_1' toimub enne tööratas ning rõhult p_1' kuni p_2 — töölabida labal. Auru rõhu langemine tööratas tekitab reaktiivjõu, mis on rakendatud samuti tööratasle nagu auru voolu suuna muutumisest tingitud tsentrifugaal- (aktiiv-) jõudki.



Joon. 88. Reaktiivturbiini kiiruse ja liikumise muutumise graafik.

Reaktiivjõu tekkimist võib seletada järgmise lihtsa näitega. Oletame, et komprimeeritud gaasiga täidetud reservuaar on paigutatud vankri rööbastele. Gaasi rõhk on kõigile seintele ühesugune ja reservuaar püsib paigal; kuid kui reservuaari seina teha ava, nii et gaas hakkaks sellest välja voolama rööbaste suunas kiirendatult ja reservuaarist nagu väljatõugatuna.

Reservuaar aga hakkab tekkinud reaktiivjõu toimel liikuma gaasi väljavoolule vastassuunas.

Vaatleme mehaanikaseadustest lähtudes reaktiivjõudude tekkimist. Kui aur liigub labade vahel rõhku muutmata, siis jääb tema kiirus labade suhtes, s.o. suhteline kiirus, püsivaks ja sel juhul, nagu oli seletatud varem, on labidate labad ainult tsentrifugaaljõudude mõju all, mis tekivad auru liikumissuuna muutumisest. Kui liikumisel tekib peale selle veel labade vahel rõhu langemine, siis põhjustab see auru kiiruse suurenemise labade suhtes, s.o. auru liikumiskiiruse suhtelise suurenemise. Kiiruse suurenemine, s.t. kiirenduse olemasolu, räägib sellest, et liikuvale aurujoale mõjub (vastavalt teisele Newtoni seadusele) jõud, mis on suunatud liikumise suunas. Vastavalt Newtoni kolmandale seadusele mõjub sellele jõule sama suur ja vastupidi suunatud jõud, mis on rakendatud labidate labadele. Seda viimast jõudu nimetataksegi reaktiivjõuks. Seega mõjuvad sel juhul labidatele ühes ja samas suunas kaks jõudu — tsentrifugaaljõud ja reaktiivjõud.

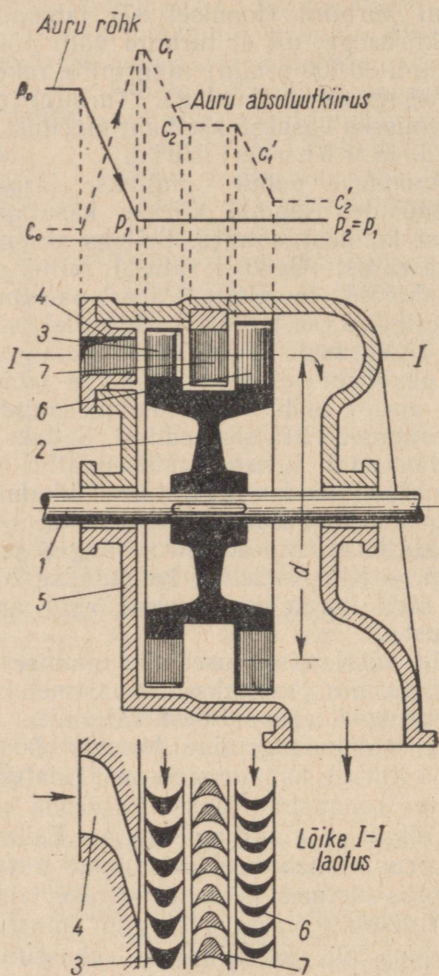
Arvutused näitavad, et kõige kasulikum on kasutada kineetilist energiat, mis saadakse auru paisumisel turbiini düüsidel, kui turbiini (joonisel 87) labidad pöörlevad väga suure kiirusega, nii et turbiini võlli pöörete arv on väga suur (kuni 30 000 p/min) ning mille rakendamine on seotud mitmesuguste raskustega. Turbiini pöörlemiskiiruse vähendamiseks kasutatakse kaht moodust — kiiruseastmeid ja rõhuastmeid.

Esimese mooduse puhul toimitakse järgmiselt. Auru paisumisel düüsidel saadud kiiruse kasutamine toimub kahes (vahest kolmes) astmes. Selleks rakendatakse erilise ehitusega ratast (Curtis'e ratast), millel on kaks (või kolm) rida labidaid (joon. 89). Pärast paisumist düüsidel 4 läheb aur esimese rea labidatele 3, millel ta kiirus kahaneb kiiruselt c_1 kiirusele c_2 (vt. kiiruste diagramm üleval).

Seejärel peab aur minema teise rea labidatele. Kuid selleks tuleb aurule anda sama liikumissuund, mis tal oli töölabidate esimesse ritta sisenemisel. Selleks kasutatakse nn. juhtlabasid 7; need on ühendatud turbiini kerega, ja liikumatud. Nendes taastatakse liikumissuund, mis töölabidate esimeses reas oli muutunud; seejärel tuleb aur töölabidate teise ritta 6. Kiirus langeb seejuures suuruselt c_2 kuni c_3 . Kiiruse sellise kasutamise korral pöörleb turbiini võll kaks korda aeglasemalt, kuid arendab sama suurt võimsust.

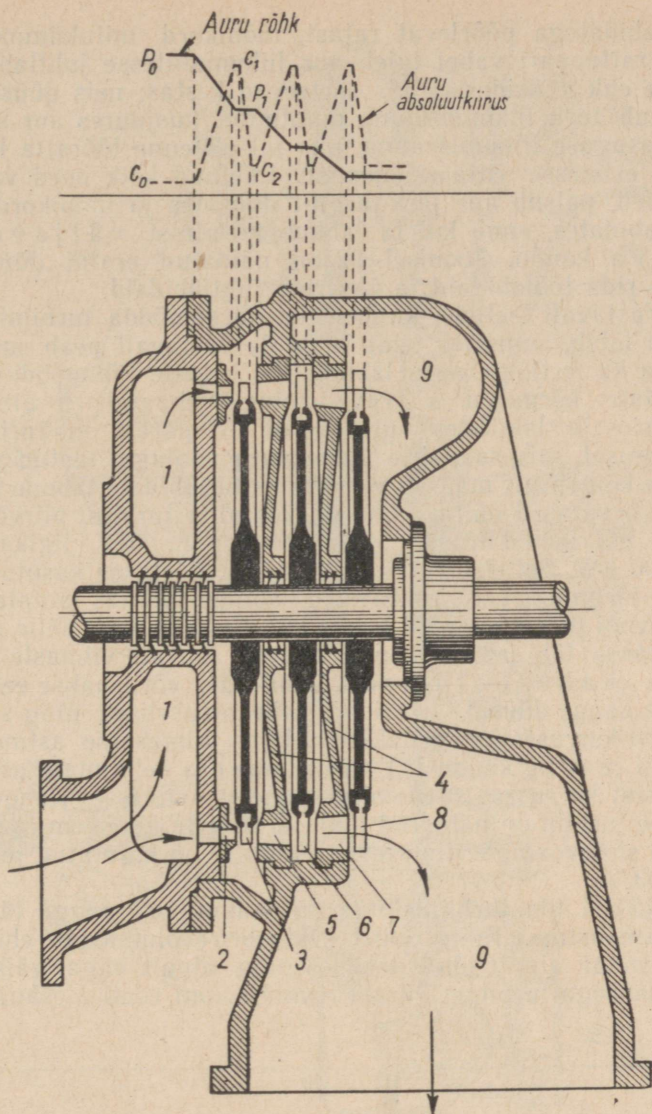
Teine võlli pöörlemiskiiruse vähendamise moodus seisab selles, et turbiin jaotatakse rõhuastmeteks. Seejuures on auru kiirus igast rõhuastmest väljumisel väiksem kui sel juhul, kui rõhu langemine toimuks korraga. Rõhu muutumine ja kiiruse kahanemine on näidatud joonisel 90 (üleval) kolme rõhuastme jaoks. Aururõhk esimeses astmes langeb rõhult p_0 ainult rõhuni p_1 . Esimeses astmes kujunenud kiirus alaneb, seejärel toimub uus rõhu langemine järgmises astmes ja selle kiiruse alanemine jne. Sellele tööprintsibile vastava turbiini konstruktsioon on järgmine (joon. 90): kohtkindlate vaheseintega 4 (neid nimetatakse diafragmadeks) jaotatakse turbiin nii mitmeks osaks, kui palju surve astmeid on ette nähtud. Igas osas paikneb eraldi tööratas töölabidatega 3, 6, 8. Liikumatud diafragmad on varustatud düüsidega (mida vahel nimetatakse ka juhtlabidateks), milles toimub järjekindel rõhulangus.

Kaasaegsetel võimsatel turbiinidel (joon. 91) on mitu



Joon 89. Aktiivturbiini lõige piki kiiruseastmeid.

1 — võll; 2 — ratas; 3 — töölabidate esimene rida; 4 — düüs; 5 — kere; 6 — töölabidate teine rida; 7 — juhtlabid.



Joon. 90. Kolme rõhuastmega turbiini lõige.

1 — värskete auru kamber; 2 — esimese astme düüs; 3 — esimese astme töölabidad; 4 — diafragma; 5 — teise astme düüs; 6 — teise astme töölabidad; 7 — kolmanda astme düüs; 8 — kolmanda astme töölabidad; 9 — väljavoolutoru.

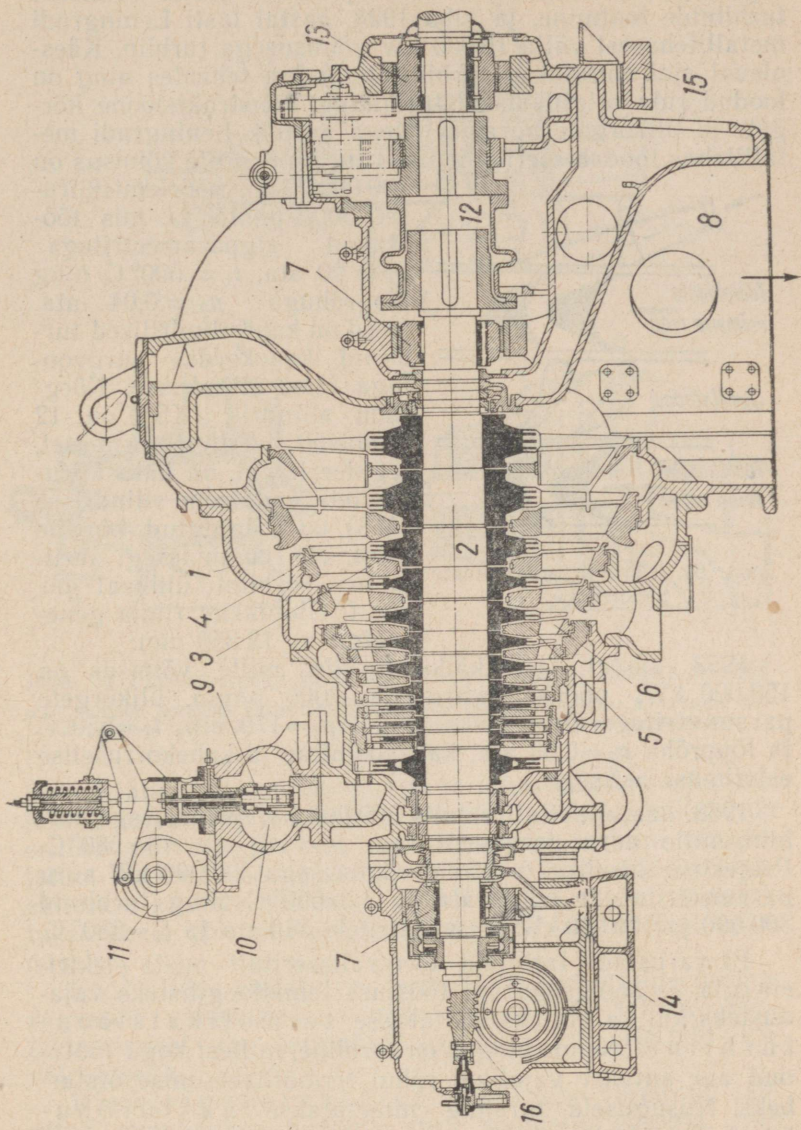
töölabiladega pöörlevat ratast, mõnikord mitukümmend. Iga rattapaari vahel tuleb aur liikumatutesse juhtlabidatesse ehk düüsidesse, mis asetsevad keetas; neis düüsidest toimub auru liikumissuuna muutmine, kusjuures aur saab samasuguse liikumissuuna, mis tal oli enne tööratat labidate esimesse ritta sisenemist. Läbinud kõik need vaheastmed, paisub aur järk-järgult düüsidest ja mõnikord ka töölabiladest, enne kui ta lahkuv turbiinist väljavooluava kaudu. Joonisel 92 on näidatud eraldi düüs 1, kaks rida töölabilaid ja üks rida juhtlabilaid.

Vastavalt sellele, kuidas aur järgemööda turbiiniastmeid läbib, suureneb tema maht ja vastavalt peab suurenema ka ristlõige auru läbimiseks; ketaste läbimõõdud ja labidate kõrgused kasvavad ning mehaanilised pinged ketastes ja labidates suurenevad. Seepärast on turbiini võimsusel, mis saadakse ühtse auru vooluga, teatud piir, mille kõigepealt määrab viimase ketta labidate labade kõrgus. Arvutused näitavad, et ühevoolulise turbiini piirvõimsus pöörlemiskiirusel $n=3000$ p/min, on ligikaudu 50 000 kW. Selleks et seda piiri tõsta, võetakse kasutusele üks järgmisi konstruktiivseid abinõusid: kas jaotatakse auruvool turbiini teatud kohas kaheks ja kumbki selle pool juhitakse läbi eraldi komplektidena asuvate viimaste astmete (kahevoolulised turbiinid), või tehakse eelviimase astme düüsid ja labidad kahekorruselised ning seesmisest korrusest saadetakse turbiini viimasesse astmesse ainult osa (ligikaudu $\frac{2}{3}$) auru; teine osa eelviimase astme välisest korrusest saadetakse kondensatorisse. Kahevooluline turbiin on näidatud joonisel 93 a ja b; skeem osalise auru sissevooluga viimasesse astmesse on kujutatud joonisel 93, c.

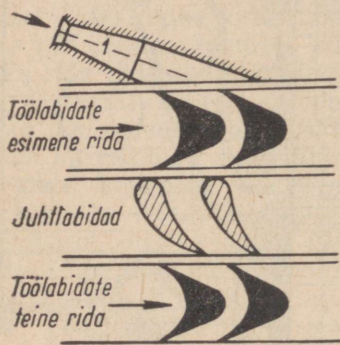
NSV Liidu turbiiniehitus on saavutanud kõrge täiuslikkuse astme. Enne Suurt Oktoobrirevolutsiooni ehitati Venemaal ainult ühes tehases ning ainult väga väikese võimsusega turbiine. Pärast revolutsiooni võeti ülesandeks

Joon. 91. Leningradi metallitehase 50 000 kW võimsusega turbiini piki-lõige.

1 — turbiini kere; 2 — völli; 3 — tööratas; 4 — töölabilas; 5 — diafragma; 6 — juhtlabidas; 7 — laagrid; 8 — väljalasketoru; 9 — regulaatori klapp; 10 — klapi-kamber; 11 — regulaatori klapi ajam; 12 — turbiini ja generaatori völlide ühendussidur; 13 — generaatori laager; 14 — eesmine vundamendiplaat; 15 — tagumine vundamendiplaat; 16 — regulaatori völli ja õlipumba tiguajam.



organiseerida ehitatavate elektrijaamade jaoks võimsate turbiinide tootmine, ja juba 1928. aastal lasti Leningradi metallitehasest välja 10 000 kW võimsusega turbiin. Käesoleval ajal ehitatakse turbiine paljudes tehastes ning on loodud rida originaalseid turbiinide konstruktsioone kõrgete ja ülikõrgete parameetritega aurule. Leningradi metallitehas toodab seeriaviisiliselt turbiine, mille võimsus on



Joon. 92. Töö- ja juhtlabidate paiknemine

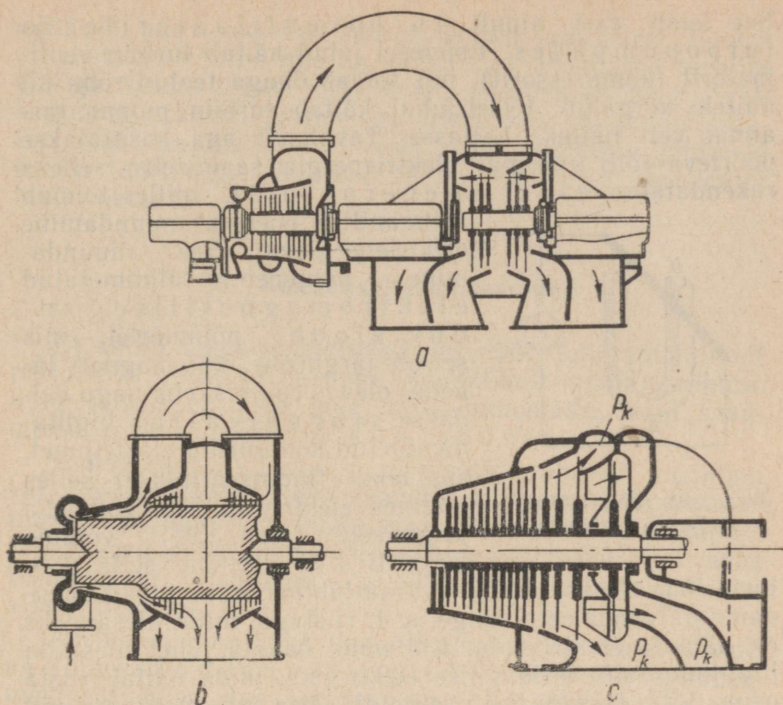
100 000 kW pöörlemiskiirusel 3000 p/min ja mis töötavad algparameetritega $p_1 = 90$ ata, $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ning lõpprõhuga $p_2 = 0,04$ ata. Need on kahe silindrilised turbiinid kahekordse auruvooluga teise silindrisse. Kõrgrõhu silindris (KS) on 12 rõhuastet, millest esimesel, reguleeritaval, on kaks kiiruseastet. Madalrõhu silindrisse (MS) on paigutatud kümme astet, viis kummassegi auruvoolu. Turbiini üldkaal on 264 t. Üldpikkus (ilma generaatorita) 12 350 mm.

1953. aastal lasti käiku turbiin, mille võimsus on 150 000 kW, pöörlemiskiirusega 3000 p/min, ülikõrgete parameetritega auru jaoks, millel $p_1 = 170$ ata, $t_1 = 550^\circ\text{C}$ ja lõpprõhk $p_2 = 0,03$ ata, kahevooluline ja kahekorruselise eelviimase astmega.

1958. aastal ehitati valmis 200 000 kW võimsusega turbiin, mille auru parameetrid on $p_1 = 140$ ata, $t_1 = 580^\circ\text{C}$. Projekteerimisel on turbiinid võimsusega 300 000 kW auru parameetritele $p_1 = 300$ ata ja $t_1 = 650^\circ\text{C}$ ning turbiinid 300 000 ja 600 000 kW parameetritele 240 ata ja $t_1 = 580^\circ\text{C}$.

Et varustada tarbijaid tsentraliseeritult peale elektrienergia ka soojusega, nii tööstuse tehnoloogilisteks vajadusteks kui ka kütteks, ehitatakse termofikatsiooniturbiine. Nende hulgas on turbiine, millest kogu töötanud aur antakse vajalikul rõhul termofitseerimise otstarbeks. Niisuguseid turbiine nimetatakse vasturõhuturbiinideks.

Enamikul juhtudel võetakse aur soojuslikuks tarbeks turbiini mingist vahepealsest astmest; ülejäänud osa



Joon. 93. Piirvõimsusega turbiinide viimaste astmete voolude skeemid.

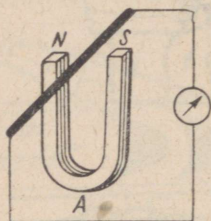
a — kahtpidi auruvool kahesilindrilise turbiini madalrõhuastmes; *b* — sama ühesilindrilises turbiinis; *c* — auruvool osalise minekuga viimasesse astmesse.

aurust jätkab paisumisprotsessi ja läheb kondensaatorisse. Rõhku tuleb väljavõtul pidada teatud piirides, milleks on eriline rõhuregulaator. Niisugust turbiini nimetatakse vaheltvõtuturbiiniks. Turbiinid konstrueeritakse kas ühe või kahe vaheltvõtuga, mida reguleeritakse ühele või teisele rõhule vastavalt aurutarbija vajadusele.

NSV Liidus ehitatakse termofikatsiooniturbiine mitmesugustele võimsustele — maksimaalselt 50 000 kW. Projekteerimisel on termofikatsiooniturbiinid 100 000 kW võimsusega.

Elektrigeneraatorid. Nagu juba varem oli räägitud, muudetakse turbiinis auru soojuslik energia võlli pöörlemise mehaaniliseks energiaks. Seda juhtub harva, et saadud mehaaniline energia läheb vahetuks kasutamiseks.

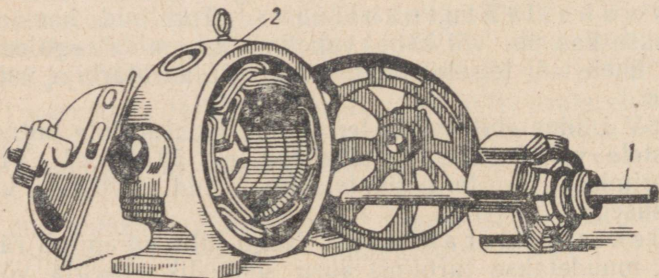
See leiab aset ainult turboventilaatorites ja turbopumpades. Esimesel juhul käitab turbiin ventiilaatorit (kompressorit), mis toidab õhuga teatud rõhu all näiteks kõrgahju; teisel juhul käitab turbiin pumpa, mis annab vett näiteks katlasse. Tavaliselt aga kasutatakse pöörleva võlli energiat elektrienergia saamiseks; selleks rakendatakse elektrigeneraatorit, milles toimub



Joon. 94. Elektriinduktsioonvoolu tekkimine.

mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks. See muundamine põhjeneb niinimetatud elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel, mis seisab järgmises: kui magneti lähedal olevas ruumis, ehk nagu öeldakse, magnetväljas liigutada suletud kontuuriga elektrijuhet, siis tekib (indutseeritakse) selles juhtmes elektrivool. Seda võib teha järgmiselt (joon. 94): võtame magneti *A* ja asetame selle po-

luste *N* ja *S* vahele juhi — traatjuhtme, mille otsad ühendame galvanomeetri külge, s. t. riistaga, mille ülesandeks on näidata elektrivoolu. Kui nüüd hakata juhet üles-alla liigutama, siis tekib selles elektrivool, mida näitab riista osuti. Võib toimida ka vastupidi: jätta juhe paigale, kuid liigutada magnetit — vool tekib ka sel juhul. Niisugusele põhimõttele on rajatud ka elektrigeneraatori ehitus. Generaator koosneb kahest peaosast (joon. 95): pöörlevast rootorist *1*, mille külge on kinnitatud rida magneteid, ja liikumatust staatorist *2*, millesse on paigutatud



Joon. 95. Elektrigeneraatori detailid.

mähised, mis koosnevad suurest arvust juhtmetest. Rootor on asetatud võllile, mis on siduri abil ühendatud turbiini võlliga. Seega liigub turbiinivõlli pöörlemisel magnetväli kogu aeg staatori juhtmetega ristsuunas, kusjuures staatori mähistes tekib elektrivool, mis juhitakse juhtmeid kaudu tarbijatele. Joonisel 95 on kujutatud generaator lahti võetuna.

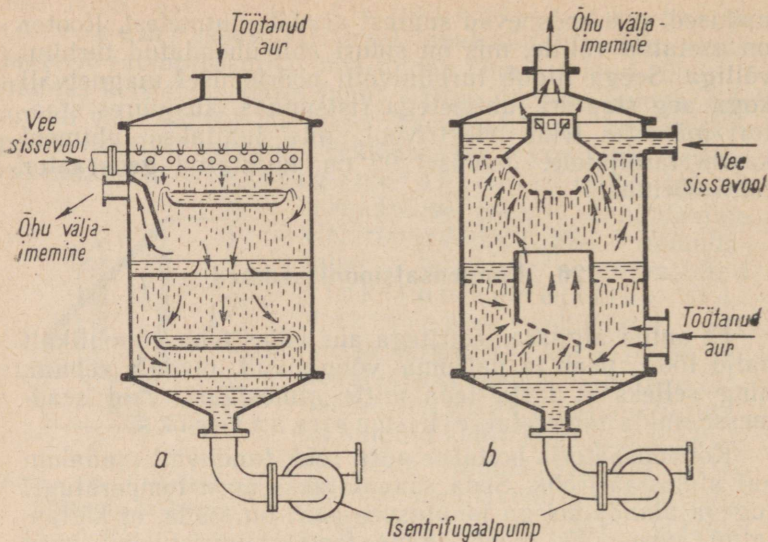
26. Kondensatsiooniseadmed

Et antud algparameetritega aur võiks teha võimalikult palju tööd, peab ta paisuma võimalikult madala rõhuni, ning selleks ei lasta teda mitte atmosfääri, vaid seadmesse, mida nimetatakse kondensaatoriks.

Kondensaatoris hoitakse auru rõhk tunduvalt madalam kui atmosfäärirõhk. Seda saavutatakse auru temperatuuri tugeva alandamisega jahutusvee abil; on teada, et küllastatud auru rõhk oleneb tema temperatuurist; kui auru temperatuuri alandada alla 100°C , siis langeb ka rõhk alla 1 ata.

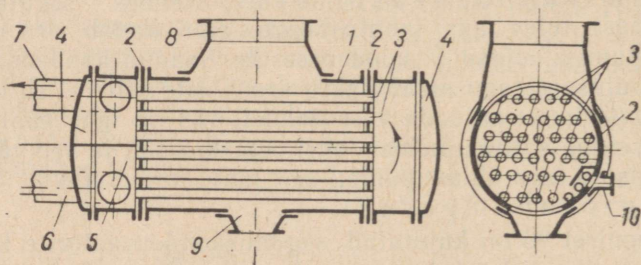
Aurumasinate jaoks kasutatakse vahel niinimetatud segamiskondensaatoreid. Nendes segatakse masinast tulev aur jahutusveega. Aur annab ära oma aurustumissjoojuse ja kondenseerub. Saadud kondensaadi ja jahutusvee segu pumbatakse ära. Peale selle tuleb kondensaatorist eemaldada vees lahustunud ja läbi ebatiheduste sinna sattunud õhk. Vahel seatakse õhu ja vee väljaimemiseks üles ühine pump; sel juhul nimetatakse neid m ä r g - õ h u p u m p a d e k s.

Joonisel 96 on kujutatud segamiskondensaatorite kaks skeemi. Skeemil *a* tulevad aur ja selle jahutamiseks määratud vesi sisse ülevalt ja liiguvad alla ühes suunas. See on pärivooluga segamiskondensaator. Auru ja vee kokkupuutepinna suurendamiseks antakse vett sisse üksikute jugadena — ja peetakse kinni spetsiaalselt ülesseatud künadel, kust ta tilgub ühelt teiselt. Alumisse ossa on paigutatud tsentrifugaalpump, mis saadud segu välja pumpab. Õhk pumbatakse välja kondensaatori ülemisest osast erilise äratõmbetoru kaudu, mis asetseb natuke madalamal vee sissevoolu kohast. Skeemil *b* on näidatud auru ja vee vastassuunaline liikumine. Ka



Joon. 96. Segamiskondensaatori skeemid.

a – päriverooluga; *b* – vastuvooluga.



Joon. 97. Auruturbiini kondensaatori löige.

siin langeb vesi jugadena. Saadud segu valgub alla ja imetakse siit välja.

Segamiskondensaatorites saadakse tavaliselt rõhk 0,1–0,15 ata, mis ongi aurumasinate jaoks nõutav.

Auruturbiinidel kasutatakse ainult pindkondensaatoreid; nendes on võimalik saada madalamat absoluutset rõhku, s. o. sügavamat vaakuumi. Niisugune kondensaator (joon. 97) koosneb silindrilisest trumlist ehk

kerest 1, mille kummaski otsas asetseb kaas 4. Trumli kummaski otsas on metallist torulauad 2, millesse on kinnitatud suur hulk torusid 3.

Turbiinist tuleb aur kondensaatorisse ava 8 kaudu ja ümbritseb torusid, milles voolab vesi. Toru 6 kaudu tuleb ruumi 5 niinimetatud jahutusvesi, mis võetakse jõest või mõnest teisest veekogust; alumiste torude kaudu liigub see parempoolse kaane poole. Siin pöörduv vesi tagasi ja liigub ülemisi torusid pidi vasakule. Torusid läbides võtab vesi aurult soojust ja aur kondenseerub, s. t. muutub veeks, mida nimetatakse kondensaadiks. Kondensaat nõrgub kondensaatori alumisse ossa ja pumbatakse siit toru 9 kaudu pumba abil välja. Aurult saadud soojust arvel soojenenud jahutusvesi väljub torust 7 ja saadetakse jõkke tagasi.

Koos auruga kaasatunud ja ebatihedustest paratamatult läbitunginud õhk on vaja välja imeda. Seda tehakse toru 10 kaudu. Toru 10 lähedases kondensaatori osas on kondenseerumata jäänud auru kogus väike, kuid õhu hulk suhteliselt suur, sest auru osarõhk on siin tunduvalt madalam kui kondensaatori ülejäänud osades. Kondensaatori seda osa nimetatakse jahutustsooniks. Ohk koos vähese hulga auruga imetakse tavaliselt välja aurujoapumba, nn. ežektori abil.

Mõnikord, kui lähedal ei ole voolavat vett, saadetakse kondensaatori jahutusvesi jahutusseadmetesse (gradiirid, tiigid, purskbasseinid) ja juhitakse pärast uuesti kondensaatorisse tagasi toru 6 kaudu.

Auruturbiinide kondensaatorites hoitakse rõhk 0,03—0,04 ata. Küllastunud auru tabelitest on näha, et rõhu 0,04 ata puhul on auru temperatuur ligikaudu 29° C.

Auru kondenseerimiseks kasutatav vesi tuleb kondensaatorisse temperatuuril ligikaudu 10° C ja lahkub temperatuuriga 20° C. Nende andmete põhjal võib arvutada vee hulka, mis kulub kondensaatorisse tuleva 1 kg auru kondenseerimiseks. Lähtume sellest, et turbiinist tuleb kondensaatorisse niiske aur parameetritel $p_2=0,04$ ata ja $x=0,94$. Soojussisaldus is-diagrammi järgi $i_2=575$ kcal/kg. Sellest aurust saadud kondensaadi soojussisaldus $i_2'=29$ kcal/kg. Seega annab 1 kg kondenseeruvat auru tsirkuleerivale jahutusveele $575-29=546$ kcal/kg soojust. Teiselt poolt saab 1 kg tsirkuleerivat jahutusvett, soojenedes 10° C võrra, soojust 10 kcal, sest vee erisoojus võr-

dub 1 kcal/kg^o C. Siit leiame, et kondensaatorisse tuleva 1 kg auru kondenseerimiseks on vaja $546:10 \approx 55$ kg jahutusvett. Teiste sõnadega kulub kondensaatoris jahutusvett kaaluliselt ligikaudu 55 korda rohkem kui turbiinist kondensaatorisse tulevat auru.

27. Kondensatsiooniturbiini aurukulu

Elektrijaamas põletatava kütuse kulu arvutamiseks peab teadma, millisel hulgal on vaja anda turbiinile auru, et saada 1 kWh elektrienergiat. Seda võib arvutada, lähtudes järgmistest kaalutlustest.

Vaatleme algul ideaalset turbiini, s. t. niisugust, milles ei esine mingit mehaanilise energia kadu ega ka soojuse kadusid ümbritsevasse keskkonda.

Iga kilogramm auru, mis turbiini tulles sisaldab soojust i_1 kcal/kg, lahkub pärast adiabaatilist paisumist turbiinist entalpiaga i_2 kcal/kg. Soojuse hulk diferentsist $h_0 = i_1 - i_2$ kcal/kg, mida nimetatakse adiabaatiliseks entalpia languks, muutub aga mehaaniliseks energiaks. Selleks et saada ideaalsest turbiinist 1 kWh elektrienergiat, mis on sama mis 860 kcal soojusenergiat, on ilmselt vaja turbiinist lasta läbi nii mitu kilogrammi auru, kui mitu korda on 860 suurem vahest $i_1 - i_2$. Kui tähistada ideaalse turbiini aurukulu d_0 , siis seega

$$d_0 = \frac{860}{i_1 - i_2} \text{ kg/kWh} \quad (88)$$

Soojusenergia muutumisega mehaaniliseks (ja seejärel elektriliseks) kaasuvad tegelikus turbiinis energia kaod. Kõigepealt muutub auru sisemise hõõrdumise tõttu ja auru hõõrdumisest vastu turbiini osade seinu osa mehaanilist energiat soojuseks, mille saab aur. Seega on turbiinist lahkuval aurul suurem entalpia kui i_2 ja nimelt i_{2t} , kus täht t näitab, et jutt käib entalpia kohta tegelikus turbiinis. Seetõttu ei saada turbiini sees 1 kg aurust mehaanilist energiat mitte $(i_1 - i_2)$ kcal/kg, vaid vähem, nimelt $(i_1 - i_{2t})$ kcal/kg. Turbiini sees saadud tegeliku töö ja ideaalse turbiini töö suhet nimetatakse sisemiseks suhteliseks kasuteguriks ja tähistatakse η_{oi} seega

$$\eta_{0i} = \frac{i_1 - i_{2t}}{i_1 - i_2} \quad (89)$$

Siit

$$i_1 - i_{2t} = (i_1 - i_2) \eta_{0i}, \quad (90)$$

ehk

$$i_1 - i_{2t} = h_0 \eta_{0i}. \quad (90)$$

Kuid kogu mehaaniline energia, mida aur toodab turbiini sees, ei anta edasi turbiini võllile, osa sellest kulub hõõrdumise ületamiseks turbiini laagrites, reguleerimis-seadmete käitamiseks jne. Seepärast antakse masina võllile edasi ainult teatud osa auru poolt toodetud energiast, mida mõõdetakse nn. mehaanilise kasuteguriga, mida tähistatakse η_m . Seega annab iga kilogramm auru turbiini võllile järgmise koguse mehaanilist energiat:

$$h_0 \eta_{0i} \eta_m.$$

See mehaaniline energia paneb pöörlema elektrigeneraatori ja muundub selles elektrienergiaks. Kuid saadud elektrienergia hulk on väiksem kui turbiinis toodetud mehaaniline energia, sest teatud osa elektrienergiat kulutatakse mähiste ja generaatori muude osade soojendamiseks. Saadud elektrienergia osa tähistame η_g ; seda nimetatakse generaatori kasuteguriks; siit leiame igast kilogrammist aurust saadava elektrienergia hulga:

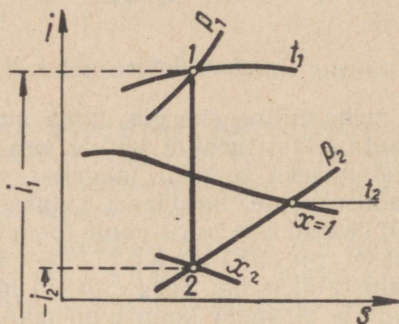
$$h_0 \eta_{0i} \eta_m \eta_g.$$

Et saada turbogeneraatorist 1 kWh elektrienergiat, ehk mis on sama mis 860 kcal soojusenergiat, tuleb kulutada niipalju kilogrammisid auru, kui palju kordi läheb $h_0 \eta_{0i} \eta_m \eta_g$ arvusse 860. Kui tähistada auru kulu 1 kWh elektrienergia tootmiseks, d_e siis

$$d_e = \frac{860}{h_0 \eta_{0i} \eta_m \eta_g} \text{ kg/kWh.} \quad (91)$$

Tavaliselt on tegurite η_{0i} , η_m , η_g väärtused auru kulu arvutamiseks antud ning $h_0 = i_1 - i_2$ võib leida *is*-diagrammist. Selleks leitakse ptk. 9 kirjeldatud viisil antud auru algpärametrite jaoks i_1 (punkt 1 joonisel 98). Selleks et leida i_2 , lähtume sellest, et auru paisumine masinas toi-

mub adiabaatilisel; nagu ptk. 9 oli näidatud, kujutatakse adiabaati *is*-diagrammis vertikaalse sirgena. Seepärast tõmbame punktist 1 joone, mis on paralleelne ordinaat-
teljega, kuni see lõikub lõpprõhu isobaariga p_2 (punkt 2),



Joon. 98. Adiabaatilise paisumise *is*-
diagramm turbiinis.

saadud punktis leiame i_2 väärtuse. Turbiini tunnine aurukulu, kui turbiini võimsus on N kW, moodustab:

$$D = Nd_e = \frac{860N}{h_0\eta_0\eta_i\eta_m\eta_g} \text{ kg/h.} \quad (92)$$

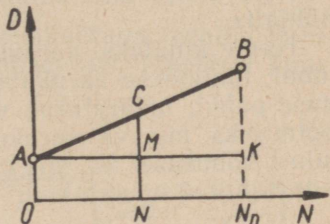
Turbiinid on arvestatud selliselt, et nad töötavad kõige ökonoomsemalt koormusega 0,8—0,9—1,0 täisvõimsusest; seda võimsust nimetatakse turbiini ökonoomseks võimsuseks. Valemi (92) järgi leitud aurukulu kehtib turbiini ökonoomse võimsuse kohta ja edaspidi tähistatakse seda aurukulu $d_{ök}$; seega

$$d_{ök} = \frac{860}{h_0\eta_0\eta_i\eta_m\eta_g} \text{ kg/kWh.} \quad (93)$$

Soojuselektrijaamades kasutatakse toitevee ettesoojen-
damiseks sageli auru, mida võetakse turbiinist (vt. edas-
pidi ptk. 32). Seda asjaolu arvesse võttes arvutatakse
aurukulu erilisel viisil. Ligikaudu on siis aurukulu
12—18% suurem sellest, mis annab valem (93). Turbiini
maksimaalset võimsust, millega ta võib töötada ükskõik
kui kaua ilma kahju kannatamata, nimetatakse **m a k s i -**
m a a l s e k s k e s t e v v õ i m s u s e k s. See võimsus on

märgitud turbiini passile ja seda nimetatakse nomi-
naal- ehk nimivõimsuseks ning tähistata-
takse N_n .

Kondensatsioon-turbiini aurukulu mitmesugustel koor-
mustel määratakse katselisel
teel. Katse tulemused väljen-
datakse DN -diagrammiga
(joon. 99), kus abstsisssteljele
kantakse koormus N ja ordi-
naatteljele aurukulu D . Dia-
grammi hõlpsamaks käsitse-
miseks ja arvutuste lihtsusta-
miseks väljendatakse aurukulu
nimetatud diagrammis
sirgena. See joonistatakse
diagrammile järgmisel viisil.
Auru kulu võimsuse N_n puhul määratakse valemiga



Joon. 99. Kondensatsioonitur-
biini aurukulu graafiline kujun-
tamine.

$$D_n = d_{\text{ök}} N_n, \quad (94)$$

mis on õige ainult ligikaudselt, sest aurukulu koor-
mustel N_n on natuke kõrgem kui $d_{\text{ök}}$. Vastavalt koormusele
 N_n kantakse diagrammi aurukulu D_n ja saadakse punkt B .
Seejärel tõmmatakse läbi punkti B sirge AB selliselt, et
see vastaks võimalikult täpselt turbiini aurukulule mitme-
sugustel katsetatud koormustel.

Sirge AB lõikumisel ordinaatteljega saadakse punkt
 A . Lõik OA näitab saadud diagrammil aurukulu koor-
mustel $N=0$. Seda aurukulu nimetatakse tühijooksu
aurukuluks. Niiviisi nimetatakse seda seepärast, et
kulutatud aurukulu läheb turbiini ringiajamiseks nor-
maalsel pöörlemiskiirusel ilma elektrienergiat tootmata.
Tühijooksu aurukulu tähistatakse D_x ja sageli väljenda-
takse x osadena aurukulust D_n normaalkoormusel N_n .
Seega saame:

$$D_x = x D_n = x d_{\text{ök}} N_n; \quad (95)$$

selles valemis tähendab x tühijooksu tegurit.

Ehitatud diagrammi abil võib aurukulu mõnel teist-
sugusel koormusel leida ordinaadi NC abil.

Tühijooksu aurukulu on ühesugune turbiini igasugusel
koormusel. Joon. AK , mis on paralleelne abstsisssteljega,

lõikab ordinaadist NC (ja igasugusest muust ordinaadist) ära lõigu NM , mis võrdub lõiguga OA . Seega näitab lõik MC auru hulka, mis kulutatakse elektrienergia tootmiseks, s. o. üle selle, mis kulutatakse turbiini ringiajamiseks «tühjalt».

Teeme kindlaks aurukulu komponendid koormuse N_n puhul; tühijooksu aurukulu, nagu ka igasuguse muu koormuse puhul, määratakse valemi (95) abil. Elektrienergia tootmiseks mineva aurukulu saame, kui üldisest aurukulust võimsusel N_n , mis määratakse valemiga (94), lahutada tühijooksu aurukulu

$$d_{\delta k} N_n - x d_{\delta k} N_n = (1-x) d_{\delta k} N_n \quad (96)$$

Seega võib aurukulu D_n kujutada kahe komponendina, millest üks näitab aurukulu tühijooksul ning teine — elektrienergia tootmiseks:

$$D_n = d_{\delta k} N_n = x d_{\delta k} N_n + (1-x) d_{\delta k} N_n, \quad (97)$$

ja igasuguse teise võimsuse N puhul

$$D = x d_{\delta k} N_n + (1-x) d_{\delta k} N. \quad (98)$$

28. Termofikatsiooniturbiinid. Auruturbiinide reguleerimise printsiibid

Selleks et tarbijaid tsentraliseeritult varustada peale elektrienergia ka soojusenergiaga, mida toodetakse tehastele ja vabrikutele mitmesuguste tehnoloogiliste protsesside jaoks ning elanikkonnale hoonete kütmiseks ja elukondlikkudeks vajadusteks, on NSV Liidus välja töötatud rida termofikatsiooniturbiinide tüüpe. Nende hulgas on eriti levinud turbiinid, milledest võetakse teatud osa auru välja pärast seda, kui see on turbiinis läbinud mõned rõhuastmed ja osaliselt paisunud. Niisuguseid turbiine nimetatakse vaheltvõtturbiinideks ja vahelt väljavõetud auru — vaheltauruks. Vahel kasutatakse kahte väljavõttu: üht tööstuslikuks otstarbeks, millest aur võetakse välja rõhul 6—16 ata, teist — kütte otstarbeks (0,7—2,5 ata). Rõhk peetakse neis väljavõttudes püsivana (mõninga lubatud hälbega määratud rõhust); seepärast nimetatakse neid väljavõtte reguleeritavateks.

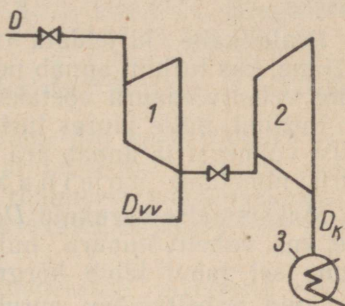
Vaheltvõetud aur saadetakse soojuse tarbijate rahul-

damiseks. Soojuse hulka, mis antakse ära tarbijale auruga ühe tunni jooksul, nimetatakse turbiini või seadme soojuslikuks võimsuseks ehk soojuslikuks koormuseks. Soojuslikku koormust mõõdetakse kcal/h või miljonites kcal/h.

Tingmärkide abil võib ühe vaheltvõtuga turbiini kujutada nii, nagu see on toodud joonisel 100. Trapets 1 kuju-

Joon. 100. Ühe reguleeritava vaheltvõtuga termofikatsiooniturbiini skeem tingmärkidega.

1 — turbiini kõrgrõhuastme osa (k. r. a.);
 2 — turbiini madalrõhu aste (osa) (m. r. a.); 3 — kondensaator; D — turbiini voolava auru kulu; D_{vv} — vaheltvõtu auru kulu; $D_k = D - D_{vv}$ — madalrõhuastmesse ja kondensaatorisse mineva auru kulu.



tab enesest turbiini kõrgrõhuastet; selles osas paisub aur algrõhult kuni rõhuni, millel toimub vaheltvõtt; trapets 2 kujutab enesest turbiini madalrõhuastet, milles aur paisub vaheltvõturõhust kuni kondensaatori 3 rõhuni.

Üldse tuleb turbiini auruhulk D ; kogu see aur paisub turbiini kõrgrõhuastmes ja arendab teatud võimsust; kõrgrõhuastmest väljumisel läheb auruhulk D_{vv} vaheltvõttesse ning ülejäänud osa läheb madalrõhuastmesse ja paisub seal, andes seejuures samuti teatud hulga elektrilist võimsust. Seega on turbiini elektriline võimsus turbiini mõlema astme elektrilise võimsuse summa.

Termofikatsiooniturbiin võib töötada mitmesugustel režiimidel. Turbiin arvutatakse selliselt, et ta annaks ettenähtud nominaalse väljavõtu D_{vv}^n puhul nominaalset võimsust N_n . Nominaalsete elektriliste ja soojuslike koormuste puhul tarvitab turbiin auru D_v kg/h; see on maksimaalne aurukulu. Selle aurukoguse läbilaskmiseks arvutatakse kogu kõrgrõhuastme labidatesüsteem. On ilmne, et sellel režiimil läheb kondensaatorisse auru

$$D_k = D_v - D_{vv}^n. \quad (99)$$

Uhtlasi peab turbiin andma nominaalset elektrilist võimsust vaheltvõtu puudumise korral. Sel juhul töötab ta nagu kondensatsiooniturbiin. Aurukulu on sel juhul turbiinis väiksem kui D_v , ja seepärast töötab kõrgrõhuaste väiksema võimsusega; järelikult peab madalrõhuaste tootma suuremat võimsust kui eelneval režiimil, ning kondensaatorisse tuleb auruhulk D_n , mis on suurem kui D_k . On ilmne, et nii madalrõhuaste kui ka kondensaator peavad olema arvestatud nimelt selle auru hulga $D_n > D_k$ läbilaskmiseks.

Peale kahe kirjeldatu võib esineda mitmesuguseid režiime, kus turbiin annab nominaalset elektrilist võimsust ning vaheltvõtuauru võetakse nullist nominaalseni.

Režiimi, mille juures turbiin toodab nominaalset elektrilist võimsust ja annab ära nominaalse hulga vaheltvõtuauru, nimetame nominaalseks režiimiks.

Maksimaalse aurukulu D_v korral võib esineda ka režiime, kus vaheltvõtuauru hulk on suurem nominaalsest. Kuna sel juhul läbib kõrgrõhuastme endine aurukogus D_v , kuid vaheltvõetav auruhulk on suurem kui D_{vv}^n , siis tuleb madalrõhuastmesse väiksem kogus auru kui valemi (99) järgi ja seepärast jääb neil juhtudel turbiini võimsus alla nominaalset. Äärmuseks niisugustel režiimidel on see, kui kogu auru kogus D_v , mis tuleb turbiini, võetakse pärast kõrgrõhuastme läbimist tööstuslikuks otstarbeks. Sel juhul töötab kõrgrõhuaste nagu iseseisev turbiin, kuid tunduvalt kõrgema väljumisrõhuga kui kondensatsiooniturbiin. Niisugust turbiini nimetatakse vasturõhuturbiiniks. On ilmne, et selle võimsus on väiksem kui turbiini mõlema astme nominaalvõimsus. Kuid praktiliselt on niisugune režiim lubamatu; läbi madalrõhuastme on vaja lasta teatud, kasvõi üsna väikene kogus auru (ligikaudu 5—8% aurukogusest D_v), et seda ventileerida. Vastasel korral eraldub turbiini pöörlevate ketaste labidate ja auru hõõrdumisest soojust ja see põhjustaks auru liikumise puudumise tõttu labidate temperatuuri ohtlikku tõusu.

Vaatleme auru kulu võrrandit kirjeldatud ühe vaheltvõtuga termofikatsiooniturbiinis. Kui $D_{vv} = 0$, siis on võrrand selline, nagu kirjeldatud 27. punktis, s. o. valemi (98) järgi:

$$D = x d_{\delta k} N_n + (1 - x) d_{\delta k} N. \quad (100)$$

Kui võtta välja auruhulk D_{vv} , siis jääb võimsus väiksemaks kui N , sest töötanud aur ei tee madalrõhuastmes tööd. Et võimsus jääks endiseks, tuleb turbiinile anda lisakogus auru, mis toodaks paisumisel niisuguse võimsuse, milline jäi tootmata madalrõhuastmes selle auru poolt, mis läks kaasa vaheltvõtuaauruga. On ilmne, et täiendav auru kogus, paisudes kogu turbiinis, ning mitte ainult madalrõhuastmes, nagu väljavõetud kogus, oleks sellest väiksem ja moodustaks seega ainult teatud β osa sellest, s. o. täiendav auru hulk oleks βD_{vv} , kus $\beta < 1$. Seega moodustab termofikatsiooniturbiini aurukulu

$$D = x d_{\delta k} N_n + (1 + x) d_{\delta k} N + \beta D_{vv}. \quad (101)$$

Tegurit β nimetatakse puudujäägi koefitsiendiks ja ta suurust määratakse erilise arvutusega. β suurus oleneb auru algpärametritest ning rõhkudest kondensaatoris ja vaheltvõtul. NSV Liidus toodetavatel turbiinidel on teguri β väärtus 0,3—0,6.

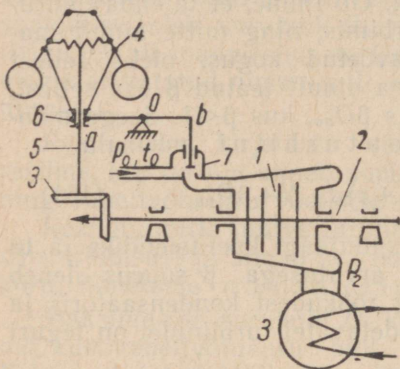
Suurtes elektri jaamades toodetakse tavaliselt elektri vahelduvvoolu, mille sagedus on 50 perioodi sekundis. Selleks peab generaatori võll tegema 50 pööret sekundis ehk 3000 p/min. Tavaliselt ühendatakse turbiini- ja generaatorivõll omavahel siduriga, nii et üks on teise pikenduseks; seega peab ka turbiin, sõltumata koormusest, tegema 3000 pööret minutis; sellest pöörlemiskiirusest kõrvale kalduda tohib ainult vähe.

Selleks et säilitada pöörlemiskiirust, peab turbiini poolt toodetav võimsus vastama tarbija koormusele. Kui seda tasakaalu rikutakse, näiteks koormuse langemisega, siis püüab turbiini pöörlemiskiirus suurenedä. Pöörlemiskiiruse taastamiseks tuleb vähendada auru hulka. Seega peab vajaliku pöörete arvu säilitamiseks turbiinisse antavat auru hulka reguleerima.

Automaatse reguleerimise lihtsaim skeem on näidatud joonisel 101. Sellel on 1 — auruturbiin; 2 — turbiini võll; 3 — kondensaator; 4 — tsentrifugaalregulaator.

Vaatleme selle töötamist. Suurenegu tarbija koormus. Võlli pöörlemiskiirus hakkab siis vähenema. See põhjustab tsentrifugaalregulaatori 5 võlli pöörlemiskiiruse aeglustumise, ja seetõttu langevad selle vihid madalamale ning koos nendega laskub madalamale ka muhv 6. Hoob ab pöörduv ümber liikumatu punkti O . Punkt b tõuseb,

mistõttu auru läbipääs klapi 7 all suureneb; turbiini voolava auru hulka suureneb ja selle tulemusena pöörete arv, olgugi et see natuke alanes, jääb üldiselt püsima ja vastab turbiini uuele koormusele, erinedes natuke 3000 p/min.



Joon. 101. Otsese reguleerimise skeem.

1 — auruturbiin; 2 — turbiini võll; 3 — kondensaator; 4 — tsentrifugaalregulaator; 5 — regulaatori võll; 6 — regulaatori muhv; 7 — reguleerklapp.

Auru läbivoolu-ristlõike muutumisel ei muutu ainult auru kogus, vaid ka $h_0 = i_1 - i_2$, s. o. auru iga kilogrammi töö. See toimub seepärast, et kui auru läbib mõnd kitsendatud ristlõiget, siis auru rõhk langeb. Seda nimetatakse auru muljumiseks ehk drosseldamiseks.

Turbiini täiskoormusel on klapp avatud täielikult, nii et ristlõike pind auru läbipääsuks on maksimaalne. Seejuures läbib klappi arvutuslik aurukogus.

Koormuse vähenemisel läheb klapp koomale; selle tulemuseks on auru hulga

vähenedamine ja koos sellega tema drosseldamine, mistõttu väheneb 1 kg auru töö. Nende kahe toime koostamisel väheneb turbiini poolt toodetud võimsus. Niisuguse reguleerimisviisi puhul, mida nimetatakse drosselreguleerimiseks, muljutakse kogu auruhulka, ja seepärast ei ole niisugune reguleerimismeetod ökonoomne.

Kirjeldatud skeemil mõjus regulaator hoova *ab* abil otseselt reguleerimisklapile. Niisugust viisi nimetatakse otseseks reguleerimiseks ning seda võib kasutada ainult väikese võimsusega turbiinide (50—60 kW) reguleerimisel. Võimsamates turbiinides on klapi tõstmiseks vajalik jõud niivõrd suur, et tuleb kasutada erilist lisamehhanismi (servomootorit), mis tõstab klappi vastavalt pöörete arvu muutumisele.

Et mitte kõike turbiini voolavat auru muljuda, jaotatakse esimese astme düüsid reaks gruppideks; düüside gruppidel on oma eraldi kambrid, millesse juhitakse auru läbi üksikute reguleerimisklappide. Täiskoormusel on kõik

düüsid avatud. Koormuse vähenemisel vähendatakse auru hulka ainult ühes düüsis ja ainult selles toimub auru muljumine, kuna kõik ülejäänud düüsid on täiesti avatud. Edasisel koormuse langemisel suletakse see klapp täielikult ja osaliselt avatuks jääb järgmine klapp, ning ainult selles toimub auru muljumine jne. Niisugusel reguleerimise moodusel toimub reguleerimine mitme reguleerimisklapi abil ja seda nimetatakse düüs-reguleerimiseks. Koormuse muutumisel toimub auru muljumine ainult ühes klapis; ülejäänud klapid on kas avatud või suletud täielikult.

Mõlema reguleerimise viisi, drossel- ja düüsreguleerimise puhul lastakse mõnikord aur läbi kõigi düüsides esimesse astmesse ainult turbiini ökonoomsel võimsusel, Edasise võimsuse kasvu puhul kuni nominaalseni antakse osa auru ühte järgmisesse atmesse. Saadakse niinimetatud *baipass-reguleerimine*.

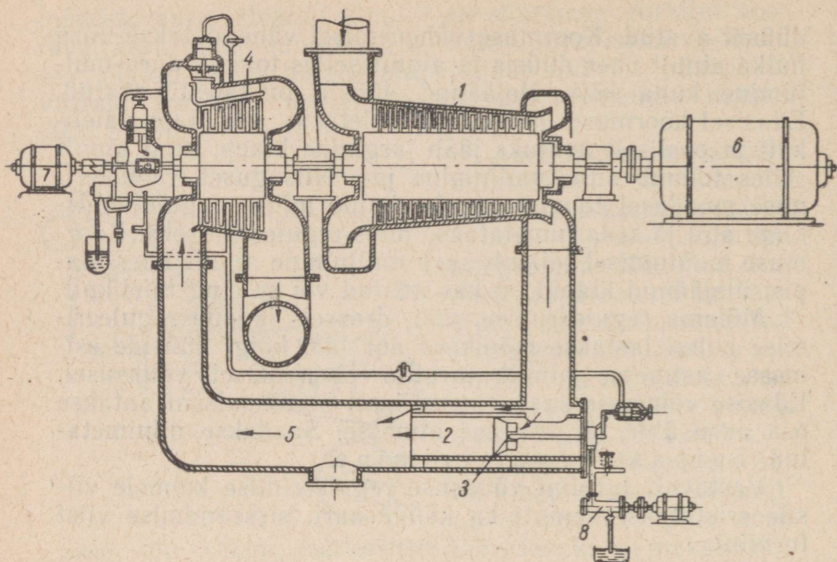
Vastavalt turbiini võimsuse reguleerimise kolmele viisile eristatakse samuti ka kolme auru sisseandmise viisi turbiini.

29. Gaasiturbiinid

Gaasiturbiin, nagu sise põlemismootorgi, kasutab töötavaks kehaks ideaalset gaasi — kütuse põlemissaadusi. Gaasiturbiinil ei ole sise põlemismootori puudusi, mida põhjustab kolvi edasi-tagasi liikumine.

Gaasiturbiini agregaat koosneb gaasiturbiinist 4 ja kompressorist 1, mis paiknevad ühisel võllil. Niisuguse agregaadid skeem on näidatud joonisel 102.

Tegelikult on soojusjõumasinaks turbiin ise. Kompressor on abimasinaks, mille ülesanne seisab selles, et võtta ümbritsevast keskkonnast põlemiseks vajalikku õhku, seda kokku suruda ja anda see kõrge rõhu all agregaadid põlemiskambrisse 2. Sinnasamasse antakse pumbaga ka vedelkütust (või erilise gaasikompressori abil gaasilist kütust). Kambris toimub kütuse põlemine, mille tulemusel saadakse töötav keha — põlemissaadused kõrgel temperatuuril (1200—1500° C), mis ei ole aga vastuvõetav gaasiturbiini metall-labidate töö tingimuste poolest, sest esimese rea labidatel tuleks töötada kogu aeg sellel temperatuuril ilma niisuguse jahutuseta, nagu see on võimalik



Joon 102. Gaasiturbiin-agregaadi skeem.

- 1 — aksiaalkompressor; 2 — põlemiskamber; 3 — pihusti; 4 — gaasiturbiin;
 5 — gaasikanal; 6 — elektrigeneraator; 7 — käivitus-elektrimootor;
 8 — kütusepump.

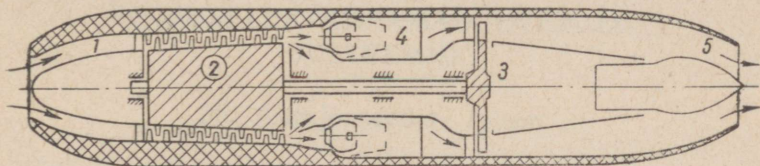
sisepõlemismootoris. Labidate kindla töö võimaldamiseks segatakse põlemiskambriest väljuvad põlemissaadused kompressorist tuleva külma õhuga. Saadud gaasisegu, millel on juba vastuvõetav temperatuur ($600\text{--}800^\circ\text{C}$), tuleb gaasiturbiini 4, paisub düüsidest ning annab seejärel oma kineetilise energia labidatele. Töötanud gaasid lahkuvad turbiinist väljaviigu toru kaudu. Osa turbiinis toodetud mehaanilist energiat kasutatakse õhu kokkusurumiseks kompressoris. Ülejäänud osa kasutatakse elektrigeneraatori või mingi muu masina ringiajamiseks.

Tahke kütuse kasutamine on kirjeldatud skeemi puhul tunduvalt raskem, sest koos põlemisgaasidega võib kaasa lennata kütuse tuhk, mis turbiini labidaid kulutab ja nad kiiresti kõlbmatuks muudab.

Gaasiturbiinil on auruturbiiniga võrreldes rida eeliseid: langeb ära vajadus aurukatla ja kondensaatori järele, ning seepärast on kogu seade kergem ja väiksemate mõõtmetega. Ökonoomsusest võivad gaasiturbiiniseadmed ületada väiksemaid aurujõuseadmeid, eriti näiteks vedurite

omi. Seepärast omavad gaasiturbiinid perspektiivi leida rakendamist niisugustel raudtee lõikudel, kus kasutatakse vedelkütust.

Seetõttu, et viimastel aastatel üha rohkem ja rohkem hakatakse energeetikas tarvitama vedelaid ja gaasilisi kütuseid, võib oodata gaasiturbiinide kasutusele võtmist ka elektrijaamades. Juba käesoleval ajal kasutatakse gaasiturbiine nende tööstusettevõtete elektrijaamades, kus tehnoloogilistel protsessidel saadakse suurel hulgal põlevgaasi, mis kõlbab gaasiturbiini kütuseks.



Joon. 103. Turboreaktiivse lennukimootori skeem.

1 — difuusor; 2 — kompressor; 3 — gaasiturbiin; 4 — põlemiskamber; 5 — väljavooludüüs.

Gaasiturbiini rakendamiseks elektrijaamades on perspektiive ka neil juhtudel, kui kasutatakse söe maalust gaasistamist (vt. p. 17). Maa-alusel gaasistamisel saadud võrdlemisi väikese kütteväärtusega gaasi ei tasu torusid mööda kaugematele tarbijatele saata, vaid kasutada gaasiturbiini kütusena tootmiskoha lähedal.

Rida instituute ja tehaseid NSV Liidus (Nevski Masinaehitustehas, Leningradi Metallitehas, Harkovi Turbiinitehas jt.) töötavad probleemide lahendamiseks, et kasutada gaasiturbiine elektrijaamades.

Perspektiivid elektrijaamades gaasiturbiini kasutamiseks avanevad aga alles siis, kui leitakse viis tahke kütuse põlemissaaduste täielikuks puhastamiseks tuhast.

Kõige enam on gaasiturbiin levinud lennuasjanduses, olles ühe reaktiivmootorite tüübi koostisosaks. Niisuguse reaktiivmootori skeem on näidatud joonisel 103. Selle tööprintsip seisab järgmises.

Õhk tuleb sisse vasakult läbi kanali 1 kompressorisse 2, mis pannakse pöörlema gaasiturbiini 3 poolt. Kompressoris kokkusurutud õhk saadetakse põlemiskambrisse 4, kuhu antakse ka kütus. Saadud

põlemissaadused lähevad kompressorit ringi ajava turbiini labidate labadele. Turbiinist väljumisel omavad gaasid veel palju energiat. Düüsi 5 väljudes tekitavad nad reaktiivjõu, mis on suunatud vastupidi gaaside liikumissuunale. Selle reaktiivjõu toimele saadaksegi kogu aparraadi (lennuki, mürsu jne.) kulgev liikumine.

NELJAS PEATÜKK
SOOJUSELEKTRIJAAAMAD, ENERGIA-
SÜSTEEMID

30. Aurujõuseadme skeem

Iga aurujõujaam koosneb põhiliselt katlamajast, masinasaalist ja elektri-jaotusseadmetest. Peale selle on ruumid abiseadmetele — pumpadele, toitevee puhastusseadmetele, paakidele, tuha eemaldamise ning kütuse etteande-seadmetele.

Igal elektrijaamal on kütuseladu.

Joonisel 104 on lihtsustatud viisil kujutatud auruturbiiniga elektrijaama skeem. Jälgime sellel elektrienergia tootmist.

Laost või vahetult kaevandusest (sageli ka otse raudteevagunitest või vagonettidest) antakse kütus punkrisse, kust see torujuhtme kaudu veskisse läheb. Veskis peenestatud kütuse tolmu puhutakse õhukuumendist tuleva kuumu õhuvooluga koldesse.

Kuumad gaasid, temperatuuriga 1200—1600°, mis saadakse kütuse põlemisel, uhuvad katlatorusid ja seejärel ülekuumendit. Katlast väljumisel on gaasidel veel küllalt kõrge temperatuur (350—450°). Selleks et kasutada nende gaaside soojust, on üles seatud vee ökonoomaier. See koosneb reast torudest, milles voolab toitevesi enne katlasse minekut. Kuumad gaasid liiguvad väljaspool torusid ja kuumutavad vett, ise seejuures aga jahtuvad. Paremaks kütuse põlemise tagamiseks tuleb kuumutada ka koldesse minevat õhku. Selleks on üles seatud õhu-eelsoojendi. Õhk surutakse ventilaatori abil läbi õhu-eelsoojendi koldesse. Suitsugaasid, läbinud gaasipuhastus-seadmed, kus neist eraldatakse

tuhk, imetakse välja tõmbeventilaatori abil ja juhatakse korstnasse.

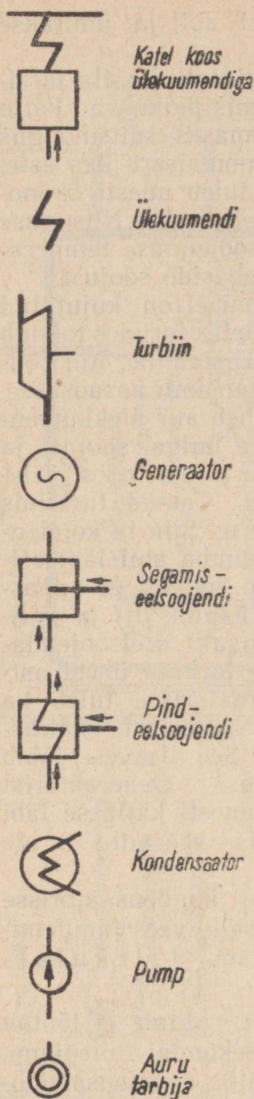
Uutes suurtes katelagregaatides jaotatakse katla järelpinnad, s. o. õhu- ja vee-eelsoojendid, mis paiknevad katla viimases suitsukäigus, astmeteks; viimases suitsukäigus asetseb tavaliselt kõige alguses ökonomaiseri üks aste, seejärel õhu-eelsoojendi aste, seejärel tuleb uuesti ökonomaiseri aste ja lõpuks õhu-eelsoojendi aste. Niisuguse asetuse sihiks on kõrgendada õhu eelsoojenduse temperatuuri ja paremini kasutada väljuvate gaaside soojust.

Jälgime auru ja vee liikumist. Joonisel on kujutatud ühe trumliga veetorukatel. Selle torudes toimub gaasidelt võetava soojuse arvel vee aurustamine. Aur tõuseb mööda torusid üles ja koguneb katlatrumli auruosasse. See on küllastunud aur. Siit läheb aur ülekuumendisse, kus ta saab gaasidelt täiendava hulga soojust ja muutub seejuures ülekuumendatud auruks. Ülekuumendist juhitakse aur turbiini. Teinud turbiinis tööd, läheb aur kondensaatorisse. Siin ta kondenseerub ja suunatakse kondensatsioonipumba abil läbi eelsoojendi deaeraatorisse, mis on selleks, et puhastada vett selles lahustunud gaasidest (hapnik jt.) ja säilitada selles toitevee tagavara (toiteveepaak). Eelsoojendamiseks kasutatakse auru, mis võetakse turbiini ühest astmest (vt. edaspidi punkt 32). Deaeraatorisse tuleb ka lisavesi, mis kompenseerib mitmesugustest ebatihedustest tingitud vee ja auru kadusid. See lisavesi läbib eelnevalt vee puhastusseadme. Deaeraatorist pumbatakse toitevesi toitepumba abil uuesti katlasse läbi kõrgrõhu-regeneraatori, mis skeemil ei ole näidatud.

Auru kondenseerimiseks võetakse kondensaatorisse jahutusvett jõest, järvest või tiigist; selle vee pumpamiseks on üles seatud jahutusveepump, nn. tsirkulatsioonipump.

Auru ja vee liikumise kirjeldusest nähtub, et töötav keha liigub kogu aeg mööda kinnist teekonda: toitepump, ökonomaiser, katel, turbiin, kondensaator, kondensatsioonipump, toitepaak (deaeraator) jne.

Turbiiniga ühisele völlile on paigutatud elektri-voolu-generaator. Selles toodetud elektrienergia läheb elektri-jaotusseadmetele; siin asuvad kogumislaidid, milledele tuleb vool kõikidest generaatoritest.



Joon. 105. Aurujõujaama skeemi tingmärgid.

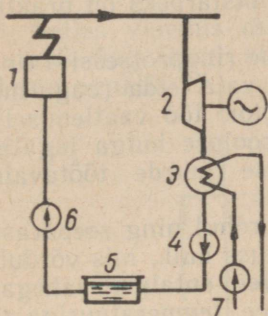
Kui kasutada neid tingmärke, mis on toodud joonisel 105, siis on lihtsaimal aurujõuseadmél joonisel 106 toodud kuju.

Siin on 1 — katel koos ülekuumendiga; 2 — turbiin elektri- voolu-generaatoriga (turbogeneraator); 3. — kondensaator; 4 — kondensaadi pump; 5 — toiteveepaak (deaeraator); 6 — toitepump; 7 — tsirkulatsiooni-pump. Nooltega on näidatud vee, auru ja kondensaadi liikumissuunad.

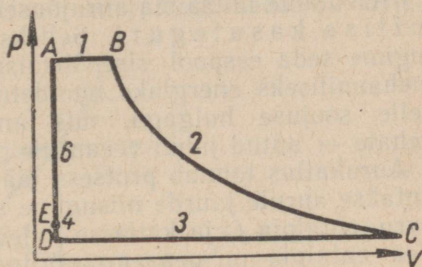
See skeem on lihtsustatud — sellel ei ole näidatud lisavee puhastusseade jm.

Vaatleme nüüd, mis toimub töötava kehaga, kui see läbib kirjeldatud agregaadid. Nagu varemgi, jälgime seda p - v -diagrammil (joon. 107). Iseloomustagu punkt E vee olekut kui vesi asub toitevee paagis. Siit tuleb vesi toitepumpa, kus ta rõhk tõstetakse katla auru rõhuni (praktiliselt isegi natuke üle selle). Vee maht seejuures ei muutu, sest vesi ei ole kokkusurutav. Joon EA joonisel 107 näitab rõhu suurenemist toitepumbas. Edasi läheb vesi katlasse, kus ta muudetakse auruks ja auru kuumendatakse — joon AB . Seejuures maht suureneb, rõhk aga jääb püsivaks. Katlast läheb aur masinasse (turbiini); selles toimub tema paisumine — joon BC . Rõhk seejuures langeb. Turbiinist läheb aur kondensaatorisse, kus aurult konstantse madala rõhu juures võetakse soojust ära. Aur seejuures kondenseerub, seda protsessi kujutab joon CD . Konden-

saat läheb kondensaadipumpa, milles tema rõhku tõstetakse — joon DE. Numbritega on joonisel 107 näidatud need agregaadid, mis on kujutatud joonisel 106.



Joon. 106. Aurujõujaama skeem tingmärkidega.



Joon. 107. Elementaarse aurujõujaama ringprotsess.

Kirjeldatud jõujaam on lihtsaim aurujõuseade. Töötava keha oleku ringprotsessi niisuguses lihtsas aurujõuseadmes (ilma vee eelsoojendusega turbiinist võetava vahelt-auruga) nimetatakse Rankine ringprotsessiks. Kaasaegsetes soojusjõujaamades on kasutusele võetud rida mooduseid jõuseadme ökonoomsuse tõstmiseks, millega kaasas käib ka keerukam ringprotsess. Neid vaadeldakse edaspidi.

31. Aurujõuseadme ökonoomilised karakteristikad. Soojusbilanss, aurukulu, kütusekulu

Eelmises punktis vaatlesime kondensatsiooniturbiiniga seadistatud elektrijaama tööd. Kondensatsiooniturbiinid on määratud ainult elektrigeneraatorite pöörlema panemiseks kulutatava mehaanilise energia tootmiseks. Pärast turbiinist lahkumist juhitakse äratöötanud aur kondensaatorisse, kus ta annab oma aurustumissoojuse jahutusveele. Niisuguseid aurujõujaamu nimetatakse kondensatsioonielektrijaamadeks (vene k. lüh. КЭС).

Selleks et 1 kg auru teeks turbiinis võimalikult palju tööd, hoitakse niisuguse elektrijaama kondensaatoris rõhk

võimalikult madal (sügav vaakuum). Turbiinide kondensaatorites võib saada rõhku ligikaudu $p_2=0,03-0,04$ ata. Niisuguse madala rõhu juures on lahkuva tsirkulatsioonivee temperatuur madal (umbkaudu 20°C) ja tema kasutamine edasiselt mingiks soojenduse otstarbeks on praktiliselt võimatu.

Arvutame lihtsaima aurujõuseadme ringprotsessi termilise kasutegur. Selleks on vaja leida (nagu me tegime seda eespool sise põlemismootori töö vaatlemisel) mehaaniliseks energiaks muudetud soojuse hulga jagatis selle soojuse hulgaga, mis antakse juurde töötavale kehale — antud juhul veeaurule.

Aurukatlas toimub protsess jääval rõhul ning seepärast antakse aurule juurde niisugune soojuse hulk, mis võrdub auru entalpia i_1 ja katlasse tuleva vee entalpia vahega. Vee entalpia on peaaegu võrdne vee temperatuuriga t ; seega on antud 1 kg katlas olevale töötavale kehale soojust

$$q_1 = i_1 - t \text{ kcal/kg.}$$

Ideaalses masinas toimub auru adiabaatiline paisumine; olgu auru entalpia paisumise lõpul i_2 . Selles olekus tuleb aur kondensaatorisse, kus ta muutub vedelikuks, mille temperatuur on t . Kuna ka kondensaatoris toimub protsess jääval rõhul, siis võib ka siin äraantud soojust vaadelda kui entalpiate vahet, s. o.

$$q_2 = i_2 - t \text{ kcal/kg.}$$

Siin on q_1 soojuse hulk, mis saadi kuumalt allikalt, s. o. katlas kütuse põlemisel tekkinud kuumadelt gaasidelt; q_2 on soojuse hulk, mis antakse ära termodünaamika teise seaduse järgi külmale soojuseallikale, s. t. jahutusveele kondensaatoris. Mehaaniliseks tööks muudetud soojuse hulk võrdub vahega $q_1 - q_2$; siin võrdub see vahe:

$$q_1 - q_2 = (i_1 - t) - (i_2 - t) = i_1 - i_2 = h_0, \quad (102)$$

s. o. soojuse hulk, mis lihtsaimas aurujõuseadmes adiabaatilise protsessi puhul muudetakse mehaaniliseks energiaks, on võrdne töötava keha entalpiate vahega protsessi alguses ja lõpul.

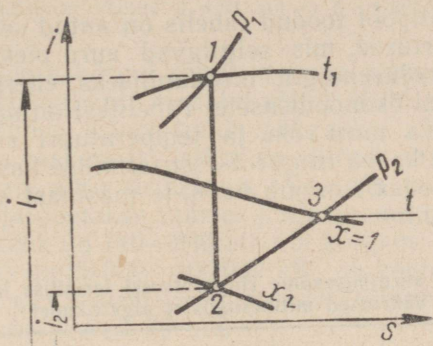
Meenutades, et aurukatlas 1 kg töötavale kehale juurdeantud soojus on

$$q_1 = i_1 - t \text{ kcal/kg,}$$

leiaime, et otsitav jagatis ehk termiline kasutegur η_t väljendub järgmiselt:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} \quad (103)$$

Selles valemis esinevate i_1 ja i_2 väärtused võib määrata i -diagrammi abil (joon. 108), nagu seda oli kirjeldatud punktis 27.



Joon. 108. Auru olekuparameetrite määramine lihtsaimas aurujouajas.

Valemis oleva t väärtuse võib leida, kui isobaari p_2 punktist 2 minna mööda kõverat kuni ülemise piirkõverani (punkt 3) ja lugeda ära seda punkti läbiva isotermi väärtus. See on t väärtus. Teisiti võib t väärtuse leida küllastanud auru tabelist. Vaatleme, millistest teguritest on lihtsaima aurujouuseadme termiline kasutegur, mis on määratav valemiga (103). Masinasse mineva auru algentalpia i_1 on auru olekust, s. t. auru rõhust p_1 ja temperatuurist t_1 . Auru lõplik entalpia i_2 on sellest, millise lõpprõhuni paisub aur turbiinis; rõhust p_2 on ka kondensaatoris kondenseeruvast aurust saadava kondensaadi temperatuur t . Seega me näeme, et η_t väärtus on sellest, milline rõhk ja temperatuur on aurul algolekul, s. o. masinasse sisenemisel, ja milline rõhk on aurul väljumisel masinast, s. o. rõhk kondensaatoris.

Ei ole raske kindlaks teha, kuidas nimelt mõjutavad auru algolek ja rõhk masinast väljumisel ringprotsessi

kasutegurit. Selleks on vaja arvutada selle väärtused rea juhtude puhul. Et seda selgitada, kuidas mõjub algrõhk termilise kasuteguri suurusele, tuleb arvutada kasuteguri väärtused real juhtudel, mis erinevad ainult algrõhu poolest. Auru temperatuuri mõju väljaselgitamiseks tuleb teha samasuguseid arvutusi, muutes temperatuuride väärtusi. Samuti tuleb toimida, kui soovitakse leida auru (s. t. turbiinist väljuva ja kondensaatorisse siseneva auru) lõpprõhu mõju.

Kolmes allpool toodud tabelis on antud sel viisil arvutatud η_t väärtused, mis selgitavad auru oleku parameetrite mõju soojusenergia mehaaniliseks energiaks muutmise protsessi ökonoomsusele. Tabelitest on näha, et masinasse siseneva auru rõhu ja temperatuuri suurendamine toob enesega kaasa ringprotsessi termilise kasuteguri suurenemise; soodsalt mõjub ka η_t -le masinast väljuva auru rõhu vähenemine.

Lihtsaima aurujõuseadme ringprotsessi termilise kasuteguri väärtused mitmesugustel algrõhkudel¹

p_1 ata	15	25	50	75	100	125
η_t	0,340	0,368	0,388	0,404	0,414	0,420

Kõigil juhtudel on võetud $p_2=0,04$ ata ja $t_1=400^\circ\text{C}$.

Lihtsaima aurujõuseadme ringprotsessi termilise kasuteguri väärtused mitmesugustel algtemperatuuridel

t_1 °C	300	350	400	450	500	550
η_t	0,374	0,380	0,388	0,395	0,401	0,408

Kõigil juhtudel on võetud: $p_1=50$ ata ja $p_2=0,04$ ata

Selleks et suurendada lihtsas aurujõuseadmes soojuse tööks muutmise ökonoomsust, on vaja, et aur läheks masi-

¹ Termilise kasuteguri väärtused auru kõrgemate parameetritega ringprotsessidel vt. näites 24.

Lihtsaima aurujõuseadme ringprotsessi termilise kasuteguri
väärtused mitmesugustel lõpprõhkudel

p_2 ata	0,04	0,1	0,8	1,2	2	3	5	8
η_t	0,388	0,363	0,295	0,277	0,254	0,222	0,207	0,178

Kõigil juhtudel on võetud $p_1=50$ ata ja $t_1=400^\circ\text{C}$.

nasse võimalikult kõrgel rõhul ja temperatuuril ning väljuks sellest võimalikult madalal rõhul. Kuid algparameetrite suurendamisel esineb tunduvalt raskusi. Mida kõrgem on rõhk, seda raskem ja kallim on ehitada masinat, aurukatelt ja kogu auru armatuuri (ventiile, siibreid jne.). Käesoleval ajal loetakse suurtes jõujaamades otstarbekaks, kui auru algrõhk on 140—240 ata või kõrgem. Turbiinidele, mille võimsus on 25 000—100 000 kW, on võetud standardrõhuks 90 ata. Väiksema võimsusega turbiinide jaoks on standardrõhuks võetud 35 ata.

Mida kõrgem on temperatuur, seda raskem on valida metalli, mis ei oksüdeeruks ja säilitaks oma tugevuse kõrgetel temperatuuridel. Tuleb kasutada rauasulameid, milles on suurel hulgal kalleid ja defitsiitseid lisandeid. Praegusel ajal on meie elektriijaamades kõige kõrgemaks kasutatavaks ülekuumendatud auru temperatuuriks 570°C .

Ülekuumendatud auru temperatuur turbiini sisenemisel rõhul 90 ata on kindlaks määratud 500°C ning rõhul 35 ata — 435°C .

Neid parameetrite väärtusi ei saa lugeda piirväärtusteks. Et saada suuremat ökonoomsust, juurutavad praegu nõukogude teaduslikud asutused ja tehased ülikõrgetel auruparameetritel töötavaid aurujõuseadmeid (rõhud kuni 300 ata ning temperatuurid $550\text{—}650^\circ\text{C}$ ja kõrgemad). NSV Liidus KP XX kongressi direktiivides on kuuenda rahvamajanduse arendamise viisaastaku kohta öeldud: «Võtta tööstuses kasutusele turbiiniplokid võimsusega 220 000 kW rõhul 220 ata ja temperatuuriga 600°C . Lasta käiku turbiiniplokid võimsusega 300 000 kW aururõhul kuni 300 ata ja temperatuuril 650°C .»

Minimaalne rõhk, mida turbiini kondensaatoris kasutatakse, on 0,03 ata. Rõhu edasisel alandamisel muutub auru erimaht väga suureks: see toob enesega kaasa tur-

biini labidate mõõtmete ülemäärase suurenemise ning sageli ei ole ka jahutusvee temperatuur küllalt madal ega võimalda seega rõhku kondensaatoris rohkem alandada.

Vaatleme nüüd kondensatsioonielektrijaama soojusbilanssi. Võtame näiteks lihtsa aurujõuseadme termilise kasuteguri. Seade töötab järgmiste auruparameetritega (joon. 109):

algparameetrid $p_1=100$ ata, $t_1=500^\circ\text{C}$
 lõpprõhk $p_2=0,04$ ata.

Leiame is-diagrammi järgi:

$$\begin{aligned} i_1 &= 807 \text{ kcal/kg;} \\ i_2 &= 475 \text{ kcal/kg;} \\ t &= 28,6^\circ \text{C.} \end{aligned}$$

Nende andmete põhjal leiame, et turbiini tulevast 1 kg aurust muutub mehaaniliseks tööks soojuse hulk, mis võrdub

$$h_0 = i_1 - i_2 = 807 - 475 = 332 \text{ kcal/kg.}$$

Katlasse on 1 kg auru kohta viidud soojust

$$i_1 - t = 807 - 28,6 = 778,4 \text{ kcal/kg.}$$

Kirjeldatud seadme termiline kasutegur on siit järgmine:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} = \frac{332}{778,4} = 0,427 = 42,7\%$$

(auru standard-parameetrite puhul on termiline kasutegur toodud näites 24).

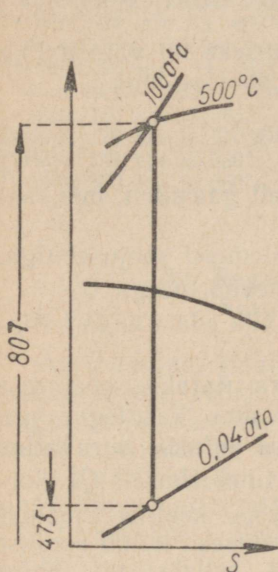
Võib öelda, et, olenevalt auru olekuparameetritest, ei ületa termilise kasuteguri väärtused üldiselt 40—45%. See tähendab, et umbkaudu 55—60% auru soojusest ei ole termodünaamika teise seaduse põhjal võimalik muuta mehaaniliseks energiaks ja läheb selles mõttes kaduma. Jahutusvesi, mis väljub kondensaatorist ja kannab enesega selle soojuse ära, on madala temperatuuriga ega ole sellepärast kasutatav ka soojendava kehana.

Kui siia juurde arvestada ka kaod katlamajas ja masinasaalis, siis näeme, et lihtsas kondensat-

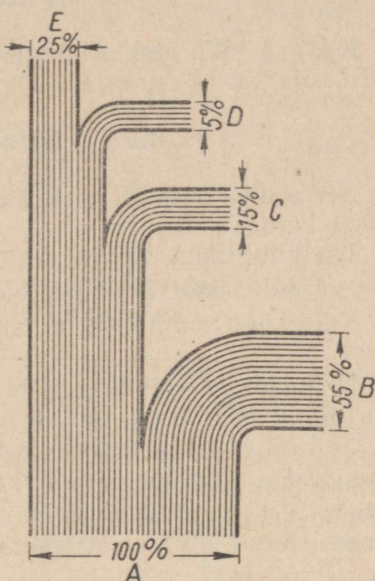
sioon-aurujõuseadmes kasutatakse kütuse põletamisel saadud soojusest 18—32%.

Soojusbilanss oleks ligikaudu järgmine: umbkaudu 55% kulub kondensaatori jahutusveega, 15% moodustavad kaod katlamajas, 5% masinasaalis ja ainult 25% kulutatakse elektrienergia saamiseks.

See bilanss on skemaatiliselt näidatud joonisel 110. Siin on kujutatud soojuse peamised voolud (*B, C, D, E*), milleks jaguneb summaarne kütuse põlemisel eraldunud soojusehulk *A*.



Joon. 109. Adiabaatiline protsess *is*-diagrammis.



Joon. 110. Aurujõujaama soojusbilanss.

Auru kulu 1 kWh elektrienergia tootmiseks ideaalses seadmes, mis töötab elementaarse aurujõuseadme ringprotsessi järgi, võib leida valemiga (88) ning tegeliku seadme puhul valemiga (91).

Kütuse kogust, mis on vaja aurukatla koldes põletada selleks, et saada 1 kWh elektrienergiat, nimetatakse kütuse erikuluks. See suurus on elektrienergia tootmise tähtsaim näitaja. Kütuse erikulu leidmiseks peab kõi-

gepealt teadma auru kulu $d_{\text{ök}}$ ühe kWh saamiseks, mis arvutatakse valemiga (91), kas turbiini või aurumasina erilisel katsetamisel saadud andmete põhjal. Arvutame, kui palju tuleb aurukatlas kulutada soojust, et saada $d_{\text{ök}}$ kg/kWh auru.

Üks kilogramm toitevett tuleb katlasse entalpiaga, mis on arvuliselt võrdne vee temperatuuriga t_v , ning aur väljub katlast entalpiaga i_1 . Järelikult selleks, et saada katlas 1 kg auru, on vaja katlasse tulevale 1 kg veele anda soojust

$$i_1 - t_v \text{ kcal/kg.}$$

Kuna 1 kWh elektrienergia saamiseks on vaja $d_{\text{ök}}$ kg auru, siis katlas on vaja veele anda soojuse hulk

$$d_{\text{ök}} (i_1 - t_v) \text{ kcal/kWh.}$$

See soojus antakse veele kuumadelt gaasidelt, mis saadakse kütuse põlemisel.

Iga kilogramm kütust eraldab põlemisel soojusehulga, mis võrdub tema tarbimiskütuse kütteväärtusega Q_k^t .

Kuid kogu soojust Q_k^t ei ole võimalik edasi anda katla veele.

Nagu oli näidatud punktis 20, kasutatakse soojusest ära ainult osa, mida näitab katelseadme kasutegur η_{ks} .

Selleks et leida soojuse hulka, mis antakse aurukatlas edasi veele 1 kg kütuse põletamisel, tuleb ilmselt Q_k^t korrutada η_{ks} -ga ja aur saab siis $Q_k^t \eta_{ks}$ kcal/kg soojust juurde. Kui 1 kWh elektrienergia saamiseks kulub soojust $d_{\text{ök}} (i_1 - t_v)$ kcal, siis kulub ilmselt selleks nii palju kilogramme kütust, kui mitu korda $Q_k^t \eta_{ks}$ on suurem korutisest $d_{\text{ök}} (i_1 - t_v)$.

Kui nüüd kütuse kulu 1 kWh kohta tähistada $b_{\text{ök}}$, siis saame:

$$b_{\text{ök}} = \frac{d_{\text{ök}} (i_1 - t_v)}{Q_k^t \eta_{ks}} \text{ kg/kWh.} \quad (104)$$

Järgnevas tabelis on toodud kasuteguri ligikaudsed väärtused ja tingkütuse ($Q_k^t = 7000$ kcal/kg) kulud mitmesuguste aurujõuseadmete kohta.

Jõuseade	Elektrijaama kasutegur %	Tingkütuse erikulu kg/kWh
Lokomobiil, 10—12 ata, ilma kondensaatorita	5—6	2,46—2,04
Lokomobiil, 12—15 ata, kondensaatoriga ja ökonomaiseriga	12—14	1,02—0,88
Turbiin, 12—15 ata ja 350°C, väikese võimsusega	14—15	0,88—0,82
Turbiin, 29 ata ja 400°C, keskmise võimsusega (12000—15000 kW)	22—23	0,56—0,53
Turbiin, 29 ata ja 400°C, suure võimsusega (50000—100000 kW)	24—25	0,51—0,49
Turbiin, 90 ata ja 500°C, suure võimsusega (50000—100000 kW)	29—31	0,42—0,40
Turbiin, 130 ata ja 565°C	38	0,32
Turbiin, 170 ata ja 550°C	34	0,364
Turbiin, 240 ata ja 580°C	43	0,286
Turbiin, 300 ata ja 650°C	46	0,268

32. Regeneratiivne ringprotsess. Auru vaheülekuumendus

Auru soojuste puudulik kasutamine tema muundamisel mehaaniliseks tööks sunnib otsima teid aurujõuseadme ringprotsessi parandamiseks. Üheks seadme ökonoomsuse tõstmise viisiks on nn. toitevee regeneratiivne eelsoojendamine. Seejuures saadud aurujõuseadme ringprotsessi nimetatakse regeneratiivseks ringprotsessiks. Selle ringprotsessi olemus seisab järgmises.

Elementaarse aurujõuseadme ringprotsessil on kondensaatorist saadaval kondensaadil temperatuur, mis võrdub vee keemistemperatuuriga sellel rõhul, mille juures on aur kondensaatoris. Kui näiteks eeldada, et rõhk on kondensaatoris $p_2=0,04$ ata, siis võib küllastunud auru tabeli järgi määrata, et keemistemperatuur on seejuures 28,6°C. Seega tuleb kondensaat toitepaaki ja edasi katelseadmesse temperatuuril ligikaudu 29°C. Kondensaadi, s.o. katla toitevee auruks muutmiseks kuumutatakse ta katelseadmes keemistemperatuurini ja alles seejärel algab aurustamisprotsess. Kui näiteks rõhk on aurukatlas $p_1=100$ ata, siis katlavee entalpia keemise olukorras on 334 kcal/kg.

Aurukatlasse tuleva kondensaadi entalpia sama tabeli järgi on 28,6 kcal/kg. Seega tuleb 1 kg katlasse mineva kondensaadi keemistemperatuurini viimiseks anda soojust

$$334 - 28,6 \approx 305 \text{ kcal/kg.}$$

See soojus, nagu oli juba öeldud, *juhitakse lihtsas aurujõuseadmes veele juurde aurukatla koldes põletatava kütuse arvel.*

Me nägime, et turbiinist väljuv ja kondensaatorisse sisenev aur on veel küllalt suure entalpiaga. Seejuures läheb aurult võetav soojus ära jahutusveega ja seda auru, nagu jahutusvettki, ei saa neil juhtudel kasutada.

On täiesti ilmne, et turbiinist lahkuvat kondensaati oleks väga kasulik soojendada mitte kütuse soojuse arvel, vaid turbiini töötanud auruga. Seda ei saa teha auruga, mis paisus turbiinis kondensaatori rõhuni $p_2=0,04$ ata, sest selle temperatuur alanes juba kuni 28,6°-ni. Kuid selleks otstarbeks võib kasutada auru, mis on turbiinis töö tegemisel paisunud osaliselt ja omab kõrgemat temperatuuri. Sel juhul kulutatakse osa masinasse juhitud auru soojusenergiat töö tegemiseks, teine osa aga toitevee soojendamiseks. Nii tehaksegi. Osa turbiini minevast aurust võetakse välja mõnest vaheastmest. Teine (suurem) osa aurust töötab masinas edasi, paisudes algrõhult kuni kondensaatori rõhuni ja teeb tööd tavalise Rankine'i tsükli järgi.

Joonisel 111 on näidatud ühe väljavõtuga seadme skeem toitevee soojendamiseks. Skeemil on numbritega 1, 2, 3 ja 4 märgitud samad agregaadid mis joonisel 106 (toitepaak ja deaeraator ei ole lihtsuse pärast näidatud). Kondensaatorist väljuva kondensaadi temperatuur on nagu ennegi 28,6° C (kui auru rõhk kondensaatoris $p_2=0,04$ ata). Kuid edaspidi erineb ringprotsessi skeem elementaarse aurujõuseadme ringprotsessi skeemist. Kondensaat ei lähe otse katlasse, vaid algul eelsoojendisse 7. Eelsoojendisse tuleb ka turbiinist võetav vahelt-aur. Selle auruga soojendataksegi kondensaat soovitava temperatuurini, mis oleb vaheltvõetava auru temperatuurist, ning alles pärast seda saadetakse kondensaat katlasse.

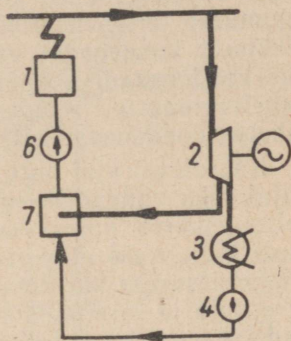
Nagu näha, seisab lihtsa aurujõu skeemiga võrreldes kasu selles, et *turbiinist välja võetava auru aurustumissoojus ei satu tsirkuleerivasse jahutusvette, vaid antakse*

kondensaadile (nagu öeldakse — taastatakse ehk rege-
nereeritakse). See suurendabki seadme termilist
kasutegurit.

Võiks oletada, et mida kõrgemale on tõstetud masinast
võetud auru soojuse arvel kondensaadi temperatuur, seda
kasulikum. Kuid kõrgemat eelsoojendust võib kondensaa-
dile anda siis, kui võtta turbiinist aur välja kõrgema rõhuga.
Seetõttu kasu aga väheneks, sest auru poolt tehtav töö väheneks
samuti. Peale selle halveneks ka veeökonoomiseri töö, kui
sellesse voolaks liiga kõrge temperatuuriga vesi. Kondensa-
aat kuumutatakse üle-kriitiliste parameetritega seadmetes kuni
250—275° C, kõrgrõhuga suurtes seadmetes 215—230° C ning
keskrõhu- (35 ata) seadmete juures kuni 150° C. Maksimaalse
kasu saamiseks toimub kondensaadi kuumutamine astmeliselt.
Selleks võetakse auru turbiini mitmest vaheastmest, et vahelt
võetav aur teeks turbiinis võimalikult palju tööd. Keskrõhul töötavate turbiinide puhul
ei kasutata üle kolme, nelja vaheltvõtu, et seade ei läheks
liiga keerukaks, hinnalt kalliks ega ebamugavaks eksplua-
teerimisel. Kõrge rõhu ja suure võimsuse korral tehakse
viis kuni kaheksa vaheltvõttu.

Kondensaadi eelsoojendid võivad olla segamist
tüüpi, milles segatakse kondensaati ja turbiinist võetav
vahelt-aur omavahel. Kõige sagedamini kasutatakse pinde-
eelsoojendeid, milles segamist ei toimu. Pindeelsoo-
jendid on ehitatud samuti kui kondensaatoridki, s. o. neis
on suur arv torusid, milles liigub kuumutatav kondensaat.
Torusid ümbritseb turbiinist tulev aur.

Joonisel 112 on kujutatud aurujõuseadme skeem kolme
vaheltvõtuga, kahe pindeelsoojendiga ja ühe segamisel-
soojendiga. Sellel on numbritega 1, 2, 3, 4 ja 6 märgitud
samad agregaadid kui joonisel 106. Lisaks on siin toite-
paak (deaeraator) 5, madalrõhu-eelsoojendi 7 ja kõrgrõ-
hueelsoojendi 8.



Joon. 111. Regeneratiivse eel-
soojendusega ühe segamis-
eelsoojendajaga aurujõu-
jääma skeem.

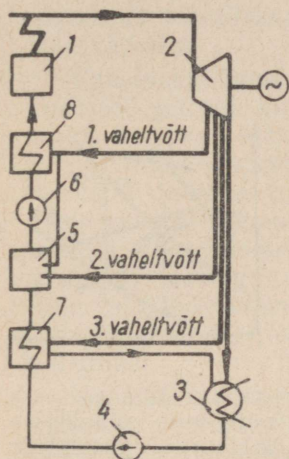
Nagu skeemilt näha, tuleb kolmanda eelsoojendi vaheltvõtuauru kondensaadid kondensaatorisse, kus seguneb turbiinist tuleva kondensaadiga. Kogu see segu saadetakse kolmanda pind-eelsoojendi torudesse, soojendatakse seal kolmanda vaheltvõtuauru poolt ning läheb edasi teise (segamis-)eelsoojendisse, kuhu tuleb ka esimese eelsoojendi vaheltvõtuauru kondensaadid. Kogu seda kondensaati kuumutab teise vaheltvõtu aur. Pumba abil antakse kogu tekkinud kondensaadid esimese pind-eelsoojendi torudesse, kus kondensaadi temperatuur tõstetakse peaaegu esimese vaheltvõtuauru temperatuurini. Selle temperatuuriga lähebki kondensaadid katelseadmesse.

Käesoleval ajal on toitevee regeneratiivne eelsoojendus vajalikuks vahendiks igas aurujõujaamas. Regeneratiivse eelsoojenduse korral suureneb turbiini poolt tarvitav auru hulk, kuid et vesi tuleb sel juhul katlasse kõrgema temperatuuriga kui ilma regeneratiivse seadmeta, siis soojuse kulu ja järelikult ka kütuse kulu katlamajas vähenevad. Regenererimine annab kütuse kokkuhoidu 5 kuni 12 %.

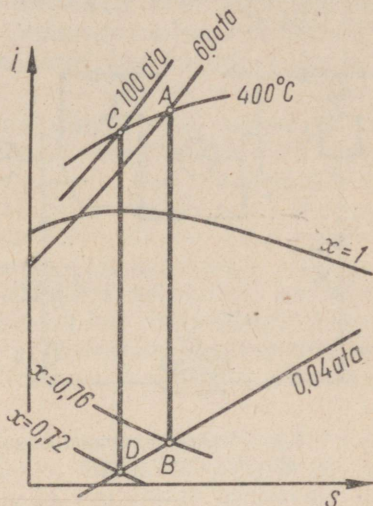
Auru vahetulekumendus. Punktis 30 näidati, et auru algrõhu tõstmine suurendab seadme termilist kasutegurit. Kuid koos rõhu tõusmisega kaasneb negatiivne nähe — kasvab tugevasti auru niiskus turbiinis paisumise lõpul; aurused esinevad veetilgad löövad suure kiirusega vastu turbiini viimase astme labidate labasid ja purustavad need aja jooksul. Peale selle kasutatakse halvasti labade vastu löövate lendavate veetilgade kineetilist energiat võlli pöörlemapanemiseks, nii et turbiini ökonoomsus väheneb.

Koos auru rõhu kasvuga toimuvat auru niiskuse suurenemist on hästi näha, kui auru paisumise protsessi turbiinis kujutada *is*-diagrammis. Joonisel 113 on kujutatud kaks niisugust protsessi. Ühel juhul kujutab joon *AB* auru paisumist rõhult $p_1=60$ ata ja $t_1=400^\circ\text{C}$ kuni rõhuni $p_2=0,04$ ata. Teisel juhul kujutab joon *CD* auru paisumist, kui $p_1=100$ ata ja $t_2=400^\circ\text{C}$ kuni rõhuni $p_2=0,04$ ata. Nagu näha, erinevad need kaks juhtu algrõhu poolest. Koos sellega on diagrammilt näha, et algrõhule $p_1=60$ ata vastab adiabaatilise paisumise lõpul kuivuse aste $x_2=0,76$ (tegelikult saadakse masinas suurem kuivuse aste); kui aga auru algrõhk $p_1=100$ ata, siis on auru kuivuse aste paisumise lõpul juba väiksem ning $x_2=0,72$.

Et saavutada veelgi suuremat aurujõuseadme ökonoomsust ja koos sellega vältida auru suurt niiskust (lubatavaks loetakse kuivusastmed kuni 0,86—0,88), võetakse kasutusele auru vaheülekuumus. Sel juhul jaotatakse kogu auru paisumisprotsess alg- ja lõpprõhkude vahel kaheks (mõnikord ka kolmeks) osaks, millele vasta-



Joon. 112. Kolme vaheltvõtuga ja regeneratiivse eelsoojendusega aurujõujaama skeem.

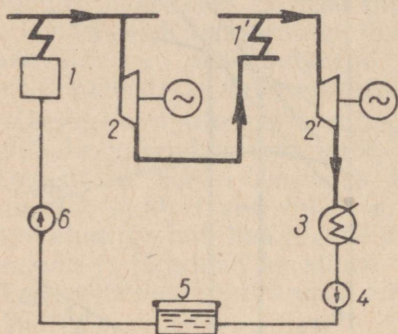


Joon. 113. Auru kuivuseastme alandamine auru algrõhu tõusu puhul (is-diagrammis).

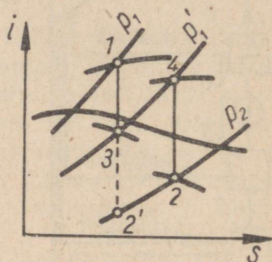
valt seatakse üles kaks (või kolm) turbiini: üks (kaks) kõrgrõhuturbiini («ettelülitatud turbiin») ja teine (kolmas) madalrõhuturbiin. Joonisel 114 on kujutatud vaheülekuumutusega elektriijaama skeem. Sellel on numbritega 1, 2, 3, 4, 5 ja 6 näidatud samad agregaadid kui joonisel 106. Numbriga 1' on tähistatud vaheülekuumendi. Kõrgrõhu turbiin 2 on paigutatud vasakule, madalrõhuturbiin 2' — paremale.

Auru töötamine kulgeb niisuguses seadmes järgmisel viisil. Aurukatla ülekuumendist tuleb aur kõrgrõhu-turbiini ja paisub selles mingi vahepealse rõhuni. Kui näiteks auru algrõhk $p_1=100$ ata, siis toimub kõrgrõhu-turbiinis paisumine ligikaudu kuni $p'_1=25$ ata. Kõrgrõhu-turbiinist

väljuvat auru kuumutatakse uuesti, milleks see tavaliselt suunatakse uuesti katlasse, kus ta läbides katla vaheülekuumendi saab lisaks soojust jääval rõhul. Teistkordselt ülekuumendatud aur juhatakse tagasi masinasaali ning läheb seal madalrõhuturbiini, kus ta paisub vahe rõhult kuni kondensaatori rõhuni. Meie näite puhul toimub madalrõhuturbiinis 2' paisumine rõhult $p'_1=25$ atá kuni $p_2 = 0,04$ ata.



Joon. 114. Vaheülekuumendusega aurujõu jaama skeem.



Joon. 115. Auru paisumise is-diagramm vaheülekuumendusega ringprotsessil.

Joonisel 114 kujutatud skeemil toodud seadet kahe turbiiniga ja kahe võlliga nimetatakse kahevõlliliseks.

Kasutusel on ka ühevõllilised turbiinid auru vaheülekuumendusega. Sel juhul on turbiini kõrgrõhuaste ja madalrõhuaste ühel võllil ja veavad ringi üht generaatorit.

Kujutame is-diagrammil auru paisumist vaheülekuumendusega ringprotsessil (joon. 115). Joon 1—3 kujutab auru adiabaatilist paisumist kõrgrõhuturbiinis või ühevõllilise turbiini kõrgrõhuastmes. Kuna vaheülekuumendus toimub rõhul $p = \text{const}$, siis kujutatakse seda joonlõiguga 3—4, mis läheb mööda isobaari $p'_1=25$ ata. See lõpeb punktis 4, millise temperatuurini toimub vaheauru ülekuumendus. Punktist 4 algab joon 4—2, mis iseloomustab auru adiabaatilist paisumise protsessi turbiinis või madalrõhuastmes. Protsess lõpeb punktis 2, mis võimaldab leida

kuivuse astet paisumise lõpul, kui kasutatakse vaheülekuumutamist.

is-diagrammist on hästi näha, et lõplik kuivuse aste seejuures tugevasti tõuseb. Koos sellega võib *is*-diagrammist määrata, milline võiks olla kuivuse aste, kui paisumine toimuks vaheülekuumendit kasutamata. Selleks tuleb punktist 3 jätkata adiabaati 1—3 kuni lõikumiseni isobaariga $p_2=0,04$ ata. Lõikumine toimub punktis 2', mis näitab, et vaheülekuumendamist kasutamata oleks kuivuse aste väiksem.

Vaheülekuumendusega ringprotsessi puhul on 1 kg auru töö suurem kui sama parameetritega auru ringprotsessis ilma vaheülekuumendusest. See saavutatakse lisaks juurdeviidud soojuse arvel. Selle lisatöö suhet lisaks juurdeviidud soojuse hulgasse nimetatakse lisaringprotsessi kasuteguriks. Vaheülekuumenduse kasutusele võtmine suurendab ringprotsessi kasutegurit sel juhul, kui lisaringprotsessi kasutegur on suurem kui ringprotsessi kasutegur ilma vaheülekuumendusest. Niisugune kasuteguri tõus saavutatakse sel teel, et valitakse vaheülekuumenduseks õige aururõhk.

Vaheülekuumenduse kasutamine väldib labidate labade kulumist viimastes astmetes, vähendab veetilkade kahjulikku mõju ökonoomsusele ja suurendab tunduvalt elektri-jaama kasutegurit. Seepärast, vaatamata sellele et ekspluatatsiooni tingimused ja seade teatud määral muutuvad keerukamaks, kasutatakse mõnikord vaheülekuumendust isegi siis, kui auru niiskus paisumise lõpul ei ületaks lubatud piiri.

33. Termofitseerimine

Kui uurida kondensatsiooni-elektri-jaamas kütuse põlemisel vabanenud soojuse bilanssi, siis näeme, et soojust kasutatakse selles väga väikesel määral. Ainult suhteliselt väikene osa sellest soojusest, umbkaudu 25—45% (ja seda ka ainult parimates elektri-jaamades), tarvitatakse kasulikult, muutes selle mehaaniliseks ja seejärel elektriliseks energiaks. Eespool oli selgitatud ka põhjus, miks kütuse soojust nii vähe ära kasutatakse. Põhjus seisab kõigepealt selles, et soojuse mehaaniliseks energiaks muutumisele paneb piiri termodünaamika teine seadus. Mõningat soojuse paremat ära kasutamist võib saavutada ainult ühe või teise

täiustuse sisseviimisega. Seejuures tekib mõte: kui soojust ei saa paremini kasutada mehaaniliseks energiaks muutmise teel, kas siis ei saa mehaaniliseks energiaks muutmata jäänud soojust kasutada mõnel teisel viisil, näiteks soojenduse otstarbeks? Meie poolt vaadeldud kondensatsiooni-elektrijaamas on need võimalused üsna piiratud. Nagu me nägime, lahkub mehaaniliseks energiaks muutmata jäänud soojusest suur osa kondensaatori jahutusveega. Jahutusvett ei saa kasutada seetõttu, et selle temperatuur ei ole küllalt kõrge. *Kondensatsiooni-elektrijaamas ei saa äratöötanud auru kasutada ei töösaamiseks ega ka soojenduse otstarbeks.*

Selleks et oleks võimalik mehaaniliseks energiaks muutmata jäänud soojust kasutada ja seega ühtlasi suurendada kütuse soojuse kasutamist, on vaja tõsta masinast lahkuva auru temperatuuri. Niisuguse kasutamise näidet me nägime regeneratiivses tsükliis. Selles tsükliis ei paisu teatud osa auru mitte kondensaatori rõhuni, vaid viiakse turbiinist välja kõrgemal rõhul, mille juures auru temperatuur on veel küllalt kõrge selleks, et ta kõlbaks soojenduse otstarbeks, nagu öeldakse, soojuslikuks otstarbeks. Regeneratiivses tsükliis kasutatakse seda auru katlasse mineva vee soojendamiseks. Sel juhul osa soojust, mis juhiti juurde turbiinist võetavale aurule, muudetakse tööks, ülejäänud osa kasutatakse vee soojendamiseks, s. o. kogu aurule juhitud soojus kasutatakse täielikult. Kuid regeneratiivses tsükliis ei saa küllaldaselt määral saavutada niisugust kasutamist, sest toitevee soojendamiseks vajatakse vähe auru (15—30%) ja seepärast on vaheltvõtuauruga toodetud mehaaniline energia väike. Suur osa vajalikust elektrienergiast toodetakse auruga, mis pärast turbiini läheb kondensaatorisse ja põhjustab seega suurt soojuskadu.

Kuid kas ei saa organiseerida kogu, või peaaegu kogu elektrienergia tootmist sellisel viisil, et külmale allikale antud soojust võiks ära kasutada? Selgub, et võib. Asi seisab selles, et on väga palju ettevõtteid, kes tootmiseks vajavad soojusenergiat. Siia kuuluvad tekstiili-, toiduainete-, keemia-, metallurgiatööstuse ettevõtted. Peale selle on talvisel ajal vaja suurel hulgal soojust elamute ja tööstushoonete kütteks. Tähendab kütuse soojuse võimalikult paremaks kasutamiseks on vaja masinas töötanud aur pärast seda saata loendatud ettevõtetele või eluma-

jade kütmiseks. Seejuures ei tohi aur turbiinis täielikult kuni rõhuni $p_2=0,04$ ata paisuda, vaid ainult nii kõrge rõhuni, mille puhul temperatuur vastab auru kasutava ettevõtte nõuetele. Õige, seejuures suureneb 1 kWh elektrienergia tootmiseks minev auru kulu tunduvalt ning termiline kasutegur jääb väiksemaks, mis näitab seda, et see soojuse osa, mis muutus mehaaniliseks energiaks, väheneb. Kuid seetõttu, et töötanud auru soojus ei lähe siin kaduma, tõuseb soojuse üldine kasutamine. Kokkuvõttes saadakse tunduv kütuse kokkuhoid, võrreldes kütuse kuluga sel puhul, kui elektrienergiat toodetakse kondensatsioonielektrijaamas ning ettevõtetele vajalik aur toodetakse eraldi katlamajas, s.o. soojusenergia ja elektrienergia eraldi tootmisel.

Toome kütuse kulu arvutuste tulemused kahe seadme kohta: ühes neist võetakse aur tootmiseks turbiinist ja nii et ta annaks enne tootmise tarbeks minekut elektrienergiat. Teisel juhul saadakse sama parameetritega auru samas koguses madalrõhu katlamajast ning elektrienergiat toodetakse kondensatsioonielektrijaamas. Esimese seadme töötingimused on järgmised: turbiin, mille võimsus $N=12\,000$ kW, annab kogu temas töötanud auru ettevõttele tehnoloogiliseks tarbeks. Kondensaat tuleb tööstusest tagasi küllastustemperatuuril, mis vastab auru rõhule. Algpameetrid, mida vajab turbiin

$$p_1=35 \text{ ata}, t_1=450^\circ \text{ C.}$$

Töötanud auru rõhk $p=2$ ata.

Kirjeldatud elektrijaama skeem on toodud joonisel 116.

Üksikasjaline arvutus näitab, et kütuse kulu elektrienergia ja auru üheaegsel tootmisel selles seadmes moodustab

$$B=7,22 \text{ t/h.}$$

Kui elektrienergiat toota kondensatsioonijaamas, ettevõtte jaoks aga auru toota eraldi katlamajas, siis moodustab kütuse kulu:

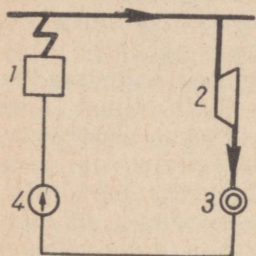
elektrienergia tootmiseks	4,55 t/h
auru tootmiseks	5,48 t/h

Kokku 10,03 t/h.

Võrdlusest on näha, et teisel juhul kulub sama hulga elektrienergia ja auru saamiseks kütust tunduvalt rohkem. Kokkuhoid esimesel juhul moodustab

$$\frac{10,03 - 7,22}{10,03} = 28,1\%.$$

Seega näeme, et kõige ökonoomsem kütuse kasutamine saadakse siis, kui elektrijaam annab ettevõttele ja elanikkonnale peale elektrienergia ka soojusenergiat tööstuslikuks ja elukondlikuks vajaduseks või kütteks. Sel juhul



Joon 116. Vasturõhutiiniga aurujõujaama skeem.

korraldatakse elektrienergia tootmise protsess teistmoodi, kasulikumal printsiibil, mille juures töötanud auru soojus ei lähe jahutusveega kaotsi, vaid kasutatakse soojenduse otstarbeks.

Niisugust viisi nimetatakse elektri- ja soojusenergia tootmise kombineeritud viisiks. Kui kütuse soojuse kasutamine soojus- ja elektrienergia eraldi tootmisel moodustab 25—35%, siis kombineeritud viisil tootmisega ulatub see 60—70%-ni.

Elektri- ja soojusenergia tootmise kombineeritud viis on NSV Liidus laialt levinud termofitseerimise aluseks.

Elektrijaamasid, kus saadakse elektri- ja soojusenergiat soojuslikuks tarbeks kombineeritud viisil, nimetatakse termofikatsioonielektrijaamadeks (vene k. lüh. ТЭЦ).

Termofikatsioonielektrijaama poolt elektrienergia ja soojusega varustatava energiamajanduse organiseerimine nõuab jaama õiget asetsemist nii kütuse leiupaiga kui ka elektri- ja soojusenergiat kasutavate ettevõtete suhtes. Teiste sõnadega on termofikatsioonielektrijaamast saadava energia kasutamine tulus ainult majanduse organiseerimisel plaanilisel alusel, nagu see esineb ainult sotsialistlikus majanduses. Majanduse eraomanduslikkudes tingimustes piiravad termofikatsioonielektrijaamade kasutamist elektri- ja soojusenergiat tarbivate ettevõtete erinevad huvid. Seepärast seisabki NSV Liit termofitseerimise poolest maailmas esikohal. Revolutsiooniajal Venemaal ei tuntud termofitseerimist ja seepärast võib lugeda t e r-

termofitseerimist nõukogude võimu tehnilise poliitika tulemuseks.

Nõukogude Liidu partei ja valitsus pühendavad suurt tähelepanu termofitseerimisele. NSVL KP(b) KK ja RKN määrusega 10. VI 1935. aastast «Moskva linna generaalplaani rekonstrueerimisest» oli öeldud: «Moskva linnamajanduse rekonstrueerimise tähtsaimaks ülesandeks on selle termofitseerimine — peamine vahend linna vabastamiseks kütuse kaugetest vedudest, et ratsionaliseerida tema soojusmajandust ja edasiselt suurendada linna varustamist elektriga.»

Termofitseerimise arenemise algus NSV Liidus kuulub 1925. aastasse, kuid juba enne Suurt Isamaasõda oli meie kodumaa termofikatsioonielektriyaamade võimsuse ja soojusvõrkude ulatuse poolest esimesel kohal maailmas.

Termofitseerimise edasine kasv ja termofikatsioonielektriyaamade ehitamine jätkus ka neljandal ja viiendal viisaastakul (1946—1955). XX kongressi direktiivides kuuenda viisaastaku rahvamajanduse arendamise plaani kohta antakse järgmine juhend: «Kindlustada tööstusettevõtete ja suurte linnade edasine termofitseerimine ja likvideerida mahajäämus soojusvõrkude ehitamisel.»

34. Soojuselektriyaamade tüüpskeemid

Elektrienergia tootmiseks on mitut tüüpi seadmeid. Peamiselt ehitatakse elektriyaamad suurtes tööstusrajoonides kütuse leiukohtade lähedale. Elektriyaamast kuni elektrienergia tarbimiskohani ehitatakse kõrgepingeliinid, mida mööda antakse elektrienergiat edasi. Majanduslikudel kaalutlustel ja töökindluse mõttes on erinevatest rajooni jaamadest tulevad kõrgepingeliinid omavahel ühendatud nii, et nad moodustavad antud rajoonis ühtse võrgu. See võimaldab elektriyaamade sisseseadet majanduslikult paremini kasutada ning maksimaalselt koormata neid elektriyaamu, mis töötavad vähem väärtuslikel kohalikkudel kütustel, kuid ühesuguste kütuste korral neid, millel on täiuslikumad sisseseaded.

Peale selle on üldise kõrgepingevõrgu olemasolu korral iga elektriyaam reserviks teisele jaamale (avarii korral või remondi ajal).

Elektriyaamu, mille ülesandeks on rajooni varustamine

elektrienergiaga tsentraliseeritud korras, nimetatakse t s e n t r a a l e l e k t r i j a a m a d e k s (vene k. lüh. ЦЭС). Vahest on antud tööstusrajoonis mitu tsentraalelektrijaama, mis töötavad ühisesse rajooni elektrivõrku.

Sagedasti on ühel või teisel kaalutlusel üksikutel tehastel oma elektrijaamad, mis võivad olla ühendatud rajooni üldisesse elektrivõrku. Niisuguseid tehaste elektrijaamu nimetatakse b l o k k j a a m a d e k s.

Jaamu, mis töötavad linnades ja annavad peamiselt voolu väikestele tööstusettevõtetele, linnatranspordi (tramm, trollibuss) ja muude kommunaalvajaduste rahuldamiseks, nimetatakse k o m m u n a a l e l e k t r i j a a m a d e k s.

Nagu näitavad eelmises punktis toodud arvutused, on kõige kasulikum kütuse kulu seisukohast kasutada termofikatsioonelektrijaamades niisuguseid turbiine, milledes töötanud aur kasutatakse terveni soojuslikkudeks vajadusteks. Niisuguseid turbiine nimetatakse v a s t u r õ h u t u r b i i n i d e k s, sest nendes väljub aur kõrgema rõhuga kui kondensatsiooniturbiinides.

Joonisel 116 toodud skeemil on kujutatud vasturõhuturbiiniga varustatud elektrijaama skeem. Sellel skeemil on tähistatud: 1 — katel; 2 — vasturõhuturbiin; 3 — tööstus, mis kasutab turbiinist tulevat auru; 4 — toitepump.

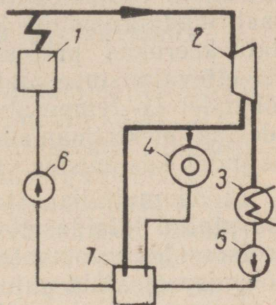
Kuid vasturõhuturbiinid termofikatsioonelektrijaamade jaoks on suuremalt osalt ebasoodsad järgmistel kaalutlustel. Kogu turbiinist väljuv aur saadetakse tööstusse ja seepärast oleneb nendes turbiinides arendatav elektriline võimsus auru hulgast, mida kasutatakse tööstuses. Neil juhtudel, kui vähendatakse vajalikku auru kogust, langeb ka masina võimsus. Soojuse tarbijate puudumise korral ei tohiks ilmselt niisugune turbiin töötama jääda. Seetõttu võib vasturõhuturbiin leida head kasutamist peamiselt võrdlemisi väikestes tehasetüüpi jaamades, kus on suur ja püsiv soojuse tarbimine.

Vahel kasutatakse ka niinimetatud h a l v e n d a t u d v a a k u u m i g a t u r b i i n e. Need turbiinid töötavad soojusliku koormuse puudumise ajal kondensatsiooniturbiinidena. Sel ajal kui vajatakse soojust soojenduse otstarbeks, tõstetakse kondensaatorisse mineva auru rõhku (halvendatakse vaakumi); jahutusvesi lahkub siis kondensaatorist kõrgema temperatuuriga ja teda võib kasutada soojenduse vajadusteks. Halvendatud vaakuumiga töötamisel

oleneb niisuguse turbiini võimsus, nagu igasuguse teisegi vasturõhuturbiini puhul, tervenisti soojuslikust tarbimisest.

Kõige sobivamateks termofikatsioonelektrijaamas kasutamiseks on auru vaheltvõtuga turbiinid. Nendes turbiinides on auru teekonnal astmete vahel üks või mitu kambrit, millest võib auru vahepealse rõhuga välja võtta. See aur saadetakse tööstuse tarbeks või ka jaama enese vajadusteks. Ülejäänud aur läheb kondensaatorisse, mis töötab tavalisel rõhul, näiteks $p_2 = 0,04$ ata. Niisugune turbiin võib igasuguse soojusliku koormuse puhul või selle täielikul puudumisel anda täit võimsust, töötades nagu puhtkondensatsiooniturbiin. Käesoleval ajal on termofikatsioonelektrijaamades kõige enam levinud vaheltvõtuga turbiinid.

Joonisel 117 on kujutatud elektrijaama skeem, kus on kasutusel vaheltvõtuga turbiin. Sellel skeemil on tähistatud: 1 — katel; 2 — vaheltvõtuga turbiin (vaheltvõtuaur läheb tööstusse ja regeneratiivsesse eelsoojendisse); 3 — kondensaator; 4 — soojuse tarbija; 5 ja 6 — pumbad; 7 — segamiselsoojendi (deae-raator).



Joon. 117. Auru vaheltvõtuga turbiiniga aurujõujaama skeem.

Revolutsioonieelsel Venemaal kasutati järgmiste parameetritega auru: rõhk 15 ata ja temperatuur 350°C . Ajavahemikul 1930—1932 toimus üleminek parameetritele 29 ata ja 400°C (enne turbiini). Mõned aastad enne Suurt Isamaasõda hakati üle minema auru kõrgematele parameetritele ja ehitati mitu elektrijaama, kus kasutati auru rõhuga 60—100 ata ja vastavalt kõrgemaid temperatuure. Pärast Suurt Isamaasõda teostati laialdaselt üleminekut aurule rõhuga 90 ata ja temperatuuridele $480\text{—}500^{\circ}\text{C}$ (enne turbiini).

Käesoleval ajal toimub NSV Liidus üleminek veelgi kõrgematele auruparameetritele — kuni 300 ata ja 650°C .

Näites 24 on näidatud lihtsa aurujõuseadme ringprotsessi ökonoomsuse juurdekasv, kui minnakse üle auru kõrgematele parameetritele.

Tehtud arvutused näitavad, et töötavates jaamades

üleminek parameetritelt 15 ata ja 350° C parameetritele 29 ata ja 400° C annab kütuse säästu 25%, üleminek parameetritelt 29 ata ja 400° C parameetritele 90 ata ja 480° C annab säästu 14 kuni 16%; edasine üleminek ülikõrgetele parameetritele annab lisaks veelgi 15% kütuse säästu.

Nõukogude soojustehnikud omandasid möödunud perioodil soojuselektrijaamade ehitamisel ja ekspuaterimisel suuri kogemusi. Nimetatud perioodil lahendasid nad rea keerukaid soojustehnilisi probleeme; lahendati suuremalt osalt madalasordilise kütuse põletamise probleemid; lahendati keerukad probleemid katlasiseste protsesside ning vee-ettevalmistuse alal, uuriti metallide omadusi kõrgetel rõhkudel ja temperatuuridel jm. Nõukogude energeetika edestas elektrijaamade ehituse ja ekspuaterimise alal paljudes küsimustes välismaise tehnika.

Möödunud viisaastakuil ja käesoleval seitseaastakul on juurutatud laialdaselt praktikasse elektrijaamades soojusprotsesside automaatset reguleerimist. 1956. aastal olid põlemisprotsessid automatiseeritud kateldel, millede aurutoodang moodustas üldtootlikkuse suhtes 80% ning toitmine automatiseeritud 94% ulatuses üldise aurutootlikkuse suhtes. 1957. aastaks olid peaaegu täielikult automatiseeritud deaeraatorid, kuulveskid jt. Tuha ja šlaki eemaldamine oli 1956. aastal mehhaniseeritud 90% ulatuses.

Veel suuremas mastaabis on automatiseeritud hüdroelektrijaamad.

Tööd automatiseerimise alal jätkuvad. Reguleerimise automatiseerimine võimaldab tõsta elektrijaama kasutegurit, vähendab avarii võimalusi ning teenindava personali hulka. Teaduslikud uurimisasutused ja tehased on välja töötanud rea süsteeme soojuslikkude protsesside kompleksseks automaatseks reguleerimiseks, mis on juba juurutatud jaamade ekspuateratsiooni praktikasse.

Jaamade ehitamise tehnikas tuleb märkida Suure Isa-maasõja ajal laialdaselt juurdunud katelde montaaži niinimetatud plokk-meetodil. Sel meetodil, erinevalt katelde montaažist üksikosadest, kus iga üksik detail tõstetakse ja monteeritakse eraldi, monteeritakse katla suured sõlmed juba varem kokku ja tõstetakse siis kokkupandud kujul (plokkidena) oma kohale.

Selle meetodi edasise arenemise tulemusel loodi 1954. a. projektid ja hakati tootma plokk-katlaid, s. o. nii-

suguseid, mille üksikud osad, nagu kolle, trummel, ülekuumendi, ökonomaiser jt. koosnevad «plokkidest», mis on vahetult valmis tehtud tehases ja tuuakse ehitusplatsile juba valmis kujul.

Katelagregaatide plokkmeetodil ehitamine ja monteerimine lühendavad tunduvalt elektriijaama ehituse kestust ja teevad selle odavamaks.

35. Soojuselektriijaama soojusliku osa kavandis

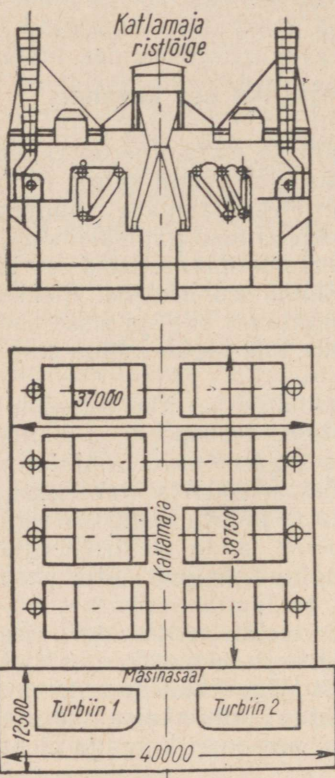
Elektriijaamade projekteerimine ja ehitamine on rahvamajanduse arendamise plaani üks tähtsamaid külgi. Projekteerimisel kasutatakse elektriijaamade tüüpprojekte, mis on üleliiduliste projekteerimisorganisatsioonide poolt välja töötatud, ning seadmetena standardseid seeria-siseseadeid, mida toodavad kodumaised tehased. Elektriijaamade hoonete ehitamisel kasutatakse kiir- ja sisseseadmete monteerimisel plokkmeetodit, mis tagab jaama ehitusel ökonoomsuse.

Elektrienergia tootmine ja tarbimine on tihedalt seotud meie maa kogu elu, tema tööstuse, transpordi ja elanikkonna eluolu normaalse kulgemisega. Kasvõi lühiajaline elektrivoolu katkestus häirib tööstuse tööd ja elanikkonna elu normaalset kulgemist; kindla ja pideva elektrivarustamise kõrval püstitatakse ka nõue: anda elektrienergiat kindla pingega ja soojust ettenähtud soojuskandja parameetritel.

Kuid seega ei ole kõik nõuded elektriijaama ekspluateerimise kohta ammendatud; elektri- ja soojusenergia tootmine ja jaotamine peab toimuma väga ökonoomselt, s. o. väljastatava elektrienergia suhtes minimaalse kütusekuluga ja minimaalse teenindava personali hulgaga elektriijaamas.

Nagu juba oli viidatud, kasutavad nõukogude elektriijaamad peamiselt tuharikkaid ja suure väävlisisaldusega madalasadilisi kütuseid. Tuha ja väävliühendite sisaldus põlemissaadustes võib tekitada ebamugavusi ümbruskonna elanikkonnale ja põhjustada haljasistandike hävimist. Seepärast peab elektriijaama töö rahuldama vastavate riiklikkude organite poolt väljatöötatud sanitaarhügieenilisi tingimusi, et luua normaalsed elutingimused ümbruskonna elanikkonna ja jaama teenindava personali jaoks.

Pärast seda, kui on määratud võimsus ja kütuse liik, millega elektriyaam peab töötama hakkama, tuleb elektriyaama projekteerimisel välja valida tema jaoks ehitusplats ja otsustada peamiste sisseadeosade, turbiinide ja katelde vastastikune paigutus.



Joon. 118. Kaherealine katlamaja seesmise punkteruumiga.

mist linnast ning toob seega enesega kaasa hügieeniliste tingimuste teatud halvenemise; sageli on ka vaja ehitada hiiglaslikud seadmed jahutus- ehk tsirkulatsioonivee jahutamiseks, kui puuduvad looduslikud veevarustusallikad (jões, järved).

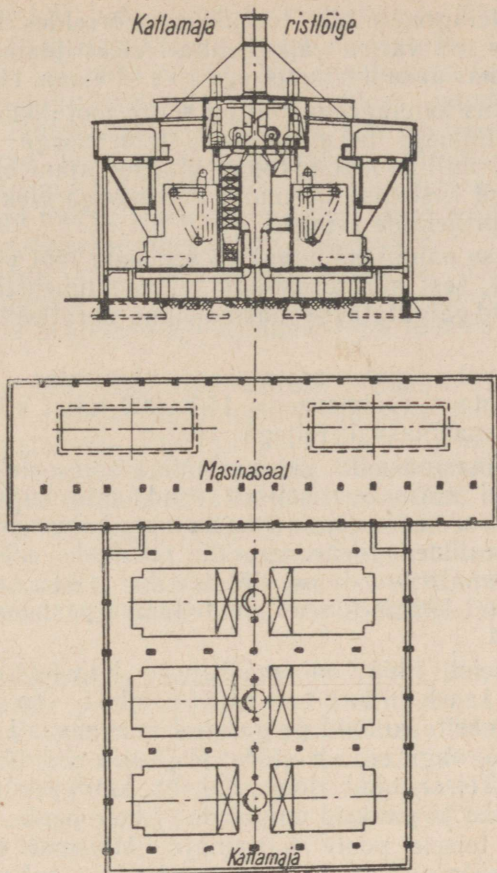
Selleks et termofikatsioonelektriyaamu mitte ehitada

Elektriyaama ehitusplatsi valiku määravad peamiselt energia — soojus- ja elektrienergia — tarbijate asend, kütuse kaevanduse asukoht ning veevarustuse tingimused. Soojuselektriyaamad ehitatakse enamalt jaolt kütuse leiukohtadesse, elektrienergia aga saadetakse kõrgepingeliinide abil selle tarbimiskohale.

Termofikatsioonelektriyaamad aga ehitatakse, vastupidi, enamasti soojuse tarbijate lähedale ning kütus veetakse juurde veetee või raudteed mööda.

Seega võetakse soojuselektriyaama või termofikatsioonelektriyaama ehituskoha valikul peamiselt arvesse kütuse saamise odavust ja soodsust, soojuse ja elektrienergia edasiandmist tarbijatele, veevarustusallikate olemasolu jne.

Asjaolu, et termofikatsioonelektriyaam peab asetsema soojuse tarbijate keskel, põhjustab vajaduse ehitada neid linnadesse; see nõuab suurtes kogustes kütuse vedamist linna ja tuha väljavedamist



Joon. 119. Kaherealine kattlamaja välise punkriteruumiga.

linna, lahendatakse viimasel ajal soojuse kaugvarustamise probleeme, mille juures termofikatsioon-elektriijaam viiakse mõnel juhul väljaspoole linna piire või kütuse leiukohtadesse, mistõttu ta satub linnast mitmekümne kilomeetri kaugusele.

Jaama soojusliku osa kavandise kujundamine on peamiselt määratud kasutatavatest katel- ja turbiiniseadmetest ja valitud kütuseliigi põletamise viisist.

Kui katelagregaatide tootlikkus, võrreldes turbiinide võimsusega, oli varem väike, ehitati elektrijaamades katlamaja ja masinasaal teineteisega risti (joon. 118 ja 119).

Nüüd, kus katelagregaadid on suure tootlikkusega, ehitatakse katlamaja ja masinasaal teineteisega paralleelselt, milline moodus kuni viimase ajani on kasutamist leidnud keskmise ja suure võimsusega elektrijõujamade tüüpprojektide juures.

Niisuguse paigutuse puhul on soodsam läbi viia jaama laiendamist, sest aurutorustikud tulevad lühemad. Turbo-generaatorid paigutatakse masinasaalis paralleelselt hoone teljega.

Käesoleval ajal asetatakse võimsates elektri- ja amades (võimsusega 150—200 tuhat kW) turbiinide teljed masinasaali teljega risti.

Peale masinasaali ja katlamaja on elektrijaama hoones veel mitmekorruselised osad, mis kujundatakse vahekorruste või rõdudena, kuhu on paigutatud abiseadmed (deaeraatorid, pumbad, eelsoojendid jne.). Katlamaja juurde on ehitatud ka kütusepunkrid. Joonisel 120 on toodud elektrijaama peahoone paigutuse näiteid.

Ühel neist, mis on määratud kivisöetolmu põletamiseks šahtveskite abil, on vahekorruste ja punkrite ruumid paigutatud masinasaali ja katlamaja vahele, nagu see on näidatud jaama ristlõikes joonisel 120, *a*. Teisel juhul (joon. 120, *b*), kuulveskite korral, on kuulveskid ja punkrid paigutatud ühele poole, vahekorrusted aga teisele poole katlamaja. Mõlemal näitel on katelde esikülg pööratud masinasaali poole; tuhaemaldamisseadmed, tõmbeventilaatorite ruumid ja korsten on paigutatud maapinnale, mis kergendab ehitamist ja teeb selle odavamaks. Sama sihiga püütakse ka paigutada tõmbeventilaatorid, ventilaatorid ja tuhapüüdjad väljapoole katlamaja.

Viimastel aastatel on tehniline mõte selles suunas läinud veelgi kaugemale; on ilmunud poollahtiste ja lahtiste elektrijaamade projektid, kus põhiseadmed on osaliselt või täiesti lahtise taeva all.

Kütuse etteandmine ja selle hoidmine suurtes elektri- ja amades, kui kasutatakse madalasordilist kütust, toob enesega kaasa suuri raskusi. Elektri- ja am, mille võimsus on

1 200 000 kW, kulutab ööpäevas ligikaudu 7000 tonni tingkütust. Olenevalt kütuse liigist määratakse selle etteandmise ja hoidmise viisid. Nii luuakse turbaga köetavas elektrijaamas erilised varud selleks juhuks, kui tekib raskusi lumesadude ajal. Suured, kuni kuuekuulised kütuse tagavarad luuakse elektrijaamades, mis kasutavad kaugeletootavaid kütuseid, mida veetakse veeteed mööda. Kui kivisöega töötav elektrijaam asub kütuse leiukoha lähedal, siis muretsetakse ühekuuline kütusevaru.

Kütuste laod mehhaniseeritakse, s. o. varustatakse mitmesuguste kraanade ja laadimisseadmetega. Kütuse maha- ja pealelaadimine toimub ilma füüsilist tööd rakedamata.

Suurtesse elektrijaamadesse tuuakse kütus kohale tavaliselt raudteevagunitega ja antakse kütuse etteandemehhanismidega vahetult punkritesse; juhul kui punkrid on täis, saadetakse kütus lattu. Kütuse etteandmine laost katlamajja toimub täiesti mehhaniseeritult. Selleks kasutatakse mitmesugust tüüpi transportööre.

Kütuse põlemisel tekkinud suitsugaasid tuleb puhastada kahjulikkudest lisanditest. See on eriti raske ülesanne sel juhul, kui põletatakse kivisöetolmu, mis sisaldab väävlit.

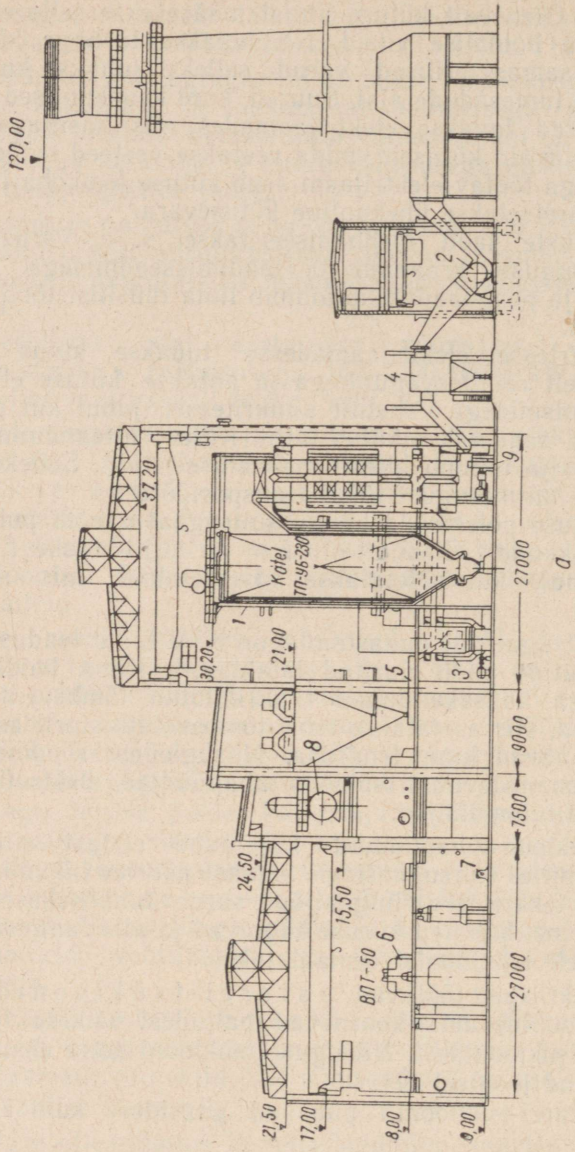
Suitsugaaside puhastamist on NSV Liidu teaduslike instituutide poolt uuritud laialdaselt. Kuna lendav, s. t. suitsuga kaasakandunud tuhk kulutab tõmbeventilaatori labidaid, siis asetatakse enne tõmbeventilaatorit seadmed, mis püüavad kinni lendtuha. Niisugustest seadmetest on kõige enam levinud tsükloon-tuhapüüdjad, elektrofiltrid ja märjad tuhapüüdjad.

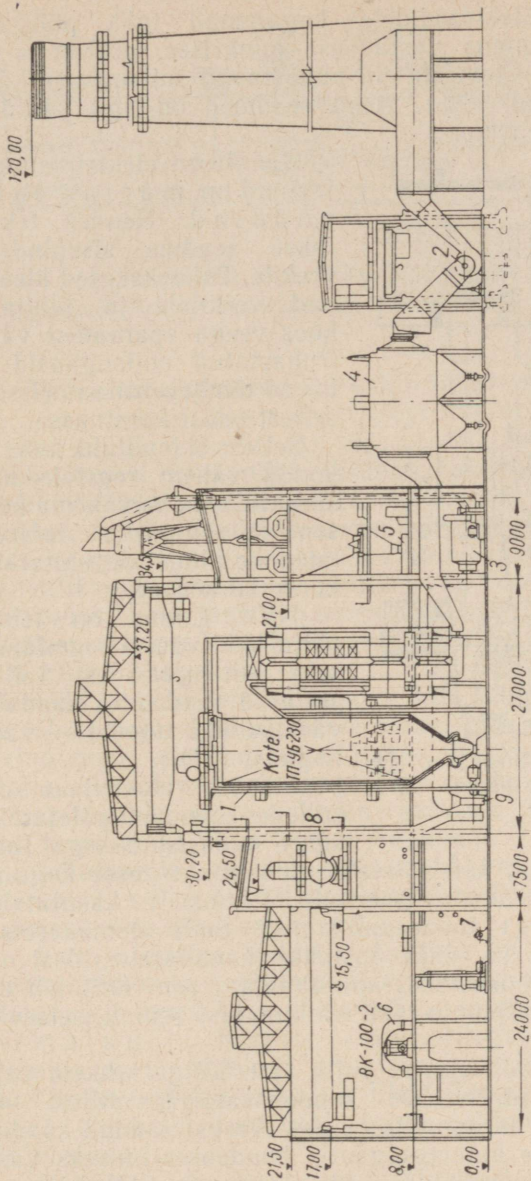
Tsükloon-tuhapüüdjad kujutavad endast silindrilisi kesti, milles suitsugaasidele antakse pöörlev liikumine. Seejuures tekkiv tsentrifugaaljõud surub tuhaosakesed vastu välisseina, kus nad kiiruse kaotavad ja alla langevad ning edasiselt tsükloonist eemaldatakse.

Efektiivselt töötavad patarei-tsükloonid (multitsükloonid), mis koosnevad paljudest väikese läbimõõduga tsükloonidest. Niisuguse tsüklooni kolm elementi on näidatud joonisel 121.

Patarei-tsükloonid püüavad gaasidest kuni 70—75% tuhka.

Elektrofiltrites sadeneb tuhk kõrgepingelise elektrivälja toimel elektroodidele (metallist plaatidele või

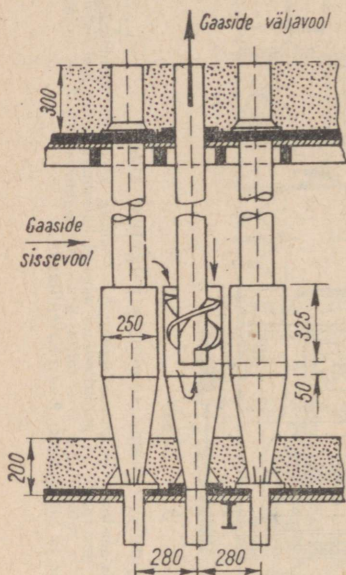




Joon. 120. Soojuselektrijaama seadmete paigutuse skeem.

a — suure kõrgõhu-elektri-termofikatsioonijaama seadmete paigutuse skeem; b — suure kõrgõhu kondensatsioon-elektrijaama seadmete paigutuse skeem, kus deaeraator ja punkriterium asuvad katlamaja erinevatel pooltel.
 1 — katel; 2 — tõmbeventilaator; 3 — veski; 4 — tuhapüüdja; 5 — toiti; 6 — turbogeneraator; 7 — toitepump; 8 — deaeraator ja toitepaigid; 9 — õhuventilaator.

traatidele). Elektroodidele kogunenud tuhk pühitakse perioodiliselt maha vastavasse punkrisse, millest ta siis eemaldatakse. Elektroofiltrid puhastavad suitsugaase kõige paremini (kuni 98%). Need seadmed on aga kallid ja võtavad palju ruumi.



Joon. 121. Multitsükloon ehk tsükloonide patareid.

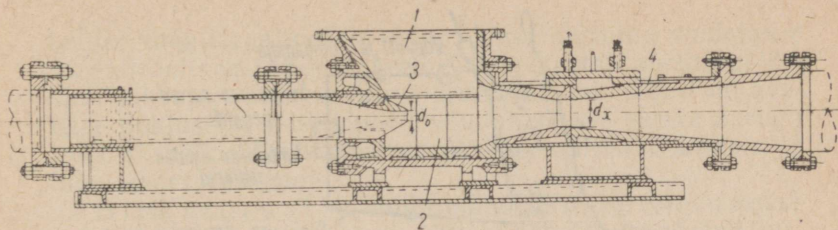
Laialt on elektrijaamades levinud nn. määrjad tuhapäüdjad. Nendes tekitatakse seadme sisepindadel veekile. Tuhaosakesed kleepuvad veekilele ja juhitakse koos veega aparaadist välja. Puhastatud suitsugaasid lähevad tõmbeventilaatorisse ja sellest edasi korstnasse.

Selleks et lendtuhk ümbruskonda vähem reostaks ning sadestuks maha vähema kontsentratsiooniga ja levineks laiemale pindalale, ehitatakse korstnad kõrged.

NSV Liidus on tehtud palju tööd väevli eemaldamiseks suitsugaasidest. Selleks ehitatud seadmetes saadakse väärtuslikku toodet — väevlisgaasi (SO_2).

Suurtes elektrijaamades, milledes enamasti põletatakse suure tuhasisaldusega tuharikkaid kütuseid, kõrvaldatakse tuhapunktritesse kogunev tuhk ja šlakk mehhaniseeritult. Peamiselt kasutatakse hüdraulilist tuhaemaldamist. Selle olemus seisab selles, et tuhk ja šlakk lastakse kanalisse, millest nad eemaldatakse Moskalkovi aparaadiga (joon. 122) või erilise tsentrifugaalpumba abil katlamajast eemal asetsevale tuhaväljale.

Elektrijaamad vajavad palju vett. Kõige rohkem vajavad seda auruturbiinide kondensaatorid, millest vesi eemaldab auru aurustumissoojuse. Aurust saadud kondensaat saadetakse katelagregaati, kondenseerimiseks kasutatud vesi, niinimetatud jahutusvesi läheb tagasi veevarustusallikasse. Elektrijaam, mille võimsus on 300 000 kW, vajab ligikaudu $60 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ vett tunnis.



Joon. 122. B. A. Moskalkovi hüdroaparaat.

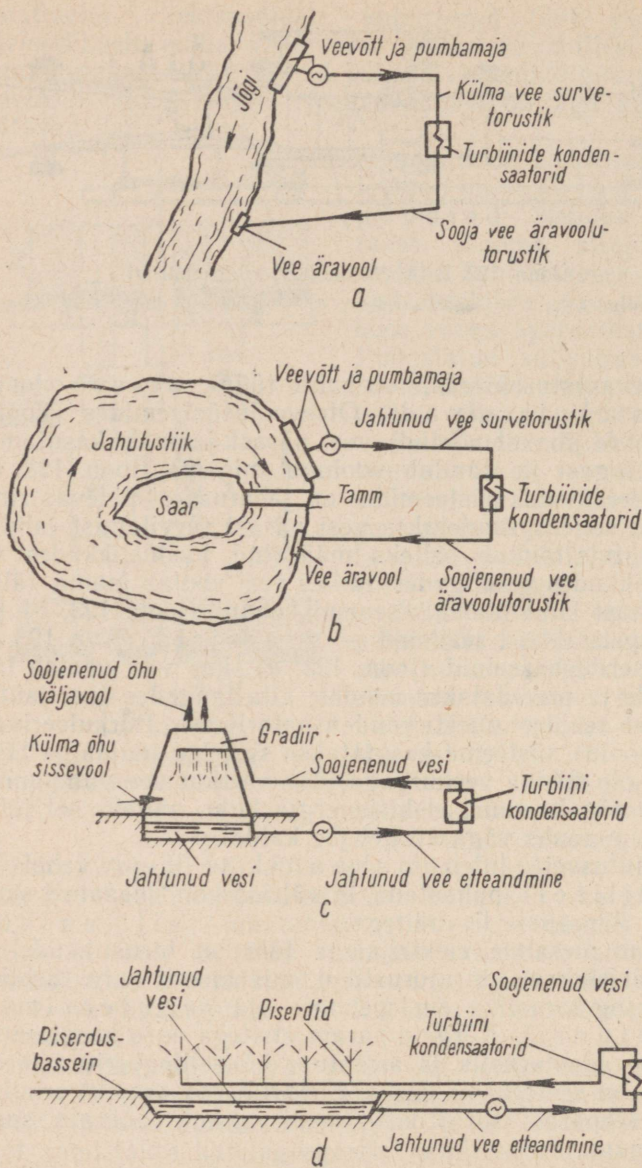
1 — sisenemiskolu; 2 — segamiskamber; 3 — ezekteeriv düüs; 4 — difuusor.

Veevarustussüsteeme on kahte tüüpi: otsevooluga ja tsirkuleerivad. Otsevoolusüsteemides voolab (jõesst või järvest võetud) vesi pärast jaamas kasutamist jõkke tagasi ja kandub vooluga minema (joon. 123, a). Tsirkuleeruvates süsteemides on jahutusvesi pidevas ringvoolus; selleks saadetakse vesi pärast tarvitamist jahutamisele, mis toimub selleks määratud looduslikkudes või kunstlikkudes veekogudes, milles vesi voolab jaama väljumiskohast kuni jaama sisenemiskohani (joon. 123, b) või läbib spetsiaalsed seadmed — gradiirid (joon. 123, c), või piserdusbasseinid (joon. 123, d), kus vesi voolab läbi düüside ja piserdatakse nendes; alla langedes vesi jahtub ja läheb seejärel uuesti kondensaatoritesse. Tsirkuleerivaid (ringvoolu) süsteeme kasutatakse siis, kui jõujaama lähedal ei ole sobiva veehulgaga jõge või kui vee pumpamine jaama nõuaks suurt elektrienergia kulu, näiteks sel juhul kui jaam asuks väga kõrgel jõe kaldal.

Jahutusvett tuleb mehaaniliselt ja vahel ka keemiliselt puhastada, et vältida kondensaatori saastumist kõrvaliste lisanditega.

Suur ülesanne elektri jaama töös on torustikkudel ja esmajärjekorras aurutorustikul, mis annab auru turbiinidele, ning torustiku sulgemis- ja reguleerimisarmatuuril. Kõrgete parameetritega auru kasutamisel tehakse aurutorustik ja armatuur kõrgeltleegeritud terasest ja on seetõttu ka kallis. Elektri jaama projekteerimisel tuleb seepärast torustiku skeemi valikule pöörata suurt tähelepanu.

Põhiliselt on kasutusel järgmised aurutorustikkude skeemid. Tsentraliseeritud (üksik- ja kaksik-) torustik, mille puhul kõik katlad annavad auru (ühte või



Joon. 123. Elektri jaamade kondensaatorite veega varustamise skeemid.

a — läbivoolu-veevarustus; b — ringlev veearustus tiigist; c — ringlev veearustus gradiiridega; d — ringlev veearustus pihustusbasseinidega.

kahte) magistraalitorusse ning kõiki turbiine toidetakse magistraalitorust. Seda skeemi iseloomustab aurutorustiku suur pikkus ja suurearvuline armatuur, mis sageli on avariide põhjuseks; teiselt poolt võimaldab see skeem auruga toita ükskõik millist masinat ükskõik millisest katlast ja luua reserv katlamajas.

Blokk torustik, mille puhul üks (harvemini kaks) katelt teenindavad auruga ühte nendega ühendatud turbiini; seda skeemi iseloomustab torustiku minimaalne pikkus ja väikesearvuline armatuur, mis tagab suure töökindluse ja väikese maksumuse võrreldes tsentraliseeritud skeemiga. Kuid blokküsteem ei võimalda üldist katelde reservi.

Ühe või teise erikujuks on nn. sektsioonskeem, mille juures üksikud blokid — katel-turbiin — on omavahel ühendatud ümberlülitatava magistraaliga, mis võimaldab ükskõik millist turbiini toita ükskõik millise katla auruga. See skeem on NSV Liidu elektriijaamades käesoleva ajani kõige enam levinud.

36. Energiasüsteemid

Antud rajooni ettevõtete ja elanikkonna elektrienergiaga varustamine toimub NSV Liidus põhiliselt suurtest elektriijaamadest, mis omavahel on ühendatud kõrgepingeliinidega. Niisuguste elektriijaamade komplekt moodustab rajooni energiasüsteemi. Sageli varustatakse soojuselektriijaamadest ettevõtteid ja elanikkonda tsentraliseeritud korras ka soojusega tehnoloogilisteks protsessideks, hoonete kütmiseks ja elanikkonna varustamiseks sooja veega.

Energiasüsteemi kuuluvad ka energia jaotusseadmed — alajaamad, milledele antakse energiat elektriijaamast ning tarbijate jaotusseadmetest, mis omakorda saavad energiat alajaamadest. Energiasüsteemil on juhtimis-dispetšerpunkt.

Elektriijaamade ja tarbijate ühendamine ühte süsteemi annab suurt majanduslikku efekti, sest see võimaldab rahvamajanduse seisukohalt kõige kasulikumalt jaotada koormust elektriijaamade vahel — esmajärjekorras koormata hüdroelektriijaamu (küllaldase veehulga olemasolu korral) ja seejärel soojuselektriijaamu. Koormuse jaotamisel soo-

jusjõujaamade vahel võetakse arvesse rida tegureid — kütuse hinda, selle varusid antud hetkel, selle hankimisvõimalusi, masinate ja katelde ökonoomsust jne.

Kui energiasüsteemi kuuluvad hüdro- ja soojuselektrijaamad, siis annab see suuri võimalusi laialt manööverdada iga-aastaste remontide teostamiseks, koormates hüdroelektrijaamu jõgede suurvee perioodil ja remontides sel ajal soojusjõu-agregaat; vastupidiselt jaotatakse koormusi, kui jõgedes vee juurdevool on väike.

Energiasüsteemi eeliseks on ka see, et ta ühendab mitmekesiseid elektrienergia tarbijaid — erinevate vahetustega (ühe, kahe, kolme vahetusega) ning mitmesuguse tööalguse, transpordi ja valgustusega tehaseid. Seetõttu muutub energia tarbimine kellaaegade järgi (koormusgraafik) ühtlasemaks, nii et jõujaama võimsust kasutatakse ööpäeva kestel ühtlasemalt. Elektrijaamade ühendamine teeb seega elektriga varustamise kindlamaks ja alandab kulusi reservvõimsusele.

Kõik energiasüsteemid on kolmefaasilised vahelduvvoolusüsteemid, mis said arenema hakata pärast seda kui andekas vene insener M. O. Dolivo-Dobrovolski aastatel 1889—1900 leiutas kolmefaasilise generaatori ja kolmefaasilise transformaatori. Kolmefaasiline vool koos kolmefaasilise asünkroonmootoriga, mis samuti on Dolivo-Dobrovolski leiutis, osutus kõige soodsamaks elektrienergia ülekandeviisiks suurtele kaugustele ning on töötuses laialdaselt juurdunud.

Esimene suur rajoonielektrijaam Venemaal ehitati 1914. aastal R. E. Klassoni poolt. Ühtlasi oli see esimene suur elektrijaam maailmas, mis töötas turbaga. Selle jaama võimsus oli 10 000 kW ning toodetud elektrienergiat saadeti Moskvasse 70 000 voldilise ülekande-liini kaudu. Energiasüsteemide areng algas pärast Suurt Sotsialistlikku Oktoobrirevolutsiooni.

Sõjajärgsetel aastatel sammub Nõukogude Liidu energeetika üksikute energiasüsteemide ühendamisel üha kaugemale. Selleks kasutatakse 110 000, 220 000—400 000 voldilise pingega kõrgepingeliine. Käesoleval ajal juurutatakse energia ülekandmiseks suurtele kaugustele ka alalisvoolu ja vahelduvpinget 500 000 V (Stalingrad—Moskva liini pikkus on üle 1000 km).

Rajoonidevaheliste energiasüsteemide olemasolu paneb aluse selleks, et lähemas tulevikus

organiseeritakse ühtne kõrgepingevõrk alguses Nõukogude Liidu Euroopa-osas ja edaspidi ka kogu Nõukogude Liidus. Selle tehniliseks baasiks on kõrgepinge-ülekanaliinid Vladimir Iljitš Lenini nimelisest Volga hüdroelektrijaamast ja Stalingradi hüdroelektrijaamast ning edaspidi Siberi jõgede hüdroelektrijaamadest.

Ühtse kõrgepingevõrgu moodustamisest saadud majanduslik ja eksploatatsiooniline kasu on veelgi suurem kui see, mis oli toodud rajooni energiasüsteemide puhul, sest ühtne kõrgepingevõrk organiseerib ühtseks tervikuks kogu maa rahvamajanduse harud ja kujutab enesest V. I. Lenini poolt püstitatud ülesande — elektrofitseerimise kõrgeima vormi — lõpule viimist.

Ühtse energiasüsteemi (vene k. lüh. ЕЭС) loomine, mis baseerub ühtsel kõrgepingevõrgul, on eriti kasulik tohtul Nõukogude Liidu territooriumil, sest see võimaldab kogu Nõukogude Liidu territooriumil kasutada odavat elektrienergiat, mida saadakse veerikastest jõgedest ja odavatest kütustest, mis asuvad sageli kohtades, kus tööstus seni on veel nõrgalt arenenud. See asjaolu võimaldab kõige soodsamal viisil paigutada tööstusettevõtteid, kusjuures selle küsimuse lahendamine ei olene enam kütusega varustamisest. Ühtse energiasüsteemiga saavutatakse kütuse kokkuhoidu; toorainete ressursse kasutakse kõige otstarbekamalt; vähendatakse toorainete transportimise kulusid ja parandatakse seega maa tootlike jõudude arenemise tingimusi.

Suurel territooriumil kõrgepingeliinidega omavahel ühendatud elektrijaamade ja alajaamade töö operatiivne juhtimine nõuab tsentraliseerimist ja nende koondamist ühte organisatsiooni.

Kohaks, kust lähtuvad korraldused selle kohta, kuidas peavad töötama elektrijaamad ja alajaamad, ja kuhu koonduvad andmed selle kohta, millises seisukorras on seadmed, millises hulgas ja kvaliteedis on toodetud elektrienergiat, on süsteemis dispetšeripunkt ning kogu süsteemi jooksva töö juhtimine toimub süsteemi valvedispetšeri poolt.

Valvedispetšeri kohustustesse kuulub peamiselt võimsuse jaotus elektrijaamade vahel, selle hulgas ka hüdroelektrijaamade vahel (olenevalt veevarudest), pinge reguleerimine ettenähtud punktides, elektrijaama põhilise seadmestiku käivitamine ja seiskamine, elektrijaamade ja

kõrgepingevõrkude kõikide lülitamiste juhtimine ning avariide likvideerimine, mis võivad tekkida kõrgepinge peavõrgus ja elektrijaamades.

Dispetšerile allub kogu elektrijaamade ja alajaamade operatiivpersonal, kelle kaudu dispetšer juhib kogu energiasüsteemi tööd.

Võrgu lülitamiste suhtes kiiremaks orienteerumiseks on tavaliselt dispetšeripunktis signaalkilp, millele on kantud kogu energiasüsteemi skeem kõigi jaamade, alajaamade ja võrgu seadmetega (turbogeneraatorid, transformaatid, lülitid).

Süsteemi töö üle otsustamiseks peab dispetšeripunkt olema varustatud riistadega, mis näitavad elektrijaama koormust, elektrivoolu pinget võrgu peamistes punktides ning vahelduvvoolu sagedust. Riistade näidud antakse edasi suurtele kaugustele nii traatside kui ka raadio teel.

Dispetšeripunktis peab olema kindel telefoni- ja raadioside kõigi elektrijaamade ja alajaamadega, et oleks võimalik korraldusi kiiresti edasi anda oma alluvale operatiiv-personalile.

Kui antud energiasüsteem läheb väga laiaks, siis muutub dispetšeril raskeks vahenditu side pidamine kõigi elektrijaamade ja alajaamadega. Sel puhul eraldatakse süsteemist üksikud rajoonid, millede juhtimiseks korraldatakse omad dispetšerile alluvad rajooni dispetšeripunktid. Rajooni dispetšerid saavad süsteemi dispetšerilt korraldused ja annavad need edasi oma rajooni personalile.

Operatsioonide kiiremaks läbiviimiseks peavad dispetšeripunktides olema instruksioonid, mis näevad ette tüüpiliste abinõude kasutuselevõtmist.

Rajoonidevaheliste ühenduste moodustamise korral luuakse ühendatud dispetšerivalitsused, mis teostavad rajoonidevaheliste põhivõrkude juhtimist ja võimsusvoolude jaotamist üksikutes süsteemides, mis kuuluvad rajoonidevahelistesse ühendustesse.

37. Elektrijaamade eksploatatsioonilised karakteristikud

Iga soojuselektrijaama iseloomustab esmajärjekorras tema installeeritud võimsus N_{inst} . Nii nimetatakse elektrijaama ülesseatud masinate n o m i n a l - ehk

nimivõimsuste summat:

$$N_{inst} = N_1 + N_2 + N_3 + \dots, \quad (105)$$

kus N_1, N_2, N_3, \dots — iga masina nimivõimsus.

Üheks jaama töö näitajaks on energia aastatoodang, mis on toodetud kõigi elektriijaama masinate poolt, ja mida tähistatakse E kWh aastas, ning kui see on termofikatsioonelektriijaam, siis ka tarbijatele saadetud aastane soojuse hulk $Q_{väljast}$ mil. kcal aastas.

Üks tähtsamaid elektriijaama töö näitajaid, mille järgi hinnatakse tema tööd installeeritud võimsuse kasutamise järgi, on installeeritud võimsuse kasutamise tunnid T_{inst} . Seda karakteristikut võib välja arvutada järgmiselt:

$$T_{inst} = \frac{E}{N_{inst}}. \quad (106)$$

Teades T_{inst} , võib välja arvutada elektriijaama installeeritud võimsuse kasutamise koefitsiendi

$$k_i = \frac{T_{inst}}{8760}. \quad (107)$$

Siin on 8760 maksimaalselt võimalik elektriijaama töötundide arv aastas, mis võrdub $24 \cdot 365 = 8760$ tundi aastas.

Heaks võib lugeda elektriijaama, kui k_i väärtus kõigub 0,65—0,75 vahel. Selle koefitsiendi ületamine tähendab seda, et jaamal ei olnud küllaldaselt aega agregaatide järelevaatuseks ja remondiks. Väiksemad väärtused näitavad, et installeeritud sisseseadeid ei kasutatud täielikult.

Jaama installeeritud võimsuse heaks kasutamiseks loetakse, kui kasutamise tundide arv on piirides

$$T_{inst} = 5500 - 6500 \text{ tundi aastas.}$$

Jaama ökonoomsust iseloomustab esmajärjekorras tema kasutegur η_j , mis kujutab enesest jaama poolt toodetud energia suhet kütuse põlemisel eraldunud energiasse. Kondensatsioonielektriijaama puhul, mille toodanguks on ainult elektrienergia, moodustab toodetud energia 860 E kcal aastas ning kulutatud kütuse põlemisel eraldunud soojuse hulk moodustab BQ_k^t kcal aastas, kus B on

põletatud kütuse hulk kg aastas. Seega on kondensatsioonelektrijaama kasutegur

$$\eta_j = \frac{860 E}{BQ_k^t} \quad (108)$$

Seda näitajat võib väljendada peale aasta-ka mõne teise ajavahemiku suhtes, näiteks kuus, ööpäevas või vahetuses.

Termofikatsioonelektrijaamade kohta, mis annavad kaht liiki toodangut — elektri- ja soojusenergiat, võib koostada analoogilise näitaja, kus lugejas esineb kahe energialiigi summa. Saadud suhet nimetatakse kütuse soojuse kasutamise teguriks. Seda tähistatakse tähega $k_{küt}$ ja võib kirjutada:

$$k_{küt} = \frac{860E + Q_{tood}}{BQ_k^t} \quad (109)$$

See tegur ei iseloomusta elektrijaama täiuslikkust täiesti õigesti, sest et lugejasse võetakse elektri- ja soojusenergia summa. Kütuse soojuse kulu elektri- ja soojusenergia tootmisel ei ole aga mõlema suhtes samaväärsed. Peale selle ei anna see ettekujutust kummagi toodanguliigi ökonoomsuse kohta eraldi; seepärast kasutatakse termofikatsioonelektrijaama töö iseloomustamiseks teisi näitajaid.

Elektrijaamade Ministeeriumi poolt termofikatsioonelektrijaamade töö hindamiseks kasutusele võetud tegurite hulgas on tähtsaimaks elektrienergia tootmise kasutegur η_{term}^E ja soojuse tootmise kasutegur η_{term}^s .

Ühe või teise karakteristiku väljaarvutamiseks on vaja eelnevalt teada elektrijaama kütusekulu, eraldi soojuse kohta, mis saadeti tarbijatele, ja eraldi selle kohta, mis läks elektrienergia tootmiseks.

Kui termofikatsioonelektrijaama üldine kütusekulu moodustab B ning soojuse tarbijatele väljastatud soojuse tootmiseks kulutati B_s , siis elektrienergia tootmiseks kulunud kütuse hulk on:

$$B_E = B - B_s \quad (110)$$

Kondensatsioonelektrijaama puhul $B_s = 0$, seepärast on sellel

$$B_E = B.$$

Valemi (110) jaoks määratakse B_s suhtest

$$\frac{B_s}{B} = \frac{Q_{tood}}{D_m(i_a - i_{tv})}, \quad (111)$$

kus Q_{tood} — elektriyaamast tarbijatele väljastatud soojuse hulk;

D_m — auru hulk, mis läheb katlamajast masinasaali; määratakse erilise arvestusega või mõõteriista järgi.

$i_a - i_{tv}$ — auru ja toitevee entalpiate vahe.

Seega kujutab võrdusmärgist paremal pool seisev murd tarbijale väljastatud soojuse hulga suhet sellesse soojuse hulgasse, mis juhiti turbiinidesse.

Elektrienergia tootmise kasutegurit η_{term}^E võib esitada toodetud elektrienergia 860 E_{tood} ja elektrienergia tootmiseks kulutatud kütuse põlemisel eraldunud soojusenergia $B_E Q_k^t$ suhtega, s. o.

$$\eta_{term}^E = \frac{860 E_{tood}}{B_E Q_k^t}, \quad (112)$$

ning soojusenergia tootmise kasutegurit η_{term}^s võib kujutada kui tarbijatele väljastatud soojuse Q_{tood} suhet energiasse, $B_s Q_k^t$, mis kulus kütuse põletamisel selleks ots-tarbeks, s. o.

$$\eta_{term}^s = \frac{Q_{tood}}{B_s Q_k^t}. \quad (113)$$

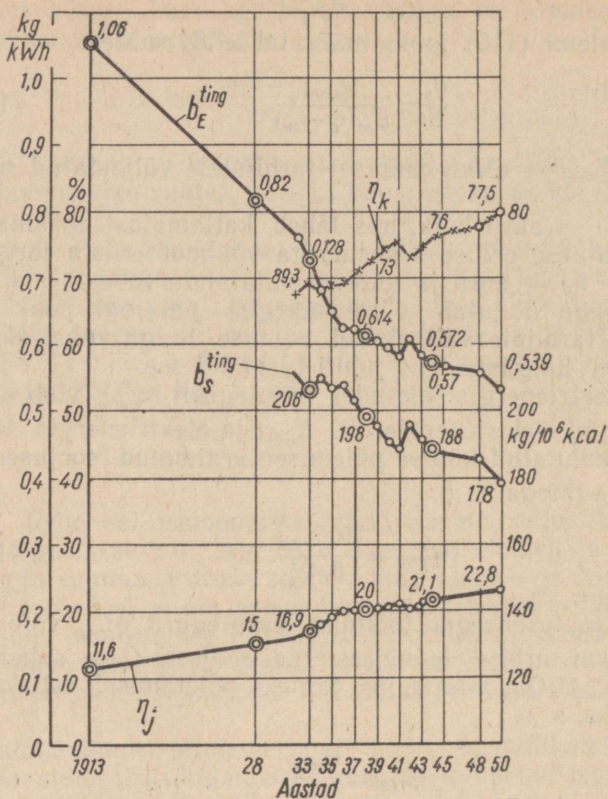
Elektriyaama töö teiseks tähtsaks iseloomustajaks majanduslikust seisukohast on tingkütuse erikulu 1 kWh elektrienergia tootmiseks ja tingkütuse erikulu 1 miljon kcal tarbijale saadetud soojuse kohta.

Soojuse kulu 1 kWh elektrienergia tootmiseks moodustab ilmselt:

$$q_E = \frac{B_E Q_k^t}{E} \text{ kcal/kWh}, \quad (114)$$

ning tingkütuse kulu

$$b_E^{ting} = \frac{q_E}{7000} = \frac{B_E Q_k^t}{7000 E} \text{ kg/kWh}. \quad (115)$$



Joon. 124. Elektri jaamade ministeeriumi elektri jaamade tingkütuse erikulu ning soojuste ja elektrienergia tootmise kasutegurite aastakeskmised.

Elektri jaama kütuse kulu tarbijale antud 1 kcal soojuste kohta moodustab

$$q_s = \frac{B_s Q_k^t}{Q_{tood}} \text{ kcal/kg.} \quad (116)$$

Vastavalt leiame tarbijale antud 1 kcal soojuste tootmiseks kasutatud tingkütuse kulu:

$$b_s^{ting} = \frac{q_s}{7000} = \frac{B_s Q_k^t}{7000 Q_{tood}} \text{ kcal/kg.} \quad (117)$$

Tavaliselt ei arvutata seda kulu mitte 1 kcal kohta, vaid 1 miljoni kcal kohta, mis sel juhul on:

$$b_s^{ting} = \frac{10^6 \cdot B_s Q_k^t}{7000 Q_{tood}} = \frac{143 B_s Q_k^t}{Q_{tood}} \text{ kg/milj. kcal.} \quad (118)$$

Nõukogude Liidu soojuselektrijaamade ökonoomsus suureneb aastast aastasse. Seda tõendab nende töö näitajate paranemine. Joonisel 124 on toodud graafik, mis kujutab tingkütuse kulu termofikatsioonielektrijaamalt väljastatud elektrienergia ja 1 milj. kcal soojuse tootmiseks ning Elektrijaamade Ministeriumi juhtimisel olevate elektrijaamade ja katelseadmete kasutegurid. Lisaks neile andmetele on vaja märkida, et keskmine tingkütuse kulu 1951. a. moodustas 535, 1952. a. — 523, 1953. a. — 511, 1954. a. — 498, 1955. a. — 480, 1956. a. — 463, 1957. a. — 450 g/kWh.

Graafikute vaatlemine näitab, et tingkütuse kulu on revolutsiooni-eelsete aegadega võrreldes vähenenud enam kui 2 korda.

Ülesannete lahendamise näiteid

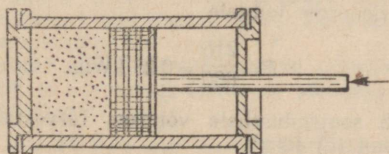
Näide 1. Kaalukaasil, mille pindala on 240 cm², asetseb ühtlaselt jagunenud raskus, mis kaalub 1,2 kg. Määrata rõhk, mida raskus avaldab alusele.

Kuna rõhuks nimetatakse jõudu, mis mõjub ühele pinnahiikule, siis arvutame, millise jõuga surub raskus pindalale 1 cm²; seega saame:

$$1,2 : 240 = 0,005 \text{ kg/cm}^2.$$

Seega on raskuse rõhk pindalale 0,005 kg/cm² ehk 0,005 at.

Näide 2. Auru rõhk silindris (vt. joonis) on 12 at; kolvi pindala on 200 cm². Arvutada, kui suure jõuga surub aur kolvile.



Kuna rõhk 12 at vastab jõule 12 kg ühele cm²-le, siis jõud, mis tuleb kogu kolvi kohta, mille pindala on 200 cm², moodustab:

$$12 \cdot 200 = 24\,000 \text{ kg.}$$

Näide 3. Tõstukiga on 2 tunni jooksul tõstetud 12 000 kg raskune last 100 m kõrgusele. Arvutada tõstuki võimsus.

Leiame tõstuki poolt tehtud töö. See on:

$$12\,000 \cdot 100 = 1\,200\,000 \text{ kgm.}$$

Arvutame nüüd tõstuki töö 1 sekundis. Kuna 1 tund = 60 minutit ning 1 minut = 60 sekundit, siis

$$2 \text{ tundi} = 2 \cdot 60 \text{ min} = 120 \cdot 60 \text{ sek} = 7200 \text{ sek.}$$

Siit leiame, et 1 sekundis tehtud töö ehk tõstuki võimsus:

$$\frac{1\,200\,000}{7200} = 167 \text{ kgm/sek.}$$

Väljendame selle võimsuse hobujõududes:

$$167 : 75 = 2,23 \text{ hj.}$$

Kilovattides on tõstuki võimsus:

$$2,23 : 1,36 = 1,64 \text{ kW ehk } \frac{167}{102} = 1,64 \text{ kW.}$$

Näide 4. Hõõvelpingi elektrimootor, mille võimsus on 2 kW, töötas 3 tundi. Arvutada, kui palju soojust eraldus selle aja jooksul, kui mootor töötas täiskoormusel.

Valemi (8) järgi:

$$E = Nt = 2 \cdot 3 = 6 \text{ kWh,}$$

mis annab soojust

$$Q = 6 \cdot 860 = 5\,160 \text{ kcal.}$$

Suuremalt osalt läks see soojus lõiketera ja töödeldava detaili soojendamiseks; ülejäänud soojus läheb ümbritsevasse õhku ja pingi detailide soojendamiseks.

Näide 5. Elektrisoojendusriistaga soojendati 4,3 kg vett temperatuurilt $t_1 = 20^\circ\text{C}$ kuni temperatuurini $t_2 = 70^\circ\text{C}$ 30 minuti jooksul. Määrata soojendusriista võimsus.

Veele antud soojuse hulka valemi (10) järgi on:

$$Q = Gc(t_2 - t_1) = 4,3 \cdot 1(70 - 20) = 215 \text{ kcal,}$$

mis vastab elektrienergia hulgale

$$E = \frac{215}{860} = 0,25 \text{ kWh.}$$

Siit järeldub soojendusriista võimsus (arvestades, et 30 min = 0,5 tundi) valemi (6) järgi:

$$N = \frac{0,25}{0,5} = 0,5 \text{ kW.}$$

Näide 6. Seatina sulab temperatuuril 327°C ning tema sulamissoojus on 5 kcal/kg . Tahke seatina erisoojus $c=0,03\text{ kcal/kg}$. Arvutada soojuse hulk, mida vajab sulamiseks $0,5\text{ kg}$ seatina, mille temperatuur on 27°C .

Valemi (12) järgi vajatakse 1 kg jaoks:

$$Q=c(t_s-t_l)+m=0,03(327-27)+5=14\text{ kcal/kg.}$$

Tähendab, et sulatada $0,5\text{ kg}$, on vaja:

$$Q=14\cdot 0,5=7\text{ kcal.}$$

Näide 7. Määrata soojuse hulk, mis on vajalik selleks, et muuta vesi temperatuurilt $t=80^{\circ}\text{C}$ ja rõhul 20 at auruks.

Tabelist 9 (raamatu lõpus) leiame, et rõhul $p=20\text{ at}$, $t_a=210^{\circ}\text{C}$, $r=452\text{ kcal/kg}$. Siit leiame valemi (13) abil:

$$Q=c(t_a-t)+r=1(211-80)+452;$$

$$Q=131+452=583\text{ kcal/kg.}$$

Näide 8. Hõrendus aurumasina kondensaatoris on 700 mm Hg . Arvutada auru absoluutrõhk kondensaatoris ja väljendada see atmosfäärides, kui baromeetri näit on 760 mm Hg .

Valemi (16) järgi leiame, et auru absoluutrõhk kondensaatoris:

$$p_{abs}=B-h=780-700=80\text{ mm Hg.}$$

Tehnilistes atmosfäärides on see:

$$\frac{80}{735,6}=0,109\text{ at.}$$

Näide 9. Aurukatla tõmbeventilaatori juures näitab tõmbemõõtja hõrendust $h=100\text{ mm vs}$. Baromeetriline rõhk on 720 mm Hg . Määrata gaaside absoluutrõhk atmosfäärides enne tõmbeventilaatorit.

Avaldame gaaside baromeetrilise rõhu ja hõrenduse atmosfäärides.

$$B=\frac{720}{735,6}=0,98\text{ at;}$$

$$h=\frac{100}{10\,000}=0,01\text{ at.}$$

Siit järeldub gaaside absoluutrõhk valemi (16) järgi:

$$p_{abs}=B-h=0,98-0,01=0,97\text{ at.}$$

Näide 10. Silindris tõsteti kolvi liikumatu asendi juures gaasi rõhku nii, et manomeetri näit tõusis rõhult $p_1=4\text{ at}$ rõhule $p_2=8\text{ at}$. Milliseks tõusis temperatuur kui $t_1=350^{\circ}\text{C}$?

Kõigepealt leiame absoluutrõhu protsessi alguses ja lõpus. Kuna baromeetriline rõhk ei ole antud, loeme ta võrdseks 1 at ($B=1\text{ at}$). Seega valemi (14) järgi:

$$p_1=4+1=5\text{ ata; } p_2=8+1=9\text{ ata.}$$

Leiame absoluutse algtemperatuuri valemi (18) järgi

$$T_1=t_1+273=350+273=623^{\circ}\text{K.}$$

Valemi (19) kohaselt

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Pannes asemele tuntud suurused, leiame T_2 :

$$T_2 = 623 \cdot \frac{9}{5} = 1121^\circ \text{K}.$$

Selleks et lõpptemperatuuri arvutada Celsiuse skaalale, kasutame valemit (17); selle järgi leiame

$$t_2 = T_2 - 273 = 1121 - 273 = 848^\circ \text{C}.$$

Seega on gaasi lõpptemperatuur $t_2 = 848^\circ \text{C}$.

Näide 11. Gaasi erikaal algolekus $\gamma_1 = 0,5 \text{ kg/m}^3$ ning temperatuur $t_1 = 27^\circ \text{C}$. Arvutada, milliseks kujuneb gaasi erikaal γ_2 , kui püsiva rõhuga protsessil tõsta selle temperatuuri kuni $t_2 = 190^\circ \text{C}$.

Arvutame gaasi absoluuttemperatuuri alg- ja lõppolekus valemi (10) järgi:

$$\begin{aligned} T_1 &= 273 + 27 = 300^\circ \text{K}; \\ T_2 &= 273 + 190 = 463^\circ \text{K}. \end{aligned}$$

Valemi (21) järgi:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

Asetades siia tuntud suurused, saame:

$$\frac{463}{300} = \frac{0,5}{\gamma_2}$$

Esimene murd võrdub 1,54. Siit

$$\begin{aligned} \frac{0,5}{\gamma_2} &= 1,54; \\ \gamma_2 &= \frac{0,5}{1,54} = 0,325 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

Näide 12. Arvutada soojuse hulk, mida on vaja anda 10 kg õhule, et tõsta selle temperatuuri $t_1 = 20^\circ \text{C}$ kuni $t_2 = 80^\circ \text{C}$ püsival rõhul.

Otsitav soojuse hulk leitakse valemiga (11)

$$Q = Gc_p(t_2 - t_1)$$

(valemis tähendab indeks p tähe c juures, et soojendusprotsess toimub püsival rõhul).

Tabelist 4 leiame, et õhu jaoks $c_p = 0,24 \text{ kcal/kg}^\circ \text{C}$. Asetades valemisse (11) arvulised väärtused, saame:

$$Q = 10 \cdot 0,24(80 - 20) = 144 \text{ kcal}.$$

Näide 13. Kompressoris surutakse õhk kokku selliselt, et selle maht pärast kokkusurumist moodustab üks kolmandik algmahust.

Absoluutne algrõhk $p_1=0,98$ ata. Leida gaasi lõpprõhk p_2 . Vastavalt valemile (23) ja etteantud tingimustele

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{3}.$$

Sellest võrrandist leiame nimetaja tundmatu väärtuse

$$p_2 = 0,98 : \frac{1}{3} = 0,98 \cdot 3 = 2,94 \text{ ata.}$$

Näide 14. Toitevee eelsoojendisse tuleb küllastunud aur $p=3$ ata ja $x=0,98$ juures; andnud oma soojuse toiteveele, väljub ta vee kujul samal rõhul ja temperatuuril $t=80^\circ\text{C}$. Teades, et läbi eelsoojendi läheb 2000 kg auru tunnis, arvutada, milline soojuse hulk anti toiteveele auru poolt.

Vee-eelsoojendis toimub auru soojuse äraandmine jääval rõhul. Punktis 9 [valem (26)] oli öeldud, et soojuse hulk, mida aur annab ära jääval rõhul, võrdub entalpiate vahega. Järelikult annab 1 kg auru toiteveele soojuse hulga, mis võrdub auru entalpia rõhul $p=3$ ata ja $x=0,98$ ning vee entalpia $t=80^\circ\text{C}$ juures vahega.

Auru entalpia $p=3$ ata ja $x=0,98$ juures leiame *is*-diagrammist. Siin $i_1=640$ kcal/kg. Vee entalpia temperatuuril $t=80^\circ\text{C}$ võrdub $i_2=80$ kcal/kg.

Soojuse hulk, mida annab 1 kg auru toiteveele, moodustab

$$q_p = i_1 - i_2 = 640 - 80 = 560 \text{ kcal/kg.}$$

Kogu auru hulk (2000 kg/h) annab veele soojust

$$Q = 2000 \cdot 560 = 1\,120\,000 \text{ kcal/h.}$$

Näide 15. Katla trumlist läheb aur rõhul $p=40$ ata ja $x=0,97$ ülekuumendisse ja väljub ülekuumendist rõhul $p=40$ ata ja $t=400^\circ\text{C}$. Määrata, kui suure soojuse hulga saab 1 kg auru ülekuumendis.

Auru ülekuumendusprotsess toimub rõhul $p=\text{const}$; seepärast, nagu oli öeldud punkt 9, võrdub auru poolt ülekuumendis saadav soojuse hulk entalpiate vahega. Leiame *is*-diagrammist auru entalpia ülekuumendist väljumisel. See on

$$i_1 = 769 \text{ kcal/kg.}$$

Edasi leiame *is*-diagrammist, et auru entalpia ülekuumendisse minekul, s. o. kui $p=40$ ata ja $x=0,98$ on:

$$i_2 = 656 \text{ kcal/kg.}$$

Soojuse hulga, mille aur saab ülekuumendis, leiame vahest

$$q_p = i_1 - i_2 = 769 - 656 = 113 \text{ kcal/kg.}$$

Näide 16. Tööpink, mis vajab võimsust 3 hj, töötab 3 tundi. Arvutada töö hulk kgm ja eraldunud soojus kcal.

On teada, et 1 hj = 75 kgm/sek; seega võib pingi võimsuse avaldada järgmiselt:

$$3 \text{ hj} = 3 \cdot 75 = 225 \text{ kgm/sek.}$$

Pink töötab 3 tundi, s. o. $3 \cdot 60 \cdot 60 = 10\,800$ sekundit, seepärast on pingi poolt tehtud töö

$$225 \cdot 10\,800 = 2\,430\,000 \text{ kgm.}$$

Kuna ühe kgm arvel saadakse $1/427$ kcal soojust, siis on eraldunud soojuste hulk

$$2\,430\,000 \cdot \frac{1}{427} = 5690 \text{ kcal.}$$

Näide 17. Liikuva kolviga silindris on gaas. Kolvile on asetatud raskus. Kuumendamisega suurendati gaasi mahtu, kusjuures gaasile juhiti juurde 100 kcal soojust. Arvutada, kui palju tegi kolb tööd, kui on teada, et seejuures 0,7 kogu soojustest läks gaasi enese soojendamiseks.

Tingimuste kohaselt läks gaasi soojendamiseks:

$$100 \cdot 0,7 = 70 \text{ kcal.}$$

Ülejäänud soojuste hulk läks kaduma. Termodünaamika esimese seaduse järgi muutus ta mehaaniliseks energiaks, mille arvel tehti tööd kolvi tõstmisel. Selleks kulub

$$100 - 70 = 30 \text{ kcal.}$$

Kuna ühest kilokalorist soojustest saab 427 kgm tööd, siis üldse tehti tööd

$$427 \cdot 30 = 12\,810 \text{ kgm.}$$

Näide 18. Veega soojendatavas eelsoojendis soojendatakse vett hoone kütmiseks. Soojendava vee keskmine temperatuur $t_1 = 120^\circ\text{C}$, soojendatava vee keskmine temperatuur $t_2 = 80^\circ\text{C}$. Soojusvahetusaparaadi pindala $F = 1,2 \text{ m}^2$. Torude materjal on teras, mille $\lambda = 35 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$; torude sisemine läbimõõt $d_1 = 18 \text{ mm}$, väline läbimõõt $d_2 = 20 \text{ mm}$. Arvutada soojuste hulk, mis antakse edasi soojendatavale veele, kui soojuste ülekandetegur soojendavalt veelt seinale võib võtta $3000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, ning seinalt soojendatavale veele $4000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$.

Arvutame eelnevalt soojuste läbikandeteguri. Võtame küttepinna tasapinnalise seinana, valem (42) järgi saame:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Selles valemis $\alpha_1 = 3000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

$$\alpha_2 = 4000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}.$$

Seinapaksus s määratakse kui pool toru välise ja sisemise läbimõõdu vahest:

$$s = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{20 - 18}{2} = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m.}$$

Asetame suuruste väärtused valemisse (42)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{3000} + \frac{0,001}{35} + \frac{1}{4000}} = 1635 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}.$$

Nüüd võib leida soojuse hulga Q . Selleks kasutame valemit (39):

$$Q = kF(t_1 - t_2).$$

Asetades siia suuruste väärtused, leiame:

$$Q = 1635 \cdot 1,2(120 - 80) = 78\,400 \text{ kcal/h}.$$

Näide 19. Moskvalähedase söe elementaarkoostis on järgmine:

$$C^t = 29,4; H^t = 2,2; O^t = 9,1; N^t = 0,6; \\ S^t = 2,6; A^t = 23,6; W^t = 32,5.$$

Määrata tarbimiskütuse kuiva massi kütteväärtus. Määrata kuiva massi koostis. Määrata tarbimiskütuse kütteväärtus, kui $W^t = 28\%$.

Valemi (48) järgi leiame:

$$Q_k^t = 81C^t + 246H^t + 26(S^t - O^t) - 6W^t = \\ = 81 \cdot 29,4 + 246 \cdot 2,2 + 26(9,1 - 2,6) - 6 \cdot 32,5 = 2557 \text{ kcal/kg}.$$

Valemist (49) leiame:

$$Q_k^t + 6W^t = Q_k^k \frac{100 - W^t}{100},$$

kust

$$Q_k^k = (Q_k^t + 6W^t) \frac{100}{100 - W^t};$$

$$Q_k^k = (2557 + 6 \cdot 32,5) \frac{100}{100 - 32,5} = 4070 \text{ kcal/kg}.$$

Kuiva massi koostis, valemi (46) järgi:

$$C^k = C^t \frac{100}{100 - W^t} = 29,4 \frac{100}{100 - 32,5} = 43,5\%.$$

Analoogiliselt leiame:

$$H^k = 3,26\%; O^k = 13,5\%; A^k = 35\% \text{ jne.}$$

Kütuse kütteväärtus Q_k^t , kui $W^t = 28\%$, on valemi (49) järgi

$$Q_k^t = Q_k^k \frac{100 - 6W^t}{1000} - 6W^t;$$

$$Q_k^t = 4070 \frac{100 - 28}{100} = 6 \cdot 28;$$

$$Q_k^t = 2762 \text{ kcal/kg}.$$

Näide 20. Ühes katlamajas põletatakse katla all puitu, mille $Q_k^t = 2500$ kcal/kg, teises antratsiiti, mille $Q_k^t = 6800$ kcal/kg. Võrrelda mõlema kütuseliigi puhul põlemisõhu hulki ja CO_2 määra, kui puidu põletamisel $\alpha = 1,35$ ja antratsiidiga kütmisel $\alpha = 1,4$.

Valemite (60) ja (58) järgi leiame teoreetiliselt vajaliku ja tegeliku õhuhulga.

Puidu jaoks

$$V_o = \frac{1,12 Q_k^t}{1000} = \frac{1,12 \cdot 2500}{1000} = 2,8 \text{ nm}^3/\text{kg};$$

$$V_t = \alpha V_o = 1,35 \cdot 2,8 = 3,8 \text{ nm}^3/\text{kg}.$$

Antratsiidi jaoks

$$V_o = \frac{1,12 Q_k^t}{1000} = \frac{1,12 \cdot 6800}{1000} = 7,6 \text{ nm}^3/\text{kg};$$

$$V_t = \alpha V_o = 1,4 \cdot 7,6 = 10,6 \text{ nm}^3/\text{kg}.$$

Täieliku põlemise puhul leiame CO_2 sisalduse %-des järgmiselt. Tabelist II leiame CO_2 sisalduse täielikul põlemisel teoreetilise õhuhulgaga, s. o. CO_{2maks} . Puidu puhul on $\text{CO}_{2maks} = 20,0\%$, antratsiidi puhul $\text{CO}_{2maks} = 20,0\%$. Etteantud liigõhuteguri puhul tuleb koldes hoida:

puidu puhul

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2maks}}{\alpha} = \frac{20,0}{1,35} = 14,8\%;$$

antratsiidi puhul

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2maks}}{\alpha} = \frac{20,0}{1,4} = 14,3\%.$$

Näide 21. Katelseade töötab Moskvalähedase söega ja toodab auru $D^I = 230$ t/h, rõhuga $p = 100$ ata ja temperatuuril $t = 500^\circ \text{C}$; toitevee temperatuur $t_{tv} = 215^\circ \text{C}$. Kütusekulu $B^I = 60$ t/h, kui $Q_k^t = 2540$ kcal/kg. Teine katlamaja töötab turbaga, mille $Q_k^t = 2250$ kcal/kg ja toodab auru 29 ata, temperatuuriga $t_1 = 400^\circ \text{C}$ ja auru hulk $D^{II} = 160$ t/h; toitevee temperatuur $t_{tv} = 125^\circ \text{C}$. Teise katelseadme kasutegur $\eta_{ks}^{II} = 0,84$.

Võrrelda mõlema katla kasutegurite väärtusi ja kütuse aurustustegurit.

Esimese katla jaoks leiame 1 kg tingkütuse aurustusteguri normaalauru kohta. Selleks määrame algul tingkütuse kulu. Valemi (50) järgi saame:

$$B_{ting}^I = \frac{B_t^I Q_k^t}{7000}.$$

Pannes siia arvulised väärtused, leiame tingkütuse kulu

$$B_{ting}^I = \frac{60\,000 \cdot 2540}{7000} = 21\,800 \text{ kg/h.}$$

Ülesande tingimustest on meil: $D^I = 230\,000 \text{ kg/h}$. *is*-diagrammist leiame auru entalpia antud parameetritel: $i_a = 803 \text{ kcal/kg}$; toitevee entalpia veeauru tabelite järgi on $219,8 \text{ kcal/kg}$. Asetades arvvaartused valemisse (73), leiame:

$$I_{n. ting}^I = \frac{230\,000(803 - 219,8)}{640 \cdot 21860} = 9,6 \text{ kg auru 1 kg kütuse kohta.}$$

Esimese katlamaja jaoks leiame katelseadme kasuteguri valemi (69) järgi:

$$\eta_{ks}^I = \frac{D^I(i_a - i_{tv})}{B^I Q_k^t}.$$

Siin on lugejas soojuse hulk, mis on kuumade gaasidega kasulikult antud töötavale kehale; nimetajas on soojuse hulk, mida võib eraldada koldes; järelikult on murru parem pool soojuse see osa, mis on kasulikult töötavale kehale antud, s. o. katelseadme kasutegur. Pärast arvuliste väärtuste asendamist leiame:

$$\eta_{ks}^I = \frac{230\,000(803 - 219,8)}{60\,000 \cdot 2540} = 0,88.$$

Teise katelseadme kütusekulu arvutame valemi (68) järgi

$$B^{II} = \frac{D^{II}(i_a - i_{tv})}{Q_k^t \eta_{ks}}.$$

Siin on nimetajas soojuse hulk, mis anti teises katelseadmes kasulikult kuumade gaaside poolt töötavale kehale; nimetajas on soojuse hulk, mis antakse kasulikult 1 kg kütuse põlemisel töötavale kehale; järelikult kujutab parempoolne murd kütuse hulka kilogrammides, mida on vaja põletada, et saada antud hulk auru.

Leiame *is*-diagrammi järgi antud tingimuste jaoks: $p = 29$ at ja $t = 435^\circ \text{C}$ teises katelseadmes auru entalpia $i_a = 771 \text{ kcal/kg}$; toitevee entalpia võtame valemi (24) järgi võrdseks tema temperatuuriga, s. o. $i_{tv} = 125 \text{ kcal/kg}$; asetades valemisse (68) arvulised väärtused, leiame:

$$B^{II} = \frac{160\,000(771 - 125)}{2250 \cdot 0,84} = 54\,600 \text{ kg/h.}$$

Taandame loodusliku kütuse kulu tingkütusele valemi (50) järgi:

$$B_{ting}^{II} = \frac{B^{II} Q_k^t}{7000}.$$

Pannes asemele arvulised väärtused, saame tingkütuse kulu

$$B_{ting}^{II} = \frac{54\,600 \cdot 2250}{7000} = 17600 \text{ kg/h.}$$

Saadud väärtus võimaldab meil arvutada aurustegurit normaal-auru suhtes tingkütuse kohta. Valemi (68) järgi leiame:

$$I_{n. ting}^{II} = \frac{D^{II}(i_a - i_{tv})}{640 B_t^{II}};$$

$$I_{n. ting}^{II} = \frac{160\,000 (771 - 125)}{640 \cdot 17\,600} = 9,2 \text{ kg/kg.}$$

Võrdlemisel näeme, et teise katla mõlemad majanduslikud öko- noomsuse näitajad — seadme kasutegur ja aurustusarv — on normaalauru suhtes madalamad kui esimesel.

Näide 22. Arvutada tõmbeventilaatori elektrimootori võimsus, kui tootlikkus $V=180\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ja üldine takistus $S=220 \text{ kg/m}^2$ (ehk mm vs); võetud on $\eta=0,55$.

Valemi (75) järgi leiame:

$$N = \frac{VS}{102 \cdot 3600 \cdot \eta} = \frac{180\,000 \cdot 220}{102 \cdot 3600 \cdot 0,55} = 196 \text{ kW.}$$

Näide 23. Sisepõlemismootor, mille võimsus on 200 efektiivset hj, kulutab tunnis 40 kg naftat. Nafta kütteväärtus $Q_k^t=10\,000 \text{ kcal/kg}$. Leida mootori efektiivne kasutegur.

Algul arvutame kütuse kulu efektiivhobujõutundide kohta.

$$b_e = \frac{40}{200} = 0,2 \text{ kg/hj.}$$

Edasi leiame valemi (66) järgi:

$$\eta_e = \frac{632}{10\,000 \cdot 0,2} = 0,316$$

või protsentides

$$\eta_e = 31,6\%.$$

Näide 24. Arvutada elementaarse aurujõuseadme ringprotsessi termiline kasutegur rea auru parameetrite korral.

- | | |
|--|--------------------------|
| 1) $p_1=15 \text{ ata}; t_1=350^\circ \text{C};$ | $p_2=0,04 \text{ ata};$ |
| 2) $p_1=29 \text{ ata}; t_1=400^\circ \text{C};$ | $p_2=0,04 \text{ ata};$ |
| 3) $p_1=35 \text{ ata}; t_1=435^\circ \text{C (standard)};$ | $p_2=0,04 \text{ ata};$ |
| 4) $p_1=90 \text{ ata}; t_1=500^\circ \text{C (standard)};$ | $p_2=0,04 \text{ ata};$ |
| 5) $p_1=130 \text{ ata}; t_1=565^\circ \text{C (standard)};$ | $p_2=0,035 \text{ ata};$ |
| 6) $p_1=170 \text{ ata}; t_1=550^\circ \text{C};$ | $p_2=0,03 \text{ ata};$ |
| 7) $p_1=240 \text{ ata}; t_1=580^\circ \text{C};$ | $p_2=0,03 \text{ ata};$ |
| 8) $p_1=300 \text{ ata}; t_1=650^\circ \text{C};$ | $p_2=0,03 \text{ ata}.$ |

Jälgides *is*-diagrammis paisumise adiabaate, leiame valemi (103) järgi:

$$1) \eta_t = \frac{751 - 511}{751 - 28,6} = 0,332; \quad 5) \eta_t = \frac{841 - 476}{841 - 26,4} = 0,448;$$

$$2) \eta_t = \frac{771 - 499}{771 - 28,6} = 0,366; \quad 6) \eta_t = \frac{818 - 462}{818 - 23,6} = 0,45;$$

$$3) \eta_t = \frac{788 - 500}{788 - 28,6} = 0,379; \quad 7) \eta_t = \frac{826 - 448}{826 - 23,8} = 0,472;$$

$$4) \eta_t = \frac{810 - 476,5}{810 - 28,6} = 0,427; \quad 8) \eta_t = \frac{860 - 456}{860 - 23,8} = 0,483.$$

Näide 25. Katsetega on kindlaks tehtud, et turbiini keskmine ööpäevane aurukulu moodustab 5,2 kg/kWh. Jaama köetakse Moskva-lähedase kivisöega, mille kütteväärtus $Q_k^t = 3200$ kcal/kg. Turbiini mineva auru parameetrid $p_1 = 30$ ata; $t_1 = 400^\circ\text{C}$. Toitevee temperatuur $t_{tv} = 120^\circ\text{C}$. Katla kasutegur on 0,82. Arvutada jaama ööpäevane kasutegur, kui jaama tootlikkus $E = 400\,000$ kWh ööpäevas.

Leiame *is*-diagrammist auru entalpia, kui selle parameetrid $p_1 = 30$ ata; $t_1 = 400^\circ\text{C}$. See on $i_1 = 715$ kcal/kg. Valemi (104) järgi leiame kütuse kulu 1 kWh kohta.

$$b_e = \frac{d_e(i_1 - t_{tv})}{Q_k^t \eta_{ks}}$$

Asetades siia arvulised väärtused, saame:

$$b_e = \frac{5,2(715 - 120)}{3200 \cdot 0,82} = \frac{5,2 \cdot 595}{3200 \cdot 0,82} = 1,18 \text{ kg/kWh.}$$

Siit leiame ööpäevase kütuse kulu

$$B = 1,18 \cdot 400\,000 = 472\,000 \text{ ööpäevas;} \\ B = 472 \text{ t/ööpäevas.}$$

Näide 26. Termofikatsioonelektrijaam, mille võimsus on 136 000 kW, tootis elektrienergiat $E = 600\,000\,000$ kWh aastas ja andis soojust $Q_{tood} = 750\,000$ milj. kcal aastas. Kateldes põletatakse kütust

$B = 1000\,000$ t aastas; kütuse kütteväärtus $Q_k^t = 2400$ kcal/kg. Määrata:

1) elektrijaama installeeritud võimsuse kasutamise tundide arv; 2) installeeritud võimsuse kasutustegur; 3) kütuse soojuse tarbimise kasutegur; 4) tingkütuse erikulu elektrienergia tootmiseks, võttes arvesse, et tingkütuse erikulu tarbijale väljastatud soojuse kohta $b_{ting}^S = 175$ kg/milj.kcal; 5) η_{term}^E ja η_{term}^S .

1. Elektriijaama installeeritud võimsuse kasutamise tundide arv

$$T_{inst} = \frac{E}{N_{inst}} = \frac{600\,000\,000}{100\,000} = 6000 \text{ tundi aastas.}$$

2. Jaama installeeritud võimsuse kasutustegur

$$k = \frac{T_{ir.st.}}{8760} = 0,685$$

3. Kütuse soojuse kasutegur

$$k_{küt} = \frac{860E + Q_{tood}}{BQ_k^t} = \frac{860 \cdot 600\,000\,000 + 750\,000\,000\,000}{1\,000\,000\,000 \cdot 2400} = \\ = \frac{126,6 \cdot 10^{10}}{240 \cdot 10^{10}} = 0,526.$$

4. Tingkütuse kulu on valem (50) järgi

$$B_{ting} = \frac{B_t Q_k^t}{7000} = \frac{1\,000\,000 \cdot 2400}{7000} = 343\,000 \text{ tonni aastas.}$$

Tarbijatele väljastatud soojuseks kulutatud tingkütuse kulu moodustab ülesande tingimuste kohaselt:

$$B_s = Q_{tood} b_{ting}^S = 750\,000 \cdot 175 = 131\,000\,000 \text{ kg aastas} = 131\,000 \text{ tonni aastas.}$$

Tingkütuse erikulu elektrienergia tootmiseks moodustab:

$$b_{ting}^E = \frac{212\,000\,000}{600\,000\,000} = 0,354 \text{ kg/kWh.}$$

5. Soojusenergia tootmisel on termofikatsioonielektrijaama kasutegur

$$\eta_{term}^S = \frac{750\,000 \cdot 10^6}{131\,000\,000 \cdot 7000} = 0,82.$$

Elektrienergia tootmise: on termofikatsioonijõujaama kasutegur

$$\eta_{term}^E = \frac{860 E}{B^e Q_k^t} = \frac{860 \cdot 600\,000\,000}{212\,000\,000 \cdot 7000} = 0,348.$$

Tabel 1

Laialdasemalt kasutatavad mõõtühikud
pikkuse, pindala, mahu, kaalu ja aja mõõtmiseks

1 m=10 dm=100 cm=1000 mm; 1 km=1000 m
 1 m²=10 000 cm²; 1 cm²=100 mm²; 1 hektar=10 000 m²
 1 m³=1000 dm³; 1 dm³=1 liiter
 1 t=1000 kg; 1 kg=1000 g; 1 tsentner=100 kg
 1 t=10 ts; 1 kg=1000 g
 1 h=60 min; 1 min=60 sek.

Tabel 2

Ainete erikaalud (kg/m³)

Alumiinium	2700	Petrooleum (0° C)	800
Raud	7800	Elavhõbe (0° C)	13600
Vask	8900	Piiritus (0° C)	790
Plaatina	21500	Lämmastik ¹	1,25
Puit	600	Õhk ¹	1,29
Malm	7000	Hapnik ¹	1,42
Vesi (4° C)	1000	Süsihappegaas ¹	1,97

¹ Temperatuuril 0° C ja rõhul 760 mm Hg

Tabel 3

Tahkete ja vedelate ainete erisoojused (kcal/kg° C)

Alumiinium	0,22	Vesi	1,0
Teras (malm)	0,11	Petrooleum	0,51
Vask	0,09	Elavhõbe	0,03
Plaatina	0,03	Piiritus	0,58
Mangaan	0,5		

Tabel 4

Gaaside erisoojused (kcal/kg° C)

Gaasi nimetus	Jääval rõhul	Jääval mahul
Hapnik	0,22	0,16
Lämmastik	0,25	0,18
Süsihappegaas	0,204	0,15
Õhk	0,24	0,172

Tabel 5

Tähtsamate elementide keemiline märk ja aatomkaal

Elemendi nimetus	Ladinakeelne nimetus	Keemiline märk	Aatomkaal
Hõbe	Argentum	Ag	108
Alumiinium	Aluminium	Al	27
Süsinik	Carboneum	C	12
Vask	Cuprum	Cu	64
Raud	Ferrum	Fe	56
Vesinik	Hydrogenium	H	1
Lämmastik	Nitrogenium	N	14
Hapnik	Oxygenium	O	16

Tabel 6

Mõnede gaasiliste ainete molekulkaalud

Gaasi nimetus	Keemiline valem	Molekulkaal
Vesinik	H ₂	2
Hapnik	O ₂	32
Lämmastik	N ₂	28
Süsinikoksüüd (vin- gugaas)	CO	28
Süsihappegaas	CO ₂	44
Veeaur	H ₂ O	18
Metaan	CH ₄	16

Tabel 7

Mõnede ainete sulamistemperatuur ja sulamissoojus

Nimetus	Sulamistemperatuur °C	Sulamissoojus
Alumiinium	658	77 kcal/kg
Raud	1520	30 "
Vask	1084	42 "
Inglitina	232	14 "
Malm	1165	33 "
Jää	0	80 "

Tabel 8

Mõnede ainete keemistemperatuur ja aurustussoojus (normaalrõhul)

Nimetus	Keemistemperatuur °C	Aurustussoojus kcal/kg
Piiritus	78	202
Vesi	100	539
Elavhõbe	357	68
Eeter	35	90

Tabel 9

Küllastunud veeaur

Rõhk ata	Keemis- tempera- tuur	Kuiva küllas- tunud auru erimaht v'' m ³ /kg	Aurustu- missoojus r kcal/kg	Vedeliku soojussisal- dus kcal/kg	Kuiva küllas- tatud auru soojussisal- dus kcal/kg
0,04	28,6	35,5	580,8	28,6	609,4
0,5	78,3	28,7	552,4	78,2	630,6
1,03	100	1,73	539	100	639
2	120	0,9	527	120	647
3	133	0,62	518	133	651
5	151	0,38	505	152	657
8	170	0,15	490	171	661
10	179	0,198	482	181	663
15	197	0,13	466	201	667
20	211	0,1	452	216	668
50	263	0,04	392	274	666
100	310	0,018	317	334	651
200	364	0,0062	150	431	581
224	373,6	0,00384	44,3	478	522,3

Tabel 10

Kütuste kütteväärtus Q_k^t

Puit	3200 kcal/kg
Turvas	3000 "
Moskvalähedane süsi	3000 "
Kivisüsi	5000—6800 "
Masuut	9300 "
Looduslik gaas	8000—8600 "
Põlevkivigaas	3600 "
Põlevkivi, III sort	2200 "

Tabel 11

Kütus	RO ₂ maks
Puit	20,0
Turvas	19,4
Moskvalähedane süsi	19,3
Antratsiit	20,0
Masuut	15,5
Põlevkivi	18,0

SISUKORD

Eessõna viiendale trükile	3
Eessõna kuuendale trükile	5
Sissejuhatus	6

Esimene peatükk

Töötav keha ja soojusteooria seadused

1. Mõõtude tehniline süsteem	19
2. Valem, sõltuvus, tabel, graafik	23
3. Energia ja selle liigid, energia muundumine. Energia jäävuse ja muundumise seadus. Energia mõõtühikud. Soojuse hulga arvutus	26
4. Aine agregaatolekud. Aine üleminek ühest agregaatolekust teise	31
5. Gaaside omadused. Gaaside rõhu ja temperatuuri mõõtmine	35
6. Gaasi oleku muutused	44
7. Gaasi oleku muutumise protsessid jääval mahul ja jääval rõhul	47
8. Gaasi oleku muutumise adiabaatilised ja isotermlised protsessid	52
9. Veeaur. Veeauru <i>is</i> -diagramm	56
10. Niiske õhk. Niiske õhu <i>Id</i> -diagramm	69
11. Termodünaamika esimene seadus	73
12. Termodünaamika teine seadus	75
13. Carnot' ringprotsess	83
14. Soojusvahetusaparaadid	86
15. Soojuse levimise viisid	90
16. Soojusvahetuse peamised juhud	94

Teine peatükk

Katelagregaat

17. Aurukatelde kütus ja selle kasutamine. NSV Liidu kütusevarud	101
18. Kütuse põlemine. Gaasisegud	111
19. Koldeseadmed	120
20. Aurukatlad	131
21. Vesi ja selle ettevalmistamine katelde toiteks	146
22. Tõmbeseadmed, armatuur, kontroll-mõõteriistad	152
23. Katelagregaadi automaatse reguleerimise printsiibid	158

Kolmas peatükk

Soojusjõumasinad

24. Masinate liigitus töötava keha ja tööprintsibi järgi. Sise- põlemismootorid	168
25. Aurumasinad	184
26. Kondensatsiooniseadmed	201
27. Kondensatsiooniturbiini aurukulu	204
28. Termofikatsiooniturbiinid. Auruturbiinide reguleerimise print- siibid	208
29. Gaasiturbiinid	213

Neljas peatükk

Soojuselektrijaamad, energiasüsteemid

30. Aurujõuseadme skeem	217
31. Aurujõuseadmete ökonoomilised karakteristikad. Soojus- bilanss, aurukulu, kütusekulu	221
32. Regeneratiivne ringprotsess. Auru vaheülekuumendus	229
33. Termofitseerimine	235
34. Soojuselektrijaamade tüüpskeemid	239
35. Soojuselektrijaamade soojusliku osa kavandis	243
36. Energiasüsteemid	253
37. Elektrijaamade eksploatatsioonilised karakteristikud	256
Ülesannete lahendamise näiteid	261
Lisad	273

Литвин Александр Моисеевич
ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Оформление: Р. Роос |

На эстонском языке

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

Toimetaja H. Allpere

Kunstiline toimetaja H. Keigo

Tehniline toimetaja H. Kohu

Korrektorid H. Abo ja E. Kask

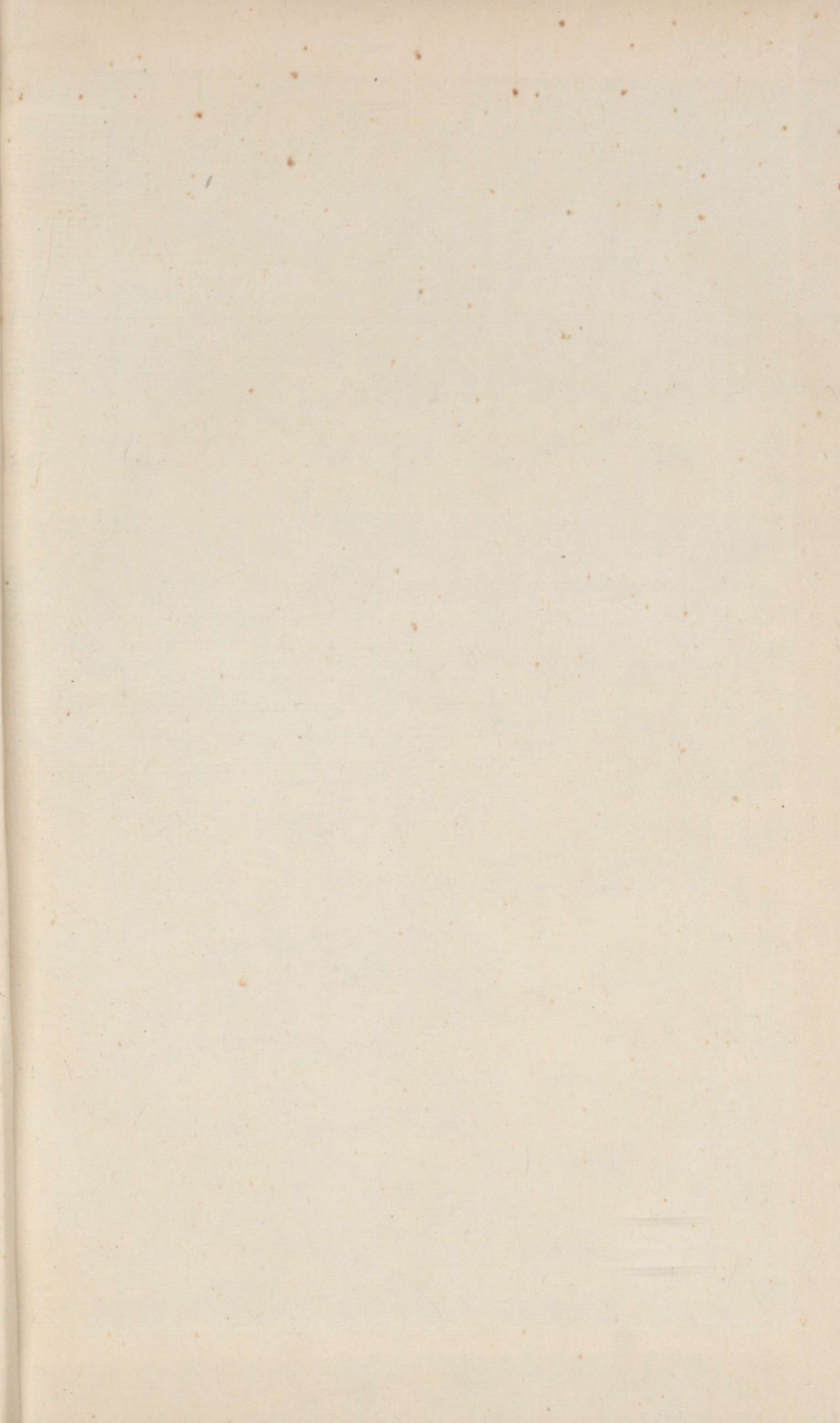
Ladumisele antud 29. XII 1960. Trükkimisele antud 19. V 1961. Trükipoognaid 17,5. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 14,35. Arvutuspoognaid 14,85. Trükiarv 3000. Tellimise nr. 12151. Hans Heidemanni nimeline trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. I

Hind 62 kop.

3—4







62 kop.

A-23838

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00366359 0