R. LEVIN

MASINAÕPETUS

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

R. LEVIN

MASINAÕPETUS

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1950

ESIMENE OSA.

KATELSEADMED.

I peatükk.

Sissejuhatus ja üldmõisteid katelseadmetest.

1. Sissejuhatus.

Aurukatla mõiste ulatub tagasi kaugele minevikku. Nii näiteks esineb aurukatla mõiste juba Heronil (Aleksandriast), s. o. II sajandil e. m. a. Veel XIX sajandil kasutati veeauru saamiseks lihtsaid madala rõhuga ja väikese võimsusega katlaid, kuid tehti juba ettepanekuid kõrgema rõhu ja temperatuuriga auru kasutuselevõtmiseks. Suurtööstuse ja elektritsentraalide arenemisega tekkis vajadus ka suuremate katelagregaatide järele, mis põhjustas järsku muutust katelde arenemises, nii tehniliste näitajate kui ka konstruktiivse vormistamise osas. Aurujõuseadmete ökonoomsuse pidev tõus põhjustas nende kasutuselevõtmist tööstuse ja rahvamajanduse harudes, kus auru varem ei kasutatud. See omakorda saab tõukejõuks uute katlatüüpide arenemisele.

Katelde ehitustehnika on arenenud eriti intensiivselt viimase 25—40 aasta jooksul. Silmapaistvat osa etendab selles revolutsioonieelse Venemaa ja eriti N. Liidu katelde ehitustehnika. Tulemusrikkalt ja kõrgel teaduslikul tasemel töötavad uurimisinstituudid, nagu F. E. Dzeržinski-nimeline Punalipu Tööordeni Üleliiduline Soojustehnika Instituut „ВТИ" (Всесоюзный Ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический Институт имени Ф. Е. Дзержинского) ja I. I. Polzunovi-nimeline Tsentraalne Katla-Turbiini-Instituut „ЦКТИ" (Центральный Котлотурбинный Институт имени И. И. Ползунова).

Katelagregaatide alal võivad N. Liidu teadlased ja insenerid uhked olla oma suurtele saavutustele sääraste probleemide lahendamisel, nagu: madalaväärtuseliste kütuste põletamine, kollete räbuga kattumise vältimine, siseprotsesside loomine kateldes uute skeemide järgi, toitevee keemi-

line ettevalmistamine, ekraankatelde loomine, katelagregaatide unifitseerimine, katelagregaatide töö hüdrodünaamiline ja soojustehniline arvutamine jt. Üldiselt on N. Liidu tehnika etendanud pioneeri osa paljude tähtsate probleemide lahendamisel seoses katelagregaatidega ja jääb vaieldamatult esirinda ka tulevikus. Stalinlikel viisaastakuil on N. Liidu konstruktorid loonud ja tehased on ehitanud terve seeria kõrge ökonoomsusega originaalseid katelagregaate, mis tagavad rahvamajanduses energeetika normaalset arenemist.

Kuni Oktoobrirevolutsioonini kasutati katelagregaate, milledes auru rõhk ei ületanud 16 atü ja temperatuur 350° C, kusjuures ainult üksikute katelde jõudlus oli 15 kuni 20 tonni auru tunnis. Kolmekümnendates aastates mindi N. Liidus massiliselt üle auru parameetritele 32 atü ja 420° C ning katelagregaatidele jõudlusega kuni 200 t/h. Käesoleval ajal juurutatakse jõumajanduses otsustavalt auru parameetritega 100 atü ja 510° C. Tähtsamateks katelde ehitamise tehasteks on Stalini-nimeline metallitehas (ЛМЗ) Leningradis, „Krasnõi Kotelštšik" (ТКЗ) Taganrogis, Lenini-nimeline Nevski tehas (НЗЛ) Leningradis jt.

Praegustes N. Liidu jõujaamades võib näha katlaid, millede jõudlus on 200 kuni 230 t/h, auru parameetritega kuni 140 atü ja 510° C. Katelseadmete kasutegur on piirides: vanematel 55—60% ja uuematel 85—90%.

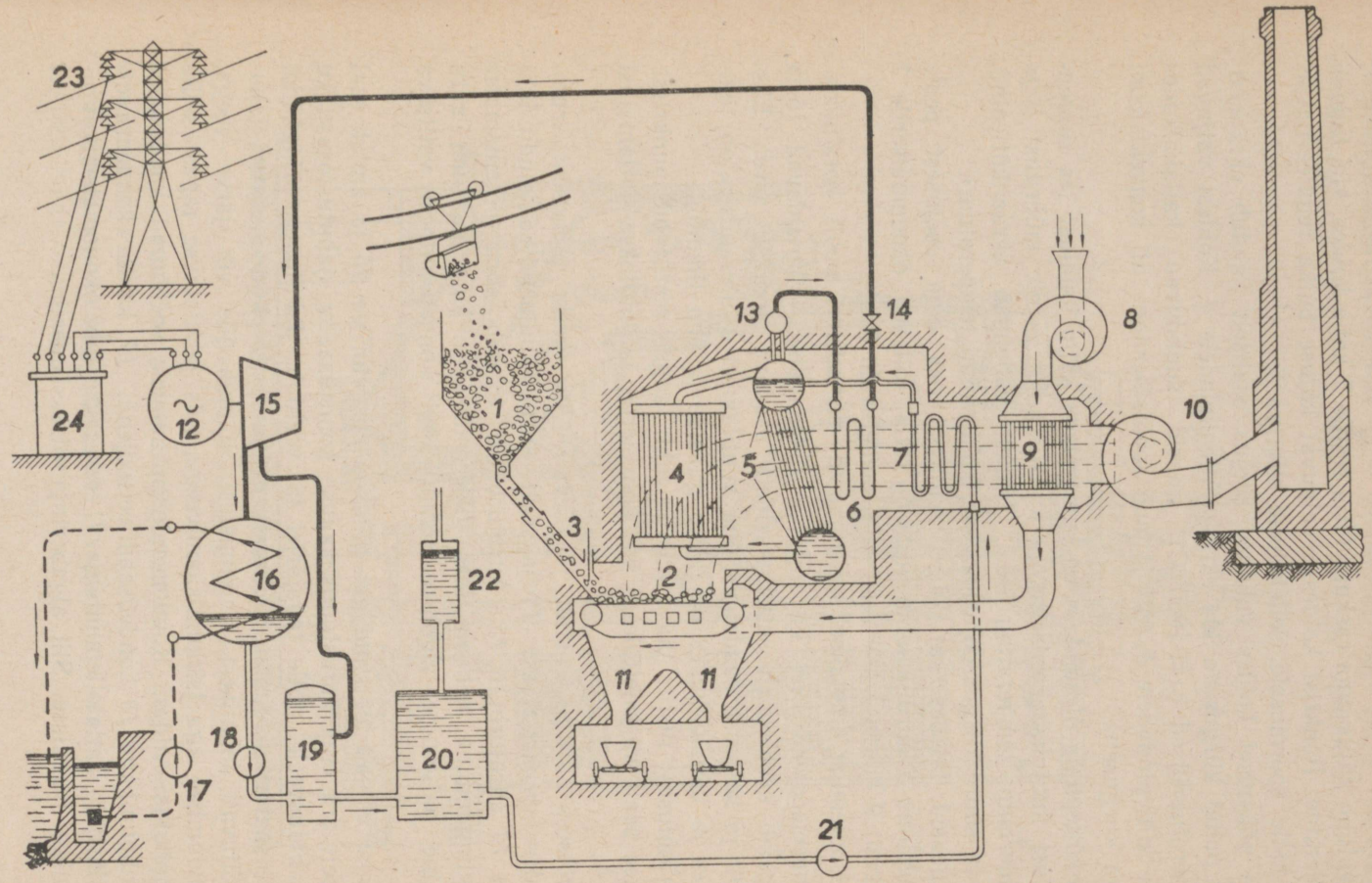
Uued ehitatavad katelseadmed on GOST 3619-47 järgi ette nähtud auru rõhu jaoks 8, 13, 39 ja 100 atü. Esimene rühm katlaid on määratud niiske auru tootmiseks, teise rühma katlad — niiske ja ülekuumendatud aurule temperatuuriga 250, 300 ja 350° C; kolmanda rühma katlad — ülekuumendatud aurule 450° C ja neljanda rühma katlad — ülekuumendatud aurule 510° C.

Katelde toitevee temperatuur, vastavalt katelde rühmadele, on 20 (või 50), 50, 150 ja 215° C. Katelde nimijõudlus ehk võimsus, vastavalt rühmadele, on: esimesel rühmal 0,2; 0,4; 0,7; 1 ja 2 t/h; teisel rühmal 4; 6,5 ja 10 t/h; kolmandal rühmal: 12, 20, 35, 50, 75 ja 110 t/h; neljandal rühmal: 75, 120, 170 ja 230 t/h.

2. Aurujõuseadme skeem ja katelseadme põhielemendid.

Aurujõuseade koosneb katlamajast, milles asetseb katel ühes vajalikkude abiseadmetega, ja masinasaalist, kuhu on monteeritud auruturbiin ühes elektrigeneraatoriga. Masinasaali juures on ka kõrgepinge-transformaatori alajaam, kust transformeeritud elektrivool juhitakse välisliinidesse.

Tööprotsess jõuseadmes on järgmine. Kütus antakse kas köisraudteega (joon. 1), linttransportööridega, koppkonveieriga jne. katlamaja kütuse-



Joon. 1. Aurujõuseadme skeem. *1* — katlamaja kütuse-punker, *2* — kütuse põletamise rest koldes, *3* — koldesse valguvat kütuse hulka reguleeriv siiber, *4* — ekraan-küttepind, *5* — katel, *6* — auruülekuumendi, *7* — katla toitevee ökonomaiser, *8* — õhku koldesse suruv ventilaator, *9* — koldesse juhitava õhu eelsoojendi, *10* — ekshauster, *11* — tuha- ja räbupunker, *12* — elektrigeneraator, *13* — aurukoguja, *14* — katla peaventiil, *15* — auruturbiin, *16* — kondensaator, *17* — tsirkulatsioonipump, *18* — kondensaadipump, *19* — kondensaadi eelsoojendaja, *20* — kondensaadipaak, *21* — katlatoitepump, *22* — toorvee puhastusseade, *23* — kõrgepingeliin, *24* — transformaator.

punkrisse *1*, mille maht vastab tavaliselt 8—4-tunnisele kütuse tarvitusele. Punkrist valgub kütus oma raskuse tõttu restile *2* katla koldes, kus toimub kütuse põlemine. Punkrist koldesse valguvat kütuse hulka reguleeritakse, vastavalt katla koormusele, sellekohase siibriga *3*.

Kütuse põlemisel koldes vabanev soojus osaliselt kandub ekraneeritud kolde puhul kiirgusena üle ekraanküttepindadele *4*. Koldest väljuvad kõrgetemperatuurilised ($\approx 1000^{0}$ C) gaasid suunduvad katlakäikudes asetsevaile küttepindadele *5*, kus toimub soojusülekanne nii konvektsiooni teel kui ka kiirgusena.

Ekraanküttepinna ülesandeks on suurendada katla jõudlust (ta suurendab jõudlust kuni kahekordseks) ja kaitsta kolde seinte müüritust liiga kõrge kolderuumi temperatuuri eest. Nimelt vähendab ekraanküttepind, võttes vastu suure kiirgussoojushoovuse, kolderuumi temperatuuri.

Suitsugaasid, läbides katlakäike, annavad osa oma soojusest peale katla küttepinna *5* auruülekuumendile *6*, katla toitevee ökonomaiserile *7* ja eelsoojendi *9* kaudu kolde resti alla saadetavale õhule.

Õhueelsoojendist imetakse suitsugaasid ekshausteri poolt korstnasse.

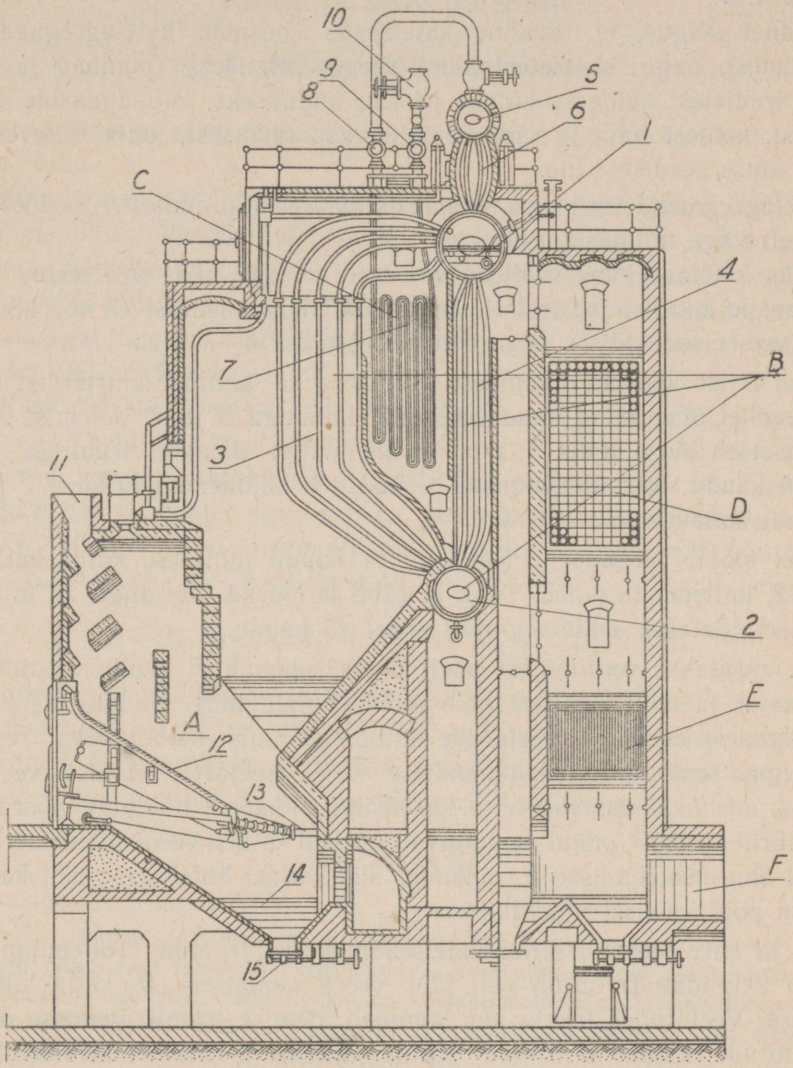
Nii õhueelsoojendi kui ka toitevee ökonomaiser võimaldavad tõsta katelagregaadi kasutegurit suitsugaasidelt saadava soojuse arvel. Ekshausteri *10* ja koldesse saadetava õhu ventilaatori *8* ülesandeks on tekitada koldes ja katlakäikudes vajalikku gaaside ja õhu liikumist.

Koldes kütusest restile jääv räbu ja tuhk langeb restilt tuhapunkrisse *11*, lastakse sealt vagonettidesse või konveierile ja juhitakse katlamajast väija.

Ringprotsess auruga teostub järgnevalt. Aur katla ülemisest trumlist juhitakse aurukogujasse *13* ja sealt auruülekuumendi *6* kaudu läbi peaventiili *14* auruturbiini *15*. Auruturbiinis toimub auru potentsiaalse energia muundumine mehaaniliseks tööks, ühes millega kaasneb auru adiabaatiline paisumine algoleku rõhult kuni kondensaatoris valitseva rõhuni.

Turbiinist voolab töötanud aur pindkondensaatorisse *16* ja annab seal isobaariliselt ära oma aurustumis-soojuse kondensaatori jahutustorustikku läbivale jahutusveele, mille tagajärjel ta veeldub. Jahutusvee ringkäiku läbi kondensaatori põhjustab tsirkulatsioonipump *17*. Kondensaatori jahutamine, sõltuvalt kohalikest tingimustest, toimub jõe või järve veega, nende puudumisel aga tsirkulatsiooniveega, mis jahutatakse tagasi sellekohastes jahutustornides. Kondensaatorist antakse veeldunud kondensaat kondensaadipumbaga *18* kondensaadi-eelsoojendi *19* kaudu kondensaadipaaki *20*, kust ta katlatoitepumbaga *21* surutakse läbi ökonomaiseri aurukatla ülemisse trumlisse. Siit algab ringprotsess uuesti.

Kondensaadi eelsoojendi *19* ülesandeks on, nagu ökonomaiserilgi, kondensaadi temperatuuri tõstmine, millega suureneb aurujõuseadme



Joon. 2. Katelagregaadi üldvaade.

kasutegur, s. o. lähendatakse auruga toimuvat ringprotsessi regeneratiivsele ringprotsessile.

Kondensaadi eelsoojendamiseks kasutatakse, skeemil näidatud juhul, turbiini madalrõhuastmest võetavat auru.

Kondensaadipaagiga *20* on ühendatud toorvee ettevalmistus- ehk puhastusseade *22*, kust täiendatakse ringprotsessist kadumaminevat kondensaadi osa.

Toodust selgus, et tavaline katelseade koosneb: katelagregaadist ja abiseadistest, nagu: seadistest katla veega toitmiseks (pumbad ja inžektorid), seadistest koldesse kütuse ja õhu andmiseks, suitsugaaside tõmbeseadisest, koldest tuha ja räbu eemaldamise seadisest, katla toitevee ettevalmistamise seadisest jne.

Katelagregaadid on oma konstruktiivselt kujunduselt, mõõdetelt ja jõudluselt väga mitmesugused.

Üheks katelagregaadi näiteks võib olla seade, mis on toodud joonisel 2. Seade koosneb koldest *A*, katlast *B*, ülekuumendist *C*, veeökonomaiserist (vee-eelsoojendist) *D* ja õhueelsoojendist *E*.

Katel *B* ise koosneb ülemisest trumlist *1* ja alumisest trumlist *2*, mis on omavahel ühendatud kahe veetorude kimbuga *3* ja *4*. Ülemise trumli kohal asetseb aurukoguja *5*, mis on ühendatud ülemise trumliga torude kimbu *6* kaudu. Auruülekuumendi *C* koosneb kuumendustorudest *7* ja ülekuumendi kollektoritest *8* ja *9*.

Katel töötab järgmiselt. Toitekolu *11* kaudu juhitakse kütus kallakrestidele *12*, milledel ta põleb. Tuhk ja räbu langevad läbi augu *13* tuhakasti *14* ja eemaldatakse sealt aeg-ajalt siibri *15* kaudu.

Õhk surutakse ventilaatori poolt õhueelsoojendi *E* kaudu restide alla (ventilaator ja õhutorustikud pole joonisel näidatud). Suitsugaasid suunduvad koldest esimesse veetorude kimpu *3*, mis moodustavad esimese katlakäigu, sealt auruülekuumendisse *C* ja seejärel teisesse veetorude kimpu *4*, mis moodustavad teise katlakäigu. Joonisel näidatud pööratavate gaasisiibrite asendi puhul suunduvad gaasid katlast veeökonomaiserisse *D*, seejärel õhueelsoojendisse *E*, lahkudes siis katlast korstnasse läbi kanali *F* (korsten pole joonisel näidatud).

Vee ja auru teekond selles katelseadmes on järgmine. Toitepump (pole joonisel 2 näidatud) surub vett läbi veeökonomaiseri *D* katla ülemisse trumlisse. Veetorudes tekkiv aur koguneb ülemise trumli ülemisse ossa ja läheb torude kimbu *6* kaudu aurukogujasse *5*, sealt auruülekuumendi kollektorisse *8*, kust aur jaguneb auruülekuumendi kuumendustorudesse, kus toimubki ülekuumendamine. Kuumendustorudest voolab aur kollektorisse *9* ja suundub lõpuks auruventiili *10* kaudu tarbimiskohtadesse.

Niisugused on katelseadme ehituse ja töötamise põhijooned. Katelseadme üksikelementide ehitust ja töötamist vaadeldakse üksikasjalikumalt edaspidi.

Kütus ja selle põlemine.[1]

3. Kütuse liigitus ja koostis.

Agregaatoleku järgi jaguneb kütus tahkeks, vedel- ja gaaskütuseks.

Tahke kütuse põhiliikideks on kivisüsi, antratsiit, pruunsüsi, turvas, põlevkivi, puit. Vedelkütuste hulka kuuluvad nafta ja selle saadused (masuut, petrooleum, bensiin jt.). Gaaskütust tarvitatakse kas loodusliku või kunstliku gaasi näol. Kunstlikest gaasidest olgu nimetatud generaatorgaas, kõrgahjugaas, koksigaas koksiahjudest, krekkgaas, maa-alusel gaasistamisel saadav gaas jm.

Kütust sel kujul, nagu seda kasutatakse katelseadmetes, nimetatakse tarbimiskütuseks. Igasuguse tahke ja vedela tarbimiskütuse elementaarne koostis määratakse sellega, kui palju temas sisaldub kaaluliselt järgmisi elemente: süsinikku C_t, vesinikku H_t, hapnikku O_t, lämmastikku N_t, põlevat, s. o. orgaanilistes ühendites sisalduvat ja püriitset väävlit S_t^{o+p}, tuhka A_t ja niiskust W_t.

$$C_t + H_t + O_t + N_t + S_t^{o+p} + A_t + W_t = 100\%.$$

Nendest elementidest süsinik, vesinik, hapnik, lämmastik ja orgaanilistes ühendites sisalduv väävel (S^o) moodustavad kütuse orgaanilise osa; samad elemendid koos püriitse väävliga (S^p) moodustavad kütuse põlevosa. Tuhk ja niiskus aga on kütuse ballastiks, s. t.

$$A_t + W_t = B.^2 \qquad (1)$$

---

[1] Selles peatükis esitatakse ainult põhimised mõisted ja andmed kütusest ja selle põlemisest, rakendatult tahkele ja vedelkütusele; need kütuse liigid osutuvad käesoleval ajal põhimisteks, nii katelseadmetele kui ka sisepõlemootoritele. Üksikasjalikumaid andmeid kütuse ja selle põlemise (seehulgas ka gaaskütuste) kohta võib leida erikursustes (vt. kirjanduse loetelu raamatu lõpul).

[2] Mõnel kütusel (näit. põlevkivil) leidub anorgaanilises osas rohkesti karbonaatühendeid, mis kuumutamisel lagunevad. Näiteks lubjakivil laguneb kaltsiumkarbonaat ($CaCO_3$) kuumutamisel CaO-ks, mis jääb tuha hulka, ja CO_2-ks, mis lendub koos suitsugaasidega. Säärase kütuse jaoks

$$B = A_t + (CO_2)_t + W_t,$$

kus $(CO_2)_t$ on karbonaatide lagunemisel tekkiv süsihappegaas.

Teatava kütuse sordi põlevosa koostis on enam või vähem püsiv: nii näiteks puidul $C_p = 50\%$, $H_p = 6\%$, $O_p + N_p = 44\%$. ($C_p + H_p + O_p + N_p + S_p^{o+p} = 100\%$, s. o. kütuse põlevosa).

Tarbimiskütuse koostis aga sõltub paljudest lisatingimustest: tootmisviisist, kuivatamise ja hoidmise meetodist jne.

Selleks, et määrata tarbimiskütuse koostis, kui on teada kütuse põlevosa koostis ja ballasti-sisaldus, kasutatakse järgmisi valemeid:

$$C_t = C_p \frac{100 - B}{100}; \qquad (2')$$

$$H_t = H_p \frac{100 - B}{100}; \qquad (2'')$$

$$O_t + N_t = (O_p + N_p) \frac{100 - B}{100}; \qquad (2''')$$

$$S_t^{o+p} = S_p^{o+p} \frac{100 - B}{100}. \qquad (2'''')$$

4. Kütuse soojusväärtus ja selle määramise meetodid.

Kütuse soojusväärtuseks nimetatakse soojuse hulka (kilokaloreis), mida eraldavad ühe kilogrammi tahke, resp. vedela kütuse (gaasilise kütuse puhul ühe nm^3 gaasi) põlemissaadused täielikul põlemisel, kui nad jahutatakse põlemistemperatuurilt protsessi algtemperatuurini, s. o. temperatuurini, milles kütus ja tema põlemiseks tarbitud õhk või hapnik on viidud põlemisprotsessi.

Kütuse põlemisel tekib veeauru seetõttu, et kütuses sisaldub niiskust ja vesinikku. Kui kütuse soojusväärtuse määramisel veeaur kondenseerub, nagu see näiteks toimub kalorimeetrilises pommis, siis auru kondenseerumissoojus lisandub kütuse soojusväärtusele; seejuures me saame ülemise soojusväärtuse ehk nn. põlemisväärtuse Q^p. Kui lahutada ülemisest soojusväärtusest veeauru kondenseerumissoojus, siis saame alumise soojusväärtuse ehk nn. küttevääruse Q^k. Tarbimiskütuse küttevääruse tähistatakse Q_t^k, tema põlemisväärtust — Q_t^p.

Veeauru kondenseerumissoojust võib lugeda ligikaudu võrdseks 600 kcal/kg. Tarbimiskütuse ühe kg põletamisel saadakse veeauru

$$G_{H_2O} = \frac{W_t + 9H_t}{100} \text{ kg/kg},$$

kuna 1 kg vesinikku annab põlemisel 9 kg veeauru. Järelikult

$$Q_t^k = Q_t^p - 6(9H_t + W_t) \text{ kcal/kg}. \qquad (3)$$

Tahkete ja vedelkütuste kütteväärtust on võimalik ligikaudselt määrata Mendelejevi empiirilise valemi järgi:

$$Q_t^k = 81C_t + 300H_t + 26(S_t^{o+p} - O_t) - 6(9H_t + W_t). \quad (4)$$

Täpsemalt määratakse soojusväärtust keskmise proovi põletamise teel kalorimeetrilises pommis; seejuures tehakse kindlaks kütuse kalorimeetriline põlemisväärtus Q_{kal}. Kütuse põletamisel kalorimeetrilises pommis tekib väävelhape ja lämmastikhape, milliste reaktsioonide juures eraldub soojust. Kuna katelseadmetes neid reaktsioone ei teki, on kütuse põlemisväärtus väiksem, kui pommis määratud kalorimeetriline põlemisväärtus. Nende suuruste vaheline seos on määratav tarbimiskütuse suhtes valemiga

$$Q_t^p = Q_{kal} - 22{,}5S_t^{o+p} - 0{,}0015Q_{kal}.$$

Tarbimis-kütteväärtust aga arvutatakse sel juhul valemi (3) järgi:

$$Q_t^k = Q_t^p - 6(9H_t + W_t).$$

Tabelis 1 on toodud Nõukogude Liidu enamlevinud kütuste põhimised iseloomustused.

5. Kütuse põlemine ja põlemissaaduste koostis.

Põlemisprotsess seisab selles, et kütuse põlevosad ühinevad hapnikuga; seejuures muundub keemiline energia soojuseks, mis soojendab põlemissaadusi. Kütuse põlevosadeks on: süsinik C, vesinik H ja põlevväävel S^{o+p}.

Süsinik võib põleda täielikult süsihappegaasiks (süsinikdioksüüdiks) võrrandi järgi:

$$C + O_2 = CO_2,$$

kusjuures 12 kg süsiniku kohta on tarvis 32 kg hapnikku ehk ühe kg süsiniku kohta $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$ kg hapnikku; seejuures ühest kg süsinikust saadakse $\frac{44}{12} = \frac{11}{3}$ kg süsihappegaasi CO_2.

Hapniku vähesuse korral põleb süsinik süsinikoksüüdiks (mittetäielik põlemine) võrrandi järgi $2C + O_2 = 2CO$, kusjuures ühe kg süsiniku kohta on tarvis $\frac{32}{2 \cdot 12} = \frac{4}{3}$ kg hapnikku; ühest kg süsinikust saadakse $\frac{2 \cdot 28}{2 \cdot 12} = \frac{7}{3}$ kg CO.

Tabel 1.

NSV Liidu kütuste põhimised iseloomustused.

Leiukoha rajoon	Kütuse sort ja mark	Koostis kaaluprotsentides							Tarbimiskütuse küttevääртus Q_t^k kcal/kg
		C_t	H_t	N_t	O_t	S_t^{o+p}	A_t	W_t	
	Küttepuud:								
	okaspuit	35,4	4,3	0,4	29,2	0	0,7	30	2980
	lehtpuit	35,0	4,2	0,4	29,7	0	0,7	30	2910
	Turvas:								
	masinturvas . . .	41,2	4,1	1,6	24,2	0	2,7	26,1	3550
	hüdroturvas . . .	30,1	3,1	1,2	18,0	0	4,6	43,0	2500
	freesturvas	26,5	2,7	1,0	15,3	0	4,5	50,0	2150
	Süsi:								
Moskva-lähine bassein	jäme 150—50 mm	37,0	2,8	0,7	9,9	2,0	15,5	32,1	3240
	pähkel 50—20 mm	34,5	2,4	0,7	9,4	3,6	18,2	31,2	2995
	sortimata peen 50—0 mm . . .	33,2	2,3	0,7	9,3	3,2	19,3	32,0	2870
Donetsi bassein	pika leegiga D . .	59,8	4,2	1,2	9,2	2,9	9,7	13,0	5640
	gaasisüsi T	67,8	4,5	1,3	7,4	2,7	10,4	5,9	6430
	aurusüsi, rasvane ПЖ	72,6	4,5	1,4	5,1	2,2	11,0	3,2	6940
	koksisüsi K . . .	75,0	4,2	1,4	3,8	1,8	10,3	3,5	7120
	aurusüsi, paakuv Ж	77,1	4,0	1,3	2,8	1,9	9,4	3,5	7190
	lahja T	80,1	3,8	1,4	1,7	1,4	8,2	3,4	7350
	antratsiit üle 100 mm АП	85,3	1,7	0,6	1,2	1,4	4,3	5,5	7240
	antratsiit 25—100 mm АК	83,4	1,6	0,6	1,2	1,4	6,4	5,4	7080
	antratsiit 13—25 mm АМ	77,9	1,5	0,6	1,1	1,5	11,9	5,5	6610
	antratsiit 6—13 mm АС	75,3	1,5	0,6	1,1	1,4	13,4	6,7	6390
	antratsiit 0—13 mm АШ	71,5	1,4	0,9	1,3	1,5	16,0	7,4	6040
	antratsiit 0—100 mm АРШ	77,1	1,6	0,6	1,6	1,2	11,1	6,8	6560

(Järg.)

Leiukoha rajoon	Kütuse sort ja mark	Koostis kaaluprotsentides							Tarbimis-kütuse küttevääritus Q_t^k kcal/kg
		C_t	H_t	N_t	O_t	S_t^{o+p}	A_t	W_t	
Taga-Kaukaasia	tkvibuli	56,9	4,1	1,1	9,3	1,1	16,5	11,0	5310
	tkvartšeli	62,2	4,7	1,4	11,1	0,9	17,7	2,0	5930
Uural	tšeljabinski	48,1	3,4	1,2	11,7	1,0	15,6	19,0	4350
	bogoslavski	40,1	2,5	0,9	13,9	0,3	12,3	30,0	3280
	kizeli	58,6	4,1	0,9	3,6	5,8	21,5	5,5	5720
	jegoršino	69,5	2,7	0,5	3,1	0,4	17,9	5,9	6050
Kasahstan	karaganda	65,4	4,0	1,1	5,6	0,6	16,3	7,0	6120
Kuznetski bassein	anžero-sudženski	79,7	3,8	1,6	1,9	0,4	8,6	4,0	7280
	prokopjevski	78,0	3,9	1,8	3,3	0,4	6,6	6,0	7090
	leninski	71,4	5,0	2,3	6,4	0,4	8,5	6,0	6720
	kemerovo	68,5	3,8	1,6	4,9	0,5	12,6	8,1	6240
	ossipovo	73,0	4,7	2,0	4,5	0,4	7,4	8,0	6670
Lääne-Siber	minussinski, tšernogorski	60,3	4,2	1,8	9,4	0,8	12,5	11,0	5640
Ida-Siber	tšeremhovo	58,9	4,4	1,2	10,1	1,1	14,4	10,0	5520
	tšernovski	47,2	3,1	1,0	10,5	0,4	5,8	32,0	4100
Kaug-Ida	artemovski	47,5	3,6	1,0	13,7	0,3	8,3	25,6	4300
	sutšanski	68,1	3,9	1,1	5,3	0,2	17,9	3,5	6360
Leningradi oblast	Põlevkivi: oudova	17,45	2,15	0,0	1,1	1,7	47,3 + 18,6[1]	11,7	1800
Eesti NSV	põlevkivi	24,5	3,1	0,1	3,9	1,7	41,7 + 15,0[1]	10,0	2600
Kesk-Volga	Põlevkivi: kašpiri	20,6	2,5	0,5	1,4	4,1	49,9 + 8,0[1]	13,0	2010

[1] Esimene liidetav on tuhk A_t, teine karbonaatne süsinikdioksüüd $(CO_2)_t$.

Leiukoha rajoon	Kütuse sort ja mark	Koostis kaaluprotsentides							Tarbimiskütuse küttevääртus
		C_t	H_t	N_t	O_t	S_t^{o+p}	A_t	W_t	Q_t^k kcal/kg
	Vedelkütus:								
	masuut	84,21	12,2	0,0	0,44	0,15	—	3,0	9740
	mootornafta . . .	85.5	12,8	0,0	0,3	0,1	—	1,3	10 000
	Muud kütuse liigid:								
	päevalilleseemne kestad	48,1	5.6	0,5	40,0	0,1	1,9	3,8	3740
	õled	43,0	5,3	0.5	36.4	0.1	4,2	10,5	3690
	Koks, donetsi . .	77.0	0,6	1.0	0,4	1,5	12,0	7,5	6350
	Puidusüsi:								
	miilidest	81,2	1,8	0,4	5,8	0,0	1 8	9,0	6810
	ahjudest	70.6	3,5	0,4	13,7	0,0	1,8	10,0	6195

Vesinik põleb veeauruks võrrandi järgi

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O;$$

ühe kg vesiniku kohta on tarvis $\frac{32}{2 \cdot 2} = 8$ kg hapnikku; ühest kg vesinikust saadakse $\frac{2 \cdot 18}{2 \cdot 2} = 9$ kg H_2O.

Väävel põleb vääveldioksüüdiks; ühe kg väävli põletamiseks on tarvis $\frac{32}{32} = 1$ kg hapnikku; üks kg väävlit annab $\frac{64}{32} = 2$ kg vääveldioksüüdi.

Kui 1 kg kütust sisaldab C_t kg süsinikku, H_t kg vesinikku ja S_t kg väävlit, siis põlemiseks vajaliku hapniku kulu täieliku põlemise korral väljendub järgmise valemiga:

$$G'_{O_2} = \frac{8}{3} C_t + 8H_t + S_t. \qquad (5)$$

Õhuhapnikku aga, mille arvel toimub põlemisprotsess, läheb tarvis vähem, kuna kütus ise sisaldab hapnikku hulgal, mis on võrdne O_t kg; õhuhapnikku läheb järelikult tarvis

$$G_{O_2} = \left[\frac{8}{3} C_t + 8H_t + S_t - O_t\right] \text{ kg hapnikku/kg kütust.}$$

Õhku aga läheb tarvis:

$$K_o = \frac{100}{23{,}2}\left[\frac{8}{3}C_t + 8H_t + S_t - O_t\right] \text{ kg õhku/kg kütust,} \qquad (6)$$

kuna õhk sisaldab ligikaudu 23,2% (kaalu järgi) hapnikku.

Kui kütuse elementaarne koostis on antud kaaluprotsentides, siis valem (6) võtab järgmise kuju:

$$K_o = [0{,}115C_t + 0{,}345H_t + 0{,}043(S_t^{o+p} - O_t)] \text{ kg õhku/kg kütust,} \qquad (6')$$

kus C_t, H_t, S_t^{o+p}, ja O_t on avaldatud kaaluprotsentides.

Ligikaudsetel arvutustel võib vajaliku õhu hulga määramiseks kasutada järgmist valemit:

$$K_o = a\frac{Q_t^k + 6W_t}{1000} \text{ kg õhku/kg kütust,} \qquad (7)$$

kus $a = 1{,}36—1{,}42$, keskmiselt 1,4.

Toodud vajaliku õhu hulga arvutus eeldab järgmisi tingimusi: 1) kütuse täielik põlemine, 2) kogu õhu ja kütuse hapniku täielik ärakasutamine kütuse põlemisel. Sel viisil arvutatud õhu hulka nimetatakse *teoreetiliselt vajalikuks õhu hulgaks*.

Tavaliselt aga, kui juhtida koldesse ainult teoreetiliselt vajalik hulk õhku, tekib kütuse mittetäielik põlemine. Selleks et tagada täielikku põlemist, tuleb õhku anda rohkem, kui on teoreetiliselt vajalik. Tegelikult antud õhuhulga K ja teoreetiliselt vajaliku õhuhulga K_o suhet nimetatakse *liigõhuteguriks* ja tähistatakse tähega α, s. t.

$$\alpha = \frac{K}{K_o} \qquad (8)$$

ehk

$$K = \alpha K_o \qquad (8')$$

Teguri α suurus on katelseadmetes tavaliselt piirides 1,1—1,5 ja sõltub kütuse sordist, kolde tüübist ja ekspluatatsiooni tingimustest. Teguri α madalad väärtused esinevad gaas- ja vedelkütuse ja tolmukujulise kütuse puhul.

Gaasiliste põlemissaaduste ehk suitsugaaside kaaluline hulk saadakse põlemisprotsessi juhitud õhu kaalulisest hulgast K ja ärapõlenud kütuse kaalulisest hulgast, mida ühe kg kütuse kohta võib võtta ligikaudu võrdseks $1 - \frac{A_t}{100}$ (kg), s. t.

$$G \approx K + 1 - \frac{A_t}{100} \text{ kg gaasi/kg kütust.} \qquad (9)$$

Gaaside mahtu on võimalik määrata nende üldkaalu ja erikaalu järgi

$$V = \frac{G}{\gamma_{go}} \text{ nm}^3/\text{kg}.$$

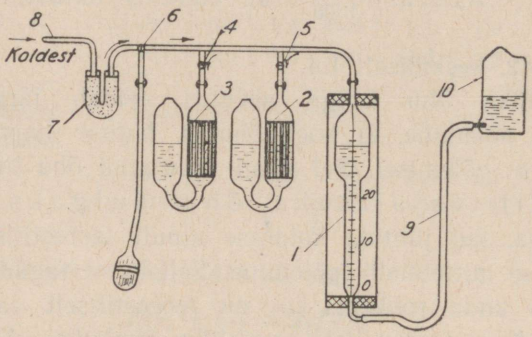
Suitsugaaside erikaalu on võimalik arvutada nende koostise järgi. Ligikaudseteks arvutusteks võib võtta

$$\gamma_{go} \approx 1{,}33 \text{ kg/nm}^3.$$

Ligikaudselt võib arvutada suitsugaaside mahtu ka valemi järgi:

$$V = (c\alpha + b)\frac{Q_t^k + 6W_t}{1000} + 0{,}012W_t \text{ nm}^3/\text{kg kütust}, \qquad (10)$$

kus b ja c on kütuse liigist sõltuvad tegurid: $b = 1{,}07 - 1{,}12$; $c = 0{,}14 - 0{,}02$.



Joon. 3. Orsat' gaasianalüsaator.

Eeltoodust nähtub, et suitsugaaside hulga määramiseks on tarvis teada liigõhuteguri α väärtust.

Töötava katelseadme α määratakse suitsugaaside analüüsi teel (kui põlemine on täielik) valemi järgi:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2}{N_2}} \qquad (11)$$

ja valemi järgi

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0{,}5CO}{N_2}} \qquad (12)$$

(kui põlemissaadustes on süsinikoksüüdi).

Valemites (11) ja (12) O_2, N_2, CO on hapniku, lämmastiku ja süsinikoksüüdi protsentuaalne mahuline sisaldus suitsugaasides. Need suurused leitakse tavaliselt järgmiselt.

O_2 määratakse vahetult gaasianalüsaatori abil.

CO arvutatakse valemi järgi:

$$CO = \frac{(21 - \beta RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0{,}6 + \beta}, \qquad (13)$$

kus β on kütuse nn. tunnusarv, mis omakorda arvutatakse valemi järgi:

$$\beta = 2{,}37 \frac{H_t - 0{,}126(O_t - 0{,}302N_t)}{C_t + 0{,}368\, S_t^{o+p}} + 0{,}005\ ^1. \qquad (14)$$

$RO_2 = CO_2 + SO_2$, s. o. süsinikdioksüüdi ja vääveldioksüüdi summaarne sisaldus suitsugaasides (mahuprotsentides), määratakse gaasianalüsaatori abil.

N_2 arvutatakse valemi järgi:

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO). \qquad (15)$$

Ühe gaasianalüsaatori tüübi (Orsat' aparaadi) ehitus on skemaatiliselt näidatud joonisel 3. See riist koosneb gradueeritud büretist *1* mahuga 100 cm³, mis on täidetud veega, absorbeerimisnõust *2*, mis on täidetud kaaliumhüdroksüüdi (KOH) lahusega, ja samasugusest nõust *3* pürogallooli $C_6H_6(OH)_3$ ja kaaliumhüdroksüüdi seguga.

Bürett *1* on ühendatud nõudega *2* ja *3* kapillaartoru ja kraanide *4* ja *5* kaudu; kapillaartoru ots on kraani *6* ja filtri *7* kaudu ühendatud imemistoruga *8*. Büreti *1* alumine ots on kummitoru *9* kaudu ühenduses nõuga *10*. Analüüsi toimetatakse järgmisel viisil. Büretti *1* imetakse 100 cm³ gaasi, kasutades selleks nõud *10*. Gaas aetakse siis nõusse *2*, milles absorbeeritakse $RO_2 = CO_2 + SO_2$.

Pärast RO_2 absorbeerimist imetakse gaas büretti *1* ja määratakse kindlaks absorbeerunud RO_2 maht. Pärast seda aetakse gaas büretist *1* nõusse *3*, kus absorbeeritakse hapnik. Pärast hapniku absorbeerimist ime-

---

[1] Põlevkivide puhul

$$\beta = 2{,}37 \frac{H_t - 0{,}126[O_t - 0{,}302N_t + 0{,}727x_{CO_2}(CO_2)_t]}{C_t + 0{,}368\, S_t^{o+p} + 0{,}273x_{CO_2}(CO_2)_t} + 0{,}005,$$

kus $(CO_2)_t$ on karbonaatne süsinikdioksüüd %-des;

x_{CO_2} — karbonaatide lagunemise aste; tavaliselt

kihispõletamise korral $x_{CO_2} = 0{,}7—0{,}8$

tolmpõletamise korral $x_{CO_2} = 1$.

takse gaas uuesti büretti *1* ja määratakse absorbeerunud $RO_2 + O_2$ maht. Gaasi imemist absorbeerimisnõudest *2* ja *3* büretti *1* teostatakse nõu *10* abil. Absorbeeritud RO_2 ja O_2 kuupsentimeetrite arv näitab siis protsentides RO_2 ja O_2 mahulist sisaldust kuivades suitsugaasides.

Suitsugaaside koostist kütuse täielikul põlemisel on võimalik ligikaudselt määrata ka järgmisel viisil.

Süsinikdioksüüdi CO_2 saadakse 3,67 kg süsiniku ühe kg kohta. Kui ühe kg kütuse süsinikusisaldus on $\frac{G_t}{100}$, siis süsinikdioksüüdi hulk $G_{CO_2} = 0{,}0367C_t$ kg/kg, kus C_t võetakse kaaluprotsentides.

Veeauru saadakse vesiniku põlemisest $0{,}09H_t$ kg/kg ja kütuse niiskuse väljaaurutamisest $0{,}01W_t$ kg/kg, kokku $G_{H_2O} = 0{,}09H_t + 0{,}01W_t$ kg/kg. Analoogiliselt

$$G_{SO_2} = 0{,}02S_t^{o+p} \text{ kg/kg.}$$

Siin H_t, W_t, S_t^{o+p} võetakse samuti kütuse kaaluprotsentides.

Lämmastikku, mis põlemisprotsessist osa ei võta, saadakse 76,8% õhukaalust, s. t.

$$G_{N_2} = 0{,}768K \text{ kg/kg.}$$

Hapnikku sisaldub põlemissaadustes (liigõhust, mille hulk võrdub $K - K_o$)

$$G_{O_2} = 0{,}232(K - K_o) = 0{,}232K_o(\alpha - 1) \text{ kg/kg.}$$

Seega on ühe kg kütuse täielikul põlemisel tekkivate suitsugaaside kaaluline koostis (kilogrammides) järgmine:

$$G_{CO_2} = 0{,}0367C_t;\ ^1$$
$$G_{H_2O} = 0{,}01(9H_t + W_t);$$
$$G_{SO_2} = 0{,}02S_t^{o+p};$$
$$G_{N_2} = 0{,}768;$$
$$G_{O_2} = 0{,}232(K - K_o) = 0{,}232K_o(\alpha - 1) \text{ kg/kg kütust.}$$

---

[1] Põlevkivide puhul

$$G_{CO_2} = 0{,}0367C_t + 0{,}01x_{CO_2}(CO_2)_t.$$

Teades põlemissaaduste kaalulist koostist, on võimalik arvutada nende mahuline koostis. [1]

Näide. On antud: donbassi kivisüsi, mark ПЖ, mille elementaarne koostis on kaaluprotsentides:
$C_t = 73{,}4$, $H_t = 4{,}3$, $(O_t + N_t) = 4{,}9$, $W_t = 3{,}5$, $S_t^{o+p} = 1{,}8$, $A_t = 12{,}1$. Liigõhutegur $\alpha = 1{,}4$.

Määrata suitsugaaside hulk ja koostis.

Lahendus. Määrame

$$K_o = 0{,}115C_t + 0{,}345H_t + 0{,}043\,(S_t^{o+p} - O_t) =$$
$$= 0{,}115 \cdot 73{,}4 + 0{,}345 \cdot 4{,}3 + 0{,}043(1{,}8 - 3{,}9) = 9{,}84 \text{ kg/kg kütust.}$$

Suitsugaaside koostis kilogrammides on ligikaudu järgmine:

Süsinikdioksüüdi G_{CO_2}	$0{,}0366 \cdot 73{,}4 = 2{,}7$
Veeauru G_{H_2O}	$0{,}01\,(9 \cdot 4{,}3 + 3{,}4) = 0{,}422$
Vääveldioksüüdi G_{SO_2}	$0{,}02 \cdot 1{,}8 = 0{,}036$
Hapnikku G_{O_2}	$9{,}84\,(1{,}4 - 1)\,0{,}23 = 0{,}905$
Lämmastikku G_{N_2}	$1{,}4 \cdot 9{,}84 \cdot 0{,}77 = 10{,}32$
Kokku põlemissaadusi	14,36 kg/kg kütust.

III peatükk.

Soojuse ülekanne.

6. Soojuse ülekanne kiirgamisega.

Kütuse põlemisel eralduv soojus võib üle kanduda katla pindadele kahel viisil: 1) hõõguva kütusekihi või seinte, leegi ja kuumade gaaside kiirgamisega; 2) kuumade gaaside ja küttepindade vahetu kokkupuutumise teel, s. o. nn. konvektsiooni teel.

Kiirgamisega ülekantava soojushulka võib arvutada järgmise valemi järgi:

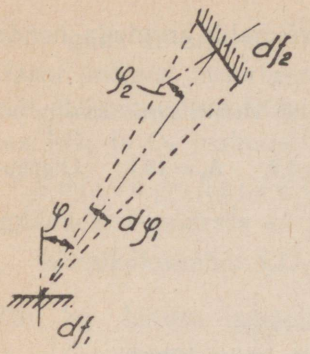
$$Q_{krg} = CH_{krg}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \qquad (16)$$

kus Q_{krg} on kiirgamise teel üleantud soojuse hulk, kcal/h;

H_{krg} — kiirgusenergiat vastuvõttev pind (kiirgus-küttepind), m²;

T_1 ja T_2 — soojusvahetusest osavõtvate kehade pindade keskmised absoluutsed temperatuurid, °K;

[1] See viis põletamissaaduste koostise määramiseks on lihtne ja näitlik, kuid ta pole täpne, kuna tuleb võtta meelevaldselt liigõhuteguri α väärtused ja ette oletada, et põlemine on täielik.



Joon. 4. Kahe meelevaldselt asetatud pinnaelemendi vastastikune kiirgamine.

C — taandatud kiirgamistegur, mis sõltub nende kehade iseloomust, millede vahel toimub soojusvahetus, nende mõõdete suhetest, nende kujust, omavahelisest asendist, keha kuumenemistemperatuurist jne.

Teguri C mõõtühikuks on kcal/m²h $(^0K)^4$.

Taandatud kiirgamisteguri C määramine on tavaliselt seotud väga suurte matemaatiliste raskustega ja ainult mõningatel kõige lihtsamatel juhtudel on teda võimalik määrata analüütiliselt. Üldlahendus teguri C määramisel on järgmine:

Kujutleme endale kahte lõpmata väikeste mõõdetega pinda df_1 ja df_2. Soojuse hulk, mis kandub üle soojemalt pinnalt jahedamale, väljendub võrrandiga:

$$dQ = \frac{C_1 C_2}{C_s} \frac{df_1 df_2}{\pi r^2} \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \qquad (17)$$

kus C_1 ja C_2 on soojusvahetusest osavõtvate kehade kiirgamistegurid;

C_s — absoluutselt musta keha kiirgamistegur.

Tabelis 2 on toodud teguri C arvulised väärtused mitmesugustele materjalidele, milledega tuleb tegemist teha aurukatelde kolletes.

Tabel 2.

Mitmesuguste kehade kiirgamistegurid.

Materjal	Keha temperatuur °C	Kiirgamistegur C kcal/m²h$(^0K)^4$
Absoluutselt must keha	(Ei sõltu temperatuurist)	4,96
Raud (katlaraud, oksüdeerunud)	20— 356	4,32
Lehtvask, jämedalt valtsitud	20— 280	3,68
Valgevask, mattpinnaga	50— 350	1,05
Tellis, tulekindel	1000—1100	4,1—4,2
Tellis, punane	20	4,6

Lõplike mõõdetega pindade puhul see soojuse hulk väljendub võrrandiga:

$$Q_{krg} = \frac{C_1 C_2}{C_s} \int_{f_1} \int_{f_2} \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} df_1 df_2 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]. \qquad (18)$$

Võrreldes seda võrrandit võrrandiga (16), leiame, et

$$C = \frac{1}{f_2} \cdot \frac{C_1 C_2}{C_s} \int_{f_1} \int_{f_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} df_1 \cdot df_2 . \qquad (19)$$

Selle võrrandi inteegrimine on isegi võrdlemisi lihtsate pinnakujude puhul seotud väga keeruliste matemaatiliste ümberkujundamistega. Mõnedel juhtudel aga see võrrand lahendub lihtsalt. Näiteks kahe lõpmata suure pinna puhul, mis asetsevad teineteisega paralleelselt:

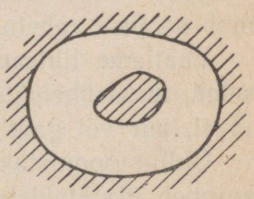
$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}} ; \qquad (20)$$

kahe kiirgava keha *1* ja *2* puhul, milledest üks asetseb teise sees (joon. 5):

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{f_1}{f_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)} , \qquad (21)$$

kus f_1 ja f_2 on sisemise ja välimise keha pinnad.

Toodud valemites ei arvestata leegi ja gaaside kiirgamist.



Joon. 5. Kahe keha vastastikune kiirgamine, milledest üks asetseb teise sees.

Arvesse võtta soojust, mis antakse üle kiirgusküttepinnale leegi ja mittehõõguvate gaaside kiirgamisega, osutub küllalt keerukaks, kuna leegi kiirgamist pole üldse veel küllaldaselt tundma õpitud. Mis puutub gaaside kiirgamisse, siis märgime siinkohal, et ühe- ja kaheaatomilised gaasid on peaaegu täiesti soojusläbipaistvad, s. t. nad ei neela soojuskiirgust ega kiirga ka ise. Kiirgamisvõimeliseks osutuvad ainult süsinik-dioksüüd, veeaur ja muud kolme- ja paljuaatomilised gaasid. Suitsugaaside kiirgamise intensiivsus sõltub järelikult eelkõige nendes süsinik-dioksüüdi ja veeauru sisaldusest.

Eeltoodust nähtub, et taandatud kiirgamisteguri arvulist väärtust pole võimalik määrata puhtteoreetiliselt, vaid teda määratakse eksperimentaalselt. Ta muutub suurtes piirides.

Praktiliste arvutuste puhul kiirgamissoojuse hulga määramiseks tavaliselt ei kasutata füüsikalisi seadusi, kuna nende rakendamine annaks erakordselt keerukaid lahendusi. Selle asemel kasutatakse empiirilisi valemeid, mis rajanevad arvukatele katselistele andmetele.

7. Soojuse ülekanne konvektsiooni teel.

Konvektsiooni teel ülekanduvat soojuse hulka võib arvutada Newtoni poolt esitatud valemiga:

$$Q_{kv} = KH\Delta t. \tag{22}$$

Sellest valemist järgneb, et

$$\Delta t = \frac{Q_{kv}}{H} \cdot \frac{1}{k} = \frac{Q_{kv}}{H} \cdot R, \tag{23}$$

kus Q_{kv} on konvektsiooniga ülekanduv soojuse hulk, kcal/h;

k — soojuse läbikande tegur ehk soojusvoo juhtivus, mis näitab, kui palju soojust kandub üle suitsugaasidelt töötavale keskkonnale läbi soojenduspinna ühe m² tunnis, kui suitsugaaside ja töötavkeha temperatuuride vahe on 1° C; teguri mõõtühikuks on kcal/m²h kraad;

$R = \frac{1}{k}$ — soojusvoo takistus (soojuse läbikande teguri pöördväärtus);

H — kokkupuute pind, m²;

Δt — suitsugaaside ja töötava keskkonna temperatuuride keskmine vahe vaadeldava soojenduspinna piirides.

Soojuse läbikande tegur k sõltub paljudest tingimustest, millistel toimub soojuse vahetus läbi seina suitsugaaside ja töötava keskkonna vahel.

Vaatleme lihtsamat juhust, kus soojuse ülekanne toimub läbi lameda seina, mida ühelt poolt uhuvad suitsugaasid, teiselt poolt töötav keskkond (vesi, aur või gaas)[1].

Üldine soojustakistus soojuse ülekandumisel gaasidelt veele läbi seina kujuneb üksiktakistuste summaks.

Esimene takistus R_1 — soojusvoogu vastuvõtva pinna termiline takistus, esineb soojuse ülekandumisel gaasidelt seina välispinnale, kusjuures R_1 võrdub gaasidelt seinale soojuse üleande teguri α_1 pöördväärtusega, s. t.

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1}.$$

Teine takistus R_2 — seina termiline takistus — ilmneb seinas endas; ta on võrdeline seina paksusega ja pöördvõrdeline seina soojusjuhtivusega, s. t.

$$R_2 = \frac{\delta}{\lambda},$$

kus δ on seina paksus, m;

[1] Asja lihtsustamiseks on edaspidi arvatud, et töötavaks keskkonnaks on vesi.

λ — soojusjuhtivuse tegur, kcal/m tund kraad.

Kolmas takistus R_3 on soojusvoogu töötavale keskkonnale edasiandva pinna termiline takistus, s. o.

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_2},$$

kus α_2 on seinalt veele soojuse üleande tegur.

Siit järgneb, et

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3},$$

ehk

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kcal/m}^3\text{h kraad.} \qquad (24)$$

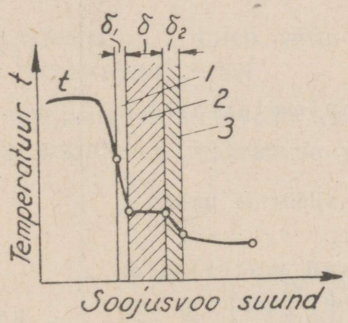
Kui katla sein on mustunud, s. o. kaetud seestpoolt katlakiviga, väljastpoolt aga tuhaga või tahmaga, siis soojusvoo takistus suureneb ja soojuse läbikande tegur on määratav valemiga:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kcal/m}^3\text{h kraad,} \qquad (25)^*$$

kus $\frac{\delta_1}{\lambda_1}$ on tahmakihi termiline takistus;

$\frac{\delta_2}{\lambda_2}$ — katlakivi kihi termiline takistus.

Temperatuuri muutumine soojusvoo suunas, mis läbib mustunud seina, on näidatud joonisel 6.



Joon. 6. Temperatuurikõver soojusvoo puhul läbi mitmekihilise seina. *1* — tahmakiht; *2* — metallsein; *3* — katlakivi kiht.

---

* Võrrand (25) on küllaldase täpsusega rakendatav ka õhukeste seintega silindrilistele torudele.

Õhukeste silindriliste torude puhul on õigem määrata soojuse läbikande tegurit k valemi järgi

$$k_2^* = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}\cdot\frac{d_4}{d_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}\cdot\frac{d_4}{d_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\cdot\frac{d_4}{d_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\cdot\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kcal/m}^3\text{h kraad.} \quad (26)$$

Selle valemi kasutamisel toru pind valemis (22) tuleb võtta välise läbimõõdu d_4 järgi (läbimõõtude tähistused vt. joonisel 7).

Toodud valemitega on hõlpus määrata seina enda termilist takistust antud seina paksuse ja seina materjali soojusjuhtivuse järgi (soojusjuhtivuse võib leida käsiraamatust). Mõnede materjalide jaoks on andmed toodud tabelis 3.

Tabel 3.

Mitmesuguste materjalide soojusjuhtivus kcal/m h kraad.

Materjali nimetus	Soojusjuhtivus
Metallid:	
Alumiinium	175
Raud	40—50
Messing	75—100
Vask	300—340
Hõbe	360
Ehitusmaterjalid:	
Betoon	0,7—1,2
Tellismüüritis	0,4
Šamott-tellis	0,9—1,1
Isolatsioonimaterjalid:	
Asbest	0,18
Diatomiitmass	0,10
Plaadid korgist, vildist ja turbast	0,04—0,08
Saepuru	0,06
Mitmesugused materjalid:	
Õhk (paigalseisev)	0,02
Masinaõli	0,01
Katlakivi	0,15—2,0
Tahm	0,06—0,2

* Indeks „2" tähistab, et tegur k on arvutatud toru välispinna kohta. Indeksiga „1" tähistatakse k väärtust toru sisepinna kohta.

Gaasidelt seinale, samuti ka seinalt keevale veele, aurule või gaasile soojuse üleande teguri määramine aga on seotud suurte raskustega.

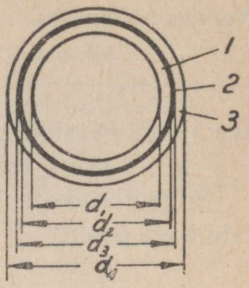
Soojuse üleande tegur sõltub väga paljudest asjaoludest, milledest osutuvad tähtsamateks:

1) gaaside liikumise kiirus;

2) kanali, mida mööda liigub gaaside voolus, elavristlõike kuju ja geomeetrilised mõõted;

3) gaaside füüsikalised konstandid, s. t. nende tihedus, viskoossus, erisoojus ja soojusjuhtivus.

Praktikas arvutatakse soojuse üleandetegur α_1 empiiriliste valemite järgi, mis määratakse tavaliselt katseliselt M. V. Kirpitševi poolt arendatud sarnasusteooria põhjal.



Joon. 7. Mitmekihilise seinaga toru. *1* — katlakivi kiht; *2* — metallsein; *3* — tahmakiht.

Kui on tegemist soojuse üleandega gaaside liikumisel torudes ja kanalites, samuti soojuse üleande puhul torude kimbus, mida uhutakse väljastpoolt gaaside voolusega piki torusid võib kasutada järgmist valemit:

$$\alpha_1 = 0{,}022 w^{0{,}8} d^{-0{,}2} \lambda \nu^{-0{,}8}, \qquad (27)$$

kus w on gaasi keskmine kiirus, m/sek;

γ — gaasi erikaal, kg/m³;
ν — gaasi kinemaatiline viskoossus, m/sek;
λ — gaasi soojusjuhtivus, kcal/m h kraad;
d — toru läbimõõt, m.

Gaasi füüsikalised suurused ν, λ tuleb võtta temperatuuris, mis on keskmine gaasi ja seina temperatuuri vahel.

Kui silmas pidada sirgjoonelist sõltuvust temperatuurist füüsikaliste suuruste kompleksil, mis sisalduvad määramise võrrandis, siis tegur α_1 on määratav järgmiselt:

õhu jaoks

$$\alpha_1 = \left(3{,}97 + 1{,}65 \frac{t_k}{1000}\right) \frac{\left(\frac{273w}{273 + t_k}\right)^{0{,}79}}{d^{0{,}21}}; \qquad (28)$$

suitsugaaside jaoks

$$\alpha_1 = \left(4{,}20 + 1{,}96 \frac{t_k}{1000}\right) \frac{\left(\frac{273w}{273 + t_k}\right)^{0{,}79}}{d^{0{,}21}}. \qquad (29)$$

Nendes valemites

$$t_k = \frac{t_g + t_s}{2},$$

kus t_g on gaaside keskmine temperatuur;

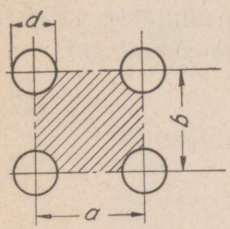
t_s — seina temperatuur.

Suitsutorude jaoks võib kasutada valemit, mis on esitatud prof. Sõromjatnikovi poolt:

$$\alpha_1 = 6 + 4{,}4\sqrt{w}. \tag{30}$$

Kui on tegemist mitte-ümmarguste torudega, siis tuleb toodud valemites d asendada ekvivalentse läbimõõdu väärtusega, mis arvutatakse valemi järgi:

$$d_{ekv} = \frac{4\Omega}{U},$$



Joon. 8. Gaasi vooluse ekvivalentse läbimõõdu määramine.

kus Ω on gaasivooluse ristlõike pindala,

U — toru perimeeter.

Juhul, kui torusid uhutakse väljastpoolt, ei tohi unustada, et valemites (27—30) esineva d väärtus pole sugugi võrdväärne gaasi poolt uhutava toru läbimõõduga: d on selle kanali ekvivalentne läbimõõt, mida mööda voolab gaas. Näiteks, kui torude paigutus vastab joonisele 8, siis nende välise uhtumise puhul

$$d = d_{ekv} = \frac{4\Omega}{U} = \frac{4ab - \pi d^2}{\pi d}.$$

Ristsuunalisel torude kimbu uhtumisel võib kasutada „ВТИ" (Üleliidulise Soojustehnilise Instituudi) valemit:

$$\alpha = C\frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\varrho}{\mu}\right)^n, \tag{31}$$

kus λ on gaasi soojusjuhtivus, kcal/m h kraad;

d — uhutavate torude läbimõõt, m;

w — gaasi kiirus torude kimbu kõige kitsamas lõikes, m/sek;

ϱ — gaasi tihedus, kg sek^2/m^4;

μ — dünaamiline viskoossus, kg sek/m^2;

C ja n — tegurid, millede arvulised väärtused tuleb võtta tabelist 4 tingimusel, et λ, ϱ, μ on määratud temperatuuril

$$t_k = \tfrac{1}{2}(t_s + t_g).$$

Tabel 4.

C ja *n* arvulised väärtused valemi (31) jaoks „BTH" andmetel.

	Koridoriline torude asetus (joon. 9)					Malekorras torude asetus (joon. 10)			
s_1/d / s_2/d	n	1,2—1,5 C	1,5—2 C	2—2,5 C	s_1/d / s_2/d	n	1,1—1,3 C	1,3—1,6 C	1,6—2 C
1,2—1,5	0,65	0,178	0,172	0,169	1,1—1,3	0,60	0,285	0,300	0,320
1,5—2	0,65	0,173	0,170	0,169	1,1—1,6	0,60	0,292	0,295	0,310
2 —2,5	0,65	0,169	0,168	0,167	1,6—2,0	0,60	0,273	0,295	0,295

Lihtsamateks, kuigi vähem täpsemateks osutuvad järgmised valemid:

Koridorilisel torude asetamisel:
kahe torude rea jaoks

$$\alpha_1 = \left(4{,}01 + 2{,}34\,\frac{t_k}{1000}\right)\frac{\left(\frac{273w}{273+t_k}\right)^{0{,}65}}{d^{0{,}35}}; \qquad (32)$$

nelja torude rea jaoks

$$\alpha_1 = \left(4{,}24 + 2{,}48\,\frac{t_k}{1000}\right)\frac{\left(\frac{273w}{273+t_k}\right)^{0{,}65}}{d^{0{,}35}}; \qquad (33)$$

Malekorras torude asetamisel:
kahe torude rea jaoks

$$\alpha_1 = \left(4{,}24 + 2{,}38\,\frac{t_k}{1000}\right)\frac{\left(\frac{273w}{273+t_k}\right)^{0{,}69}}{d^{0{,}31}}; \qquad (34)$$

nelja torude rea jaoks

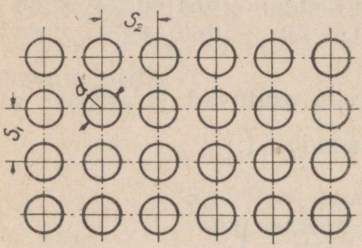
$$\alpha_1 = \left(6{,}23 + 3{,}48\,\frac{t_k}{1000}\right)\frac{\left(\frac{273w}{273+t_k}\right)^{0{,}69}}{d^{0{,}31}}. \qquad (35)$$

Vähetäpsetel orienteeruvatel arvutustel võib kasutada empiirilist valemit

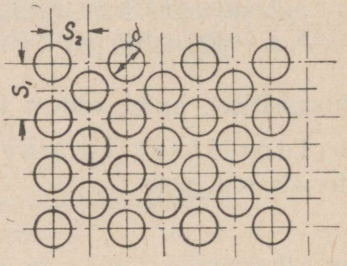
$$\alpha_1 = 2{,}5 + 10\sqrt{w}; \qquad (36)$$

kus w on gaaside kiirus, m/sek.

Seinalt keevale veele või aurule soojuse üleande teguri α_2 määramiseks on olemas vähe andmeid, kusjuures needki on küllalt laialivalguvad, mõnikord isegi üksteisele vasturääkivad. On tõsi, et sellel olulist tähtsust pole juhul, kui termiline takistus $\frac{1}{\alpha_2}$ pole suur, nagu näiteks keeva vee puhul, kus soojuse ülekande tegur α_2 kõigub piirides 6000 kuni 15 000 kcal/m²h kraad. Kuid ülekuumendatud auru või gaasi puhul on α_2 suuruse valik väga olulise tähtsusega.



Joon. 9. Koridoriline torude asetus. Gaaside liikumine vasakult paremale.



Joon. 10. Malekorras torude asetus. Gaaside liikumine vasakult paremale.

Ülaltoodud andmetest nähtub, et katlatorude seinte väikese paksuse puhul ja mustumise puudumisel teguri k suurus sõltub peamiselt α_1 väärtusest, kuna võrrandis (23) teised suurused on väikese tähtsusega. Teguri k kõrgete väärtuste saavutamiseks tuleb seepärast püüda saavutada α_1 kõrgeid väärtusi.

Tuleb eriti alla kriipsutada, et soojuse läbikande tegurit ei mõjuta tegelikult sugugi katla torude või trumli materjal. Näiteks vasksein, mis on palju suurema soojusjuhtivusega kui raudsein, ei suurenda tegelikult tegurit k, võrreldes raudseinaga. Väga suurt termilist takistust aga omavad tahm ja katlakivi; seinte ülemäärane kattumine katlakiviga võib põhjustada soojuse läbikande teguri järsku vähenemist, seinte temperatuuri tõusu ja nende läbipõlemist. Selgitame näitel mustumise mõju soojuse ülekandele.

Näide. Arvutada suitsutorukatla raudtorude soojuse läbikande tegur, kui gaaside kiirus $w = 9$ m/sek, toru seina paksus $\delta = 4$ mm, esiteks puhta seina puhul ja teiseks seina puhul, mis ühelt poolt on kaetud 2 mm paksuse tahma kihiga ja teiselt poolt 5 mm katlakivi kihiga.

Lahendus. Arvutame lameda seina valemi järgi:

Tabelitest leiame $\lambda = 50$ kcal/m²h kraad; võtame $\alpha_2 = 6000$ kcal/m²h kraad.

Arvutame α_1 empiirilise valemi (30) järgi:

$$\alpha_1 \approx 6 + 4{,}4\sqrt{w};$$

$$\alpha_1 = 6 + 4{,}4\sqrt{9} = 19{,}2 \text{ kcal/m²h kraad;}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{19{,}2} + \frac{0{,}0004}{50} + \frac{1}{6000}} \approx 19{,}2 \text{ kcal/m² kraad,}$$

s. t.

$$k \approx \alpha_1.$$

Mustunud seina puhul, võttes tabelist 3 suuruse $\lambda_1 = 1{,}0$, tahma soojusjuhtivuse $\lambda_2 = 0{,}06$, leiame:

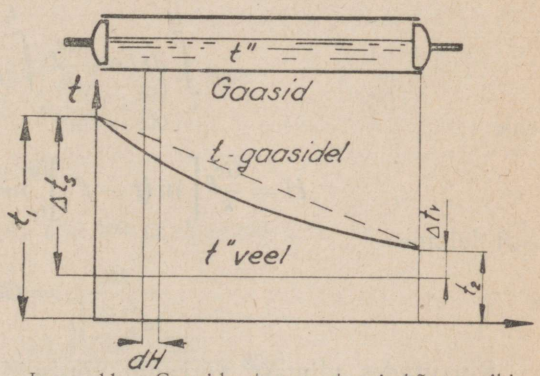
$$k = \frac{1}{\frac{1}{19{,}2} + \frac{0{,}002}{0{,}06} + \frac{0{,}004}{50} + \frac{0{,}005}{1} + \frac{1}{6000}} = 12{,}6 \text{ kcal/m²h kraad.}$$

Toodud näitest nähtub, et seina mustumise tagajärjel soojuse läbikande tegur väheneb poolteist korda, võrreldes teguriga puhta seina jaoks.

8. Temperatuuri keskmise vahe määramine.

Võrrandi 22 järgi soojuse hulk, mis kandub üle konvektsiooni teel, on võrdeline nende kehade temperatuuri keskmise vahega (Δt), millede vahel toimub soojusvahetus.

Kujutleme endale katla, mida uhutakse gaasidega (joon. 11). Gaaside temperatuur suitsukäigu alguses on t_1, suitsukäigu lõpus t_2; vee temperatuur katlas on püsiv — t'', s. o. keemistemperatuur, mis vastab katlas olevale rõhule.



Joon. 11. Gaaside temperatuuri kõver piki küttepinda.

Gaaside ja vee temperatuuri vahe suitsukäigu alguses on Δt_s (suurem), lõpus Δt_v (väiksem). Kui gaaside temperatuuri langus piki pinda oleks ühtlane, s. t. kui gaaside temperatuuri muutumise kõver piki gaasikäiku oleks sirge (joonisel 11 see kõver on näidatud punktiiriga), siis temperatuuri keskmine vahe osutuks temperatuuride alg- ja lõppvahe keskmiseks aritmeetiliseks, s. t.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_s + \Delta t_v}{2} = \frac{(t_1 - t'') + (t_2 - t'')}{2}. \qquad (37)$$

Tegelikult on soojuse ülekandumine gaasidelt katla seinale seda intensiivsem, mida suurem on temperatuuri vahe gaaside ja vee vahel, ja järelikult gaaside temperatuuri langus piki gaasikäiku on ebaühtlane: alguses kiirem ja lõpus aeglasem.

Selleks, et määrata t suurust, võtame pinnaelemendi dH. Soojuse hulk, mille gaasid annavad ära küttepinna selle elemendi kaudu, võrdub

$$dQ = kdH(t - t''),$$

kus t on gaaside temperatuur.

Soojust ära andes gaasid jahtuvad dt'' võrra, s. t., et gaaside poolt äraantud soojus

$$dQ = Gc_p dt,$$

kus G on gaaside hulk kg;

c_p — gaaside erisoojus jääva rõhu juures.

Püsiva protsessi puhul gaaside poolt äraantud soojuse hulk on võrdne läbi seina kanduva soojuse hulgaga, s. t.

$$kdH(t - t'') = Gc_p dt, \qquad (a)$$

ehk

$$dH = \frac{Gc_p dt}{k(t - t'')}.$$

Lugedes G, c_p ja k konstantseteks ja inteegrides võrrandit (a) saame:

$$\int_0^H dH = \frac{Gc_p}{k} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{(t - t'')},$$

ehk

$$H = \frac{Gc_p}{k} \left[\ln (t - t'') \right]_{t_1}^{t_2} = \frac{Gc_p}{k} \ln \frac{t_1 - t''}{t_2 - t''}.$$

Siit leiame

$$\frac{Hk}{\ln \frac{t_1 - t''}{t_2 - t''}} = Gc_p.$$

Korrutades viimase võrrandi võrdseid $(t_1 - t_2)$-ga, saame

$$kH \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t''}{t_2 - t''}} = Gc_p(t_1 - t_2). \qquad (b)$$

Võrrandi (b) parempoolne osa aga kujutab gaaside poolt veele äraantud soojuse hulka Q, mis võrrandi (22) järgi peab võrduma:

$$Q = kH\Delta t.$$

Järelikult

$$kH\Delta t = kH\frac{t_1 - t_2}{\ln\frac{t_1 - t''}{t_2 - t''}} = kH\frac{(t_1 - t'') - (t_2 - t'')}{\ln\frac{t_1 - t''}{t_2 - t''}} = kH\frac{\Delta t_s - \Delta t_v}{\ln\frac{\Delta t_s}{\Delta t_v}},$$

ehk

$$\Delta t = \frac{\Delta t_s - \Delta t_v}{\ln\frac{\Delta t_s}{\Delta t_v}}. \qquad (38)$$

Võrrand 38 annab temperatuuri tegeliku keskmise vahe gaaside ja keeva vee vahel katlas.

Ligikaudset võrrandit (37) võib kasutada siis, kui $\frac{\Delta t_s}{\Delta t_v}$ pole suurem kui 2. Vastasel korral tuleb kasutada võrrandit (38).

Kui suur lahkuminek tekib temperatuuri keskmise vahe arvutamisel võrrandite (37) ja (38) järgi, võib näha allpool toodud näidetest.

Näide 1. Määrata Δt, kui $t_1 = 1200^\circ$ C, $t_2 = 300^\circ$ C, $t'' = 200^\circ$ C (vastab rõhule katlas p = 15 atü).
Võrrandi (37) järgi:

$$\Delta t = \frac{(1200 - 200) + (300 - 200)}{2} = 550^\circ.$$

Võrrandi (38) järgi:

$$\Delta t = \frac{1200 - 200}{2{,}303\ \lg\frac{1200 - 200}{300 - 200}} = 392^\circ.$$

Lahkuminek on 40%, kuna $\frac{\Delta t_s}{\Delta t_v} = 10$.

Näide 2. On antud: $t_1 = 1200^\circ$ C; $t_2 = 800^\circ$ C; $t'' = 200^\circ$ C.
Määrata Δt.
Lahendus. Võrrandi (37) järgi:

$$\Delta t = \frac{(1200 - 200) + (800 + 200)}{2} = 800^\circ.$$

Võrrandi (38) järgi:

$$\Delta t = \frac{1200 - 800}{2{,}303\ \lg\frac{1200 - 200}{800 - 200}} = 790^\circ.$$

Lahkuminek on õige väike, kuna $\frac{\Delta t_s}{\Delta t_v} < 2$.

9. Üheaegne soojuse ülekanne konvektsiooniga ja kiirgamisega.

Oleme vaadelnud soojuse ülekannet kiirgamisega ja eraldi ka ülekannet konvektsiooniga. Suitsugaaside kõrgetel temperatuuridel, nagu näiteks aurukatla koldes, soojuse ülekanne kiirgamisega ületab märgatavalt konvektiivset ülekannet, mistõttu viimast sageli ei arvestata. Vastupidi sellele võib suitsugaaside madalatel temperatuuridel õhueelsoojendites jätta arvestamata soojuse ülekande kiirgamisega. Katlakäikudes aga ja ülekuumendis tuleb arvestada mõlemaid soojuse ülekande liike ja küttepinnale edasiantud soojuse üldhulk Q on järelikult:

$$Q = Q_{krg} + Q_{kv},$$

kus Q_{krg} on kiirguse teel ülekantud soojuse hulk ja

Q_{kv} — konvektsiooni teel ülekantud soojuse hulk.

Mõnedel juhtudel kiirgamispind H_{krg} ja kokkupuutepind H_{kv} omavahel ei ühtu. Nii näiteks, kui kolde seina ääres asetsevad küttepinna torud, siis kiirgamispind kujutab endast torude projektsioonide pindalade summat tasapinnale, mis on risti kiirgussoojuse vooga. Kokkupuutepinnaks sel juhul aga loetakse torude kogu pindala, mida uhutakse koldegaaside poolt.

Selleks, et lihtsustada katlakäikude pinna arvutust, võetakse kasutusele leppeline mõiste summaarsest soojuse ülekande tegurist α, mis kujutab endast kiirgusüleande teguri α_k ja konvektsiooniüleande teguri α_{kv} summat, s. t.

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{kv} = \alpha_1.$$

Soojusülekanne kiirgamisega toimub katlakäikudes gaaside kiirgamise näol.

Gaaside kiirgamine erineb põhjalikult tahkete kehade kiirgamisest. Nagu eespool märkisime, on ühe- ja kaheaatomilised gaasid (H_2, N_2, O_2 jt.) soojuskiirguse suhtes praktiliselt läbipaistvad, s. t., et nad ei oma soojuse absorbeerimise ja seega ka kiirgamise võimet. Gaasidest, mis saadakse kütuse põlemisproduktidena, on H_2O, CO_2 ja ka SO_2 võimelised teatavates lainepikkuste piirkondades absorbeerima soojuskiirgust ja välja kiirgama samade lainepikkustega soojuskiiri (nn. selektiivne kiirgamine). Nende gaaside kiirgamine võib kõrgetel temperatuuridel omada tähelepanuväärset osatähtsust suitsugaaside ja küttepindade vahelises soojuse ülekandumises.

Teiseks gaaside iseärasuseks on asjaolu, et kiirgusenergia neeldumine ei lõpe õhukeses kihikeses gaasikihi pinnal, nagu see toimub tahkete

kehade juures, vaid järk-järgult kogu gaasikihi ulatuses. Soojuskiirgus, langedes gaasikihile, mis on absorbeerimisvõimeline antud lainepikkusel, osaliselt neeldub gaasikihis, osaliselt aga läbib gaasikihi ning väljudes omab vähenenud intensiivsust. Intensiivsuse vähenemine, ehk teiste sõnadega — kiirgusenergia neeldumine, oleneb gaasikihi paksusest, gaasi rõhust ja temperatuurist. Sama on kehtiv ka gaasikihi kiirgamise kohta: kuuma gaasi kihti ümbritseva pinna ühikule gaasi poolt kiiratav soojuse hulk oleneb samadest teguritest, s. t.

$$q = f(p,\ s,\ T)\ \text{kcal/m}^2\text{h},$$

kus p on gaasi rõhk, atm;

s — gaasikihi efektiivne paksus, m;

T — absoluutne temperatuur.

Katlakäikudes moodustavad suitsugaasid segu kiirgavatest ja mittekiirgavatest gaasidest. Seejuures võib suitsugaaside rõhu lugeda võrdseks ühe ata-ga, millega kiirgava gaasi osarõhk väljendub tema mahulise osaga segus, s. t.

$$p_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V} = \frac{G_{CO_2}\gamma}{G\gamma_{CO_2}},$$

$$p_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V} = \frac{G_{H_2O}\gamma}{G\gamma_{H_2O}},$$

kus V on ühe kg kütuse põlemisest saadav gaasiliste põlemissaaduste mahuline kogus nm³, G — nende kaaluline kogus kg ja γ — erikaal.

V_{CO_2} – ühe kg kütuse põlemisel saadav CO_2 mahuline kogus nm³, G_{CO_2} — kaaluline kogus kg ja γ_{CO_2} — erikaal.

V_{H_2O}, G_{H_2O} ja γ_{H_2O} — samad suurused põlemissaadustes oleva veeauru kohta.

p_{CO_2} ja p_{H_2O} on CO_2 ja H_2O osarõhud atmosfäärides põlemissaadustes, s. o. suitsugaasides.

Soojuse vahetus kiirgusega gaaside (suitsugaasid) ja tahke keha (katelagregaat, küttepinnad) vahel on arvutatav järgmiste katselisel teel saadud valemitega:

$$q_{CO_2} = 3{,}5\sqrt[3]{p_{CO_2}s}\left(\frac{T}{100}\right)^{3,5}\ \text{kcal/m}^2\text{h}, \qquad (39)$$

$$q_{H_2O} = 35p_{H_2O}^{0,8}s^{0,6}\left(\frac{T}{100}\right)^{3}\ \text{kcal/m}^2\text{h}. \qquad (39')$$

Gaasikihi efektiivne paksus s gaasiruumi mitmesuguste eri kujude puhul.

Gaasiruumi geomeetriline kuju	s
1. Gaas kahe lõpmatu suure paralleelse pinna vahel. Kiirgamine pinnale, pindade vahega h.	$s = 1{,}8h$
2. Silinder kõrgusega $h = \infty$, läbimõõduga d. Kiirgamine silindri küljele.	$s = 0{,}9d$
3. Torude kimp, moodustatud torudest läbimõõduga d, torutelgede vahega x. Torude vahelise gaasiruumi jaoks torude asetuse puhul:	
a) võrdkülgse kolmnurga tippudes, $x = 2d$	$s = 2{,}8d$
b) „ „ „ $x = 3d$	$s = 7{,}6d$
c) ruudu tippudes $x = 2d$	$s = 3{,}2d$

Nende valemitega määratakse soojuse hulk, mida kiirgab gaas seinale, gaasi temperatuuril T_g °K, ja soojuse hulk, mida gaas võtab vastu seinalt, mille temperatuur on T_s °K.

Soojuse vahetuse olukorras, kus $T_g > T_s$, sein võtab vastu gaasilt soojuse hulga

$$q = \varepsilon (q^g - q^s),$$

kus q^g ja q^s on arvutatud valemitega (39) ja (39′) vastavalt temperatuuridele T_g ja T_s, ning ε on musta värvuse aste, mis katelagregaadi küttepindade puhul võetakse 0,8—0,82.

Kiirguse ülekande tegur on arvutatav järgmise valemiga

$$\alpha_k = \alpha_k^{CO_2} + \alpha_k^{H_2O} = \frac{\varepsilon\left(q^g_{CO_2} - q^s_{CO_2}\right)}{T_g - T_s} + \frac{\varepsilon\left(q^g_{H_2O} - q^s_{H_2O}\right)}{T_g - T_s}. \qquad (39'')$$

Näide. Veetorukatla torude kimpu uhutakse gaasiga, milles on mahuliselt $CO_2 = 14\%$ ja $H_2O = 8{,}5\%$. Gaaside keskmine temperatuur on 900° C, torude välispinna temperatuur 200° C. Torud asetsevad ruudu tippudes; $d = 52$ mm.

Arvutada kiirguse ülekande tegur α_k.

Gaasilt seinale kiiratav soojuse hulk (valem 39)

$$q^g_{CO_2} = 3{,}5 \sqrt[3]{p_{CO_2} \cdot s} \left(\frac{Tg}{100}\right)^4.$$

Siin

$$p_{CO_2} = 0{,}14 \text{ at.}$$

Efektiivne gaasikihi paksus, vastavalt eeltoodud tabelile, on

$$s = 3{,}2d = 3{,}2 \cdot 0{,}052 = 0{,}166,$$
$$T_g = 900 + 273 = 1173° \text{ K}.$$

Sellega

$$q^{g}_{CO_2} = 3{,}5\sqrt[3]{0{,}14 \cdot 0{,}166}\left(\frac{1173}{100}\right)^{3{,}5} = 5060 \text{ kcal/m}^2\text{h}.$$

Seina poolt kiiratud soojuse hulk

$$q^{s}_{CO_2} = 3{,}5\sqrt[3]{p_{CO_2} \cdot s}\left(\frac{T_s}{100}\right)^{3{,}5},$$

$$q^{s}_{CO_2} = 3{,}5\sqrt[3]{0{,}14 \cdot 0{,}166}\left(\frac{200+273}{100}\right)^{3{,}5} = 230 \text{ kcal/m}^2\text{h}.$$

Sama veeauru jaoks valemiga (39′):

$$q^{g}_{H_2O} = 35 p^{0{,}8}_{H_2O} s^{0{,}6}\left(\frac{T_g}{100}\right)^{3}.$$

Siin $p_{H_2O} = 0{,}085$ at.
Seega

$$q^{g}_{H_2O} = 35 \cdot 0{,}085^{0{,}8} \cdot 0{,}166^{0{,}6}\left(\frac{1173}{100}\right)^{3} = 2160 \text{ kcal/m}^2\text{h},$$

$$q^{s}_{H_2O} = 35 \cdot 0{,}085^{0{,}8} \cdot 0{,}166^{0{,}6}\left(\frac{473}{100}\right)^{3} = 106 \text{ kcal/m}^2\text{h}.$$

Valemiga (39″) on arvutatav summaarne kiirguse ülekande tegur

$$\alpha_k = \alpha_k^{CO_2} + \alpha_k^{H_2O} = \frac{\varepsilon\left(q^{g}_{CO_2} - q^{s}_{CO_2}\right)}{T_g - T_s} + \frac{\varepsilon\left(q^{g}_{H_2O} - q^{s}_{H_2O}\right)}{T_g - T_s} =$$

$$= \frac{0{,}8(5060 - 230)}{1173 - 473} + \frac{0{,}8(2160 - 106)}{1173 - 473} = \frac{5420}{700};$$

$$\alpha_k = \alpha_k^{CO_2} + \alpha_k^{H_2O} = 5{,}5 + 2{,}3 = 7{,}8 \text{ kcal/m}^2\text{h kraad}.$$

IV peatükk.

Katelseadme soojusbilanss.

10. Soojusbilansi põhivõrrand.

Kogu soojuse hulgast, mis kütusega on viidud koldesse, suurem osa kasutatakse auru saamiseks, kuna ülejäänud osa läheb mitmesuguste kadude katteks.

Katelseadme soojusbilanss käib tavaliselt kütuse ühe kg kohta ja kirjutatakse järgmiselt:

$$Q^{k}_{t} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \qquad (40)$$

kus Q^{k}_{t} on tarbimiskütuse küttevääртus, kcal/kg;

Q_1 — katelseadmes kasulikult tarbitud soojus, kcal/kg;
Q_2 — soojuskaod lahkuvate suitsugaasidega, kcal/kg;
Q_3 — soojuskaod põlemise keemilisest ebatäiuslikkusest, kcal/kg;
Q_4 — soojuskaod põlemise mehaanilisest ebatäiuslikkusest, kcal/kg;
Q_5 — soojuskaod ümbruskonda katla välisjahtumisest, kcal/kg;
Q_6 — soojuskaod katlavee, müüritise ja katelseadme muude osade esialgseks ülessoojendamiseks, kcal/kg.

Püsiva režiimi puhul $Q_6 = 0$.

Kui arvutada protsentides, siis soojusbilanss avaldub järgmise võrrandiga:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \%, \tag{40'}$$

kus 100%-iks on võetud tarbimiskütuse alumine soojusväärtus, q_1, q_2 jne. aga on vastavateks koostusosadeks protsentides.

11. Kasulikult ärakasutatud soojus ja katelseadme kasutegur.

Kui tähistame katlast või auruülekuumendist tunnis väljuva auru hulka D-ga, auru entalpiat $i_{ü}$-ga, katelseadmesse saabuva toitevee temperatuuri t_v-ga, (selle entalpiat i_v-ga), siis katelseadmes kasulikult ärakasutatud soojuse hulk on:

$$D(i_{ü} - ct_v) = D(i_{ü} - i_v) \text{ kcal/h}, \tag{41}$$

kus c on vee erisoojus.

Kui tunnis põletatakse B kg kütust, siis

$$Q_1 = \frac{D(i_{ü} - i_v)}{B} \text{ kcal/kg kütust.} \tag{42}$$

Kasulikult ärakasutatud soojuse Q_1 ja tarbimiskütuse alumise kütteväärtuse Q_t^k suhe moodustab katelseadme kasuteguri (bruto-kasuteguri):

$$\eta_{ka} = \frac{Q_1}{Q_t^k} = \frac{q_1}{100} = \frac{D(i_{ü} - i_v)}{BQ_t^k}. \tag{43}$$

Katelagregaadi kasutegur sõltub paljudest asjaoludest, näiteks kütuse sordist, kolde ja katelagregaadi konstruktsioonist, küttepinna soojuslikust erikoormusest ja ta seisukorrast. Kasutegur kõigub väga laiades piirides (ligikaudu 0,5 kuni 0,9).

12. Soojuskaod lahkuvate suitsugaasidega.

Soojuskaod lahkuvate suitsugaasidega moodustavad tavaliselt peaosa kõikidest kadudest. Teda määratakse, kui pole olemas aurupuhumist, järgmiselt:

$$Q_2 = Gc'_p t_{hg} - Kc_p t_{kõ}, \tag{44}$$

kus G on kütuse ühe kg põletamisel saadava suitsugaaside hulk, kg;
c'_p — suitsugaaside kaaluline erisoojus;
t_{hg} — lahkuvate gaaside (heitgaaside) temperatuur, °C;
K — õhu hulk kütuse ühe kg kohta, kg;
c_p — õhu kaaluline erisoojus jääva rõhu juures;
$t_{kõ}$ — katelagregaati saabuva õhu (nn. külmõhu) temperatuur, °C.

Pole raske märgata, et korrutis $Gc'_p t_{hg}$ kujutab endast lahkuvate gaaside soojussisaldust, $Kc_p t_{kõ}$ aga saabuva õhu soojussisaldust. On ilmne, et need kaod suurenevad lahkuvate gaaside temperatuuri tõusmisel ja liigõhu suurenemisel.

Protsentides need kaod väljenduvad järgmiselt:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_t^k} 100\%.$$

Neid kadusid võib määrata orienteeruvalt valemi järgi:

$$q_2 = \frac{a(t_{hg} - t_{kõ})}{CO_2}, \tag{45}$$

kus CO_2 on süsinikdioksüüdi sisaldus suitsugaasides mahuprotsentides;
a — tegur, mis sõltub kütuse liigist; ta omab järgmisi väärtusi: puidu ja turba jaoks — 0,78; pruunsöe jaoks — 0,73; kivisöe jaoks — 0,66; antratsiidi jaoks — 0,7; nafta jaoks — 0,55.

Kadusid lahkuvate gaasidega võib ligikaudselt hinnata 6%-le lahkuvate gaaside ja koldesse saabuva õhu temperatuuri vahe iga 100° kohta. Kui näiteks saabuva õhu temperatuur on 20°, lahkuvate gaaside temperatuur aga 200°, siis kaod

$$q_2 = \frac{6 \cdot (200 - 20)}{100} = 10{,}8\%.$$

13. Kaod põlemise keemilisest ebatäiuslikkusest.

Soojuskaod põlemise keemilisest ebatäiuslikkusest tekivad tegelikult siis, kui suitsugaasides leidub süsiniku mittetäieliku põlemise saadust — süsinikoksüüdi CO-d.

Tabel 5.

Käsitsi teenindatavate, poolmehaaniliste ja mehaaniliste restide soojusliku

Kolde töötamise näitarvud	Tähised	Mõõtühikud	Käsitsi teenindatavad kolded								
			puit	turvas	pruunsüsi		kivisüsi		antratsiit		
					tavaline	peen	mittepaakuv	paakuv	АП ja АК	АМ ja АС	АРШ
Resti normaalne näiline soojuslik erikoormus	$\frac{Q}{R}$	$\frac{10^3 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}}$	$\frac{1100}{1500}$	$\frac{950}{1200}$	$\frac{850}{1000}$	$\frac{650}{700}$	$\frac{850}{1000}$	$\frac{950}{1100}$	$\frac{900}{1100}$	$\frac{850}{900}$	$\frac{700}{800}$
Mehaanilised soojuskaod	q_4	%	1,5	2	$5,5+0,2A_k$	7	$3+0,2A_k$	$1.5+0,2A_k$	$4+0,2A_k$	$5+0,2A_k$	$7+0,2A_k$
Keemilised soojuskaod	q_3	%	2–3	2–3	2–3	3–4	3–7	3–7	2–3	2–3	2–3
Liigõhutegur koldes	α_{ko}	—	1,25–1,30	1.25–1,30	1.30–1,40	1.30–1,40	1,35–1,40	1,35–1,40	1,30	1,30	1,35–1,40
Kolde normaalne soojuslik erikoormus	$\frac{Q}{V_{ko}}$	$\frac{10^3 \text{ kcal}}{\text{m}^3 \text{ h}}$	$\frac{300}{350}$	300	275	250	$\frac{250}{275}$	$\frac{250}{275}$	300	300	275
Puhumisrõhk resti all	S_0	mm v. s.	15	30	50	60–80	60–80	60–80	80	80	80

Neid kadusid määratakse järgmise valemiga:

$$Q_3 = 56{,}6 C_t \frac{CO}{CO_2 + CO}, \qquad (46)$$

kus C_t on süsiniku sisaldus tarbimiskütuses, %;

CO_2 ja CO — nende gaaside sisaldus suitsugaasides mahuprotsentides;

$56{,}6 = \frac{5660}{100}$, kusjuures 5660 cal/kg on soojus, mis jääb saamata, kui 1 kg süsinikku põleb mitte CO_2-ks, vaid CO-ks.

Põlemisprotsessi õige juhtimise puhul koldes ja kolde ratsionaalse konstruktsiooni puhul süsinikoksüüdi sisaldus ei tohi ületada 0,2—0,4% ja kaod põlemise keemilisest ebatäiuslikkusest ei ületa siis 1—2%.

Ligikaudselt võib võtta, et kui põlemissaadused sisaldavad mahu järgi 1% CO-d, siis see vastab soojuskadudele ca 4—4,5%.

Kolde töötamise näitarvud	Tähised	Mõõtühikud	Poolmehaanilised kolded		Mehaanilised kolded						
					Kettrestid						Kolded alumise etteandmisega
			puit	turvas	laastud	tükkturvas	tšeljabinski pruunsüsi	mittepaakuv kivisüsi	paakuv kivisüsi	antratsiit	nõrgalt paakuv kivisüsi
Resti normaalne näiline soojuslik erikoormus	Q/R	$\frac{10^3 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}}$	1100 / 1500	900 / 1200	1500	2000— 2500	900— 1000	900— 1200	1200— 1300	1000— 1100	1600— 1800
Mehaanilised soojuskaod	q_4	%	0.5— 2	2—4	—	—	$3+0{,}8A_k$	$3.5+0{,}8A_k$	$1.5+0{,}2A_k$	7	$2{,}5+0{,}25A_k$
Keemilised soojuskaod	q_3	%	2—3	2—3	3	4	1	2	1,5	1	1,5
Liigõhutegur koldes	α_{ko}	—	1,25	1,30	1,2	1,25	1,25— 1,30	1,25— 1,30	1,30	1,25	1,25
Kolde normaalne soojuslik erikoormus	$\frac{Q}{V_{ko}}$	$\frac{10^3 \text{ kcal}}{\text{m}^3 \text{ h}}$	300 / 350	300	300	300 / 350	250 / 275	250	250	275	200 / 225
Puhumisrõhk resti all	S_0	mm v. s.	15	20	25	45—55	50	50	60	60	100

14. Soojuskaod mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest.

Soojuskaod mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest on tingitud asjaolust, et osa koldesse viidud kütusest ei põle ära ja eemaldatakse koos räbuga, osa aga variseb läbi resti või viiakse gaaside poolt suitsukäikudesse ja korstnasse.

Koldest eemaldatavas räbus leidub alati mittepõlenud kütuse osakesi. Kütuse sisalduse protsent räbus sõltub kütuse tuhasisaldusest, kütuse sordist ja kolde konstruktsioonist. Suurimad räbuskaod esinevad käsitsi teenindatavates kolletes kivisõe ja pruunsõe jaoks. Niisugustes kolletes moodustab kütuse sisaldus räbus vähemalt 12—15% räbu kaalust, mõnikord aga ulatub kuni 30—40%.

Kütuse kaod restist läbivarisemise tõttu pole tavaliselt kuigi suured, kuid restilülide ebaõige valiku puhul võib läbivarisemine järsult suure-

neda. Suure läbivarisemise puhul tuleb võtta tarvitusele abinõud läbivarisenud osa teistkordseks kasutamiseks.

Resti erikoormuse (s. o. tunnis restipinna ühe m² kohta ärapõletatava kütuse hulga) suurenemisel põlemata jääva kütuse protsent suureneb.

Kütuse mittepõlenud osakeste kaasaviimist gaaside poolt suitsukäikudesse ja korstnasse esineb kõikides kolletes, kusjuures kaasaviidava kütuse hulk sõltub kütuse sordist, kolde konstruktsioonist, resti soojuslikust erikoormusest ja kolde mahust.

Suurim kaasaviimine esineb käsitsi teenindatavates kolletes, mis töötavad mittepaakuva peene kütusega, nagu antratsiidi puru ja lahja süsi.

Kaasaviidud kütus sadestub osaliselt suitsukäikude taskutes, osaliselt viiakse korstnasse. Kaasaviimisega on võimalik võidelda järgmisel viisil: 1) juurde segades mittepaakuvatele kütuse sortidele paakuvat kivisütt ПЖ või ПС (kas või ainult 10—15%); 2) küllaldase mahuga koldekambri ehitusega; 3) resti normaalse erikoormusega. Koldekambri mitteküllaldase mahu puhul võivad isegi sellised kütused, nagu nafta ja gaas tekitada nõge, mis viiakse heitegaaside poolt kaasa.

Juhul, kui kogutakse ja kaalutakse kõik koldejäägid ja kaasaviidud kütus ja määratakse nende kütteväärtus, arvutatakse põlemise mehaanilisest ebatäielikkusest tingitud kaod järgmiselt:

$$Q_4 = Q_4^r + Q_4^v + Q_4^e = g_r Q_r + g_v Q_v + g_e Q_e \text{ kcal/kg},$$

kus g_r, g_v, g_e on räbu, läbivarisenud osa ja kaasaviidud osa kilogrammide arv, mis saadakse kütuse ühe kg põlemisel;

Q_r, Q_v, Q_e — räbu, läbivarisenud osa ja kaasaviidud osa kütteväärtus.

Orienteeruvad arvud põlemise mehaanilisest ebatäielikkusest tingitud kadude kohta, sõltuvalt kütuse sordist ja kolde tüübist, on toodud tabelis 5.

15. Soojuskaod ümbritsevasse keskkonda.

Soojuskaod ümbritsevasse keskkonda on tingitud sellest, et katla müüritisel ja välistel metallosadel on temperatuur ümbritsevast õhust kõrgem ja seetõttu annavad nad soojust temale üle. See kadude liik sõltub müüritise kvaliteedist, agregaadi üksikosade vastastikusest paigutusest ja agregaadi võimsusest. Andmed seda liiki kadude kohta nüüdisaegsete statsionaarsete katelde juures on toodud tabelis 6.

Tabel 6.

Katelseadme aurutusvõime D, t/h . .	16	16—30	40—60	90	120	160
Kaod välisjahtumisest, %	3,5	2,5	1,5	1,2	1,0	0,6

Lokomobiilidel, ajutistel kateldel jms. on kaod välisjahtumisest sageli palju suuremad.

V peatükk.

Katelseadme soojusarvutus.

16. Soojusarvutuse ülesanne ja vajaliku kütuse hulga määramine.

Katelseadme lihtsustatud soojusarvutuse eesmärgiks on: a) kütuse tunnikulu määramine, b) kolde ja katla tüübi valik, c) katelagregaadi elementide põhimõõdete määramine ja nimelt: kolderuumi mahu ja restipinna määramine; ekraanide, katla, auruülekuumendi, ökonomaiserite küttepinna määramine.

Arvutuseks on tavaliselt antud järgmised suurused:

a) katelagregaadi aurutusvõime D, t/h;

b) auru ja toitevee parameetrid $t_ü$, p ja t_v;

c) kütuse sort ja ta iseloomustus (eelkõige Q_i^k).

Selleks, et määrata vajalikku kütuse hulka, on tarvis eelnevalt koostada katelseadme soojusbilanss. Selleks määratakse kindlaks kaod ümbritsevasse keskkonda ja kaod põlemise mehaanilisest ja keemilisest ebatäiuslikkusest.

Edasi on tarvis määrata soojuskaod lahkuvate suitsugaaside kaudu, milleks tehakse kindlaks katelseadmest lahkuvate suitsugaaside kasulikem temperatuur; seejuures tuleb juhinduda järgmistest kaalutlustest. Mida madalam on lahkuvate suitsugaaside temperatuur, seda väiksemad on nende kaudu tekkivad soojuskaod ja seda kõrgem on katelseadme kasutegur, kuid teiselt poolt peab seda suurem olema õhu- ja veeökonomaiseri, s. o. eelsoojendite, küttepind. Suurem ökonomaiser nõuab suuremaid kulutusi ülesseadmisele, teenindamisele, remondile ja ka suuremat tõmmet. Seepärast on iga katelseadme jaoks, sõltuvalt kohalikest tingimustest (kütuse hind, katlamaja koormus, seadmestiku maksumus jne.), kasulikem lahkuvate suitsugaaside temperatuur; tavaliselt ta asub piirides 120—200°. Selle temperatuuri määramine nõuab detailseid tehnilis-ökonoomilisi arvutusi.

Lahkuvate suitsugaaside valitud temperatuuri järgi leitakse ligikaudne suurus soojuskadudele suitsugaaside kaudu ja määratakse kindlaks katelseadme kasutegur:

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5).$$

Teades katelseadme kasutegurit, on hõlpus määrata, kasutades valemit (43), kütuse tunnikulu:

$$B = \frac{D(i_ü - i_v)}{Q^k_t \eta_{ka}}. \qquad (47)$$

17. Kolde ja katla tüübi valik.

Kolde tüüp sõltub peamiselt kütuse liigist. Vedela, gaasitaolise ja tolmukujulise kütuse jaoks kasutatakse kamberkoldeid, tükk-kütuse jaoks — kihtkoldeid.

Kollete teenindamisviis (käsitsi, mehaaniliselt või poolmehaaniliselt, näiteks kihtkollete juures) sõltub kolde võimest ja kütuse liigist. Käsitsi teenindatavaid koldeid kasutatakse ainult aurukatelde juures aurutusvõimega mitte üle 6—10 t auru tunnis.

Katla tüübi valikul on mõõduandvad tehnilis-ökonoomilised ja tehnoloogilised kaalutlused. Tähtis osa on seejuures auru parameetritel ja katla aurutusvõimel.

18. Kolderuumi mahu ja restipinna arvutus.

Kolderuum peab olema küllaldaselt mahukas ja kõrge, et kütuse põlemisprotsess lõpeks koldes. Kolderuumi mahtu võib määrata valemiga

$$V_{ko} = \frac{BQ^k_t}{Q/V_{ko}}, \qquad (48)$$

kus Q/V_{ko} on kolderuumi soojuslik erikoormus, kcal/m³h.

Q/V_{ko} väärtused määratakse katseliselt. Neid võib valida tabeli 5 andmete järgi.

Kütuse kihispõletamise puhul on tarvis määrata ka restipinda; selleks tuleb eelnevalt leida resti peegelpind, mille all mõistetakse seda osa restil asuva kütuse pinnast, mis asub koldekambris.

Resti peegelpinna pindala määratakse järgmiselt:

$$R = \frac{BQ^k_t}{Q/R},$$

kus R on resti peegelpinna näiline soojuslik erikoormus, mida võib võtta tabelist 5.

Pärast seda, kui on määratud resti peegelpind, võib leida resti pindala sõltuvalt kolde konstruktsioonist.

19. Teoreetilise põlemistemperatuuri ja koldetemperatuuri määramine.

Teoreetilise põlemistemperatuuri määramine. Põlemistemperatuuriks nimetatakse seda teoreetilist temperatuuri, mis tekiks kütuse täielikul põlemisel koldes antud liigõhu puhul, kui puuduksid soojuse ülekandumine kiirgamisega ja kaod. Selle määramiseks koostame kolde soojusbilansi kütuse ühele kg-le. Kui pole olemas aurupuhumist, siis koldesse saabub soojust: a) kütusega Q_t^k; b) õhuga $K_o a c_p t_õ$, kus $K_o a$ on tegelik õhu hulk, c_p — õhu keskmine erisoojus jääval rõhul (võib võtta 0,24 kcal/kg °C); $t_õ$ — koldesse saabuva õhu temperatuur, °C.

Põlemissaaduste soojussisalduseks on

$$(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O}) t_t,$$

kus G_k on kuivade gaaside hulk kilogrammides kütuse ühe kg kohta;

c_{pk} — kuivade gaaside keskmine erisoojus jääval rõhul, mis üldiselt sõltub gaaside koostisest (keskmiselt võib võtta $c_{pk} = 0{,}24 + 0{,}00002 t_t$ kcal/kg kraad);

G_{H_2O} — veeaurude hulk kilogrammides kütuse ühe kg kohta;

c_{pH_2O} — veeaurude keskmine erisoojus jääval rõhul, mida võib arvutada valemi järgi $c_{pH_2O} = 0{,}438 + 0{,}00005 t_t$.

Juhul, kui puuduvad soojuse ülekandumine kiirgamisega ja kaod, siis peame saama:

$$Q_t^k + K_o a c_p t_õ = (G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O}) t_t,$$

kust leiame teoreetilise põlemistemperatuuri:

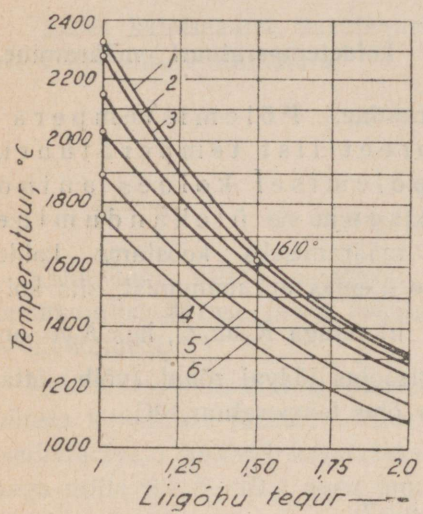
$$t_t = \frac{Q_t^k + K_o a c_p t_õ}{G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O}}. \qquad (49)$$

Siin K_0 on teoreetiliselt tarvilik õhuhulk ühe kg kütuse põlemiseks kg-des.

Saadud võrrandi lahendamiseks leiame algul t_t orienteeriva väärtuse

joonisel 12 toodud diagrammi järgi, siis arvutame c_p kuivade gaaside ja veeauru jaoks ning seejärel määrame põlemistemperatuuri võrrandi (49) järgi.

Koldetemperatuuri määramine. Kolderuumi keskmine temperatuur on märksa madalam teoreetilisest põlemistemperatuurist, kuna koldes toimub soojuse ülekandumine küttepinnale kiirgamisega ja esinevad mitmed kaod.



Joon. 12. Põlemistemperatuuride kõverad mitmesuguste kütuste jaoks, sõltuvalt liigõhutegurist α: *1* — antratsiidi jaoks; *2* — kivisõe jaoks; *3* — masuudi jaoks; *4* — puidu jaoks niiskusega 20%; *5* — puidu jaoks niiskusega 30%; *6* — puidu jaoks niiskusega 40%.

Kolderuumist väljuvate gaaside keskmist temperatuuri võib määrata järgmiselt:

$$t_o = t_t \eta_{ko} (1 - \sigma), \qquad (50)$$

kus t_o on kolderuumist väljuvate gaaside keskmine temperatuur;

η_{ko} — kolde töö efektiivsuse tegur, mis arvestab temperatuuri alanemist põhjustavaid kadusid:

$$\eta_{ko} = 1 - \frac{q_3 + q_5^{ko}}{100}, \qquad (51)$$

kus q_3 on põlemise keemilisest ebatäiuslikkusest tingitud kaod %-des;

q_5^{ko} — koldekaod ümbritsevasse keskkonda %-des;

σ — tegur, mis iseloomustab koldes otseselt äraantava soojuse hulka ja mis võrdub koldest kiirgamise teel äraantava soojuse hulga ja korrutise BQ_t^k suhtega.

Teguri σ väärtus kõigub piirides 0,05—0,55 ja katelseadmete nüüdisaegsete tüüpide jaoks võib seda ligikaudselt määrata Gurvitš-Orrok'i empiirilise valemi järgi:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{K\sqrt{Q/H_{krg}}}{A}}, \qquad (52)$$

kus η_{ko} on kolde töö efektiivsuse tegur;

K — koldesse viidava õhu hulk, kilogrammides kütuse ühe kg kohta;

$Q = Q_t^k B\eta_{ko}$ — kolde kasulik soojuse väljaand tunnis;

H_{krg} — koldest kiirgamisenergiat vastuvõttev küttepind;

A — kütuse soojusväärtusest sõltuv tegur.

Tegurit A on võimalik määrata küllaldase täpsusega valemi järgi:

$$A = 0{,}75 Q_t^k.$$

Koldest lahkuvate gaaside temperatuur valitakse tavaliselt piirides 900 kuni 1200° C järgmistel kaalutlustel. Temperatuuridel alla 900° C ei toimu põlemisprotsess küllalt intensiivselt; temperatuurid aga, mis ületavad 1200° C, kahjustavad müüritise seinu, soodustavad selle kiiret kulumist ja võivad põhjustada ülemäärast räbu tekkimist koldes. Teiselt poolt osutuvad koldest lahkuvate gaaside temperatuurid piirides 900—1200° C optimaalseteks soojuse äraandmise jaotuse seisukohalt katelagregaadi küttepindade vahel.

20. Esimese katlakäigu küttepinna määramine.

Katelseadme mistahes elemendi küttepinda arvutatakse valemi järgi:

$$H = \frac{Q}{k\Delta t}\ \text{m}^2, \tag{53}$$

kus (iga elemendi jaoks) Q on tunnis ülekanduv soojuse hulk, mida määratakse kui suitsugaaside poolt äraantud või töötava keha poolt vastuvõetud soojust;

k — soojusläbikande tegur, mille ligikaudseks määramiseks võib kasutada joonisel 13 toodud kõveraid;

Δt — suitsugaaside ja töötava keha (vesi, aur või õhk) keskmine temperatuuri vahe.

Esimese katlakäigu küttepinna määramiseks kirjutame valemi (53) järgmisel kujul:

$$H_{1k} = \frac{Q_{1k}}{k\Delta t},$$

kus

$$Q_{1k} \approx B(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O})(t_o - t_{üe});$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_s - \Delta t_v}{ln \frac{\Delta t_s}{\Delta t_v}}.$$

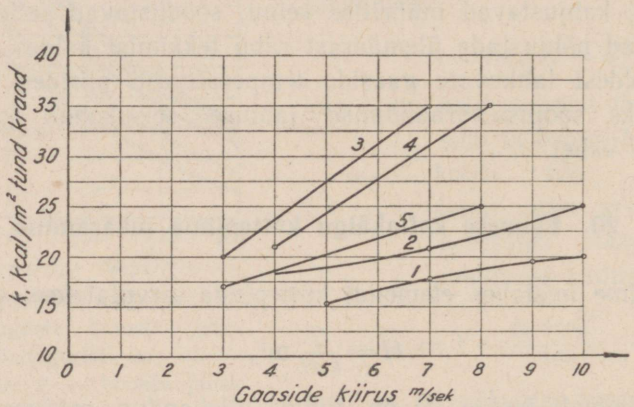
B on kütuse kulu, kg/h;

G_k ja G_{H_2O} — kütuse ühe kg põlemisel saadavate kuivade gaaside ja veeauru kaaluline hulk;

c_{pk} ja c_{pH_2O} — kuivade gaaside ja veeauru keskmine erisoojus jääval rõhul;

t_o — gaaside temperatuur sisenemisel esimesse katlakäiku, mis praktiliselt on võrdne koldest lahkuvate gaaside temperatuuriga;

$t_{üe}$ — gaaside temperatuur väljumisel esimesest katlakäigust (tavaliselt sama, mis on gaasidel auru ülekuumendisse sisenemisel);



Joon. 13. Soojusülekande tegurid mitmesugustele kateldele, sõltuvalt gaaside kiirusest: *1* — suitsutorude katel; *2* — leektoru-katel; *3* — ülekuumendi; *4* — veetorukatelde esimene katlakäik; *5* — veetorukatelde teine ja viimane katlakäik.

Δt_s ja Δt_v — gaaside ja katlavee temperatuuri vahe esimese katlakäigu algul ja lõpus, kus

$$\Delta t_s = t_o - t'' \quad \text{ja} \quad \Delta t_v = t_{üe} - t''.$$

Eeltoodust on teada, et kütuse ühest kg-st saadavate kuivade gaaside hulk sõltub liigõhutegurist α, kuid lihtsustamiseks oletame, et liigõhu hulk koldes, katla suitsukäikudes ja ülekuumendis jääb püsivaks.

Toodud võrrandites suurused B, G_k, G_{H_2O}, t_o on tuntud; suuruse $t_{üe}$ valime piirides 600—800° (mõnikord ka 900°) sel kaalutlusel, et gaaside kõrgemad temperatuurid võivad põhjustada auruülekuumendi torude läbipõletamist, madalamatel temperatuuridel aga osutub tarvilikuks suurendada ülemääraselt auruülekuumendi pinda.

21. Ülekuumendi küttepinna määramine.

Arvutusvalemiks on:

$$H_{ü} = \frac{Q_{ü}}{k \Delta t}. \tag{54}$$

Arvutuseks on meil olemas:

D — auru tunnikulu, kg/h;

$i_{ü}$ — auru entalpia auruülekuumendist väljumisel;

$t_{üe}$ — gaaside temperatuur auruülekuumendisse sisenemisel, mis võrdub gaaside temperatuuriga esimesest katlakäigust väljumisel;

G_k, G_{H_2O} — kuivade gaaside ja veeauru kaaluline hulk kütuse ühe kg kohta;

B — kütuse tunnikulu;

$Q_{ü}$ — võib defineerida kui auru poolt vastuvõetud soojust, s. t.

$$Q_{ü} = D(i_{ü} - i_x), \tag{55}$$

kus i_x on ülekuumendisse siseneva auru entalpia.

Selleks, et määrata i_x, võtame auru oletatava kuivusastme auruülekuumendisse sisenemisel, s. o. suuruse x (tavaliselt $x = 0{,}97—0{,}99$), ja tuntud p ja x järgi leiame is-diagrammi järgi i_x või arvutame ta väärtuse valemi $i_x = i' + xr$ järgi, kasutades kuiva küllastunud auru tabeleid.

Olles määranud $Q_{ü}$, leiame gaaside temperatuuri $t_{pü}$ ülekuumendist väljumisel, kasutades selleks valemit:

$$Q_{ü} \approx B(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O})(t_{üe} - t_{pü}),$$

või

$$t_{pü} = t_{üe} - \frac{D(i_{ü} - i_x)}{B(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O})}. \tag{56}$$

Selleks, et määrata c_p, mis esineb viimases võrrandis, leiame eelnevalt $t_{pü}$ ligikaudse väärtuse võrrandi järgi:

$$t_{pü} \approx t_{üe} - (t_{ü} - t''), \tag{57}$$

kus $t_{ü}$ ja t'' on ülekuumenenud ja küllastunud auru temperatuurid (praktikas gaaside temperatuur ülekuumendis langeb umbes samapalju, kuipalju tõuseb auru temperatuur).

Seejärel määrame keskmise temperatuuri vahe võrrandi järgi:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_s - \Delta t_v}{2{,}303 \log \frac{\Delta t_s}{\Delta t_v}},$$

kus

$$\Delta t_s = t_{üe} - t_ü;\ \Delta t_v = t_{pü} - t''.$$

Soojusläbikande teguri väärtuse võime võtta joon. 13 kõverate järgi. Nüüd omame kõiki andmeid, mis on vajalikud $H_ü$ määramiseks valemi (54) järgi.

22. Teise katlakäigu arvutus.

Teise katlakäigu all mõistame katla küttepinna ülejäävat osa, s. t.

$$H_{2k} = H_k - H_{1k}.$$

Arvutuseks on meil olemas gaaside temperatuur sisenemisel teise katlakäiku, mis võrdub gaaside temperatuuriga auruülekuumendist väljumisel, s. t. $t_{pü}$. Teise gaaside käigu soojusläbikande teguri määrame graafikult (joon. 13). Tarvis on määrata gaaside temperatuur väljumisel teisest katlakäigust või katlast t_{ka}.

Kirjutame uuesti põhivõrrandi:

$$Q_{2k} = k\Delta t H_{2k}.$$

Kuid

$$Q_{2k} = B\,(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O})\,(t_{pü} - t_{ka}).$$

Edasi võrrandi (37) järgi

$$\Delta t = \frac{(t_{pü} - t'') + (t_{ka} - t'')}{2};$$

siit:

$$B(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O})(t_{pü} - t_{ka}) = kH_{2k} \frac{(t_{pü} - t'') + (t_{ka} - t'')}{2}.$$

Ilmutades selle võrrandi t_{ka} suhtes, saame:

$$t_{ka} = \frac{t_{pü}[2B\,(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O}) - kH_{2k}] + aH_{2k} k t''}{2B(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O}) + H_{2k} k}. \qquad (58)$$

Selleks, et määrata c_p, võib eelnevalt leida t_{ka} ligikaudse väärtuse võrrandist:

$$t_{ka} = t'' + 6{,}65 \frac{D}{H_k + H_{ü}}. \tag{59}$$

23. Ökonomaiseri arvutamine.

Katla ja ülekuumendi arvutamisel me eeldasime, et liigõhutegur α on püsiv suurus ja et seetõttu G_k on ka püsiv. Tõepoolest aga õhu juurdeimemise tõttu müüritise ebatiheduste kaudu liigõhu hulk koos gaaside liikumisega katlas suureneb. Võtame ökonomaiseri ees α 0,1 võrra suuremana kui koldes. Seetõttu siis temperatuur ökonomaiserisse sisseminekul on väiksem, kui meie poolt määratud t_{ka} katlast väljumisel.

Võttes lihtsustamiseks, et suitsugaaside erisoojus on võrdne õhu erisoojusega ja on jääv suurus, võime määrata gaaside temperatuuri ökonomaiserisse sisseminekul järgmise valemi järgi:

$$t_{eö} = t_{ka} \frac{K_o \alpha_{ko} + 1}{K_o \alpha_k + 1}, \tag{60}$$

kus K_o on teoreetiliselt tarvilik õhuhulk kütuse ühe kg kohta, kg;

α_{ko} — liigõhutegur koldes;

α_k — liigõhutegur ökonomaiserisse sisseminekul.

Ökonomaiseri pind määratakse võrrandist:

$$H_ö = \frac{Q_ö}{k \Delta t};$$

$$Q_ö = B(G_k c_{pk} + G_{H_2O} c_{pH_2O})(t_{eö} - t_{pö}),$$

kusjuures selles valemis $t_{pö}$, mis on võrdne katelseadmest lahkuvate gaaside temperatuuriga, t_{hg} (kui ökonomaiseri järel puudub põlemisõhu eelsoojendi) on valitud meie poolt katla arvutuse alguses, G_k aga on tarvis määrata uuesti, kuna liigõhu tegur α_k erineb tegurist α_{ko}. Soojusvoo läbikande tegur k sõltub ökonomaiseri süsteemist ja gaaside kiirusest; teda võib määrata joonisel 14 toodud diagrammi järgi, kus on toodud soojusläbikande tegurite kõverad eri süsteemi ökonomaiserite jaoks, sõltuvalt gaaside kiirusest.

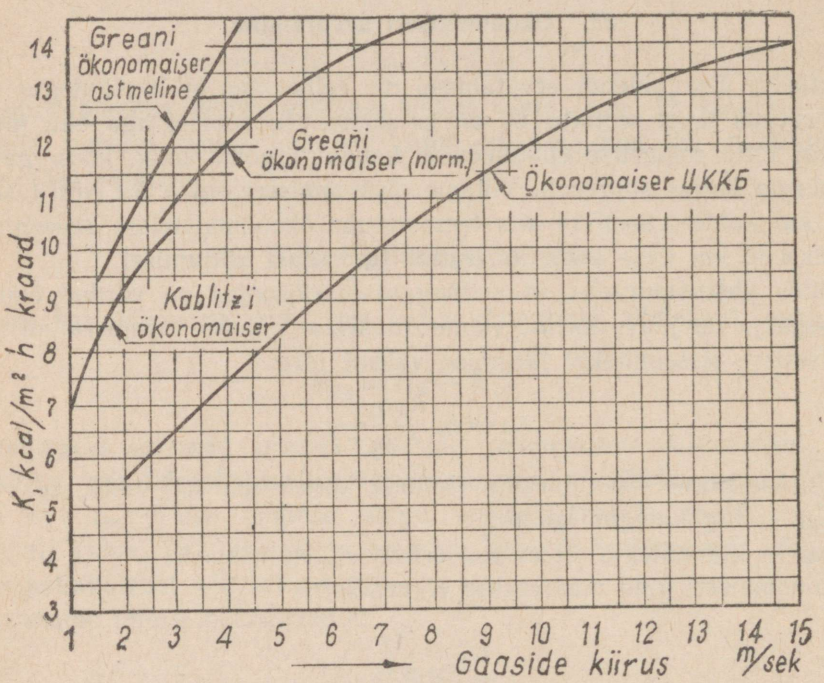
Siis määrame keskmise temperatuuri vahe võrrandi (37) järgi:

$$\Delta t = \frac{(t_{eö} - \vartheta_2) + (t_{pö} - \vartheta_1)}{2},$$

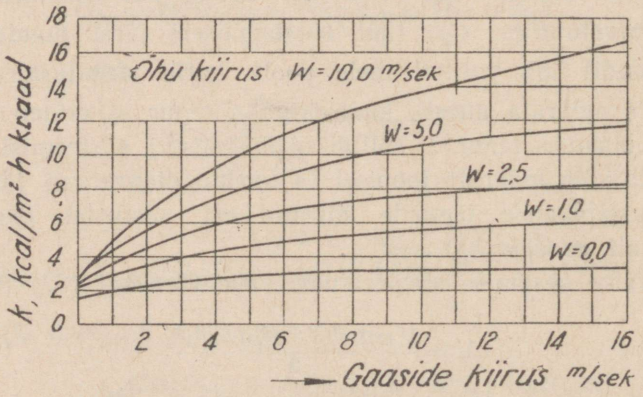
kus ϑ_2 on ökonomaiserist lahkuva vee temperatuur;

ϑ_1 — ökonomaiserisse siseneva vee temperatuur, mis võrdub t_v ja oli antud arvutuse lähteandmete hulgas.

Ökonomaiserist väljuva vee temperatuur peab olema vähemalt 30—40° madalam vee temperatuurist katlas, selleks et vältida vee keemahakkamist



Joon. 14. Soojusvoo läbikande tegurid mitmesuguste veeökonomaiserite jaoks, sõltuvalt gaaside kiirusest.



Joon. 15. Soojusvoo läbikande tegurid õhueelsoojendite jaoks, sõltuvalt gaaside kiirusest.

ökonomaiseris. Teda määratakse ökonomaiseri soojusbilansi võrrandist:

$$\vartheta_2 = \frac{Q_{\ddot{o}}}{D} + \vartheta_1,$$

kus D on ökonomaiserit tunnis läbiva vee hulk, mis võrdub katlast saadava auru hulgaga.

Õhueelsoojendi puhul on arvutuskäik samasugune kui veeökonomaiseri puhulgi, ainult vee asemel soojendatakse ökonomaiseris õhku. Joonisel 15 on toodud soojusläbikande teguri kõverad õhueelsoojendite jaoks.

VI peatükk.

Kolded.

24. Eelmõisteid.

On olemas kaks kütuse põletamise viisi — kihispõletamine ja lendpõletamine kamberkoldes. Kihtkolletes põletatakse tahket tükk-kütust, kamberkolletes — söetolmu, vedelkütust, gaasi; lõpuks kamber-kihtkolletes — freesturvast, saepuru ja muud peenkütust.

Kolde soojusvõime määrab temas tunnis eralduv soojuse hulk $Q = BQ_i^k$ kcal/h.

Kolde töö intensiivsuse määrab koldekambri mahu näiline soojuslik erikoormus $\frac{Q}{V_{ko}}$ (siin V_{ko} on kolderuumi maht kuupmeetrites), kihtkollete puhul veel resti või põlemise peegelpinna näiline soojuslik erikoormus

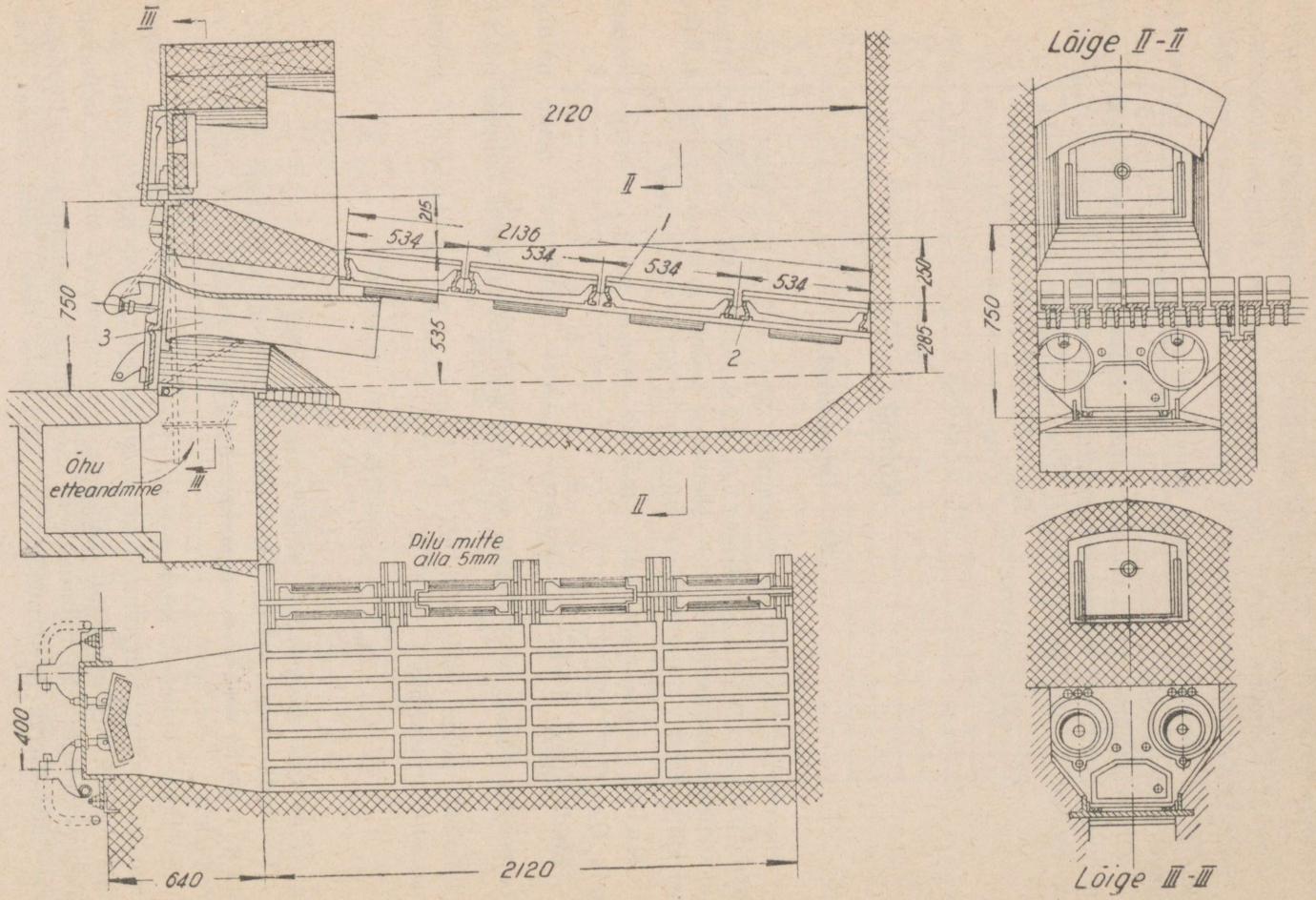
$$\frac{Q}{R},$$

kus R on resti peegelpinna pindala ruutmeetrites.

Teenindamisviisi järgi võib tükk-kütuse-koldeid jaotada käsitsiteenindatavateks, poolmehaanilisteks ja mehaanilisteks.

Kõikidele kolletele tuleb esitada järgmised põhinõuded: 1) kütuse keemiliselt võimalikult täiuslikum põlemine minimaalse õhuliia puhul, sest mida rohkem liigõhku satub koldesse, seda suuremad on kaod lahkuvate suitsugaasidega; 2) minimaalsed kaod kütuse mehaanilise mittepõletamise tulemusena. Neid nõudeid on võrdlemisi raske täita kütuse kihis-

TRÜ Raamatukogu



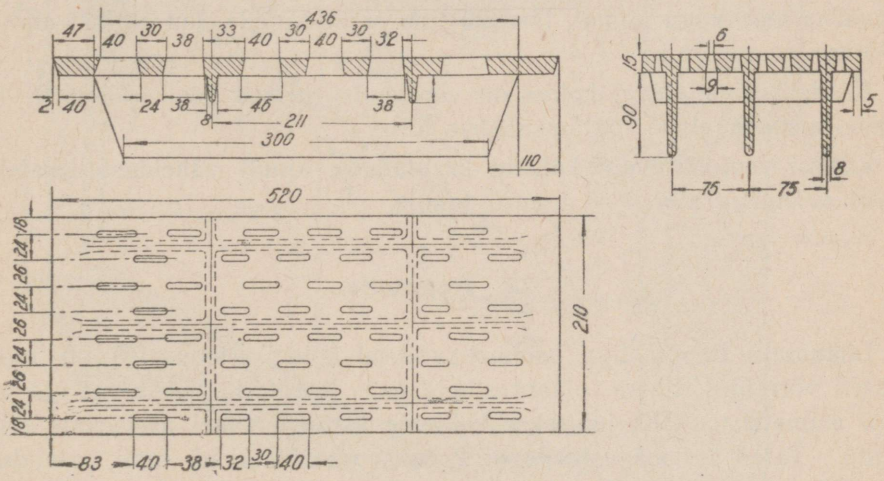
Joon. 16. Käsitsi-teenindatav restkolle

põletamisel, hõlpsam aga lendpõletamisel. Kütuse kihispõletamisel on raske saavutada olukorda, kus kütuse iga osake puutuks kokku temale vajaliku hapniku hulgaga; seepärast keemiliselt mittetäiusliku põlemise vältimiseks tuleb anda märgataval hulgal liigõhku (30—90%).

25. Käsitsi-teenindatav kolle plaanrestiga.

Käsitsi-teenindatav rest (joon. 16) koosneb üksikutest restilülidest *1*, mis asetsevad risttaladel *2*. Kolle on varustatud aurujoapuhuriga *3*, mis imeb välisõhku ja surub seda väikese ülerõhu all tuhakasti resti alla. Parem on siiski kasutada tavalist tsentrifugaalventilaatorit, mis annab rõhku 80—100 mm ws, kuna tsentrifugaalventilaatori käitamiseks kulub vähem energiat.

Käesoleval ajal kasutatakse tavaliselt plaat-restilülisid, mis on varustatud aukudega, mida läbib õhk (joon. 17). Aukude kooniline kuju hoiab



Joon. 17. Plaat-restilüli.

ära nende ummistumise. Nende aukude üldpindala ja resti üldpindala suhe moodustab resti nn. e l a v r i s t l õ i k e. Restilüli ribid on ette nähtud selle jahutamiseks. Käsitsi-teenindatava restkolde eemusteks tuleb lugeda järgmisi:

1) valmistamise ja monteerimise lihtsus ja järelikult ka odavus;

2) sobivus mitut liiki tahkele tükk-kütusele (kivisöed, pruunsöed, antratsiidid);

3) võimalus kasutada igasuguste katlatüüpide juures.

Sellel koldel on aga ka puudusi, milledest olulisemateks on järgmised:

1) selliseid koldeid teenindavate kütjate raske füüsilise töö vältimatus;
2) perioodiline töötamine, mis ei võimalda põlemisprotsessi korrapärast kulgemist koldes.

Kütuse sisseviskamine toimub teatavate ajavahemikkude järel (5 kuni 15 minutit, sõltuvalt kütuse sordist). Kütuse sisseviskamise, samuti ka roopimise ja tuha ning räbu eemaldamise ajal läbi koldeukse tungib koldesse suur hulk külma õhku, mis suurendab kadusid heitgaasidega, jahutab kollet ja võib põhjustada katla neetõmbluste ja valtsitud kohtade lekkimist.

Kütuse põlemisprotsess toimub ebaühtlaselt: pärast kütuse sisseviskamist algab lenduvate osade intensiivne eraldumine ja sel momendil ei jätku kütuse kihti läbivast õhust, millest tekib keemiliselt mittetäiuslik põlemine. Pärast lenduvate osade eraldumist algab koksi kihispõlemise protsess; see protsess toimub võrdlemisi aeglaselt; sel perioodil on tegemist suure õhuliiaga. Raske on samuti hoida kütuse kihti ühesugusena resti kogu pinnal, järelikult on raske tagada õhu ühtlast andmist koldesse.

Käsitsi-teenindataval koldel on võrdlemisi suured kaod põlemise keemilise ja mehaanilise ebatäiuslikkuse tõttu.

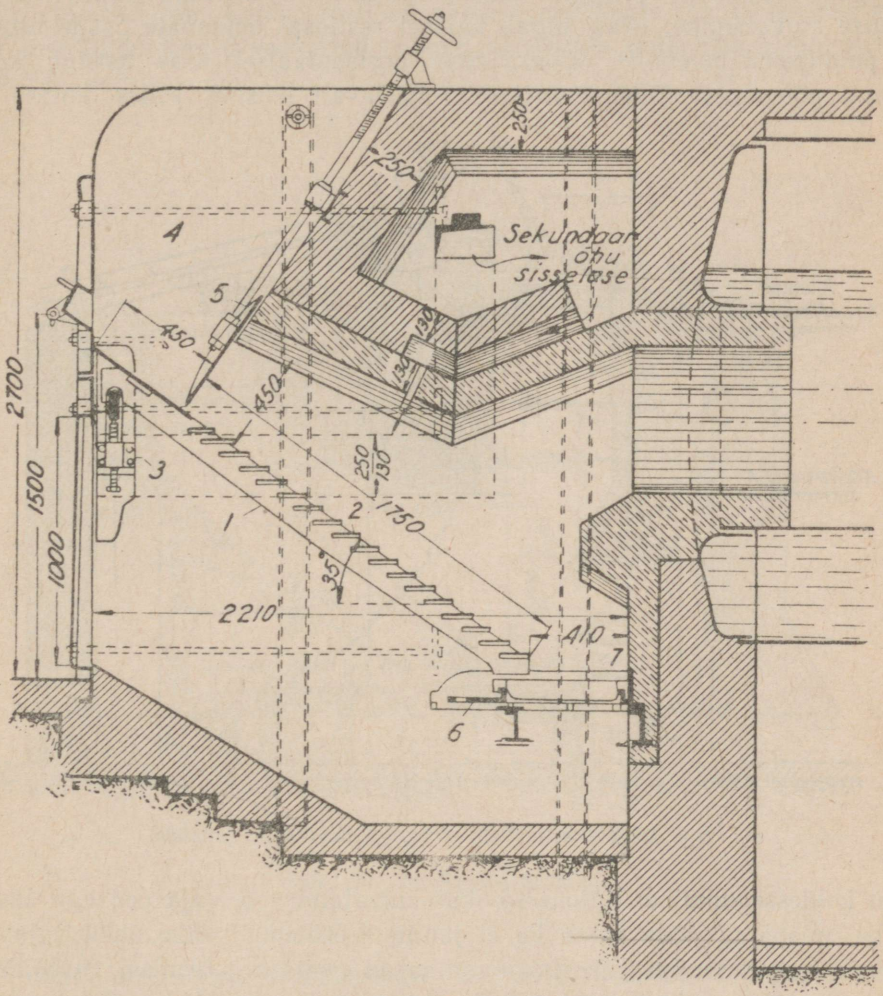
Käsitsi-teenindatavaid koldeid kasutatakse ainult väheldastes kateldes aurutusvõimega alla 6—8 t auru tunnis.

26. Treppkolle.

Liikumatu treppprestiga poolmehaanilisel koldel (joon. 18) on mõned eelised võrreldes lihtsa plaanrestkoldega. Restilülid asetsevad tavalise trepi astmetena. Õhk juhitakse koldesse astmete vahel asetsevate pilude kaudu. Talad *1* koos astmetega *2*, mis moodustavad resti, asetatakse 30—40° nurga alla (sõltuvalt kütuse loomulikust langunurgast). Resti ülesseade nurka on võimalik muuta kruvimehhanismi *3* abil. Kütus valgub koldesse pidevalt punkrist *4*. Siibri *5* abil reguleeritakse kütuse kihi paksust, nii et see oleks antud kütusesordile kõige otstarbekohasem. Üheaegselt põlemisega valgub kütus allapoole ja peab suutma ära põleda enne, kui ta jõuab horisontaalsele resti osale *7*, mis on ette nähtud kütuse jääkide väljapõletamiseks räbust. Sama resti osa on ette nähtud ka koldest tuha ja räbu eemaldamiseks; vajaduse kohaselt tõmmatakse ta restilülid pideme *6* abil välja ja räbu variseb alla.

Kaldkolle on kohane peene mittepaakuva niiske kütuse põletamiseks, nagu pruunsüsi, turvas, saepuru, päevalilleseemnete koored. Selle kolde

eelised horisontaalkoldega võrreldes seisavad selles, et kütuse etteandmine toimub kütuse enda raskusega automaatselt ja kütus jaotub enamvähem ühtlaselt resti kogu pinnale.



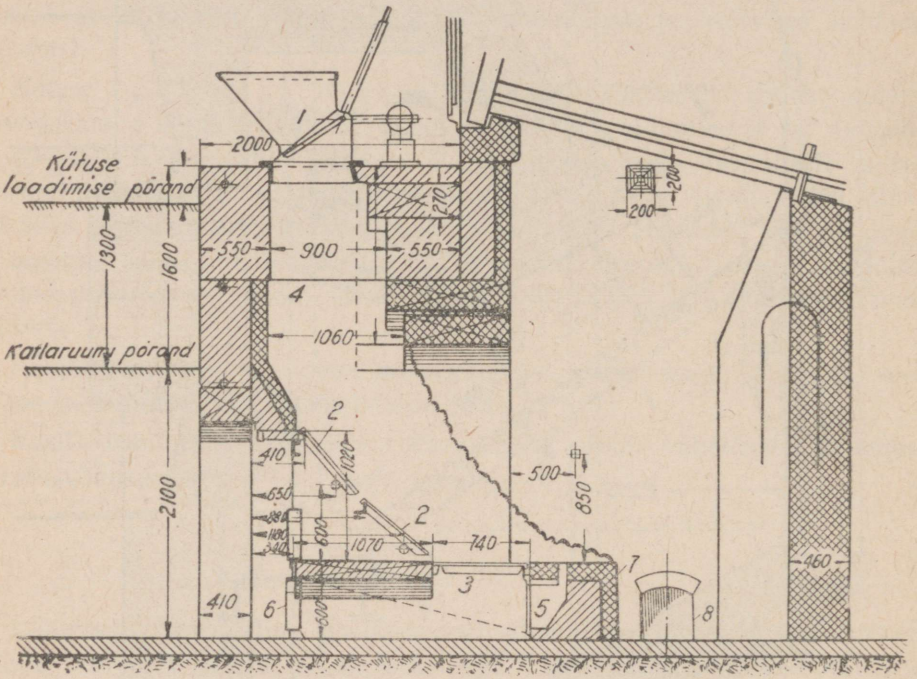
Joon. 18. Trepprest.

27. Süvikkolle puude ja turba põletamiseks.

Turba ja puude jaoks on laialt levinenud kaldrestiga süvikkolle. Joonisel 19 on näidatud selline kolle puudele niiskusega kuni 30—35%. Rest koosneb kaldsete restilülide *2* kahest reast ja horisontaalsete restilülide *3* ühest reast. Koldesse laaditakse kolu *1* kaudu puuhalud, millede pikkus

on ligikaudu 100 mm väiksem süviku laiusest. Puud laskuvad alla mööda süvikut *4* ja asetuvad restile loomuliku langunurga all.

Kütuse põlemise protsess toimub järgmiselt. Süvikus endas toimub kütuse kuivatamine; edasi algab kaldsel restiosal lenduvate osade utmine ja puidukoksi põlemine; lõpuks resti horisontaalsel osal teostub koksi lõpuni põlemine. Põlemisprotsessile vastavalt teostub selles koldes ka

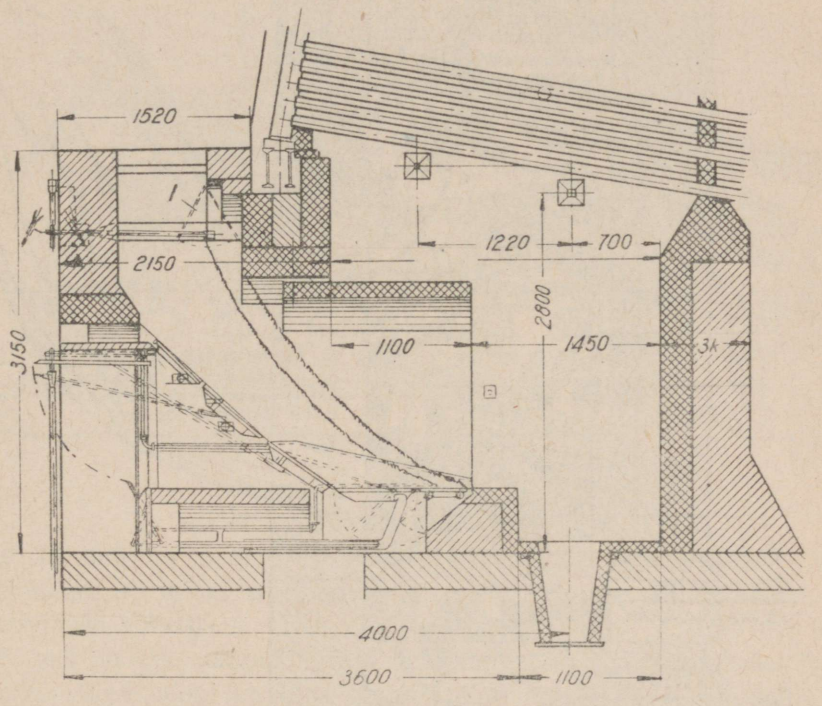


Joon. 19. Kaldse põlemispeegliga süvikkolle puudele.

õhu koldesseandmine. Kütuse süvikus kuivatamine ei vaja peaaegu sugugi õhku, mispärast teda sinna ka ei juhita. Võrdlemisi vähe õhku vajab ka koksi järelpõletamine pärast horisontaalset restiosa. Joonisel 19 näidatud sekundaarõhu andmine siibri *5* kaudu toimub siis, kui põlemine pole täielik õhupuuduse tõttu koldekambris. Kõige rohkem õhku vajatakse resti kaldse ja horisontaalse osa alla, kus toimub kõige intensiivsem põlemisprotsess, kusjuures õhu etteandmist reguleeritakse uste *6* abil. Vähene hulk tuhka, mida annavad puud, variseb osalt läbi resti *3*, osalt aga kukub astmelt *7* alla, kust teda aeg-ajalt eemaldatakse luugi *8* kaudu.

Joonisel 20 on kujutatud kaldrestiga süvikkolle turba jaoks. Kütuse põlemisprotsess toimub siin samasuguselt nagu puuküttе-koldes; turba-

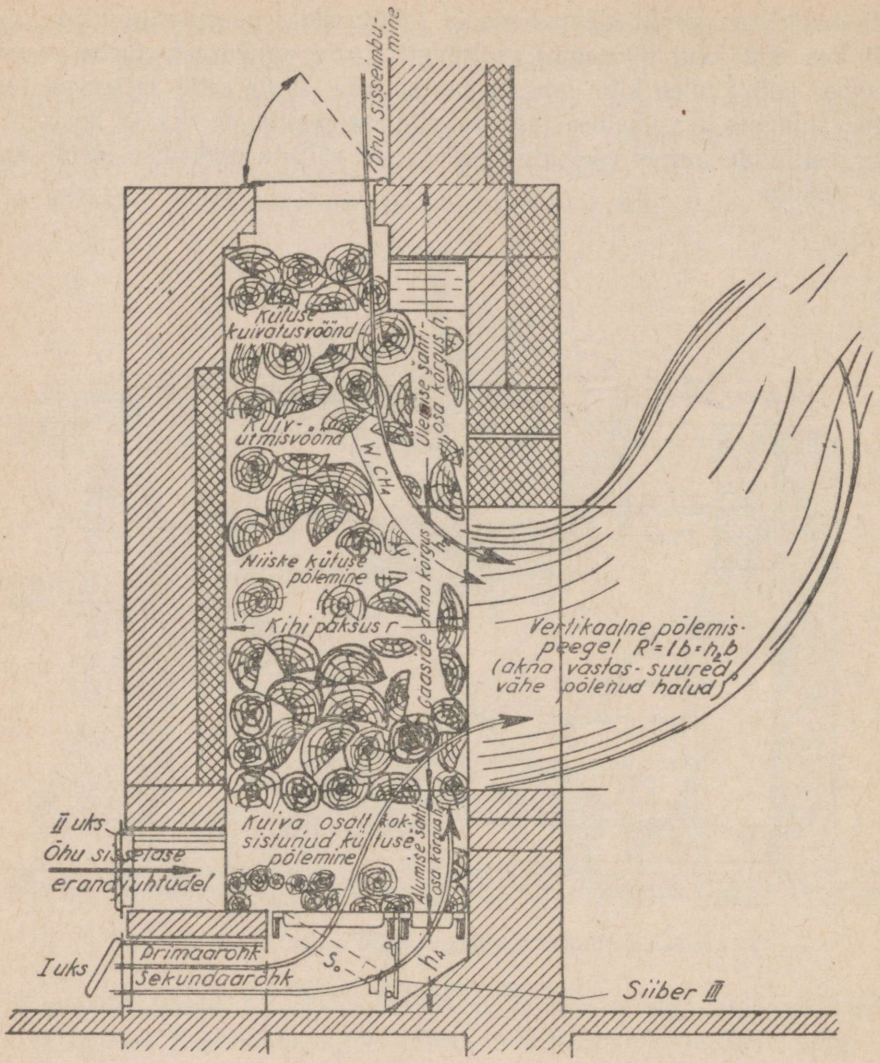
kütte-koldes on ainult olemas seadis *1* kütusekihi paksuse reguleerimiseks (piirides 800 kuni 600 mm), sõltuvalt turba niiskusest; turba suurema niiskuse puhul tuleb kihi paksust suurendada. Peale selle asetsevad turbakolde alumises osas kaldse restiosa viimase restilülide rea ja horisontaalsete restilülide juures veekarbid selleks, et vältida müüritise seinte kattumist räbuga.



Joon. 20. Süvikkolle turbale.

Puude põletamiseks niiskusega üle 45% kasutatakse vertikaalseid süvikkoldeid. Põlemisprotsessi sellises koldes selgitab joonis 21.

Süvikkolle osutub seega poolautomaatseks ja võimaldab küllalt efektiivselt põletada ka suure niiskusega kütust. Kolde õige konstruktsiooni puhul võib liigõhu tegur α olla mitte üle 1,3—1,4; mehaanilised põlemiskaod on puude puhul 0,5—2% ja turba puhul 1—4%; keemilised soojuskaod ei ületa 2—3%. Resti lubatav soojuslik erikoormus $Q/R =$ $= 900—1500$ kcal/m²h. Kolde soojuslik erikoormus ulatub kuni $300 \cdot 10^3$ kcal/m³h.



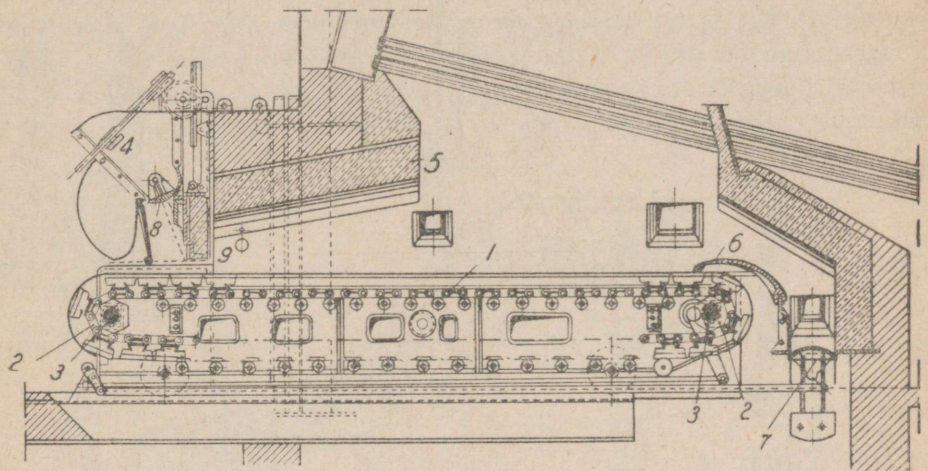
Joon. 21. Vertikaalse põlemispeegliga puuküttе-süviku skeem.

28. Mehaanilised kolded tükk-kütuse põletamiseks.

Käsitsi-teenindatavaid ja poolmehaanilisi koldeid kasutatakse väikekatelde juures aurutusvõimega kuni 8 t auru tunnis. Äärmistel juhtudel võidakse neid kasutada katelde juures aurutusvõimega kuni 10—12 t/h. Suure aurutusvõimega katelde juures, küttepinnaga üle 400 m², kasuta-

takse harilikult mehaanilisi koldeid, milledest on kõige enam levinud kettrestiga kolle (joon. 22).

Kettrest (joon. 22) kujutab endast linti *1*, mis koosneb otsata kettidest; viimased on omavahel ühendatud lattidega, millede külge on kinnitatud restilülid. Resti ketid on asetatud ketiratastele *2*, mis asetsevad võllidel *3*. Kettresti eesmise võlli pöörlemine, mis käitatakse mootorilt 1—5 HJ, paneb liikuma kogu süsteemi. Liikumise kiiruseks on tavaliselt



Joon. 22. Kettrestiga kolle.

4 kuni 12 m/h ja seda reguleeritakse reduktori abil. Kütus valgub restile kolust *4*, millel on segmentsiiber *8*. Kütuse kihi paksust restil reguleeritakse siibriga *9*. Kettresti esimese osa kohal asetseb nn. süütevõlv *5*, mis on ette nähtud kütuse kuivatamiseks, soojendamiseks ja süütamiseks. Resti lõpul on üles seatud räbu mahavõtja *6*, üle mille räbu heidetakse restile *7*, kus toimub räbus leiduva kütuse järelpõletamine ja kust tuhk ja räbu aeg-ajalt eemaldatakse restilülide keeramisega.

Kütuse põletamisprotsessi ratsionaalse teostamise eesmärgiga rakendatakse sektsioonilist ehk tsoonilist õhupuhumist. Selleks jaotatakse kogu kamber, mis asub resti all, mitmeks (neljaks kuni kuueks) üksteisest eraldatud osaks, milles igaühes on võimalik iseseisvalt reguleerida õhupuhumise intensiivsust. Seesugune seadis võimaldab põletada kütust minimaalse liigõhuga ja minimaalsete põlemise keemiliste kadudega.

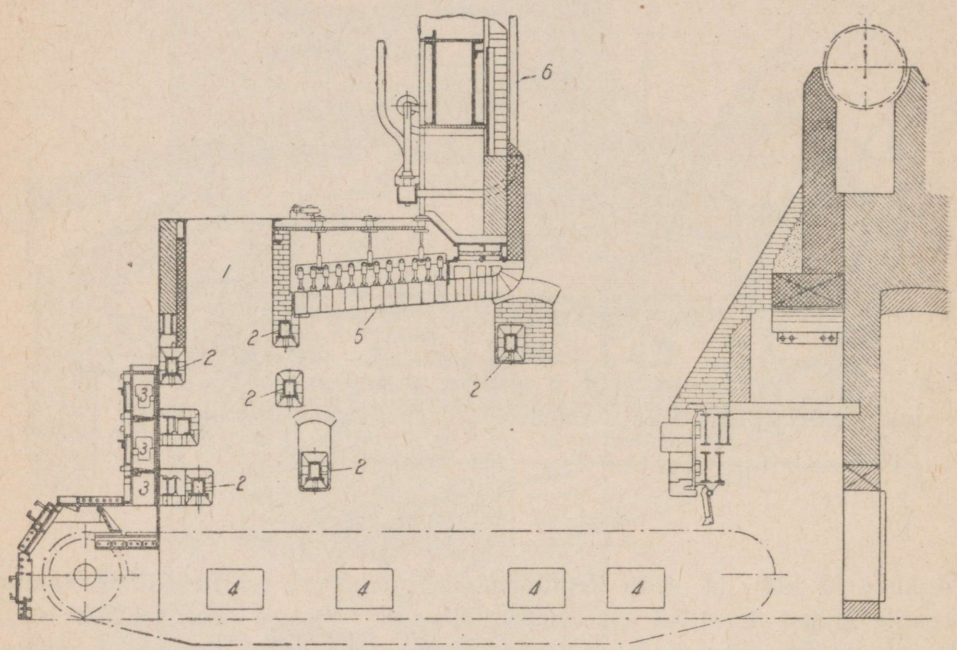
Kettrestiga koldel on järgmised paremused:

1) kütuse põletamise protsess on täielikult mehhaniseeritud ega nõua järelikult rasket kehalist tööd;

2) kolde teenindamine on erakordselt lihtne;

3) kettresti on võimalik kohandada mitmesugust liiki tahkete kütuste, nagu kivisõe, pruunsõe, tükkturba jne. põletamiseks.

Kettrestil on raske või ebaökonoomiline põletada mittepaakuvat kivisütt koos peenpuruga, väiketeralist kütust lenduvate ainete väikese väljaanniga (näiteks AШ), tugevasti paakuvaid süsi, kergesti sulavat räbu andvaid süsi ja lõpuks tuhasisaldusega kütust.



Joon. 23. Prof. T. F. Makarjevi süsteemi süvikuga kettrest-kolle turba põletamiseks. *1* — süvik; *2* — veega jahutatavad tulekindlatest kividest ümbritsetud sillustalad; *3* — süviku õhupuhumise sektsioonid; *4* — põlemisõhu sisenemise kohad resti tsoonidesse; *5* — rippuvlagi; *6* — kolde esiseina ekraan.

Tükkturba põletamiseks on välja töötatud ja laialdaselt kasutamisele võetud efektiivne prof. T. F. Makarjevi süsteemi süvikuga kettrest-kolle (joon. 23). Turba kuivatamine toimub süvikukujulises eeskoldes põlemispesade abil, mis asuvad astmestikul süviku esiosas. Astmestiku moodustavad õõnsad veega jahutatavad sillused. Kuum õhk juhitakse mitte ainult resti alla, vaid ka põlemispesade juurde süviku esiosas. Resti eespoolne osa on kaetud rippuva laega, mille läbi vajaduse korral teostatakse freesturba lisandamist (puistamise teel).

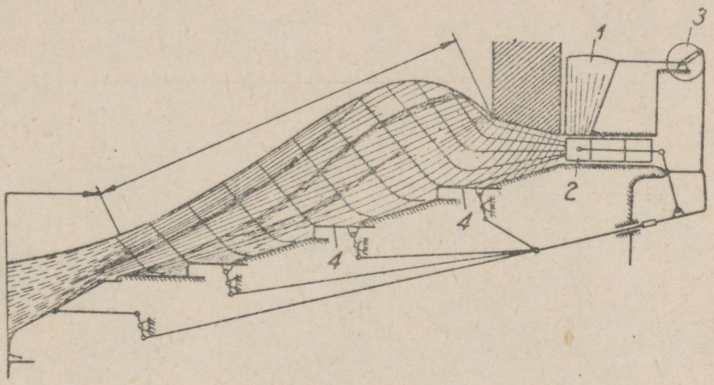
Kettresti puudusteks osutuvad ta kõrge hind, mõnikord ka kütuse eba-

ühtlane ärapõlemine ja kütuse märgatavad mehaanilised kaod. Andmeid kettrestiga kollete soojusliku töö kohta leidub tabelis 5.

29. Alumise etteandmisega kolded (stokerid).

Mehaaniliste kollete arvukatest liikidest väärib tähelepanu alumise etteandmisega kolle.

Kettrestiga kolletes toimuvad põlemise kõik järgud — kuivatamine, süttimine, lenduvate ainete põlemine, koksi põlemine ja jääkide järelpõlemine — üksteise järel resti kogu pikkuses. Alumise etteandmisega kolletes (stokerites) need põlemisstaadiumid toimuvad kõrguselt erinevates kihtides. Joonisel 24 on kujutatud stokeri skeem. Kütuse etteandmine



Joon. 24. Stokeri skeem.

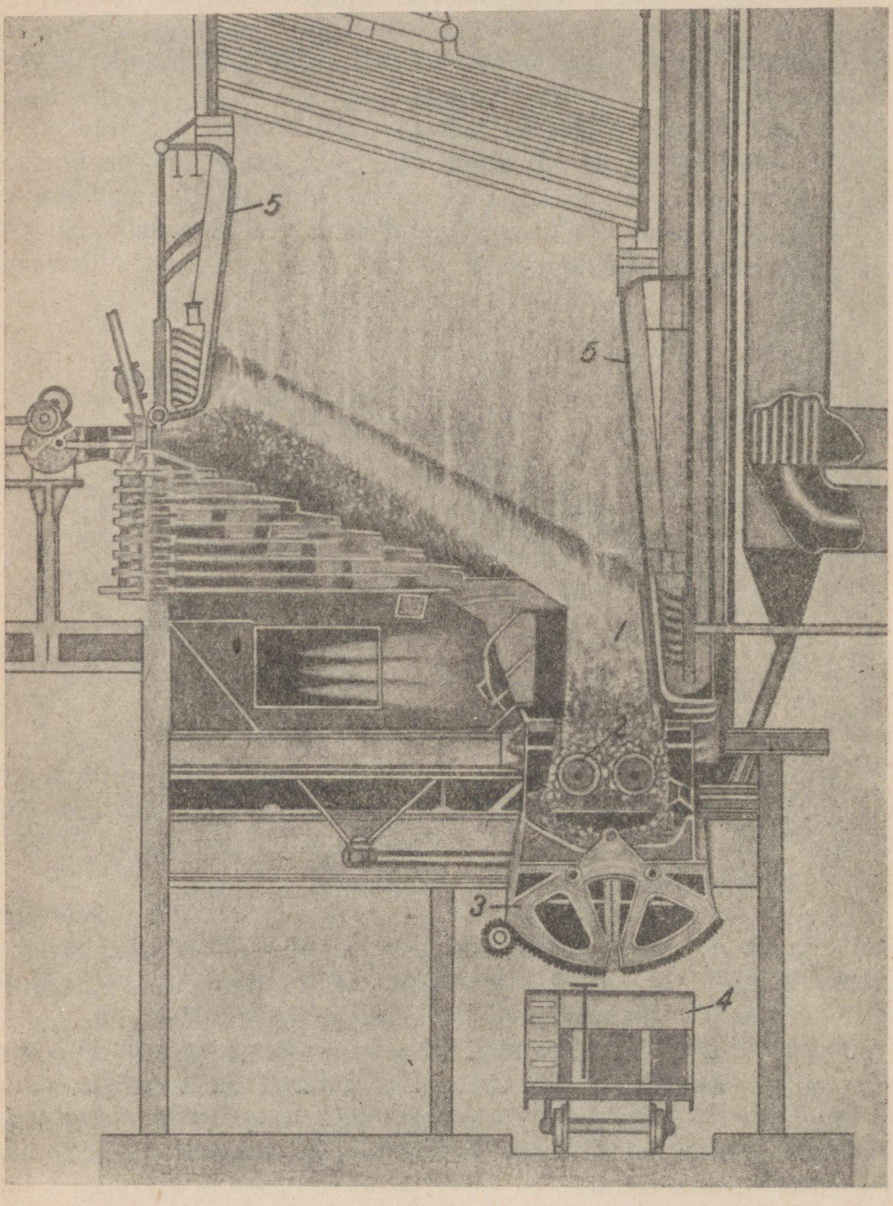
restile punkrist *1* toimub kolbidega *2*, mis käitatakse ekstsentrilt *3*. Etteantav kütus satub seejuures põleva kihi alla. Restil teda lükatakse edasi ja üles kelkude *4* poolt, mida käitatakse samalt ekstsentrilt *3*. Põlemisprotsess sellises koldes toimub järgmiselt.

Allpool vastu resti kütus kuivab ja soojeneb, etteantud kütusekihi keskel toimub lenduvate osade eraldumine ja alles kihi kõige pealmises osas toimub koksi põlemine. Räbu koos mittepõlenud kütuse jääkidega langeb eri plaadile või süvikusse, kus kütus põleb ära lõplikult.

Alumise etteandmisega kolde põhimiseks paremuseks võrreldes kettrestiga on see asjaolu, et põlemistsoon on viidud restist eemale, millest ongi tingitud resti pikk iga. On tarvis märkida, et koormuse suurenemisel põlemistsoon selles koldes eemaldub restist ja vastupidi — koormuse vähenemisel ligineb restile.

Joonisel 25 on seesugune kolle näidatud lõikes. Kolde lõpus asub

sügav süvik, kus toimub räbu järelpõlemine; selle süviku põhjas asetsevad kaks teineteisele vastu pöörlevat valtsi *2*, mis peenendavad räbu ja lasevad sellel kukkuda sulgurile *3* ja sealt vagonetti *4*. Kolle on varus-



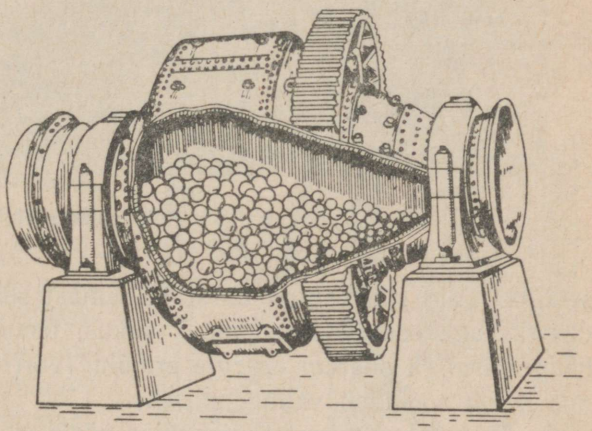
Joon. 25. Alumise etteandmisega kolle.

tatud vesiekraaniga 5. Andmed nende kollete soojusliku töö kohta on toodud tabelis 5.

Alumise etteandmisega koldeid on otstarbekohane kasutada kõrgeväärtuslike kütuste põletamiseks, mis sisaldavad vähe niiskust ja tuhka, mis mõõdukalt paakuvad ja eraldavad palju lenduvaid aineid. Madalakvaliteedilise kütuse põletamiseks nad on aga vähe kohased. Neid koldeid on võimalik kasutada kusnetski ja uurali süte põletamiseks.

30. Tolmkütte-kolded.

Käesoleval ajal on suuresti levinud kivisöe põletamine tolmu näol. Tolmuks on võimalik peenendada nii kõrgeväärtuslikke süsi kui ka igasugust madalakvaliteedilist kütust (antratsiidi puru, pruunsütt, koksi tootmisel tekkivaid jäätmeid). Tolmupõletamise arendamisel on suured teened nõukogude soojustehnikutel, kes on edukalt lahendanud raskeimad ülesanded antratsiitide, tuharikaste pruunsüte, freesturba jm. kütuste põletamisel. Kütus, mis on ette nähtud peenendada tolmuks, purustatakse tükkideks mõõdetega kuni 10—20 mm, kuivatatakse siis lõppniiskuseni 12—3%, sõltuvalt kütuse sordist, ja lõpuks jahvatatakse tolmuks. Jahvatamise peenus määratakse sõltuvalt kütuse sordist: jahvatatud antratsiidi puru annab näiteks sõelumisel läbi sõela nr. 70, millel on 4900 auku 1 cm² kohta, 90—95% tolmu, moskvalähine süsi 70—80%.



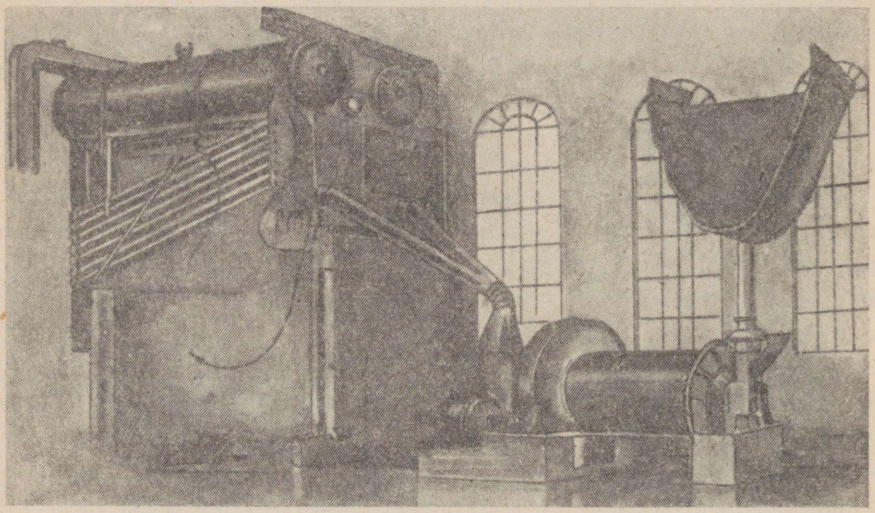
Joon. 26. Kuulveski.

Kütust on võimalik kuivatada kas enne jahvatamist erilistes kuivatites või üheaegselt jahvatamisprotsessiga veskis endas; viimasel juhul juhitakse veskisse kuivatamise otstarbel eelsoojendatud õhku, mis sealt koos söetolmuga siirdub koldesse.

Tahke kütuse jahvatamiseks kasutatakse mitut tüüpi veskeid, millistest osutub kõige töökindlamaks ja kohaseks kõige mitmekesisematele kütuse sortidele trummel-kuulveski (joon. 26). Söetolmu valmistamine võib olla kas tsentraalne, mispuhul tolmu valmistamine toimub eriseadmetes,

mis varustavad söetolmuga jaama kõiki katlaid, või siis individuaalne, kui igal katlal on iseseisev jahvatusseade. Joonisel 27 on kujutatud söetolmu-koldega katel, mis on varustatud individuaalse jahvatusseadmega.

Tsentraliseeritud tolmuvalmistamise paremused seisavad selles, et katla töö pole sõltuv veskite tööst ja on võimalik varustada mitmesugu-



Joon. 27. Kolle individuaalse söetolmu-seadmega.

seid tarbijaid söetolmuga ühest ja samast seadmest. Selle süsteemi puudusteks aga osutuvad seadme kogukus, tema kallis hind, vajadus eraldi hoone järgi ja suurem energia erikulu (võrreldes individuaalsüsteemiga), mis kulub söetolmu valmistamiseks.

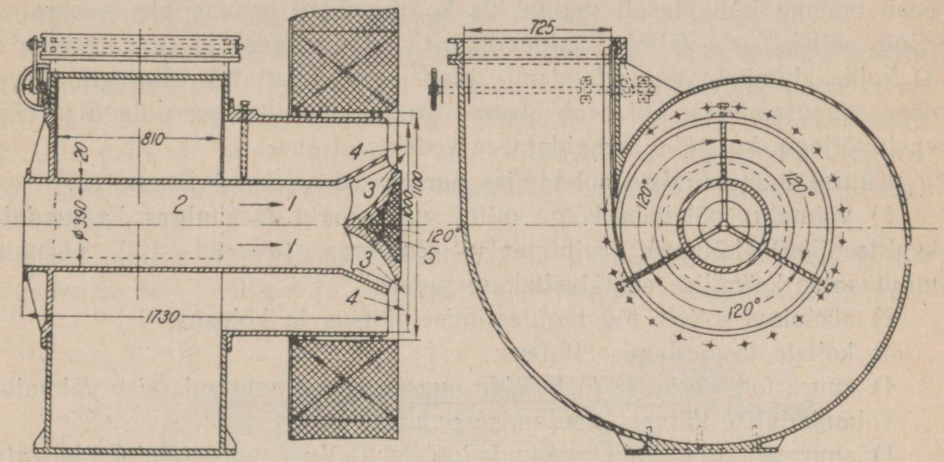
Individuaalne tolmuvalmistamise süsteem paistab silma seadmestiku lihtsuse ja järelikult ka odavuse poolest. NSV Liidus rakendatakse peaaegu eranditult seda tolmuvalmistamise süsteemi.

Individuaalsel tolmuvalmistamisel trummel-kuulveskis imetakse tolmu ja õhu segu ekshausteri poolt veskist välja läbi separaatori ja juhitakse siis koldesse mitme põleti kaudu. Joonisel 28 on kujutatud üks enamlevinud söetolmu põletitest.

Nõukogude konstruktorid ja teadlased on loonud originaalse ja ökonoomse „pneumaatilise" kolde peenendamata freesturba põletamiseks (autor on Stalini preemia laureaat A. A. Šeršnjov), kolded freesturba ja teiste lenduvate ainete poolest rikaste kütuste lendpõletamiseks minimaalse ette-

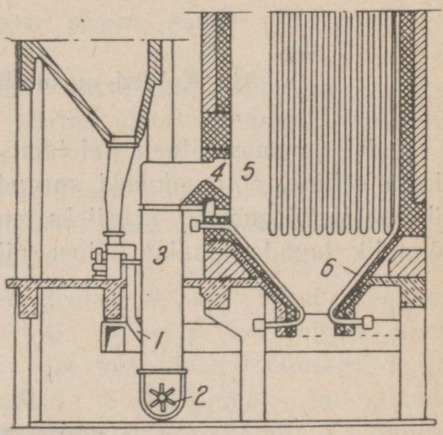
valmistusega (kuivatamine torukuivatises, jahvatamine ventilaatoris), on pioneerideks süvikveskiga kollete loomise ja ehitamise alal.

Süvikveskiga kollete (joon. 29) oluliseks paremuseks on nende kom-



Joon. 28. Turbulentne põleti (läbilaskevõimega ligikaudu 4500 kg/h antratsiiditolmu): *1* — kütus koos primaarõhuga, (*2* — õhu ja tolmu segu), *3* — küttesegu väljumise ava koldesse, *4* — sekundaarõhk.

paktsus, lihtsus ja suhteliselt väiksem energia kulu jahvatamisel. Tolmuvalmistamise süsteem on siin orgaaniliselt seotud koldega. Süviku all asub kiirekäiguline veski (pöörete arv minutis 700—1000). Kütuse kuivatamine toimub jahvatamise ajal läbi veski puhutava kuuma õhuga või õhu ja kuumade gaaside seguga (niiskete kütuste puhul temperatuuriga kuni 400° C). Süviku peamiseks ülesandeks on separeerida jahvatatud tolmust jämedamad osakesed: need langevad süvikust tagasi keskmisse, kuna paraja peensusega tolm kantakse õhuvoolusega läbi süviku peal oleva ambrasuuri koldesse.



Joon. 29 (vt. O. T. lk. 184 joon. 3—25). Süvikveskiga kolle: *1* — kütuse pealeande toru; *2* — kiirekäiguline veski; *3* — süvik; *4* — ambrasuur; *5* — kolle; *6* — ekraanid.

Süvikveskiga kolded on NSV Liidus laialdaselt kasutamisel.

Tolmkütte-kolded kujutavad endast suure mahuga kambreid; nad eri-

nevad üksteisest peamiselt leegi kujult (*U*- ja *L*-kujuline) ja räbu eemaldamise viisilt (räbu eemaldamine tahkelt või vedelalt).

Kolde enda konstruktsioonile esitatakse järgmised nõuded: 1) kolle peab omama küllaldaselt mahtu; 2) kolde seinad peavad olema ekraneeritud selleks, et vältida kolde müüritise lagunemist ja ta räbustumist; 3) kolde alumine osa peab olema intensiivselt jahutatav räbu granuleerimise saavutamiseks, või peab olema varustatud erilise põrandaga ja räbu vastuvõtjaga, kui räbu eemaldatakse vedelas olekus.

Kütuse tolmukujulise põletamise paremused seisavad järgnevas:

1) võimalus põletada kõige mitmesugusemaid (seehulgas ka madalakvaliteedilisi) kütuseid minimaalse õhuliiaga ($\alpha = 1{,}1—1{,}2$) põlemise minimaalse keemilise ebatäiuslikkuse puhul;

2) söetolmu-kollete töö reguleerimise lihtsus ja hõlpsus;

3) kollete teenindamise lihtsus;

4) suure forsseerimise ja katelde aurutusvõime suurendamise võimalus.

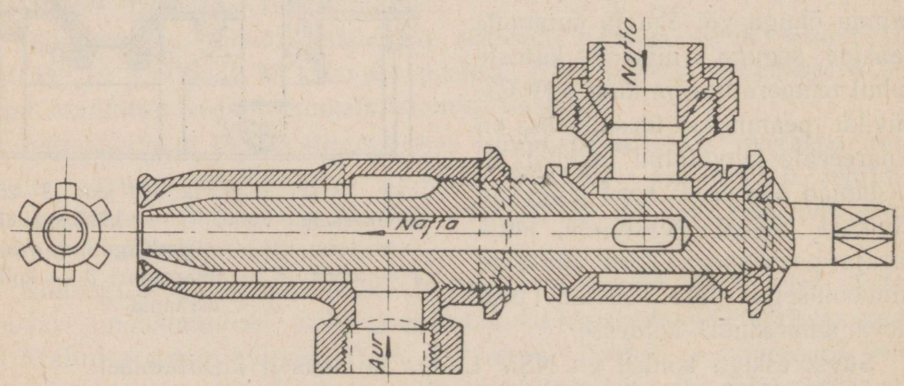
Tolmukujulise kütuse kasutamise puudusteks on:

1) suur energia kulu omavajadustele (kütuse purustamine, kuivatamine, jahvatamine);

2) lendtuha suur väljakandumine koldest ja eriliste tuhapüüdeseadiste vajalikkus.

31. Kolded masuudi ja gaasi põletamiseks.

Vedel- ja gaasikütuste põletamiseks määratud kollete kambri kuju peab olema selline, et puuduksid surnud nurgad. Kolle peab olema sellise pikkuse ja kõrgusega, et esiteks tema maht oleks küllaldane, teiseks oleks võimalik tagada kindlat kütuse pihustamist ja gaasi segunemist õhuga,



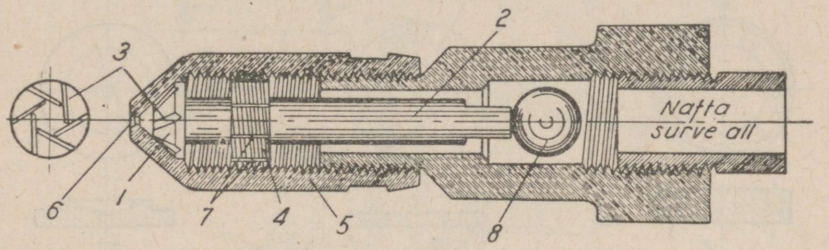
Joon. 30. Šuhhovi aurupihusti.

ja lõpuks, et kütus ei satuks katla müüritise seintele ja leek otseselt ei käiks vastu katla torusid.

Kolde maht valitakse, lähtudes kolderuumi lubatavast soojuslikust erikoormusest $Q/V_{ko} = 350\,000—500\,000$ kcal/m³h.

Naftat antakse koldesse aurupihustite (harvem õhupihustite) kaudu, mis pihustavad naftat auru (või suruõhu) abil, mille rõhk peab olema mitte alla 3—4 at. Kasutatakse ka mehaanilisi pihusteid, milledes nafta pihustub koldesse suure kiirusega väljavoolava joa mehaanilise lagunemise toimel. Aurupihustitest on laialdaselt levinud Šuhhovi pihustid (joon. 30).

Selle pihusti voorusteks on ehituse ja teenindamise lihtsus, kütuse pihustamise hea kvaliteet ja järelikult ta efektiivne põlemine. Aurupihusti



Joon. 31. Grigorjevi mehaaniline pihusti „Aatom".

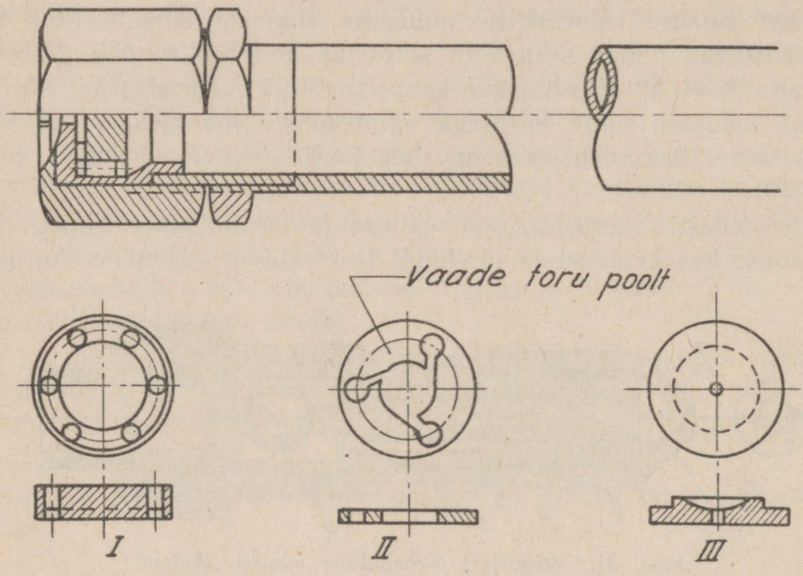
puudusteks tuleb lugeda võrdlemisi suurt auru kulu (vähemalt 0,3 kg auru nafta ühe kg kohta), müra, mida tekitab töötav pihusti, ja kondensaadi kaotsiminekut koos auruga.

Loeteldud puudustest on vabad mehaanilised pihustid, milledest meil on kõige enam levinud väikeste seadmete jaoks pihustid „Aatom" ja suurte seadmete jaoks — seibidega pihustid.

Pihusti „Aatom" (joon. 31) koosneb nõelast *2*, mis lõpeb koonuspeaga *1*; viimane on varustatud soontega *3*. Kruvi *4* abil, mis on ühes tükis nõelaga, kruvitakse nõel torusse *5*. See toru lõpeb koonusega, mille tipus on väike, väljastpoolt süvitatud auk *6*. Selleks juhuks, kui pihusti pea peaks ära murduma, on olemas kuulklapp *8*, mis hoiab ära suure hulga nafta sattumist koldesse.

Pihusti „Aatom" töötab järgmiselt. Surve all olev nafta saabub pihustisse, tungib läbi kruvi *4* soonte *7*, siis läbi soonte *3*, ja väljub suure kiirusega koldesse läbi augu *6*. Suure kiiruse ja üheaegse pöörlemise tõttu nafta pihustub intensiivselt õige peenteks osakesteks ja põleb kiiresti; pihustamine toimub seda paremini, mida suurem on rõhk. Tavaliselt peab rõhk, mille all pihustatakse naftat, olema mitte alla 6 at.

Ligikaudu samal põhimõttel töötab ka mehaaniline pihusti, mis on kujutatud joonisel 32. Siin nafta pihustamine ja keeriste tekkimine saavutatakse kolme seibi *I—III* abil, mis asetsevad üksteise järel. Nafta saabub kõigepealt esimese seibi juurde, mis on varustatud kuue auguga; siis



Joon. 32. Mehaaniline pihusti seibidega.

teise seibi juurde, mille kolmel augul on kaldsed sisselõiked tsentri suunas, ja lõpuks kolmanda seibi juurde, mis on ühe auguga, mille kaudu keeristatud nafta juga tungib suure kiirusega koldesse.

Mehaaniliste pihustite suureks puuduseks on pihustusseadme keerulisus.

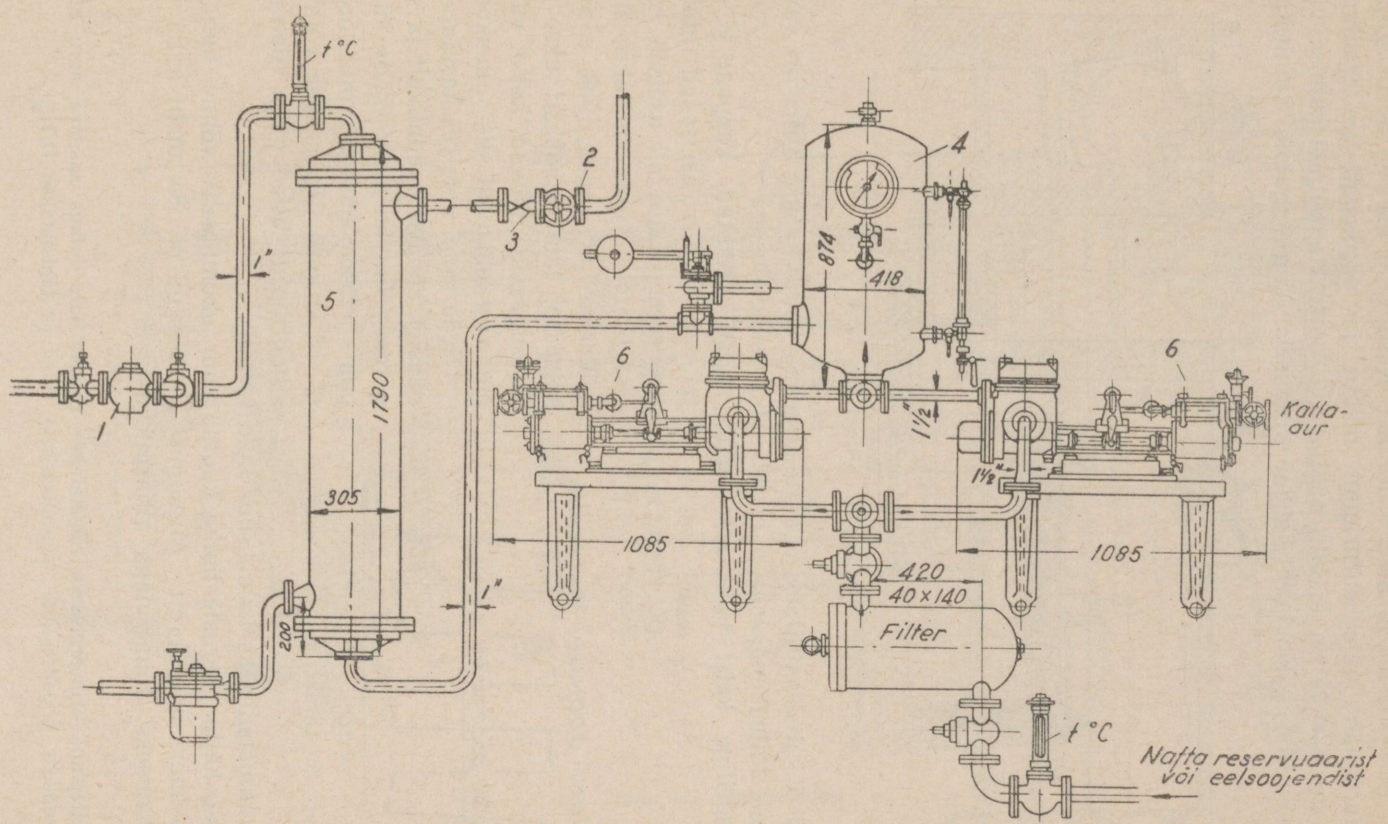
Joonisel 33 on kujutatud selline seade. Ta töötamine nähtub jooniselt.

VII peatükk.

Aurukatelde tüübid.

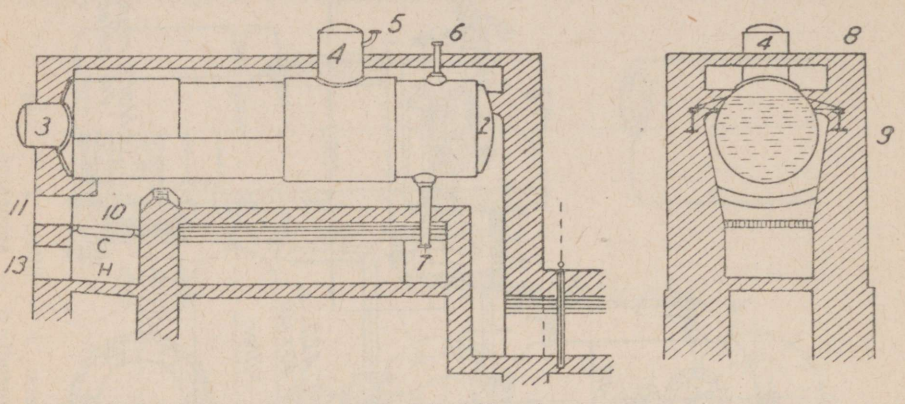
32. Silindrilised ja patareikatlad.

Tööstuslike aurukatelde üheks kõige vanemaks tüübiks on silindriline ehk trummelkatel (joon. 34). Ta kujutab endast kahe põhjaga *(2)* rauast needitud silindrit. Eesmise põhja külge on kinnitatud väljaulatuv ümmargune osa *3*, mille külge kinnitatakse veeklaasid, proovi-



Joon. 33. Seade nafta jäätmete mehaaniliseks pihustamiseks: *1* — filter; *2* — sulgventiil; *3* — sulgventiil; *4* — survenõu; *5* — eelsoojendi; *6* — aurupump.

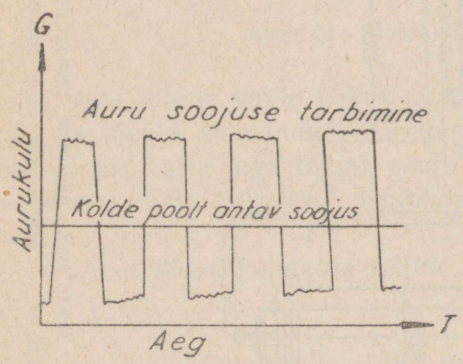
kraanid, manomeeter ja muu armatuur. Katla peal asetseb aurukoguja *4*, mis suurendab katla aururuumi mahtu ja soodustab vee eraldumist aurust; peale selle on ta ette nähtud vee ootamatu väljaviskumise vältimiseks aurutorustikku vee ägedal keemisel. Aurukogujale kinnitatakse



Joon. 34. Silindriline katel.

otstorud *5* kaitseventiilide ja auru-sulgemisventiili jaoks. Katel on varustatud veel toiteühendusega *6* ja läbipuhumisühendusega *7*.

Silindriline katel toetatakse tema külge needitud käppade *8* abil taladele *9*, mis asetsevad müüritise sees. Katla all asetseb kolle restiga *10*. Kütus visatakse sisse koldeukse *11* kaudu, õhk saabub koldesse läbi tuhakasti ukse *13*. Suitsugaasid uhuvad katla välispinda ja lahkuvad siis suitsukäiku.

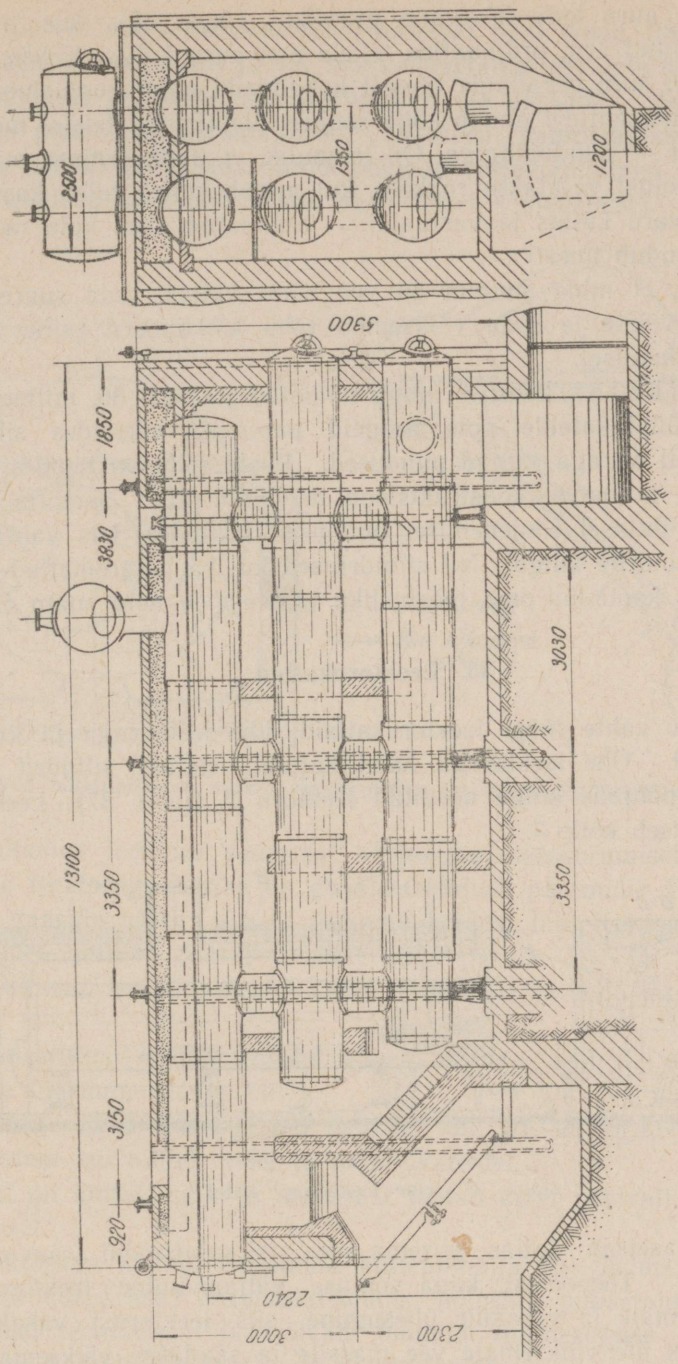


Joon. 35. Aurukatla graafik ajas.

Seda tüüpi kateldes kasutatakse gaaside soojust puudulikult ja seepärast töötavad nad väikese küttepinna erikoormusega[1], mis võrdub 8—10 kg/m²h. Peale selle võtavad silindrilised katlad palju ruumi ja nende valmistamiseks kulub suur hulk metalli.

Sellise katla vooruste hulka kuulub suur akumuleeriv võime, kuna ta sisaldab suure hulga vett. Missuguse tähtsusega on vee maht katla iseloomustamiseks, võime näha alljärgnevast.

[1] Küttepinna erikoormuseks nimetatakse katlast ühes tunnis saadava auru hulga (kilogrammides) ja küttepinna (ruutmeetrites) suhet ja tähistatakse D/H_k.



Joon. 36. Patareikatel.

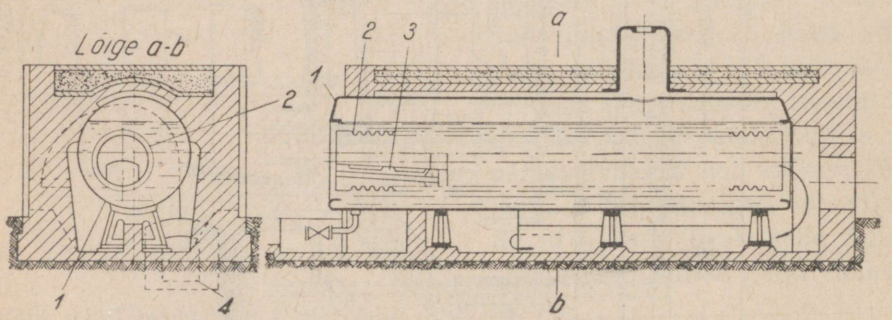
Kujutame auru kulu kõverana graafikul (joon. 35), kus abstsisside teljele on kantud aeg, ordinaatide teljele aga auru kulu. Kolde tööd pole võimalik auru kulu graafikule täpselt kohandada kolde soojusinertsi tõttu. Mõningatel momentidel annab kolle soojust ülejäägiga, teistel momentidel aga vastupidi — puudujäägiga. On loomulik, et tippkoormuse momentidel (kui auru soojust vajatakse rohkem, kui annab kolle) tuleb kasutamisele vee soojuse varu katlas ja vastupidi — alandatud auru kulu momentidel see varu täiendub uuesti.

On ilmne, et mida suurem on vee maht katlas, seda suurem on ta akumuleeriv võime ja seda väiksemad rõhu kõikumised esinevad katlas koormuse kõikumisel.

Patareikatel koosneb, nagu näidatud joonisel 36, mitmest silindrist. Seda tüüpi kateldel pole mingeid paremusi võrreldes silindriliste kateldega, neil on aga samad puudused. Peale selle on nendes halb vee tsirkulatsioon ja nende konstruktsioon on liialt jäik. Seetõttu riknevad silindrite ebaühtlasel soojenemisel õmblused kohtades, kus vahetorud on kinnitatud silindrite külge. Nii silindrilised kui ka patareikatlad on käesolevaks ajaks kaotanud oma tööstusliku tähtsuse ja neid enam ei ehitata.

33. Leektorukatlad.

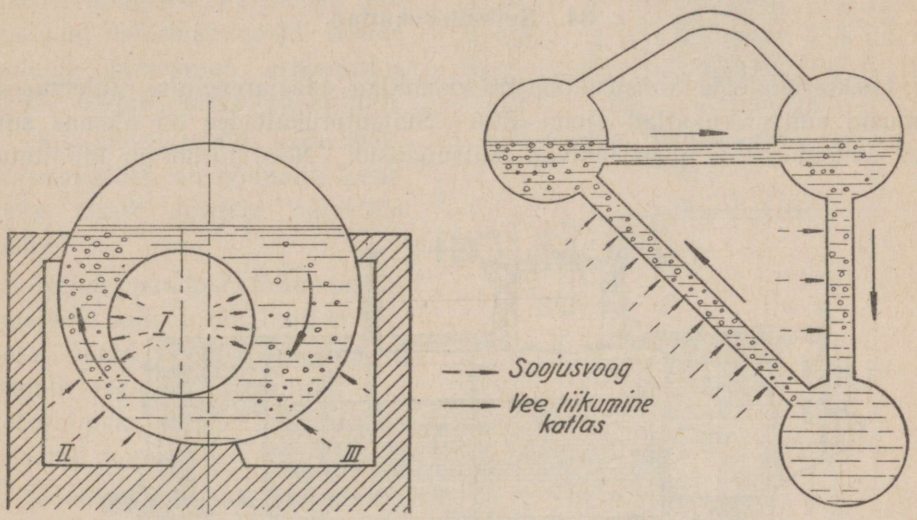
Eristatakse kahte tüüpi leektorukatlaid: ühe leektoruga ja kahe leektoruga katlad. Ühe leektoruga katel kujutab endast silindrit *1*, mille sees asetseb põhjade külge needitud leektoru *2* (joon. 37). Leektorus *2* tavaliselt asetseb kolle *3*.



Joon. 37. Ühe leektoruga katel.

Leektoru asetseb katlas parema vee tsirkulatsiooni saavutamiseks ekstsentriliselt. Tõepoolest, kuna soojuse väljaandmine leektoru seinte poolt on paremale ja vasakule ühesugune, siis leektorust vasakul pool antakse soojus üle väiksemale vee massile ja saadakse väiksema erikaa-

luga auru ja vee mass, kui leektorust paremal pool (joon. 38). Seetõttu püüab vasakul asetsev auru ja vee mass ühendatud anumate seaduse järgi tõusta kõrgemale ja voolab siis loomulikult üle paremale. Sel viisil toimub katlas pidev vee tsirkulatsioon. Leektoru valmistatakse tavaliselt lainelisena, selleks et vältida silindripõhjade väljakummimist ja õmbluste riknemist leektoru ja trumli seinte ebaühtlasel soojenemisel. Peale selle



Joon. 38. Vee tsirkulatsiooni skeem leektorukatlas ja kolme trumliga veetorukatlas.

avaldab laineline leektoru suuremat vastupanu sissesurumisele aururõhu poolt. Ühe leektoruga katlas on gaaside soojuse paremaks ärakasutamiseks kolm gaaside käiku: gaasid liiguvad koldest läbi leektoru (käik I), siis pöördudes uhuvad trumli vasakut külge (käik II) ja veelkordselt pöördudes uhuvad trumli paremat külge (käik III) ja selle järel lahkuvad katlast.

Katla aururuumi ei tohi tulised gaasid uhtuda, sest siis tekiks katla metallseinte ülekuumenemise oht.

Küttepinna erikoormus sellistel kateldel on 20—25 kg/m² tund, s. t. märksa suurem kui silindrilistel ja patareikateldel.

Veemaht on küllalt suur ja seepärast töötab katel püsivalt ka muutlikul koormusel.

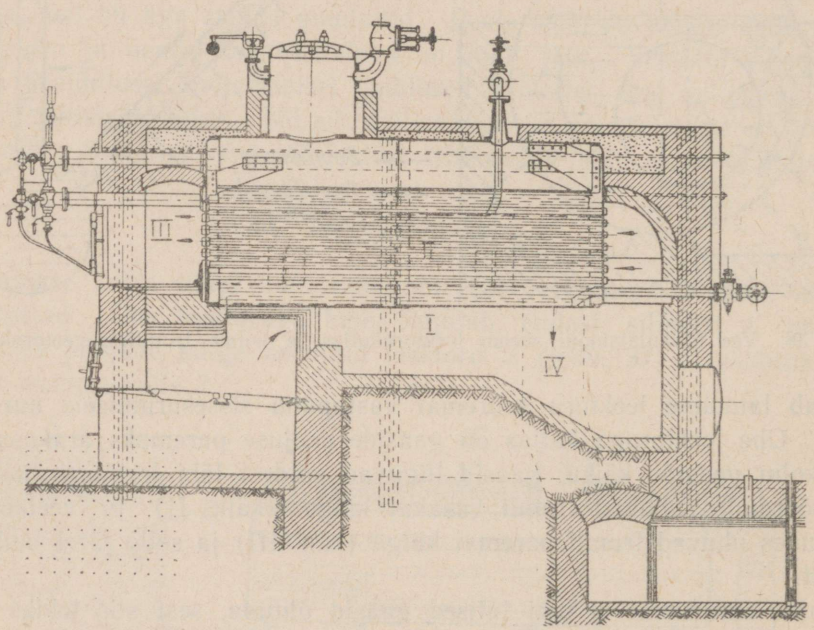
Ühe leektoruga katlaid ehitatakse küttepinnaga 20—55 m². Need katlad on väga käepärased ekspluatatsioonis, hõlpsalt puhastatavad katlakivist, lihtsad teenindada ja võivad töötada mitmesuguse karedusega veega. Nende katelde puuduseks on nende kogukus.

Kahe leektoruga katlad annavad võimaluse ehitada ühele katlale kaks kollet. Nende konstruktsioon osutub seetõttu veidi kompaktsemaks ja suhteliselt kergemaks ühe leektoruga katelde konstruktsioonist.

Leektorukatelde normaalne töörõhk ei ületa 10—12 atü, sest kõrgemate rõhkude puhul osutuksid katlad ülemäära rasketeks.

34. Suitsutorukatlad.

Leektorukatelde konstruktsiooni loomuliku edasiarenemise tulemusena ilmusid suitsutorukatlad (joon. 39). Suitsutorukateldes on olemas suur arv suitsutorusid, mida läbivad suitsugaasid. Need torud on kinnitatud



Joon. 39. Suitsutorukatel.

trumli otstesse ja väljastpoolt uhub neid vesi. Osa suitsutorudest, mis on kinnitatud trumli otstesse keermetisel, on ankurseosteks, mis takistavad trumli otste väljapaindumist.

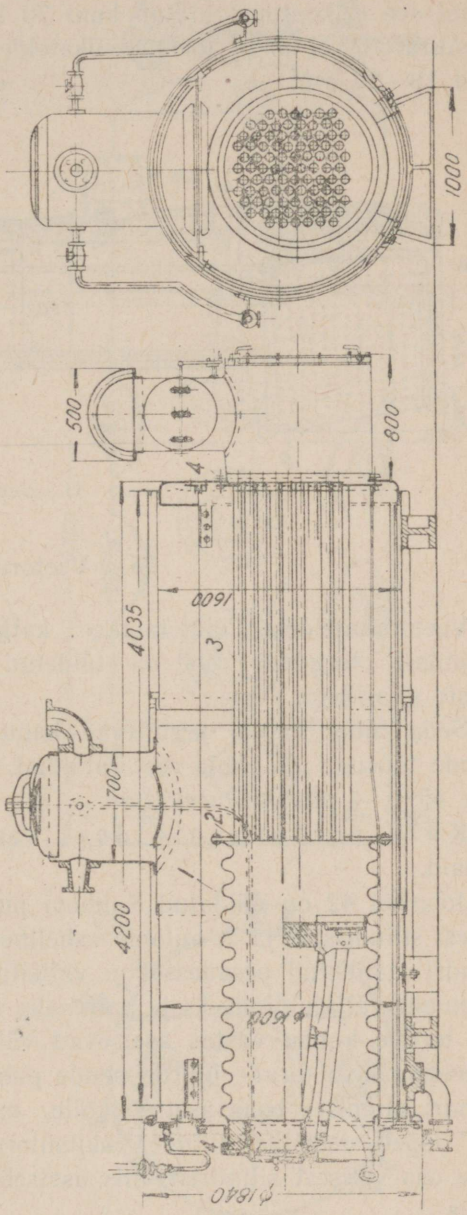
Nende katelde positiivseks omaduseks on nende kompaktsus, kuna võrdlemisi väikese mahu juures osutub võimalikuks saavutada suurt küttepinda. Seda tüüpi katelde põhimiseks puuduseks on eriti raske

torude puhastamine katlakivist ja sagedane lekkimine kohtades, kus torud on valtsitud otsaseintesse. Nende ühenduste riknemist põhjustab halb vee tsirkulatsioon seda tüüpi kateldes, kuna halvast vee tsirkulatsioonist tulenevad katla eri osade erinevad temperatuurilised tingimused ja erinevad soojuslikud deformatsioonid. Nende katelde küttepinna erikoormus D/H_k ületab harva 15 kg/m²h.

Suitsutorukatlaid, nagu leektorukatlaidki, on võimalik kasutada ainult madala aururõhu puhul.

Nende puuduste tõttu statsionaarseid suitsutorukatlaid ei ehitata, kuid neid kasutatakse sageli transportvahenditel, kus tähtsaimaks nõudeks on katelseadme kompaktsus ja kergus.

Joonisel 40 on kujutatud kombineeritud suitsutorukatel, nn. lokomobiilkatel. Ta koosneb trumlist ja sellele kinnitatud aurukogujast, leektorust *1*, milles asub kolle, torulaudadest *2* ja suitsutorudest *3*. Kogu süsteem (leektoru, torulauad ja suitsutorud) kinnitatakse trumli otste külge poltidega *4*, mistõttu on võimalik välja võtta kogu seda süsteemi, kui katel on seisma pandud puhastamiseks ja remondiks. See on ta eeliseks, võrreldes teist tüüpi suitsutorukatlaga — vedurikatlaga.

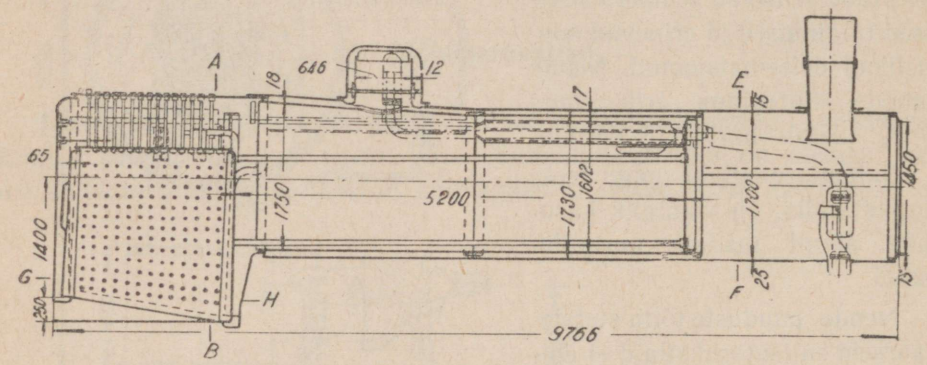


Joon. 40. Lokomobiilkatel.

Vedurikatel (joon. 41) kujutab endast kombinatsiooni tulepesast, mille sees asetseb kolle, ja suitsutorudest.

Loomuliku tõmbe puhul küttepinna normaalne erikoormus kombineeritud suitsutorukateldel on 16—25 kg/m²h. Vedurikateldel kunstliku tõmbe puhul see erikoormus ulatub kuni 70 kg/m²h.

Aururõhk ei ületa lokomobiilkateldel 15 atü, vedurikateldel ta ulatub kuni 18—20 atü.



Joon. 41. Vedurikatel.

35. Veetorukatlad.

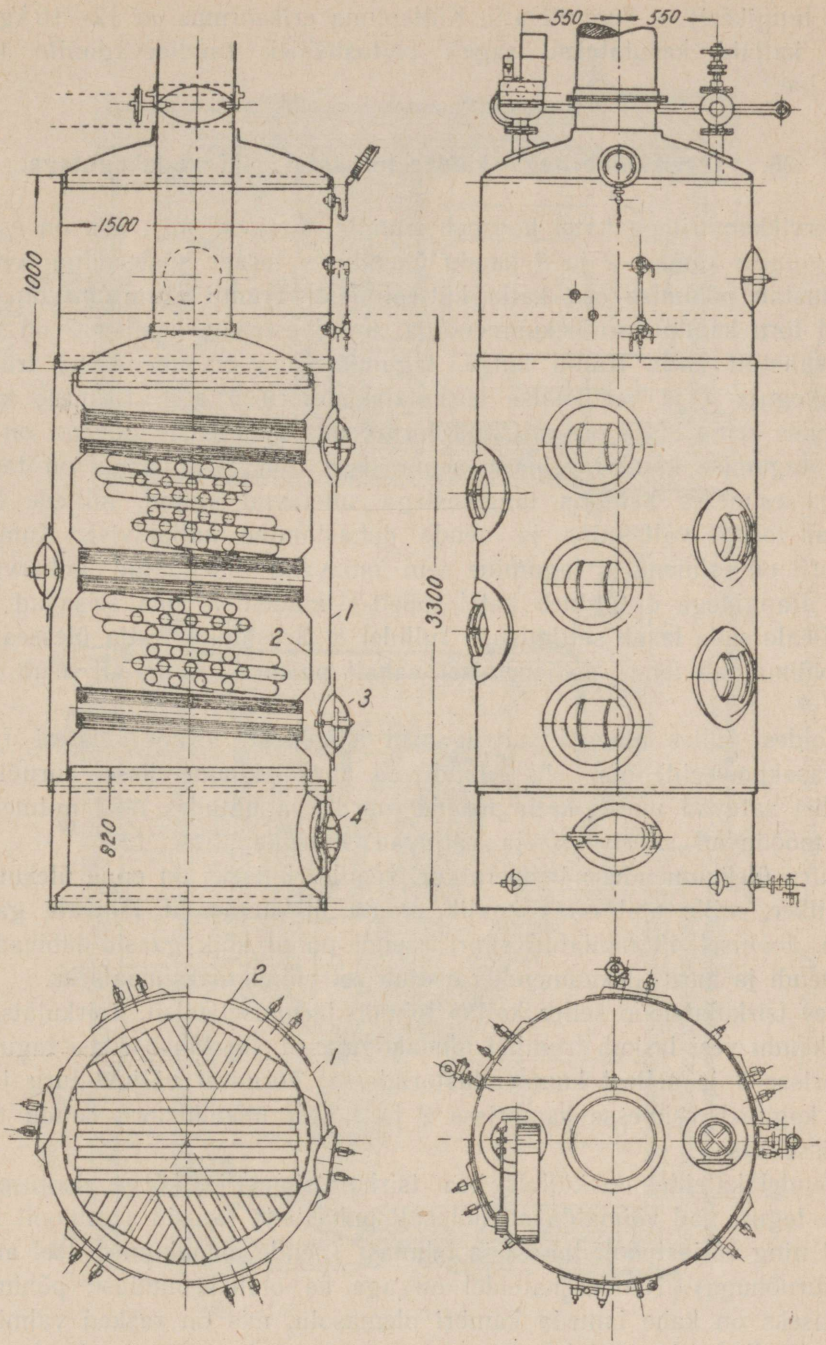
Veetorukateldeks nimetatakse katlaid, milledel küttepind koosneb põhimiselt torudest, mis on täidetud veega ja uhutakse väljastpoolt tuliste gaasidega.

Seda tüüpi katlad jagunevad kahte suurte klassi — katlad väikese torude tõusuga — kald-veetorukatlad, ja katlad suure torude tõusuga (üle 45°) — püst-veetorukatlad.

Kald-veetorukateldest vaatleme NSV Liidus enam levinud katlaid.

Joonisel 42 on näidatud Šuhhovi püstkatla ehituse skeem. Ta koosneb kahest silindrist *1* ja *2*, millede vaheline ruum on täidetud veega. Sisemise silindri stantsitud pesadesse on valtsitud torud, milledele on antud auru paremaks väljajuhtimiseks ja paremaks vee tsirkulatsiooniks väike kallakus. Iga torude kimbu vastas asetsevad välimises silindris luugikesed *3*, mis tagavad pääsu torude juurde nende puhastamiseks ja remondiks. Sisemise silindri alumises osas asetseb kolle, mida teenindatakse ukse *4* kaudu. Ülal lõpeb sisemine silinder suitsutoruga. Aururuum võtab enda alla selle osa välisest silindrist, mis asetseb pealpool sisemise silindri ülemist põhja.

Niisuguseid katlaid ehitatakse ainult väikestele võimsustele, küttepinnaga kuni 35 m². Aururõhk on madal (vastasel korral on raske tihen-



Joon. 42. Suhhovi püstkatel.

dada luugikesi) — kuni 12 atü. Küttepinna erikoormus on 12—16 kg/m²h. Neid katlaid kasutatakse sageli ehitustöödel, raudteevagunite kütmiseks jne.

36. Tervikkambritega kaldveetorukatel piki-mudakogujaga.

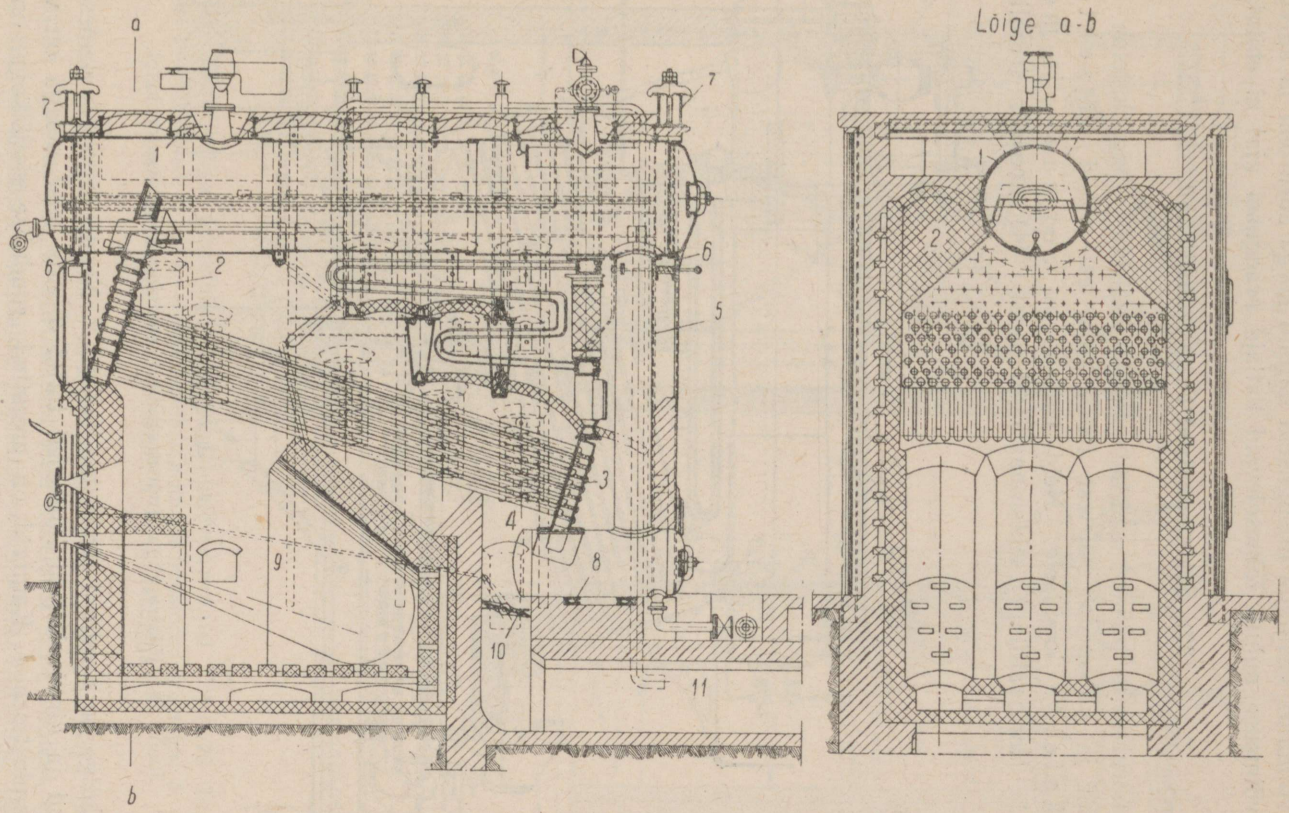
Tervikkambritega katel koosneb trumlist *1* (joon. 43), mis on esimese ja tagumise kambri *2* ja *3* kaudu ühenduses torude süsteemiga; viimane moodustab põhimise osa katla küttepinnast. Trumli aururuum on ühendatud toru kaudu auruülekuumendiga. Katla esimene kamber *2* on needitud vahetult katla trumli külge, tagumine aga on ühendatud trumliga mudakoguja *4* ja vertikaalse tsirkulatsioonitoru *5* abil. Esimese kambri tagumise seina sisse on valtsitud torud, mis oma teiste otstega on valtsitud tagumise kambri esimese seina sisse. Iga toru vastas on tagumises ja esimeses kambris luugikestega suletavad augud, millede kaudu toimub torude valtsimine ja nende puhastamine katlakivist. Kummalgi kambril on esimene ja tagumine sein omavahel ühendatud ankurvarrastega. Rangidega *6* tugineb katel topelt-T-taladele *7*, mis seisavad postidel. Peale selle lasub settimisnõu rullidel *8*. Seesugune katla ülesseadmise viis võimaldab temal soojenemisel vabalt paisuda. Katla all asub naftakolle *9*.

Koldest tulles uhuvad suitsugaasid kõigepealt torude esimesi (joonisel vasakpoolseid) otsi, siis suunduvad auruülekuumendisse, auruülekuumendist satuvad uuesti katla torude juurde, ja uhtudes neid mitmel käigul, mööduvad siibrist *10* ja väljuvad suitsukanalisse *11*.

Auru ülekuumenduse temperatuuri reguleerimiseks on enne ülekuumendit siiber, mille abil on võimalik muuta ülekuumendit läbivate gaaside hulka. Joonisel 43 näidatud siibri asendi puhul kõik gaasid läbivad ülekuumendi ja auru ülekuumendus osutub sel puhul maksimaalseks.

Vee tsirkulatsioon selles katlas toimub järgmisel viisil. Tsirkulatsioonitoru kaudu vesi laskub trumlist mudakogujasse, siit läheb edasi tagumisse kambrisse *3* ja sellest kuumendustorudesse. Torudest väljuv auru ja vee segu koguneb esimesse kambrisse *2* ja sellest ühendustoru kaudu trumli ülemisse ossa.

Nendel kateldel on küllalt hea tsirkulatsioon ja kõrge soojuse ülekande tegur; nad võimaldavad hõlpsalt puhastada torusid seestpoolt katlakivist ning väljastpoolt tuhast ja tahmast (nende ülepuhumise teel auruga või suruõhuga). Nendel kateldel on aga ka olulisi puudusi; põhimiseks puuduseks on kahe lameda kambri olemasolu, mis on rasked valmistada ja ebakindlad ekspluatatsioonis suure arvu ankurvarraste ja lamedate

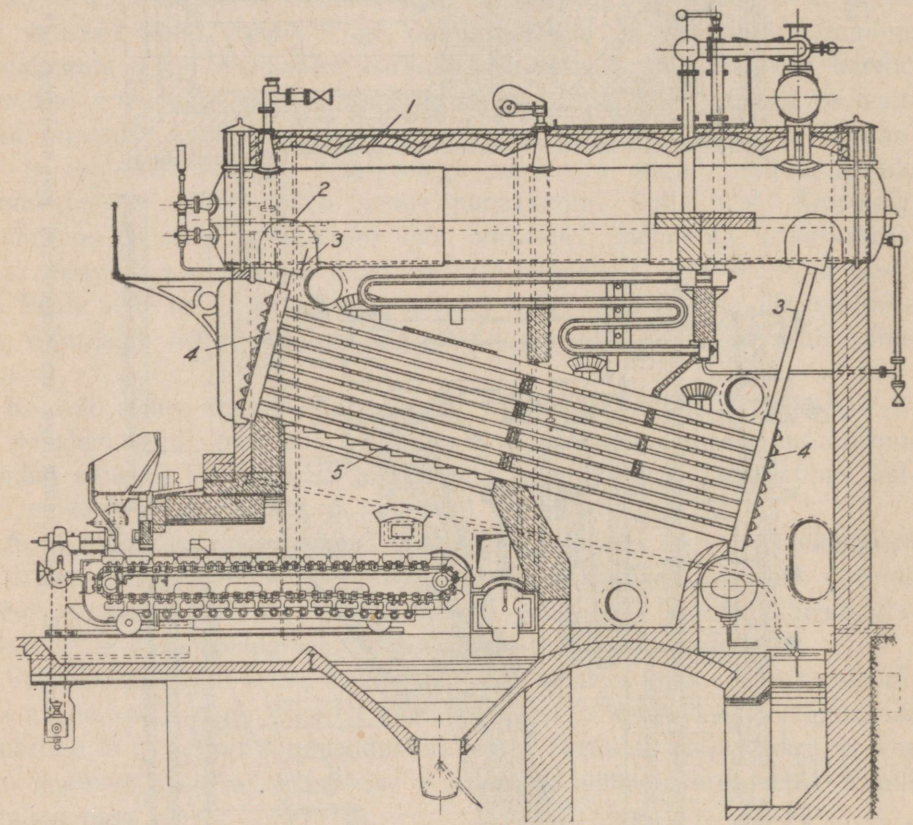


Joon. 43. Tervikkambritega kaldveetorukatel piki-mudakogujaga.

seinte tõttu, mida tuleb valmistada väga paksudena aururõhu tõstmisel; see ei võimalda kasutada niisuguseid katlaid kõrge aururõhu ja agregaadi suure võimsuse puhul. Kõnesolevaid katlaid praegusel ajal ei ehitata.

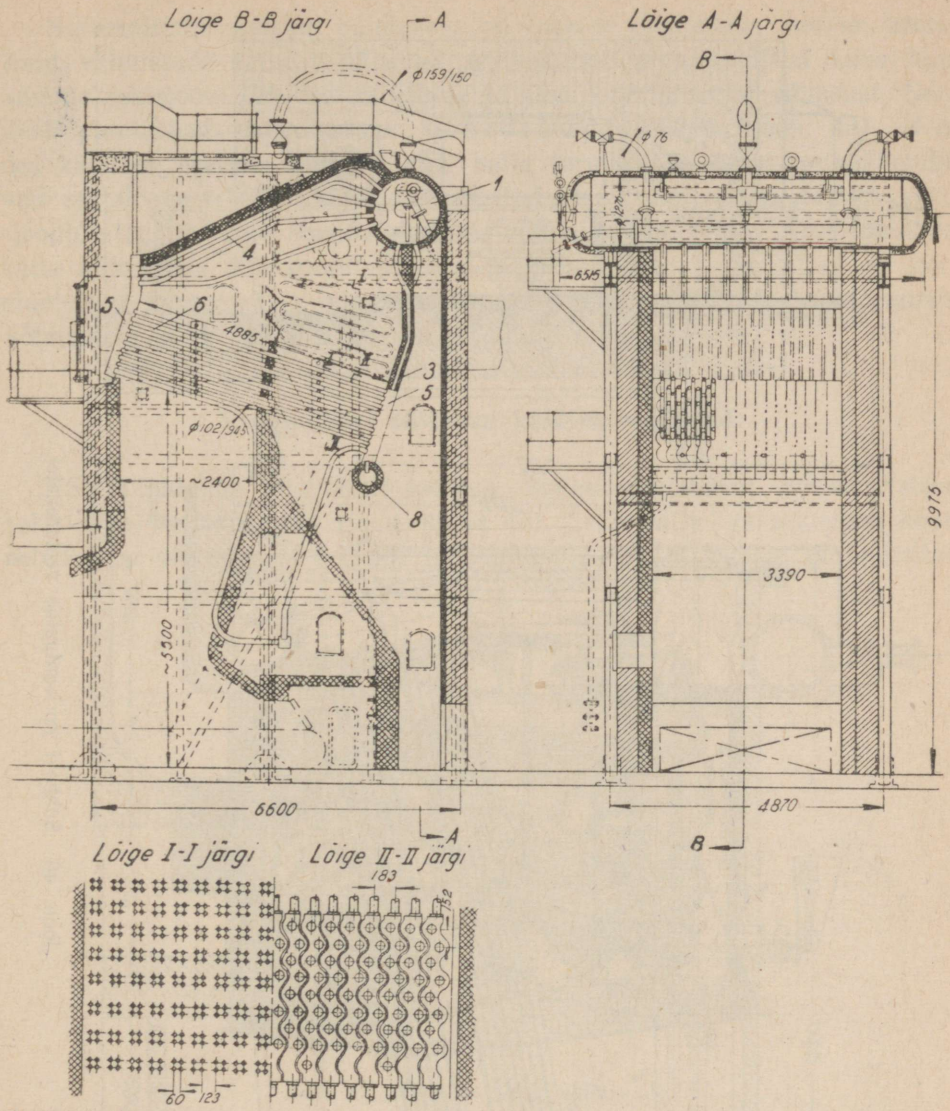
37. Sektsionaalsed kaldveetorukatlad.

Konstruktorite püüded säilitada horisontaalsete veetorukatelde kõiki paremusi ja vabaneda suurtest tervikkambritest viisid nn. sektsionaalkatelde loomisele. Neid katlaid on normaal- ja meretüüpi. Normaaltüüpi sektsionaalkatel (joon. 44) koosneb trumlist *1*,



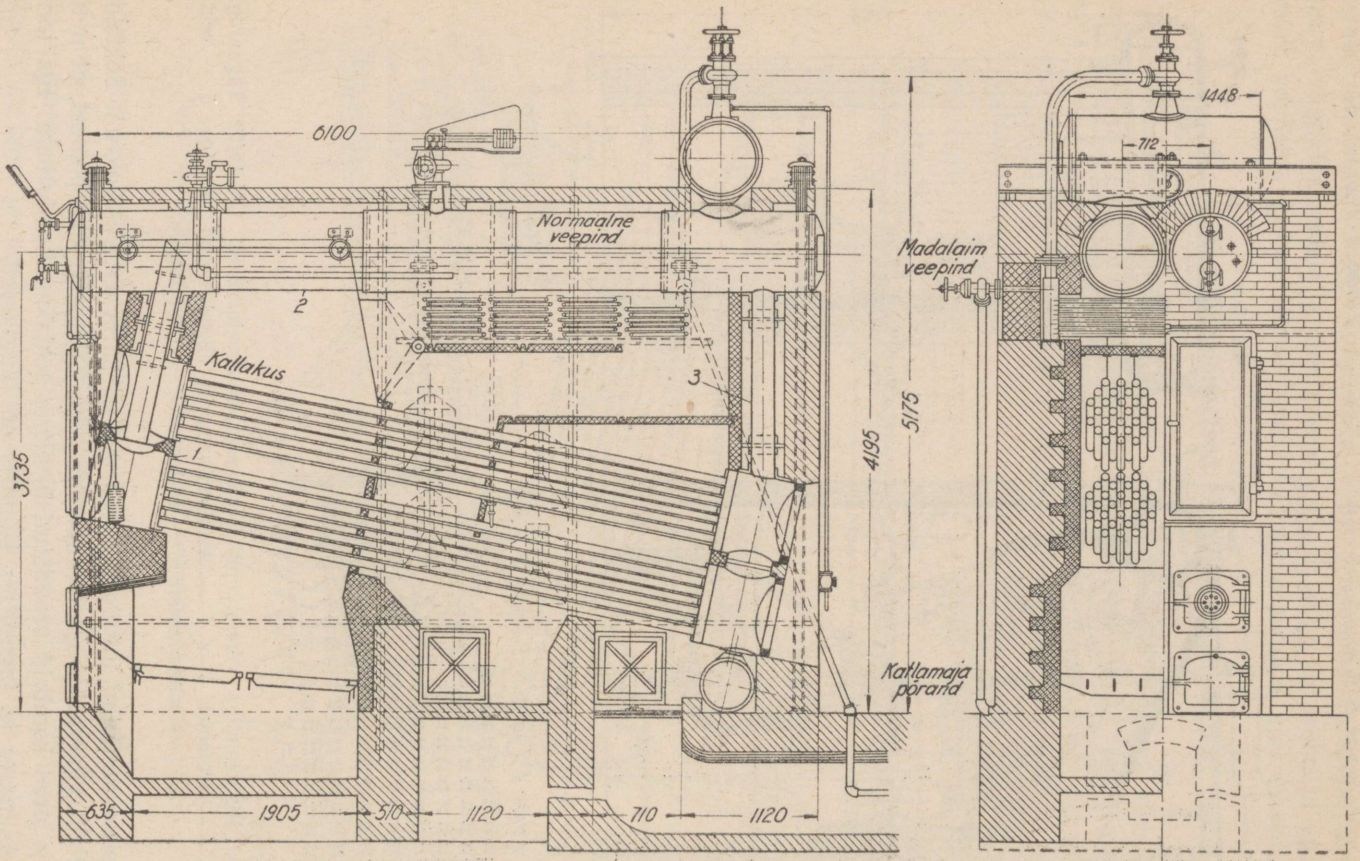
Joon. 44. Pikitrumliga (normaaltüüpi) sektsionaal-kaldveetorukatel.

mille külge on needitud stantsitud taskud *2*. Nende taskute aukudesse on pistetud ja kinnivaltsitud lühikesed torud *3*, mis teise otsaga on valtsitud kambritesse *4*. Kambrid on pressitud, ruudulise ristlõikega, omavad siksakilist kuju ja nende sisse on valtsitud veetorud *5*. Kaks kambrit



Joon. 45. Ristitrumliga (meretüüpi) sektsionaal-kaldveetorukatel CM-16/22 Taganrogi tehasest: *1* — trummel; *3* ja *4* — sektsioonikambrite ühendustorud trumliga; *5* — sektsioonikambrid; *6* — veetorud; *8* — mudakoguja.

nende sisse valtsitud torudega moodustavad katla s e k t s i o o n i. Sektsionaalkatlad erinevad seega tervikkambritega kateldest selle poolest, et nendes on suured kambrid asendatud üksikute sektsioonikambritega. Iga toru vastas esimeses ja tagumises kambris on luugikesed.

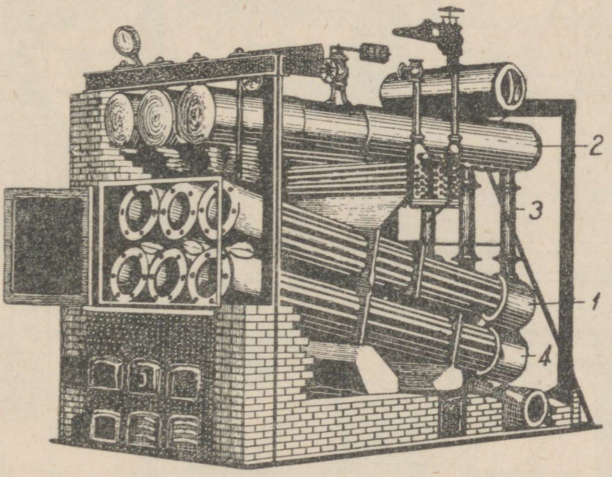


Joon. 46. Suhhovi horisontaalne veetorukatel.

Normaaltüüpi katelde puuduseks on taskute olemasolu, mis on keerulised valmistada ja mis piiravad sektsioonide arvu (kõigest kuus kuni kümme sektsiooni ühe trumli kohta) ja järelikult ka katla võimsust. Nendest puudustest on vabad nn. meretüüpi katlad (joon. 45). Nendes kateldes asetseb trummel risti katla torudele ja torud, mis ühendavad sektsioone trumli külge, on valtsitud otse trumli sisse. Selline sektsioonide trumli külge ühendamise viis võimaldab märgatavalt suurendada katla küttepinda ühe trumli puhul. Meretüüpi sektsionaalkatlad on normaalsetest kergemad ja odavamad ja neid võidakse ehitada väga suurele võimsusele ja nii kõrgele kui ka madalale rõhule.

38. Šuhhovi süsteemi kaldveetorukatlad.

NSV Liidus on laialdaselt levinud Šuhhovi süsteemi horisontaalsed sektsionaal-veetorukatlad (joon. 46 ja 47). Selle katla iga sektsioon koosneb kahest väheldasest kollektorist-trumlist *1*, mille otstesse on valtsitud

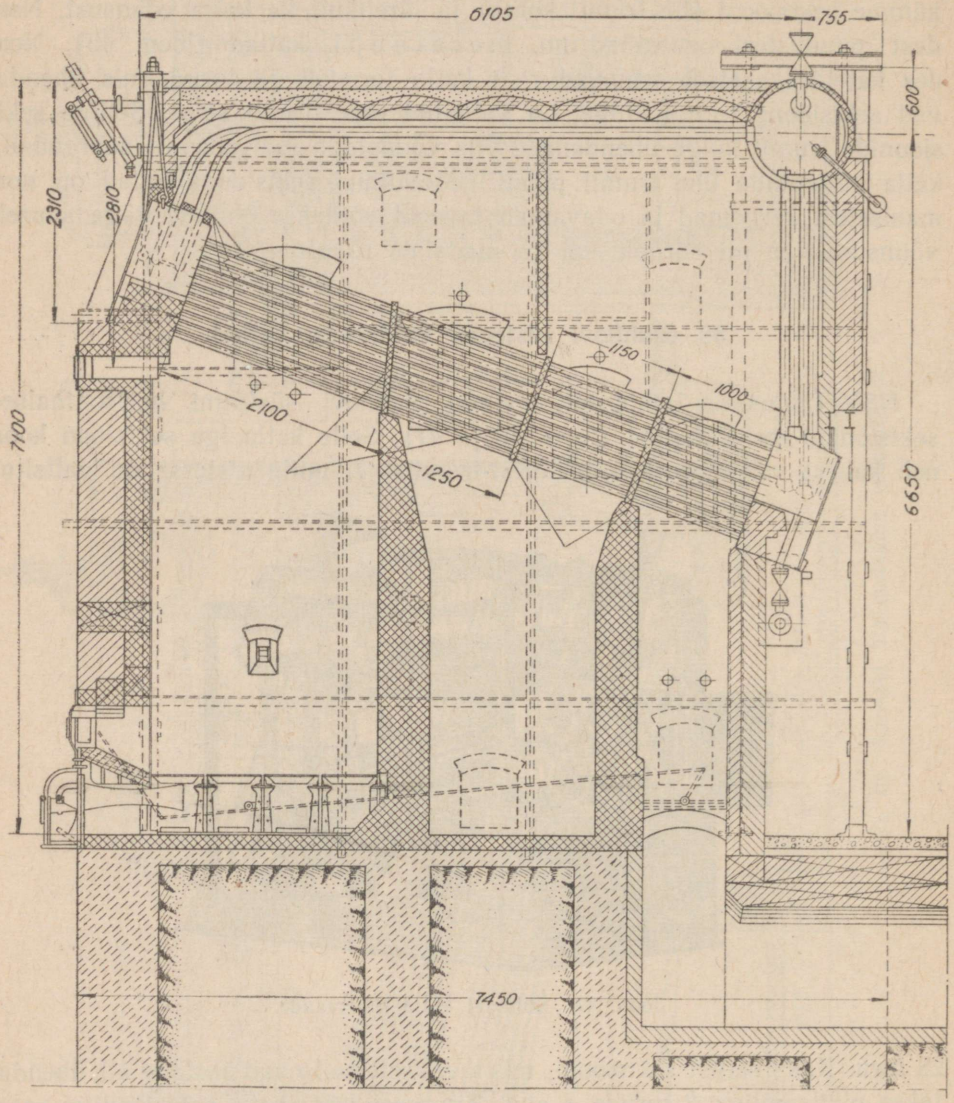


Joon. 47. Šuhhovi katla välisvaade.

28 toru. Kaks sellist sektsiooni, mis tavaliselt asetsevad üksteise all, ühendatakse pikitrumliga *2* torude *3* abil. Trummel koos kahe sektsiooniga moodustab patarei. Patareide arvu, samuti ka torude pikkuse suurendamisel on võimalik muuta nende katelde küttepinda piirides 38—750 m².

Šuhhovi katelde puuduste hulka kuulub suur neetühenduste arv, raskendatud tsirkulatsioon, torude ebaühtlane paigutus gaasi vooluses ja madalavõitu rõhu ülempiir (kuni 18 atü).

Käesoleval ajal on Šuhhovi katelde konstruktsiooni muudetud ja niisuguseid katlaid nimetatakse Šuhhov-Berlini kateldeks (joon. 48).



Joon. 48. Šuhhov-Berlini süsteemi veetorukatlad.

Selle katla erinevus vana konstruktsiooniga katlast seisab järgmises:

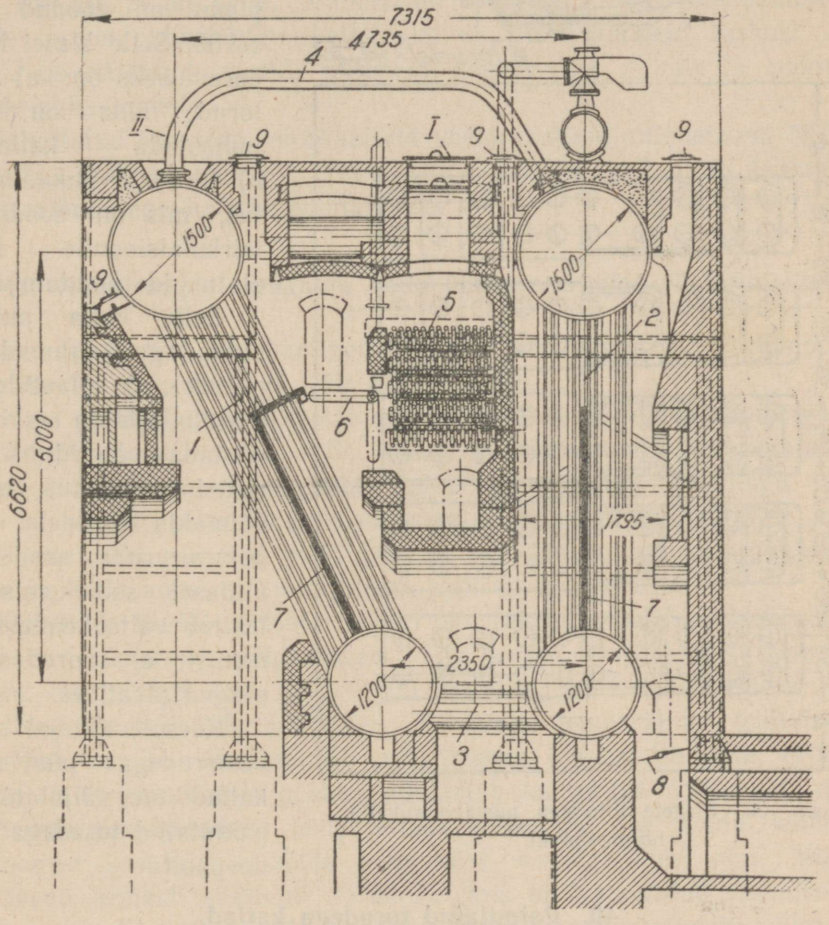
a) Šuhhov-Berlini kateldel on olemas üks risttrummel, mis teeb konstruktsiooni sektsioonide suure arvu puhul märgatavalt kergemaks ja odavamaks;

b) sektsioonid asetsevad malekorras ja on ühendatud trumliga sirgete või painutatud torude abil;

c) kimbus on 28 asemel 24 toru, mis annab võimaluse torude hõlpsamaks ülepuhumiseks ülepuhumistoru viimisega veetorude vahele.

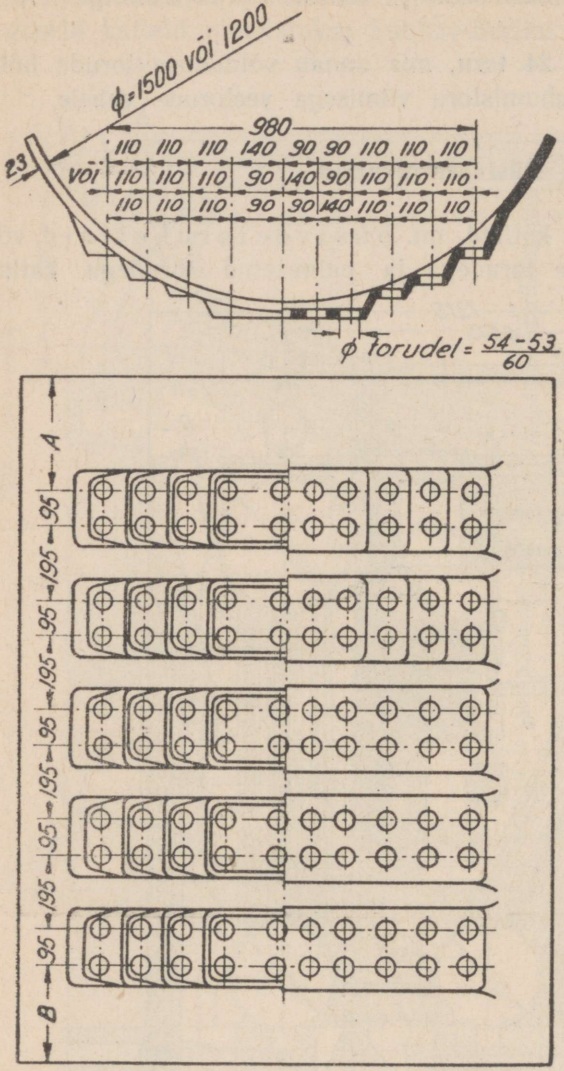
39. Püstveetorukatlad.

Suure torude kallakusega katlaid, nn. p ü s t v e e t o r u k a t l a i d võib jaotada kahte klassi: sirgete torudega ja painutatud torudega katlad.



Joon. 49. Sirgete torudega püstveetorukatel.

Sirgete torudega kateldest on kõige enam levinud katel, mis on kujutatud joon. 49.



Joon. 50. Sirgete torudega püstveetorukatla normaalplaat.

See katel koosneb kahest ülemisest ja kahest alumisest trumlist. Ülemiste trumlite alumine osa ja alumiste trumlite ülemine osa kujutavad endist stantsitud lehti astmetega, millede aukudesse on valtsitud torud. Plaadi lõige ja plaan on toodud joonisel 50. Selle klassi katelde paremuseks on: a) sirged torud, mida on hõlpus puhastada katlakivist; b) torude vertikaalne asetus, mis on soodne vee tsirkulatsioonile katlas; c) luukide puudumine.

Selle katla puuduste hulka aga kuuluvad järgmised: a) plaatide olemasolu, mis on rasked valmistada ja kallid; b) konstruktsiooni jäikus, mis ei võimalda torudele vabalt deformeeruda nende ebaühtlasel soojenemisel ja tekitab valtsühenduste riknemist; c) suured soojuspinged plaatides.

Käesoleval ajal sirgete veetorudega püstveetorukatlad on välja tõrjutud painutatud torudega katelde poolt.

40. Painutatud torudega katlad.

Joonisel 51 ja 51-a on kujutatud painutatud torudega püstveetorukatel. Katel koosneb kolmest trumlist, mis omavahel on ühendatud painutatud torudega. Augud on puuritud trumlitesse radiaalselt, mis võimaldab kalli-

hinnaliste trumlite väheldaste mõõdete puhul paigutada nendesse suure arvu torude ridasid, s. t. võimaldab ehitada katlaid suure küttepinnaga ja järelikult ka suure võimsusega. Painutatud torud teevad süsteemi väga painduvaks, vältides trumlite liigseid termilisi pingeid. Süsteemi painduvus koos torude vertikaalse asetusega annab võimaluse vajaduse korral katla tööd forsseerida. Selle katla puuduseks on ebakindel tsirkulatsioon.

Veelgi kergemateks ja paremini töötavateks osutuvad kahe trumliga kolmekimbulised katlad.

Painutatud torudega vertikaalseid veetorukatlaid ehitatakse rõhkudele kuni 100 atü ja üle selle. Painutatud torudega katelde hooldamine, eriti nende torude puhastamine katlakivist ei tekita mingeid raskusi. Joonisel 52 on näidatud freesid, milliseid kasutatakse sirgete ja painutatud torude puhastamiseks.

Painutatud torudega vertikaalseid veetorukatlaid valmistavad NSV Liidus väga mitmed tehased. NSV Liidus sellised katlad on keskmise ja kõrge võimsusega katelde põhitüübiks.

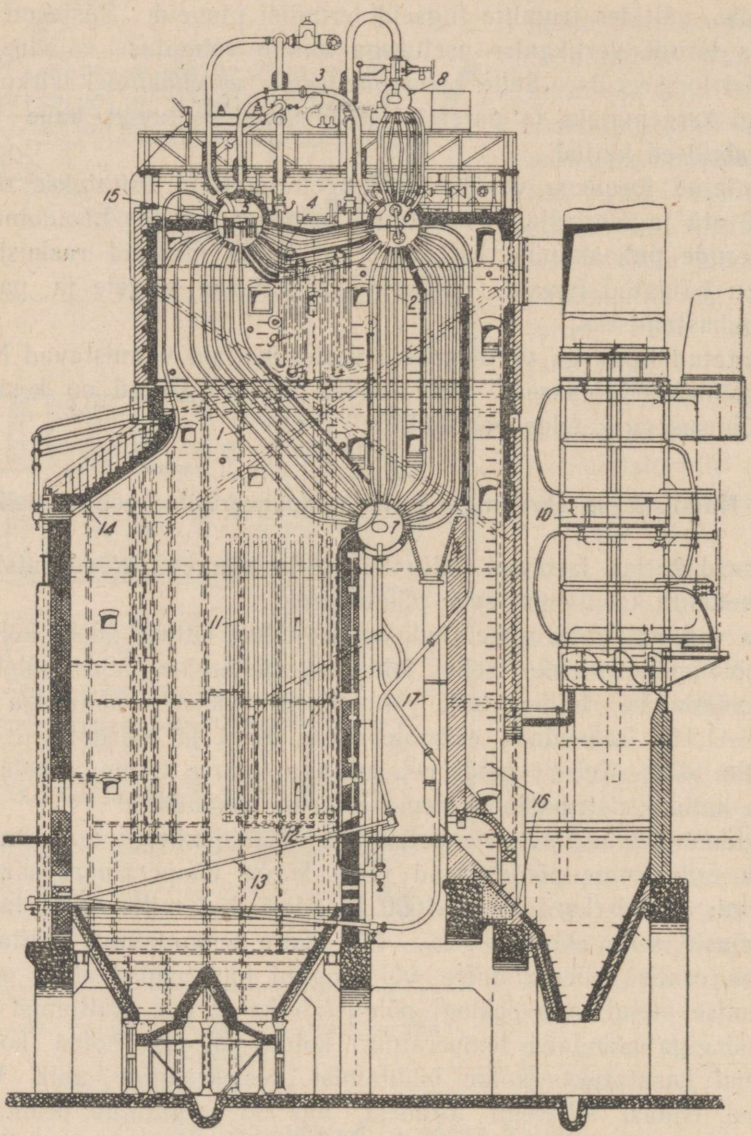
41. Nüüdisaegse ekraaniga katla komponeerimise põhiprintsiibid.

Võimsad katlad tarbivad palju kütust ja nõuavad kõige ratsionaalsemate meetodite kasutamist selle põletamiseks.

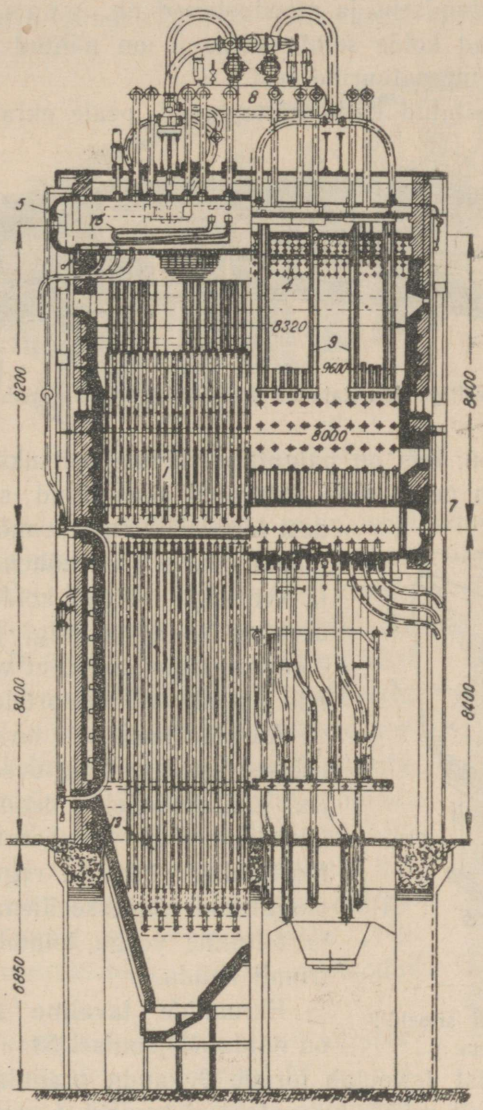
Nagu varemalt juba nimetatud, osutub tahke kütuse üheks kõige paremaks põletamise viisiks selle tolmuna põletamine. See põletamisviis annab võimaluse toime tulla suhteliselt väikse õhuliiaga koldes ($\alpha = 1{,}1—1{,}15$), rakendada eelsoojendatud õhku ja märgatavalt forsseerida katla tööd. Teiselt poolt peavad aga kütuse tolmuna põletamiseks kolde ja katla konstruktsioon olema eriliselt kohandatud.

Väheldane liigõhk, eelsoojendatud õhu rakendamine ja kolderuumi suur soojuslik erikoormus põhjustavad väga kõrge temperatuuri saavutamist koldes, mis ulatub kuni 1500—1600 kraadini, kui mitte võtta tarvitusele eri abinõusid selle alandamiseks. Nii kõrge temperatuur tekitab kolde müüritise osalise ülessulamise või koguni hävinemise ohtu, eriti räbu ülessulamise puhul, mis pealegi põhjustab ka torude kattumist räbuga.

Eesmärgiga alandada temperatuuri koldes ja ära hoida koldeseinte hävinemist kasutatakse kolde jahutamist vesiekraanide abil. Viimased kujutavad endast süsteemi torudest, mis on paigutatud peamiselt piki kolde seinu. Ekraani torud on ühtlasi ka kuumendustorudeks, olles ühendatud vee üldisse tsirkulatsioonisüsteemi katlas ja kujundades seega katla täiendavat kiirgus-küttepinda. Tugeval ekraneerimisel ekraanid neelavad kuni 50—60% kütuse soojusest.



Joon. 51 ja 51-a. Kolme trumliga Leningradi Stalini-nim. tehase püstveetorukatel tolmuküttekoldega ja põlemisõhu eelsoojendiga, $D = 90/110$ t/h; $p = 32$ atü. *1* — esimene katlakimp; *2* — tagumine katlakimp; *3* — ülemisi trumleid ühendavad torud



(auruläbilasketorud); *4* — veeläbilasketorud; *5* — ülemine esimene trummel; *6* — tagumine ülemine trummel; *7* — alumine trummel; *8* — aurukoguja; *9* — ülekuumendi; *10* — õhueelsoojendi; *11* — külgekraan; *12* — tagaekraan; *13* — alumine granulaator.

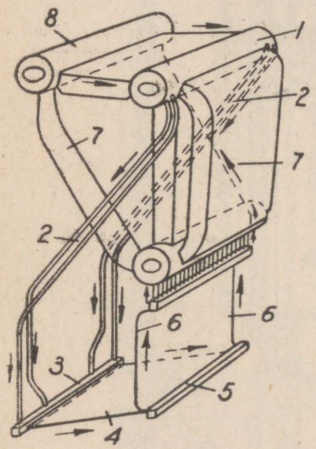
Ekraan tolmuküttega kolletes (joon. 51) koosneb tavaliselt kahest osast: horisontaalsetest torudest *13*, *14* ja vertikaalsetest külgtorudest *11*, *12*. Horisontaalsed torud *13* asetsevad kolde alumises osas, on ette nähtud räbu jahutamiseks ja moodustavad nn. granulaatori. Külgtorud *12* asetsevad kolde seinte ääres ja on nähtud ette viimaste kaitsmiseks kõrgete temperatuuride eest.

Joonisel 51 esitatud katla küttepinnad, peale ekraanide, moodustavad



Joon. 52. Paindüvõlliga käivitatavad freesid katlatorude puhastamiseks katlakivist.

kaks torude kimpu, mis on paigutatud kolme suitsukäiku. Ülemised kaks trumlit 5 ja 6 on peale selle omavahel ühendatud samasugustest torudest torudekimbuga ja mõnede suuremat läbimõõtu omavate auruühendustorudega 3. Auru ja vee segu kõigist kolde ekraanidest, välja arvatud kolde eeskülg, juhitakse tagumisse ülemisse trumlisse 6, et vältida ülemisi trumleid ühendavate veetorude ülekoormust.

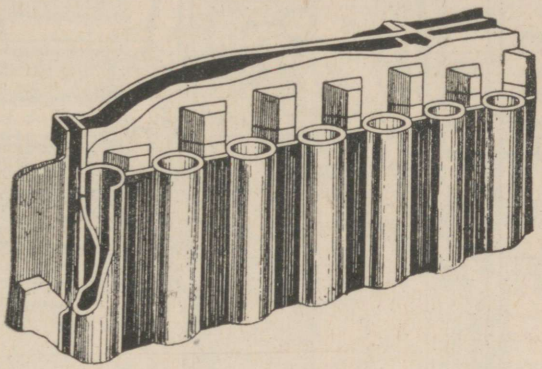


Joon. 53. Ekraani sisselülimise skeem.

Auruülekuumendi on rippuvat tüüpi ja asetseb esimese ning teise suitsukäigu vahel. Aur juhitakse ülekuumendisse aurukogujast 8. Ülekuumenduse temperatuuri reguleerimine teostatakse pinnalise regulaatoriga 15, mis on paigutatud esimesse ülemisse trumlisse. Katla toitmine veega toimub tagumise ülemise trumli kaudu.

Ekraanide tavaline sisselülimise skeem on näidatud joonisel 53. Vesi katla ülemisest tagumisest trumlist *1* voolab torude *2* kaudu granulaatori esimesse kollektorisse *3* ja sealt mööda granulaatori torusid *4* granulaatori tagumisse kollektorisse *5*. Edasi läheb vesi granulaatorist ekraani vertikaaltorudesse *6* ning nendest läheb auru ja vee segu katla esimesse ülemisse trumlisse *8*. Tugevasti räbustavate kütuse sortide põletamisel kasutatakse üleni ekraneerimist pikiribidega torude või katteplaatide abil.

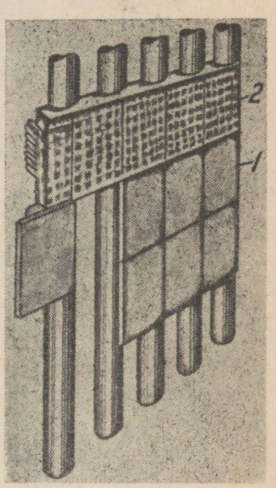
Pikiribidega ekraani torud (joon. 54) on varustatud külgekeevitatud ribidega, mis täidavad vahe kahe naabrustoru vahel; kolle kaetakse sel viisil üleni metallsoomusega. Nende torude abil ekraneerimise puudus seisab temperatuuritingimuste järsus erinevuses ekraani eri kohtades;



Joon. 54. Pikiribidega ekraani torud.

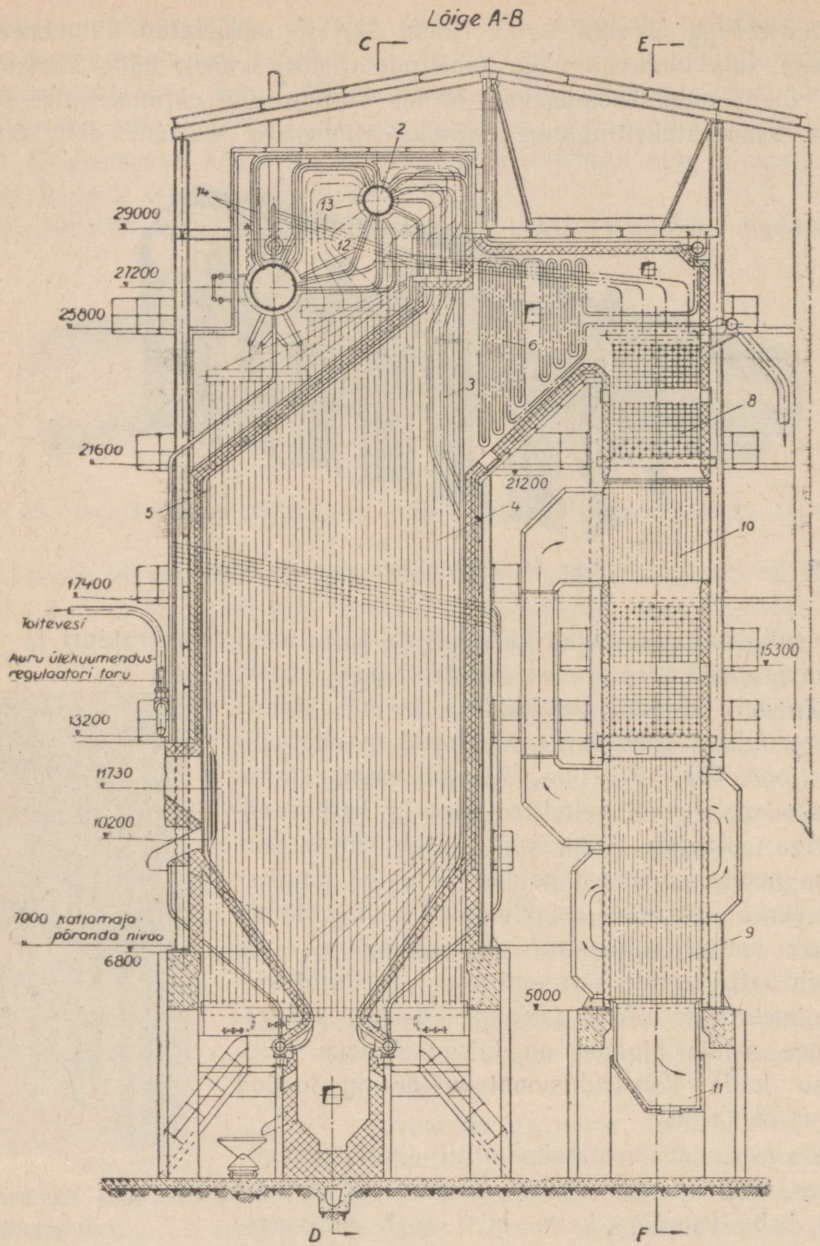
peale selle nad alandavad kohati liiga palju leegi temperatuuri ja võivad põhjustada põlemisprotsessi ebastabiilsust koldes.

Mõnedel juhtudel kasutatakse kollete kinnist ekraneerimist, kattes ekraanide torud malmplaatidega (joon. 55). Plaatide välispind valmistatakse kas siledana *1*, või vahvlitaolisena *2* karborundvoodriga; plaatide tüübi valik sõltub kütuse sordist ja nende asukohast koldes. Plaadid kinnitatakse ekraani torudele eri klambrite abil. Mõnda süsteemi katlad on konstrueeritud selliselt, et kolle asetseb katla torude süsteemi sees. Selliseid katlaid nimetatakse ekraankateldeks; märgatav osa nende pinnast on kiirguspinnaks. Niisuguse katla konstruktsiooni näide on toodud joonisel 56 ja 56-a.

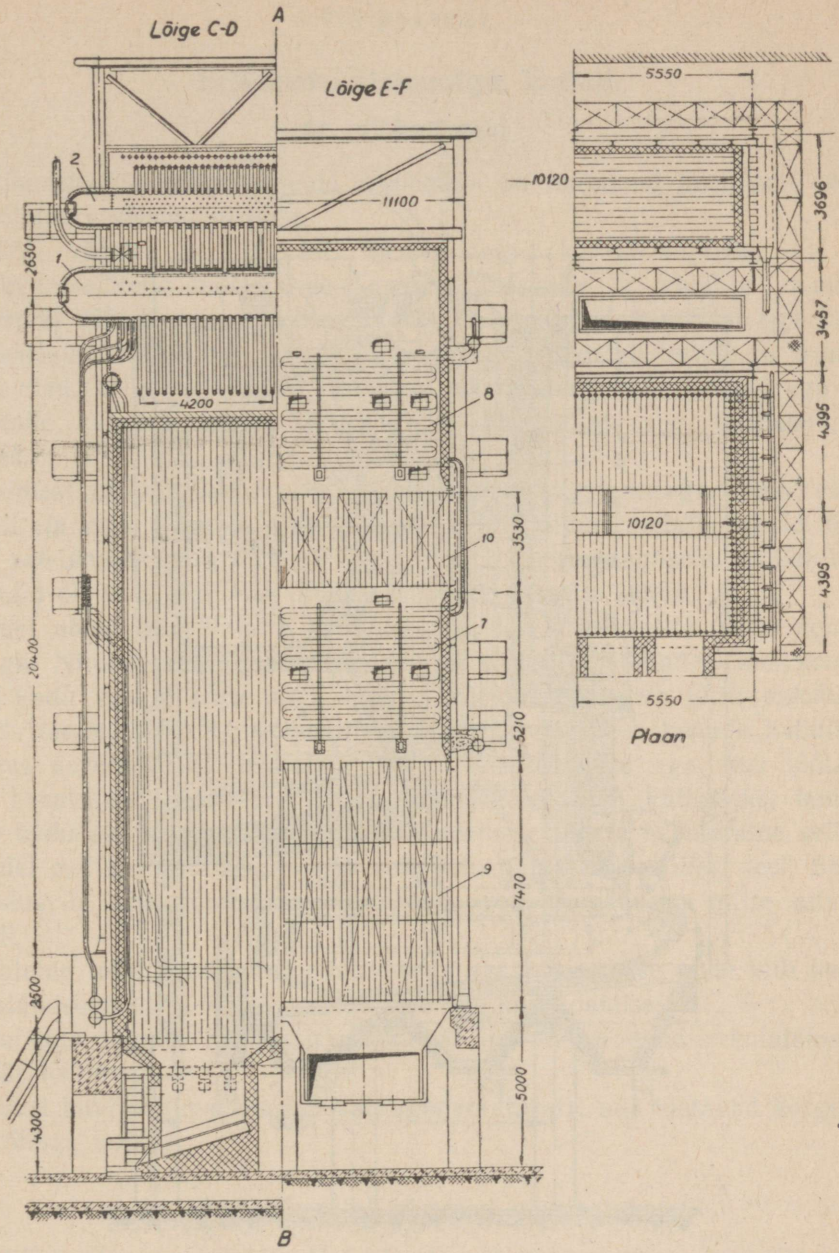


Joon. 55. Ekraani katteplaadid.

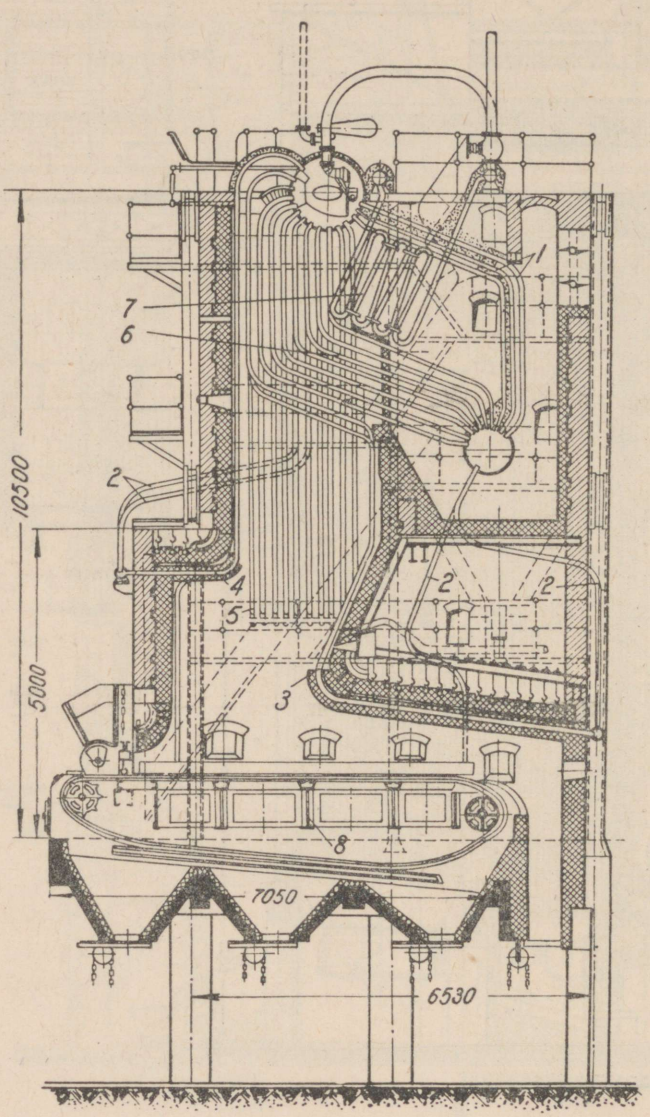
Ekraneerimist kasutatakse mitte ainult kamberkolletes, vaid ka restkolletes. Joonisel 57 on näidatud kahe trumliga katel, mis omab ekraneeritud kollet kettrestiga.



Joon. 56 ja 56-a. Katelagregaat KO-7, $D = 240$ t/h, $p = 100$ atü, $t_{ü} = 500^{0}$ C. Stalini-nim. tehase projekt. *1* — peatrummel; *2* — jaotustrummel; *3* — tagumise ekraani ühendustorud; *4* — külgekraan; *5* — eesseina ekraan; *6* — auruülekuumendi; *7* — veeökono-



maiseri esimene aste; *8* — veeökonomaiseri teine aste; *9* — õhueelsoojendi esimene aste; *10* — õhueelsoojendi teine aste; *11* — tuhakolv; *12* — veetorud; *13* — aurutorud; *14* — aurutorud ülekuumendisse.



Joon. 57. Katelagregaat ПМ Taganrogi tehaselt „Krasnõi kotelštšik" — $D = 16$ t/h. *1* — katla langtorud; *2* — ekraanide toitetorud; *3* — tagumine ekraan; *4* — eesseina ekraan; *5* — külgekraan; *6* — katla veetorud; *7* — ülekuumendi; *8* — kettrest.

Erikonstruktsiooniga katlad.

42. Üldmõisteid.

Erikonstruktsiooniga katelde arenemine on toimunud peamiselt seoses kõrgrõhuauru rakendamisega.

Kõrge rõhuga ja tugevasti forsseeritavad katlad vajavad: 1) eriti kõrgekvaliteediliste materjalide kasutamist torude ja trumlite valmistamiseks; 2) täiesti puhast toitevett, mis ei sisalda ei hapnikku ega katlakivi tekitajaid, kuna hapniku olemasolu vees põhjustab torude ja trumlite korrosiooni, kõige väiksemad katlakivi tekkimised torude seintel aga võivad esile kutsuda nende läbipõlemist; 3) kindlat vee tsirkulatsiooni torudes.

Esimest nõuet täidetakse eri sorti teraste kasutamisega. Püüe säästa metalli, ja eriti trumlite valmistamiseks ettenähtud metalli, viisid trumliteta katelde ehk nn. *otsevoolukatelde* kujundamisele, millise tüübi parimaid on prof. Ramzini tüüpi nõukogude otsevoolukatel.

Teist nõuet on võimalik täita sel teel, kui toita katelt puhta kondensaadiga. Niinimetatud kondensatsiooniga elektrijõujaamades, kus kondensaadi kadu vee ja auru mitmesuguste kõrvalesattumiste tõttu moodustab 2—4%, on otstarbekohane destilleerida vett, mis läheb kadude katmiseks, erilistes aurutusseadmetes. Soojuselektritsentraalides aga, kus töötanud auru kasutatakse tehnoloogilisteks eesmärkideks või kütmiseks, kondensaadi kadu on tavaliselt üsna suur. Aurutusseadmete kasutamine sellistel juhtudel osutub mittetasuvaks ja vett puhastatakse keemilisel teel. Selline puhastusviis aga võimaldab valmistada vett karedusega mitte alla 0,5 kraadi.

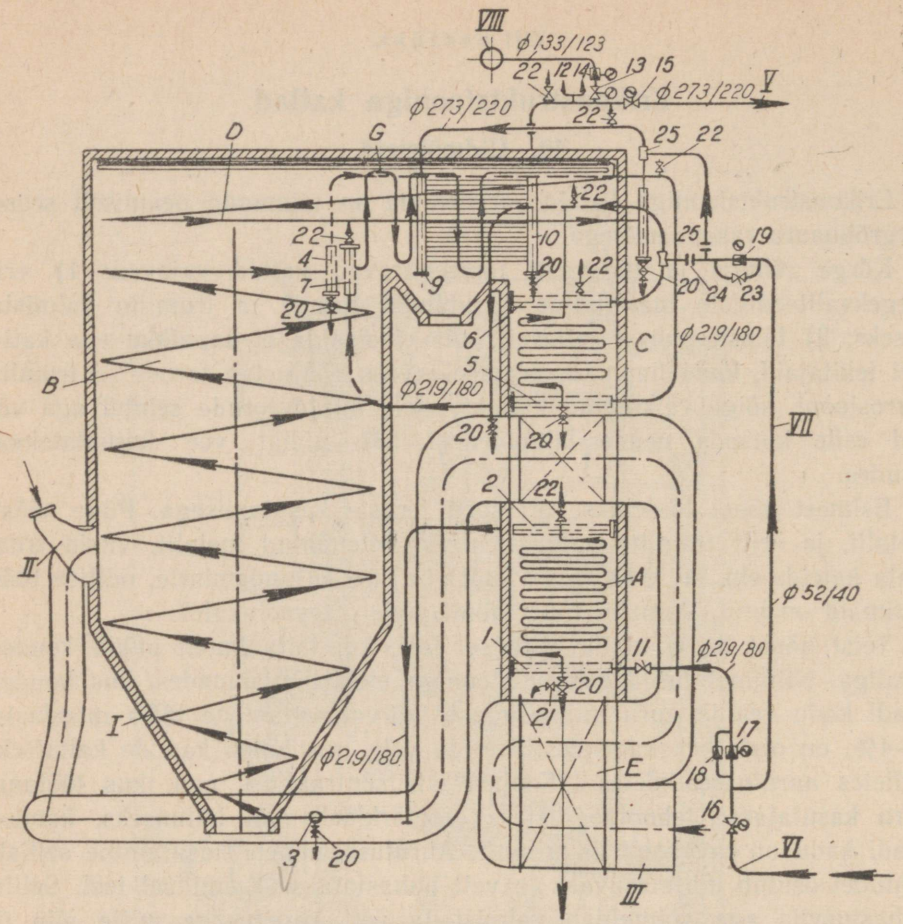
Katelde toitmiseks võrdlemisi kareda vee kasutamise püüe viib kaudse aurustamisega katelde erikonstruktsioonide kujundamisele.

Vajadus tagada head tsirkulatsiooni on viinud sundtsirkulatsiooniga katelde loomisele.

Suurt huvi pakuvad katlad (aurugeneraatorid), mis töötavad kõrgendatud rõhuga koldes.

43. Prof. Ramzini süsteemi otsevoolukatel.

NSV Liidus on laialdaselt levinud prof. Ramzini süsteemi otsevoolukatlad, mis on ehitatud rõhule 35 kuni 140 atü. Skeem ühest sellisest katlast, mis töötab rõhuga 100 atü ja ülekuumendustemperatuuriga 495° C, on toodud joonisel 58. Katelseadme üldvaade on toodud joonisel 59.



Joon. 58. Ramzini otsevoolukatla 51 СП220/100 skeem (tootmisjõudlus 220 t/h, aururõhk 100 atü). *A* — katla toitevee ökonomaiser; *B* — katlaagregaadi kiirgusosa; *C* — katlaagregaadi konvektiivne osa (ülemineku-tsoon); *D* — kiirgusülekuumendi; *G* — konvektsioon-ülekuumendi (vt. joon. 59); *F* — õhu eelsoojendi esimene aste; *E* — õhu eelsoojendi teine aste (vt. joon. 59); I — kolde ekraneeritud lehtri osa; II — söetolmupõletid; III — õhu vool eelsoojendisse; V — ülekuumendatud auru magistraaljuhe masinasaali; VI — katla toitevee juhe; VII — veejuhe ülekuumendatud auru temperatuuri reguleerimiseks; VIII — sisseküttе separaator; *1* ja *2* — ökonomaiseri sisse- ja väljavoolu kollektorid; *3* — vee sissevoolu kollektor katelagregaadi kiirgusosale; *4* — katelagregaadi kiirgusosast niiske auru väljavoolu kollektor; *5* ja *6* — katelagregaadi konvektiivse osa (*C*) sisse- ja väljavoolu kollektorid; *7* — kiirgusülekuumendi sissevoolu kollektor; *8* — kiirgusülekuumendi väljavoolu kollektor (joonisel nummerdamata); *9* ja *10* — konvektsioon-ülekuumendi sisse- ja väljavoolu kollektorid; *11* — tõkkeventiil; *12* — impulsiivne kaitseventiil; *13* — sulgventiil; *14* — muljumisventiil; *15, 16, 17, 18, 19* — reguleerivad sulgventiilid; *20* — väljalaskeventiilid; *21* — sulgventiil; *22* — õhuventiilid; *23* — reguleeriv sulgventiil; *24* — muljumisseib; *25* — veepihusti ülekuumendus-temperatuuri reguleerimiseks.

Katel töötab järgmiselt: toitevesi antakse toru VI kaudu veeökonomaiserisse *A*; sealt mööda ühendustoru saabub soojendatud vesi katla kiirgamisosa sissemineku-kollektorisse *3*, läbib spiraaltorustiku ja väljub kollektorisse *4*. Katla kiirgamisosa torustikes toimub kõigepealt vee soojendamine kuni keemistemperatuurini ja seejärel aurustamine, kusjuures vee aurustamist ei viida lõpuni selleks, et vees leiduvad soolad ei sadestuks katlakivi näol torustiku sisemistele seintele. Ülemineku-tsoon tekkinud auru ja vee segu täielikuks aurustamiseks on viidud välja erilisse kuumendustorustikku *C*, mis asetseb gaaside vooluses ülekuumendi taga, kus gaaside temperatuur ei ole suhteliselt kuigi kõrge — umbes 600—700° C. Selleks juhitakse niiske aur kollektorist *4* üleminekutsooni soojendustorustiku *C* kaudu väljumiskollektorisse *6*, ja auruülekuumendi soojendustorustiku *D* ja *G* kaudu ülekuumendi väljumiskollektorisse *10*, viimasest aga lõpuks toru V kaudu turbiini.

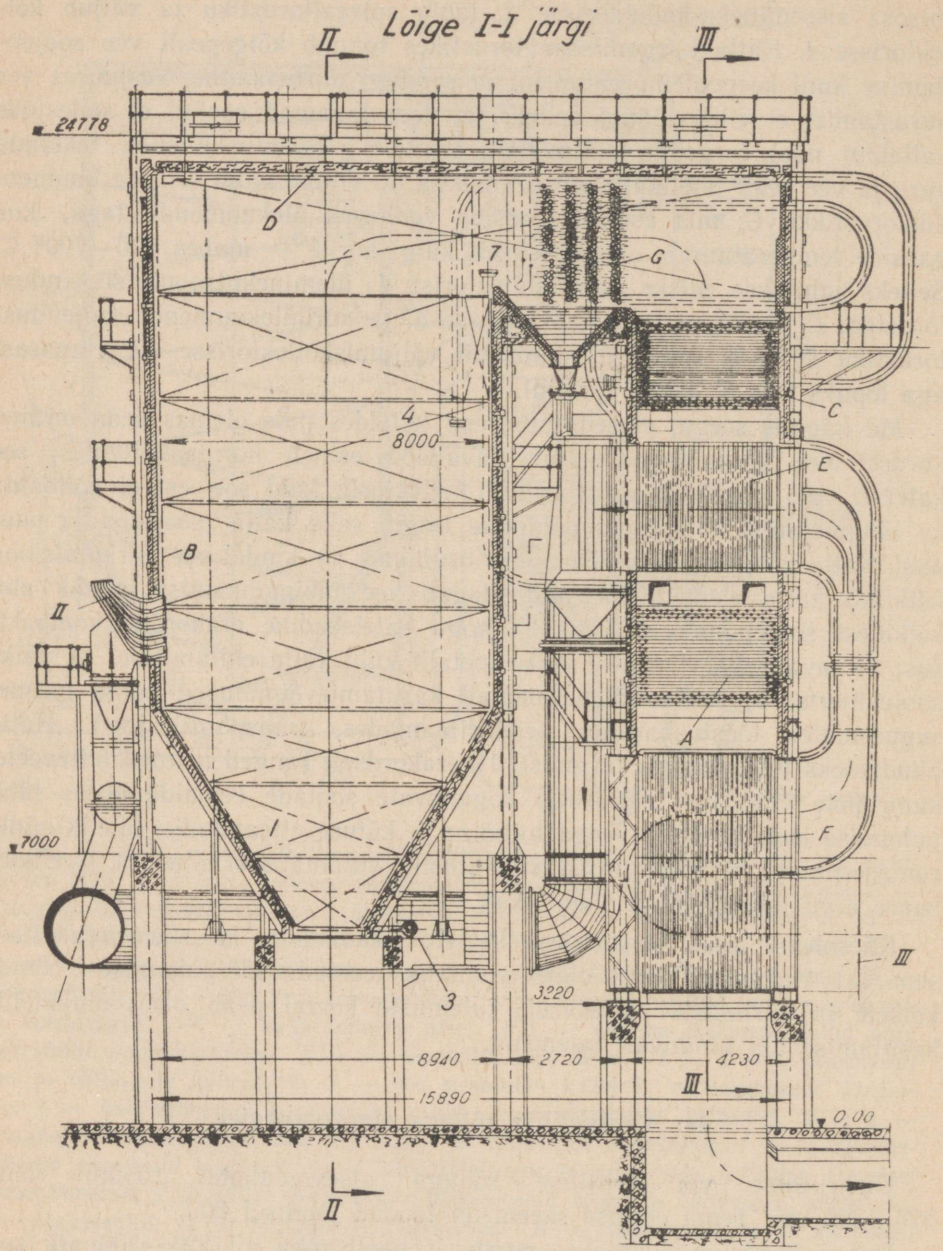
Me nägime seega, et seda süsteemi kateldes pole olemas seda mitmekordset vee tsirkulatsiooni, mis tavaliselt esineb normaalkateldes; see katel ei vaja järelikult suurt trumlit-kollektorit, kuid see-eest ei võimalda ka läbipuhumist. Otsevoolu põhimõte tingib selle katla paremusi ja puudusi. Katla põhimisteks paremusteks osutuvad: 1) kindel vee tsirkulatsioon kõikides katla elementides, mida tagab vee läbipumpamist pumba abil kõikidest soojendustorustikest; 2) kogu katelseadme erakordne kompaktsus; 3) tavalisega võrreldes väike metalli kulu katla ehitamisele; 4) väike soojusinerts; 5) katla kõige laiemad kasutamisvõimalused kõige mitmesugusemates tööstusharudes (elektrijaamades, transpordil jne.). Katla puudusteks tuleb lugeda järgmisi: 1) erakordselt ranged nõuded toiteveele, kuna pole võimalust katlavette kogunevate soolade eemaldamiseks läbipuhumise teel; 2) katla veega toitmise ja kütuse etteandmise täielik sünkroniseerimine; 3) kogu protsessi ulatuslik automatiseerimine ja järelikult suure arvu mõõteriistade vajalikkus.

Käesoleval ajal teostatakse katseid seadistada ka otsevoolukatlaid separaatoritega, milledest oleks võimalik teostada läbipuhumist. Nende katsete ja uurimuste positiivsete tulemuste korral peab otsevoolukatelde kasutamise ala tunduvalt laienema.

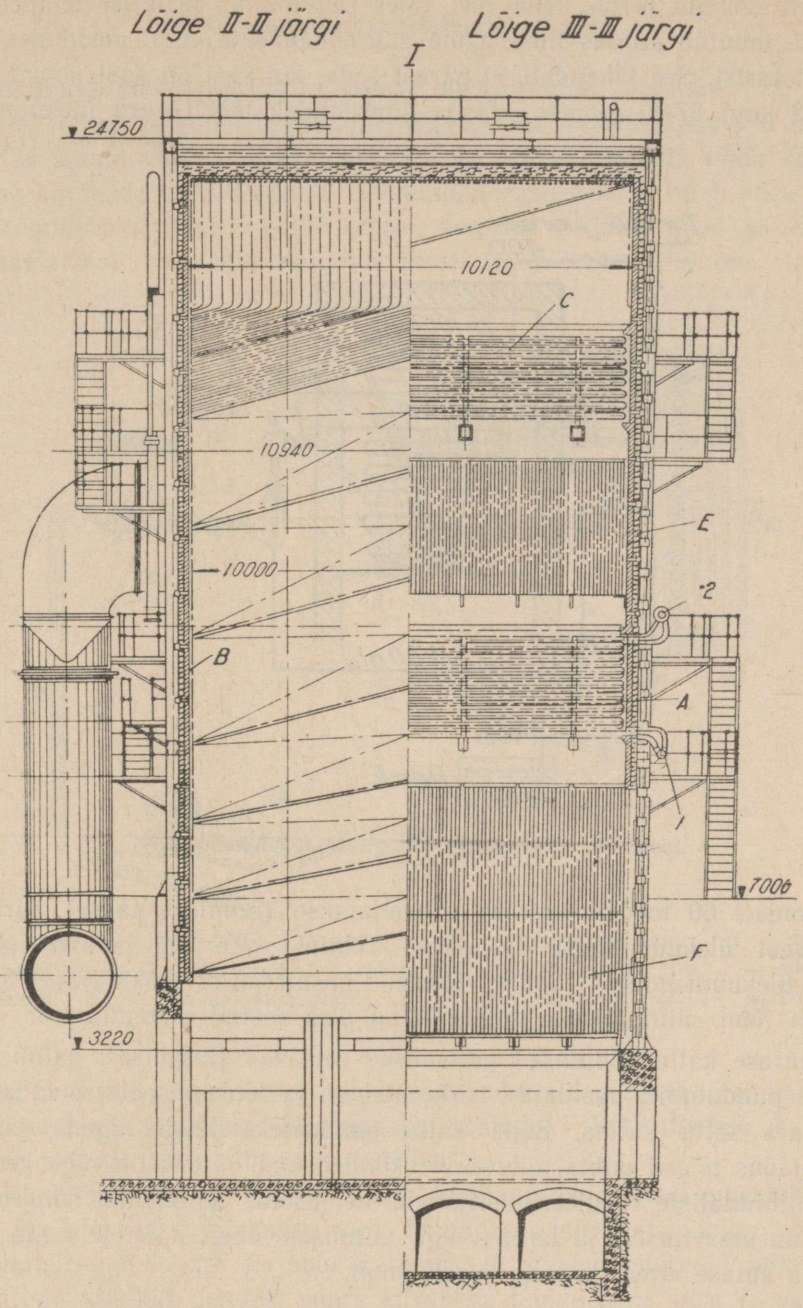
44. Ülekriitilise rõhuga otsevoolukatel.

Ülekriitilise või kriitilise rõhuga otsevoolukatel töötab rõhul 225—300 atü. Tema ehituse skeem on toodud joonisel 60.

Puhas kondensaat antakse pumba *1* poolt rõhu all 225—300 atü spiraaltorustikku *2*, mille alguses toimub vee soojenemine. Kuid, nagu teada,

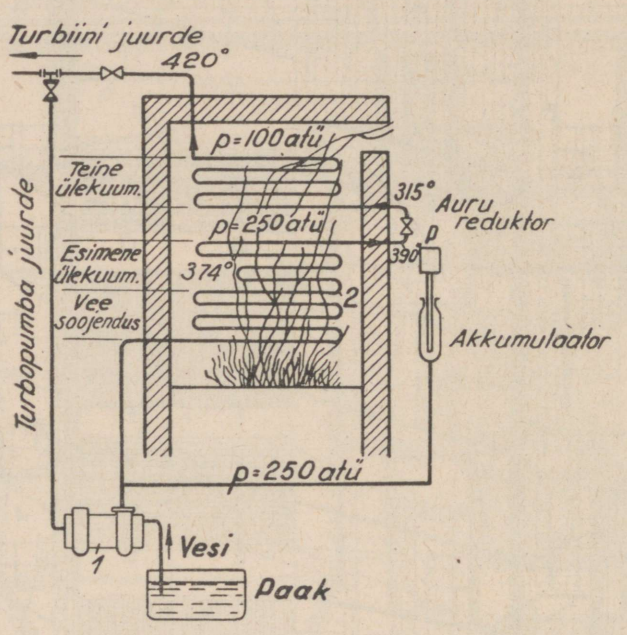


Joon. 59 ja 59-a. Ramzini otsevoolukatla 51 СП220/100



üldvaade. Tähistused vt. joon. 58.

rõhu all 225 atü ja üle selle vesi, olles saavutanud kriitilise temperatuuri 374° C, muutub auruks ilma mahu suurendamiseta, s. t. möödudes aurutusprotsessist. See tähendab, et pärast seda, kui vesi on soojenenud torustikus 2 kuni 374°, soojuse edasine juurdetulek läheb auru ülekuumendamisele.



Joon. 60. Ülekriitilise rõhuga otsevoolukatla skeem.

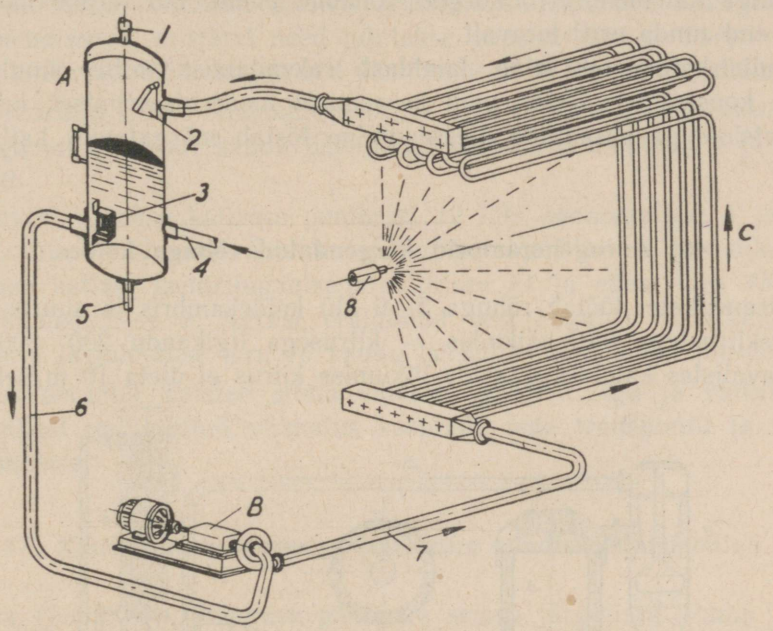
Joonisel 60 toodud skeemil vähendatakse (redutseeritakse) auru rõhk esimesest ülekuumendist väljumisel rõhuni ~100 atü ja siis juhitakse teise ülekuumendisse. Sellist skeemi kasutatakse töökindluse huvides. Püsiva rõhu säilitamiseks toiteliinil on üles seatud akumulaator.

Säärase katla põhimised paremused seisavad järgmises: kallihinnalise trumli puudumine, usaldatav tsirkulatsioon ja lõhkemisohutus väikese vee tagavara tõttu katlas. Selle katla puudusteks tuleb lugeda järgmisi: a) vajadus täiesti puhta toitevee — kondensaadi järele; b) väga keeruliste ja kallihinnaliste reguleerimisriistade olemasolu; c) täieliku sünkroonsuse nõue aurutarvitusele ja katla veega toitmisele ühelt poolt ja katla toitmisele ja kütuse etteandmisele teiselt poolt.

45. Sundtsirkulatsiooniga katel.

Sundtsirkulatsiooniga katla skeem on kujutatud joon. 61.

Katel töötab järgmiselt. Trummel-kollektorist *A* võttab pump *B* imemistorustiku kaudu vett ja surub selle läbi soojendustorude *C*, mida kuumendatakse kuumade gaaside poolt. Soojendustorustikkudest tuleb auru ja vee segu (emulsioon) tagasi kollektorisse, kus aur eraldub veest ja suundub aurumagistraali, vesi aga suundub uuesti imemistorustikku jne.



Joon. 61. Sundtsirkulatsiooniga katla skeem. *A* — trummel-kollektor; *B* — tsirkulatsioonipump; *C* — soojendustorud. *1* — aurumagistraal; *2* — põrkekilp; *3* — sõel; *4* — toitetorustik; *5* — läbipuhumistorustik; *6* — imemistorustik; *7* — survetorustik; *8* — põleti.

Vee ühtlaseks jaotamiseks soojendustorudesse kasutatakse erilisi seibe, mis asetsevad torudesse sissemineku kohtadel. Kollektorisse *A* saabub tavalise toitepumba poolt antav toitevesi.

Tsirkulatsioonipump osutub seega katelagregaadi lisaelemendiks, mis tagab vee efektiivset tsirkulatsiooni. Loomuliku tsirkulatsiooniga võrreldes on sundtsirkulatsioonil see suur paremus, et soojendustorusid jahutatakse tõhusalt ja kindlalt nendest suure kiirusega läbivoolava auru ja vee segu poolt ja nad võimaldavad seetõttu suurt auru tootlikkust — kuni 350 kg/m²h. Peale selle, kuna segu voolab torudest läbi suure kiirusega,

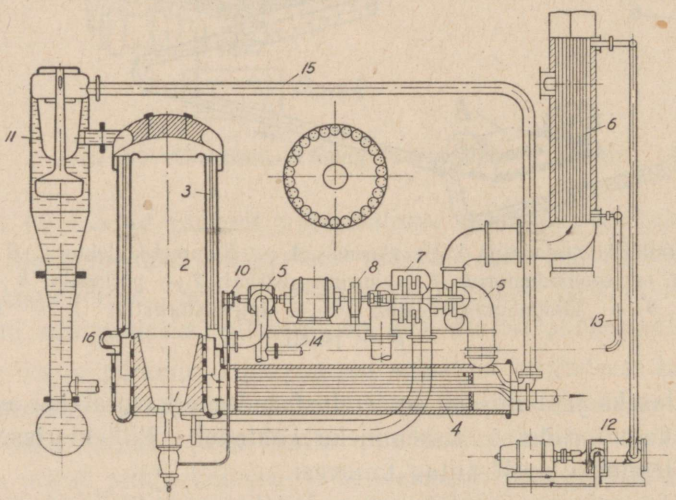
siis nad võrdlemisi vähe mustuvad mitmesuguste sadestiste poolt ja seetõttu need katlad on vähem tundlikud toitevee kvaliteedile kui loomuliku tsirkulatsiooniga katlad. Sundtsirkulatsiooni puhul on võimalik kasutada väikese läbimõõduga torusid, milledel hüdrauliline takistus on märksa suurem kui suure läbimõõduga torudel. Väiksema läbimõõduga torud muudavad katla kompaktsemaks, kuna gaasidelt torule soojuse üleande tegur suureneb toru läbimõõdu vähenemisega.

Kõik loeteldud paremused sunnivad pöörama tähelepanu sundtsirkulatsiooniga kateldele, eriti kõrgete rõhkude puhul, kui torude mustumine annab end tunda eriti teravalt.

Sundtsirkulatsioon leiab laialdast rakendamist mitte ainult uutes katelde konstruktsioonides, vaid ka vanade moderniseerimisel, kus sundtsirkulatsiooniga ekraanide ülesseadmine tõstab märgatavalt katla võimsust.

46. Aurugeneraatorid kõrgendatud rõhuga koldes.

Säärane katel töötab rõhuga 5—6 atü koldekambris ja suurte gaaside liikumiskiirustega katlakäikudes — kiirusega ligikaudu 200—300 m/sek, kuna tavalistes kateldes gaaside liikumise kiirus ei ületa 10 m/sek.



Joon. 62. Aurugeneraator kõrgendatud rõhuga koldes.

Kõrgendatud rõhk koldekambris, suurendades põlemisreaktsiooni kiirust ja vähendades gaaside mahtu, annab võimaluse märgatavalt suurendada kolderuumi soojuslikku erikoormust. Gaaside suured kiirused katla-

käikudes kõrge rõhumise puhul tagavad suurt soojuse üleande tegurit ja järelikult vähendavad märgatavalt katla küttepinda.

Selliste töötingimuste puhul vähenevad katla gabariidid ja kaal märgatavalt.

Aurugeneraatori skeem koos kõikide abiseadmetega on toodud joonisel 62. Katelt köetakse naftaga, mida antakse põleti *1* kaudu koldekambrisse *2*, kus hoitakse rõhk 5—6 atü.

Koldekambri erikoormus on 10^7 kcal/m³h. Koldekambrist suunduvad gaasid kiirusega mitusada meetrit sekundis suitsutorude *3* kaudu auruülekuumendisse *4*, misjärel need juhitakse gaasiturbiini *5*. Turbiinist väljumisel lahkuvad töötanud gaasid ökonomaiseri *6* kaudu välisõhku.

Gaasiturbiin käitab õhukompressorit *7*, mis surub õhku koldesse. Gaasiturbiiniga on reduktori kaudu ühendatud tsirkulatsioonipump *9* ja kütusepump *10*.

Toitevesi antakse katlasse pumbaga *12* läbi ökonomaiseri *6* ja torustiku *13*, mis on ühendatud tsirkulatsioonipumba *9* imemistorustikuga *14*. Aur läheb katlast tsentrifugaalseparaatorisse *11* ja edasi toru *15* kaudu auruülekuumendisse *4*. Aurust eraldunud vesi koguneb separaatori alumisse ossa ja juhitakse toru *16* kaudu tsirkulatsioonipumba juurde.

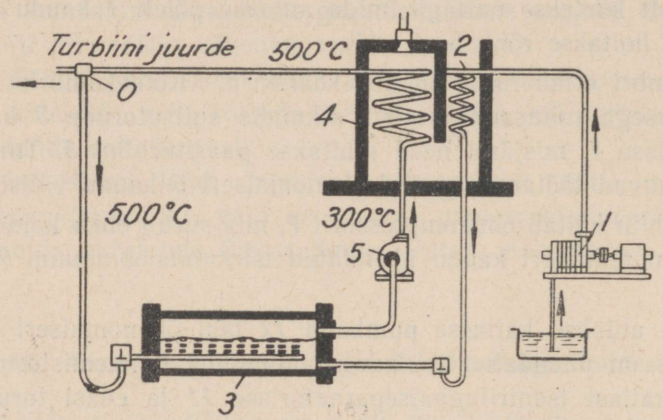
Aurugeneraator paistab silma väikeste gabariitidega ja väikese kaaluga, millest on tingitud võimalus kasutada teda transpordil ja muudes eritingimustes.

47. Kaudse aurustamisega katel auru sundtsirkulatsiooniga.

Katla (joon. 63) töötamise põhimõte seisab järgmises. Pump *1* pumpab vett läbi ökonomaiseri *2*, kus ta temperatuur jääb umbes 30° võrra allapoole keemistemperatuuri, trumlisse-umformerisse *3*, milles toimub vee soojendamine kuni keemistemperatuurini ja aurustumine auru ülekuumendussoojuse arvel, mis saabub trumlisse ülekuumendist *4*. Trumlis tekkinud küllastunud aur surutakse turbopumba *5* poolt läbi auruülekuumendi *4*, kus ta kuumeneb kuni tarbijale vajaliku temperatuurini (skeemil näidatud 500°). Auru väljumisel ülekuumendist jaguneb ta kahele poole: väiksem osa suundub turbiini; suurem osa aga läheb trumlisse-umformerisse küllastunud auru tekitamiseks. Trummel-umformer, milles toimub aurustumine, asetseb väljaspool tuliste gaaside mõjupiirkonda. Katlakivi tekkimine temas pole mitte ainult kahjulik, vaid isegi teataval määral kasulik, kuna katlakivi kiht seintel kujutab endast isolatsioonikihti, mis vähendab soojuse kadusid ümbruskonda. Kuumade gaaside poolt uhutavates torudes

aga katlakivi tekkimist ei tohi olla, sest et ökonomaiseris toimub vee soojendamine, ülekuumendis aga auru ülekuumendamine.

Praktika on aga ometi näidanud, et soolade kaasaviimine trumlist auruülekuumendisse on tavaliselt sedavõrd suur, et pole võimalik toita katelt puhastamata veega.



Joon. 63. Kaudse aurustamisega katla skeem.

Kirjeldatud katelt on võimalik kasutada ainult suurte rõhkude jaoks (mitte alla 75 atü). Madalamatel rõhkudel, seoses küllastunud auru erimahu suurenemisega, energia kulu turbopumbale auru ümberpumpamiseks muutub niivõrd suureks, et see katel pole enam võistlusvõimeline teiste katlatüüpidega.

Katla põhimised puudused seisavad ta kõrges hinnas (trumlid, armatuur, pump, auruülekuumendi suur pind) ja märgatavas energia kulutuses auru ümberpumpamiseks. Need puudused piiravad väga suurel määral auru sundtsirkulatsiooniga katelde arenemise perspektiive.

IX peatükk.

Auruülekuumendid.

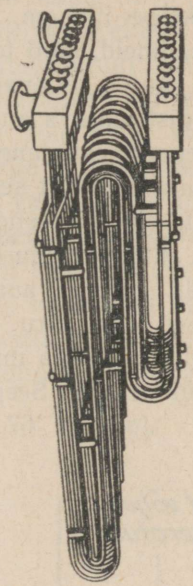
48. Auruülekuumendi otstarve ja ta ehitus.

Auruülekuumendit kasutatakse katlast saadava auru kuivatamiseks, peamiselt aga ta ülekuumendamiseks. Ülekuumendi koosneb tavaliselt painutatud torude süsteemist, mis on ühendatud üheks tervikuks kollektorite (kambrite) abil. Ülekuumendi monteeritakse tavaliselt katlaga ühi-

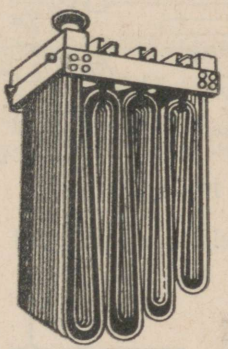
sesse müüritisse, kusjuures kuumendustorud asetatakse kas horisontaalselt või vertikaalselt (joon. 64 ja 65).

Aur juhitakse ülekuumendi kollektorisse kas katla trumlist või aurukogujast, ta läbib torud, ülekuumeneb neis ja väljub siis teise kollektorisse. Ülekuumendamiseks tarvilik soojus võetakse kuumadelt suitsugaasidelt.

Asetsemiskoha järgi jagunevad ülekuumendid kiirgamis- ja konvektsiooni-ülekuumenditeks. Kiirgamisülekuumendid asetsevad kol-



Joon. 64. Horisontaaltorudega auruülekuumendi.



Joon. 65. Püsttorudega auruülekuumendi.

des ja soojus kandub üle gaasidelt auruülekuumendi seintele peamiselt kiirgamisega. Konvektsiooni-ülekuumendid asetsevad esimese katlakäigu järel ja nendes teostub soojuse ülekandumine gaasidelt peamiselt kokkupuutumisega.

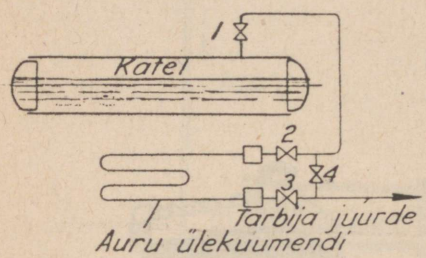
Kiirgamisülekuumendeid kasutatakse peamiselt kõrgendatud ja kõrgrõhkude puhul, millal nii või teisiti ei saa vältida erimaterjalide kasutamist ja hõlbustub soojuse ülekandumine seinalt aurule auru suure tiheduse tõttu.

Soojuse ülekandumise parandamise eesmärgil valitakse auru kiirus ülekuumendi torudes tavaliselt küllalt suur, ligikaudu 15—25 m/sek, kiirgamisülekuumendites aga kuni 30 m/sek. Auru suure kiiruse puhul mustuvad torud vähem, kuid seejuures suureneb rõhu kadu ülekuumendis (kuni 1,5—2 at).

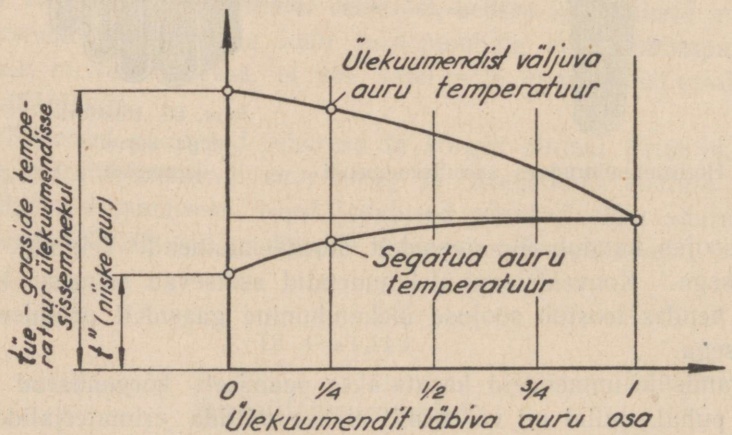
49. Ülekuumendustemperatuuri reguleerimine.

Käesoleval ajal on olemas mitu viisi auru ülekuumendustemperatuuri reguleerimiseks; neist tähtsamad on kirjeldatud allpool.

Ülekuumendatud auru segamine küllastunud auruga. Ülekuumenduse reguleerimise skeem sellel viisil on näidatud joonisel 66. Tarbijale (masinasse) suunduva auru temperatuuri alandamiseks lastakse osa auru katla trumlist tarbija torustikku möödudes auruülekuumendist, kõrvalühenduse kaudu, avades selleks ventiili *4*. See viis on kõige lihtsam, kuna ta ei nõua lisaseadmeid, kuid teda on vaja kasutada suure ettevaatlikkusega. Ülekuumendist väljuva auru temperatuuri tähelepandavat alanemist on võimalik saavutada ainult sel juhul, kui juurde lasta kõrvalühenduse kaudu palju auru, kuid seejuures väheneb ülekuumendit läbiva auru hulk ja järelikult see osa auru kuumendub tugevasti üle, mis võib muutuda ohtlikuks ülekuumendile. Seepärast tuleb kasutada sellist viisi ainult äärmistel juhtudel. Joonisel 67 on toodud



Joon. 66. Skeem ülekuumendatud auru temperatuuri reguleerimiseks niiske auru juurdesegamisega.



Joon. 67. Segamisprintsiibil reguleeritava ülekuumendatud ja segatud auru temperatuuri kõverad.

auru temperatuuri kõverad ülekuumendi järel ja tarbijale suunduvas torustikus, sõltuvalt auru osast, mis läbib auruülekuumendit.

Auru ülekuumenduse reguleerimine vee (kondensaadi) sisseprits imisega. Küllastunud aurusse, mis saabub ülekuumendisse, või sellest väljuvasse

ülekuumendatud aurusse, pritsitakse vett. Esimesel juhul on võimalik auruülekuumendi torude mustumine katlakiviga, teisel juhul võib masinasse koos auruga sattuda ka vesi; peale selle on mõlemal juhul raske saavutada head automaatset reguleerimist. Seepärast see reguleerimisviis pole leidnud laialdast levikut.

Ülekuumenduse reguleerimine auruülekuumendi ees asuva gaasisiibri avamise määraga. Gaasisiiber võimaldab muuta auruülekuumendit läbivate gaaside hulka, mistõttu muutub gaaside poolt ülekuumendile üleantav soojuse hulk ja järelikult muutub ka ülekuumendustemperatuur. See viis on rakendatav ainult väiksemates kateldes mittekõrge auru ülekuumendusega, kuna siiber neil ei ole suur ja asetseb tsoonis, kus suitsugaaside temperatuur pole kõrge (tavaliselt mitte üle 650° C). Suurtes kateldes ja gaaside kõrge temperatuuri puhul enne ülekuumendit ei kasutata gaasisiibrit selle ebakindluse tõttu.

Ülekuumenduse reguleerimine pindjahutusega. Ülekuumendatud aur lastakse läbi torude, mida jahutatakse väljast veega. Auru jahutamine võib toimuda kas väljaspool katelt asuvates eri jahutites või siis torudes, mis asetsevad katla trumli sees. See viis on kõige kallim, kuna ta vajab lisaseadmeid, kuid ta on kõige töökindlam.

X peatükk.

Eelsoojendid.

50. Veeökonomaiserid.

Veeökonomaiserid on ette nähtud katlasse pumbatava vee soojendamiseks. Nad jagunevad siledatorulisteks ja ribidega ökonomaiseriteks. Neid valmistatakse malmist ja terasest.

Joonisel 68 on kujutatud siledatoruline malmist ökonomaiser. Ökonomaiser koosneb kahekümne neljast reast siledatest vertikaaltorudest *1*, mis ülal ja all on ühenduses malmkarpidega *2*. Torude rida koos ülemise ja alumise karbiga moodustab ühe elemendi. Teatud arv elemente (antud süsteemis 12 elementi) ühendatakse omavahel sektsiooniks; ühendamiseks on all kollektor *3*, ülal aga kollektor *4*. Torud on varustatud kraapidega *5*, mis üles ja alla liikudes puhastavad torude soojenduspinda tuhast ja tahmast.

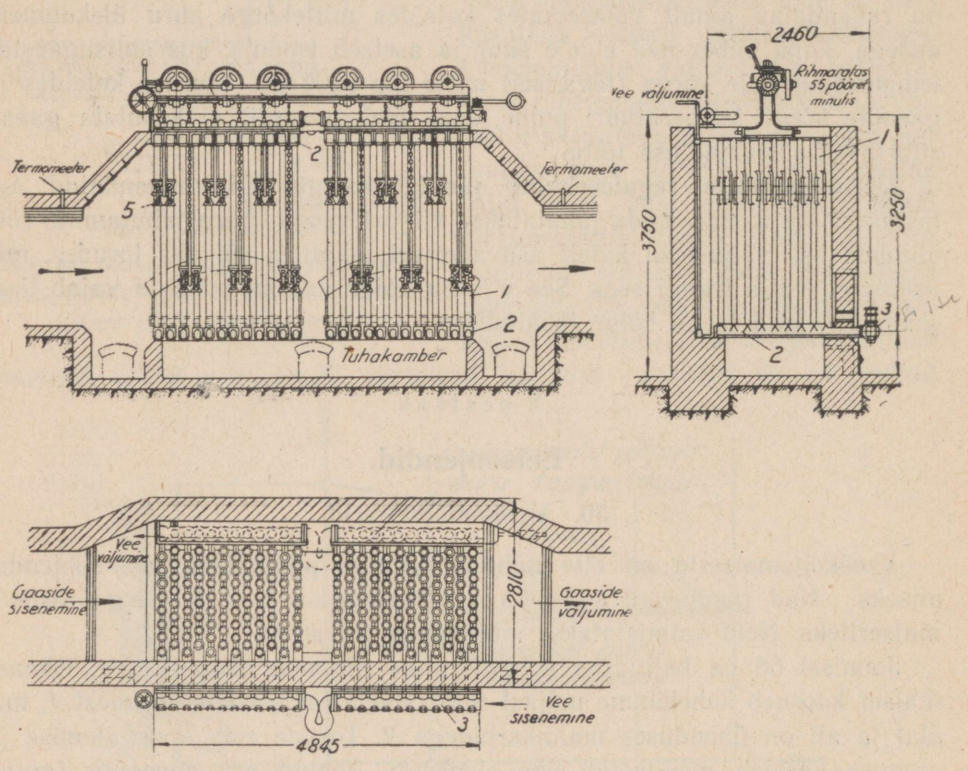
Vesi saabub alumisse kollektorisse *3* ja jaguneb sealt kõikidesse karpidesse *2*, voolab nendest mööda torusid *1* ülemistesse karpidesse *2* ja kollektorisse *4*, kust suundub edasi katlasse.

Väljastpoolt uhuvad torusid suitsugaasid. Soojuse ülekandumise parendamiseks asetsevad torud malekorras. Ökonomaiseri torude läbimõõt

on 100 mm, iga toru pikkus 2,7 m kuni 4 m. Ühe toru soojenduspind, kui ta pikkuseks on 2,7 m, on 1 m².

Eelkäsiteldud süsteemi ökonomaiseris hoitakse soojenduspind kraapide olemasolu tõttu töötamise ajal puhtana ja järelikult kasutatakse ära efektiivselt lahkuvate gaaside soojus. See on antud konstruktsiooni paremuseks. Malmist ökonomaiseri puudusteks aga tuleb lugeda ta kogukust, kõrget hinda ja piiratud töörõhu suurust (kuni 22 atü).

Seda liiki ökonomaiserit võib kasutada kütuse põletamisel, mis sisaldab suurel määral lendtuhka.

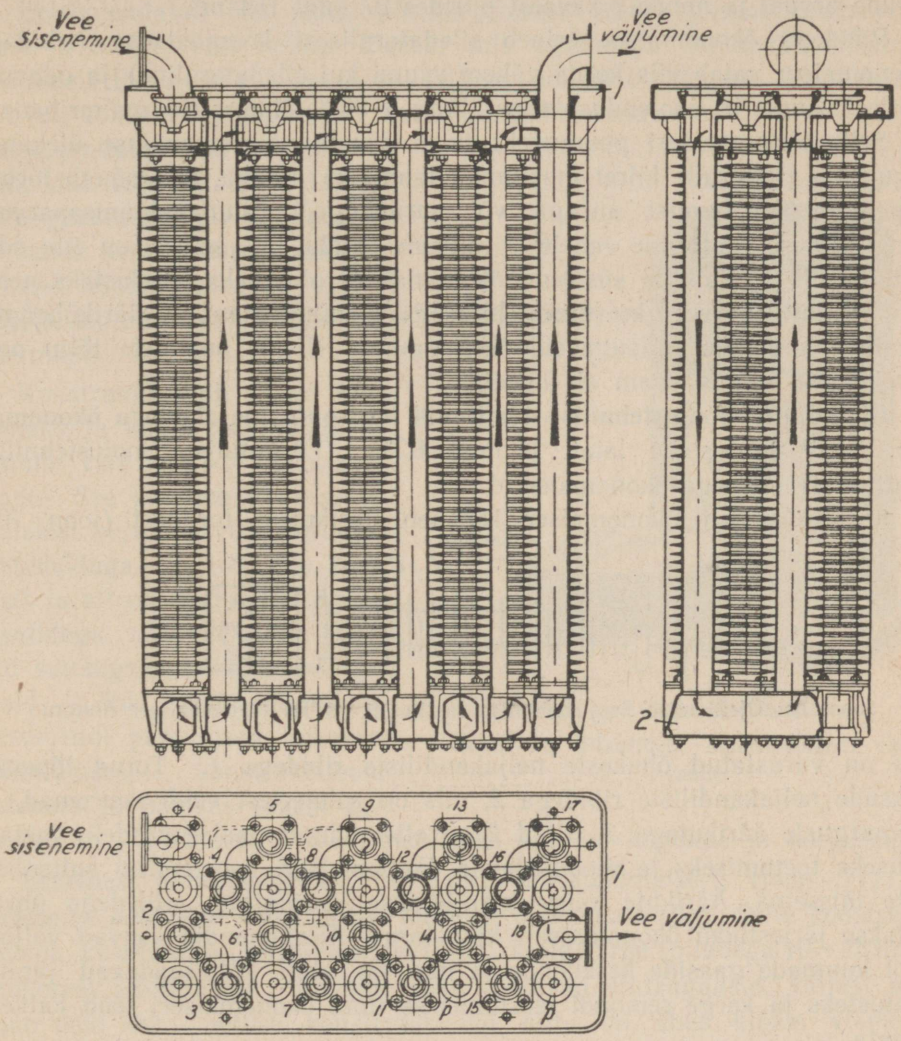


Joon. 68. Siledatoruline malmist ökonomaiser.

Siledatorulised terasökonomaiserid. Tõstetud ja kõrgete rõhkude jaoks ettenähtud suurtes katelseadmetes kasutatakse terasökonomaisereid, mis on koostatud samasugustest elementidest, nagu aurukatladki. Terasökonomaiserisse saabuv toitevesi peab olema vabastatud temas lahustunud õhust, kuna vees lahustunud hapniku toimel terastorud korrodeeruvad tugevasti.

Viimasel ajal on suuresti levinud teras-siugtorudest ökonomaiserid,

milliseid kasutatakse kõrgendatud ja kõrge rõhuga kateldes. Siugtorudega ökonomaiserite ülesseadmisel puhastatakse toitevesi eelnevalt hoolikalt, selleks et eemaldada veest katlakivi tekitajaid aineid ja lahustunud gaase. Niisuguseid ökonomaisereid kasutatakse Ramzini jt. kateldes.



Joon. 69. Malmökonomaiser ribitatud püsttorudega.

Vertikaalsete ribitorudega malmökonomaiser. Vanades katelseadmetes oli laialt levinud Kablitzi süsteemi ökonomaiser (joon. 69). See koosneb üksikutest ribitorudest, mis ülalt on ühendatud üldise plaadiga *1*, alt aga

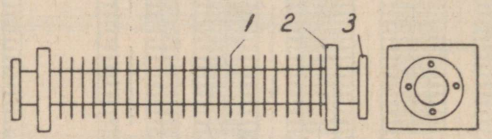
on paariviisi ühendatud karpidega *2*. Plaadis *1* on augud selleks, et omavahel järjestikku ühendada ökonomaiseri torusid. Vesi läbib torusid nii, nagu on näidatud joonisel 69. Üks plaat koos tema külge ühendatud torudega moodustab elemendi. Ühe elemendi soojenduspind kõigub sõltuvalt torude arvust ja nende pikkusest piirides 27 kuni 154 m².

Ribidega ökonomaiser erineb siledatorulisest kompaktsuse (ribidega ökonomaiser vajab viis korda vähem ruumi kui siledatoruline) ja odavuse poolest, kuna ta soojenduspinnast langeb 90% õhukestele malmribadele.

Selle ökonomaiseri puudusteks tuleb arvata väikest soojuse ülekande tegurit ja ribitorude kiiret mustumist tahma ja tuhaga, mis nõuab torude sagedast ülepuhumist auruga või suruõhuga. Tahmapuhumisaparaadi torud viiakse ribitorude vahele eri aukude kaudu, mis selleks on ette nähtud plaadis *1*. Kablitzi süsteemi ökonomaiseri olulisteks puudusteks peale eelloetelduteon veel keerulise ehitusega ülemine plaat ja äärikühendite asumine kuumade suitsugaaside keskkonnas. Nende puuduste tõttu neid Nõukogude Liidus enam ei toodeta.

Üleliidulise Soojustehnilise Instituudi horisontaalne ribidega ökonomaiser. NSV Liidus on laialt levinud BTИ (Üleliidulise Soojustehnilise Instituudi) ribidega ökonomaiserid.

Seda süsteemi ökonomaiser koosneb üksikutest torudest (joon. 70),



Joon. 70. Üleliidulise Soojustehnilise Instituudi (BTИ) ökonomaiseri ribitoru.

mis on varustatud õhukeste neljakandiliste ribidega *1*. Torud lõpevad paksude neljakandiliste ribidega *2*, mis on esimestest veidi suuremad, ja ümmarguste äärikutega *3*. Ribid *2* on ette nähtud naabertorudele vastastikuseks toetumiseks ja moodustavad ökonomaiseri koostamisel suitsukäigule täisseina. Äärikute külge kinnitatakse kaarkarbid, milledega ühendatakse järjestikku ökonomaiseri kõik torud. Äärikühendid asuvad väljaspool kuumade gaaside keskkonda ja nad on alati kättesaadavad järelevaatusteks ja kerge remondi teostamiseks ilma ökonomaiseri tööd katkestamata.

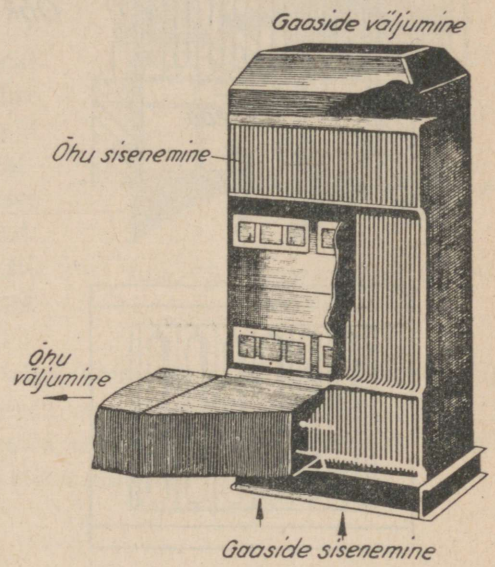
Torude tahmapuhumine toimub auruga või suruõhuga. Tahmapuhumisaparaadi torud pistetakse erilistesse aukudesse, mis on ette nähtud ribide nurkades.

Kõrgendatud rõhu puhul (üle 22 atü) kasutatakse malmökonomaiserite asemel terasökonomaisereid.

51. Õhueelsoojendid.

Torudest õhueelsoojendid. Nagu juba varem märkisime, on õhueelsoojendi ette nähtud koldesse juhitava õhu soojendamiseks.

Eelsoojendatud õhu puhul põlemisprotsess koldes toimub intensiivsemalt ja temperatuur koldes tõuseb, mis omakorda soodustab põlemisprotsessi. Peale selle võimaldab kütuse põlemise kõrgem temperatuur märksa rohkem kiirgussoojust katla kiirgamispinna poolt ära kasutada. Eelsoojendatud õhu kasutamine vähendab seega kadusid lahkuvate gaasidega kui ka kadusid põlemise keemilisest ja mehaanilisest ebatäiuslikkusest ja tõstab küttepinna soojuslikku erikoormust.

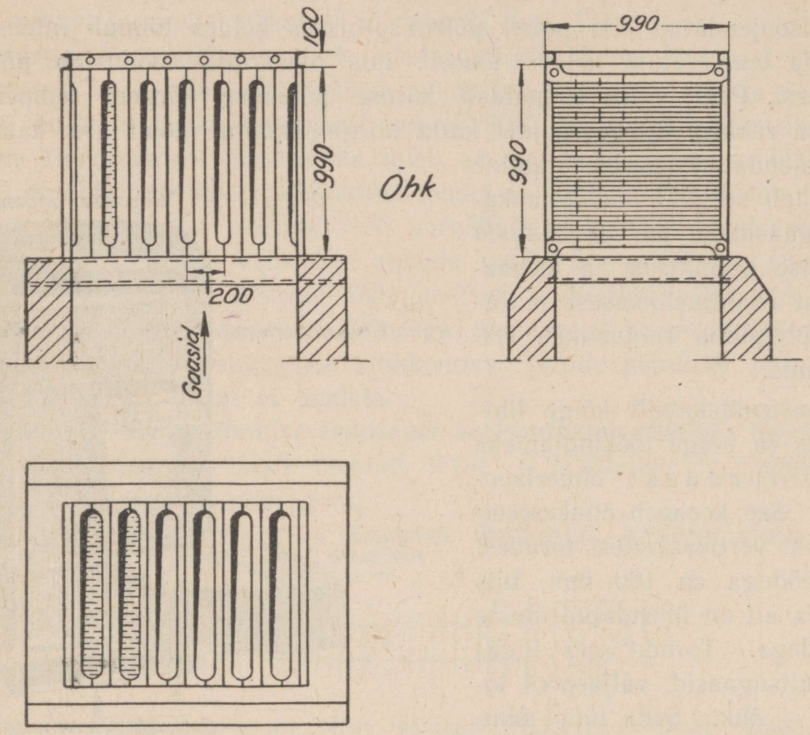


Joon. 71. Plaatidest õhueelsoojendi väline vaade.

Konstruktsioonilt kõige lihtsamaks ja kõige töökindlamaks osutub t o r u d e s t õhueelsoojendi. See koosneb õhukeseseinalistest vertikaalsetest torudest läbimõõduga ca 100 mm, mis ülalt ja alt on ühendatud ühiste plaatidega. Torude sees liiguvad suitsugaasid, väljaspool torusid — õhk. Seda tüüpi õhueelsoojendi paremused seisavad töökindluses, konstruktsiooni lihtsuses ja hõlpsas tuhast puhastamise võimaluses. Tema puudusteks aga on kogukus ja kõrge hind.

Lehtedest õhueelsoojendi. Lehtedest õhuökonomaiseril (joon. 71) on töötamise põhimõte sama, nagu torudest ökonomaiserilgi. Selle konstruktsioonis kasutatakse torude asemel täisnurkseid karpe (piludega 10—25 mm) õhukesest lehtterasest. Karpide sees voolavad suitsugaasid, väljast aga uhub neid õhk. Sellise konstruktsiooni tõttu on ühes blokis võimalik saavutada suurt soojenduspinda — mitu sada ruutmeetrit. Selle õhu eelsoojendaja tüübi voorusteks on kompaktsus ja odavus; puuduste hulka tuleb arvata — raskendatud tuhast ja tahmast puhastamise võimalust, lehtede sagedast kaardumist kõrgete temperatuuride mõjul, tülikat remonti.

Kusinski tehase ribidega malmist õhueelsoojendi. Kõikide terasest õhueelsoojendite puudusteks on esiteks nende roostetamise ja sööbimise võimalus niiskete väävlit sisaldavate kütuste kasutamisel, teiseks aga — kaardumine lahkuvate gaaside kõrge temperatuuri puhul. Nendest puudus-



Joon. 72. Kusinski tehase õhueelsoojendi.

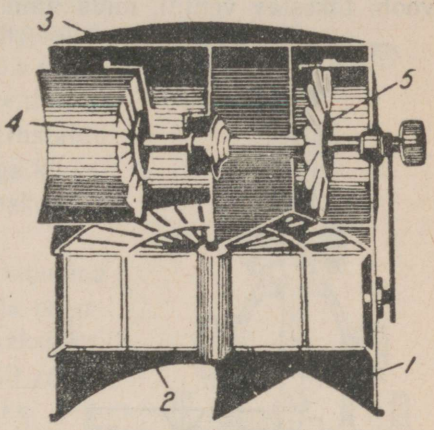
test on vaba Kusinski tehase malmist õhueelsoojendid (joon. 72). Need koosnevad üksikutest ribidega varustatud malmplaatidest. Ühelt poolt on ribid horisontaalsed, teiselt poolt vertikaalsed. Ühe plaadi soojenduspind on 4,8 m². Mitu plaati ühendatult moodustavad nn. k u u b i ehk elemendi. Ühte elementi kuulub tavaliselt 24 plaati.

Selle konstruktsiooni puudusteks on võrreldes lehtedest õhueelsoojenditega suur kaal, väiksem soojuse ülekande tegur, suuremad gabariidid.

52. Regeneratiivne õhueelsoojendi.

Kõik vaadeldud vee- ja õhueelsoojendite konstruktsioonid osutuvad r e k u p e r a t i i v s e t e k s, s. o. niisugusteks, milledes soojendav ja soojendatav keskkond voolavad üheaegselt teine teisel pool soojenduspinda.

On olemas aga teist tüüpi, nn. regeneratiivsed eelsoojendid, millede töötamise põhimõte seisab selles, et üks ja sama pind uhutakse vaheldumisi kord kuumade gaasidega (seejuures pind soojeneb, gaasid aga jahtuvad), kord aga külma õhuga (seejuures pind jahtub, õhk aga soojeneb).



Joon. 73. Regeneratiivne õhueelsoojendi.

Regeneratiivne eelsoojendi koosneb silindrilisest kestast *1*, milles pöörleb aeglaselt rootor *2*, mis koosneb üksikutest plaatidest. Kesta *1* sees olev ruum rootori all ja tema peal on jagatud sektori taoliselt vaheseinaga *3* kahte ossa. Suitsuimeja *4* imeb läbi silindri vasaku poole katlast väljuvaid tuliseid suitsugaase; seejuures rootori plaadid soojenevad. Ventilaatori *5* mõjul läbib õhk silindri parempoolse osa; seejuures rootor jahtub, õhk aga soojeneb.

Regeneratiivne eelsoojendi on väga kompaktne ja katla juurde hõlpsalt kombineeritav, kuid valmistamiselt on ta keerulisem kui plaatidest ja torudest eelsoojendid. Regeneratiivseid eelsoojendeid on võimalik ehitada üsna väikestele ja üsna suurtele katelseadmetele.

XI peatükk.

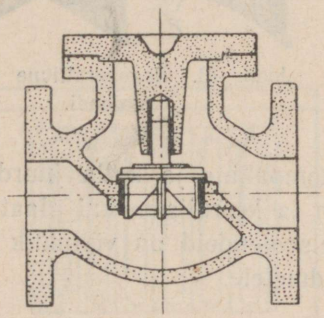
Aurukatelde armatuur ja abiseadmed.

53. Katelde toitmine.

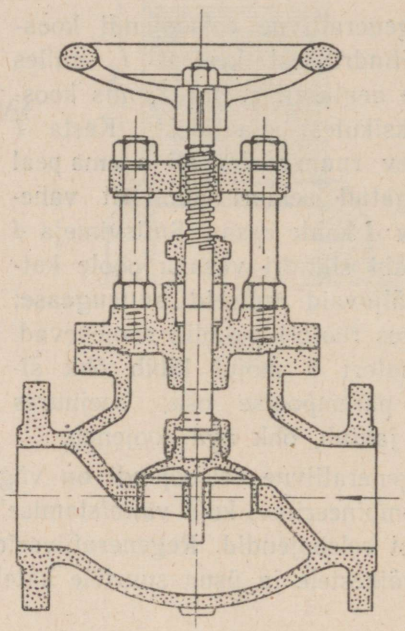
Katelde veega toitmine toimub tavaliselt tsentrifugaal- või kolbpumpade abil. Transportseadmetes kasutatakse toitmiseks sageli inžektoreid. Toiteabinõusid peab olema vähemalt kaks. Kui toitmine toimub pumpade abil, siis kummagi pumba võimsus peab võrduma katla kahekordse maksimaalse võimsusega, kusjuures üks pumpadest peab olema auruga käitatav. Kui katlaid toidetakse inžektorite abil, siis iga inžektori võimsus peab võrduma katla kolmekordse maksimaalse võimsusega.

§ 54. Katelde armatuur ja abiseadmed.

Toiteventiil. Katla veemagistraalile peab olema üles seatud vee tagasivoolu tõkestav ventiil, mida nimetatakse toiteventiiliks (joon. 74).



Joon. 74. Toiteventiil.



Joon. 75. Sulgventiil.

Ta laseb vett ainult katlasse, s. o. avaneb siis, kui rõhk toitemagistraalis on katlarõhust kõrgem.

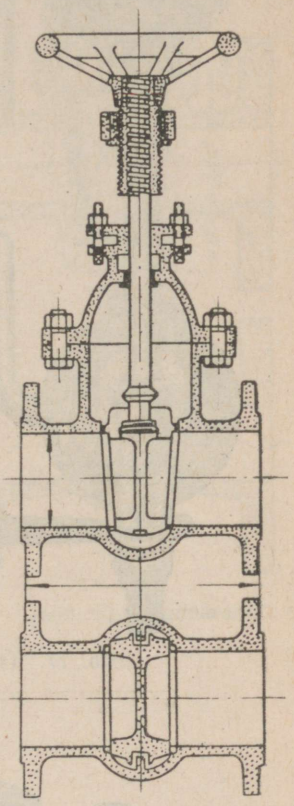
Sulgventiil. Toiteventiili ja katla vahele, vahetult toiteventiili juurde, seatakse üles tavaline sulgventiil, mis suletakse katla seismapanekul ja mis võimaldab aegajalt kontrollida tööd, ilma et oleks tarvis katkestada katla töötamist.

Aurusulgemisventiil. Auruülekuumendist või katlast tarbijale suunduvale aurutorustikule seatakse üles aurusulgemisventiil (joon. 75) või sulgsiiber (joon. 76); nad peavad olema üles seatud vahetult auruülekuumendi või katla järel ja peavad kindlalt sulgema aurutorustiku, kui katlast auru ei võeta.

Veeseisunäitajad. Iga aurukatel peab olema varustatud vähemalt ühe

veeseisunäitaja klaasiga ja kahe proovikraaniga veepinna kontrollimiseks katlas.

Veeseisunäitajad valmistatakse kas lihtsate ümmarguste klaastorude näol, mis on vastavalt kinnitatud ja katlaga ühendatud (joon. 77), või lamedate peegeldusklaaside näol (klingerklaasid). Ümmargused klaasid sagedasti lõhkevad. Teenindus-personali kaitseks nad peavad olema varustatud eri kaitseseadmetega, näiteks traatvõrguga klaas-silindri näol (joon. 78), kuid viimane raskendab veepinna jälgimist katlas.



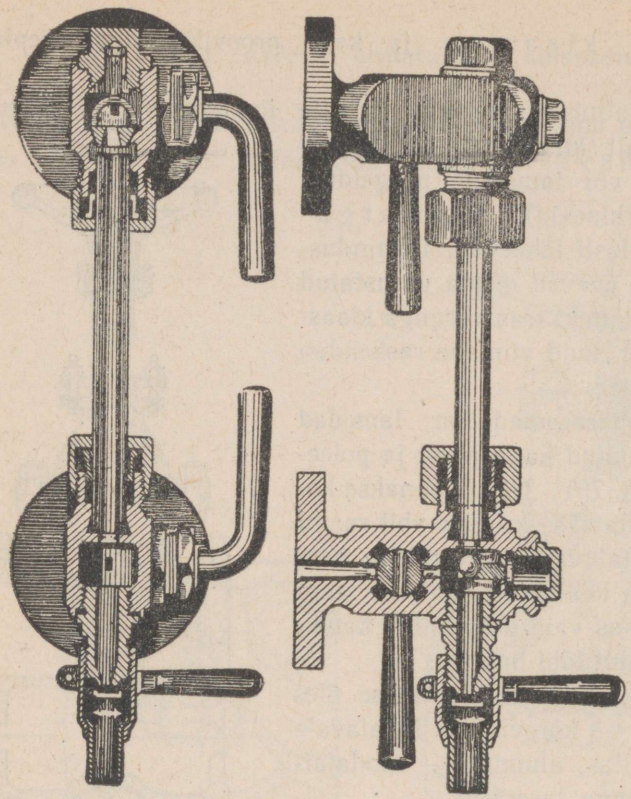
Joon. 76. Sulgsiiber.

Kasutamiseks käepärasemad on lamedad klaasid, mis on rihveldatud katla poolt ja poleeritud väljastpoolt (joon. 79). Need pannakse kohale tihenditel ja kinnitatakse kruvide abil raami sisse. Need klaasid taluvad suurt rõhku, peavad kauem vastu ja on töötamisel ohutud. Isegi purunemisel annab klaas vaid prao, mille kaudu aur ja vesi saavad ainult läbi imbuda.

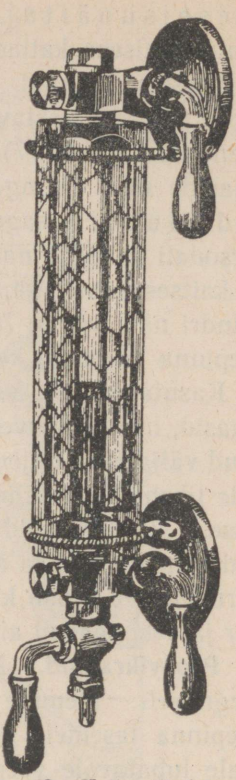
Proovikraanid. Need kraanid seatakse üles järgmiselt: ülemine — kõrgeimale lubatavale veepinna tasemele katlas, alumine — madalaimale lubatavale veepinna tasemele.

Manomeetrid. Auru rõhu mõõtmiseks on nähtud ette manomeetrid. Aurukatelde juures kasutatakse vedrumanomeetreid (joon. 80). Vedru liigse soojenemise vältimiseks ühendatakse manomeeter katlaga pika painutatud toru abil, milles tavaliselt seisab aurust kondenseerunud vesi. Mõnede tehaste poolt vedru, mis kujutab endast painutatud toru, täidetakse glütseriiniga; sellega välditakse vedru ülemäärast soojenemist. Manomeetri ja katla vahel peab asetsema kolme käiguga kraan, mis annab võimaluse kontrollida kontrollmanomeetri abil alalise manomeetri näitude täpsust.

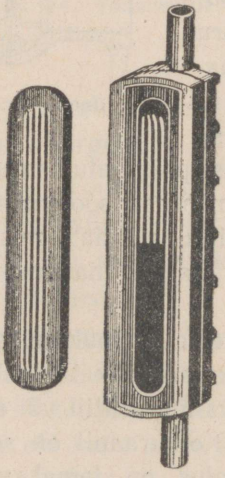
Mudakraan. Vee väljalaskmiseks katlast tema läbipuhumisel ja puhastamiseks seismapanemisel kasutatakse mudakraani ehk läbipuhumiskraani (joon. 81). Mudakraani järel seatakse üles tavaline ventiil või siiber; sagedasti kasutatakse ka kahekordseid ventiile. Korkkraanil on see paremus, et mustumise ja ebatiheda sulgumise võimalus on temal väiksem kui ventiilil.



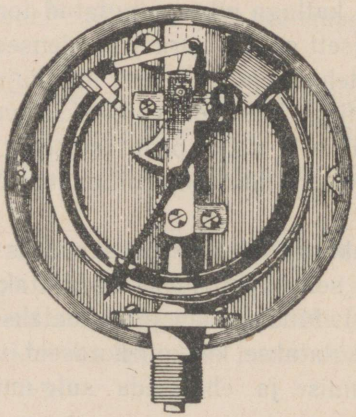
Joon. 77. Tavaline veeseisunäitaja.



Joon. 78. Kaitsesilindriga veeseisunäitaja.



Joon. 79. Veeseisunäitaja lameda klaasiga.

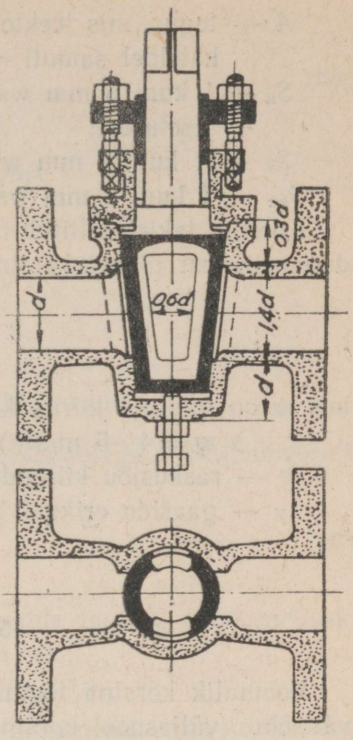


Joon. 80. Manomeeter.

Tõmme.

Tõmme võib olla loomulik ja kunstlik. Loomulik tõmme teostub korstna toimel, kunstlik aga suitsuimeja või aurujoa-seadise abil (korsten sel juhul seatakse üles suitsugaaside ärajuhtimiseks).

Tõmme on tarvilik katelseadmes selleks, et ületada gaaside liikumisel katelseadme üksikelementide (kolde, katla, aurulekuumendi, ökonomaiseri, suitsukäikude) takistused.



Joon. 81. Mudakraan.

55. Tõmbe vajalik tugevus.

Tõmbe vajalik tugevus ehk hõrendus S korstna ees kujutab endast katelseadme üksikelementide takistuste summat, s. t.

$$S = S_{k\text{o}} + S_k + S_{\ddot{u}} + S_{\ddot{o}} + \\ + S_{sk} + S_{kn} = \Delta p, \qquad (61)$$

kus $S_{k\text{o}}$ on hõrendus koldes, mm ws.;
S_k — katla takistus, mm ws.;
$S_{\ddot{u}}$ — ülekuumendi takistus, mm ws.;
$S_{\ddot{o}}$ — ökonomaiseri takistus, mm ws.;
S_{sk} — suitsukäikude takistus, mm ws.;
S_{kn} — korstna takistus, mm ws.

Hõrendus koldes $S_{k\text{o}}$ moodustab ligikaudu 2 mm ws kunstlikul õhupuhumisel. Kui põlemisõhk peab tungima koldesse ainuüksi tõmbe mõjul, peab hõrendus koldes olema võimeline ületama õhu sissevoolu takistust koldesse (vt. tabel 5).

Katla takistus arvutatakse võrrandi järgi:

$$S_k = A \left(\frac{D}{H_k}\right) \alpha_k^2, \qquad (62)$$

kus $\frac{D}{H_k}$ on küttepinna erikoormus, kg/m²h;
α_k — liigõhutegur katlas;

A — tegur, mis leektorukateldel võrdub ligikaudu 0,006, kaldveetorukateldel samuti ~0,006 ja püstveetorukateldel ~0,004;

$S_{ü}$ — 1 kuni 5 mm ws, sõltuvalt ülekuumendi ehitusest, suurusest ja asetusest;

$S_{ö}$ — 1 kuni 5 mm ws.;

S_{kk} — 1 kuni 2 mm ws.

Korstna takistus liitub rõhukaost hõõrdumisele (ligikaudu 1 mm ws) ja dünaamilisest rõhust korstnast väljumisel, mis võrdub:

$$\frac{w^2}{2g}\gamma,$$

kus w on gaaside kiirus korstnast väljumisel, m/sek (tavaliselt võetakse $w = 4—6$ m/sek);

g — raskusjõu kiirendus (9,81 m/sek²);

γ — gaaside erikaal korstnast väljumisel, kg/m³.

56. Loomulik tõmme.

Loomulik korstna tõmme tekib kuumade gaaside (korstna sees) ja välisõhu (väljaspool korstnat) erikaalu vahe tõttu:

$$\Delta p = S = H(\gamma_{ö} - \gamma_{g}), \tag{63}$$

kus H on korstna kõrgus, m;

$\gamma_{ö}$ — välisõhu erikaal;

γ_{g} — suitsugaaside erikaal korstnas valitseval temperatuuril.

Ilma suurema veata on võimalik võtta nii gaaside kui ka õhu erikaaluks normaaltingimustes võrdseks 1,29 kg/m³. Siis

$$\gamma_{ö} \approx \frac{1{,}29 \cdot b \cdot 273}{760(273 + t_{ö})};$$

$$\gamma_{g} \approx \frac{1{,}29 \cdot b \cdot 273}{760(273 + t_{g})}.$$

Siin b on baromeetri näit, mm Hg.

Pärast $\gamma_{ö}$ ja γ_{g} asendamist valemis (63) ja vastavaid ümberkujundamisi saame:

$$\Delta p = 0{,}46Hb\left(\frac{1}{T_{ö}} - \frac{1}{T_{g}}\right) = S, \tag{64}$$

kust korstna kõrgus määratakse järgmiselt:

$$H = \frac{\Delta p}{0{,}46b\left(\frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T_g}\right)}, \qquad (65)$$

kus Δp on korstna tõmbetugevus, mm ws., kg/m²;
b — manomeetri näit, mm Hg;
T_δ — õhu absoluutne temperatuur;
T_g — suitsugaaside absoluutne temperatuur;
H — korstna kõrgus, m.

57. Kunstlik tõmme. Tõmbe liigi valik.

Kunstlik tõmme tekitatakse ventilaator-suitsuimejaga. Suitsuimejale tarvilik võimsus on:

$$N_{si} = \frac{VS}{75\eta_{si}}, \qquad (66)$$

kus V on suitsuimeja poolt sisseimetavate gaaside tegelik maht, m³/sek;
S — suitsuimeja poolt tekitatav rõhk, mm ws.;
η_{si} — suitsuimeja kasutegur, mis võrdub 0,4—0,6.

Kunstliku või loomuliku tõmbe valik sõltub kõigepealt katla võimsusest ja tervest reast teistest tingimustest. Tavaliselt varustatakse võimsad katlad, mis vajavad tõmbetugevust 75—150 mm ws., suitsuimejaga, kuna sellise tõmbetugevusega korstnad osutuksid väga kõrgeteks (ligikaudu 120—250 m). Väikesed katlad varustatakse tavaliselt korstnatõmbega.

XIII peatükk.

Toitevesi.

58. Toitevee ettevalmistamine.

Toitevee kvaliteet on erakorraliselt suure tähtsusega katla töötamisele. Vee kvaliteet oleneb peamiselt hapniku ja süsihappegaasi sisaldusest vees ja selle karedusest. Kareduse kraadid näitavad, kui palju sisaldub vees põhimisi katlakivi tekitajaid, lupja ja magneesiumi.

1 kareduse kraad vastab lubjasisaldusele 1 kaaluosa CaO-d 100 000 osa vee kohta.

Üldisest karedusest eraldatakse tavaliselt nn. mööduvkaredus, mis iseloomustab soojendamisel hõlpsalt lagunevate Ca ja Mg bikarbonaatide sisaldust vees.

Kui üldkareduse kraadide arvust lahutada mööduvkareduse kraadid, siis saame jäävkareduse, mis iseloomustab püsivate soolade (peamiselt sulfaatide) sisaldust vees. Need soolad ei sadestu soojendamisel välja ega tekita katelseadme elementidel roostetamist ja sööbimist.

Mööduvkareduse soolad annavad seega soojendamisel hõlpsalt sadestusi ja katlakivi ja iseloomustavad vett katlakivi tekkimise seisukohalt; jäävkareduse soolad vastupidi on harva katlakivi tekitajateks.

Vett üldkaredusega kuni 8 kraadi loetakse pehmeks, alates 16 kraadist ja üle selle — karedaks. Tabelis 7 on toodud andmed katlakivi tekitajate Ca ja Mg soolade lahustuvuse kohta gramm-moolides 1 t vee kohta 20° C juures.

Tabel 7.

Soolade lahustuvus gramm-moolides 1 t vee kohta 20° C juures.

	Cl_2	$(OH)_2$	SO_4	$(HCO_3)_2$	CO_3
Ca	6710	23	15	6,3	0,13
Mg	5720	0,15	3030	9,2	1,15
Na_2	6120	2730	1360	1140	2020

Sellest tabelist näeme, et lahustuvuse määr eri sooladel muutub väga suurtes piirides. Vähelahustuvad soolad, nagu $CaCO_3$, küllastavad kiirelt lahuse, kuid annavad minimaalse hulga katlakivi nende erakordselt väikese sisalduse tõttu. Suure lahustuvusega soolad (näiteks $MgSO_4$) hakkavad välja sadestuma lahusest ainult väga kõrge kontsentratsiooni puhul, s. t. pika aja möödumisel katla käiku laskmisest, pealegi kui katelt läbi ei puhuta; katla perioodilise või pideva läbipuhumisega võib tagada, et katla vesi alati jääb mitteküllastatuks jäävkareduse-sooladega. Siis ei tekita niisugused soolad järelikult katlakivi. Tabelis 7 toodud sooladest tekitavad katlakivi peamiselt need, millede lahustuvus on suurem ühest ja väiksem tuhandest, s. t. eelkõige $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $CaSO_4$, $Ca(OH)_2$; neid soolasid on seepärast tarvis võimaluse järgi toiteveest eemaldada.

59. Vee puhastamine.

Eelpool kirjeldatud soolade iseärasustele on rajatud keemiline vee puhastamine, mida teostatakse lubja-sooda- ja permutiitmenetlustel.

L u b j a - s o o d a m e n e t l u s e l toimub vee puhastamine järgmiste põhimiste reaktsioonide järgi:

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 = 2CaCO_3 + 2H_2O;$$
$$Mg(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 = MgCO_3 + CaCO_3 + 2H_2O;$$
$$[Mg(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 + 2CaCO_3 + 2H_2O].$$

Järelikult, kui mõjutada kaltsium- ja magneesiumbikarbonaati lubjaga, saadakse $CaCO_3$ ja $MgCO_3$, mis on väikse lahustuvusega ja suurem hulk nendest sadestub välja veepuhastajas.

Teistele vees sisalduvatele sooladele — ($CaSO_4$, $Ca(NO_3)_2$, $CaCl_2$) mõjub sooda Na_2CO_3:

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + Na_2SO_4;$$
$$Ca(NO_3)_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + 2NaNO_3;$$
$$CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + 2NaCl;$$
$$MgCl_2 + Na_2CO_3 = MgCO_3 + 2NaCl.$$

Nende reaktsioonide tulemusena saadavad soolad on väga väikse lahustuvusega ja järelikult sadestuvad välja veepuhastajas, või vastupidi — väga suure lahustuvusega ja lastakse tavaliselt katlast välja koos läbipuhumisveega.

Rohkesti katlakivi tekitavate soolade asendamisel sooladega, mis on suure lahustuvusega ja järelikult ei tekita praktiliselt katlakivi, rajaneb vee puhastamise p e r m u t i i t m e n e t l u s. Puhastamisele kuuluv vesi läbib filtri, mis on täidetud erilise ainega — permutiidiga. Permutiidil on omadus veest Ca ja Mg soolad välja eraldada ja asendada neid Na sooladega.

Reaktsioonid permutiitfiltrites toimuvad põhimiselt järgmiste valemite järgi:

$$Ca(HCO_3)_2 + PerNa_2 = PerCa + 2NaHCO_3;$$
$$Mg(HCO_3)_2 + PerNa_2 = PerMg + 2NaHCO_3;$$
$$CaSO_4 + PerNa_2 = PerCa + Na_2SO_4;$$
$$MgSO_4 + PerNa_2 = PerMg + Na_2SO_4.$$

Kõikides nendes valemites $PerNa_2$ on värske permutiidi leppeliseks tähistuseks, PerCa, PerMg — töötanud permutiidi tähistuseks. Permutiidi regenereerimine toimub keedusoolaga järgmiselt:

$$PerCa + 2NaCl = PerNa_2 + CaCl_2;$$
$$PerMg + 2NaCl = PerNa_2 + MgCl_2.$$

Permutiidiga veepuhastamise menetlus on lubja-soodamenetlusega võrreldes lihtsam ja seepärast võib arvata, et ta leiab küllalt suurt kasutamist tehaste katelseadmetes.

Keemilisel teel puhastatud vesi annab siiski teatava hulga katlakivi. Mõnede katelagregaatide jaoks aga on tarvilik täiesti puhas destilleeritud vesi. Selliseks veeks on kondensaat auruturbiini kondensaatorist. Vältimatud aurukaod teekonnal katlast turbiini (ca 3%) asendatakse veega, mis saadakse erilistes aurutites. Auruteid aga tuleb samuti toita keemiliselt puhastatud veega, kuna muidu mustub küttepind kiiresti ja auruti töö halveneb märgatavalt.

Toitevett tuleb vabastada selles lahustunud õhuhapnikust ja süsihappegaasist. Nendest gaasidest tekib katla seinte korrosioon, eriti kõrgetel rõhkudel; peale selle halvendavad nad vaakumi turbiinide kondensaatorites, kuhu nad kanduvad koos auruga.

Toitevee puhastamiseks gaasidest kasutatakse erilisi aparaate — d e g a s e e r i j a i d ehk d e a e r a a t o r e i d, milledes eemaldatakse veest gaase selle soojendamisega keemistemperatuurini või keemilisel teel.

TEINE OSA.

AURUMASINAD.

XIV peatükk.

Aurumasina üldine ehitus, töötamine ja kasutegur.

60. Aurumasina arenemine, skeem ja töötamise põhimõte.

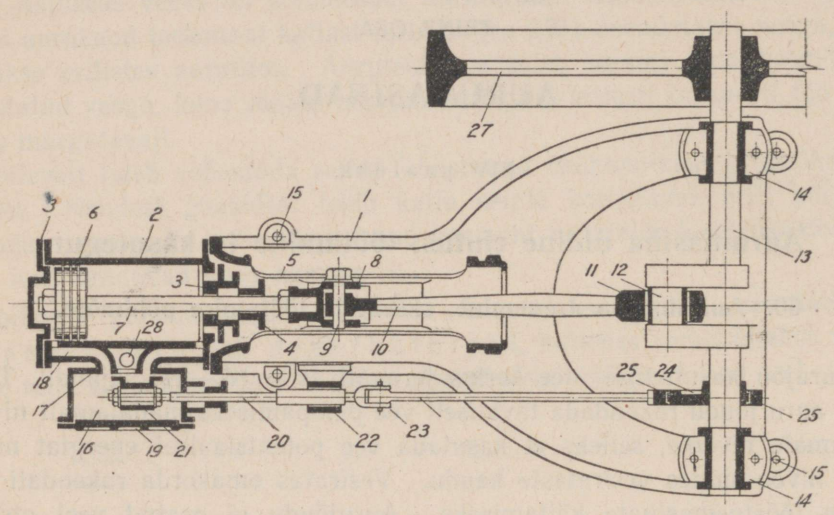
Aurujõu kasutamise idee kerkis teravalt esile 16.—17. sajandil. Tollal püüti auru jõudu rakendada tavaliselt vee pumpamiseks madalamalt nivoolt kõrgemale nivoole, selleks et kasutada vee potentsiaalset energiat madalama nivoo suhtes vesirataste kaudu. Vesiratas omakorda rakendati vastavate tööstusmasinate käitamiseks. Aurujõudu ei osatud veel otseselt rakendada tööstusmasinate käitamiseks, vaid seda tehti kaudselt vee jõuga.

Tolle aja aurumasinad töötasid atmosfääri rõhu mõjul, s. o. töötasid nn. „atmosfääri-masinatena". Nendes masinates veeaur juhiti aurukatlast rõhul 0,1—0,2 atü aurumasina silindrisse ja lasti seal aurul kondenseeruda. Auru kondenseerumise tagajärjel tekkis silindris vaakum ja silindri lahtisest otsast kolvile mõjuv atmosfääri rõhk pani kolvi liikuma.

Esimese aurumasina, mis oli vahetult rakendatav tööstusmasina käitamiseks, ehitas vene teadlane mehaanik-leidur I. I. Polzunov 1765. a. Polzunovi masin töötas atmosfääri-masina printsiibil, kuid omas tolle aja masinatega võrreldes palju omapärasusi, millest mõned leidsid hiljem osaliselt laiaulatuslikku kasutamist. Masin oli kahesilindriline, silindri läbimõõt 0,81 m, kolvikäik 2,56 m ja võimsus 40 hobujõudu. Masinat kasutati metallurgilise ahju lõõtsade käitamiseks. I. I. Polzunovi leiutise tähtsus ei leidnud tsaristlikul Venemaal vajalikku hinnangut ja I. I. Polzunovi varajane surm katkestas tema edaspidise töö.

Aurumasina arenemiskäik kestis edasi ja 19. sajandil võetakse aurumasinad juba kõikjal laiaulatuslikult kasutamisele. Üle 80 aasta on aurumasinad ainsaks soojusjõumasinaks nii transpordis kui ka tööstuses. 19. sajandi lõpul tekib talle konkurent sisepõlemismootori ja auruturbiini

näol. Sellele vaatamata pole ta tänaseni kaotanud oma tähtsust, eriti transportjõuseadmetes. Aurumasinate ehitamiseks tekkis palju tehaseid mitmetes maades. Venemaal, peale I. I. Polzunovi masina, hakati aurumasinaid ehitama 1790. a. „Olovetsi tehastes" (praegune „Martĭ" tehas) ja hiljem paljudes teistes tehastes, kuid välismaise kapitali pidurdava mõju



Joon. 82. Aurumasina skeem. *1* — alusraam; *2* — silinder; *3* — silindri kaaned; *4* — tihenduskarp; *5* — paralleelsed juhtpinnad ehk paralleelid; *6* — kolb; *7* — kolvivars; *8* — ristpea; *9* — ristpea sõrm; *10* — keps; *11* — kepsupea; *12* — väntvõlli põlv; *13* — väntvõll; *14* — laagrid; *15* — vundamendi poldid; *16* — siibrikarp; *17* — siibri peegelpind; *18* — aknad; *19* — siibrikarbi kaas; *20* — siibrivars; *21* — siiber; *22* — siibrivarre juhtpuks; *23* — siibrivarre kahvel; *24* — ekstsenter; *25* — ekstsentri rõngas; *27* — hooratas; *28* — väljalasketoru.

tõttu polnud sel arenemisel vajalikku hoogu. Hoogne aurumasinate tootmine algas 1926. a., pärast Nõukogude võimu kehistamist. Pearõhk pandi lokomobiilide ehitamisele. Nii näiteks oli 1940. a. lokomobiilide toodang aastas üle 2000. Praegu toodavad N. Liidus laeva-, veduri- ja teisi eriotstarbelisi aurumasinaid paljud spetsialiseerunud tehased.

Aurumasina skeem on toodud joonisel 82.

Aurumasin koosneb raamist *1*, mille külge kinnitatakse silinder *2*. Silindri otsad on suletavad kaantega *3*. Silindri sees liigub kolvivarrele *7* kinnitatud kolb *6*. Kolvivars läbib eesmise tihenduskarbi ja kinnitatakse jäigalt ristpeasse *8*. Ristpea külge, mis liugub paralleelsetel juhtpindadel *5*, kinnitatakse liigendiliselt sõrme *9* abil keps *10*, mis teise otsaga — oma peaga *11* on kinnitatud võlli *13* põlvele *12*. Väntvõll pöörleb laagrites *14*.

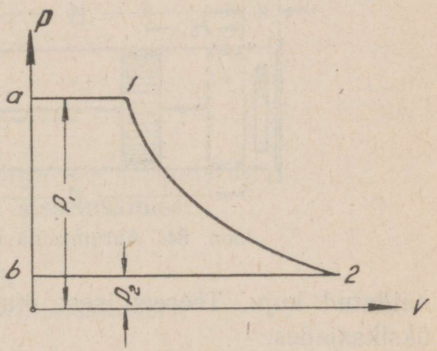
Auru jaotus teostub siibriga *21*, mis käitatakse siibrivarre *20* ja siibri tõmmitsa abil väntvõllil istuvalt ekstsentrilt *24*. Auru sisse- ja väljalaskmine toimub kanalite (akende) *18* kaudu, kusjuures katlast saabub värske aur siibrikarpi *16*, töötanud aur aga lahkub väljalasketorusse *28*. Ühtlase käigu saavutamiseks on masin varustatud hoorattaga *27*.

Aurumasina töötamine toimub järgmisel viisil. Värske aur saabub algul siibrikarbist silindri ühte otsa (näiteks tagumisse (vasakpoolsesse)), surub kolvile ja sunnib seda liikuma piki silindrit. Koos kolviga liigub kolvivars ja väntmehhanismi abil muundatakse kolvi sirgjooneline liikumine väntvõlli pöörlevaks liikumiseks. Samal ajal väljub silindri teisest (parempoolsest) osast aur siibri alla ja sealt edasi väljalasketorusse. Kolvi liikumisel paremale nihutatakse siiber ekstsentri poolt vasakule. Teatavas järjestuses suleb siiber auru sisselaske tagumisse silindri osasse ja auru väljalaske eesmisest silindriosast, seejärel aga avab paremalt poolt akna värske auru sisselaskmiseks, vasakult poolt — akna töötanud auru väljalaskmiseks; sama aja jooksul saabub kolb äärmisse parempoolsesse seisangusse ja hakkab siis liikuma vasakule. Sel viisil toimubki kolvi liikumine kord paremale, kord vasakule ja järelikult ka masina töötamine niikaua, kui masinasse juhitakse värsket auru.

61. Aurumasina teoreetiline ja tegelik indikaatoridiagramm ja soojuskadude liigid.

Auru tööprotsessi ideaalses aurumasinas on võimalik kujutada p-v-diagrammil järgmisel viisil. Teataval kolvikäigu pikkusel toimub värske auru sisselase aurutorustikust silindrisse. Sisselaske (ehk täitmise) protsess kajastub *p-v*-diagrammil joonega *a*—1 (joon. 83).

Seejärel toimub kolvi liikumise jätkumisel auru adiabaatiline paisumine, kusjuures silindris olev aur paisub auru algrõhust p_1 (katlarõhust) kuni antud vasturõhuni p_2 (rõhuni jahutis ehk kondensaatoris). *p-v*-diagrammil auru paisumine kujundab adiabaadi *1*—*2*. Lõpuks kolvi tagasiliikumisel tõrjutakse töötanud aur välja rõhu juures p_2. Töötanud auru väljatõrjumise protsessile vastab *p-v*-diagrammil joon 2—*b*.



Joon. 83. Teoreetiline protsess ideaalses aurumasinas.

Kui täitumisprotsessis a—1 aurumasina silindrisse lasti G kg auru, siis p-v-diagrammi pindala a—1—2—b—a määrab G kg auru töö aurumasinas. Samal viisil on määratav G kg auru töö Rankini ringprotsessis. Järelikult ühe kg auru töö ideaalses aurumasinas võrdub ühe kg auru tööga Rankini ringprotsessiga töötavas aurujõuseadmes ja seda on võimalik arvutada tuntud valemite järgi:

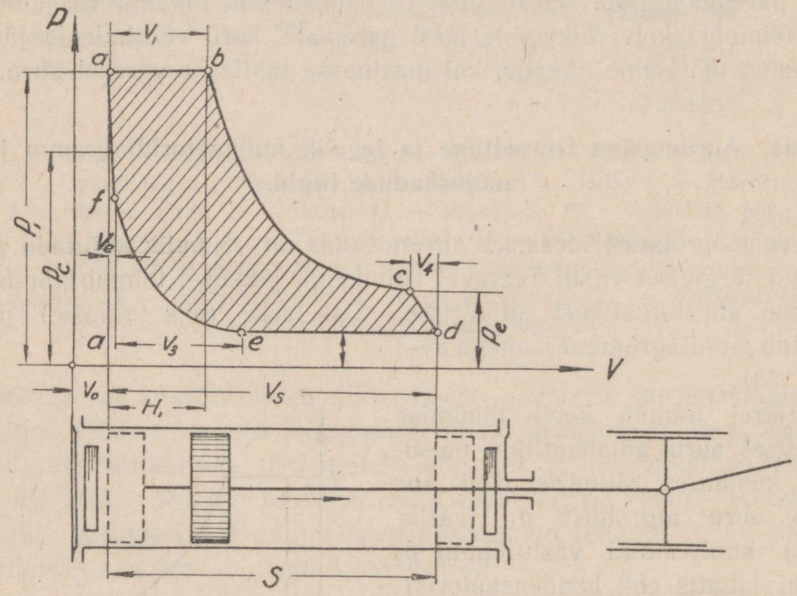
$$l_0 = \frac{k}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right] =$$

$$= \frac{1}{A}(i_1 - i_2) \text{ kgm/auru kg,}$$

kus p_1, v_1, i_1 on vastavalt värske auru rõhk, erimaht ja entalpia;

p_2, v_2, i_2 — töötanud auru samad parameetrid.

Tegelikus aurumasinas erineb tegelik, ehk nn. indikaatoridiagramm märgatavalt eespool vaadeldud diagrammist. Soojuskadude arvestamata jätmisel on aurumasina indikaatoridiagrammil joonisel 84



Joon. 84. Aurumasina teoreetiline indikaatoridiagramm.

näidatud kuju. Teoreetilisest diagrammist erineb ta eelkõige järgmistes üksikasjades:

1) kolvi äärmistes seisangutes jääb kolvi ja silindri põhja vahele nn. kahjulik ruum (maht V_0);

2) auru silindrisse sisselaske protsessis (täitumisprotsessis) rõhk silindris langeb teatava määrani;

3) silindris toimub auru paisumise protsess mitte adiabaadi, vaid polütroobi järgi, mille astendaja n protsessis pidevalt muutub;

4) aurumasina silinder valmistatakse lühem, kui teoreetiliselt on tarvilik, ja aur ei saa paisuda kondensaatori rõhuni;

5) töötanud auru väljalase silindrist algab enne seda, kui kolb jõuab äärmisse ehk nn. surnudseisangusse;

6) väljalaskel on rõhk silindris veidi kõrgem rõhust kondensaatoris;

7) jahutisse tõugatakse välja mitte kogu töötanud aur; osa temast jääb silindrisse ja surutakse kokku;

8) värske auru sisselase algab enne seda, kui kolb jõuab äärmisse ehk surnudseisangusse.

Kahjulik ruum, täitumisaste, eelväljalaske aste, komprimeerimise aste ja eelsisselaske aste antakse tavaliselt kolvi liikumisega kujundatava mahu V_s protsentides. Seega on joonisele 84 vastavalt kahjuliku ruumi suhteline maht

$$\sigma = \frac{V_0}{V_s};$$

täitumisaste (teoreetiline)

$$\varepsilon_1 = \frac{V_1}{V_s};$$

eelsisselaske aste

$$\varepsilon_2 = \frac{V_e}{V_s};$$

komprimeerimisaste ehk kokkusurumisaste

$$\varepsilon_3 = \frac{V_3}{V_s};$$

eelväljalaske aste

$$\varepsilon_4 = \frac{V_4}{V_s}.$$

Põhimisteks soojuskadudeks aurumasinas on järgmised:

1) kaod auru muljumisest silindrisse sisselaskmisel;

2) kaod algkondensatsioonist;

3) kaod mitteküllaldasest paisumisest;

4) kaod auru muljumisest silindrist väljalaskmisel;

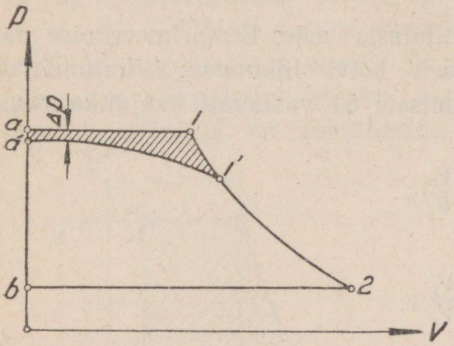
5) kaod kahjulikus ruumis;

6) soojuskaod ümbritsevasse keskkonda ja auru läbipääsust ebatiheduste kaudu.

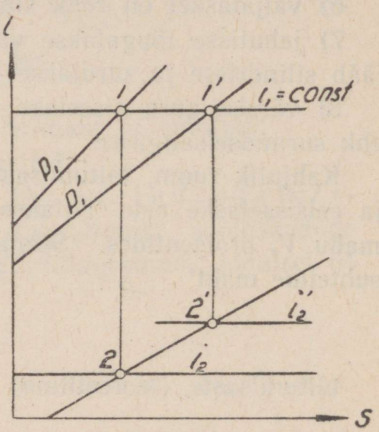
Siin me ei räägi mehaanilistest soojuskadudest, mis on seotud aurumasina silindris toimuva protsessiga.

62. Kaod auru muljumisest auru masinasse sisselaskmisel.

Soojuskaod auru muljumisest silindrisse sisselaskmisel tekivad sellest, et täitumisprotsessis osutub rõhk silindris, auru muljumise tõttu sisselaske-kanalites, väiksemaks aururõhust siibrikarbis (joon. 85). Rõhu lan-



Joon. 85. Kaod auru muljumisest ta sisselaskmisel aurumasinasse.



Joon. 86. Auru sisselaskmisel muljumisest tekkivate kadude määramine *i*—*s*-diagrammi järgi.

gus on seda suurem, mida suurem on auru liikumise kiirus; kõige väiksem on ta siis, kui kolb on surnudpunktis, ja ta suureneb sel määral, kui kolb eemaldub surnudpunktist keskkoha suunas. Seepärast väljendub auru sisselaske protsess mitte sirglõiguna *a*—*1*, vaid kõverana *a'*—*1'*. Auru muljumisest tekkiva auru töövõime kadu on võimalik määrata *i*-*s*-diagrammi abil (joon. 86).

Nagu teada on termodünaamikast, toimub muljumisprotsess auru jääval entalpial ja leppeliselt seda tähistatakse joonega *1*—*1'*.

Muljumise puudumisel auru ühe kg töövõime

$$l_0 = \frac{i_1 - i_2}{A} \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}.$$

Auru muljumise esinemisel

$$l_0' = \frac{i_1 - i_2'}{A} \frac{\text{kgm}}{\text{kg}},$$

kus A on töö termiline ekvivalent ja võrdub

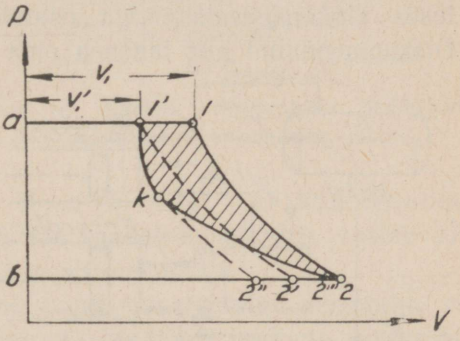
$$\frac{1}{427}\ \frac{\text{kcal}}{\text{kgm}}.$$

Toodud võrrandeid võrreldes näeme, et teisel juhul auru töövõime on väiksem.

Ülemääraste muljumiskadude vältimiseks auru maksimaalne kiirus sisselaske-akendes ei tohi ületada 50 m/sek küllastunud auru puhul ja 70 m/sek ülekuumendatud auru puhul.

63. Kaod algkondensatsioonist ja abinõud nendega võitlemiseks.

Need kaod seisavad järgmises. Silindrisse sisseminekul puutub värske aur kokku sisselaske-kanalite, kolvi ja silindri pindadega, mis on jahutatud töötanud auru poolt ja teatav osa värskest aurust kondenseerub. Selline kondensatsioon toimub mitte ainult sisselaske vältel, vaid ka paisumisprotsessi algul, niikaua kui auru temperatuur ei muutu võrdseks silindri seinte temperatuuriga. Pärast seda edasisel paisumisel ja eriti töötanud auru väljalaskmisel saab aur tagasi suurema osa soojusest, mis kulus seinte soojendamisele, kuid sellest soojusest on ainult väikest osa võimalik muundada tööks (paisumise lõpul), suurem osa temast aga läheb kasutult kaduma (väljalaske ajal). Graafiliselt neid algkondensatsioonist tingitud kadusid on võimalik kujutada p-v-diagrammil järgmisel viisil (joon. 87).



Joon. 87. Aurumasinas auru algkondensatsioonist tingitud kadude määramine.

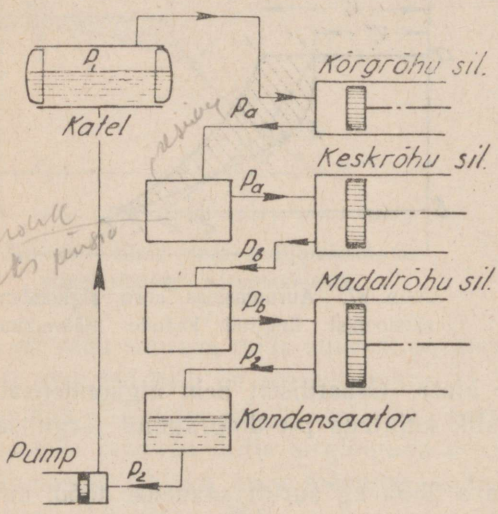
Oletame, et ideaalses aurumasinas ühelt kg aurult saadakse tööd, mis väljendub pindalaga $a12ba$. Seejuures värske auru 1 kg maht võrdub v_1. Seetõttu, et tegelikult auru sisselaskmisel temast osa kondenseerub, muutub ta maht väiksemaks (oletame, et võrdub v_1'-ga).

Kui sel momendil soojusvahetuse protsess auru ja silindriseinte vahel lõpeks, siis paisumiskõver läheks mööda adiabaati $1'$—$2'$. Kuna aga auru kondensatsiooni ja seinte soojenemise protsess jätkub veel paisumise teataval osal, siis tegelikult toimub paisumine mööda kõverat $1'k$, mis asub allpool adiabaati $1'$—$2'$. Punkt k iseloomustab seda momenti, millal auru temperatuur muutub võrdseks silindri seinte temperatuuriga.

Sellest momendist alates algab soojuse tagastamise protsess silindri seintelt aurule, kuna töötava auru temperatuur paisumise tõttu kogu aeg alaneb ja on siis madalam silindri seinte temperatuurist. Paisumiskõver kulgeb mööda joont *k2'''*, mis asub kõrgemal vastavast adiabaadist *k2''*. Seega väljendub algkondensatsiooni tõttu ühelt kg aurult saadud töö pindalaga *a'—1'—k—2'''—b—a*, mis on märgatavalt väiksem pindalast *a—1—2—b—a*.

Ühesilindrilises aurumasinas küllastunud auruga töötamisel võivad need kaod vähendada masina ökonoomsust 50% võrra ja enamgi. Alg- ja sisekondensatsioonist tingitud kadude vähendamiseks rakendatakse mitmeid abinõusid, ja nimelt: a) ülekuumendatud auru kasutamist, b) mitmekordset paisumist, c) aurusärki, d) pöörete arvu tõstmist, e) otsevoolu-põhimõtet.

Ülekuumendatud auru kasutamine. Kõige efektiivsemaks abinõuks võitluses algkondensatsiooniga osutub ülekuumendatud auru kasutamine. Ülekuumendatud aur läheneb oma omadustelt gaasidele. Temalt silindri seintele soojuse üleande teguriks on kõigest 150—300 kcal/m²h kraad, sel ajal kui küllastunud auru soojusülekande tegur on umbes 10 000 kcal/m²h kraad. Seepärast väheneb ülekuumendatud auru kasutamisel algkondensatsioon tugevasti, suure ülekuumenduse puhul aga pole üldse tähelepandav.



Joon. 88. Mitmekordse paisumisega aurumasina skeem.

Uurimuste kohaselt väheneb ülekuumenduse suurendamisel 0-st kuni 170°-ni seintele üleantud soojushulk 36,2-st kuni 9,3%-ni silindrisse sisseviidud auru soojushulgast.

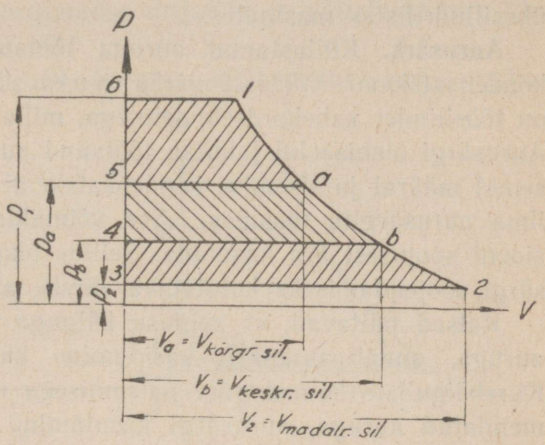
Mitmekordne paisumine. Mitmekordne paisumine seisab järgmises. Auru paisumine antud rõhu languse puhul (p_1 kuni p_2) toimub mitte ühes silindris, vaid järjestikku kahes või kolmes silindris. Kolmekordse paisumise skeemi on võimalik kujutada järgmisel viisil (joon. 88).

Aur saabub katlast rõhu all p_1 kõrgrõhusilindrisse, kus ta paisub mitte lõpprõhuni p_2, vaid mingi vahepealse väärtuseni p_a. Kõrgrõhu-

silindrist läheb töötanud aur esimesse kogujasse, mida nimetatakse esimeseks resiivriks, kus rõhk on ligikaudu püsiv ja võrdub p_a. Esimesest resiivrist läheb aur teise — keskrõhusilindrisse, kus ta paisub rõhult p_a kuni rõhuni p_b. Keskrõhusilindrist aur suundub teise resiivrisse. Teisest resiivrist aur läheb edasi madalrõhusilindrisse, kus ta paisub rõhult p_b kuni vasturõhuni p_2. Lõpuks aur läheb kondensaatorisse, kus ta muutub veeks.

Kondensaatorist antakse vesi pumba poolt katlasse.

Teoreetilisel p-v-diagrammil ühe kg auru töö, mida ta teostab kõrgrõhusilindris, väljendub pindalaga *1—a—5—6* (joon. 89), kusjuures kõrgrõhusilindri maht peab võrduma v_a. Ühe kg auru töö keskrõhusilindris on ekvivalentne pindalaga *5—a—b—4—5* ja keskrõhusilindri maht peab olema v_b. Ühe kg auru töö madalrõhusilindris vastab pindaladele *4—b—2—3—4* ja ta mahuks peab olema v_2.



Joon. 89. Rankini ringprotsess kolmekordse paisumisega aurumasina jaoks.

Nüüd vaatame, missugust tähtsust omab mitmekordne paisumine võitluses algkondensatsiooniga. On ilmne, et silindrisse juhitava värske auru jahtumine on seda suurem, mida suurem on värske ja töötanud auru temperatuuride vahe. Mitmekordse paisumise puhul on see vahe igas silindris väiksem, kui auru täielikul paisumisel ühes silindris. Näiteks, kui $p_1 = 16$ ata ja $p_2 = 0{,}1$ ata, värske auru temperatuur $t_1 = 200^0$ C ja töötanud auru temperatuur $t_2 = 44{,}5^0$ C, siis ühesilindrilises masinas vahe $t_1 - t_2 = 155{,}6^0$ C.

Kui aga paisumist teostada kolmes silindris ja seejuures oletada, et $p_a = 6$ ata ja $p_b = 2$ ata, siis saame sissemineva ja väljuva auru temperatuurid kõrgrõhusilindri jaoks 200 ja 158^0, keskrõhusilindri jaoks 158 ja 119^0 ja madalrõhusilindri jaoks 119 ja 44,4^0 C, s. t. et igas silindris temperatuuride vahe $t_1 - t_2$ kujuneb märksa väiksemaks. Kaod algkondensatsioonist esinevad kõigis kolmes silindris, kuid summaarne kadu väheneb tugevasti, esiteks seetõttu, et väheneb temperatuuride vahe ja väheneb kondenseeruv auru hulk, teiseks seetõttu, et soojus, mis läheb kaduma kõrgrõhusilindris, kasutatakse ära keskrõhusilindris, keskrõhusilindris

kadumaläinud soojus kasutatakse ära madalrõhusilindris ja ainult auru kondensatsioon madalrõhusilindris põhjustab märgatavaid soojuskadusid.

Tavaliselt moodustavad algkondensatsiooni kaod kahekordse paisumisega masinates umbes 80%, kolmekordse paisumisega aga 65% kadudest ühesilindrilistes masinates.

Aurusärk. Küllastunud auruga töötamisel on võimalik kasutada algkondensatsiooni vähendamiseks a u r u s ä r k i. Aurusärgiga masinates on töösilinder kahekordsete seintega, millede vahele juhitakse värsket auru. Aurusärgi olemasolul jahutab töötanud aur töösilindri seinu märksa väiksemal määral ja sisemise kondensatsiooni protsess lõpeb palju varem kui ilma aurusärgita masinas. See võimaldab suuremat osa algkondensatsiooni soojusest ära kasutada. Selline ökonoomia aga saavutatakse aurusärgi soojendamiseks kulutatava värske auru arvel.

Katsed näitavad, et aeglase käiguga masinates, mis töötavad niiske auruga, annab aurusärgi kasutamine kuni 20% säästu soojuse kulus. Kiirekäiguliste kolmekordse paisumisega masinates, mis töötavad ülekuumendatud auruga, aurusärgi kasutamine osutub täiesti ebaotstarbekohaseks.

Nüüdisaegsetes aurumasinate konstruktsioonides aurusärke kui masina ökonoomsuse tõstmise vahendeid ei kasutata.

Pöörete arvu suurendamine. Auru kondensatsioon on seda suurem, mida pikema aja vältel aur on kokkupuutumises silindri seintega. Seepärast pöörete arvu suurendamisel, s. t. iga ringprotsessile kuluva aja vähendamisel, väheneb auru kondensatsioon. Teiselt poolt aga pöörete arvu tõstmine põhjustab tavaliselt kadude suurenemist auru muljumisele auru sisse- ja väljalaskel.

Otsevoolu-põhimõtte mõju algkondensatsiooni vähendamisele käsitellakse edaspidi.

64. Kaod mitteküllaldasest paisumisest.

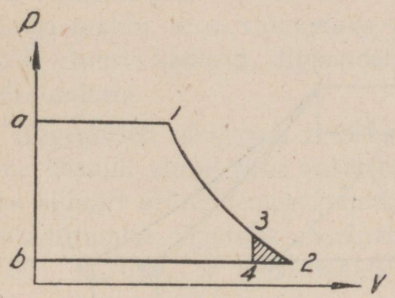
Teoreetilise protsessi vaatlemisel me oletasime, et auru paisumine aurumasina silindris toimub vasturõhuni p_2, mis on võrdne rõhuga kondensaatoris. Praktiliselt aga, eriti just madala vasturõhuga töötavates masinates, pole otstarbekohane viia paisumist lõpuni, s. t. kuni vasturõhuni p_2, kuna sellisel juhul oleks vaja töötada väiksema täitumisastmega ja masin kujuneks ülemäära kogukaks.

Tavaliselt lõpetatakse paisumine varem, näiteks punktis *3* punkti *2* asemel (joon. 90). Seejuures tekkivad töökaod väljenduvad joonisel 90 pindalaga *3—2—4*.

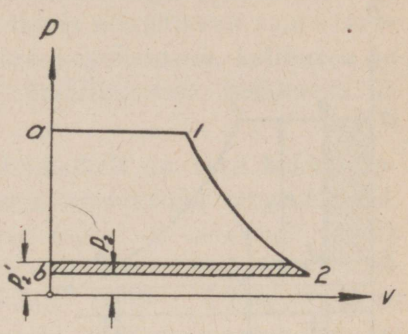
65. Kaod auru muljumisest väljalaskmisel.

Teoreetiliselt peaks auru rõhk silindris töötanud auru väljalaskmisel võrduma vasturõhuga p_2. Tegelikult on auru rõhk silindris veidi suurem (nimelt p_2'), selleks et katta aurujaotuse organite ja väljalaske-torustiku takistust.

Viirutatud pindala joonisel 91 kujutab töökadusid auru muljumisest väljalaskmisel. Suurte muljumiskadude vältimiseks auru kiirus väljalaske-akendes ei tohi ületada 50 m/sek masinatel, kus töötanud aur juhitakse atmosfääri, ja 70—90 m/sek kondensatsiooniga masinatel.



Joon. 90. Kaod mitteküllaldasest paisumisest.



Joon. 91. Kaod auru muljumisest masinast väljalaskmisel.

66. Kaod kahjulikus ruumis.

Kahjulikuks ruumiks nimetatakse seda osa silindri mahust, mis kolvi äärmistes seisangutes jääb kolvi ja silindripõhja vahele. Kahjuliku ruumi olemasolu on tingitud järgmisest:

1) praktiliselt pole võimalik ehitada masinat ilma kahjuliku ruumita;

2) on tarvilik omada aurupuhvrit inertsitungide kahjuliku mõju vähendamiseks surnudpunktide piirkonnas;

3) püütakse saada kokkusurumise lõpul küllalt kõrget rõhku, mis oleks lähedane värske auru rõhuga.

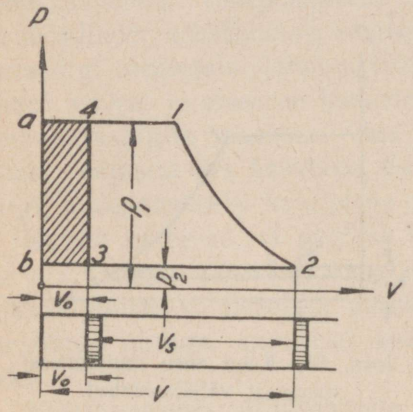
Kahjulik ruum aga mõjutab ebasoodsalt masina ökonoomsust, kuna esiteks toimub kahjuliku ruumi seintel auru algkondensatsioon ja teiseks tuleb kahjuliku ruumi täitmiseks kulutada teatav hulk auru, mis ei teosta kasulikku tööd.

Kui võrrelda ideaalset, ilma kahjuliku ruumita masinat masinaga, millel on kahjulik ruum, ja oletada, et üldse ei toimu kahjulikku ruumi jääva auru kokkusurumist, siis võime joonisel 92 toodud diagrammilt näha, et

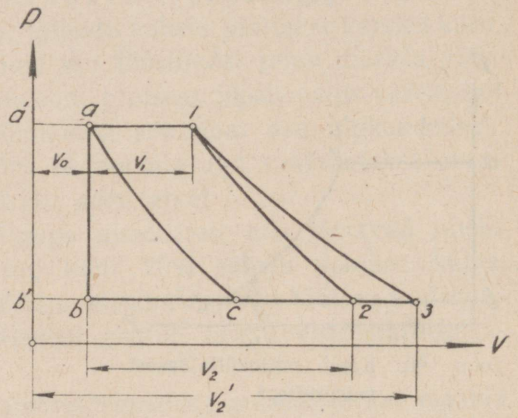
värske auru kulutamise tõttu kahjuliku ruumi täitmiseks on tekkivad töökaod ligikaudu ekvivalentsed viirutatud pindalaga *a—4—3—b*.

Neid kadusid on võimalik vähendada, kui rakendada töötanud auru kokkusurumist.

Töötanud auru täielikul kokkusurumisel kuni algrõhuni p_1 ja värske auru täielikul paisumisel kuni p_2 need kaod võrduksid nulliga.



Joon. 92. Kaod kahjulikus ruumis.



Joon. 93. Võitlus kadudega kahjulikus ruumis.

Tõepoolest, oletame, et meil on ideaalne aurumasin ilma kahjuliku ruumita.

Ühe kg auru töö niisuguses masinas väljendub pindalaga *a12b* (joon. 93). See pindala aga

$$l_0 = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \qquad (67)$$

Kui meil aga on olemas aurumasin kahjuliku ruumiga V_0, kuid töötanud auru täieliku kokkusurumisega mööda joont *ca*, siis värske auru ühele kg-le taandatud töö väljendub pindalaga *a—1—3—c—a*.

Tõestame, et pindala *a—1—3—c—a* on võrdne pindalaga *a—1—2—b—a* eeldusel, et jooned *1—3* ja *ca* on adiabaadid.

Pindala *a—1—3—c—a* on võrdne pindalaga *a'—1—3—b'—a'* miinus pindala *a'—a—c—b'—a'* ja avaldub:

$$\frac{k}{k-1} p_1 (v_1 + v_0)\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] - \frac{k}{k-1} p_1 v_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] =$$

$$= \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \qquad (68)$$

Kuid just selline on avaldis pindala *a—1—2—b* jaoks (vt. võrrand (67)).

Järelikult ühe kg auru teoreetiline töö on ühesugune kahjuliku ruumiga aurumasinas, mis töötab töötanud auru täieliku kokkusurumisega ja täieliku paisumisega, kui ka masinas kahjuliku ruumita.

Kuid kahjuliku ruumita masinas silindri täismaht peab võrduma v_2-ga, kuna kahjuliku ruumiga masinas silindri täismaht v_2' on märksa suurem kui v_2. Seega on teoreetiliselt võimalik kompenseerida kahjuliku ruumi negatiivset mõju töötanud auru täieliku kokkusurumisega. Praktiliselt aga pole võimalik seda saavutada, sest siis oleks tarvis märgatavalt suurendada silindri mahtu, s. o. valmistada masin märksa kogukamana, kallimana ja kanda suuri kadusid algkondensatsioonist ümbritsevasse keskkonda ja hõõrdumisele.

Kogemused näitavad, et ökonoomsuse seisukohalt on auru kokkusurumine kasulik ainult selle momendini, kui auru temperatuur muutub võrdseks silindri seinte temperatuuriga. Niisugusel korral on tavaliselt vajalik kokkusurumise lõpprõhk masinatel, milledel väljalase toimub atmosfääri, $(0{,}50 \ldots 0{,}75)p_1$, ja kondensatsiooniga masinatel $(0{,}15 \ldots 0{,}25)p_1$. Kahjuliku ruumi suhteline maht σ, sõltuvalt masina tüübist, muutub suurtes piirides 1,5 kuni 18%-ni. Otsevoolumasinatel on ta piirides 1,5 kuni 3%, klappidega aurujaotuse puhul 3 kuni 8%, karpsiibritega masinatel 5 kuni 10% ja silindriliste siibritega masinatel 5 kuni 12% ning erijuhtudel ka kuni 18%.

67. Soojuskaod ümbritsevasse keskkonda ja auru läbipääsust ebatiheduste kaudu.

Soojuskaod ümbritsevasse keskkonda (soojuse ülekanne kiirgamise ja konvektsiooni teel) pole aurumasinates kuigi suured, sest silinder kaetakse tavaliselt isolatsioonikihiga asbestist ja vildist.

Auru läbilaskmisest tingitud kaod sõltuvad masina konstruktsioonist ja seisukorrast. Aurukaod võivad olla n ä h t a v a d (tihenduspukside ja kraanide kaudu), milledega on kerge võidelda, ja n ä h t a m a t u d (aurujaotuse organite ja kolvirõngaste kaudu). Aurujaotuse organitest esinevad suurimad kaod karpsiibrites, väikseimad kaod — silindrilistes siibrites ja ventiilides. Auru läbilaskmine kolvirõngaste kaudu sõltub silindri seinte kulumisest, rõngaste kvaliteedist, silindri läbimõõdust ja auru rõhkude vahest mõlemal pool kolbi.

Nende kadudega on võimalik võidelda ainult hoolika remondiga, avastada aga neid on võimalik ainult indikaatoriga.

Tavaliselt on auru läbilaskmise kaod ühesilindrilistes masinates, mis töötavad küllastunud auruga:

$$D_i''' = \frac{8{,}8}{\sqrt{N_i C_m}} + \frac{1}{2C_m}, \qquad (69)$$

kus D_i''' on aurukaod ebatiheduste kaudu, kg/tund ühe JHJ kohta;
N_i — masina indikaatorivõimsus, JHJ;
C_m — kolvi keskmine kiirus, m/sek.

68. Kasutegurid.

Termiline kasutegur. Ideaalne jõuseade, mis töötab Renkini ringprotsessi järgi, omab kasutegurit, mis on määratav valemiga:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - ct_2} = \frac{Al_0}{i_1 - ct_2}, \qquad (70)$$

kus i_1 on värske auru entalpia masinasse voolamisel;
i_2 — töötanud auru entalpia vastavalt rõhule kondensaatoris;
t_2 — katla toitevee temperatuur °C;
c — toitevee erisoojus $\frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}$, mis tavaliselt on võrdne ühega.

Selle kasuteguri väärtus kõigub piirides 0,15 kuni 0,40. Masinasse saabuva auru algrõhu ja ülekuumendustemperatuuri tõstmisega ja masinast lahkuva auru rõhu alandamisega termiline kasutegur suureneb.

Suhteline indikaatorlik kasutegur. Ideaalses aurumasinas ühe kg auru töö väljendub valemiga:

$$l_0 = \frac{i_1 - i_2}{A}.$$

Tegelikult aga esinevad masinas mitut liiki soojuskaod ja järelikult teoreetilise töö asemel saame masinas tegeliku ehk indikaatorliku töö l_i, mis graafiliselt on kujutatud joonisel 94 viirutamata pindalaga.

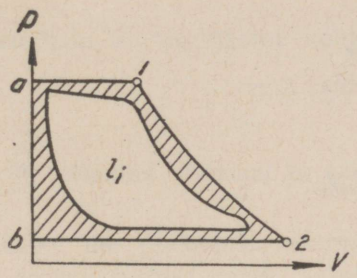
Diagrammil viirutatud pindala kujutab soojuskadusid, mis on tingitud masina konstruktsiooni ebatäiuslikkusest.

Tegeliku indikaatoridiagrammi ja teoreetilise diagrammi pindalade suhe näitab indikaatoridiagrammi täielikkuse astet ja sisuliselt on kasuteguriks, mida nimetame i n d i k a a t o r l i k u k s ehk sisemiseks suhteliseks kasuteguriks:

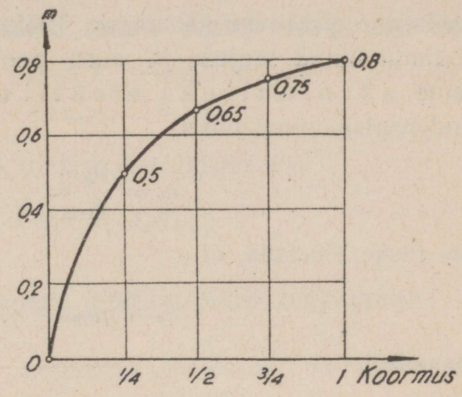
$$\eta_{oi} = \frac{l_i}{l_o}.$$

Sisemine suhteline kasutegur sõltub aurumasina konstruktsioonist ja seisukorrast ning kõigub piirides 0,40 kuni 0,85.

Mehaaniline kasutegur. Masinas esinevad veel hõõrdumiskaod (kolb,



Joon. 94. Summaarsed soojuskaod.



Joon. 95. η_m sõltuvus masina koormusest.

vändamehhanism jne.). Need kaod arvestatakse mehaanilise kasuteguriga η_m, mille all mõistetakse efektiivse töö l_e ja indikaatorliku töö l_i suhet:

$$\eta_m = \frac{l_e}{l_i}, \tag{71}$$

ehk

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_r}{N_i} = 1 - \frac{N_r}{N_i} \tag{72}$$

kus N_r on võimsus, mis kulutatakse masinas endas hõõrdumisele ja abimehhanismide käitamisele;

N_i — indikaatorlik võimsus;

N_e — efektiivne võimsus;

N_o — teoreetiline võimsus.

Täiskoormuse puhul masina mehaaniline kasutegur moodustab 80—94%. Märgime, et η_m sõltub masina koormusest ja koormuse vähenemisel alaneb, nagu see järgneb valemist (72), kui silmas pidada, et võimsus N_r on suuruseks, mis peaaegu ei muutu koormuse muutumisel. Joonisel 95 näidatud diagramm kujutab η_m sõltuvust koormusest.

Suhteline efektiivne kasutegur. Masina efektiivse ja teoreetilise võim-

suse suhet nimetatakse suhteliseks efektiivseks kasuteguriks.

$$\eta_{oe} = \frac{N_e}{N_o} = \frac{l_e}{l_o} = \frac{l_i}{l_o} \cdot \frac{l_e}{l_i} = \eta_{oi} \cdot \eta_m. \tag{73}$$

Absoluutne efektiivne kasutegur. Tööks masina võllil (s. o. efektiivseks tööks) muundunud soojuse ja auru poolt kulutatud kogusoojuse suhet nimetame absoluutseks efektiivseks kasuteguriks.

Kondensatsioonmasinatel

$$\eta_e = \frac{Al_e}{q_1} = \frac{Al_e}{i_1 - ct_2}. \tag{74}$$

Pole raske tõestada, et

$$\eta_e = \eta_t \eta_{oe} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m. \tag{75}$$

Tõepoolest —

$$\frac{Al_e}{i_1 - ct_2} = \frac{Al_o}{i_1 - ct_2} \cdot \frac{Al_e}{Al_o} = \eta_t \eta_{oe} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m.$$

Absoluutne efektiivne kasutegur arvestab kõiki kadusid aurumasinas, seehulgas ka kondensaatorisse antavat soojust.

Absoluutne efektiivne kasutegur η_e kõigub piirides 0,10 kuni 0,25. Kasuteguri η_e madalad väärtused vastavad väikese võimsusega masinatele, mis töötavad auru väljalaskega atmosfääri, ta kõrged väärtused aga vastavad kondensatsiooniga ja kolmekordse paisumisega masinatele, mis töötavad kõrgrõhuauruga.

69. Auru kulu.

Ideaalses masinas ühe kg auru teoreetiline töö määratakse valemiga

$$l_o = \frac{1}{A}(i_1 - i_2) = \frac{l}{A} h_o \frac{\text{kgm}}{\text{kg}},$$

s. t. ta on võrdeline adiabaatilise entalpia langusega h_o.

1 HJ-tund on ekvivalentne

$$75 \cdot 3600 \frac{1}{427} = 632{,}3 \text{ kcal}.$$

Järelikult teoreetiline auru kulu 1 HJ kohta tunnis on

$$d_o = \frac{270000}{l_o} = \frac{632{,}3}{i_1 - i_2} = \frac{632{,}3}{h_o} \text{ kg/HJ tund} \tag{76}$$

Auru kulu ühe indikaator-HJ kohta tunnis osutub ilmselt suuremaks, ja nimelt:

$$d_i = \frac{632{,}3}{(i_1 - i_2)\,\eta_{oi}} = \frac{632{,}3}{h_o \eta_{oi}}. \qquad (77)$$

Auru kulu ühe efektiivse HJ kohta tunnis osutub veelgi suuremaks:

$$d_e = \frac{d_i}{\eta_m} = \frac{632{,}3}{(i_1 - i_2)\,\eta_{oi}\eta_m} = \frac{632{,}3}{h_o \eta_{oe}}.$$

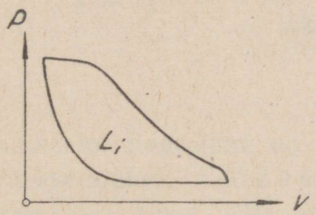
Auru kulu tunnis masina kohta määratakse järgmiselt:

$$D = d_e N_e = d_i N_i = d_o N_o.$$

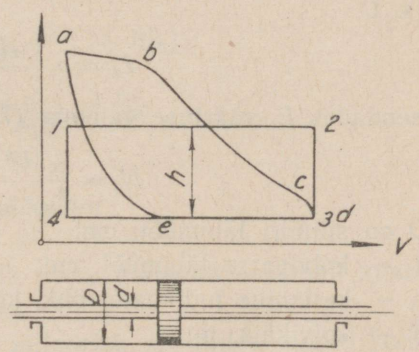
70. Masina võimsus ja keskmise indikaatorrõhu määramine.

Eespool me rääkisime masina indikaatorvõimsusest ja efektiivvõimsusest ja määrasime nende vahelise seose. Selgitame nüüd indikaatorvõimsuse määramise küsimust.

Indikaatorvõimsuseks on võimsus, mida arendab masin silindri sees; seda saab arvutada indikaatoridia-



Joon. 96. Indikaatoridiagramm.



Joon. 97. Keskmise indikaatorrõhu määramine planimeetri abil.

grammi järgi järgmisel viisil. Olgu antud indikaatoridiagramm (joon. 96), millel on kujutatud töö L_i, mida aur sooritab silindri vasakul poolel masina ühe pöörde või kolvi kahe käigu vältel. Kui masin on ühe silindriga ja teeb n pööret minutis, siis võimsus masina silindri vasakul poolel on ilmselt võrdne

$$N_i = \frac{L_i n}{60 \cdot 75}\ \text{IHJ}. \qquad (78)$$

Tööd L_i valemis (78) väljendatakse tavaliselt keskmise indikaatorrõhuga. Selleks, et määrata ta suurust, taandame indikaatoridiagrammi võrdse pindalaga ristkülikuks, mille alus on võrdne indikaatoridiagrammi pikkusega (joon. 97), s. o. nii, et pindala *a—b—c—d—e* võrduks pindalaga *1—2—3—4*.

Ristküliku *1—2—3—4* kõrgust h, väljendatult atmosfäärides, nimetatakse keskmiseks indikaatorrõhuks ja tähistatakse p_i-ga, s. t.

$$p_i = \frac{h}{m},$$

kus m on ordinaatide telje mõõt, mis näitab, mitu millimeetrit vastab ühele atmosfäärile (sellele vastavalt tuleb h võtta millimeetrites).

Teades p_i, pole raske leida L_i. Tõepoolest, kui kolvi pindala on F_1, kolvivarre ristlõige aga F_2, siis keskmine jõud, millega aur mõjub kolvile

$$p_i = p_i\ (F_1 - F_2) = p_i\ \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}, \qquad (79)$$

kus D on kolvi läbimõõt;

d — kolvivarre läbimõõt.

Indikaatortöö ühe pöörde kohta on võrdne $p_i S$, kus S on kolvikäik, s. t.

$$L_i = p_i\ \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} S. \qquad (80)$$

Asendades L_i väärtuse valemis (78), saame

$$N_i = \frac{\pi}{4} \frac{(D^2 - d^2) p_i S n}{60 \cdot 75}, \qquad (81)$$

kus D on silindri läbimõõt, cm;

d — kolvivarre läbimõõt, cm;

p_i — keskmine indikaatorrõhk, kg/cm²;

S — kolvikäik, m;

n — pöörete arv minutis.

Me arvutasime ühesilindrilise masina ühe silindripoole võimsuse. Kui masin on kahepoolse tööprotsessiga, siis teise silindripoole võimsust arvutatakse täpselt samuti ja masina kogu võimsus väljendub mõlema silindripoole võimsuste summana.

Mitmesilindrilise masina kogu võimsus võrdub üksikute silindrite võimsuste summaga.

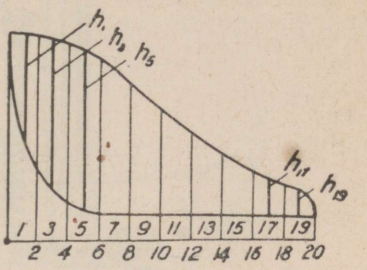
Keskmist indikaatorrõhku, mis leidub valemis (81), on võimalik määrata mitmesugusel viisil, kõige sagedamini aga määratakse p_i planimeetri abil.

Planimetreerides indikaatoridiagrammi, leitakse kontuuriga piiratud pindala f ruutmillimeetrites ja jagades f diagrammi pikkusega s, saadakse kõrgus h; jagades h diagrammi kõrgusmõõduga m, leitakse p_i, s. t.

$$p_i = \frac{f}{s \cdot m}. \qquad (82)$$

p_i määramisel jagatakse indikaatoridiagrammi pikkus 20 võrdseks osaks (joon. 98). Paarituarvulistest jaotuspunktidest (1, 3, 5 jne.) läbi tõmmatakse diagrammi sees vertikaaljooned.

Pole raske näha, et iga selline joon osutub keskjooneks trapetsitel, mis on moodustatud paarisarvulistest jaotuspunktidest läbitõmmatud vertikaaljoontest ja diagrammi joone lõikudest. Trapetsi pindala võrdub keskjoone ja kõrguse korrutisega. Kõrgus on kõikidel trapetsitel ühesugune ja võrdub $\frac{s}{10}$. Kogu indikaatoridiagrammi pindala võrdub kõikide trapetsite pindalade summaga, s. t.



Joon. 98. Keskmise indikaatorrõhu määramine.

$$f = \frac{s}{10}(h_1 + h_3 + \ldots + h_{19}),$$

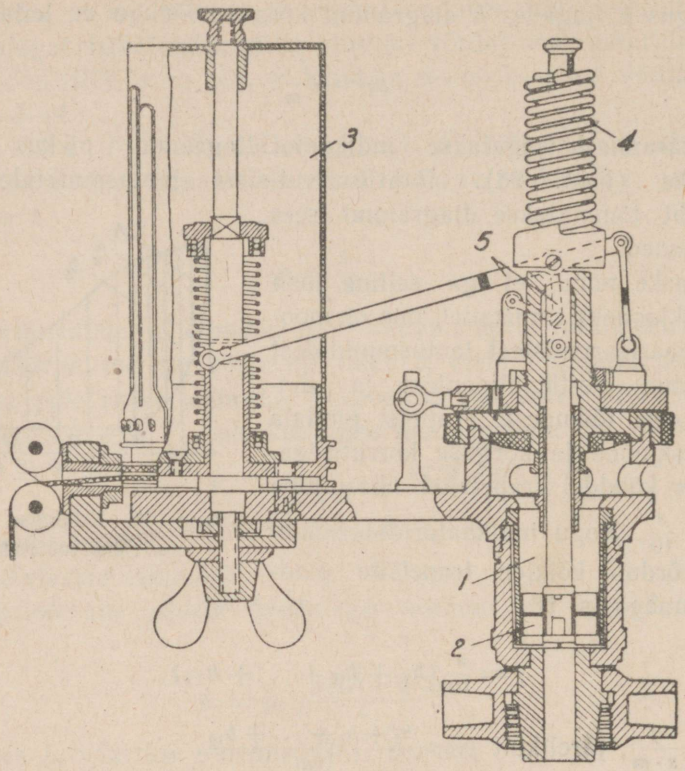
kuid $p_i = \frac{f}{s \cdot m}$, järelikult $p_i = \frac{h_1 + h_3 + \ldots + h_{19}}{10m}$.

71. Indikaator.

Indikaatoridiagrammi on võimalik võtta töötavalt masinalt riista abil, mida nimetatakse indikaatoriks.

Indikaator (joon. 99) koosneb silindrist *1*, milles liigub kolb *2*, ja trumlist *3*, millele peale on keeratud paber indikaatoridiagrammi jaoks. Indikaatori silinder ühendatakse kolmekäigulise kraani abil aurumasina silindriga. Auru rõhumine indikaatori kolvi all tasakaalustatakse kalibreeritud vedruga *4*, mis ühe otsaga on kinnitatud indikaatori kerele, teise otsaga aga selle kolvivarrele. Igale aururõhule vastab kolvi ja järelikult ka kirjutusmehhanismi *5* kindel asend. Viimane on seotud indikaatori kolvivarrega ja seepärast ta märgib selle rõhu pliiatsi abil trumlile pealekeeratud paberile. Igale kolvi asendile aurumasina silindris vastab indikaatoritrumli kindel pöördenurk, kuna trummel on nööri abil seotud käigu-

vahendaja kaudu aurumasina kolvivarrega. Sel viisil saame trumlil asetseval paberil indikaatoridiagrammi.



Joon. 99. Indikaator.

XV peatükk.

Aurujaotus.

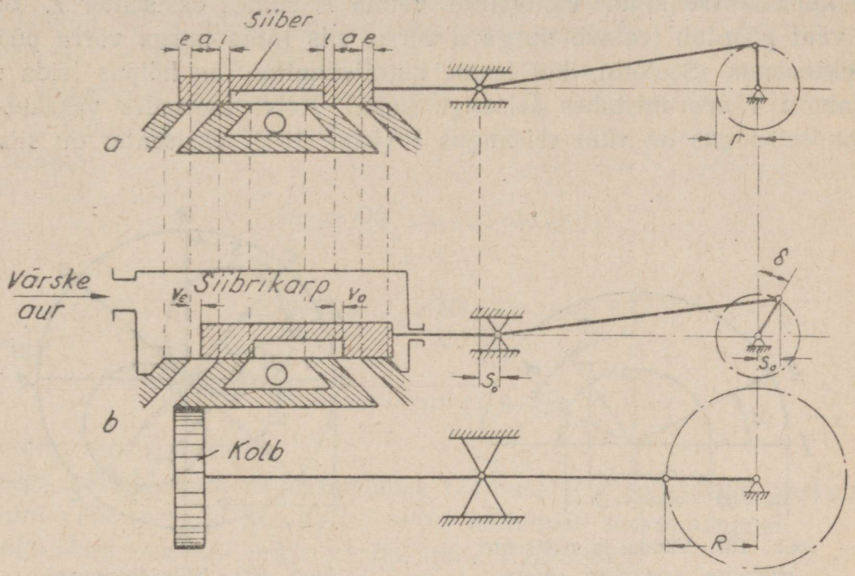
Aurujaotus võib olla siibritega (lamedate või silindrilistega), klappidega, kraanidega ja sega-aurujaotus. Aurujaotus võib olla jääva või muutuva täitumisega.

72. Siibritega aurujaotus.

Jääva täitumisega siibrid. Ülekatetega lame karpsiiber. Siibri töötamise skeem on kujutatud joonisel 100. Siiber saab liikumise ekstsentrilt ekstsentrilisusega r. Kui ekstsenter on vertikaalses seisangus, siis siibri tõmmitsa lõpmata suure pikkuse puhul siiber asetseb sümmeetriliselt

akende suhtes, mis ühendavad siibrikarpi silindriga. Tähistame akna laiuse a-ga, välise ülekatte suuruse e-ga, sisemise ülekatte suuruse i-ga.

Vaatleme siibri asendit juhul, kui kolb on äärmises vasakpoolses surnudseisangus (joon. 100). Sel momendil peab toimuma värske auru sisse-



Joon. 100. Karpsiibri töötamise skeem.

lase silindri vasakpoolsesse ossa ja töötanud auru väljalase parempoolsest osast. Selleks peab siiber olema välja nihutatud oma keskmisest seisangust paremale poole suuruse s_o võrra, mis võrdub suuruste summaga:

$$s_o = e + v_e,$$

kus e on väline ülekate;

v_e — akna avamismäär (lineaarne eelsisselase).

Ekstsenter peab seejuures olema pöördunud vertikaalsest seisangust paremale teatava nurga δ võrra, mida nimetatakse *ettetõtte-nurgaks*. Pole raske näha, et

$$s_o = r \sin \delta;$$
$$v_e = s_o - e = r \sin \delta - e.$$

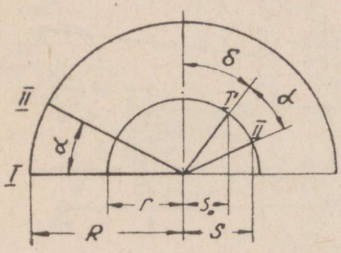
Samal ajal paremalt poolt aken on avatud suuruse v_a võrra, mida nimetatakse *lineaarseks eelväljalaskeks* ja mis võrdub:

$$v_a = s_o - i,$$

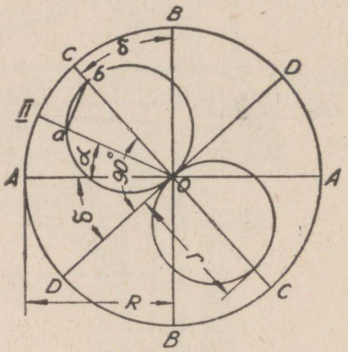
s. t.

$$v_a = s_0 - i = r \sin \delta - i.$$

Nurka $90 + \delta^0$ nimetatakse kinnitusnurgaks, kuna selle nurga alla kinnitatakse kiilul väntvõllile vända R suhtes ekstsenter r. Seega, kui vänt pöördub teatava nurga α võrra, siis sama nurga võrra pöördub ka ekstsenter. Seetõttu, kui teame kinnitusnurka, on hõlpus leida siibri seisangut vända mistahes seisangu puhul. Kolvi asetsedes vasakpoolses surnudseisangus on vänt seisangus I (joon. 101); ekstsenter on siis sei-



Joon. 101. Vända ja ekstsentri suhtelise asetamise skeem.



Joon. 102. Siibridiagramm.

sangus I′. Vända pöördumisel nurga α võrra pöördub ekstsenter samuti nurga α võrra ja seejuures teekond, mille võrra siiber on eemaldunud oma keskmisest seisangust, on:

$$s = r \sin (\delta + \alpha).$$

Muutes α väärtusi piirides 0 kuni 360°, saame s väärtused piirides $+r$ kuni $-r$, s. t. siibri äärmisest parempoolsest seisangust kuni äärmise vasakpoolse seisanguni. Seega on vända iga seisangu jaoks võimalik leida siibri seisang ja järelikult ka akna avamise määr auru sisselaskeks $v_e = s - e$ ja auru väljalaskeks $v_a = s - i$. Kirjeldatud viis siibri seisangu leidmiseks akende suhtes pole käepärane. Lihtsa ja näitliku graafilise lahendusviisi annab nn. siibridiagramm.

Siibridiagramm. Läbi vända raadiusega R tõmmatud ringi keskpunkti (joon. 102) tõmbame vertikaalse ja horisontaalse diameetri. Nurga δ all vertikaalsele diameetrile BB tõmbame läbi ringi keskpunkti O vända pöörlemisele vastassuunas sirge CC ja sellel ehitame kaks ringi ekstsentri raadiusega võrduva läbimõõduga. Väikese ringi mistahes kõõl oa,

kui see on tõmmatud läbi suure ringi keskpunkti joonele OA nurga all α, võrdub siibri hälbimisega ta keskseisangust vända pöördumisel nurga α võrra ta vasakust horisontaalsest seisangust. Seejuures ülemise abiringi kõõlud näitavad siibri kõrvalekaldumist keskseisangust paremale, alumise ringi kõõlud — ta hälbimist keskseisangust vasakule.

Oletame, et vänt on pöördunud teatava nurga α võrra vasakust äärmisest seisangust ja asetseb seisangus O—II; siis joonlõik Oa võrdub siibri hälbimisega ta keskseisangust paremale. Tõepoolest, kolmnurgast Oab leiame:

$$Oa = Ob \cdot \sin (\angle abO).$$

Kuid

$$\angle abO = \angle aOD = \alpha + \delta,$$

järelikult

$$Oa = s = r \sin (\delta + \alpha),$$

mida oligi tarvis tõestada.

Seega näitab suure ringi mistahes raadiuse lõik selle ringi keskpunktist kuni väikese ringi kontuurini siibri hälbimist keskseisangust.

Kuid akna avamise määr värske auru sisselaskeks

$$v_e = s - e,$$

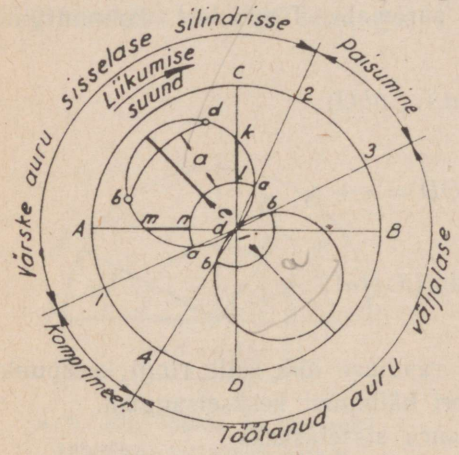
ja töötanud auru väljalaskeks

$$v_a = s - i.$$

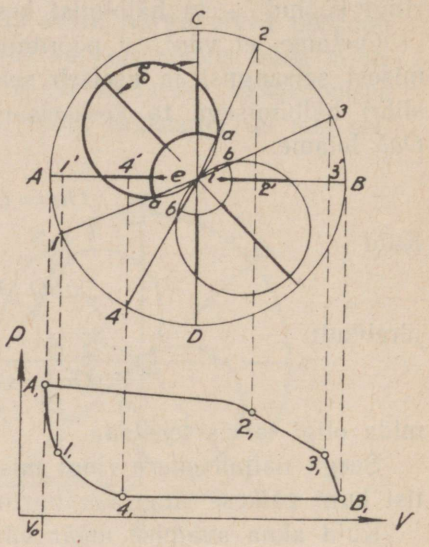
Järelikult, kui me keskpunktist O (joon. 103) raadiusega, mis võrdub e-ga, tõmbame ülemise väikese ringi sisse kaare aa, raadiusega aga, mis võrdub i-ga, tõmbame alumise väikese ringi sisse kaare bb, siis saame täieliku pildi siibri tööst [1]. Siiber hakkab avama akent värske auru sisselaskeks, kui vänt on seisangus *1*. Vända äärmises vasakpoolses seisangus on värske auru sisselaskeaken avatud joonlõigu mn võrra. Vända keskasendis, s. o. vertikaalses asendis, on aken avatud joonlõigu kl võrra. Vända asetsedes seisangus *2*, võrdub akna avamise määr nulliga, s. t. auru sisselase on lõppenud.

[1] Selleks, et määrata vända pöördenurka, mille ulatuses sisselase toimub akna täies laiuses, tõmbame keskpunktist O raadiusega $e + a$ ülemisele abiringile kaare bd. Selle kaare ja abiringi lõikepunktide b ja d vaheline osa bd vastabki täielikult sisselaskele avatud aknaga. Ehitades alumisele abiringile punktist O kaare raadiusega $i + a$, saame analoogiliselt määrata väljalaskeperioodi osa, mis toimub täielikult avatud aknaga.

Alumisel väiksemal ringil me saame jälgida akna avamise määra töötanud auru väljalaskeks: töötanud auru väljalase algab vända seisangus, mis vastab punktile *3*, lõpeb aga vända asendis *4*. Järelikult vända liikudes kellaosuti suunas punktist *1* punktini *2*, toimub värske



Joon. 103. Diagramm ülekatetega siibrile.



Joon. 104. Siibri- ja indikaatoridiagrammi vaheline seos.

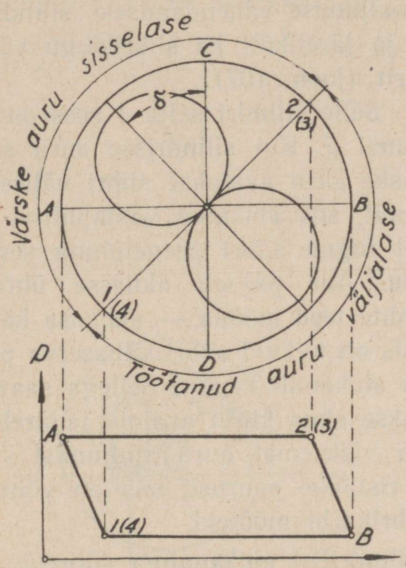
auru sisselase (vahemaa *1—A* vastab eelsisselaskele), punktist *2* punktini *3* toimub auru paisumine, punktist *3* punktini *4* — väljalase (vahemaa *3—B* vastab eelväljalaskele) ja punktist *4* punktini *1* — silindrisse jäänud töötanud auru kokkusurumine.

Siibri- ja indikaatoridiagrammide vaheline seos. Siibridiagrammi järgi on väga hõlpus ehitada indikaatoridiagrammi.

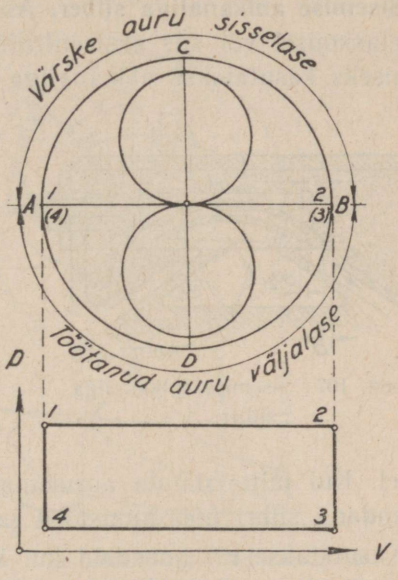
Kui vända põlv *A* (joon. 104) liigub ühtlaselt mööda ringjoont *ACBD*, siis kepsu lõpmata suure pikkuse puhul kolb liigub nii, nagu punkti *A* projektsioon mööda läbimõõtu *AB*; kui vänt asetseb punktis *A*, siis ka kolb asetseb punktis *A*; kui vänt asetseb punktis *C*, siis kolb asetseb ringi keskpunktis; kui vänt on punktis *3*, siis kolb punktis *3'* jne.

Siibridiagrammi alla paigutame koordinaatide süsteemi *p-v*, kusjuures ordinaatide telje *p* nihutame vasakule kolvi äärmisest asendist kahjuliku ruumi suuruse V_0 võrra, ja ehitame selles koordinaatide süsteemis indikaatoridiagrammi. Siibridiagrammi järgi vända liikudes punktist *A* punktini *2* ja kolvi liikudes punktist *A* kuni *2'*-ni toimub värske

auru sisselase; sellele vastavalt saadakse indikaatoridiagrammil sisselaskekõver A_1—2_1. Siibridiagrammi järgi vahemikus *2—3* toimub auru paisumine ja indikaatoridiagrammil saadakse paisumiskõver 2_1 — 3_1. Siibridiagrammil *3—B* vastab eelväljalaskele, indikaatoridiagrammil saadakse rõhu langus mööda kõverat 3_1—B_1 ligikaudu kuni antud vasturõhuni. Siibridiagrammi järgi vastab *B—4* töötanud auru väljalaskele jääva rõhu juures, indikaatoridiagrammil see väljendub sirgega B_1—4_1. Edasi vastab



Joon. 105. Indikaatori- ja siibridiagramm ilma ülekateteta siibrile, kui ettetõttenurk ei võrdu nulliga.



Joon. 106. Indikaatori- ja siibridiagramm ilma ülekateteta siibrile, kui ettetõttenurk võrdub nulliga.

siibridiagrammi järgi *4—1* auru kokkusurumisele, kuna indikaatoridiagrammil saadakse vastav kokkusurumiskõver 4_1—1_1.

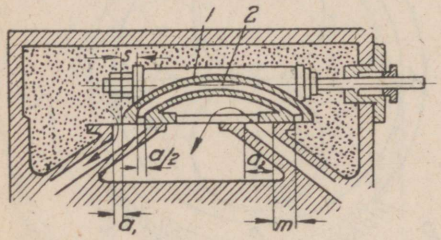
Lõpuks vastab siibridiagrammi järgi *1—A* eelsisselaskele, kuna indikaatoridiagrammil sellele vastab joon 1_1—A_1, mis näitab rõhu tõusu silindris kuni värske auru rõhuni.

Lihtne ilma ülekateteta karpsiiber. Ilma ülekateteta siibriks nimetatakse sellist siibrit, millel väline ülekate *e* ja sisemine ülekate *i* on võrdsed nulliga.

Pole raske näha, et niisuguse siibri kasutamisel puudub auru paisumine ja kokkusurumine; indikaatoridiagramm võtab kuju *1A2B* (joon. 105), kusjuures *1—A* on eelsisselase, *A—2* — täitumine, *2—B* — eelväljalase, *B—1* — väljalase.

Kui niisuguse aurujaotuse puhul ettetõttenurk δ võrdub nulliga, siis indikaatoridiagramm võtab ristküliku kuju (joon. 106). Niisuguses masinas täitumisaste võrdub 100%-ga, auru paisumine puudub. Säärase aurujaotusega masinad on äärmiselt ebaökonoomsed; seesugust aurujaotust võidakse rakendada väikestes masinates, kui on nõutav masina eriline kompaktsus ja kui auru kulu ei oma erilist tähtsust, samuti ka masinates, millede töötanud aur kasutatakse ära tootmisprotsessis.

Sisemise abikanaliga siiber. Auru muljumise vähendamiseks silindrisse sisselaskmisel või siis ekstsentrilisuse ja järelikult ka siibrikäigu vähendamiseks kasutatakse abikanaliga siibrit (joon. 107).



Joon. 107. Sisemise abikanaliga siiber.

Selle silindri selja *1* sees on abikanal *2*. Kui silindrisse auru sisselaske aken avatakse siibri välisserva poolt, siis abikanal vastupidisel küljel liigub siibri peegelpinna servast üle. Aur pääseb aknasse ühtaegu kahte teed mööda — aknaosa kaudu, mis on avatud siibri välisserva poolt, ja abikanali kaudu. Sellega saavutatakse akna kiiret avamist ja järelikult ka väiksemat auru muljumist sisselaskel. Kui mitte muuta aurukanalite ristlõike suurust, siis on võimalik vähendada siibri hõõrdumistööd ja siibrikarbi mõõteid.

Kasutatakse nii lamedaid kui ka silindrilisi abikanaliga siibreid.

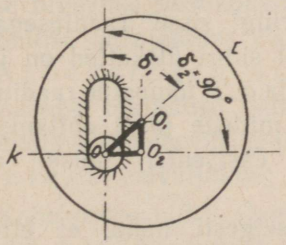
Silindrilised siibrid. Lamedad siibrid on lihtsa ehitusega, kuid neid on võimalik kasutada ainult auru rõhu puhul mitte üle ca 8 atü. Suurtel rõhkudel sellised siibrid surutakse suure jõuga vastu peegelpinda ja nad suruvad siis enda alt õli välja; seetõttu kuluvad kiiresti hõõrdepinnad, suureneb märgatavalt hõõrdumisjõud ning suureneb järelikult ka siibri käitamiseks kulutatav töö (üheaegselt suureneb auru läbipääs ebatihedustest). Tuleb ka märkida, et lamedad siibrid ei ole kohased töötamiseks ülekuumendatud auruga: auru kõrgetel temperatuuridel nad kaarduvad. Ülekuumendatud auru maksimaalne lubatav temperatuur lamedate siibrite kasutamisel on 230—240° C.

Lamedate siibrite loeteldud puudused on kõrvaldatud tasakaalustatud ümmargustes ehk silindrilistes siibrites. Selline siiber kujutab endast just nagu lamedat siibrit, mis on pööratud silindriks siibrivarre telje ümber ja mis liigub silindrilise kujuga siibrikarbis. Töötamise põhimõte sellisel siibril on samasugune, nagu lamedal siibrilgi.

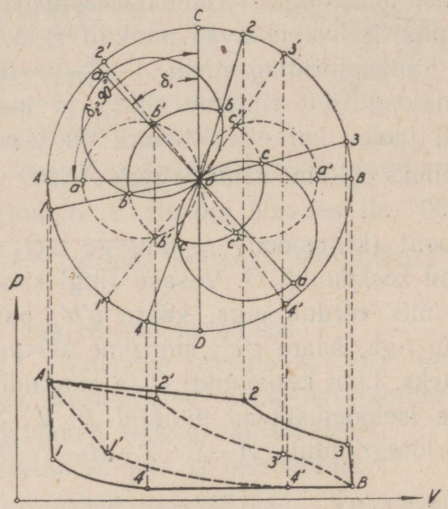
Muutuva täitumisastmega siibrid. Muutuva täitumisega

lamedad siibrid. Eespool vaadeldud siibrite tüübid, kui ekstsenter istub võllil jäigalt, annavad püsiva täitumise. Järelikult silindrisse sisselastava värske auru maht ei muutu masina koormuse muutumisel. Masina võimsuse muutmist sel juhul teostatakse auru muljumisega, s. o. värske auru rõhu vähendamisega muljumise kaudu, mis märgatavalt suurendab auru erikulu masina alakoormuste puhul.

Nüüdisaegsetes masinatüüpides kasutatakse enamalt jaolt teist reguleerimisviisi — täitumisega reguleerimist. Niisuguse reguleerimise puhul



Joon. 108. Muutliku ekstsentrilisusega ekstsentri skeem.



Joon. 109. Siibri- ja indikaatoridiagrammi muutumine võimsuse reguleerimisel ekstsentrilisuse ja ettetõttenurga muutmisega.

silindrisse sisselastava auru rõhk jääb püsivaks, muutub aga sõltuvalt masina koormusest täitumisaste.

Lamedate siibrite puhul teostatakse täitumise muutmist tavaliselt ekstsentrilisuse suuruse ja üheaegselt ka ettetõttenurga muutmisega.

Kujutleme endale, et ekstsenter C (joon. 108), mis istub võllil O, omab sisselõiget, mistõttu ta võib liikuda võlli suhtes üles ja alla. Joonisel 108 näidatud asendis ekstsentrilisuse suurus võrdub OO_1-ga ja ettetõttenurgaks on δ_1 (vastavaks vända asendiks on Ok). Kui ekstsenter alla lasta nii, et võlli keskpunkt O ja ekstsentri keskpunkt O_1 oleksid ühel horisontaalil, siis ekstsentrilisuse suurus on OO_2, ettetõttenurgaks aga on $\delta_2 = 90^0$. Pole raske näha, et sellises asendis ekstsentrilisuse suurus on minimaalne.

Vaatame nüüd, millise kujuga on siibri- ja indikaatoridiagrammid ekstsentri kahe nimetatud asendi puhul.

Tõmbame ringjoone *ACBD* vända raadiusega (joon. 109) *R*. Siis vastavalt ekstsentri esimesele asendile tõmbame nurga δ_1 all vertikaalile *CD* sirge *aa* ja ehitame sellele kaks ringi läbimõõduga, mis võrdub ekstsentri raadiusega $OO_1 = Oa$ (vt. joon. 108).

Ülemise ringi sisse tõmbame kaare *bb* raadiusega, mis võrdub välise ülekattega *e*, alumise ringi sisse aga kaare *cc* raadiusega, mis võrdub sisemise ülekattega *i*. Tõmbame tsentrist raadiused läbi punktide *b, b* ja *c, c* ja leiame iseloomustavad punktid *1*, *2*, *3*, *4*. Siis ehitame siibridiagrammi järgi indikaatoridiagrammi *A—2—3—B—4—1—A*.

Analoogiliselt ehitame siibri- ja indikaatoridiagrammi ekstsentri teise asendi jaoks, kui ettetõttenurk on võrdne 90°-ga.

Selleks ehitame samas ringis *ACBD* vertikaalsele läbimõõdule *DC* nurga $\delta_2 = 90^0$ all asuvale joonele, s. o. horisontaalsele läbimõõdule, *AB* kaks ringjoont (kriipsjoon) raadiusega $OO_2 = Oa'$ (vt. joon. 108), nii et need läbivad keskpunkti *O*. Vasaku ringi sisse tõmbame keskpunktist *O* raadiusega, mis võrdub *e*-ga, kaare *b'b'*, parema ringi sisse raadiusega, mis võrdub *i*-ga, kaare *c'c'*; märgime sel puhul, et siibri ülekatted on jäänud endisteks. Läbi keskpunkti *O* ja punktide *b', b'* ja *c', c'* tõmbame raadiused ja leiame iseloomustavad punktid *1'*, *2'*, *3'*, *4'*, millede järgi ehitame indikaatoridiagrammi *A—2'—3'—B—4'—1'—A* ekstsentri teise asendi jaoks.

Indikaatoridiagrammidelt joonisel 109 on selgesti näha, et ettetõttenurga δ suurenemisega ja ekstsentri ekstsentrilisuse vähenemisega indikaatoridiagrammi pindala väheneb, kusjuures vähenemine toimub *esiteks* täitumisastme vähenemise ja eelväljalaske suurenemise arvel ja *teiseks* kokkusurumisastme suurenemise ja eelsisselaske suurenemise arvel.

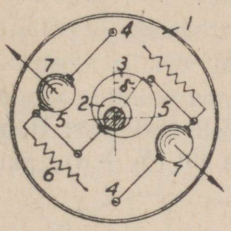
Seesugust reguleerimist rakendatakse sageli keskmise ja väikese võimsusega püstmasinates ning teostatakse niinimetatud *lameregulaatori* abil.

Lameregulaatori töötamist kujutab joonisel 110 toodud skeem. Ketas *1* ja ekstsenter *2* istuvad võllil jäigalt ja pöörlevad koos temaga. Kettale *1* on liigendite *4* abil kinnitatud hoobadel raskused *7*, millede tsentrifugaaljõud tasakaalustatakse vedrudega *6*. Tõmmitsate *5* abil raskused fikseerivad teise ekstsentri *3* asendit, mis võib pöörduda esimese ekstsentri suhtes.

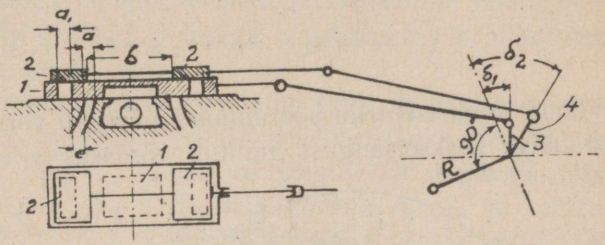
Pöörete arvu suurenemisel raskused *7* lähevad laiali, ettetõttenurk suureneb ja ekstsentrilisus väheneb, väheneb järelikult täitumisaste ja

koos sellega ka indikaatoridiagrammi pindala. Pöörete arvu vähenemisel pilt on vastupidine.

Seesuguse reguleerimise puudused seisavad järgmises: a) sisse- ja väljalaskeavade ristlõike pindala vähenemises ja järelikult auru muljumise suurenemises; b) eelväljalaske suurenemises ja järelikult mitteküllaldasest paisumisest tingitud kadude suurenemises; c) kokkusurumise astme ja



Joon. 110. Lame-regulaatori skeem.



Joon. 111. Kahekordse siibri skeem.

eelsisselaske suurenemises, mis võib osutuda masinale kahjulikuks mehaanilise tugevuse seisukohalt.

Sellise aurujaotuse vooruseks aga osutub ta lihtsus.

Kahekordsed siibrid. Võimsates masinates, kus on suure tähtsusega töötamise ökonoomsus, kasutatakse siiber-aurujaotuse puhul kahekordseid siibreid, mis võimaldavad muuta täitumisastet, ilma et muutuks eelväljalase, kokkusurumise aste ja eelsisselase.

Kahekordse siibri skeem on kujutatud joonisel 111. Ta koosneb peasiibrist *1* ja täiendavast, nn. paisumissiibrist *2*, mis liugub peasiibri selgpinnal. Siiber *2* koosneb kahest plaadist, millede vahelist kaugust on võimalik muuta. Peasiibrit käitatakse ekstsentrilt *3*, abisiibrit — ekstsentrilt *4* (suurem kui 3). Ettetõttenurk peasiibril on δ_1, paisumissiibril δ_2, mis on suurem kui δ_1.

Auru sisselaske sulgemine paisumissiibri poolt toimub sel momendil, kui plaat 2 katab kinni peasiibris oleva kanali a_1. Selle tõttu, et paisumissiibri ettetõttenurk on suurem kui peasiibril, on võimalikud juhud, millal peasiiber ehk küll hoiab silindri akna *a* avatuna, kuid seetõttu, et paisumissiiber katab kinni kanali a_1, auru sisselase lakkab. On ilmne, et mida suurem on plaatide vahemaa, seda kiiremini toimub sisselaske sulgemine ja järelikult seda väiksemaks osutub täitumisaste. Vahemaa *b* vähendamisel täitumine vastupidi suureneb.

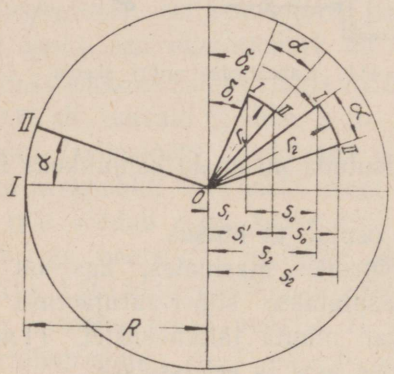
Uurime kahekordsete siibrite töötamist siibridiagrammi abil. Selleks ehitame eelnevalt vändadiagrammi.

Olgu meil masina kolvivänt, mille raadius võrdub *R*-ga (joon. 112);

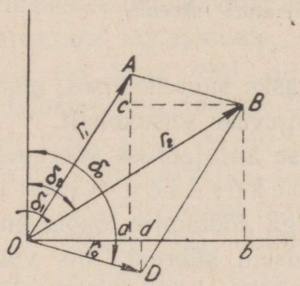
peasiibri ekstsenter on ekstsentrilisusega r_1 ja ettetõttenurgaga δ_1, paisumissiibri ekstsentril need suurused on vastavalt r_2 ja δ_2. Vända asetsedes äärmises vasakus asendis OI, on peasiiber väljunud oma keskseisangust (peegelpinna keskkohast) $s_1 = r_1 \sin \delta_1$ võrra, paisumissiiber aga $s_2 = r_2 \sin \delta_2$ võrra. Paisumissiibri nihkumine peasiibri suhtes ilmselt on võrdne:

$$s_0 = s_2 - s_1 = r_2 \sin \delta_2 - r_1 \sin \delta_1.$$

Vända ja ekstsentrite pöördumisel nurga α võrra, s. o. asendisse II, peasiibri hälve keskseisangust muutub võrdseks $s_1' = r_1 \sin (\delta_1 + \alpha)$, paisu-



Joon. 112. Kolvivända ja kahekordsete siibrite ekstsentrite vastastikune asetus.



Joon. 113. Kahekordse siibri fiktiivse ekstsentrilisuse suuruse määramine.

missiibri hälve $s_2' = r_2 \sin (\delta_2 + \alpha)$ ja paisumissiibri nihkumine peasiibri suhtes

$$s_0' = s_2' - s_1' = r_2 \sin (\delta_2 + \alpha) - r_1 \sin (\delta_1 + \alpha).$$

Seda paisumissiibri nihkumist peasiibri suhtes on võimalik leida väga lihtsalt järgmisel viisil (joon. 113).

Võtame $OA = r_1$ ühe rüüpküliku üheks küljeks, $OB = r_2$ — ta diagonaaliks; nurga AOB võtame võrdsena $\delta_2 - \delta_1$.

Võttes saadud rööpküliku $OABD$ külje $OD = r_0$ ekstsentrilisuseks teataval fiktiivsel ekstsentril ettetõttenurgaga δ_0, pole raske näidata, et tema hälve Od keskasendist O annab siibrite suhtelise nihkumise s_0, s. o. et $s_0 = Od$.

Tõmbame vertikaalid Aa, Bb ja Dd ja horisontaali Bc. On ilmne, et

kolmnurk ABc on võrdne kolmnurgaga OdD, kuna nende küljed on paralleelsed ja AB võrdub OD. Järelikult

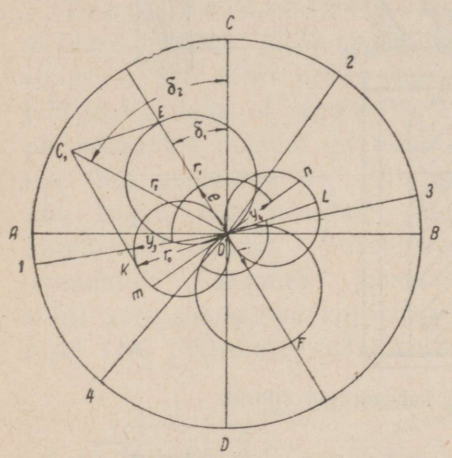
$$cB = Od$$

ja

$$s_0 = s_2 - s_1 = Ob - Oa = ab = cB = Od.$$

Kasutades tõestatud väidet, et siibrite suhtelist nihkumist on võimalik leida fiktiivse ekstsentri abil ekstsentrilisusega r_0, ehitame siibridiagrammi kahekordsete siibrite jaoks (joon. 114).

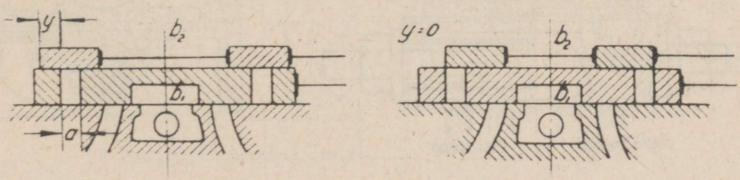
Selleks ehitame vända raadiusega R tõmmatud ringi $ACBD$ sisse varem seletatud viisil raadiusega r_1 ringid OE ja OF peasiibri jaoks. Edasi nurga δ_2 all vertikaalile OC tõmbame lõigu OC_1, mis võrdub r_2-ga, ja ehitame rööpküliku OEC_1K. Tema küljele OK, mis võrdub fiktiivse ekstsentri ekstsentrilisusega r_0, ehitame ringi OK ja sirge KO pikendusele — sümmeetrilise ringi OL.



Joon. 114. Siibridiagramm kahekordsete siibrite jaoks.

Lõigud OK, Om jne., mis lõigatakse ära ringi OK poolt läbi keskpunkti O tõmmatud sirgetest, annavad paisumissiibri suhtelise nihkumise paremale, lõigud OL, On jne. aga, mis lõigatakse ära ringi OL poolt, annavad paisumissiibri suhtelise nihkumise vasakule.

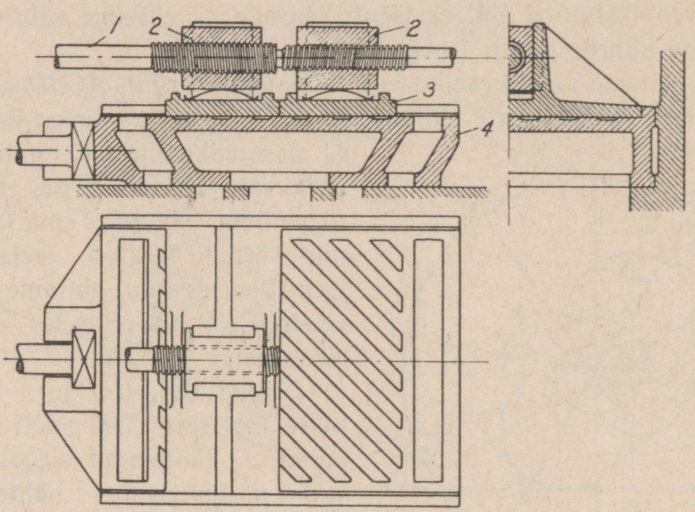
Kui tähistame paisumissiibri välise ülekatte suuruse y-ga (joon. 115), mis võib olla positiivne, võrdne nulliga ja negatiivne, siis põhisiibri kanali a avamismäär võrdub vastavalt lõikude OK, Om, OL, On jne. ja suuruse y vahega. Kui y võrdub y_3-ga, on täitumine null, kui aga y võrdub y_4-ga (negatiivne ülekate), on täitumine maksimaalne. Kui y võrdub nulliga, siis täitumine on normaalne (ca 30%). Kõikide y vahepealsete väärtuste puhul y_3 ja y_4 vahel saame vahepealseid täitumisi nullist maksimumini.



Joon. 115. Kahekordsete siibrite seadmise skeem.

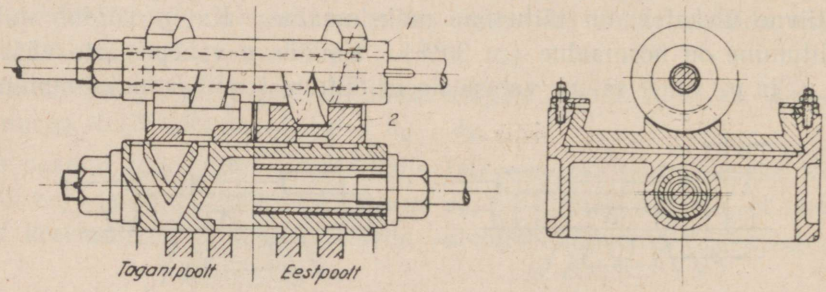
Kahekordsete siibrite konstruktiivne kujundamine. Reguleeritava pikkusega paisumissiiber. Eespool tegime kindlaks, et paisumissiiber annab seda suurema täitumise, mida väiksem on ta väline ülekate, ehk teiste sõnadega — mida väiksem on ta plaatide välisotste vaheline kaugus, s. o. mida lühem on paisumissiiber.

Reguleeritud pikkusega paisumissiiber on näidatud joonisel 116. Siibri



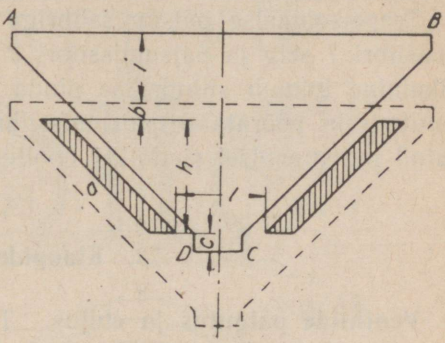
Joon. 116. Käsitsi seatavad kahekordsed siibrid.

moodustavad kaks plaati *3*, mis mutrite *2* kaudu on ühendatud siibrivarrega *1*. Nende plaatide välisotste vaheline kaugus moodustab siibri pikkuse. Siibri pikkuse muutmist saavutatakse siibrivarre *1* abil, mis omab kaht keermetist — parempoolset ja vasakpoolset; vastavad keermetised on ka paisumissiibri plaatide mutritel *2*. Siibrivarre pööramisega on võimalik kokku või laiali nihutada mutreid *2* ja koos sellega paisumis-



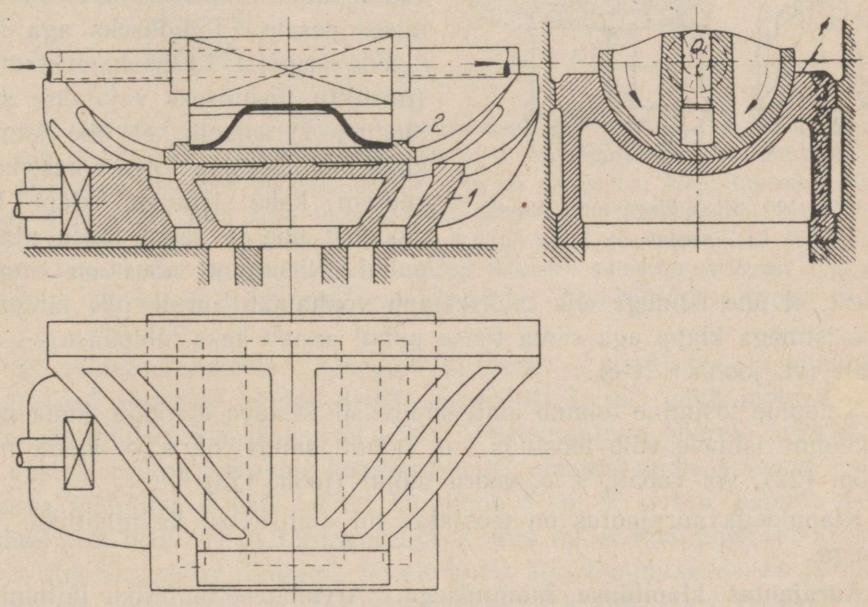
Joon. 117. Regulaatorilt seatavad kahekordsed siibrid.

plaate *3*, mis liuguvad peasiibril *4*. Paisumissiibri pikkust on võimalik ümber seada käsitsi või regulaatorilt. Viimasel juhul valmistatakse keermetis siibrivarrel *1* (joon. 117) suure sammuga, nii et siibrivarre väikesele pöördenurgale vastab paisumissiibri plaatidevahelise kauguse märgatav muutumine. Järelikult fikseeritakse täitumisaste siibrivarre pöördenurgaga, kusjuures siibrivars on seotud regulaatoriga tõmmitsate ja hoobade süsteemi kaudu. Neid siibreid kasutatakse nii lamedaid kui ka silindrilisi.



Joon. 118. Paisumissiibri arendus tasapinnal.

Trapetsoidaalne poolsilindriline paisumissiiber. See siiber erineb eelkirjeldatust sellega, et reguleeritavad paisumissiibri plaadid on asendatud ühe poolsilindrilise siibriga, mis liigub piki peasiibri selga silindrilisel pinnal. Tasapinnale arendatult sarnaneb paisumissiibri aurujaotuspinna kuju trapetsiga *ABCD*, nagu see on näidatud joonisel 118. Viirutatud pindalad sellel skeemil kujutavad endast kanaleid



Joon. 119. Trapetsoidaalse paisumissiibriga aurujaotuse konstruktiivne vormistamine.

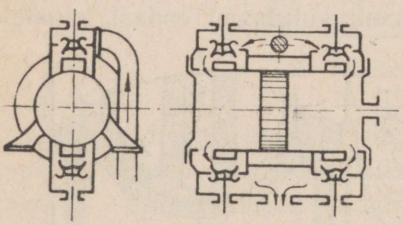
peasiibris. Täitumise muutumist saavutatakse paisumissiibri ümberpaigutamisega $y - y$ teljel, mida teostatakse tema pööramisega ümber liikumistelje $x - x$, millega muutub paisumissiibri ülekatte määr. Selle siibri asetsedes kohal, mis joonisel 118 on näidatud täisjoonega, on täitumine maksimaalne; asendis aga, mis on näidatud punktiiriga, toimub minimaalne täitumine. Jaotussiibri pööramine teostub regulaatorilt.

Trapetsoidaalse paisumissiibriga aurujaotus on näidatud joonisel 119. Peasiibri *1* selg ja paisumissiibri *2* alumine pind on silindrilised. Siibrite liikumine toimub silindrilise pinna telje $x - x$ suunas; silindri täitumise muutmiseks pööratakse paisumissiibrit ümber telje $x - x$, nagu see on näidatud parempoolsel ristlõikel nooltega.

73. Klappidega aurujaotus.

Ventiilide paigutus ja ehitus. Tavaliselt on klappidega aurujaotuse puhul igal silindril neli klappi — á kaks klappi kummalgi silindripoolel, kusjuures ülemised tavaliselt on sisselaskeks, alumised aga väljalaskeks (joon. 120).

Ehituselt võivad klapid olla üheistmelised või kaheistmelised. Esimest tüüpi klappide paremused seisavad valmistamise lihtsuses ja tihedas istumises pesale. Puuduseks aga tuleb lugeda järgmist: 1) tasakaalustamatus (mistõttu tõstmiseks vajatakse suurt jõudu); 2) asjaolu, et ühe istmega klapi läbimõõt peab olema kaks korda suurem kahe istmega klapi läbimõõdust ühe ja sama tõusu ulatuse puhul. Niisugune nõue on tingitud sellest, et ühe istmega ehk taldrikklapp võimaldab aurule ühe läbipääsu, kahe istmega klapp aga sama tõusu puhul annab kaks läbipääsu — ülalt ja alt (vt. joonis 121-c).

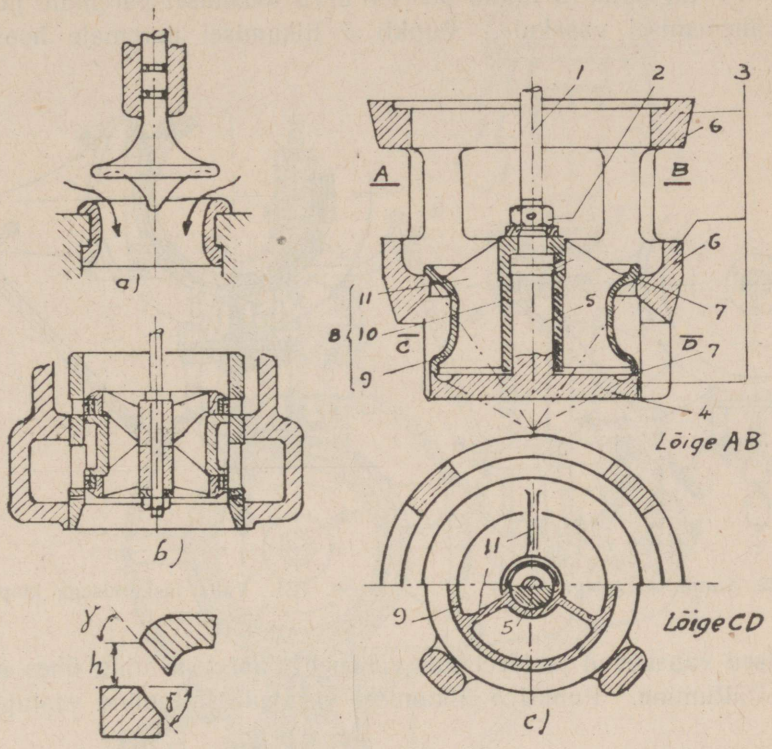


Joon. 120. Klappidega aurujaotuse skeem.

Klappide tõstmine toimub alati sundviisil vastava ajamiga, kuna nende laskumine istmele võib teostuda kas samuti sundviisil, s. o. ajami mõjul (joon. 122), või vabalt, s. o. vedru mõjul (joon. 123).

Klappidega aurujaotus on teostatav nii alalise kui ka muutliku täitumisega.

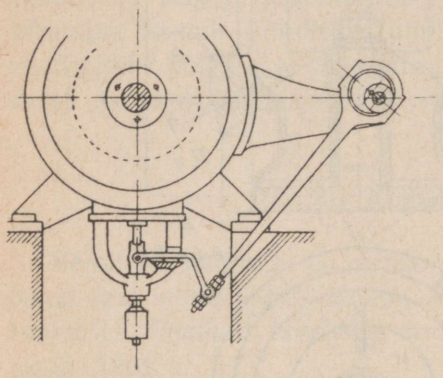
Aurujaotus klapitõusu muutmisega. Arvukatest muutliku täitumisega klappidega aurujaotuse süsteemidest enamlevinute hulka kuulub jooni-



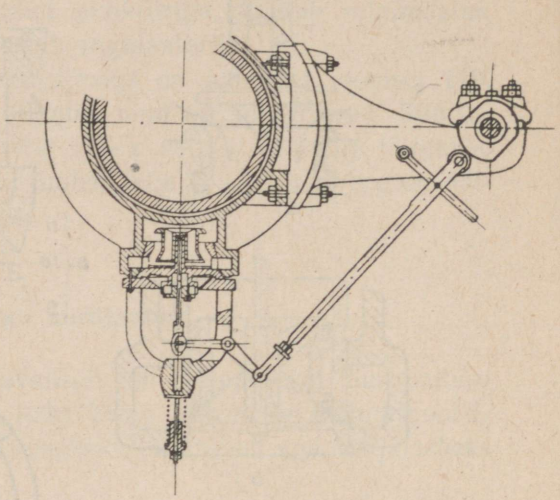
Joon. 121. Aurumasinas kasutatavate klappseadmete tüüpe: *a* — ühe istmega klapp; *b* — kolb-siiberklapp; *c* — kahe istmega klapp; *1* — klapi säär; *2* — kinnitusmutter; *3* — klapi pesa (koosneb sulgtaldrikust *4*, mis on varustatud klapi liikumist juhtiva naguga *5* ja kahest pesa keret moodustavast rõngast *6*, millede kaudu pesa toetub tihedalt silindri keresse. Numbritega *7* on märgitud klapi pesa koonilised tihenduspinnad, s. o. klapiistmed ehk sadulad); *8* — klapp (koosneb silindrilisest kerest *9* ja juhtpuksist *10*, mis on kolme ribi kaudu ühendatud klapi silindrilise kerega *9*).

sel 124 näidatud süsteem. Klappide (ülemise — sisselaske- ja alumise — väljalaske-) tõstmine toimub ühelt ekstsentrilt *1*, mis istub jaotusvõllil *2*. Täitumist muudetakse järgmisel viisil. Mittemuutuva pöörete arvu puhul, mis vastab masina teatavale koormusele, regulaatori muhv *3* seisab paigal. Temaga tõmmitsa *4* abil seotud nurkhoob *5—6—7* seisab samuti paigal ja järelikult hoob *8—9*, tugipunktiga *5*, mis on seotud ühelt poolt kiige *10—9* abil ekstsentri rõngaga, teiselt poolt aga tõmmitsa *8—11* ja hoova *11—12* kaudu klapiga, teostab ühesuguseid kiikumisi, mis tagavad klapi muutumatut tõusu ja järelikult ka muutumatut täitumist.

Masina koormuse muutumisel ja järelikult pöörete arvu muutumisel hoova *8—9* tugipunkt 5 liigub pöörete arvu tõusmisel paremale ja pöörete arvu vähenemisel vasakule. Punkti *5* liikumisel paremale hoova *8—9*



Joon. 122. Sundlaskumisega klapp.



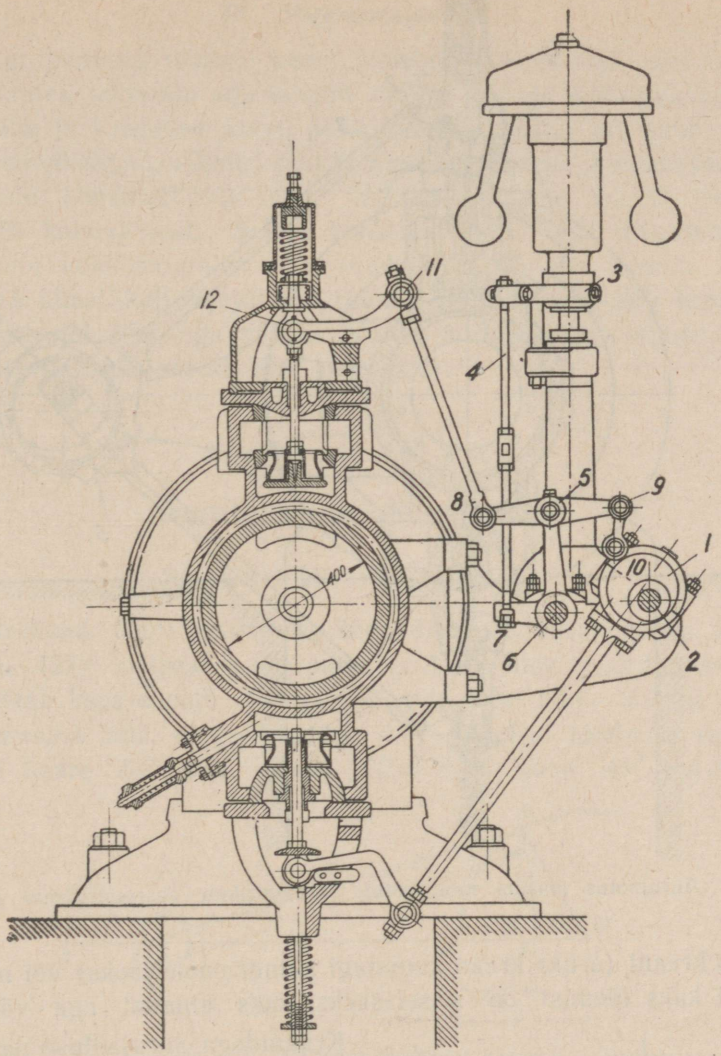
Joon. 123. Vaba laskumisega klapp.

kiikumised vähenevad ja järelikult väheneb klapi tõus ning ühes seega ka silindri täitumine. Punkti *5* liikumisel vasakule täitumine vastupidi suureneb.

Joonisel 125 on näidatud aurujaotus, kus klapi tõus või lahtioleku aeg reguleeritakse jaotusvõllil olevate ekstsentrikute ekstsentrilisuse muutmisega. Erinevalt eelmisest aurujaotusest, on siin kummalgi klapil oma ekstsenter. Täitumise muutmist saavutatakse järgmisel viisil. Klapi sääre rull *1* toetub kiikuvale hoovale *2*, mis tõmmitsa *3* abil on seotud ekstsentriga *4*. Viimase ekstsentrilisuse suurus sõltub regulaatori võllile *6* kinnitatud „kivi" *5* asendist, mille suhtes ekstsenter saab liikuda. Ekstsentri liikumist „kivi" suhtes toimetab lame regulaator. Ekstsentrilisuse suurenemisel suureneb klapi lahtiolemise aeg ja järelikult ka täitumine.

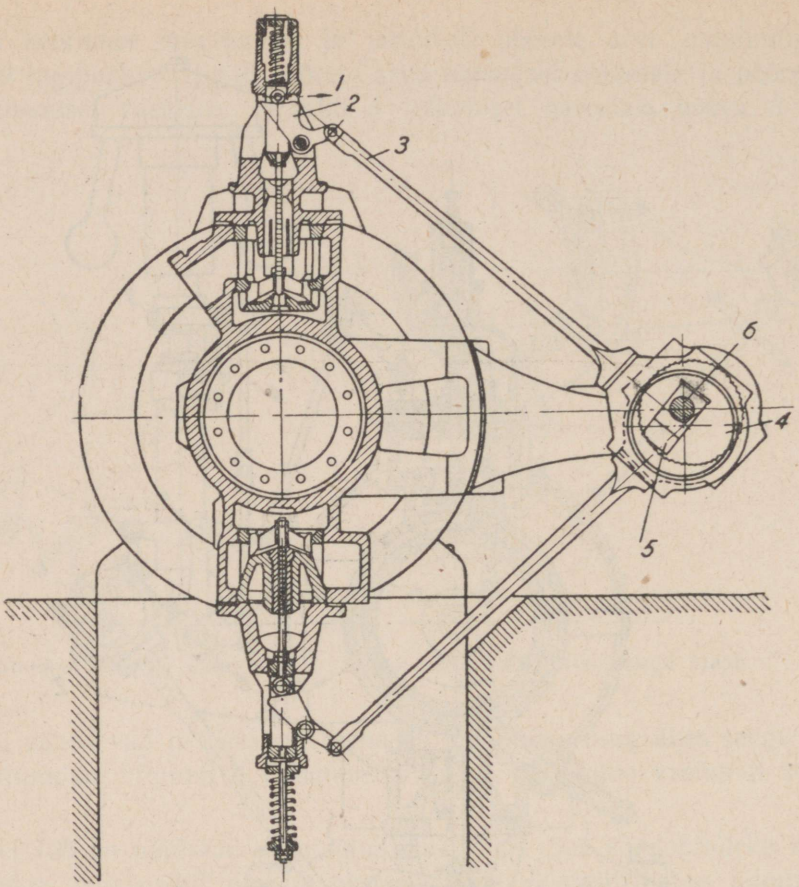
74. Kraanidega aurujaotus.

Kraan kujutab endast ülekatetega karpsiibrit, mis on keeratud poolsilindriks varrele risti asuva telje ümber (joon. 126). Kraani liikumine on loomulikult mitte sirgjooneline, vaid pöörlev. Lihtsaimal juhul võib masina silindril olla üks kraan, mispuhul aurujaotus toimub allkirjeldatud viisil.



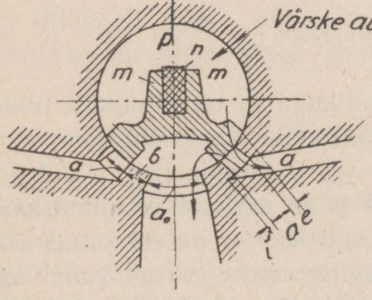
Joon. 124. Klappidega aurujaotus.

Ruum P kraani peal on ühenduses aurutorustikuga ja on järelikult täidetud värske auruga. Ruum b on kanali a_0 kaudu ühenduses töötanud auru torustikuga. Külgkanalite a kaudu ruum p või b ühendatakse silindriga. Joonisel 126 kujutatud kraani asendi puhul pääs mõlemasse silindripoolesse on suletud. Kraani pöördumisel kellaosuti suunas parem kanal avaneb värske auru sisselaskeks paremasse silindripoolesse, vasak kanal aga avaneb töötanud auru väljalaskeks silindri vasakust poolest. Silindril võib



Joon. 125. Aurujaotus masina jaotusvõllilt ekstsentrikute ekstsentrilisuse muutmiseg

olla kaks kraani (à üks kraan kummagi silindripoole jaoks) või neli kraan mispuhul kaks ülemist on sisselaskeks, kaks alumist aga väljalaskek



Joon. 126. Aurujaotuse kraan.

Kraanidega aurujaotuse paremustek on lihtsus ja detailide valmistamise od vus. Puudusteks aga tuleb lugeda tas kaalustamatust, kiiret kulumist, kaard mise võimalikkust kõrgel temperatuur ja ajami teatavat keerulisust täitum sega reguleerimisel. Nende puudus tõttu kraanidega aurujaotust käesolev ajal ei kasutata.

75. Sega-aurujaotus.

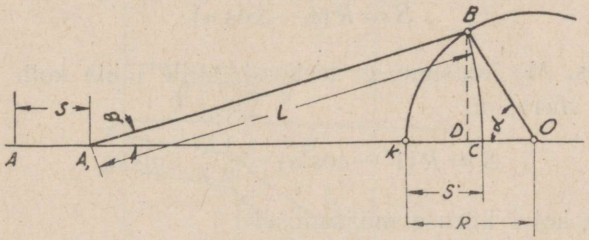
Sega-aurujaotuses toimub auru sisselase klappidega, mis asetsevad silindri kaantes, väljalase aga toimub silindri keskele tehtud akende kaudu, mis avatakse ja suletakse kolvi poolt. Kolvi pikkus on suur — umbes 80—90% kolvikäigust, silindri pikkus aga on peaaegu kahekordne, võrreldes tavaliste konstruktsioonidega; väljalaske-akende pikkus moodustab umbes 10% kolvikäigust. Sellise konstruktsiooni tõttu saavutatakse erakordselt suur kokkusurumise aste (umbes 90%), mis sunnib mõnikord suurendama kunstlikult kahjulikku ruumi; viimane aga võib konstruktiivsetel kaalutlustel olla õige väike. Sellise aurujaotusega masinaid nimetatakse otsevoolumasinateks (vt. joon. 152).

XVI peatükk.

Aurumasinate dünaamika.

76. Kolvi kiirus ja kiirendus.

Kolvi teekond. Olgu antud, et vända äärmises vasakpoolses seisangus OK (joon. 127) ristpea asub punktis A. Vända pöördumisel nurga α võrra võtab keps asendi A_1B ja teekond, mille läbib ristpea ja järelikult ka masina kolb, on siis võrdne $AA_1 = S$. Kui tõmbame raadiusega $A_1B = AK$ kaare BC, siis saame $KC = AA_1$, kuna $AK = A_1B = A_1C$.



Joon. 127. Vändamehhanismi skeem.

Selleks, et määrata S, tõmbame vertikaali BD. Siis saame

$$S = AA_1 = KC = KD + DC.$$

Kuid

$$KD = KO - OD = R - R\cos\alpha = R(1 - \cos\alpha);$$
$$DC = A_1C - A_1D = L - L\cos\beta,$$

kus L on kepsu pikkus.

Järelikult

$$S = R(1 - \cos\alpha) + L(1 - \cos\beta).$$

Teostame mõningad teisendamised:

$$A_1D = \sqrt{A_1B^2 - BD^2} = \sqrt{L^2 - (R\sin\alpha)^2} = L\sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}\sin^2\alpha},$$

kust

$$DC = L - A_1D = L\left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}\sin^2\alpha}\right).$$

Pidades silmas, et suhe $\frac{R}{L}$ moodustab tavaliselt umbes $\frac{1}{5}$, võime võtta, et

$$\sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}\sin^2\alpha} = 1 - \frac{1}{2}\frac{R^2}{L^2}\sin^2\alpha;$$

$$DC = L\left[1 - \left(1 - \frac{1}{2}\frac{R^2}{L^2}\sin^2\alpha\right)\right] = \frac{1}{2}\frac{R^2}{L}\sin^2\alpha,$$

$$S = R(1 - \cos\alpha) \pm \frac{1}{2}\frac{R^2}{L}\sin^2\alpha, \qquad (83)$$

kus teise liidetava ees pluss-märk tuleb võtta vända liikumisel mööda ringjoone ülemist poolt, miinus-märk aga liikumisel mööda alumist poolt.

Kui $\frac{R}{L} = 0$, s. t. kui keps on lõpmatu pikk, siis

$$S = R(1 - \cos\alpha). \qquad (83')$$

Kolvi kiirus. Me leidsime, et teekond, mille läbib kolb vända pöördumisel nurga α võrra, on:

$$S = R(1 - \cos\alpha) \pm \frac{1}{2}\frac{R^2}{L}\sin^2\alpha.$$

Läheme üle kolvi kiiruse määramisele:

$$c = \frac{dS}{dt} = \left(R\sin\alpha \pm \frac{1}{2}\frac{R^2}{L}\sin 2\alpha\right)\frac{d\alpha}{dt},$$

kuid

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega,$$

kus ω on nurkkiirus.

Järelikult lõpliku pikkusega kepsu puhul

$$c = \left(R\sin\alpha \pm \frac{1}{2}\frac{R^2}{L}\sin 2\alpha\right)\omega = R\omega\left(\sin\alpha \pm \frac{1}{2}\lambda\sin 2\alpha\right) \qquad (84)$$

kus $\lambda = \frac{R}{L}$.

Kui keps on lõpmatu pikk ($\lambda = \infty$), siis

$$c = R\omega \sin \alpha, \tag{84'}$$

Kolvi kiirendus. Kolvi kiirendus kepsu lõpliku pikkuse puhul

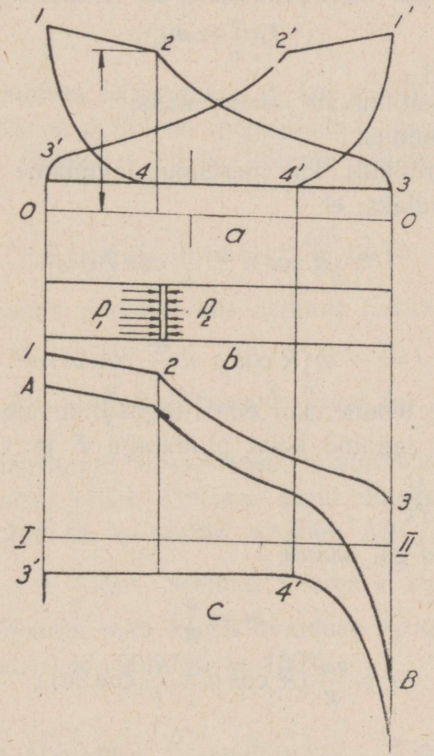
$$j = \frac{dc}{dt} = (R \cos \alpha \pm \frac{R^2}{L} \cos 2\alpha)\,\omega^2 = R\omega^2(\cos \alpha \pm \lambda \cos 2\alpha), \tag{85}$$

lõpmatu pika kepsu puhul aga —

$$j = R\omega^2 \cos \alpha. \tag{86}$$

77. Kolvile ja vändale mõjuvad jõud.

Kolvi pinna ühele cm²-le mõjuv auru resultantrõhk kolvi teekonna pikkusel. Seda diagrammi on võimalik ehitada indikaatoridiagrammide järgi.



Joon. 128. Kolvi ühele cm²-le mõjuva auru resultantrõhu diagramm.

Olgu antud indikaatoridiagramm *1—2—3—4* silindri vasaku poole jaoks ja *1'—2'—3'—4'* silindri parema poole jaoks (joon. 128-a).

Valime vabalt kolvi asendi (joon. 128-b) ja oletame, et ta liigub paremale. Vasakult mõjub kolvile auru rõhk p_1, mis on positiivne, kuna ta ühtub liikumisega, paremalt aga mõjub kolvile vastu auru rõhk p_2, mis on negatiivne, kuna ta mõjub kolvi liikumisele vastusuunas.

Teekonna pikkusel *I—II* auru rõhk kolvi ühele cm²-le vasakult poolt väljendub kõveraga *1—2—3*, mis kui positiivne asub pealpool telge *I—II* (joon. 128-c); paremalt poolt mõjuv auru rõhk aga väljendub kõveraga *3'—4'—1'*, mis asub allpool telge *I—II*.

Liites tavaliste reeglite järgi positiivsete ja negatiivsete rõhkude väärtused, saame kolvile mõjuva auru rõhu resultantkõvera *AB* (kolvi ühe cm² kohta).

Kolvi pinna ühele cm²-le taandatud inertsjõudude diagramm. Peale auru rõhu mõjuvad kolvile ka veel kolvi, kolvivarre, ristpea ja osaliselt ka vända edasi-tagasiliikuvad inertsjõud.

Üldiseks avalduseks inertsjõududele on teatavasti

$$J = -mj,$$

kus J on inertsjõud;

m — edasi-tagasiliikuvate osade mass;

j — kolvi kiirendus.

Massi m ja järelikult ka inertsjõu taandame kolvi ühele cm²-le. Varemalt tegime kindlaks, et

$$j = \left(R \cos \alpha \pm \frac{R}{L} \cos 2\alpha\right) \omega^2.$$

Järelikult

$$J = -m\left(R \cos \alpha \pm \frac{R^2}{L} \cos 2\alpha\right) \omega^2.$$

Massi m suuruse leiame, kui edasi-tagasiliikuvate ja osaliselt kiikuvate osade kaalu G jagame kolvi pindalaga F ja vabalangemise kiirendusega g, s. t. $m = \frac{G}{Fg}$.

Tähistades $\frac{G}{F} = q$-ga, saame

$$m = \frac{q}{g};$$

$$J = \frac{q\omega^2}{g}\left(R \cos \alpha \pm \frac{R^2}{L} \cos 2\alpha\right);$$

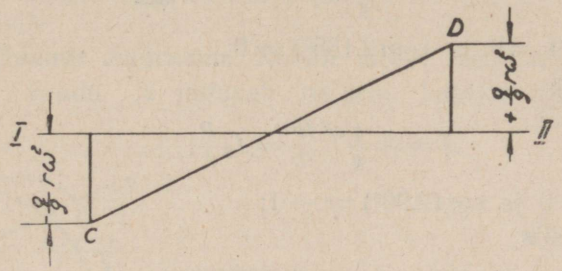
või

$$J = -\frac{q}{g} R\omega^2 \left(\cos \alpha \pm \frac{R}{L} \cos 2\alpha\right) \qquad (87)$$

ja lõpmatu pika kepsu puhul

$$J_{\text{lõpm}} = \frac{q}{g} R\omega^2 \cos \alpha. \tag{88}$$

Lõpmatu pika kepsu puhul inertsjõudude diagramm, sõltuvalt kolvikäigust, kujuneb sirgjoonena CD (joon. 129). Surnudpunktides, kui



Joon. 129. Inertsjõudude diagramm lõpmatu pika kepsu puhul.

$\alpha = 0^0$ ja $\alpha = 180^0$, inertsjõud on maksimaalse väärtusega

$$J = \pm \frac{q}{g} R\omega^2;$$

kui aga kolb on keskmises seisangus, s. t. kui $\alpha = 90^0$, siis $J = 0$.

Kepsu lõpliku pikkuse puhul on inertsjõudude diagrammi võimalik ehitada punktide järgi järgmisel viisil. Võtame mitmesugused α väärtused ja valemi järgi

$$S = R(1 - \cos \alpha) \pm \frac{R^2}{L} \sin^2 \alpha$$

arvutame kolvi teekonna pikkuse; siis samade nurkade α jaoks arvutame inertsjõu:

$$J = -\frac{q}{g} R\omega^2 (\cos \alpha \pm \frac{R}{L} \cos 2\alpha).$$

Inertsjõudude diagrammi lihtsustatud ehitamine lõpliku pikkusega kepsu puhul toimub järgmisel viisil. Ehitame algul diagrammi, eeldades kepsu lõpmatut pikkust; olgu ta kujutatud sirgega AB (joon. 130), kusjuures surnudpunktides $J_0 = \pm \frac{q}{g} R\omega^2$. Seejärel leiame J avalduse lõpliku pikkusega kepsu jaoks lõpmatu pika kepsu avalduse J_0 kaudu vända teatavate pöördenurkade puhul: 0,45, 90, 135 ja 180°.

Kui $\alpha = 0^0$, siis

$$J = -\frac{q}{g} R\omega^2 \left[\cos 0^0 + \frac{R}{L} \cos (2.0)\right] = -\frac{q}{g} R\omega^2 \left(1 + \frac{R}{L}\right),$$

s. t.

$$J = J_o\left(1 + \frac{R}{L}\right);$$

kui $\alpha = 45^0$ ja $\alpha = 135^0$, siis

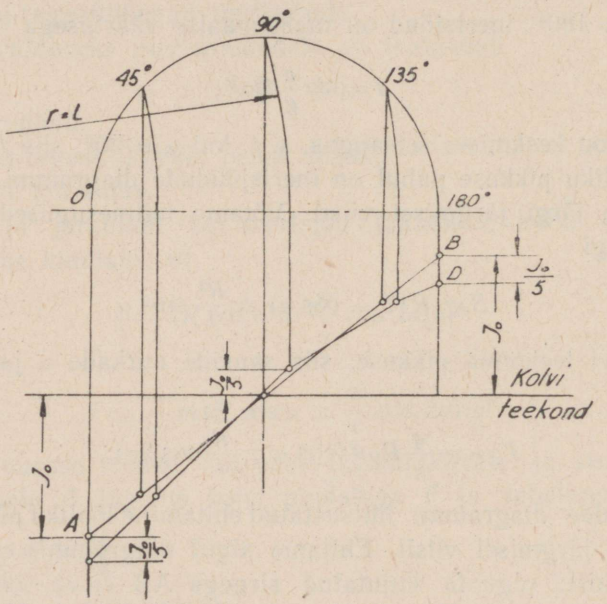
$$J = \frac{q}{g} R\omega^2 \cos\alpha = J_{lõpm},$$

kuna $\cos(2.45^0) = 0$ ja $\cos(2.135^0) = 0$;
kui $\alpha = 90^0$, siis

$$J = + \frac{q}{g} \omega^2 \frac{R^2}{L} = J_o \frac{R}{L},$$

kuna $\cos 90^0 = 0$ ja $\cos(2.90^0) = -1$;
kui $= 180^0$, siis

$$J = J_o\left(1 - \frac{R}{L}\right).$$



Joon. 130. Inertsjõudude diagramm lõpliku pikkusega kepsu puhul.

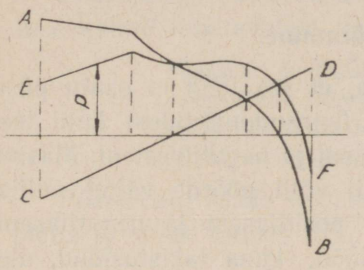
Saadud suhete järgi on hõlpus ehitada inertsjõudude diagrammi *CD* lõpliku pikkusega kepsu jaoks. Joonisel 130 on diagramm ehitatud eeldusel, et

$$\frac{R}{L} = \frac{1}{5}.$$

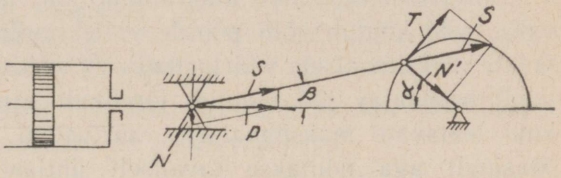
Kolvile mõjuvate resultantjõudude diagramm (kolvikäigu järgi). Järelikult mõjub kolvile aururõhk, mis taandatult ühele cm²-le väljendub kolvi teekonna diagrammi kõveraga *AB* (joon. 128-c), ja inertsjõud, mis väljendub kõveraga *CD* (joon. 129) (lõpmatu pika kepsu puhul).

Koondades need kaks diagrammi ühte (joon. 131) ja liites geomeetriliselt aururõhu- ja inertsjõud, saame kõvera *EF* resultantjõududele *p*, mis mõjuvad kolvile.

Tangentsiaaljõudude diagramm. Kolvile mõjuv resultantjõud *P* kandub edasi kolvivarre kaudu ja jaguneb ristpeas kaheks jõuks: jõuks *S*



Joon. 131. Kolvile mõjuvate resultantjõudude diagramm.



Joon. 132. Tangentsiaaljõudude määramine.

(joon. 132), mis on suunatud piki kepsu, ja jõuks *N*, mis on suunatud risti ristpea tugipinnaga. Vända pöörlemisel kellaosuti suunas jõud *N* on alati suunatud allapoole ja surub masinat vastu vundamenti.

Piki kepsu suunatud jõud

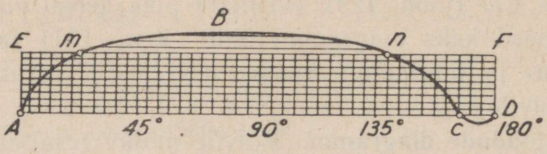
$$S = \frac{P}{\cos \beta}$$

jaguneb vändakaelal jõududeks *T* ja *N'*; esimest nimetatakse tangentsiaaljõuks ja ta on suunatud risti vända raadiusega; jõud *N'* aga on suunatud piki vända raadiust. Jõud *T* pöörab võlli ringi, kuna jõud *N'* surub võlli vastu laagreid.

$$T = S \sin (\alpha + \beta) = \frac{P \sin (\alpha + \beta)}{\cos \beta}.$$

Tangentsiaaljõudude diagrammi saamiseks sõltuvalt vända pöördenurgast α, ehitame laotise poolest ringjoonest raadiusega *R*, mis võrdub vända raadiusega (joon. 133), jaotame selle teatavaks arvuks võrdseteks osadeks ja jaotuspunktidest püstitame ordinaadid, mis on võrdsed vända mitmesugustes asendites mõjuvate tangentsiaaljõududega. Sel viisil saadud kõver *ABCD* kujutab endast tangentsiaaljõudude diagrammi vända pöördenurkade järgi. Pindala *ABCDA*, mis paikneb kõvera *ABCD* ja abstsisside

telje *AD* vahel, kujutab endast mastaabis masina poolt poolpöörde vältel arendatavat indikaatorlikku tööd (eeldame, et puudub kolvi ja silindri seinte vaheline hõõrdumine).



Joon. 133. Vändale mõjuvate tangentsiaaljõudude diagramm vända pöördenurga järgi.

78. Hooratta massi määramine.

Tangentsiaaljõudude diagrammilt on näha, et see jõud ei osutu püsivaks, vaid kõigub võlli pöörde vältel nullist (surnudpunktides) kuni teatavate maksimaalsete väärtusteni — positiivseteni ja negatiivseteni. Masina poolt arendatav töö muutub järelikult samuti võlli pöörde vältel nullist kuni teatavate maksimaalsete väärtusteni — positiivseni ja negatiivseni. Masinalt aga nõutakse tavaliselt ühtlast tööd, kuna takistusjõud, ülevііdult vända kaelale, jääb enam või vähem püsivaks ja väljendub sirgega EF (joon. 133). See tähendab, et vajatakse püsivat pöördemomenti. Pindala *ABCD* peab masina püsival koormusel võrduma pindalaga *AEFD*, kuna masina võimsus peab võrduma ta koormusega.

Seega teostab masin teatavatel momentidel ühe kolvikäigu või vända poolpöörde piirides liigset tööd, mõnedel momentidel aga mitteküllaldast tööd. Käesoleval juhul tekib piirkonnas *mn* töö ülejääk, mis väljendub pindalaga *mBn*. On selge, et see töö ülejääk läheb pöörlevate masside kineetilise energia suurendamiseks, kusjuures punktis *n* pöörlevad ehk hoomassid omavad ilmselt maksimaalset, punktis *m* aga minimaalset kiirust.

Kui tähistame pindala *mBn* ΔL-ga, hooratta põia maksimaalse või minimaalse ringkiiruse u_{max} ja u_{min}-ga, pöörlevate osade massi aga *M*-ga, ja oletame, et see on keskendatud hooratta põida, siis me saame

$$\Delta L = \frac{Mu^2_{max}}{2} - \frac{Mu^2_{min}}{2} = M\frac{u_{max}+u_{min}}{2}(u_{max}-u_{min}).$$

Kuid

$$\frac{u_{max}+u_{min}}{2} = u,$$

s. t. kujutab endast keskmist ringkiirust.

$u_{max} - u_{min}$ on ringkiiruste maksimaalne vahe.

Suhet $\frac{u_{max}-u_{min}}{u}$ nimetatakse ebaühtluse astmeks ja tähista-

takse δ-ga; ta näitab, kui suur on nurkkiiruse maksimaalne kõrvalekaldumine ühe pöörde vältel nurkkiiruse keskmisest väärtusest.

Eelöeldut silmas pidades võime kirjutada

$$\Delta L = Mu^2\delta;$$

$$\delta = \frac{\Delta L}{Mu^2};$$

$$M = \frac{L}{u^2\delta}.$$

Pöörlevate osade massi määramisel võib väljuda järgmistest ebaühtluse astme lubatavatest väärtustest:

Pumpade ja lõikemasinate käitamisel	$\delta = 1/25$
mehaaniliste tööpinkide käitamisel	$\delta = 1/35$
alalisvoolu-dünamote käitamisel	$\delta = 1/150$
vahelduvvoolu-generaatorite käitamisel	$\delta = 1/300$

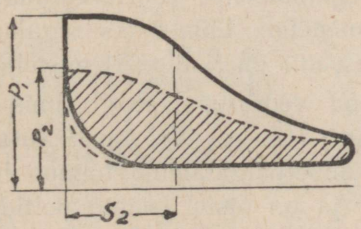
Pöörlevate osade kogumassist tavaliselt koondub umbes 90% hooratta pöida ja ainult umbes 10% moodustavad pöörlevad osad.

XVII peatükk.

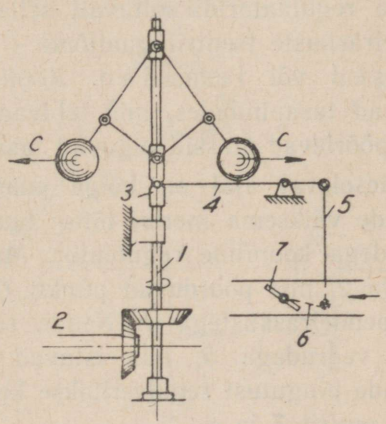
Masinate reguleerimine.

79. Reguleerimise viisid.

Masina poolt arendatava võimsuse muutumist võib saavutada kahel viisil: värske auru muljumisega ja täitumise muutmisega.



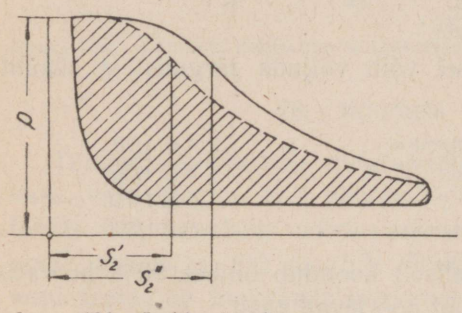
Joon. 134. Indikaatoridiagrammi muutumine muljumisega reguleerimisel.



Joon. 135. Auru muljumisega reguleerimise skeem.

Muljumisega reguleerimine seisab selles, et püsiva täitumise puhul muudetakse muljumisklapi abil silindrisse sisselastava auru rõhku (joon. 134).

Muljumisega reguleerimise skeem on toodud joonisel 135. Regulaatorivõll *1* saab koonushammasrataste kaudu liikumise võllilt *2*, mis omakorda on seotud masina peavõlliga (viimane võll pole joonisel 135 näidatud). Regulaatori muhv, mille asend sõltub masina pöörete arvust, mõjutab hoova *4*, tõmmitsa *5* ja hoova *6* kaudu muljumisklappi *7*, seda rohkem avades masina pöörete arvu vähenemisel ja vastupidi — seda rohkem sulgedes pöörete arvu suurenemisel. Auru muljumisega reguleerimise viis on väga lihtne, kuid ebaökonoomne, kuna koormuse vähenemisel suureneb tugevasti auru erikulu.



Joon. 136. Indikaatoridiagrammi muutumine täitumisega reguleerimisel.

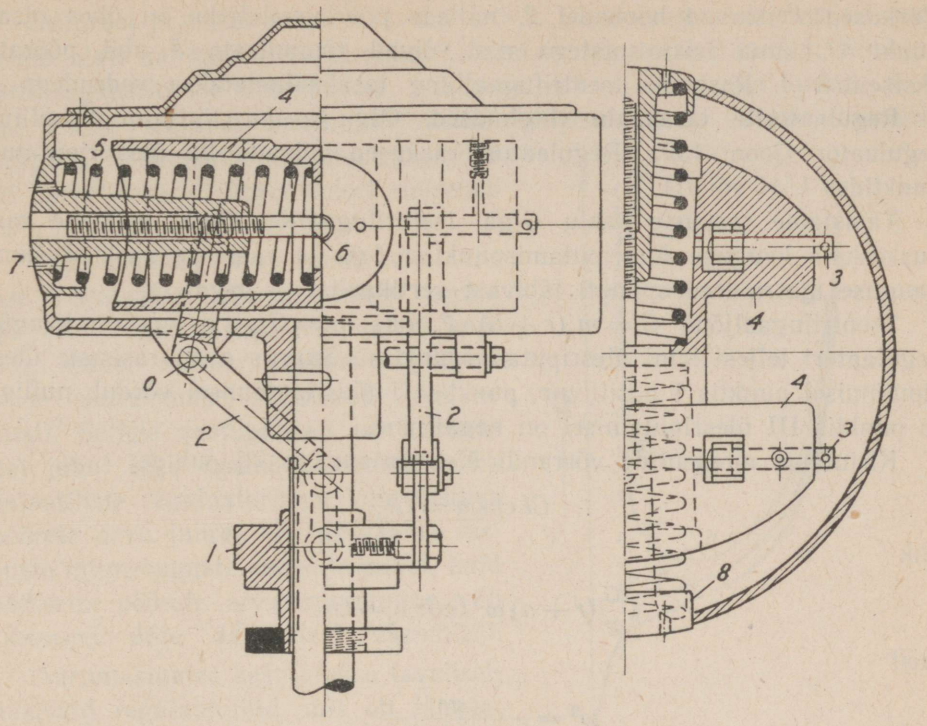
Nüüdisaegsetes aurumasinates toimub reguleerimine tavaliselt täitumise muutmisega. Selle reguleerimisviisi puhul ei muutu sisselastava auru rõhk (joon. 136), kuid muutub täitumise aste, s. t. silindrisse sisselastava auru hulk. Täitumise muutmine toimub regulaatori abil.

80. Regulaatorite tüübid ja nende tasakaalu tingimused.

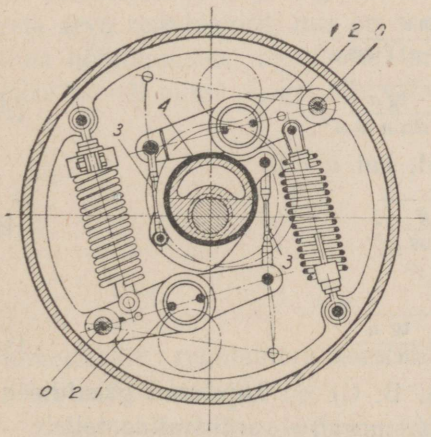
Regulaatorid jagunevad kahte rühma: 1) raskustega või vedrudega regulaatorid, sõltuvalt sellest, missugusel viisil tasakaalustatakse pendelraskuste tsentrifugaaljõud — erilise raskuse või vedru abil; 2) koonilised või lamedad. Koonilistes regulaatorites pöörlevad massid liiguvad tasapindades, mis läbivad pöörlemistelge. Lamedates regulaatorites pöörlevad massid liiguvad tasapindades, mis on risti pöörlemisteljega.

Käesoleval ajal on kõige enam levinud vedruregulaatorid, mis on masside väiksema inertsi tõttu tundlikumad. Joonisel 137 on kujutatud vedrudega kooniline regulaator. Muhvi *1* ümberpaigutamine toimub hoobadega 2, mis pöörduvad punkti *O* ümber ja on otstel seotud poltide *3* abil pendelraskustega *4*. Nende raskuste tsentrifugaaljõud tasakaalustatakse vedrudega *5*, mis istuvad pendelraskuste silindrilistes aukudes. Vedrude pingutust reguleeritakse keskmise poldi *6* abil, mis tõmbab kokku kahte mutrit *7* ja *8*.

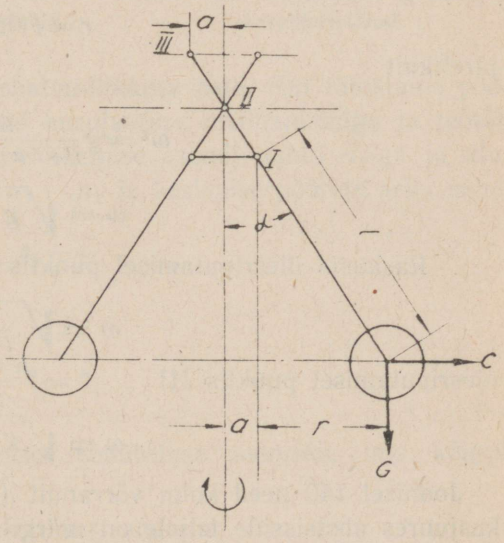
Lameregulaator. Joonisel 138 on kujutatud vedrudega lameregulaator.



Joon. 137. Kooniline vedrudega regulaator.



Joon. 138. Lameregulaator.



Joon. 139. Regulaatori skeem.

Raskused *1* istuvad hoobadel *2*, millede pöörlemisteljeks on ühes otsas punkt *O*, kuna teiste otstega nad võivad tõmmitsate *3* abil pöörata ekstsentrit *4*. Raskuste tsentrifugaaltung tasakaalustatakse vedrudega.

Regulaatorite tasakaalu tingimused. Olgu antud lihtsaim kooniline regulaator (joon. 139). Regulaatori raskused võivad olla üles riputatud punktides I, II või III.

Tähistame raskuste kaalu G-ga, tsentrifugaaljõu C-ga, raskuste raskuskeskme kauguse ülesriputamispunktist l-ga ja raskuste raskuskeskme kauguse ülesriputamispunkti läbivast vertikaalist — r-ga.

Tsentrifugaaljõud $C = m\,(r + a)\,\omega^2$, kus $m = G/g$, a aga on kaugus regulaatori teljest kuni ülesriputamispunktini. Suurus a on raskuste ülesriputamisel punktis I positiivne, punktis II ülesriputamisel võrdub nulliga ja punktis III ülesriputamisel on negatiivne.

Kirjutame momentide võrrandi ülesriputamispunkti suhtes:

$$Cl\cos\alpha = Gr,$$

ehk

$$\frac{G}{g}(r+a)\,\omega^2\, l\cos\alpha = Gr,$$

kust

$$\omega^2 = \frac{gr}{(r+a)\,l\cos\alpha};$$

kuid

$$r = l\sin\alpha,$$

järelikult

$$\omega^2 = g\frac{l\sin\alpha}{(l\sin\alpha + a)\,l\cos\alpha},$$

$$\omega = \sqrt{g\frac{\operatorname{tg}\alpha}{l\sin\alpha + a}}. \qquad \text{(A)}$$

Raskuste ülesriputamisel punktis II, kui $a = 0$,

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l\cos\alpha}}; \qquad \text{(B)}$$

ülesriputamisel punktis III

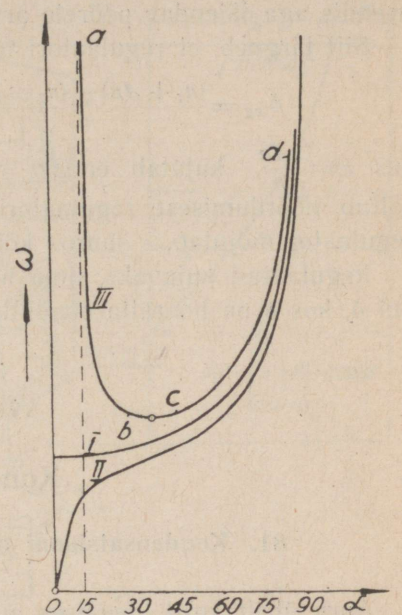
$$\omega = \sqrt{g\frac{\operatorname{tg}\alpha}{l\sin\alpha - a}}. \qquad \text{(C)}$$

Joonisel 140 need kolm võrrandit (A, B, C) on kujutatud graafiliselt, kusjuures abstsisside teljele on märgitud nurgad α, ordinaatide teljele — nurkkiirused ω.

Esimesel ja teisel juhul, s. t. kui $a > 0$, nurkkiiruse suurenemisel suureneb alati ka nurk α ja järelikult tõusevad regulaatori kuulid. Niisuguseid regulaatoreid nimetatakse p ü s i v a t e k s. Kolmandal juhul, s. t. kui $a < 0$, teataval vahemikul vastab ab nurkkiiruse ω suurenemisele nurga α vähenemine, ja alles vahemikul cd nurkkiiruse ω suurenemisel suureneb ka α.

Kaks esimest juhtu annavad staatilise regulaatori skeemi, millel antud pöörete arvule vastab regulaatori kuulide kindel asend, kusjuures pöörete arvu suurenemisel raskused lähevad laiali. Sellele vastupidiselt on kolmandal juhul tegu tasakaalustamatute ehk astaatiliste regulaatoritega, mis teatava pöörete arvu juures on tasakaalus raskuste mitmesuguste asendite puhul, kuid väikseim pöörete arvu muutumine viib raskused ühte äärmistest asenditest.

Aurumasinates kasutatakse tavaliselt püsivaid regulaatoreid, mis on lähedased astaatilistele, selleks et pöörete arvud kuigi palju ei erineks üksteisest raskuste kahe äärmise asendi puhul.



Joon. 140. Regulaatori graafilised karakteristikud.

Ebaühtluse aste ja regulaatori ebatundlikkuse aste. Kui tähistame pöörete arvu regulaatoril, mis on seotud aurujaotuse mehhanismiga ja töötab ilma hõõrdumiseta, regulaatori muhvi ülemise asendi puhul n_1-ga ja alumise asendi puhul n_2-ga, siis vahe $n_1 - n_2$ ja keskmise pöörete arvu suhet

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2},$$

s. t.

$$\frac{n_1 - n_2}{n} = \delta_2$$

nimetatakse regulaatori teoreetiliseks ebaühtluse astmeks, mis kõigub piirides 0,02 kuni 0,08.

Tegelik ebaühtluse aste on teoreetilisest suurem.

Selleks, et regulaatorit, mis on seotud aurujaotuse organitega, oleks

võimalik välja viia tasakaalust, tuleb rakendada teatavat jõudu hõõrdumise ületamiseks regulaatoris endas ja aurujaotuse organites. Järelikult on regulaatori ülemises asendis selle lisajõu tekitamiseks tarvilik pöörete arvu teatav suurendamine suuruse Δn võrra, regulaatori muhvi alumises asendis aga täiendav pöörete arvu vähendamine Δn võrra.

Siit järgneb, et regulaatori tegelik ebaühtluse aste

$$\delta_{teg} = \frac{(n_1 + \Delta n) - (n_2 - \Delta n)}{n} = \frac{n_1 - n_2}{n} + \frac{2\Delta n}{n} = \delta_2 + \varepsilon, \qquad (89)$$

kus $\varepsilon = \frac{2\Delta n}{n}$ kujutab endast regulaatori ebatundlikkuse astet; viimane sõltub hõõrdumisest regulaatoris endas ja aurujaotuse organites, mida regulaator mõjutab. ε suurus kõigub tavaliselt piirides 0,03 kuni 0,07.

Regulaatori sujuvaks, ilma hüpeteta töötamiseks peab ε olema suurem kui δ, kus δ on hooratta ebaühtluse aste.

XVIII peatükk.

Kondensatsioon.

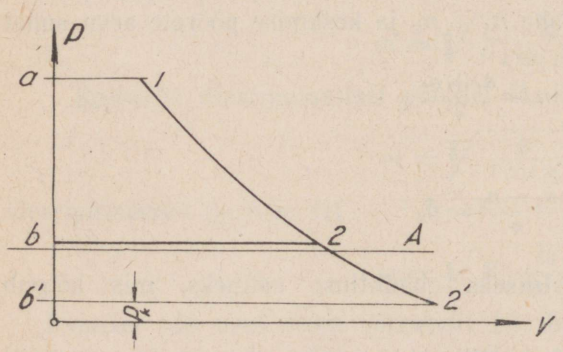
81. Kondensatsiooni olemus ja kondensaatorite liigid.

Auru ühelt kg-lt ideaalses aurumasinas saadava töö hulka määratakse teatavasti valemiga

$$l_o = \frac{i_1 - i_2}{A},$$

kus i_1 on auru entalpia paisumise algul;

i_2 — entalpia adiabaatilise paisumise lõpul.



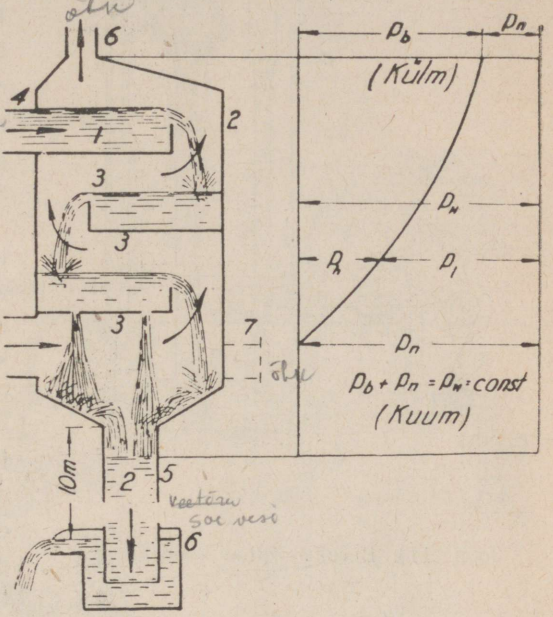
Joon. 141. Rankini ringprotsess aurumasinas töötamisel kondensaatorisse ja välisõhku.

Auru antud algoleku puhul ta töövõime on seda suurem, mida väiksem on vasturõhk, s. o. auru rõhk masinast väljumisel.

Kui masin töötab auru lastes välisõhku, siis l_o on võrdne pindalaga b—a—1—2 (joon. 141). Kui ta aga töötab auru kondensaatorisse lastes, kus rõhk p_k on madalam

atmosfäärilisest rõhust, siis l_o on võrdne pindalaga $b'—a—1—2'$, mis on märksa suurem pindalast $b—a—1—2$. Ökonoomsuse tegelik suurenemine on teataval määral väiksem kui teoreetiline, sest osa energiat, mis saadakse töötanud auru rõhu vähendamise arvel, tuleb kulutada kondensaatori töötamiseks vajalike pumpade käitamisele; peale selle osutuvad kondensatsiooniga masinates suurematеks kaod algkondensatsioonile ja auru läbipääsule ebatihedustest.

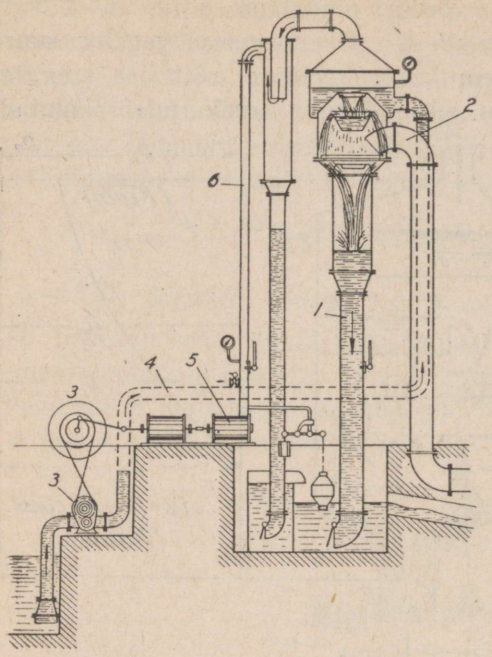
Kondensaatori põhimiseks ülesandeks on auru masinast välja laskmisel tekitada kolvi ees võimalikult suuremat hõrendust. Teoreetiliselt on kõige kasulikum omada kondensaatoris kõige sügavamat vaakumit, kuid aurumasinate puhul osutub majanduslikult otstarbekohaseks rõhk kondensaatoris piirides 0,1 kuni 0,3 ata.



Joon. 142. Segunemiskondensaatori skeem.

Töötamise põhimõttelt ja konstruktiivsetelt tunnustelt jagunevad kondensaatorid segunemis- ja pindkondensaatoriteks.

Segunemiskondensaatorid. Baromeetriline kondensaator. Joonisel 142 on kujutatud vastuvooluga segunemiskondensaatori skeem, millist sageli nimetatakse baromeetriliseks kondensaatoriks. Masinast saabub aur mööda alumist horisontaaltoru kondensaatori *2* sisemusse, kuhu on üles seatud mitu pooltaldrikut *3*. Mööda toru *4* saabub kondensaatorisse külm vesi, mis pooltaldrikult pooltaldrikule valgudes seguneb auruga, jahutab ja kondenseerib teda. Sooja vee ja kondensaadi segu võidakse välja pumbata pumba abil või lastakse tal valguda ilma pumbata raskusjõu toimel mööda vertikaalset toru *5* kogumisnõusse *6*. Toru *5* peab omama küllaldast kõrgust (ligikaudu *10* meetrit); teda nimetatakse baromeetriliseks toruks, kuna veesammas selle sees tasakaalustab välist atmosfäärilist rõhku. Õhk, mis satub kondensaatorisse koos töötanud auruga ja ebatiheduste kaudu, imetakse välja toru *7* kaudu õhupumbaga.



Joon. 143. Baromeetriline kondensaator.

Skeemi kõrval joonisel 142 on kujutatud auru ja õhu rõhkude diagramm kondensaatori kõrguse järgi; auru sisenemise kohas võib õhu partsiaalrõhku lugeda peaaegu nulliks. Sel määral kui aur kondenseerub, s. o. ülespoole liikumisel, tema partsiaalrõhk langeb, õhu partsiaalrõhk aga suureneb.

Vee kulu selles kondensaatoris on umbes 15 kuni 35 kg auru ühe kg kohta. Seda suurust nimetatakse jahutuse kordsuseks ja tähistatakse edaspidi tähega m.

Jahutuse kordsust võib arvutada järgmisel viisil. Kui kondensaatorisse saabuva auru entalpia on i_2, külma vee temperatuur t_1, sooja vee temperatuur t_2, siis auru ühe kg poolt kondensaatoris äraantud soojuse hulk on $i_2 - ct_2$. Ta peab olema võrdne jahutusvee poolt vastuvõetud soojuse hulgaga, mis võrdub $mc(t_2 - t_1)$. Järelikult

$$i_2 - ct_2 = mc(t_2 - t_1),$$

kust

$$m = \frac{i_2 - ct_2}{c(t_2 - t_1)}.$$

Joonisel 143 on kujutatud täielik kondensatsiooniseade baromeetrilise kondensaatoriga.

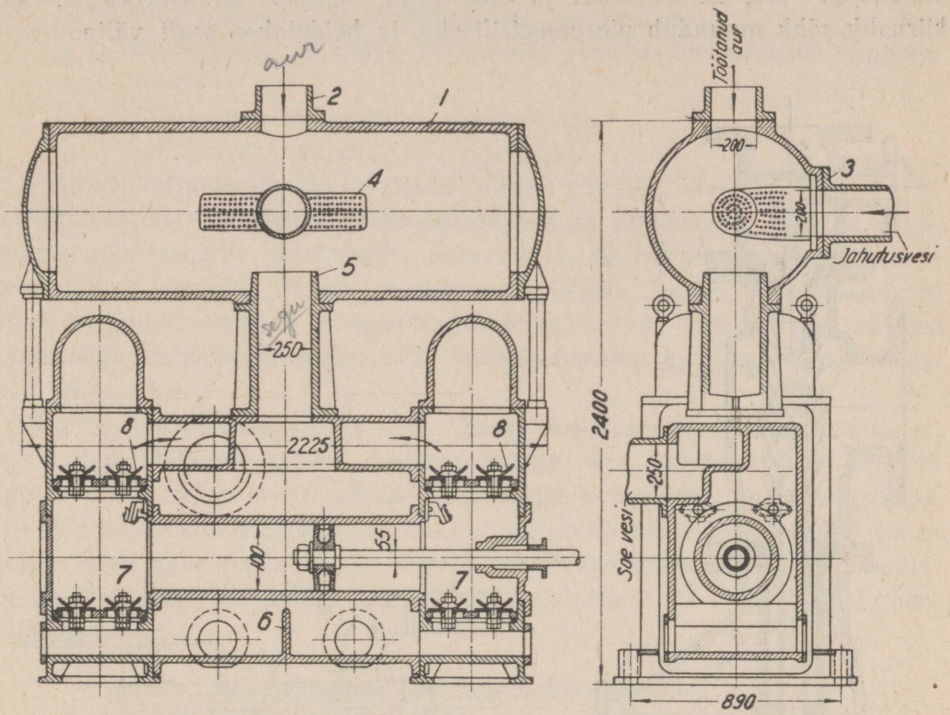
Aur saabub kondensaatorisse *1* mööda toru *2*, külm vesi antakse pumba *3* poolt mööda toru *4*, õhk pumbatakse välja õhupumba *5* poolt mööda toru *6*.

Baromeetrilisi kondensaatoreid kasutatakse seadmetes, kus üks kondensaator teenindab mitut masinat ja aparaati, milledes on tarvis säilitada kindlat vaakumit.

---

* c on vee erisoojus kcal/kg kraad.

Segunemiskondensaator märja õhupumbaga. Joonisel 144 on kujutatud segunemiskondensaator, mis on varustatud märja õhupumbaga.



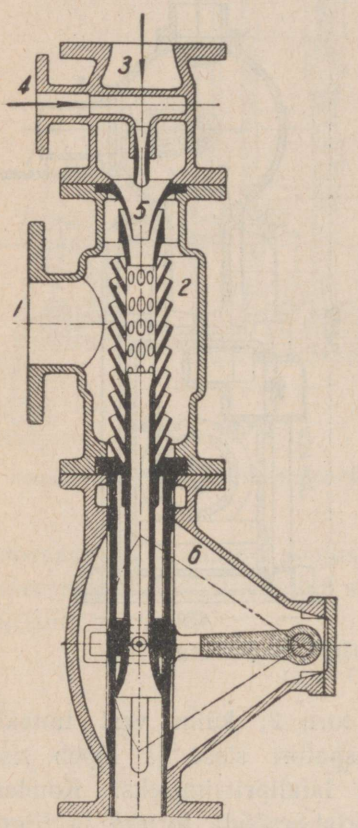
Joon. 144. Segunemiskondensaator märja õhupumbaga.

Aur saabub kondensaatorisse *1* mööda toru *2*; külm vesi tuuakse juurde mööda toru *3*, mis ulatub kondensaatori sisse ja lõpeb risttoruga, mis on varustatud augukestega vee laialipritsimiseks. Kondensaadi, vee ja õhu segu väljub kondensaatorist mööda toru *5* ja liigub ümber silindri alumisse kambrisse *6*. Siit läheb segu läbi imevklappide *7* kolbpumba silindrisse, kust ta pumbatakse surveklappide *8* kaudu ülemisse kambrisse ja sealt välja. See pump, nagu näeme, imeb välja koraga nii vett kui ka õhku, mispärast teda nimetatakse märjaks õhupumbaks.

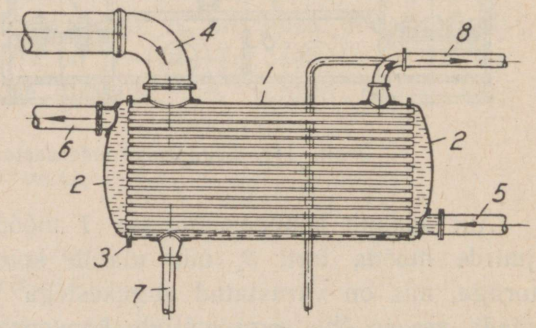
Jugakondensaator. Hästi kompaktse ja lihtsa ehitusega on jugakondensaatorid (joon. 145).

Nendes kondensaatorites antakse külm vesi rõhu all kambrisse *3*, millest ta, voolates ringi ümber toru *4*, saabub düüsi *5*, kus piezomeetriline

rõhk muundub kiiruseks. Suure kiirusega liikuv vee juga imeb endasse auru ja kondenseerib seda, mistõttu kondensaatori sisemuses ja torus *1* tekib hõrendus. Aur saabub masinast torusse *1* ja imetakse kaasa läbi aukude *2*. Vee, kondensaadi ja õhu segu saabub difuusorisse *6*, kus kiiruslik rõhk muundub piezomeetriliseks, ja heidetakse sealt välja.



Joon. 145. Jugakondensaator.



Joon. 146. Pindkondensaator.

Pindkondensaator. Pindkondensaator (joon. 146) kujutab endast silindrilist keret *1*, mis on varustatud põhjadega *2* ja torukinnitusplaatidega *3*, milledesse on kinnitatud (valtsitult või tihendatult) õhukeseseinalised messingtorud. Torude sisse juhitakse külma vett; aur uhub torusid väljastpoolt ja kondenseerub nendel. Aur saabub kondensaatorisse mööda toru *4*, külm vesi mööda toru *5*. Soe vesi lahkub mööda toru *6*, kondensaat mööda toru *7*, õhk — mööda toru *8*.

Jahutamise kordsust pindkondensaatoris määratakse järgmisel viisil:

$$m = \frac{i_2 - i_k}{c\,(t_2 - t_1)}\ \mathrm{kg_{vett}/kg_{auru}},$$

kus i_2 on auru entalpia kondensaatorisse saabumisel;

i_k — kondensaadi entalpia (arvuliselt võrdne kondensaadi temperatuuriga);

t_1 — jahutusvee temperatuur sisenemisel;

t_2 — jahutusvee temperatuur väljumisel.

Pindkondensaatoritel m tavaliselt kõigub piirides 53—60.

Mitmesuguste kondensaatorite paremused ja puudused. Kõikide segunemiskondensaatorite põhimiseks paremuseks on nende valmistamise ja teenindamise lihtsus. Nende puudus aga seisab selles, et kondensaat seguneb jahutusveega. Segunemiskondensaatoreid kasutatakse väikese võimsusega auru-jõuseadmetes, kus katelde toitevee kvaliteet ei ole otsustava tähtsusega.

Suurtes auru-jõuseadmetes aga, näiteks nüüdisaegsetes elektrijaamades, kus katlad töötavad tugeva forsseerimisega, kus toitevee karedusele ja puhtusele esitatakse erilisi nõudeid, kasutatakse seetõttu pindkondensaatoreid. Sellistes kondensaatorites annab aur kondenseerudes katelde jaoks vett, mis on vaba sooladest ja õhust. Pindkondensaatorid on segunemiskondensaatoritega võrreldes kogukamad, kallimad ja kasutamisel keerulisemad.

82. Töötanud auru puhastamine õlist.

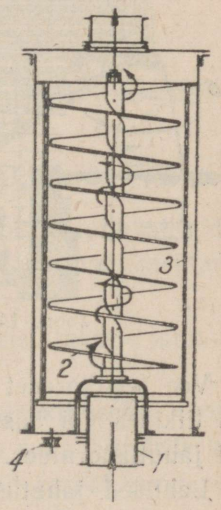
Katelde toitmiseks vajatakse vett, mis peale muu ei tohi sisaldada ka õli.

Õli on võimalik eraldada kondensaadist või töötanud aurust settimisega, keemilisel või mehaanilisel teel.

Settimisega puhastamisel lastakse kondensaadil seista suurtes settimistiikides või reservuaarides, kus õli väiksema erikaalu tõttu tõuseb pinnale; aeg-ajalt teda eemaldatakse vee pinnalt.

Keemilisel menetlusel lisatakse kondensaadile selliseid aineid (näiteks alumiiniumoksüüdi), mis tekitavad vees õli kinnipüüdvaid helbeid.

Mehaaniliseks õli eraldamiseks lastakse vesi läbi eriliste filtrite, mis on täidetud aktiviseeritud sõega, saepuruga või muude filtreerivate ainetega.

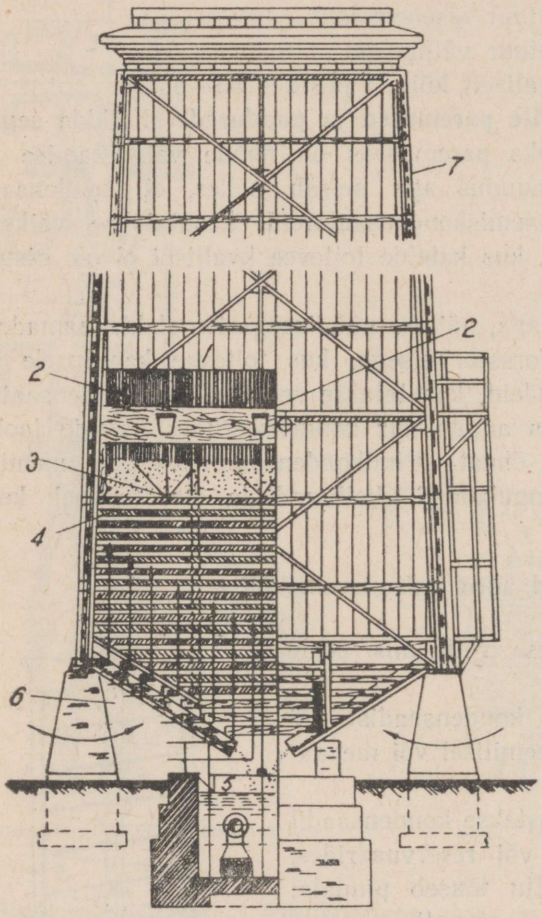


Joon. 147. Õlieraldaja.

Selleks aga, et eraldada mehaaniliselt õli aurust, kasutatakse auru liikumise suuna ja kiiruse muutmist; seejuures õli osakesed eralduvad aurust ja sadestuvad seintel, või erilistel võrkudel, kettidel jne.

Viimasel menetlusel töötava õlieraldaja näiteks võib olla joonisel 147 kujutatud konstruktsioon.

Mööda toru *1* saabub aur silindrilisse reservuaari ja läbides seda piki spiraali *2*, omandab pöörleva liikumise. Õli osakesed heidetakse seejuures välja võrgule *3*, valguvad alla ja eemalduvad toru *4* kaudu.



Joon. 148. Jahutustorn.

83. Vee teistkordne jahutamine.

Jahutusvee kulu kondensaatoris on 15—60 kg auru ühe kg kohta.

Sügava vaakumi saamiseks peab vesi olema võimalikult külm. Tavaliselt kasutatakse selleks jõgede ja järvede vett. Kui aga pole olemas küllaldasel hulgal läbivoolavat vett, siis võib kunstlikult jahutada seda vett, mis on juba kasutatud kondensaatoris. Sel juhul on pidevas ringlemises üks ja sama veehulk; on vajalik ainult võrdlemisi väike lisavee hulk, et katta jahutamisel tekkivaid kadusid.

Vee teistkordset jahutamist võib toimetada selleks korraldatud erilistes tiikides või basseinides, mis on varustatud laialipritsivate düüsidega, või jahutustornides.

Lahtised jahutustiigid ehitatakse niisuguselt, et vesi lastakse sisse ühest otsast ja pumbatakse välja teisest; basseini läbimisel vesi jahtub.

Jahutusbasseini pindala arvutamisel tuleb võtta umbes 3 m^2 masina võimsuse ühe HJ kohta.

Vee efektiivsemat jahtumist ja basseini mõõdete vähendamist on võimalik saavutada laialipritsivate düüside abil. Düüsid asetsevad basseinis pealpool veepinda ja soe jahutusvesi saabub nendesse rõhu all 1—2 atü, mida tekitatakse pumba abil. Düüsidest väljumisel vesi pihustub ja jahtub allalangemisel. Basseini pindala peab niisugusel juhul moodustama 1,5 m^2 ühe HJ kohta. Energia kulu pumpadele vee jahutamisel düüside abil moodustab kuni 3% masina võimsusest. Selle süsteemi paremusteks osutuvad vee küllalt efektiivne jahtumine ja töökindlus. Ta puuduseks on võrdlemisi suur energia kulu.

Vee teistkordseks jahutamiseks kasutatakse kõige rohkem jahutustorne (joon. 148). Kondensaatorist väljuv vesi antakse pumba poolt jaotusrenni *1*, millest ta jaotub ühtlaselt rennidesse *2*, mis asetsevad risti renniga *1*. Rennide *2* põhjas olevate aukude kaudu voolab vesi rosettidele *3*, pihustub ja langeb vihma näol restidele *4*, pihustub uuesti peenteks piiskadeks ja lõpuks voolab basseini *5*. Vee jahutamiseks vajalik õhk saabub jahutustorni žalüsiide *6* kaudu. Tõmme tagatakse sellega, et küllaldase kõrguse saavutamiseks on jahutustorn varustatud õõnsa torniosaga *7*.

Jahutustornid vajavad vähe ruumi ja töötavad kindlalt, kuid vajavad tähelepandavat energia kulu vee ümberpumpamisele.

XIX peatükk.

Masinate tüübid ja nende konstruktiivse kujundamise näiteid.

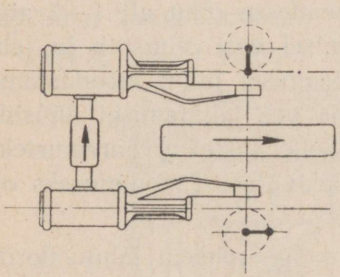
84. Masinate liigitus.

Aurumasinate liigitamine võib toimuda mitmesuguste tunnuste järgi: silindrite telgede suuna, paisumisastmete arvu, auru soojuse kasutamise jne. järgi.

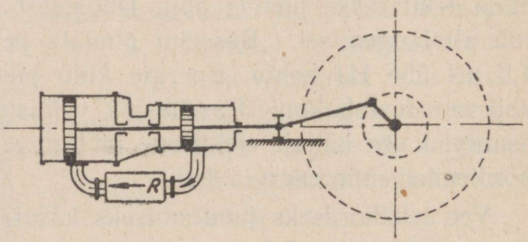
Silindrite telgede suuna järgi eristatakse lamavaid, püst- ja kaldmasinaid.

Lamavad masinad paistavad silma konstruktiivsete vormide lihtsuse ja teenindamise hõlpsusega, kuid nendes tekib suur silindrite kulumine. Peale selle nad vajavad palju ruumi ja nõuavad rasket vundamenti ning tugevat kinnitamist selle külge.

Püstmasinad vajavad vähe ruumi, on kiirema käiguga ja seepärast kergemad. Lamaval masinal on pöörete arv sõltuvalt võimsusest ja kolvikäigust tavaliselt piirides 60 kuni 300 pööret minutis. Püstmasinatel on pöörete arv 250 kuni 500, eri tüüpidel aga 800 kuni 3000 pöö-



Joon. 149. Kompaundmasina skeem.



Joon. 150. Tandem-masina skeem.

ret minutis. Püstmasinad vajavad hoolikamat järelevalvet kui lamavad masinad.

Kaldmasinaid kasutatakse sageli laevadel.

Paisumisastmete arvu järgi võivad aurumasinad olla ühe-, kahe- või kolmekordse paisumisega. Kahekordse paisumisega lamavatel masinatel võivad silindrid asetseda paralleelselt (kompaundmasinad — joon. 149) ja järjestikku (tandem-masinad — joon. 150). Silindrite paralleelsel asetsemisel vajab masin rohkem ruumi ja kujuneb üldse kogukamaks, see-eest aga niisuguse masina käik on ühtlasem, kuna tema eri silindrite vändad asetsevad erinevate nurkade all, tandem-masinas aga töötavad mõlemad kolvid ühele ja samale vändale.

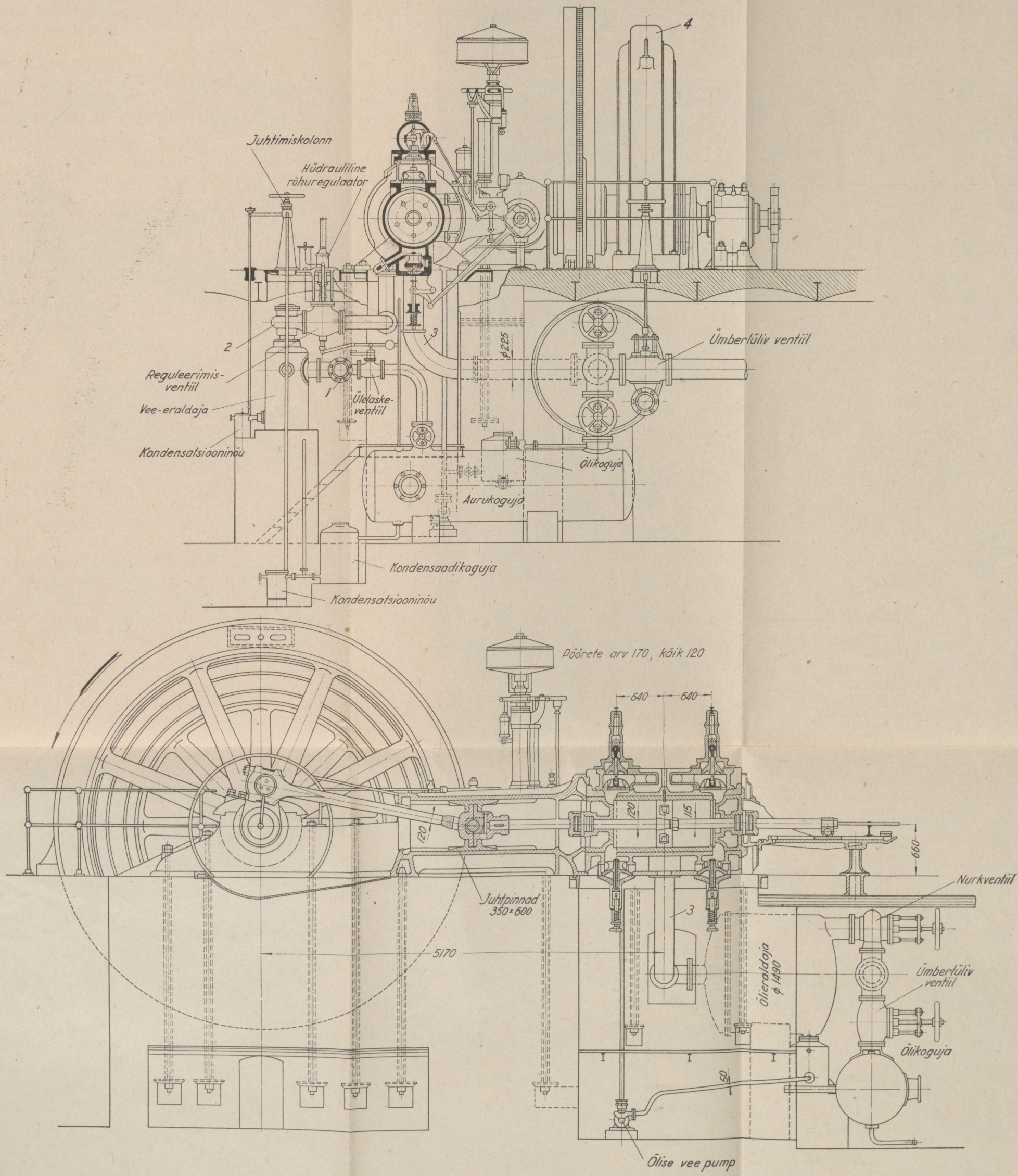
Töötanud auru soojuse kasutamise järgi eristatakse vasturõhu-, kondensatsiooni- ja vaheltaurumasinaid.

Vasturõhumasinaid kasutatakse kahel juhul: 1) kui masina töötanud auru kasutatakse tootmisprotsessis — tehnoloogilisteks otstarveteks, kütteks ja ventilatsiooniks; 2) kui ei ole võimalik rakendada kondensatsiooni, nagu näiteks veduritel ja liikuvatel lokomobiilidel.

Kondensatsioonimasinaid kasutatakse sel juhul, kui vajatakse aurumasinalt ainult mehaanilist energiat.

Vaheltaur-kondensatsioonimasinaid kasutatakse siis, kui on tarvis, et masin varustaks tarbijat nii mehaanilise kui ka soojusenergiaga ja kui mehaanilise ja soojusenergia vajaduse graafikud võivad tugevasti erineda üksteisest.

Vaheltaur võetakse masina resiivrist.

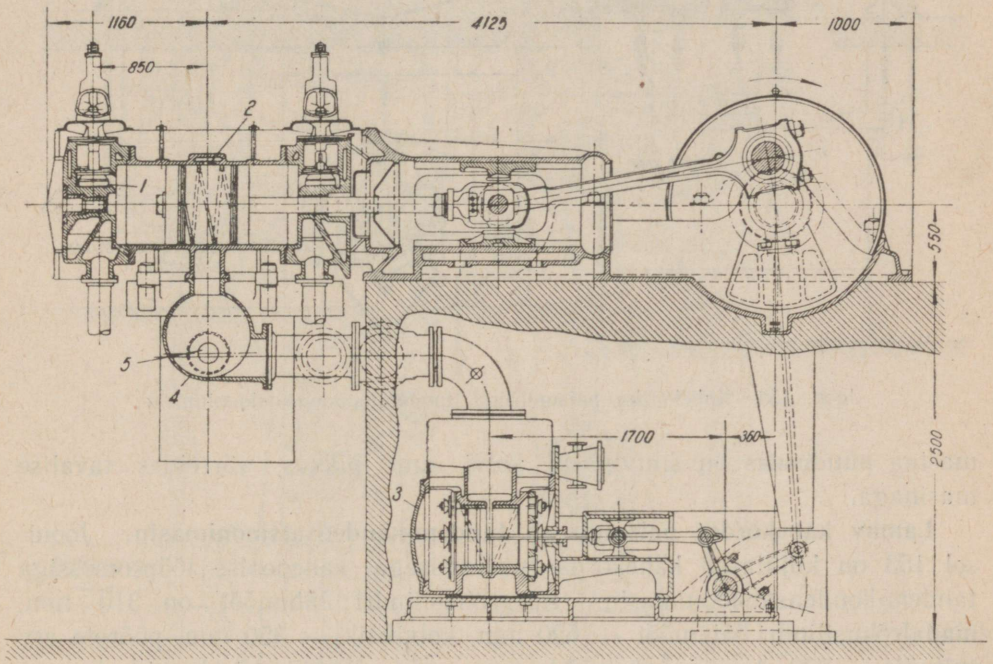


Joon. 151. Ühesilindriline klapp-aurujaotusega vasturõhumasin.

85. Masinate konstruktiivse kujundamise tüübid.

Ühesilindriline lamav vasturõhumasin. Joonisel 151 on kujutatud ühesilindriline vasturõhumasin. Masin on kahepoolse tööprotsessiga. Silindri läbimõõt on 630 mm, kolvikäik 1100 mm, pöörete arv minutis $n = 107$. Aurujaotus on klappidega; ülemised klapid on sisselaskeks, alumised — väljalaskeks.

Aur saabub katlamajast mööda toru *1* vee-eraldajasse, läheb sealt sulgemisventiili *2* ja hüdraulilise rõhuregulaatori kaudu ülemistesse ventiilikarpidesse. Töötanud aur juhitakse alumisest ventiilkarbist toru *3* ja õli-eraldaja kaudu aurumahutisse; sealt võetakse auru tootmisprotsessi vaja-

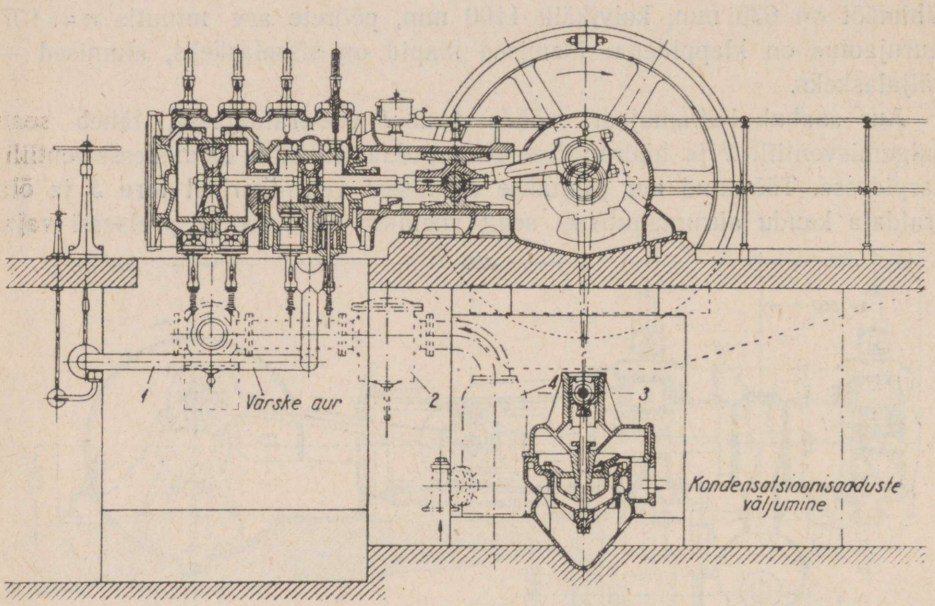


Joon. 152. Lamav otsevoolumasin.

dusteks. Masin käitab generaatorit, mille staator *4* istub peavõllil kõrvuti hoorattaga.

Ühesilindriline otsevoolu-kondensatsioonimasin. Joonisel 152 on kujutatud horisontaalne otsevoolumasin. Auru sisselase toimub klappide *1* abil, töötanud aur suundub segamiskondensaatorisse *4*, kuhu mööda toru *5* juhitakse külma vett. Kondensaadi, jahutusvee ja õhu segu imetakse välja märja õhupumba *3* poolt. Masina võimsus on 420 HJ.

Otsevoolumasina paremused seisavad järgmises: erakordselt väike kahjulik ruum (kuni 2—2,5%), väikesed kaod algkondensatsioonist, väljalaske-ventiilide puudumine, väljalaske-akende suur ristlõige ja sellest tingitud võimalus saavutada suurt vaakumit — kuni 90—93%. Selle



Joon. 153. Kahekordse paisumisega, tandem-kondensatsioonimasin.

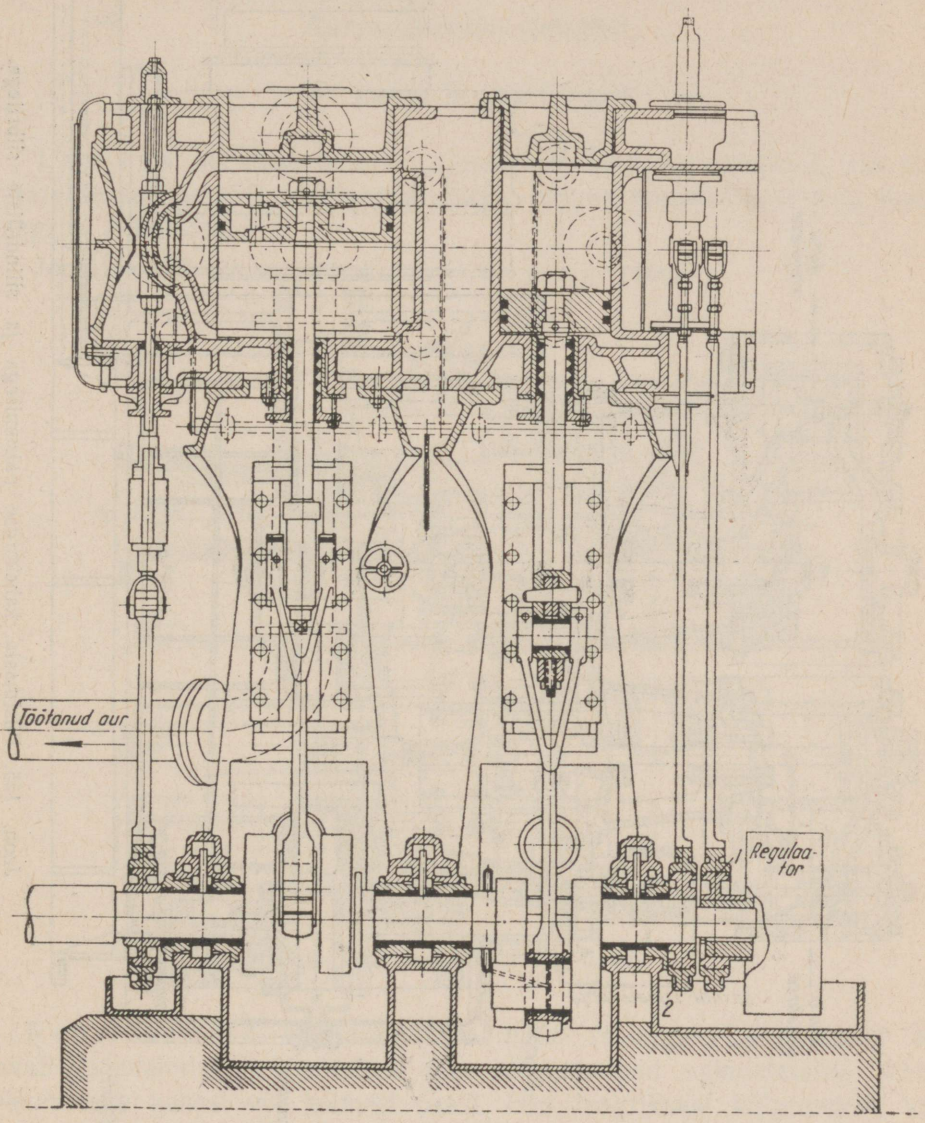
masina puuduseks on silindri ja kolvi suur pikkus, võrreldes tavalise masinaga.

Lamav kahekordse paisumisega tandem-kondensatsioonimasin. Joonisel 153 on kujutatud kahekordse paisumisega, kahepoolse tööprotsessiga tandem-kondensatsioonimasin. Kõrgrõhusilindri läbimõõt on 310 mm, madalrõhusilindri läbimõõt — 520 mm, kolvikäik — 350 mm, pöörete arv minutis — 220. Aur saabub mööda toru *1* kõrgrõhusilindri klappide juurde, mis asetsevad allpool. Sama silindri väljalaskeklapid asetsevad ülalpool. Selline klappide asetus on lubatav ülekuumendatud auru kasutamisel kõrgrõhusilindris. Resiivriks on ruum silindrite peal, kus asetsevad ventiilid. Madalrõhusilindril asetsevad sisselaskeklapid ülalpool, väljalaskeklapid — allpool. Aur väljub masinast läbi õlieraldaja *2* segamiskondensaatorisse *4*. Vee ja õhu segu pumbatakse välja kondensaatorist märja õhupumba *3* poolt.

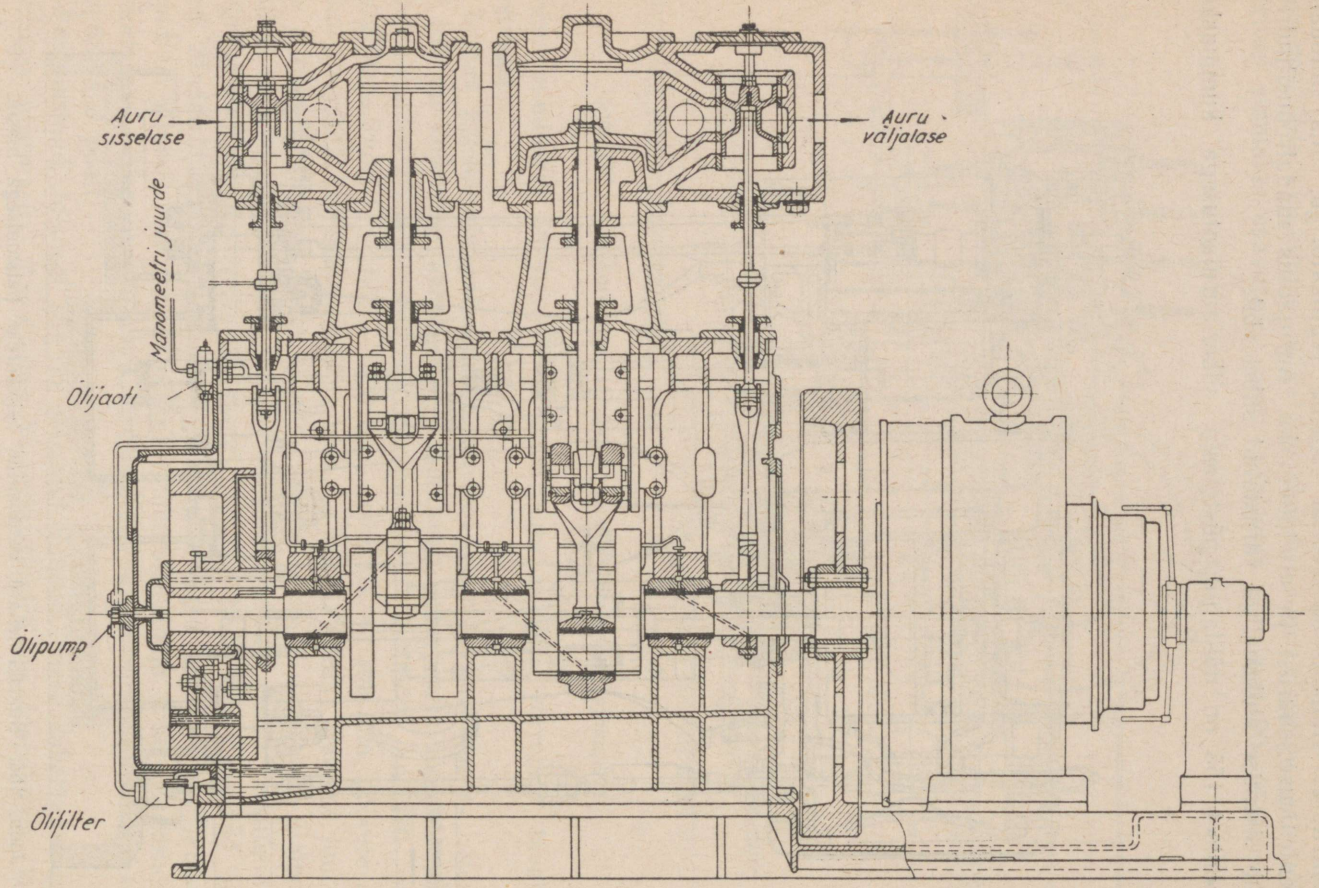
Püstmasinad. Joonisel 154 on näidatud Sumski tehase kahekordse paisumisega püstmasin. Aurujaotus kõrgrõhusilindril on klappidega, kus-

juures väljalaskeklapid käitatakse ekstsentrilt *1*, sisselaskeklapid — ekstsentrilt *2*; viimane on seotud lameda regulaatoriga, mis muudab ekstsentrilisuse suurust ja ettetõttenurka. Aurujaotus madalrõhusilindril teostub sisemise abikanaliga varustatud siibri abil.

Joonisel 155 on näidatud püstmasin siiber-aurujaotusega kummaski



Joon. 154. Sumski tehase vertikaalne kahekordse paisumisega masin.



Joon. 155. Püstmasin kahekordse paisumisega ja silindriliste siibritega.

silindris. Täitumise muutmist kõrgrõhusilindris teostab lameregulaator, mis muudab ekstsentri ekstsentrilisuse suurust ja ettetõttenurka.

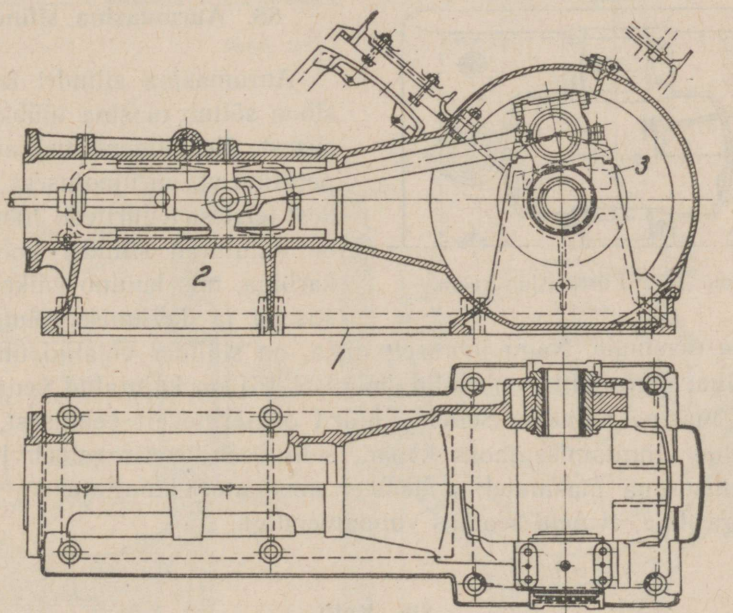
XX peatükk.

Aurumasinate detailid.

86. Raam ja raamlaagrid.

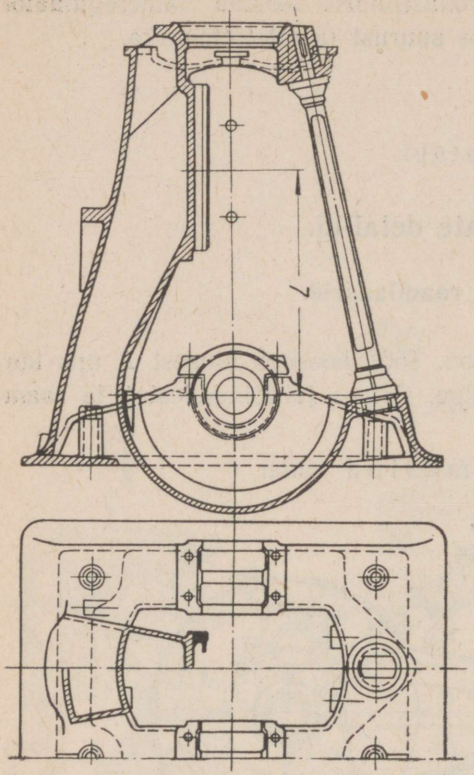
Lamava aurumasina raam (joon. 156) koosneb alusest *1*, mis kinnitatakse poltide abil vundamendi külge, ristpea juhtpindadest *2* ja raamlaagrite *3* keredest.

Joonisel 157 on kujutatud püstmasina raam.



Joon. 156. Lamava masina raam.

Raamlaagrid valatakse ühes tükis raamiga. Laagrikausid on tavaliselt malmist ja pabiidiga täis valatud; nad valmistatakse lahtivõetavatena kahest või kolmest osast. Üks laagrikausi külgosadest, kui laager kulub, tõmmatakse kiilu või külgmiste tugipoltide abil koomale.



Joon. 157. Püstmasina raam.

87. Ristpea.

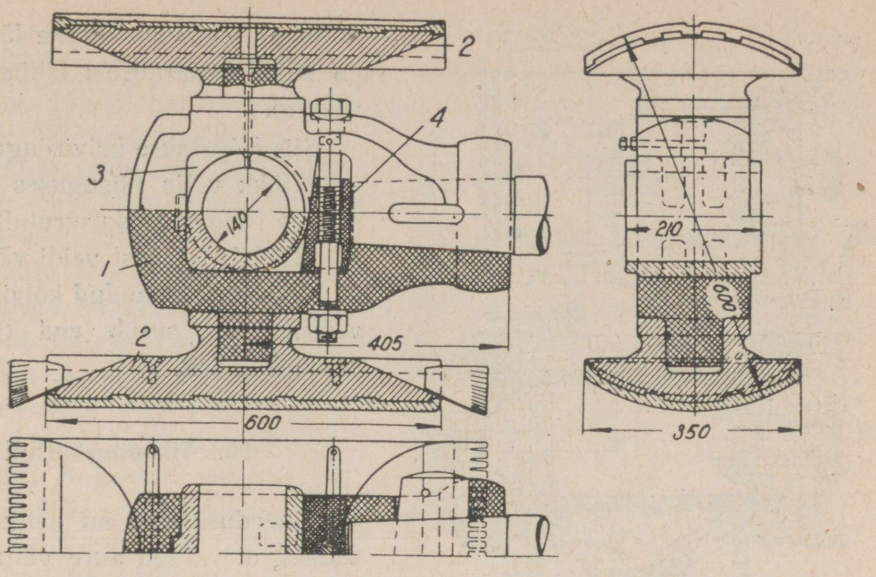
Ristpea on kolvivarre ja kepsu liigendühendiks. Ristpea valmistatakse lahtisena või kinnisena. Joonisel 158 on näidatud lahtine ristpea kahvel kepsu jaoks. See ristpea koosneb kerest *1*, mis on taotud terasest, ja malmist tugiosadest *2*, millede liugpinnad on kaetud pabiidiga. Ristpea sees on laagrikausid *3*, mida on võimalik pingutada kiilu *4* abil. Joonisel 159 on kujutatud kinnine ristpea.

88. Aurumasina silinder.

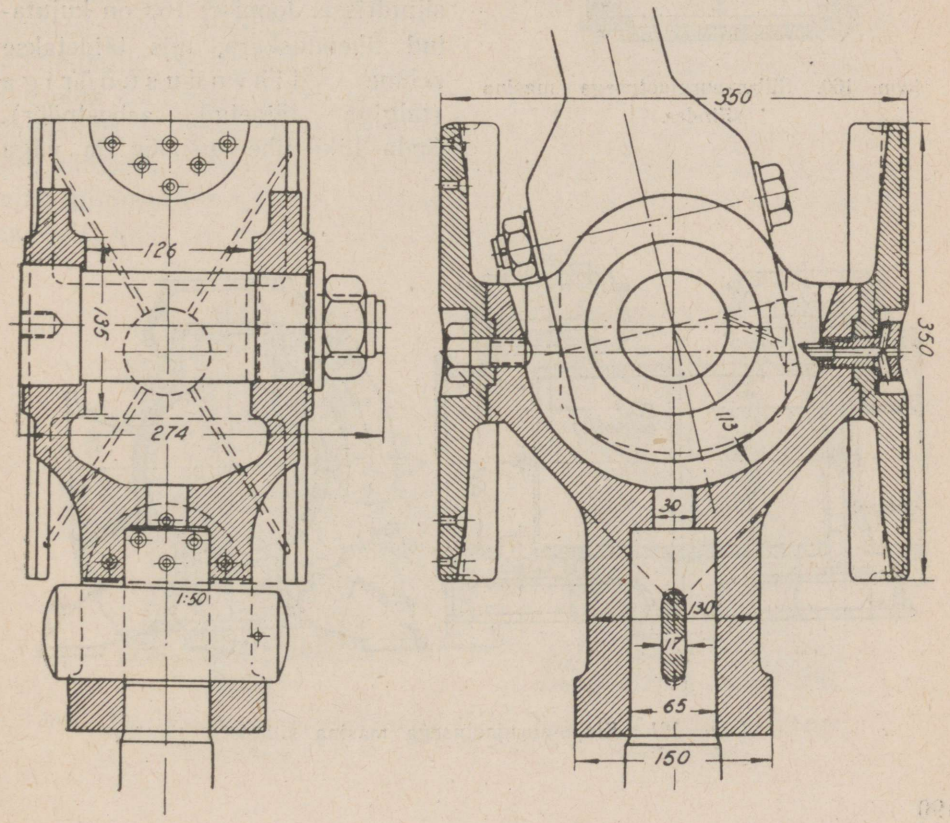
Aurumasina silindri konstruktsioon sõltub masina tüübist, võimsusest, ülekuumendatud auru temperatuurist, aurujaotusest ja paljudest teistest teguritest. Joonisel 160 on kujutatud silinder koos siibrikarbiga, mis kuulub väikese võimsusega ja keskmise rõhuga horisontaalsele masinale. Nagu jooniselt näha, on silinder valatud ühes tükis siibrikarbiga; materjaliks on malm. Joonisel 161 on kujutatud ventiil-aurujaotusega masina silinder. Sellel silindril on, erinevalt eelmisest, vundamendi külge kinnitamise jaoks käpad; selline ehitusviis esineb tavaliselt suure võimsusega masinatel; väikestel masinatel kinnitatakse silindrid aluse külge ilma, et neid seotaks vundamendiga.

89. Kolb.

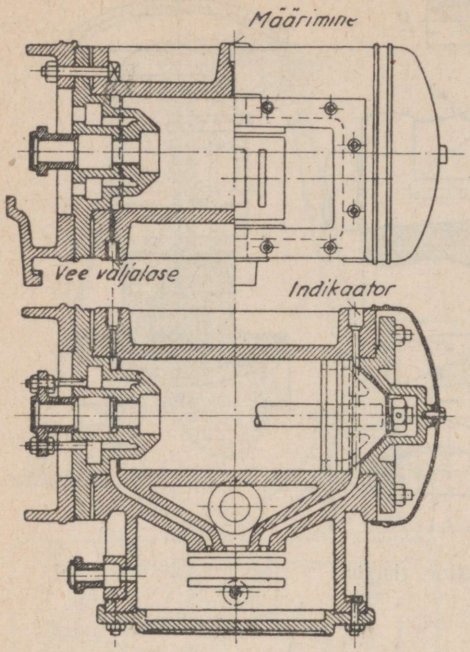
Kolb koosneb kerest ja kolvirõngastest (joon. 162). Kolvi kere on valatud malmist või terasest. Harvemini stantsitakse teda terasest. Tihendusrõngad peavad tagama minimaalse hõõrumise puhul võimalikult väikest auru läbipääsu. Kolvirõngad valmistatakse tavaliselt erimalmist. Tihedus saavutatakse järgmisel viisil: kolvirõngad treitakse



Joon. 158. Lahtine ristpea.



Joon. 159. Kinnine ristpea.



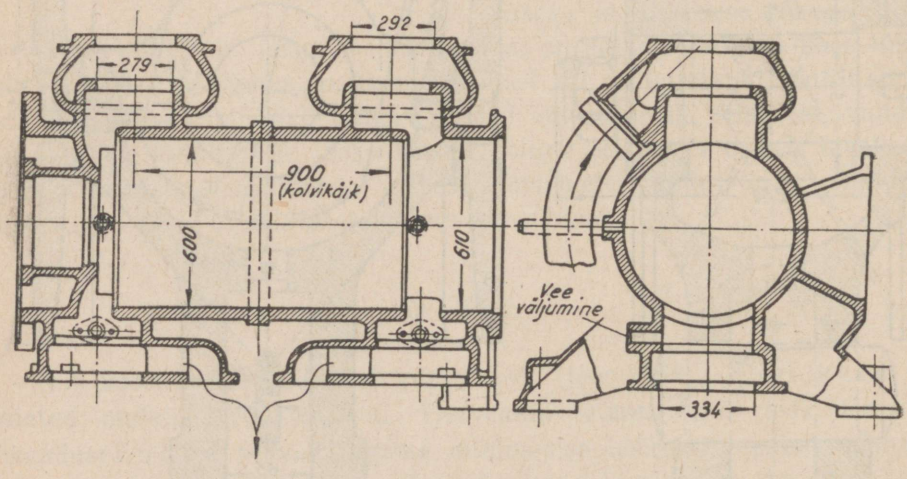
Joon. 160. Siiber-aurujaotusega masina silinder.

välja nii, et nende väline läbimõõt on silindri sisemisest läbimõõdust suurem.

Siis lõigatakse kolvirõngast viltune tükk välja niisuguses suuruses, et rõngas kokkusurutult oleks silindri läbimõõdust veidi väiksem; silindrisse sissepandud kolvirõngas vedrutab ja surub end tihedalt vastu silindrit.

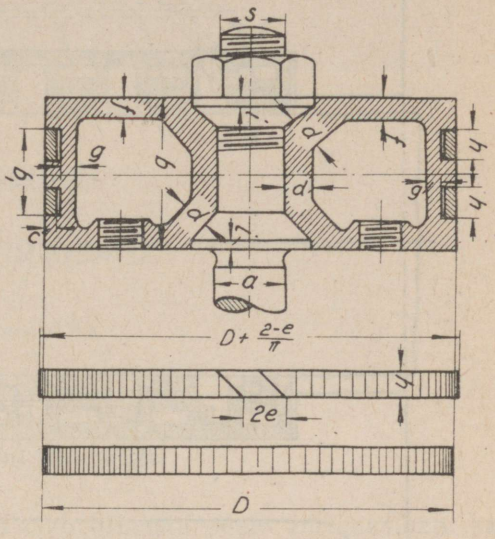
90. Tihenduskarbid.

Tihenduskarbid on nähtud ette selleks, et vältida auru väljapääsu silindrist või õhu sisseimemist silindrisse. Joonisel 163 on kujutatud tihenduskarp, mis täidetakse pehme tihendusnööriga (talgiga täidetud asbestnöör). Seda liiki tihendusnöör on väga



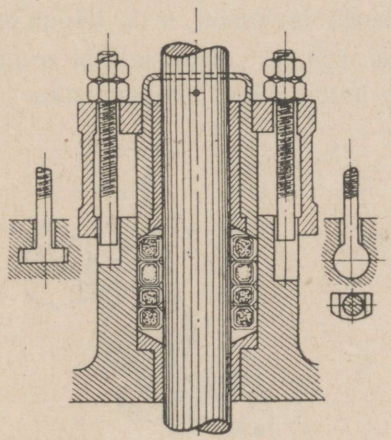
Joon. 161. Klapp-aurujaotusega masina silinder.

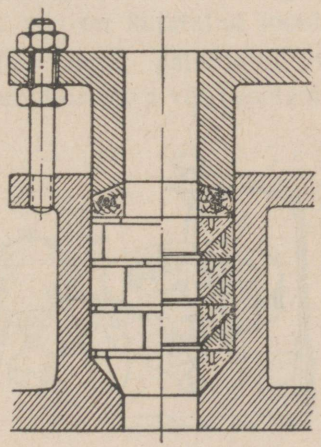
lihtne ja odav, kuid omab mitmeid puudusi: vajab tihenduskarbi sagedast pingutamist ja rikkalikku määrimist, rikneb kergesti ja laseb rohkesti auru läbi. Täiuslikum metalltihendusega tihenduskarp on näidatud joonisel 164. Tihendusrõngad on trapetsikujulise ristlõikega ja pooleks lõigatud. Sisemised rõngad, mis liibuvad vastu kolvivart, valmistatakse suure pliisisaldusega pabiidist, välised rõngad aga, mis käivad vastu tihenduskarbi keret, valmistatakse messingist või malmist. Tihenduskarbi poltide pingutamisel surutakse sisemised rõngad tugevasti vastu kolvivart, välised aga — vastu tihenduskarbi seinu.

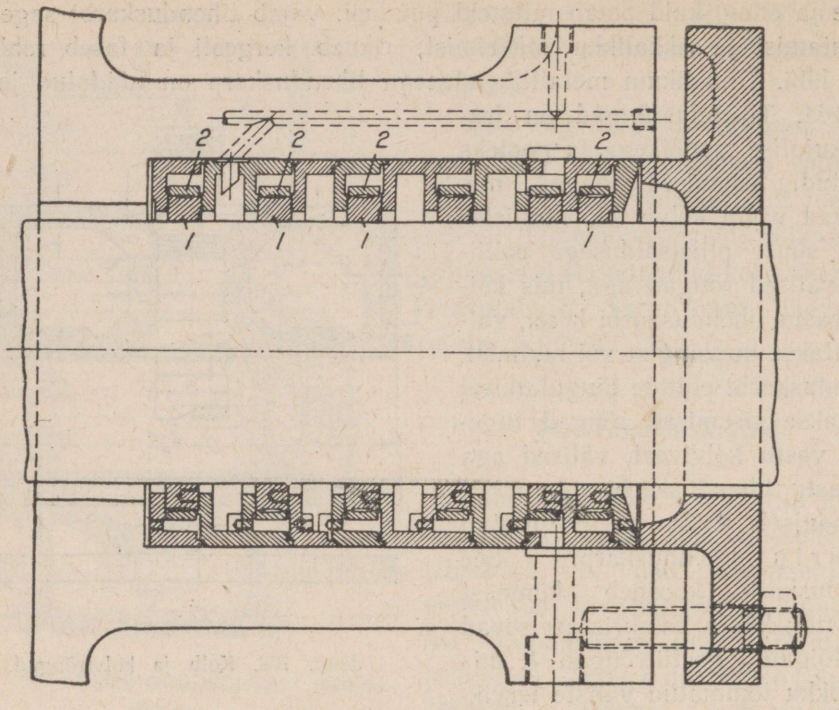


Joon. 162. Kolb ja kolvirõngad.

Joonisel 165 on kujutatud l a b ü r i n t -tihenduskarp. See tihenduskarp koosneb kümnest kambrist; kuues kambris asetsevad katkilõigatud grafiitrõngad *1*, mis on kokku tõmmatud väliste tervikrõngastega *2*. Auru muljumise tõttu üleminekul ühest kambrist teise on auru läbipääs niisugusest tihenduskarbist minimaalne. See tihenduskarp vajab minimaalset määrimist, kulutab vähe kolvivart, laseb läbi auru minimaalselt, kuid on võrdlemisi keerulise ehitusega.


Joon. 163. Pehme tihendusnööriga tihenduskarp.


Joon. 164. Pabiitrõngastega tihenduskarp.



Joon. 165. Labürint-tihenduskarp.

KOLMAS OSA.

AURUTURBIINID.

XXI peatükk.

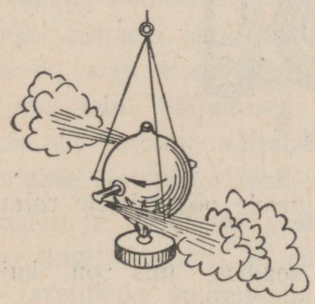
Teoreetilisi põhiteatmeid.

91. Turbiini üldmõiste.

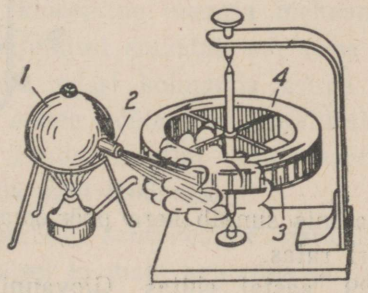
Auru energia muundumine tööks võib toimuda peale aurumasinate ka auruturbiinides. Kolb-aurumasinates muundub mehaaniliseks energiaks vahetult auru potentsiaalne energia. Auruturbiinis muundub auru potentsiaalne energia kineetiliseks energiaks, viimane aga mehaaniliseks energiaks.

Auruturbiini loomise esimene katse toimus juba kauges minevikus. Heron Aleksandriast kirjeldas 120 aastat enne meie ajaarvamist nn. eolüpüüli, s. o. pöörlevat õõnsat kera, mis on kujutatud joonisel 166.

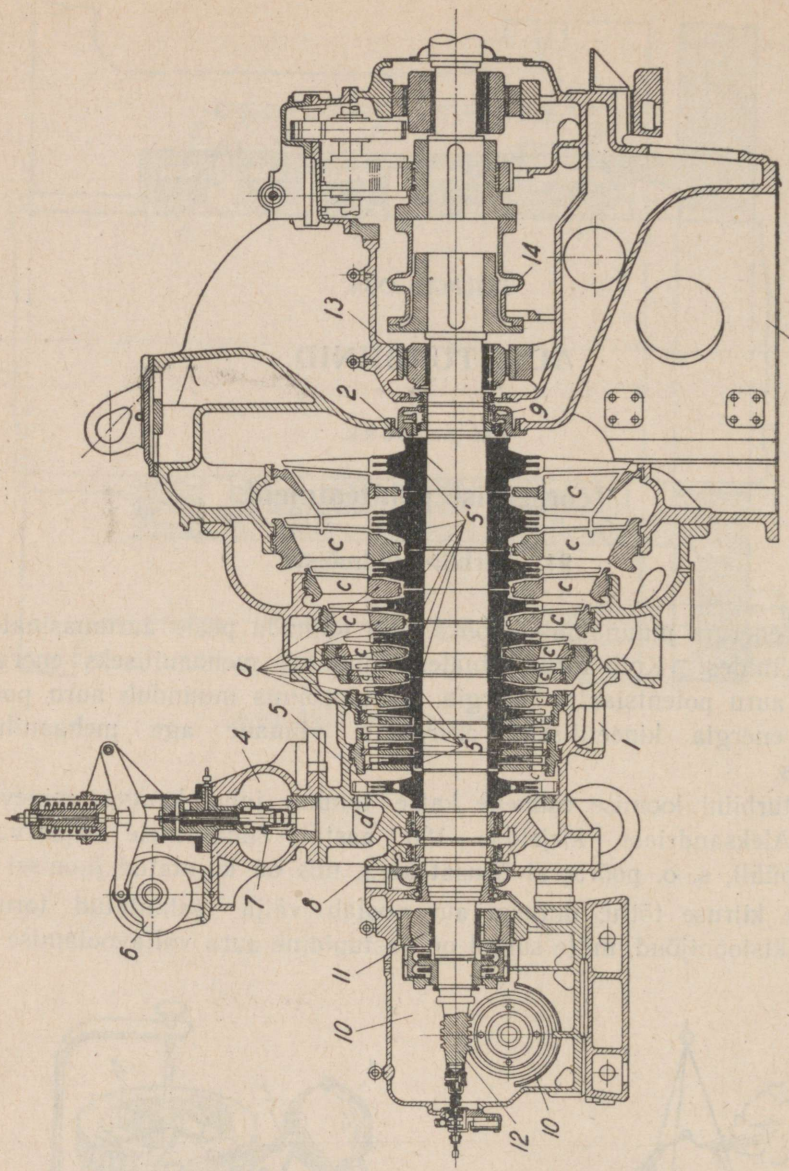
Suure kiiruse tõttu, millega aur voolab välja painutatud torudest, tekib reaktsioonijõud, mille suund on vastupidine auru väljavoolamise suu-



Joon. 166. Heroni eolüpüül.



Joon. 167. Giovanni Branco seadis.



Joon. 168. Stalini-nimelise Leningradi metallitehase turbiin võimsusega 50 000 kW.

nale ja mis sunnib kera pöörlema. Samasugusele põhimõttele rajaneb ka Segneri ratas.

1629. aastal ehitas Giovanni Branco seadise, mis on kujutatud joonisel 167.

Siin aur voolab katlast *1* suure kiirusega läbi otstüki *2*, mida võib nimetada düüsiks, ja suundub painutatud labidatele, mis on kinnitatud ratta *4* ümbermõõdule. Töölabidatel muundub kineetiline energia mehaaniliseks energiaks ja ratas hakkab seetõttu pöörlema.

Heroni kera osutub nn. reaktiivturbiini (ülerõhu-turbiini) prototüübiks, Branco ratas aga aktiivturbiini (ühtlase rõhuga turbiini) prototüübiks.

Nüüdisaegse auruturbiini tüüpilise konstruktsiooni näiteks võib olla Stalini-nimelise Leningradi Metallitehase turbiin võimsusega 50 000 kW (joon. 168).

Turbiin koosneb võllist *2*, millele on kuumalt peale pandud 12 ketast (5,5'). Iga ketta põiale on kinnitatud töölabad.

Kettad on eraldatud üksteisest vahepealsete paigalseisvate diafragmadega *a*. Igas diafragmas asetsevad düüsid *c*. Võll pöörleb kahel laagril, milledest esimene vasakpoolne *11* osutub üheaegselt nii kande- kui ka tugilaagriks, parempoolne *13* aga ainult kandelaagriks. Kohtades, kus võll läbib keret *1*, on labürinttihendused *8* ja *9*.

Turbiini võlli eesmisel otsal asetseb tigu *12*, mis käitab tiguratta abil horisontaalset võlli. Tigu ja tiguratas asetsevad karbis *10*. Tiguga aetaval võllil istuvad tsentrifugaalregulaator ja hammasratas-õlipump. Viimane tagab laagrite määrimist.

Võlli tagumisele otsale on peale pandud sidur *14*, mis ühendab turbiini generaatoriga. Turbiini all tagapool (paremal) asetseb auru väljalaske ava *3*. Eespool turbiini kohal asetsevad klappide kambrid *4* reguleerivate klappidega *7* ja nende ajamitega *6*.

Turbiin töötab järgmisel viisil. Läbi reguleerivate klappide *7* juhitakse värske aur esimese astme düüsidesse *d*, kus aur omandab vajaliku kiiruse ja suuna ja kust ta voolab edasi esimese ketta töölabadele.

Töölabade kanalites muundub auru kineetiline energia mehaaniliseks energiaks. Esimese ketta töölabadest väljumisel suundub aur teise astme düüsidesse, sealt teise astme töölabadele, edasi kolmanda astme düüsidesse jne., kuni väljumiseni viimase astme töölabade kanalitest. Siis suundub aur turbiini väljalaske-ava *3* kaudu turbiini kondensaatorisse, kus hoitakse alal püsiv rõhk piirides 0,04 kuni 0,06 ata.

Düüside ja labade kõrguse järk-järguline suurenemine astmelt astmele on tingitud sellest, et auru paisumisel ta maht suureneb ja seetõttu osutub tarvilikuks suurendada järk-järgult düüside ja töölabade kanalite ristlõikeid.

92. Energia muundumine turbiini düüsides.

Auru energia mehaaniliseks tööks muundumisel turbiinis me eristame kahte staadiumi: 1) auru potentsiaalse energia muundumist kineetiliseks energiaks ja 2) kineetilise energia muundumist mehaaniliseks tööks.

Auru potentsiaalse energia muundumine kineetiliseks energiaks toimub kas ainult düüsides (paigalseisvates kanalites), või osaliselt düüsides ja osaliselt töölabade poolt moodustatud kanalites, või siis lõpuks ainult töölabadel, mis jäigalt on kinnitatud pöörlevale kettale või trumlile.

Düüsist auru väljavoolamise teoreetiline kiirus, kui mitte arvestada düüsi saabuva auru kineetilist energiat, määratakse järgmiste võrranditega:

$$c = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \qquad (90)$$

kus c on auru teoreetiline kiirus düüsist väljumisel, m/sek.;
p_1 — auru rõhk düüsi sisenemisel, kg/m²;
v_1 — auru kilomaht düüsi sisenemisel, m³/kg;
p — auru rõhk düüsi väljavoolu-suudmes, kg/m²;
k — adiabaadi astendaja;
g — raskustungi kiirendus, m/sek².,
või võrrandi abil:

$$c = \sqrt{\frac{2g(i_1-i_2)}{A}} = 91{,}5\sqrt{i_1-i_2} = 91{,}5\sqrt{h_o}, \qquad (91)$$

kus $h_o = i_1 - i_2$ — entalpia langus auru adiabaatilisel paisumisel rõhult p_1 kuni p.

Auru düüsist väljavoolamise kiirus, kui arvestada düüsi saabuva auru kineetilist energiat, saabumise kiiruse võrdudes c_0, määratakse võrranditest:

$$c = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]+c_o^2} \text{ m/sek.}; \qquad (92)$$

$$c = \sqrt{\frac{2g(i_1-i_2)}{A}+c_o^2} = \sqrt{\frac{2gh_o}{A}+c_o^2} \text{ m/sek.} \qquad (93)$$

(tähistused samad, nagu võrrandites (90) ja (91)).

Auru kulu määratakse võrrandist:

$$G_{sek} = \frac{cf}{v} = f\sqrt{2g\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}, \quad (94)$$

kus G_{sek} on auru kulu, kg/sek.;

f — düüsi väljavoolu-suudme ristlõike pindala m² (ahenev düüs);

v — auru kilomaht väljumisel.

Auru väljavoolamisel silindrilisest või ahenevast düüsist tekib teatavasti selle suudmes kriitiline rõhk p_{kr}, mis võrdub

$$p_{kr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p_1 = \beta_{kr} p_1 \text{ kg/m}^2,$$

kus $\beta_{kr} = 0{,}546$ ülekuumendatud auru jaoks;

$\beta_{kr} = 0{,}577$ kuiva küllastunud auru jaoks.

Auru väljavoolamise kiirus silindrilisest ja ahenevast düüsist, niinimetatud kriitiline kiirus on:

ülekuumendatud aurul

$$c_{kr} = 3{,}33\sqrt{p_1 v_1} \text{ m/sek}; \quad (95)$$

küllastunud aurul

$$c_{kr} = 3{,}23\sqrt{p_1 v_1} \text{ m/sek}; \quad (95')$$

kriitiline kulu ülekuumendatud aurul

$$G_{kr} = 2{,}09 f\sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \text{ kg/sek}, \quad (96)$$

kuival küllastunud aurul

$$G_{kr} = 1{,}99 f\sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \text{ kg/sek}. \quad (96')$$

Tegelik kiirus c_1 düüsist väljumisel on teoreetilisest väiksem, sest et väljavoolamisega kaasnevad kaod, mis tekivad esiteks keeristest aurujoas ja teiseks hõõrdumisest vastu seinu ja aurujoakeste sisemisest hõõrdumisest teineteise vastu.

Kiiruse langust düüsis arvestatakse kiiruse teguriga φ:

$$c_1 = \varphi c. \quad (97)$$

Siit järgneb, et kiirusenergia kaod düüsis võrduvad:

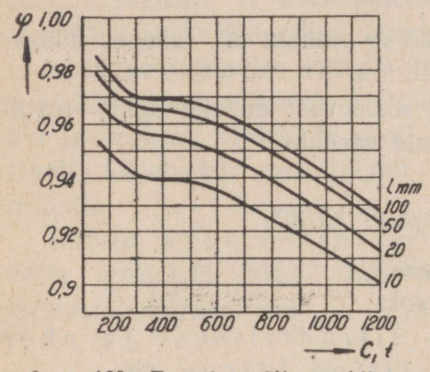
$$\Delta l = \frac{c^2}{2g} - \frac{c_1^2}{2g} = \frac{1}{2g}(c^2 - \varphi^2 c^2) = \frac{c^2}{2g}(1 - \varphi^2) = \zeta_c \frac{c^2}{2g}, \quad (98)$$

kus

$$\zeta_c = (1 - \varphi^2). \quad (99)$$

Siin ζ_c on düüsis esineva energia kao tegur ehk takistustegur.

Kiirustegur φ määratakse katselisel teel; ta sõltub auru düüsist väljavoolamise kiirusest, düüsi ristlõike suurusest, seinte sisepinna seisukorrast, düüsi kujust (on see ahenev või laienev *), düüsi pikkusest ja auru olekust. Joonisel 169 on toodud diagramm, mis näitab kiirusteguri φ sõltuvust auru väljavoolamise teoreetilisest kiirusest ja düüsi pikkusest freesitud düüside puhul. See sõltuvus on määratud andmete võrdlemisel, mis on saadud mitmesuguste uurijate ja turbiinitehaste poolt. Nagu näha jooniselt 169, muutub tegur φ piirides 0,90 kuni 0,98 ja orienteeruvate arvutuste jaoks teda võib võtta keskmiselt võrdseks 0,95-ga.



Joon. 169. Teguri φ sõltuvus kiirusest ja düüsi pikkusest.

Täienduseks nendele andmetele tuleb märkida, et lühikestel düüsidel kiirustegur φ on suurem kui pikkadel düüsidel. Laienevates düüsides aga ei tule võtta laienemisnurka suuremana kui 10—12°, kuna suuremate nurkade puhul tekib joa suur hajumine düüsist väljumisel ja on võimalik joa lahtirebendumine seintest.

93. Düüsi arvutamine.

Düüsid võivad olla ahenevad ja laienevad. Ahenevaid düüse kasutatakse siis, kui auru rõhk düüsi järel on suurem kriitilisest rõhust p_{kr}. Kui aga rõhk düüsi järel on kriitilisest väiksem, siis kasutatakse laieneva kujuga düüse.

Düüsi arvutamisel on lähteandmeteks tavaliselt auru kulu sekundis G_{sek}, auru rõhk ja temperatuur enne düüsi p_1 ja t_1 ja auru rõhk pärast düüsi p_2.

Otsitavateks suurusteks aga on laieneva düüsi puhul: 1) minimaalne ristlõige düüsi kõige kitsamas kohas, s. o. düüsi kurgus, f_{min}; 2) düüsi ristlõige auru väljumise ristlõikes f_2; 3) düüsi laieneva osa pikkus.

Aheneva düüsi puhul on otsitavaks suuruseks düüsi otsa ristlõige auru väljumisel.

* Laienevaks düüsiks nimetatakse siin laienevat kurguga düüsi.

Minimaalne ristlõige, s. o. ristlõige düüsi kurgus, määratakse võrrandist, mis on rakendatav nii küllastunud kui ka ülekuumendatud auru puhul, ja nimelt:

$$G_{kr} = 2{,}03 f_{min} \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \text{ kg/sek}, \qquad (100)$$

kust:

$$f_{min} = \frac{G_{kr}}{2{,}03\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} \text{ m}^2. \qquad (100')$$

Väljumise f_2 ristlõiget on võimalik määrata auru kulu võrrandist

$$G_{sek} = G_{kr} = \frac{f_2 c_1}{v_2},$$

kus c_1 on tegelik väljavoolamise kiirus;

v_2 — kilomaht väljumisel,

kust:

$$f_2 = \frac{G_{sek} v_2}{c_1} \text{ m}^2.$$

Auru tegelikku kiirust väljumisel määratakse võrrandi järgi:

$$c_1 = \varphi c = 91{,}5\,\varphi \sqrt{h_o} \text{ m/sek}.$$

Düüsi pikkust kuni kitsaima kohani määratakse tavaliselt konstruktiivsetel kaalutlustel; laieneva osa pikkust — valitud koonilisuse nurga järgi.

Näide. Arvutada laienev düüs andmete järgi: $G_{sek} = 0{,}5$ kg; $p_1 = 16$ ata; $t_1 = 350^\circ$; $p_2 = 0{,}1$ ata; $\varphi = 0{,}95$.

Lahendus. Leiame

$$f_{min} = \frac{G_{sek}}{2{,}03\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} = \frac{0{,}5}{2{,}03\sqrt{\frac{16 \cdot 10^4}{0{,}178}}} = 0{,}00025 \text{ m}^2 = 2{,}5 \text{ cm}^2.$$

Määrame

$$f_2 = \frac{G_{sek} v_2}{c_1}; \qquad c_1 = 91{,}5\,\varphi \sqrt{h_o}.$$

Selleks, et määrata $h_o = i_1 - i_2$, leiame i-s-diagrammilt:

$$i_1 = 751 \text{ kcal/kg};$$
$$i_2 = 535 \text{ kcal/kg};$$
$$c_1 = 0{,}95 \cdot 91{,}5 \sqrt{751 - 535} = 1283 \text{ m/sek}.$$

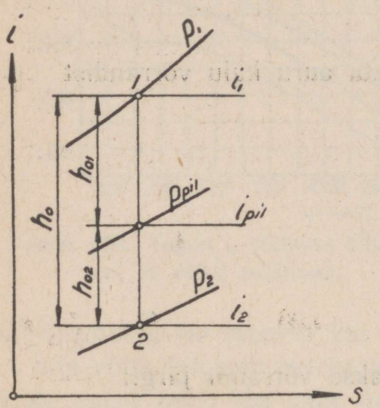
i-s-diagrammilt leiame ka auru kilomahu paisumise lõpul, s. o. düüsist väljumisel

$$v_2 = 12{,}7 \text{ m}^3/\text{kg};$$

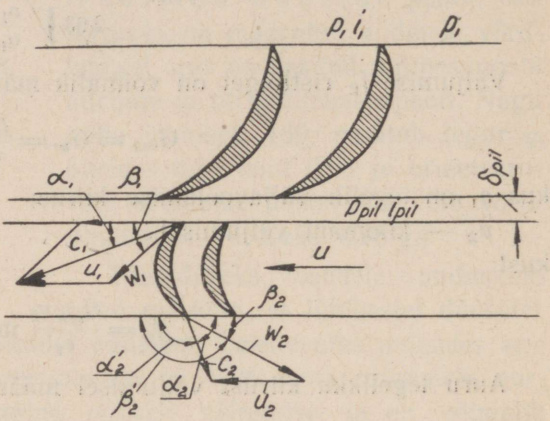
$$f_2 = \frac{0{,}5 \cdot 12{,}7}{1283} = 0{,}00495 \text{ m}^2 = 49{,}5 \text{ cm}^2.$$

Aur, mis väljub düüsidest kiirusega c_1, läbib pilu paigalseisvate düüside ja liikuvate töölabade vahel ja satub töölabade poolt moodustatud kanalitesse.

Üldjuhul toimub töölabade kanalites auru paisumine rõhust pilus p_{pil} kuni rõhuni labade taga p_2. Kui auru rõhk düüsi sisenemisel on p_1 ja entalpia i_1, pilus vastavalt p_{pil} ja i_{pil}, ja töölabade kanalitest väljumisel



Joon. 170. Reaktiivastme protsess i-s-diagrammil.



Joon. 171. Düüside ja labade profiilid ja astme kiiruste kolmnurgad.

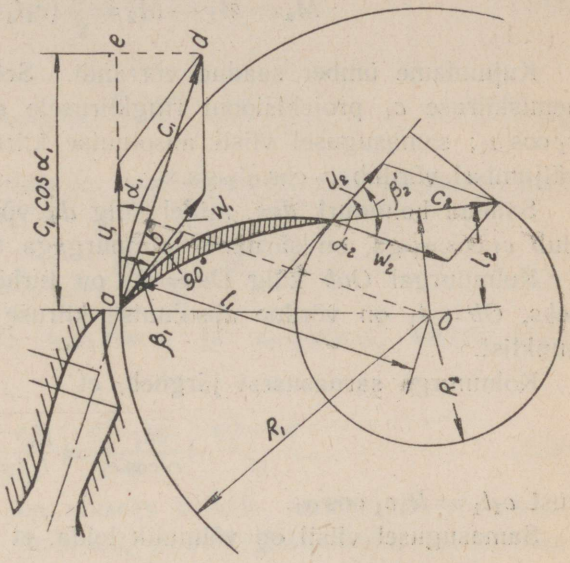
p_2 ja i_2, siis $i_1 - i_2 = h_{o1}$ (joonised 170 ja 171) osutub täielikuks entalpia languseks turbiini antud astmel, kusjuures osa sellest entalpia langusest $i_1 - i_{pil} = h_{o1}$ kasutatakse ära düüsides, osa aga $i_{pil} - i_2 = h_{o2}$ töölabade kanalites.

Suhet $\frac{h_{o2}}{h_{o1} + h_{o2}} = \varrho$ nimetatakse reaktsiooni astmeks. Kui reaktsiooni aste võrdub nulliga või pole kuigi suur (0,1—0,15), s. t. kui töölabade kanalites ei toimu auru paisumist või kui aur paisub õige vähe, siis turbiini niisugust astet nimetatakse aktiivastmeks. Kui reaktsiooni määr on tähelepandav ($\varrho = 0{,}4$—$0{,}6$), siis astet nimetatakse reaktiivastmeks.

Auru energia tööks muundumine töölabade kanalites toimub järgmisel viisil. Düüsist väljunud aurujuga satub ketta töölabadele absoluutse kiirusega c_1 (joon. 171). See kiirus c_1 kanalisse sisenemisel lahutub kiiruste vektorlahutuse reegli järgi auru relatiivseks kiiruseks labadel w_1, mis peab olema suunatud mööda puutujat laba sissemineku servale, et ei tekiks kadusid löögile, ja ringkiiruseks u_1.

Auru voolus läbib töölabade poolt moodustatud kanali ja väljub sellest relatiivse kiirusega w_2, mis on suunatud mööda puutujat laba väljumisservale. Auru relatiivne kiirus väljumisel w_2, liitudes laba väljumisserva ringkiirusega u_2, annab auru absoluutse kiiruse väljumisel c_2.

Määrame töö, mille teostab auru üks kg. Selleks eelnevalt tähistame α_1-ga nurga ringkiiruse u_1 ja absoluutse sisenemiskiiruse c_1 vahel, β_1-ga nurga ringkiiruse u_1 ja relatiivse sisenemiskiiruse w_1 vahel, α'_2-ga ja β'_2-ga vastavad nurgad väljumisel.



Joon. 172. Astme kiiruste kolmnurgad.

Töölabade kanaleid läbiva ühe kg auru töö määramiseks kasutame järgmist teoreemi mehaanikast:

Liikumise hulga momendi muutumine massil, mis voolab läbi ühes sekundis ülemineku ühelt ristlõikelt teisele, võrdub väliste jõudude momendiga, mis on rakendatud voolusele nende ristlõigete vahel.

Olgu töölabade kanaleist läbi voolava auru kulu sekundis G, ta mass $\frac{G}{g}$, ta liikumise hulk sisseminekul $\frac{G}{g} c_1$ ja väljumisel $\frac{G}{g} c_2$ (joon. 172).

Liikumise hulga moment võrdub liikumise hulga ja kiiruse vektori kauguse korrutisega pöörlemise keskpunktist, s. t. et vooluse liikumise hulga moment on:

sisenemisel

$$M_1 = \frac{G}{g} c_1 l_1,$$

väljumisel

$$M_2 = \frac{G}{g} c_2 l_2.$$

Momentide vahe $M_1 - M_2$ peab võrduma väliste jõudude momendiga M_u, mis on rakendatud voolusele sissemineku ja väljumise vahel, s. t.

$$M_u = M_1 - M_2 = \frac{G}{g}(c_1 l_1 - c_2 l_2). \tag{101}$$

Kujundame ümber saadud võrrandi. Selleks võtame absoluutse sisenemiskiiruse c_1 projektsiooni ringkiirusele u_1. See projektsioon võrdub $c_1 \cos \alpha_1$; samasugusel viisil absoluutse kiiruse projektsioon ringkiirusele väljumisel võrdub $c_2 \cos \alpha'_2$-ga.

Saadud kolmnurk *dae*, millel külg *da* võrdub c_1-ga, külg *ae* aga võrdub $c_1 \cos \alpha_1$-ga, on sarnane kolmnurgaga *Oab*.

Kolmnurgal *Oab* külg $Oa = R_1$ on turbiini ketta välisserva raadiuseks, $Ob = l_1$ on võrdne absoluutse kiiruse kaugusega pöörlemise keskpunktist.

Kolmnurga sarnasusest järgneb, et

$$\frac{c_1}{c_1 \cos \alpha_1} = \frac{R_1}{l_1},$$

kust $c_1 l_1 = R_1 c_1 \cos \alpha_1$.

Samasugusel viisil on võimalik leida, et

$$c_2 l_2 = R_2 c_2 \cos \alpha'_2.$$

Pärast saadud väärtuste asendamist võrrandis (101) saame:

$$M_u = \frac{G}{g}(R_1 c_1 \cos \alpha_1 - R_2 c_2 \cos \alpha'_2). \tag{102}$$

Korrutades saadud võrrandi mõlemaid pooli turbiini ketta nurkkiirusega, saame:

$$M_u \omega = \frac{G}{g}(R_1 \omega c_1 \cos \alpha_1 - R_2 \omega c_2 \cos \alpha'_2).$$

Korrutis $M_u \omega$ kujutab aga endast võimsust N_{ol}, kuna $R_1 \omega = u_1$ ja $R_2 \omega = u_2$.

Siit

$$N_{ol} = \frac{G}{g}(u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha'_2). \tag{103}$$

Saadud valemis N_{ol} kujutab endast võimsust turbiini labadel, kui töölabade kanalitest voolab läbi G kg auru sekundis; siit on ühe kg auru töö sekundis turbiini ketta ümbermõõdul:

$$l_{ol} = \frac{1}{g}(u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha'_2). \tag{104}$$

Kujundame ümber võrrandi (104) järgmisel viisil. Kiiruste kolmnurgast auru sisenemisel töölabade kanalitesse saame:

$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2u_1c_1 \cos \alpha_1, \tag{105}$$

kust

$$u_1c_1 \cos \alpha_1 = \frac{c_1^2 + u_1^2 - w_1^2}{2}. \tag{106}$$

Samasugusel viisil on võimalik saada kiiruste kolmnurgast auru väljumisel töölabade kanalitest:

$$u_2c_2 \cos \alpha'_2 = \frac{c_2^2 + u_2^2 - w_2^2}{2}. \tag{107}$$

Asendades võrrandis (104) $u_1c_1 \cos \alpha_1$ ja $u_2c_2 \cos \alpha'_2$ nende jaoks saadud väärtustega, saame:

$$l_{ol} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}. \tag{108}$$

Võrrandid (103) ja (104) on aluseks kõikide turbomasinate arvutamisel (auru- ja hüdraulilised turbiinid, tsentrifugaalpumbad ja ventilaatorid, turbokompressorid, propellerid jne.).

95. Kaod töölabade kanalites ja aksiaalastme kasutegur.

Auru liikumise suuna järgi eristame aksiaalturbiine, kus aur liigub paralleelselt turbiini teljega, ja radiaalturbiine, kus aur liigub risti teljega.

Aksiaalturbiini näiteks võib olla meie poolt vaadeldud turbiin joonisel 168.

Aksiaalturbiinis ringkiirused u_1 ja u_2 on omavahel ligikaudu võrdsed ja seetõttu aksiaalturbiini astme jaoks võtab võrrand (108) järgmise kuju:

$$l_{ol} = \frac{1}{g}\left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right). \tag{109}$$

Võrrand (104) aga võtab kuju:

$$l_{ol} = \frac{1}{g}(u_1c_1 \cos \alpha_1 - u_2c_2 \cos \alpha'_2) =$$

$$= \frac{1}{g} u(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha'_2). \tag{110}$$

Auruturbiinide teoorias kasutatakse mitte nurki α'_2 ja β'_2, mida moodustavad absoluutne ja relatiivne kiirus labadest väljumisel ringkiiruse suunaga, vaid vastavalt nurki α_2 ja β_2, mida moodustavad samad kiirused c_2 ja w_2 suunaga, mis on vastupidine ringkiirusega (joon. 171), kusjuures $\alpha'_2 = 180 - \alpha_2$ ja $\beta'_2 = 180 - \beta_2$; $\cos \alpha'_2 = -\cos \alpha_2$ ja $\cos \beta'_2 = -\cos \beta_2$.

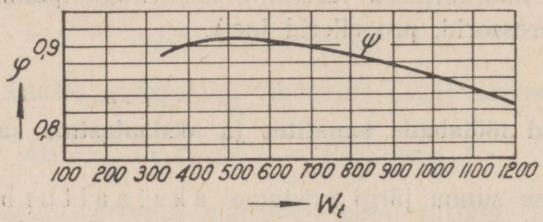
Seda silmas pidades on võimalik kirjutada võrrandeid (104) ja (110) igasuguse turbiini jaoks kujul:

$$l_{oi} = \frac{1}{g}(u_1 c_1 \cos \alpha_1 + u_2 c_2 \cos \alpha_2); \qquad (111)$$

ja ainult aksiaalturbiini jaoks:

$$l_{oi} = \frac{1}{g} u (c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2). \qquad (112)$$

Saadud võrrandid on tuletatud eeldusel, et auru voolus läbib töölabade kanaleid ilma kadudeta. Tegelikult aga auru liikumisega kaasnevad kineetilise energia kaod, mis on tingitud auru hõõrdumisest vastu labade seinu



Joon. 173. Teguri ψ sõltuvus kiirusest katsete järgi.

ja keeriste tekkimisest; need kaod arvestatakse kiirusteguriga töölabadel ψ, mis kujutab endast tegeliku relatiivse kiiruse w_2 ja teoreetilise kiiruse w_{2t} suhet töölabade kanalitest väljumisel, s. t.

$$w_2 = \psi w_{2t}. \qquad (113)$$

Tegur ψ sõltub joa pöördenurgast töölabade kanali sees, s. t. nurkadest β_1 ja β_2 ja aurujoa kiirusest kanali sees.

Joonisel 173 on näidatud teguri ψ sõltuvus kiirusest katsete järgi. Teguri ψ sõltuvus joa pöördumisest, teisiti öeldes — nurkadest β_1 ja β_2, on näidatud joonisel 174.

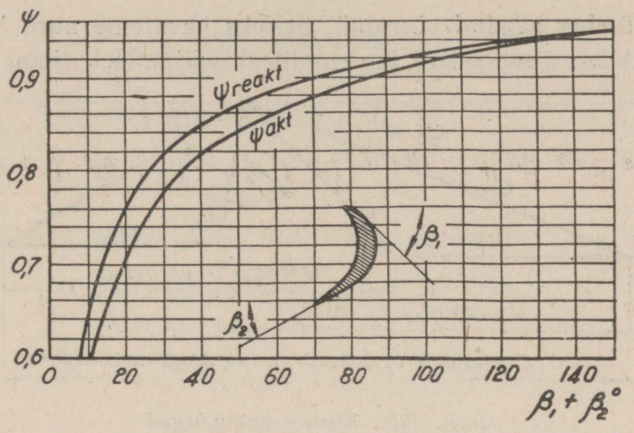
Astme kasuteguriks (suhteline) töölabade suhtes nimetatakse töölabadel

saadud töö ja kasutatava auru töö tagavara või entalpia languse suhet antud astmel, s. t.

$$\eta_{ol} = \frac{Al_{ol}}{h_o}, \tag{114}$$

kus h_o on entalpia langus antud astmel, s. t.

$$h_0 = t_1 - t_2.$$



Joon. 174. Teguri ψ sõltuvus joa pöördumisest katsete järgi.

Eespool (p. 94) tegime kindlaks, et antud entalpia langus võib üldjuhul muunduda kineetiliseks energiaks osalt düüsides, osalt aga töölabade kanalites, s. t. $h_0 = h_{01} + h_{02}$,

kus h_{01} on düüsides kasutatud entalpia languse osa;

h_{02} — töölabade kanalites kasutatud entalpia languse osa.

Kuid

$$h_{01} = \frac{Ac^2}{2g}, \tag{115}$$

kus c on auru teoreetiline kiirus düüsist väljumisel. Entalpia languse h_{02} arvel me saavutame kineetilise energia juurdekasvu töölabade kanalites, s. t.

$$h_{02} = A\frac{w_{2t}^2 - w_1^2}{2g}. \tag{116}$$

Sel viisil

$$h_0 = h_{01} + h_{02} = \frac{A}{2g}(c^2 + w_{2t}^2 - w_1^2). \tag{117}$$

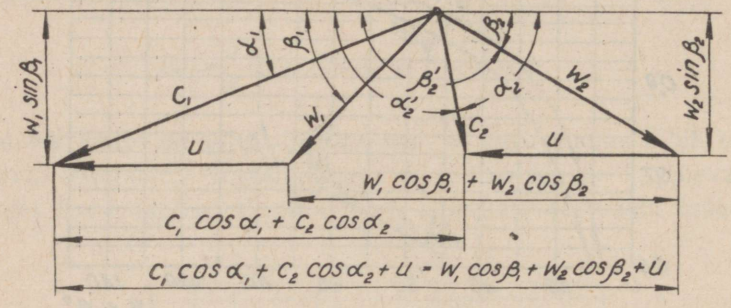
Aksiaalturbiini jaoks:

$$\eta_{oi} = \frac{Al_{ae}}{h_0} = \frac{2u(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2)}{c^2 + w_{2t}^2 - w_1^2}. \tag{118}$$

Igasuguse turbiini jaoks:

$$\eta_{oi} = \frac{2(u_1 c_1 \cos \alpha_1 + u_2 c_2 \cos \alpha_2)}{c^2 + w_{2t}^2 - w_1^2}. \tag{119}$$

Kujundame ümber saadud võrrandi. Selleks kasutame auru kiiruste kolmnurki kanalitesse sisenemisel ja kanalitest väljumisel (joon. 171).



Joon. 175. Kiiruse kolmnurgad.

Auruturbiinide arvutuste praktikas viiakse kiiruste diagrammide ehitamisel näitlikkuse mõttes tavaliselt kokku kolmnurkade tipud, nagu see on näidatud joonisel 175.

Kiiruste diagrammilt näeme, et

$$c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2 = w_1 \cos \beta_1 + w_2 \cos \beta_2. \tag{120}$$

Kasutades võrrandit (120), võime ümber kirjutada võrrandi (118) järgmisel kujul:

$$\eta_{oi} = \frac{2u(w_1 \cos \beta_1 + w_2 \cos \beta_2)}{c^2 + w_{2t}^2 - w_1^2}. \tag{121}$$

Võrrandite (118) ja (121) analüüs näitab, et üldjuhul on kasutegur töölabade suhtes keerulises sõltuvuses auru vooluse kiirustest ja nende suundadest.

Mõnedel erijuhtudel võrrand (121) võtab väga lihtsa kuju, mis on erakordselt käepärane turbiini töö analüüsiks.

Kujutleme endale, et aksiaalturbiini antud aste töötab puhtaktiivsel põhimõttel, s. t. $h_{02} = 0$,

siis

$$w_{2t}^2 - w_1^2 = 0,$$

s. t.

$$w_{2t} = w_1.$$

Arvestades energia kadusid düüsides ja töölabade kanalites, saame

$$c_1 = \varphi c;$$

$$w_2 = \psi w_{2t} = \psi w_1;$$

$$\eta_{ol} = \frac{2u(w_1 \cos \beta_1 + \psi w_1 \cos \beta_2)}{\frac{c_1^2}{\varphi^2}} = \frac{2\varphi^2 u w_1 \cos \beta_1 \left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1}\right)}{c_1^2}. \qquad (122)$$

Kuid $w_1 \cos \beta_1 = c_1 \cos \alpha_1 - u$ (joon. 175), järelikult:

$$\eta_{ol} = \frac{2\varphi^2 u(c_1 \cos \alpha_1 - u)\left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1}\right)}{c_1^2},$$

ehk

$$\eta_{ol} = 2\varphi^2\left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1}\right)\left[\frac{u}{c_1} \cos \alpha_1 - \left(\frac{u}{c_1}\right)^2\right]. \qquad (123)$$

Võrrandis (123) suurused φ, β_1, β_2 ja α_1 on konstantsed. Kui oletame esimeses lahenduses, et ψ on samuti konstantne, siis saame, et η_{ol} sõltub ainult ringkiiruse u ja absoluutse kiiruse c_1 suhtest.

Kui $\frac{u}{c_1} = 0$, s. t. kui $u = 0$, siis $\eta_{ol} = 0$, mis on ka arusaadav: kui turbiin ei pöörle, siis ta kasutegur on null.

Kui suhe $\frac{u}{c_1} = \cos \alpha_1$, siis kasutegur η_{ol} jällegi võrdub nulliga.

Kuna η_{ol}, olles avaldise $\frac{u}{c_1}$ funktsiooniks, muutub $\frac{u}{c_1}$ kahe äärmise väärtuse puhul võrdseks nulliga, siis η_{ol} peab omama maksimumi $\frac{u}{c_1}$ mingi vahepealse väärtuse juures. Selle väärtuse me leiame, kui võtame esimese tuletise võrrandi (123) paremast poolest ja võrrutame selle nulliga. Arvutuste hõlbustamiseks tähistame $\frac{u}{c_1} = x_1$. Siis võrrand (123) võtab kuju:

$$\eta_{ol} = 2\varphi^2 \left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1}\right) \cdot (x_1 \cos \alpha_1 - x^2_1). \qquad (123')$$

Tuletis:

$$[\eta_{ol}]' = 2\varphi^2 \left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1}\right) \cdot (\cos\alpha_1 - 2x_1) = 0,$$

ehk

$$\cos\alpha_1 - 2x_1 = 0,$$

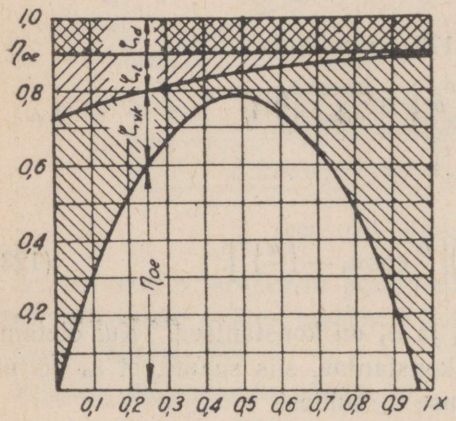
kust

$$x_1 = \frac{\cos \alpha_1}{2},$$

s. t. maksimaalse η_{ol} aktiivastme jaoks saame siis, kui

$$x = \frac{u}{c_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2}.$$

Teguri η_{ol} sõltuvus x_1-st on näidatud diagrammil (joon. 176). Aktiivastme kasutegur saadakse ühest väiksem kineetilise energia kadude tõttu düüsis, töölabade kanalites ja kaos auruga, mis lahkub kiirusega c_2. Teisiti öeldes — tegurit η_{ol} võime kujutada järgmisel viisil:



Joon. 176. Kasuteguri (η_{ol}) sõltuvus suhtest $\frac{u}{c_1}$.

$$\eta_{ol} = 1 - \zeta_d - \zeta_l - \zeta_{vk}, \qquad (124)$$

kus ζ_d on kadude suhteline suurus düüsis;

ζ_l — töölabade kanalites;

ζ_{vk} — lahkuva auruga.

Mitmesuguste kadude sõltuvus suhtest $\frac{u}{c_1}$ on näidatud joonisel 176.

Sellelt diagrammilt näeme, et kaod düüsis ζ_d jäävad konstantseks, kuna õigupoolest töötab düüs sõltumata tööratta labadest.

Kaod lahkuva auruga ζ_{vk} osutuvad minimaalseteks, kui

$$\frac{u}{c_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2}.$$

Kaod töölabade kanalites ζ_l aga vähenevad suhte $\frac{u}{c_1}$ suurenemisel.

Need kaod vähenevad peamiselt seetõttu, et suhte $\frac{u}{c_1}$ suurenemisel suu-

renevad nurgad β_1 ja β_2, s. t. väheneb joa pöördenurk ja järelikult vähenevad siis ka kaod. Kiirusteguri sõltuvus töölabade kanalites joa pöördenurgast on toodud joonisel 174.

Vaadeldud erijuhtum pakub suurt huvi, nagu oli öeldud, puht-aktiivturbiinide puhul.

Teine erijuhtum, mis omab suurt tähtsust reaktiivturbiinide puhul, saadakse siis, kui võtta reaktsiooni aste:

$$\varrho = \frac{h_{02}}{h_{01} + h_{02}} = \frac{h_{02}}{h_0} = \frac{1}{2}.$$

Meenutame, et h_0 kujutab endast täielikku entalpia langust antud astmel, h_{01} aga on düüsis kasutatud entalpia languse osa ja h_{02} — töölabade kanalites kasutatud osa. Selleks aga täpsustame kõigepealt astme kasuteguri avaldist.

Siiani me vaatlesime astme jaoks kasutada olevat energia tagavara ainult entalpia langu näol; seejuures me eeldasime, et auru kineetiline energia düüsi sisenemisel võrdub nulliga. Niisugune oletus on lubatav, kui astmete arv turbiinis pole suur, ja järelikult auru kiirus düüsist väljumisel on küllalt suur, nii et düüsi sissemineva auru kineetilise energia võiks jätta tähele panemata. Lugu on aga teisiti, kui astmeid turbiinis on palju ja kui järelikult igas astmes kasutada olev entalpia lang on väike. Sel juhul tuleb arvestada ka düüsi siseneva auru kineetilist energiat.

Niisamuti pole võimalik lugeda kaoks seda kineetilist energiat, mille viib endaga kaasa lahkuv aur, sest antud astmest aur suundub järgmisse astmesse.

Kui tähistame düüsi siseneva auru kiirust c_0-ga, töölabade kanalitest lahkuva auru kiirust (absoluutset) endiselt c_2-ga, siis antud astme täielik energia tagavara E_0 avaldub järgmiselt:

$$E_0 = A\frac{c_0^2}{2g} + h_0 - \frac{Ac_2^2}{2g}.$$

Kuid võrrandi (117) põhjal

$$\frac{Ac_0^2}{2g} + h_0 = \frac{A}{2g}(c^2 + w_{2t}^2 - w_1^2),$$

järelikult

$$E_0 = A\left(\frac{c^2 - c_2^2}{2g} + \frac{w_{2t}^2 - w_1^2}{2g}\right).$$

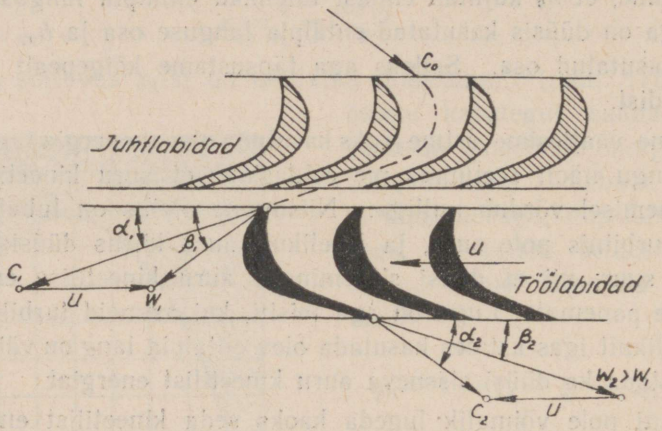
Edasi võrrandi (109) järgi

$$l_{ol} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g},$$

kust

$$\eta_{ol} = \frac{c_1^2 - c_2^2 + w_2^2 - w_1^2}{c^2 - c_2^2 + w_{2t}^2 - w_1^2}. \tag{125}$$

Reaktiivastmes, mille reaktsiooni määr ϱ on võrdne 0,5-ga, düüsidena töötavad juhtlabad ja töölabad valmistatakse nii, et $\alpha_1 = \beta_2$ (joon. 177), kii-



Joon. 177. Reaktiivturbiini juhtlabade ja töölabade profiilid.

rused aga saadakse võrdsetena ($w_2 = c_1$; $w_1 = c_2$); siis pärast mõningaid ümberkujundusi võime ümber kirjutada võrrandi (125) järgmiselt:

$$\eta_{ol} = \frac{1}{\dfrac{\dfrac{1}{\varphi^2} - 1}{2\dfrac{u}{c_1}\cos\alpha_1 - \left(\dfrac{u}{c_1}\right)^2} + 1}.$$

Kui tähistame $\frac{u}{c_1} = x_1$-ga,

siis saame

$$\eta_{ol} = \frac{1}{\dfrac{\dfrac{1}{\varphi^2} - 1}{2x_1\cos\alpha_1 - x_1^2} + 1}. \tag{126}$$

Teguri η_{ol} maksimumi leiame nimetaja minimaalse väärtuse puhul võrrandi

(126) parempoolses osas või, mis sama, avaldise $2x_1 \cos \alpha_1 - x^2_1$ maksimaalse väärtuse puhul.

Maksimumi määramiseks võtame tuletise ja võrrutame selle nulliga, s. t. $2 \cos \alpha_1 - 2x_1 = 0$, kust

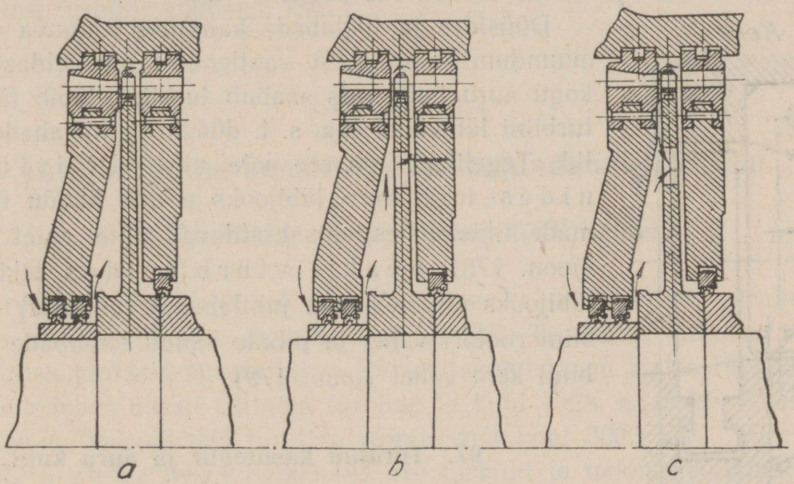
$$x_1 = \cos \alpha_1. \qquad (127)$$

Teisiti öeldult — turbiini jaoks reaktsiooni määraga $\varrho = 0{,}5$ saame maksimaalse väärtuse, kui

$$\frac{u}{c_1} = x_1 = \cos \alpha_1.$$

96. Võimsuse kaod auruturbiinides hõõrdumisele ja auru läbijooksule.

Siiani me vaatlesime kadusid düüsides, töölabade kanalites, samuti ka



Joon. 178. Auru läbijooks aktiivturbiini astmes.

kineetilise energia kadusid koos töölabadest väljuva auruga. Kõiki neid kadusid, mis on seotud auru läbivoolamisega düüsidest ja töölabadest, arvestab kasutegur ketta töölabadel η_{ol}. Kuid peale loeteldud kadude auruturbiini astmes esineb veel lisakadusid, mis ei ole seotud auru põhivoolusega ja mida on tarvis arvutada eraldi. Neist kadudest osutuvad põhimisteks kaod hõõrdumisele ja ventilatsioonile ning kaod auru läbijooksule.

Võimsuse kaod hõõrdumisele ja ventilatsioonile tekivad seetõttu, et ketas ja töölabade krants pöörlevad auruga täidetud kambris, mis tingib võimsuse kulu, selleks et ületada ketta ja labade hõõrdumist vastu auru. Järelikult on võllil saadav võimsus, niinimetatud tur-

biini sisemine võimsus N_i, väiksem võimsusest töölabadel N_{ol} võimsuse suuruse võrra, mis kulutatakse hõõrdumisele ja ventilatsioonile N_{hv}, s. t.

$$N_i = N_{ol} - N_{hv}.$$

Võimsuse kadusid hõõrdumisele ja ventilatsioonile arvutatakse tavaliselt empiiriliste valemite järgi, milledest kõige lihtsamaks on valem:

$$N_{hv} = 10^{-10}\beta \cdot d^4 \cdot n^3 \cdot l \cdot \gamma \text{ kW}, \qquad (128)$$

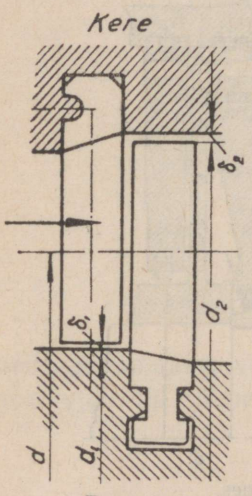
kus d on ketta läbimõõt, m;

n — pöörete arv minutis;

l — labade pikkus, cm;

γ — auru erikaal, kg/m³.

Tegur β ühe labade reaga ketta jaoks võetakse võrdsena 1,76, kahe rea puhul — 2,06 ja kolme labade rea puhul — 2,8.



Joon. 179. Auru läbijooks reaktiivturbiini astmes.

Düüsides ja töölabade kanalites toimuva energia muundumise protsessi vaatlemisel me eeldasime, et kogu auru hulk, mis saabub turbiini, läbib täielikult turbiini läbivoolu osa, s. t. düüsid ja töölabade kanalid. Tegelikult aga see pole nii. Aktiivturbiinides tekib auru läbijooks pilude kaudu diafragmade tihendustes, mis eraldavad ühte astet teisest (joon. 178). Reaktiivturbiinides tekib auru läbijooks pilude kaudu juhtlabade (düüside) ja turbiini rootori vahel ja pilude kaudu töölabade ja turbiini kere vahel (joon. 179).

97. Turbiini kasutegur ja auru kulu.

Peale meie poolt vaadeldud kasuteguri töölabadel η_{ol} kasutatakse veel turbiini sisemist — suhtelist kasutegurit η_{oi}, mis kujutab endast turbiini sees võllil arendatava töö ja teoreetilise töö suhet, s. t.

$$\eta_{oi} = \frac{l_i}{l_o},$$

ja turbiini efektiivset — suhtelist kasutegurit η_{oe}, mis kujutab endast efektiivse ja teoreetilise töö suhet, s. t.

$$\eta_{oe} = \frac{l_e}{l_o}.$$

Absoluutne efektiivne kasutegur kujutab endast Al_e ja q_1 suhet, s. t.

$$\eta_e = \frac{Al_e}{q_1},$$

kus q_1 on ühe kg auru saamiseks tarvilik soojuse hulk.

Kasutades neid tegureid pole raske määrata auru kulu.

Kui H_o on entalpia lang kogu turbiinis, mis võrdub $i_1 - i_2$, s. t. $H_o = i_1 - i_2$, siis auru kulu ühe kWh kohta

$$d_e = \frac{860}{H_o \eta_{oe}} \text{ kg/kWh;} \qquad (129)$$

auru kulu kogu turbiinile moodustab:

$$D = \frac{860 W}{H_o \eta_{oe}} \text{ kg/tund,} \qquad (129')$$

kus W on turbiini võimsus, kW.

XXII peatükk.

Auruturbiinide konstruktiivse kujundamise näiteid.

98. Turbiinide ehituse areng NSV Liidus.

Tsaristlikul Venemaal oli ainsaks tehaseks, kus ehitati auruturbiine, nüüdne Stalini-nimeline metallitehas „ЛМЗ". Ta ehitas väikese võimsusega statsionaarseid auruturbiine. Pärast revolutsiooni, alates 1923. a., hakkas sama tehas uuesti ehitama turbiine ja kuni 1928. a. laskis tehas välja terve rea mitmesuguseid turbiine võimsusega kuni 3000 kW.

1928. a. ehitas tehas 10 000 kW-lise turbiini ja hakkas ehitama 25 000 ja 50 000 kW-lise võimsusega turbiine. 1938. a. ehitas tehas 100 000 kW-lise turbiini aurule parameetritega $p_1 = 90$ ata ja $t_1 = 480^0$ C. 1931. a. algas auruturbiinide tootmist „Kirovi" tehas Leningradis võimsusega kuni 12 000 kW ja 1936. a. Lenini-nimeline Nevski masinaehitustehas Leningradis „НЗА" võimsusega 2500 kuni 12 000 kW. 1934. a. valmis Harkovis Kirovi-nimeline turbogeneraatori-tehas „ХТГЗ", mis samal aastal algas turbiinide tootmist võimsusega 50 000 ja 100 000 kW. Suure Isamaasõja ajal tehas hävitati saksa fašistide poolt, kuid juba 1945. a. tehas taastati ja algas võimsate turbiinide ehitamist. Suure Isamaasõja ajal algas turbiinide tootmist Uurali turbiinitehas.

Kaua enne Suurt Isamaasõda olid kodumaised turbiinitehased täiesti

võimelised tootma turbiine maa energeetika-majanduse rahuldamiseks, mistõttu ka katkestati välismaiste turbiinide sissevedu.

Toodust on selge, et turbiinide ehitust Venemaal on arendatud peaaegu täiesti alles pärast revolutsiooni. Siin aitasid suuresti kaasa tehaste eeskujulikud laboratooriumid, eri uurimisinstituudid, nagu „ВТИ" ja „ЦКТИ", ja eesrindlik teadus. Teostatud uurimistööd võimaldasid luua originaalseid turbiinide konstruktsioone, täiustada turbiinide tehnilisi karakteristikuid ja ökonoomsust, vastavalt maa elektrifitseerimise nõudeile, ning saavutada silmapaistvaid tulemusi turbiinide ehituse alal. Nii näiteks laskis Stalininimeline tehas „ЛМЗ" 1938. a. välja maailmas esimese ühevõllilise turbiini võimsusega 100 000 kW, pööretega 3000 minutis. Samuti on ka vaheltauruturbiinid võimsusega 25 000 ja 50 000 kW, milliseid meie tehased toodavad seeriatena, selle tüübi suurimaid esindajaid maailmas.

Alljärgnevas tabelis A on toodud mõningate NSV Liidu tehastes seeriatena toodetud turbiinide tehnilised andmed.

Tabel A.

NSV Liidu tehastes seeriatena toodetud mõningate turbiinitüüpide tehnilised andmed.

Turbiini mark	Tehas	Võimsus tuh. kW	Pöörete arv minutis	Auru algrõhk ata	Auru algtemp. °C	Reguleeritava vaheltauru rõhk või vasturõhk	Maksimaalne vaheltauru kogus t/h	Auru kulu t/tund
АП-4	НЗЛ	4	5000	29	400	5 ± 1	25	39
АП-6	НЗЛ	6	3000	29	400	6 ± 1	35	53
АК-12	Киров-	12	3000	29	400	—	—	58
АТ-12	ский	12	3000	29	400	1,2 — 2,5	60	78
АТ-25-1	ЛМЗ	25	3000	29	400	1,2 — 2,5	100	165
АП-25-1	ЛМЗ	25	3000	29	400	7 ± 1	150	235
АК-25-2	ЛМЗ	25	3000	29	400	—	—	122
АК-50-1	ЛМЗ	50	1500	29	400	—	—	22
АК-50-2	ЛМЗ	50	3000	29	400	—	—	234
АК-50	ХТГЗ	50	1500	29	400	—	—	226
АК-100-1	ЛМЗ	100	3000	29	400	—	—	460
АК-100	ХТГЗ	100	1500	29	400	—	—	450
ВК-50-2	ЛМЗ	50	3000	90	480	—	—	198
ВК-100-2	ЛМЗ	100	3000	90	480	—	—	396
ВР-25-1	ХТГЗ	25	3000	90	500	31	—	389

Leppeliste märkide tähendused on:
A — auru keskmine algrõhk (29 ata); B — kõrgrõhu turbiin (90 ata);
K — kondensatsiooniturbiin;

T — turbiin reguleeritava madalrõhu vaheltauruga;
П — turbiin reguleeritava kõrgrõhu vaheltauruga;
P — vasturõhuturbiin; esimene arvsuurus märgib turbiini võimsust tuhandetes KW; teine arvsuurus märgib tehase konstruktsiooni varianti.

Järgnevas tabelis B on antud väljavõte normidest auru algparameetrite, turbiinide võimsuse jm. kohta, mis kehistati 1947. a.

Tabel B.

Kondensatsiooniturbiinide põhiparameetrid.

(GOST 3618 — 47 järgi.)

Auru algparameetrid		Turbiini võimsus	Generaatori võlli pöörded	Turbiinide tüübid					
Rõhk	Temperatuur			Reguleerimata vaheltauruga	Reguleeritav vaheltaur 1,2 ata	Reguleeritav vaheltaur 5 ata	Kahe reguleeritava vaheltauruga		Regeneratiivselt ettesoojendatud toitevee temp.
							1,2 ata	10 ata	
ata	°C	KW	r/h	—	t/h	t/h	t/h	t/h	°C
35	435	750	3000 või 1000	—	—	7	—	—	150
35	435	1 500		*	9	12	—	—	150
35	435	2 500		*	14	18	—	—	150
35	435	4 000	3000	*	22	25	—	—	150
35	435	6 000	3000	*	35	40	—	—	150
35	435	12 000	3000	*	65	—	40	50	150
90	480	12 000	3000	—	—	—	30	40	215
90	480	25 000	3000	*	100	—	60	80	215
90	480	50 000	3000	*	—	—	—	—	215
90	480	100 000	3000	*	—	—	—	—	215

Tabelis tähisega * on märgitud reguleerimata vaheltauruga kondensatsioonturbiinid.

Nagu eespool märgitud, katsid NSV Liidu turbiinitehased juba kaua enne Suurt Isamaasõda maa energeetikamajanduse vajadusi turbiinide alal.

99. Turbiinide liigitus.

Auruturbiine on võimalik liigitada järgmiste tunnuste järgi:

1) turbiinist väljuva auru soojuse kasutamise järgi;
2) auru kasutamise iseloomu järgi töölabade kanalites ja astmete arvu järgi;

3) korpuste arvu järgi.

Auru soojuse kasutamise järgi võivad turbiinid olla:

a) puht-kondensatsiooniga, s. o. sellised, kus kogu töötanud aur juhitakse kondensaatorisse, milles hoitakse vaakumit piirides 0,94 kuni 0,96;

b) vähendatud vaakumiga turbiinid, kus töötanud aur juhitakse kondensaatorisse, milles hoitakse väikest vaakumit, selleks et saada jahutusvee kõrgemat temperatuuri kondensaatorist väljumisel, eesmärgiga kasutada seda mitmesugusteks vajadusteks;

c) vasturõhuga turbiinid, kus aur väljub turbiinist rõhuga üle atmosfäärilise ja kasutatakse tootmisprotsessis tehnoloogilisteks otstarveteks, kütteks, ventilatsiooniks jne. Selle tüübi hulka kuuluvad ka niinimetatud ettelülitusturbiinid, kuhu juhitakse kõrgrõhuauru ja milledest lahkuv aur kasutatakse keskrõhuturbiinides;

d) turbiinid auru vahepealse väljavõtmisega, nn. vaheltauru-turbiinid; sel juhul osa auru võetakse välja vahepealsetest astmetest tootmisalasteks vajadusteks või muudeks otstarveteks, ülejääv osa aga töötab turbiini astmetes edasi, kuni juhitakse kondensaatorini. Vaheltauru väljavõtmine võib toimuda kondensatsiooniturbiinidel, vähendatud vaakumiga ja vasturõhuturbiinidel;

e) turbiinid auru vahepealse juurdetoomisega (kahe rõhuga), millistes kasutatakse värsket auru kateldest ja töötanud auru tootmisest (auruhaamritelt, aparaatidelt jne.).

Auru energia kasutamise viisi järgi töölabade kanalites ja astmete arvu järgi eristatakse järgmisi turbiinide liike:

a) aktiivturbiinid ühe rõhuastmega ja ühe kiirusastmega;

b) aktiivturbiinid ühe rõhuastmega ja kahe või kolme kiirusastmega;

c) aktiivturbiinid mitme rõhuastmega;

d) reaktiivturbiinid mitme astmega;

e) kombineeritud aktiivturbiinid — esimene ketas kiirusastmetega ja selle järel rõhuastmed;

f) aktiiv-reaktiivturbiinid — üks aktiivketas ja selle järel reaktiivastmed või mitu aktiivketast ja nende järel reaktiivosa.

Korpuste arvu järgi turbiinid jagunevad ühe korpusega ja mitme korpusega turbiinideks ehk ühe- ja mitmesilindrilisteks turbiinideks.

100. Aktiivturbiin ühe rõhuastmega ja ühe kiirusastmega.

Turbiinide ehitamise arenemise algastmel ehitas üheastmelisi aktiivturbiine rootsi leidur insener Laval.

Laval'i turbiini skeem on kujutatud joonisel 180.

Turbiin koosneb võllist *1*; võllile on kiilul kinnitatud ketas *2*, mille piirdele on kinnitatud töölabad *3*. Töölabade ees asetsevad düüsid *4*, mis on kinnitatud kestasse *5*.

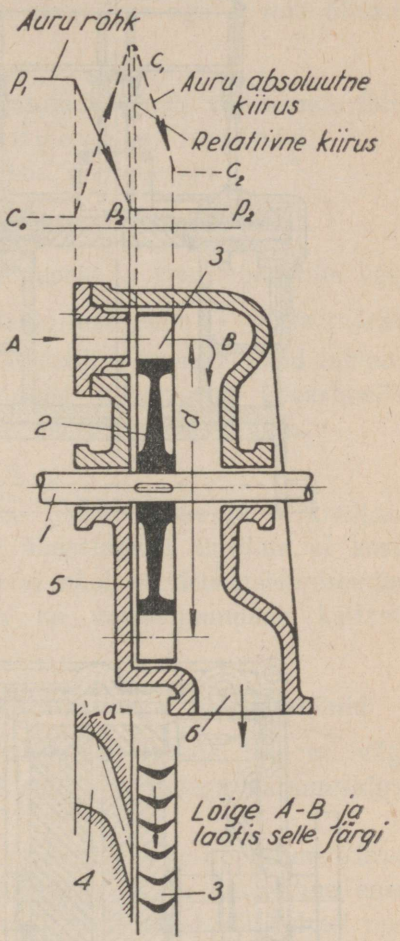
Turbiin töötab järgmisel viisil. Katla aur juhitakse düüsidesse, kus ta paisub rõhust p_1 (düüside eel) kuni rõhuni p_2 (düüside järel). Düüsidest aur väljub suure kiirusega c_1 ja satub töölabade kanalitesse, kus kasutatakse ära auru kineetiline energia, mis muundatakse tööks. Töölabade kanalitest aur väljub ava *6* kaudu turbiinist.

Joonisel 181 on kujutatud 30 HJ-line Laval'i turbiin lõikes ja plaanis.

Värske katlaaur saabub toru *1* kaudu kahe istmega muljumisklapi *2* juurde, suundub siis kambrisse *3*, sealt düüsidesse (düüsid pole lõikesse sattunud) ja edasi turbiini ketta *4* töölabadele. Ketas on kinnitatud painduvale võllile *5*, mis pöörleb laagrites *6* ja *7*.

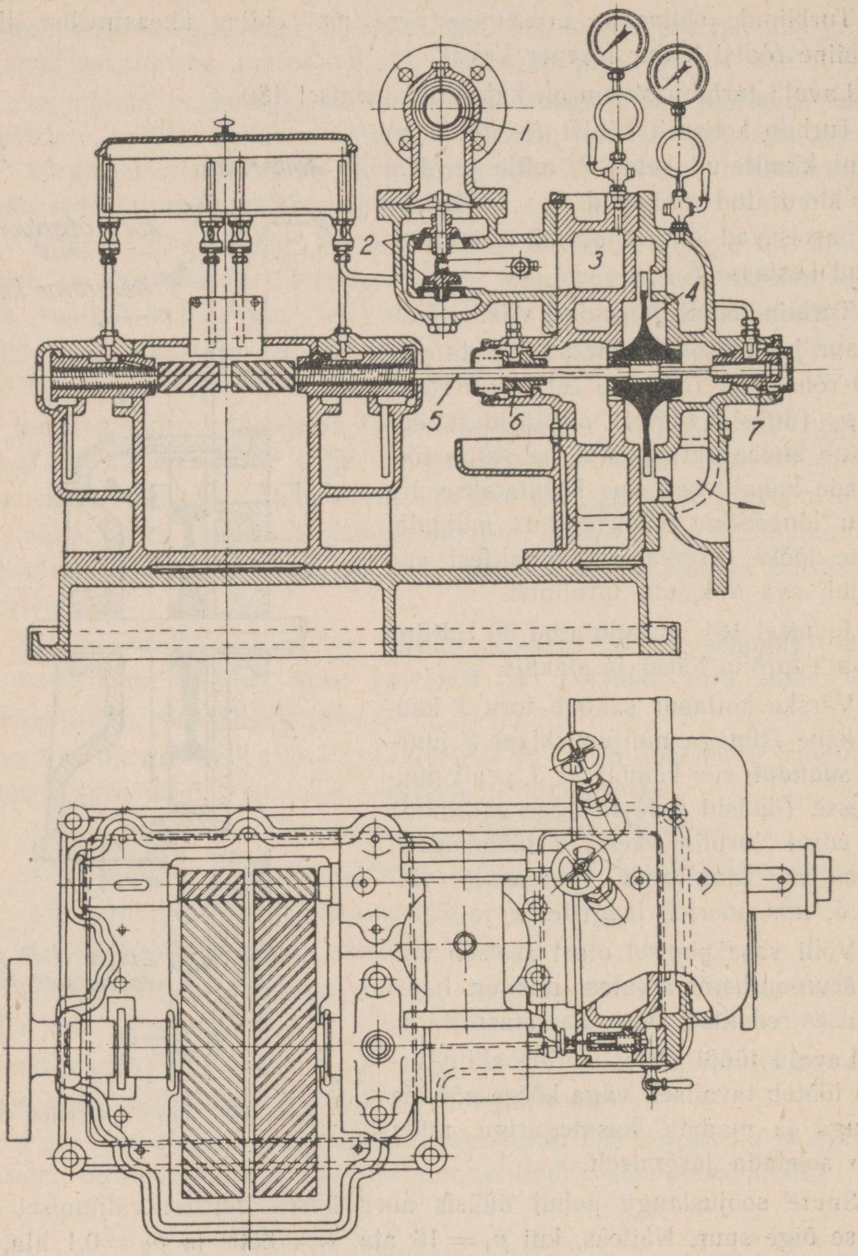
Võlli vasakpoolsel otsal asetseb väike ševroon-hammasratas, mis on hambumises reduktori suure hammasrattaga.

Laval'i tüüpi üheastmeline aktiivturbiin töötab tavaliselt väga kõrge pöörete arvuga ja madala kasuteguriga, mida võib seletada järgmiselt.



Joon. 180. Laval'i turbiini skeem.

Suure soojuslangu puhul düüsis auru kiirus düüsist väljumisel saadakse õige suur. Näiteks, kui $p_1 = 16$ ata, $t_1 = 350^0$ ja $p_2 = 0{,}1$ ata, siis $c_1 = 1283$ m/sek. (p. 92).



Joon. 181. Laval'i turbiin.

Aktiivturbiini uurimisel tegime kindlaks, et maksimaalne kasutegur labadel saadakse siis, kui ringkiiruse ja absoluutse kiiruse suhe võrdub $\frac{\cos \alpha_1}{2}$, s. t.

$$\frac{u}{c_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2} = 0{,}45—0{,}47.$$

Antud juhul ringkiirus u tuleb võtta võrdsena $1283 \cdot 0{,}45 = 557$ m/sek.

Tugevusnõuetest lähtudes ketta äärmine ringkiirus aga ei tohi ületada 400 m/sek., kust $\frac{u}{c_1} = 0{,}3$.

Sellise ringkiiruse puhul on võimalik kasutada ainult väiksemate läbi mõõtudega kettaid, niinimetatud võrdtugevaid kettaid.

Kui ketta läbimõõt $D = 0{,}25 — 0{,}30$, siis pöörete arv

$$n = \frac{u\,60}{\pi \cdot D} = \frac{400 \cdot 60}{3{,}14 \cdot 0{,}25} = 30\,000 \text{ pööret minutis.}$$

Suure ringkiiruse tõttu on kaod hõõrdumisele ja ventilatsioonile väga suured. Peale selle tuleb konstruktiivseil kaalutlusil suhe $\frac{u}{c_1}$ võtta märksa väiksemana kõige kasulikumast, mistõttu kineetilise energia kaod lahkuva auruga on samuti väga suured. Kõigi selle tulemusena üheastmelise aktiivturbiini suhteline efektiivne kasutegur on väga väike, nimelt

$$\eta_{oi} = 0{,}3—0{,}5.$$

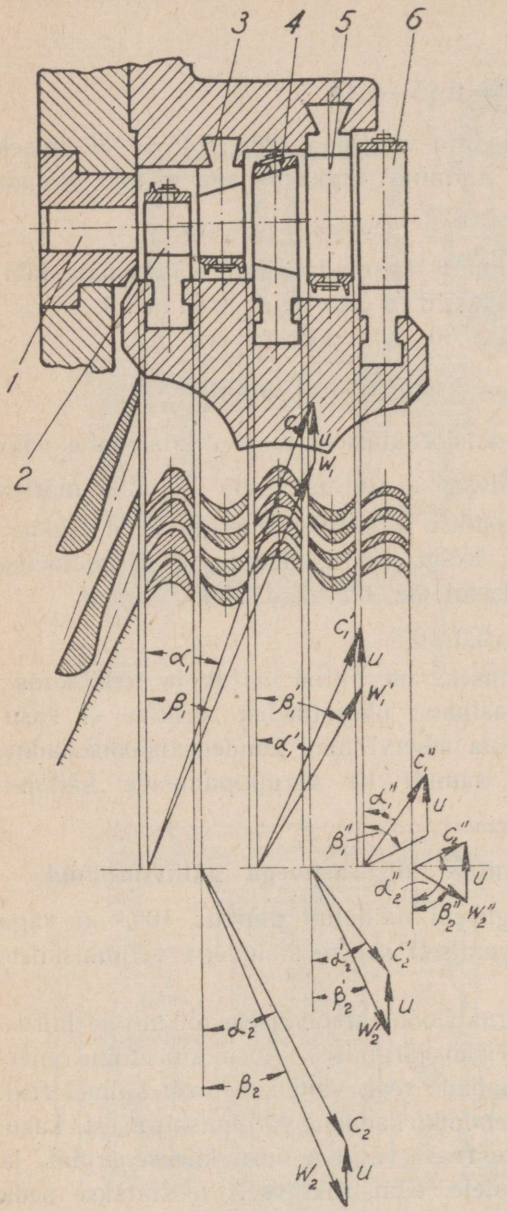
Laval'i turbiini tähtsaks paremuseks on lihtne ehitus ja töökindlus.

Seepärast jõuseadme pea-jõumasinana üheastmelisi turbiine ei kasutata; neid kasutatakse abiturbiinidena reservi näol kondensatsiooniseadme tsirkulatsioonipumba käitamiseks, samuti ka varuõlipumpade käitamiseks jne.

101. Ühe rõhuastmega ja mitme kiirusastmega aktiivturbiinid.

Ühe kiirusastmega turbiin, nagu oli näidatud punktis 100, on väga ebaökonoomne, mis on seletatav peamiselt suurte kadudega väljumiskiirusest ja kõrgete ringkiirustega.

Suure tähtsusega turbiini konstruktsiooni arenemisele oli mitme kiirusastme kasutamine. Selle olemus seisab järgmises. Auru kineetiline energia kasutatakse ära mitte ühel töölabade real, vaid kahel või kolmel real. Sel viisil läks korda tugevasti vähendada kadusid väljumiskiirusest, kasutades ära tööketta esimesest labade reast väljuva auru kiirusenergiat, ja üle minna madalamatele ringkiirustele. Konstruktiivselt teostatakse seda järgmisel viisil. Düüsist *1* väljumisel (joon. 182) aur, milles toimub täieliku antud rõhulangu muundumine kiirusenergiaks, suundub töölabade esimesele reale *2*, kus osa kineetilisest energiast muundub mehaaniliseks.



Joon. 182. Kolme kiirusastmega Curtise ketta läbivooluosa ja töölabade profiilid.

Töölabade esimesest reast väljumisel aur, mis omab veel suurt kineetilise energia tagavara, suundub juhtlabadesse *3*, mis on ette nähtud ainult auru liikumise suuna muutmiseks. Sealt aur läheb edasi töölabade teisele reale *4*, kus jätkub kineetilise energia muundumine mehaaniliseks energiaks. Töölabade teiselt realt aur suundub juhtlabadele *5* ja sealt töölabade kolmandale reale *6*.

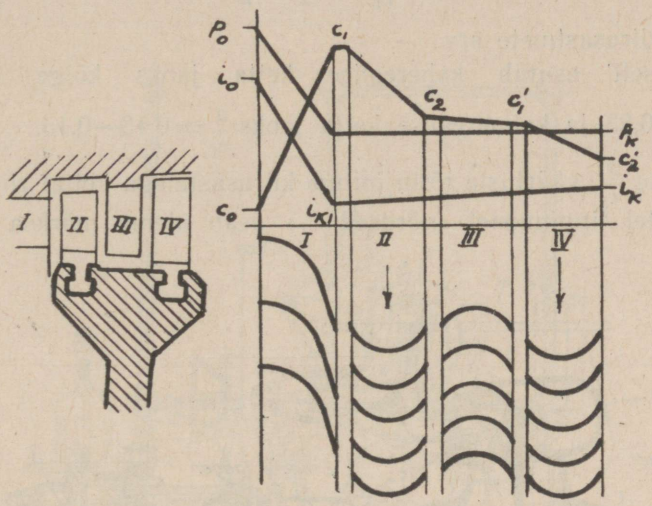
Seega osutub Curtise turbiin ühe rõhuastmega ja mitme kiirusastmega turbiiniks. Samal joonisel 182 on näidatud düüside, töölabade ja juhtlabade profiilid ja kiiruste kolmnurgad. Kiiruste ja kiiruste vektorite vaheliste nurkade tähistused on samasugused, nagu eelmisteski punktides.

Joonisel 182-a on näidatud auru rõhu ja kiiruse muutumine kaherealisel kiirusastmetega Curtise kettal.

Düüsidesse saabumisel auru rõhk, entalpia ja kiirus omavad väärtusi P_o, i_o ja c_o.

Düüsi läbides (surveaste I) auru rõhk paisumise tagajärjel langeb väärtuseni P_k, kiirus aga tõuseb väärtuseni c_1. Entalpia lang düüsides on $i_o - i_{k1}$. Edasi nähtub diagrammilt, et kiirusastmetes (II, IV) ja juhtlabadel (III) auru rõhk ei muutu, muutub vaid vähe entalpia väärtus

voolamisprotsessi tagastatamatuse tõttu. Auru kiirus esimeses kiirusastmes (II) langeb väärtuselt c_1 väärtuseni c_2, teises kiirusastmes (IV) aga väärtuselt c_1' väärtuseni c_2'.



Joon. 182-a. Auru rõhu ja kiiruse muutumise diagramm kaherealisel kiirusastmetega kettal.

Hõõrdumise tõttu juhtlabades (III) on kiiruse langus c_2-st kuni c_1'-ni.

Ühe kg auru töö kolmerealisel kiirusastmetega kettal kujutab endast tööde summat töölabade esimeses, teises ja kolmandas reas:

$$L_{oi} = \frac{u}{g}\left[(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2) + (c_1' \cos \alpha_1' + c_2' \cos \alpha_2') + \right.$$
$$\left. + (c_1'' \cos \alpha_1'' + c_2'' \cos \alpha_2'')\right] \qquad (130)$$

kus indeks ′ käib töölabade teise rea kohta ja indeks ″ töölabade kolmanda rea kohta.

Märgime, et auru sissemineku nurk juhtlabade esimesele reale löögikadude vältimiseks peab võrduma nurgaga α_2 ja et auru sissemineku nurk juhtlabade teisele reale peab võrduma nurgaga α_2'.

Kuna mitme kiirusastmega turbiinides töölabade esimese rea väljumiskiirus kasutatakse ära töölabade järgmistes ridades, siis kõige kasulikum suhe $\frac{u}{c_1}$ on mitme kiirusastmega turbiinil väiksem kui Laval'i turbiinil.

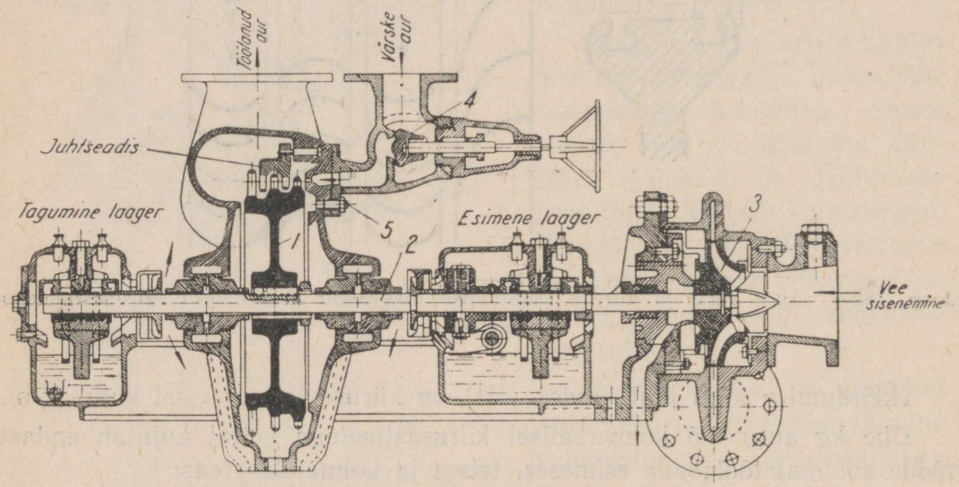
Teoreetiliselt kõige kasulikum suhe $\frac{u}{c_1}$ mitme kiirusastmega ketta jaoks võrdub:

$$\frac{u}{c_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2} \cdot \frac{1}{n},$$

kus n on kiirusastmete arv.

Praktiliselt osutub kaherealise ketta jaoks kõige kasulikumaks $\frac{u}{c_1} = 0{,}20—0{,}23$ ja kolmerealise ketta jaoks $\frac{u}{c_1} = 0{,}13—0{,}15$.

Madalate $\frac{u}{c_1}$ väärtuste tõttu mitme kiirusastmega kettal ringkiirus muudel võrdsetel tingimustel (võrdsed c_1) peab olema märksa väiksem kui



Joon. 183. Kolme kiirusastmelise kettaga turbiin tsentrifugaalpumba käitamiseks.

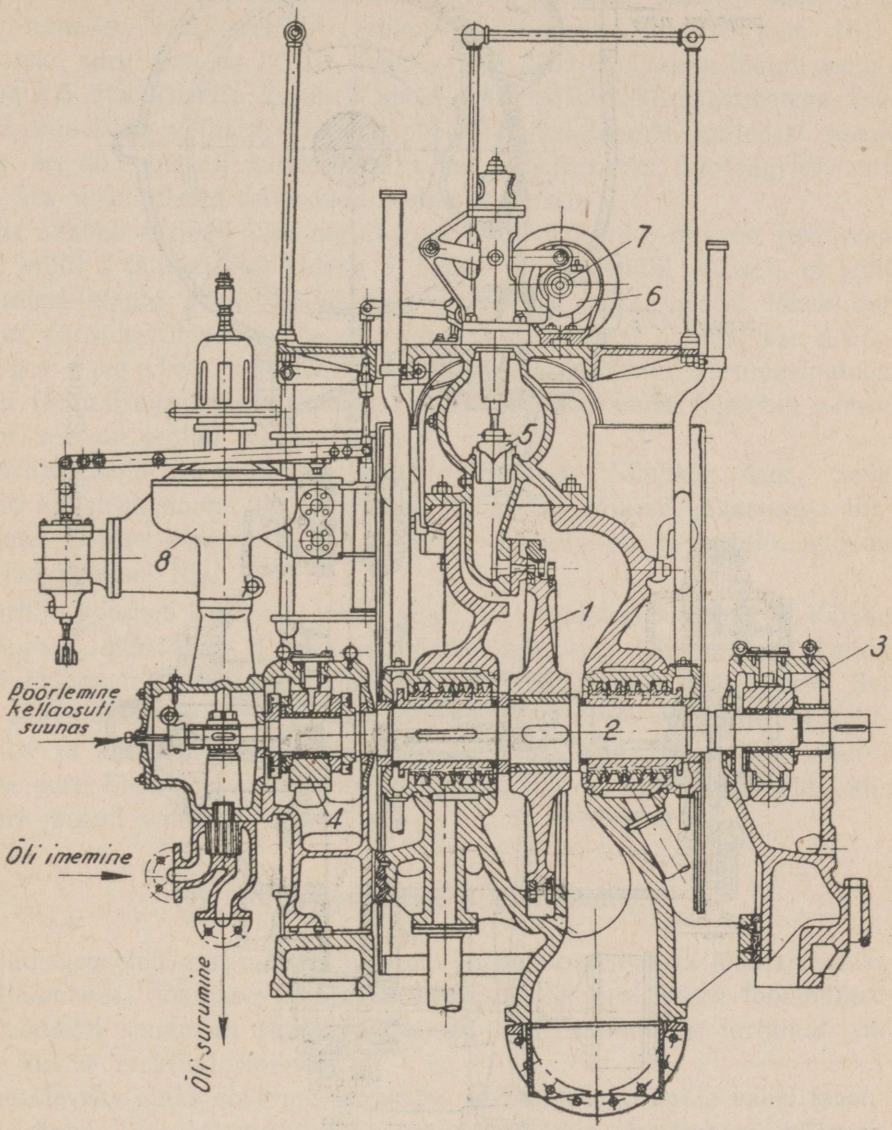
üheastmelises turbiinis. Seepärast on võimalik mitme kiirusastme puhul suure läbimõõduga ketaste kasutamine ja nende töötamine mõõdukatel pööretel.

Vaatamata auru töötamise parematele tingimustele mitme kiirusastmega turbiinis, s. o. Curtise turbiinis, võrreldes ühe kiirusastmega turbiiniga (Laval'i turbiin), osutub ta suhteline efektiivne kasutegur ikkagi väheldaseks (ei ületa 60%). Seepärast ei kasutata Curtise turbiine tavaliselt suurte jõuseadmete pea-agregaatidena, kuid nende lihtsuse ja töökindluse tõttu neid kasutatakse sageli pumpade, väikeste õhukompressorite, turbokompressorite jne. käitamiseks.

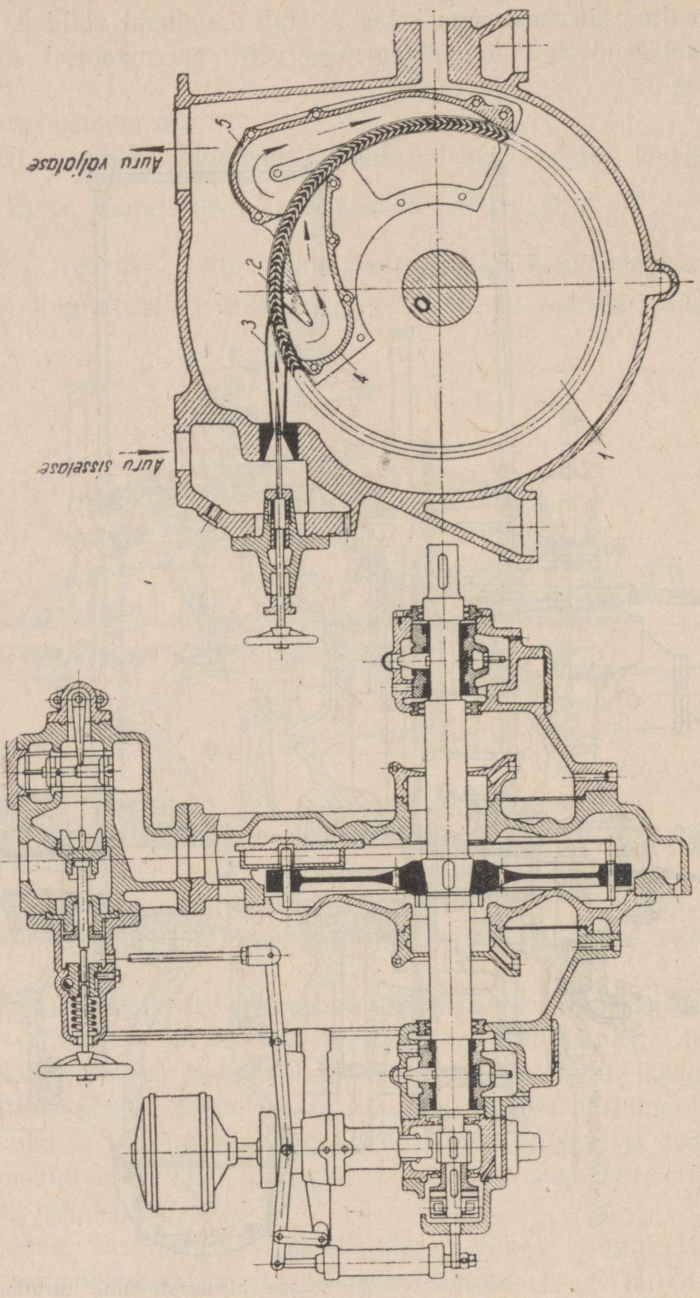
Curtise ketast kasutatakse väga sagedasti esimese (reguleeriva) astmena mitmeastmelistes aktiiv- ja reaktiivturbiinides.

Teostatud konstruktsiooni näiteks võib olla kolme kiirusastmelise kettaga turbiin tsentrifugaalpumba käitamiseks (joon. 183).

Kolmerealine kiirusastmega ketas *1* istub painduval võllil *2*, mis pöörleb rõngasmäärimisega kandelaagrites; võlli parempoolsel otsal istub pumba tiivik *3*.



Joon. 184. Lenini-nimelise Nevski tehase kiirusastmeline turbiin.



Joon. 185. Turbiin „Elektra".

Värske aur saabub muljumisklapi *4* kaudu düüside *5* juurde, milledest aur läheb kolmerealise ketta esimese töölabade rea kanalitesse.

Pöörete arvu muutumist piirides 3500 kuni 4500 pööret minutis, mis on tarvilik pumba tootlikkuse reguleerimiseks, saavutatakse muljumisklapi avatuse muutmisega. Turbiin on arvestatud töötamisele auruga, mille rõhk on 29 atü ja ülekuumenduse temperatuur 425° C.

Kiirusastmetega turbiini konstruktsiooni teiseks näiteks võib olla Lenini-nimelise Nevski tehase (asukoht Leningradis) turbiin (joon. 184). Värske auru rõhk on 11 ata, temperatuur 325° C. Turbiin töötab vastu-rõhuga 4,5 ata. Turbiin koosneb ühest kaherealisest kiirusastmetega kettast *1*, mis istub võllil *2*; viimane pöörleb kahel laagril, milledest vasak laager on ühtaegu nii kandelaagriks kui kahepoolseks tugilaagriks, mis hoiab ära turbiiniketta teljesuunalised nihkumised.

Aur saabub turbiini viie reguleeriva klapi *5* kaudu, mis on juhitavad ühisel võllil *7* istuvate nukkidega *6*. Nukid istuvad võllil selliselt, et võlli pööramisel klapid avanevad üksteise järel. Iga klapi juurest läheb aur vastava düüside rühma juurde. Niisugust reguleerimist nimetatakse *düüsidega reguleerimiseks*, mis analoogia põhjal aurumasinatega osutub täitumisega reguleerimiseks. Nukkvõlli pööramist toimetab servomootor, mis on seotud regulaatoriga *8*.

Kiirusastmeid on võimalik teostada ka ühes töölabade reas. Seda tehakse konstruktsiooni lihtsustamiseks tavaliselt väikese võimsusega turbiinides. Sellise konstruktsiooni näiteks võib olla radiaalturbiin, mis on näidatud joonisel 185.

Turbiin koosneb kettast *1*, mille pöiale on kinnitatud töölabad *2*. Värske aur saabub düüsidesse *3*, nendest töölabadele, siis juhtkanali *4* kaudu tagasi töölabadele ja lõpuks juhtkanali *5* kaudu jällegi töölabadele. Sel viisil saavutame ühel labade real kolm kiiruse astet. Märgime, et juhtkanalites ja töölabadel auru rõhk jääb püsivaks. Kanalite ristlõike suurenemine auru liikumise suunas on tingitud sellest, et neid läbiva auru kiirus järk-järgult väheneb.

102. Mitmeastmelised aktiivturbiinid.

Nüüdisaegsetelt auruturbiinidelt, mis on domineerivateks jõumasinateks elektrijaamades, nõutakse kõrget ökonoomsust ja erakordset töökindlust. Neid nõudeid suudavad rahuldada ainult mitmeastmelised turbiinid, nii aktiiv- kui ka reaktiivturbiinid.

Käesolevaks ajaks on erinevus aktiiv- ja reaktiivturbiinide vahel tasandunud, kuna ka aktiivturbiinid töötavad teatava reaktsiooni määraga

($\varrho = 0{,}10—0{,}15$). Kuid konstruktiivsete tunnuste ja mõnesuguste iseärasuste järgi on arvestuse metoodikas säilinud turbiinide jaotamine aktiiv- ja reaktiivturbiinideks. Vaatleme algul mitmeastmelist aktiivturbiini.

Mitmeastmelise aktiivturbiini töötamise olemus seisab järgnevas. Niisamuti nagu aurumasinates võib auru paisumine toimuda mitte ühes, vaid mitmes järjestikku asetsevas silindris, nii on ka võimalik muundada auru potentsiaalset energiat kineetiliseks ja seejärel mehaaniliseks energiaks mitte ühes turbiini astmes, vaid mitmes üksikus rõhuastmes, mis on lülitud üksteisega järjestikku.

Pole raske näha, et mitmeastmelise turbiini ketaste ringkiirus muudel võrdsetel tingimustel peab olema väiksem üheastmelise turbiini ringkiirusest.

Tõepoolest, kui kogu entalpia lang võrdub H_0-ga, siis selle ärakasutamisel ühes astmes auru kiirus düüsist väljumisel oleks

$$c_1 = \varphi \sqrt{2g \frac{H_0}{A}}.$$

Kui aga antud entalpia kasutatakse ära n astmes ja seejuures võrdsete osadena, siis, jättes tähele panemata düüsi siseneva auru kiiruse, on võimalik saavutada auru kiirust düüsist väljumisel

$$c_{1n} = \varphi \sqrt{2g \frac{H_0}{A \cdot n}}.$$

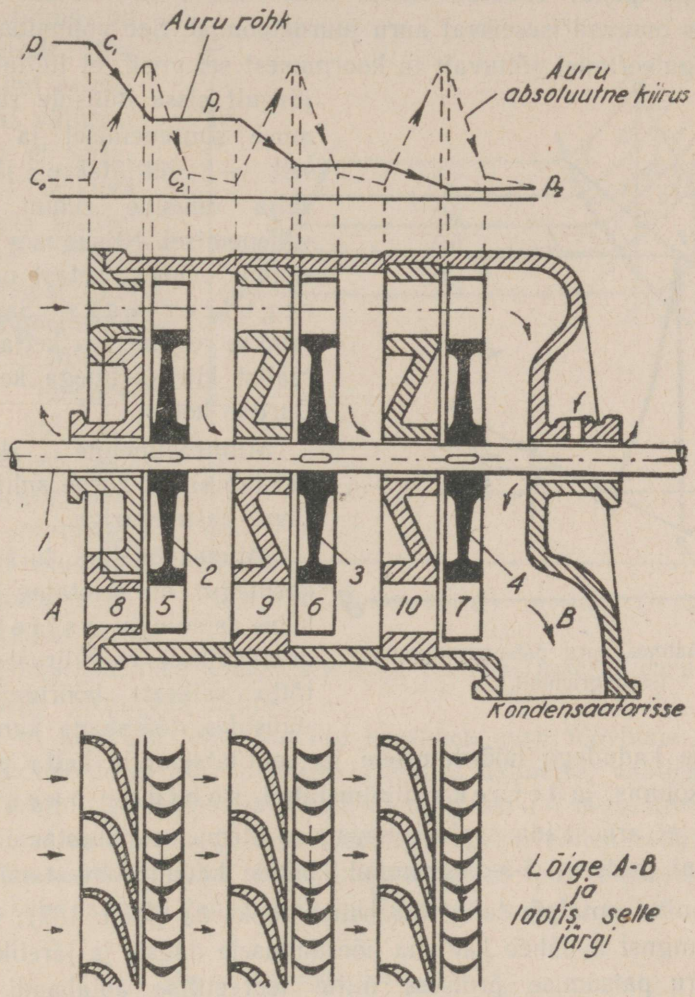
Siit saame suhte

$$\frac{c_{1n}}{c_1} = \frac{1}{\sqrt{n}},$$

s. t. auru väljumise kiirus düüsidest mitmeastmelisel turbiinil muudel võrdsetel tingimustel on $\sqrt{n}$ korda väiksem kui üheastmelisel turbiinil. Ja kuna igasuguse aktiivastme jaoks, nagu tegime kindlaks varemalt, maksimaalne η_{oi} saadakse juhul, kui $\frac{u}{c_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2}$, siis tuleb ka ringkiirus mitmeastmelise turbiini jaoks valida teoreetiliselt $\sqrt{n}$ korda väiksemana kui üheastmelises turbiinis. Näiteks kohane ringkiirus 16-ne astmega turbiinil on ligikaudu $\sqrt{16} = 4$ korda väiksem üheastmelise turbiini ringkiirusest.

Joonisel 186 on kujutatud mitmeastmelise aktiivturbiini konstruktiivne skeem. Turbiin koosneb võllist *1*, millel istub rida kettaid *2*, *3*, *4*, mis on eraldatud üksteisest diafragmadega *8*, *9*, *10*. Igasse diafragmasse on kinnitatud düüsid, milledes toimub auru potentsiaalse energia muundamine kineetiliseks energiaks. Iga ketta põiale on kinnitatud töölabad *5*, *6*, *7*.

Samal joonisel 186 on toodud auru rõhu ja auru kiiruste muutumise kõverad üksikute astmete järgi. Diagrammilt nähtub, et esimese astme düüsides kasutatakse ära ainult osa kogu turbiini jaoks antud rõhu lan-



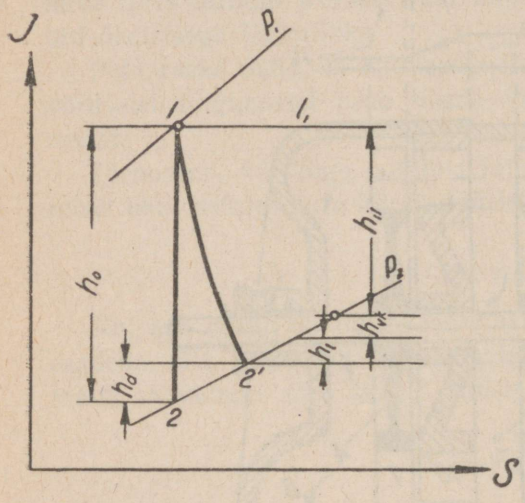
Joon. 186. Mitmeastmelise aktiivturbiini skeem.

gust. Auru kiirus suureneb düüsides selle arvel, et auru potentsiaalne energia muundub kineetiliseks energiaks.

Aktiivturbiini töölabade kanalites on rõhk püsiv, auru absoluutne kiirus aga langeb, kuna kineetiline energia muutub mehaaniliseks. Järgnevates astmetes kasutatakse omakorda järjest ära auru potentsiaalne ener-

gia, kuni väljumisel viimase astme düüsidest auru rõhk pole langenud antud vasturõhuni p_2.

Nüüdisaegsetes turbiinides kasutatakse düüsidega reguleerimist, s. o. sellist, mille puhul esimese astme kõik düüsid koondatakse mitmesse rühma, mis omavad iseseisvat auru juurdetoomist. See võimaldab teostada turbiini reguleerimist sõltuvalt ta koormusest sel viisil, et lülitatakse järk-järgult sisse düüside rühmi koormuse suurenemisel ja vastupidiselt — lülitatakse järk-järgult välja düüside rühmi koormuse vähenemisel. Niisuguses konstruktsioonis esimest ketast nimetatakse reguleerivaks. Sageli kasutatakse reguleeriva kettana mitmerealist kiirusastmega ketast, s. o. Curtise ketast.



Joon. 187. Astmes auru paisumise protsess *i-s*-diagrammil.

Mitmeastmeline aktiivturbiin paistab silma kõrge suhtelise efektiivse kasuteguriga.

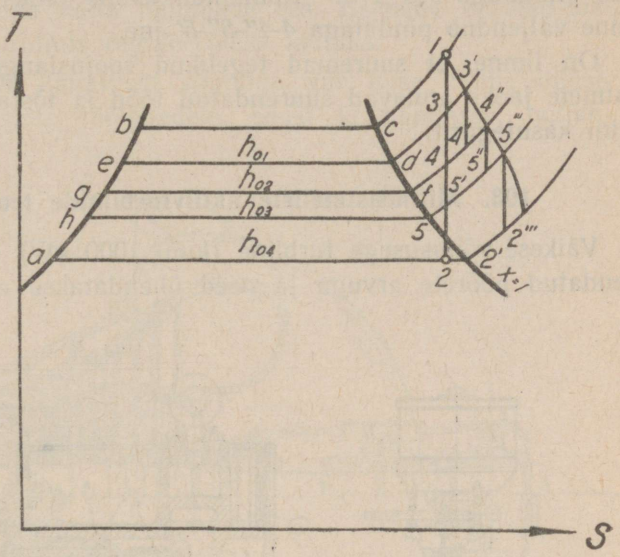
Mitmeastmelise turbiini kõrge kasutegur on seletatav põhimiselt kahe asjaoluga: esiteks võrdlemisi väikese ringkiirusega ja seetõttu väikeste hõõrumiskadudega düüsides, töölabade kanalites, kui ka väikeste kadudega hõõrdumisele ja ventilatsioonile ketta pöörlemisel auru keskkonnas, ja teiseks niinimetatud soojuse naasmisega.

Selleks et aru saada soojuse naasmise olemusest, kujutame üheastmelise turbiini protsessi *i-s*-diagrammil kõikide kadude arvestamisega.

Olgu antud entalpia lang ühe astme jaoks h_0 (joon. 187); osa sellest entalpia langust h_0 läheb kaduma hõõrdumisele düüsis ja järelikult toimub düüsis auru paisumise protsess mitte teoreetilise adiabaadi 1-2, vaid tagastamatu voolamisprotsessi kõvera *1-2'* järgi (vaadeldes hõõrdumissoojust välissoojusena, võime kõverat *1-2'* vaadelda kui teatavat polütroopi). Osa kineetilisest energiast läheb kaduma hõõrdumisele töölabade kanalites, osa entalpia langust kulutatakse hõõrdumisele ja ventilatsioonile ketta pöörlemisel auru keskkonnas ja lõpuks osa soojuslangust läheb kaduma töölabade kanalitest väljumise kiirusega.

Seega väljendub indikaatoritöö (soojusühikutes) lõiguga h_u. Tuleb märkida, et kõikide nende kadude tõttu, võrreldes tagastatava protsessiga *1-2*, suureneb auru entalpia selle väljumisel töölabade kanalitest.

Kui turbiinis on olemas ainult üks aste, s. o. kui esimesest astmest väljuvat auru enam ei kasutata, siis lahkuva auru entalpia sellisel suurenemisel pole mingit tähtsust turbiini ökonoomsuse seisukohalt. Mitmeastmelistes turbiinides aga, kui aur suundub ühest astmest järgnevasse, suurema entalpiaga aur osutub muidugi töövõimsamaks ja järelikult entalpia langu kaod eelmises astmes kompenseeruvad teataval määral auru töövõime suurenemisega järgnevas astmes.



Joon. 188. Auru paisumise protsess *T-s*-diagrammil.

Selleks, et kindlaks teha, kuivõrd suureneb auru töövõime järgmistes astmetes kadude tõttu hõõrdumisele eelmistes astmetes, vaatleme mitmeastmelise turbiini teoreetilist ja tegelikku protsessi *T-s*-diagrammil.

Oletame, et entalpia lang kogu turbiini jaoks on väljendatud pindalaga *a-b-c-1-2* (joon. 188). Olgu edasi kogu entalpia lang ühtlaselt jaotatud turbiini kõikide astmete vahel (näit. nelja astme vahel), nii et

$$h_{o1} = h_{o2} = h_{o3} = h_{o4} = \frac{H_o}{4},$$

kus

$$h_{o1} = \square\ e\text{-}b\text{-}c\text{-}1\text{-}3\text{-}d;$$
$$h_{o2} = \square\ g\text{-}e\text{-}d\text{-}3\text{-}4\text{-}f \text{ jne.}$$

Kadude puudumisel e s i m e s e s astmes auru olek esimesest astmest väljumisel oleks iseloomustatud punkti *3* parameetritega. Kuid kadude tõttu hõõrdumisele düüsis, töölabade kanalites, hõõrdumisele ja ventilatsioo-

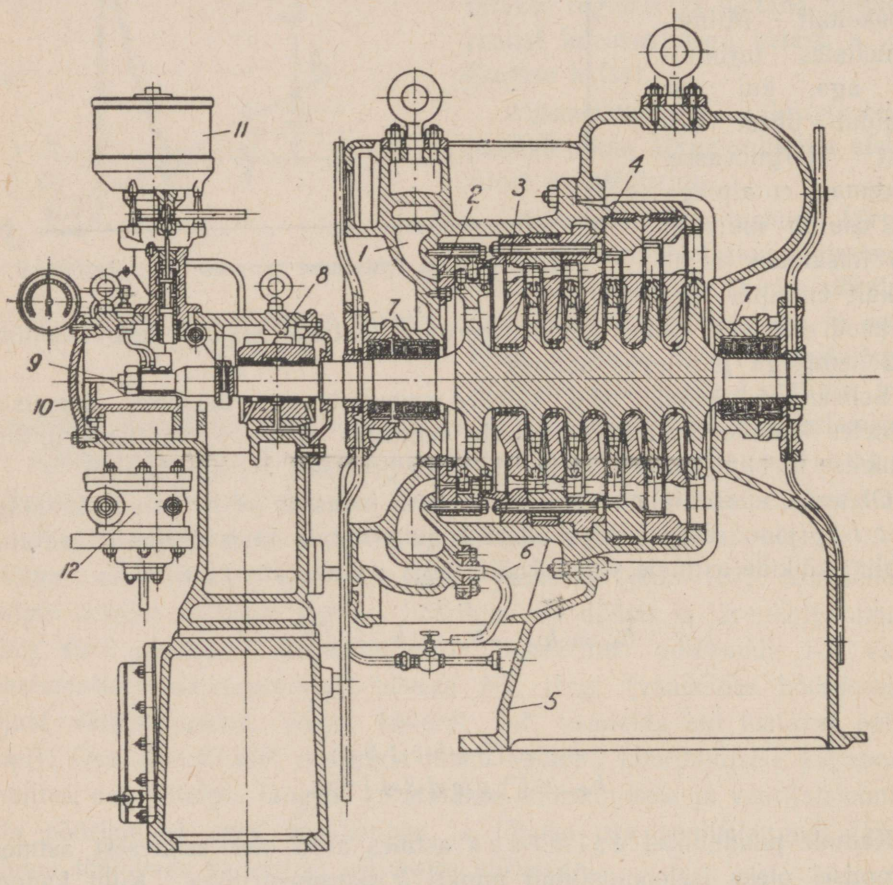
nile ketta pöörlemisest auru joas iseloomustub auru tegelik olek esimesest **astmest** väljumisel punktiga *3'*. Teise astme jaoks kasutada olev (tegelik) entalpia lang iseloomustub järelikult pindalaga *g-e-d-3'-4'-f*.

Sellest nähtub, et soojuse langu suurenemine teise astme jaoks väljendub pindalaga *3-3'-4'-4*. Kolmanda astme jaoks soojuse langu suurenemine väljendub pindalaga *4-4''-5''-5'* jne.

On ilmne, et suuremad tegelikud soojuslangud esimesele järgnevate astmete jaoks annavad suurendatud tööd ja tõstavad mitmeastmelise turbiini kasutegurit.

103. Mitmeastmeliste aktiivturbiinide teostamise näiteid.

Väikese võimsusega turbiine (kuni 1000 kW) ehitatakse tavaliselt kõrgendatud pöörete arvuga ja need ühendatakse elektrivoolu-generaatoriga

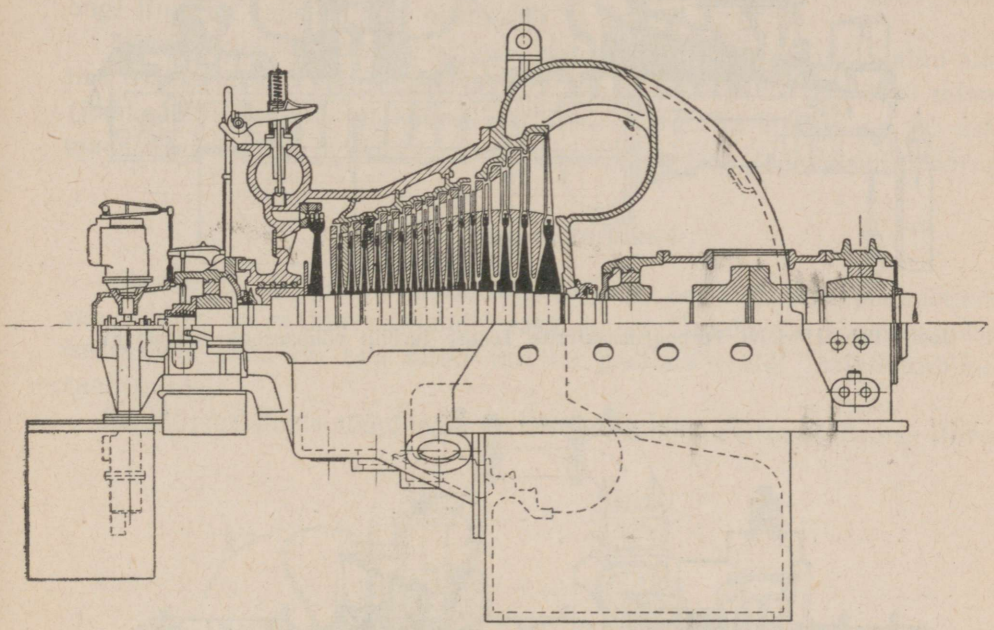


Joon. 189. Kombineeritud aktiivturbiin.

hammasreduktori kaudu (joon. 189). Turbiini pöörete arv on 7000 minutis, võimsus 700 HJ. Turbiini tervelt taotud rootoril on kuus aktiivketast, milledest esimene on kahe kiirusastmega ketas.

Katlaaur saabub ventiilide kaudu kambrisse *1*, sealt düüsidesse *2*, mis asetsevad kahe kiirusastmega ketta töölabade ees. Esimene kiirusastmetega ketas osutub antud turbiinis reguleerivaks kettaks.

Esimese ketta töölabade kanalitest suundub aur teise astme düüsidesse *3*, nendest teise astme töölabadele, edasi kolmandasse, neljan-



Joon. 190. Harkovi Turbogeneraatorite Tehase turbiin võimsusega 50 000 kW.

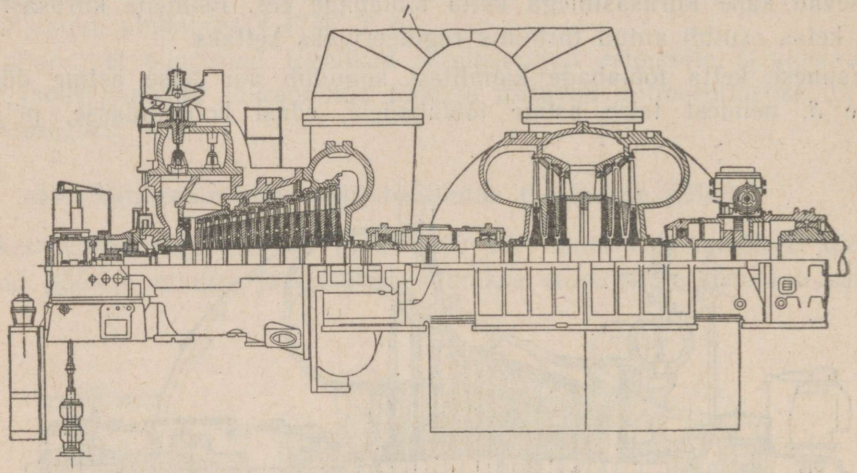
dasse jne. astmesse. Seejuures toimub järk-järgult auru paisumine, kuni rõhk viimase astme düüsides muutub võrdseks rõhuga kondensaatoris. Viimasest astmest suundub aur suure läbimõõduga toru *5* kaudu kondensaatorisse. Toru *5* suur läbimõõt on tingitud auru suurest mahust.

Kondensaadi eemaldamine kambrist *1* toimub toru *6* kaudu. Kohtades, kus võll väljub korpusest, on süsitihendused. Võll lasub kahes laagris *8*, milledest parempoolne on rõngaslaiendi olemasolu tõttu ühtlasi ka tugilaagriks (joonisel parempoolne laager pole näidatud). Võlli vasakule otsale on kinnitatud tigu *10* mutri *9* abil; tigu käitab regulaatorit *11*. Regulaatori võllile on kinnitatud veel hammasratas, mis käitab õlipumpa

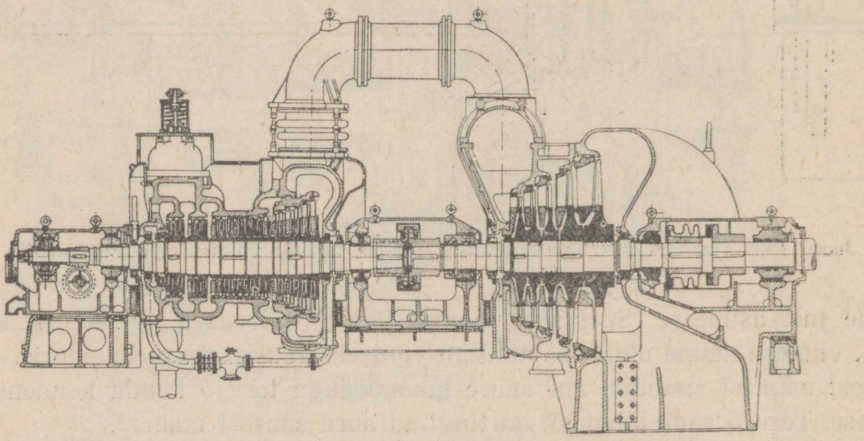
12; õlipump annab surve all õli kõikidele hõõrduvatele osadele kui ka servomootori käitamiseks.

Turbiin on ühendatud elektrigeneraatoriga hammasreduktori kaudu.

Suurema võimsusega turbiine, mis ühendatakse vahetult generaatoriga,



Joon. 191. Harkovi Turbogeneraatorite Tehase turbiin võimsusega 100 000 kW.



Joon. 192. Leningradi Stalini-nimelise tehase turbiin võimsusega 25 000 kW.

ehitatakse pöörete arvule 1500 ja 3000 minutis. Võimsa turbiini konstruktsiooni näiteks võib olla Harkovi Turbogeneraatorite Tehase turbiin võimsusega 50 000 kW, pöörete arvuga 1500 minutis (joon. 190).

Turbiinil on *17* ketast, milledest esimene — kahe kiirusastmega ketas

— on reguleerivaks kettaks. Reguleerimine toimub kümne ventiiliga, mida avatakse üksteise järel ühisel jaotusvõllil istuvate nukkide toimel.

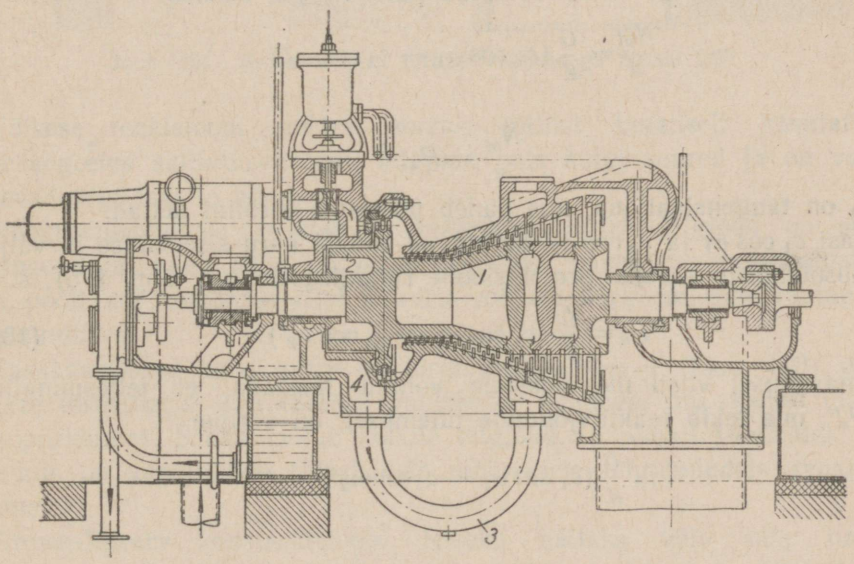
Joonisel 191 on näidatud Harkovi Turbogeneraatorite Tehase turbiin võimsusega 100 000 kW ja pöörete arvuga 1500 minutis. Turbiin koosneb kõrgrõhusilindrist ja madalrõhusilindrist. Värske aur juhitakse kahekiirus-astmelisele reguleerivale kettale, läbib siis esimese silindri 16 astet ja suundub mööda torustikku *1* madalrõhusilindri astmetesse. Auru suur maht madalrõhu-astmetes on turbiini suure võimsuse tõttu tinginud auru vooluse jaotust kahte ossa, selleks et vältida labade suurt kõrgust. Sellest ongi tingitud kahe silindri olemasolu.

Mitmeastmelise turbiini näiteks võib olla ka Leningradi Stalini-nimelise tehase turbiin võimsusega 25 000 kW ja pöörete arvuga 3000 minutis (joon. 192). Turbiin on kahesilindriline. Kõrgrõhusilindris on 20 astet, madalrõhusilindris 5 astet, mis töötavad väheldase reaktsiooni määraga.

104. Reaktiivturbiinid.

Käesoleval ajal, nagu märkisime eespool, on töötamise põhimõtteline vahe aktiiv- ja reaktiivturbiinidel tasandunud. Tunduvate konstruktiivsete iseärasuste tõttu on aga siiski tarvilik peatuda eraldi reaktiivturbiinide vaatlemisel.

Reaktiivturbiinide tüüpiliseks konstruktsiooniks osutuvad Brown-Bovery



Joon. 193. Brown-Bovery turbiin võimsusega 1500 kW ja pöörete arvuga 6000 minutis.

turbiinid (joon. 193). Turbiin omab üht (esimest) kaherealist aktiivketast ja *22* reaktiivvastet, millede töölabad on kinnitatud trumlile *1*.

Reaktiivtrummel osutub reaktiivturbiini konstruktsiooni esimeseks silmapaistvaks iseärasuseks. Teiseks konstruktiivseks iseärasuseks on tasakaalustuskolb *2*; viimane on nähtud ette suurte telgjõudude tasakaalustamiseks, mis tekivad reaktiivturbiinis suure reaktsiooni määra ($\varrho = 0{,}5$) tõttu töölabade kanalites.

Telgjõudu, mis mõjub töölabade reale, on võimalik määrata järgmisel viisil.

Kui tähistame F-ga töölabade kanalitesse sissemineku pindala, p_1-ga rõhku töölabade ees, p_2-ga rõhku töölabade taga, siis tekib üks telgjõud —

$$P_a' = F(p_1 - p_2).$$

Peale selle mõjub töölabade reale teine telgjõud; see tekib reaktiivjõudude toimel, mis antakse edasi töölabade kanalite pinnale auruvooluse poolt telgsuunas.

Võrrandi (103) järgi saame:

$$N_{ol} = \frac{G}{g}(u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha_2').$$

Aksiaalturbiinil $u_1 = u_2$, järelikult:

$$N_{ol} = \frac{G \cdot u}{g}(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2'). \qquad (131)$$

Jagades saadud võrrandi mõlemad pooled u-ga, saame:

$$\frac{N_{ol}}{u} = \frac{G}{g}(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2').$$

Kuid

$$\frac{N_{ol}}{u} = P_u,$$

kus P_u on tangensiaaljõud, mis paneb pöörlema turbiini kettad.

Edasi $c_1 \cos \alpha_1$ ja $c_2 \cos \alpha_2'$ kujutavad endast auru sisenemise ja väljumise absoluutsete kiiruste projektsioone ringkiirusele (vt. joon. 175), s. t.

$$P_u = \frac{G}{g}(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2'). \qquad (132)$$

Samasugusel viisil me oleksime võinud tõestada, et teljesuunaline jõud P_a'', mis tekib reaktiivjõudude tulemusel, on võrdne

$$\frac{G}{g}(c_1 \sin \alpha_1 - c_2 \sin \alpha_2');$$

kuid

$$\sin \alpha_2' = \sin \alpha_2, \quad c_1 \sin \alpha_1 = w_1 \sin \beta_1 \quad \text{ja} \quad c_2 \sin \alpha_2 = w_2 \sin \beta_2.$$

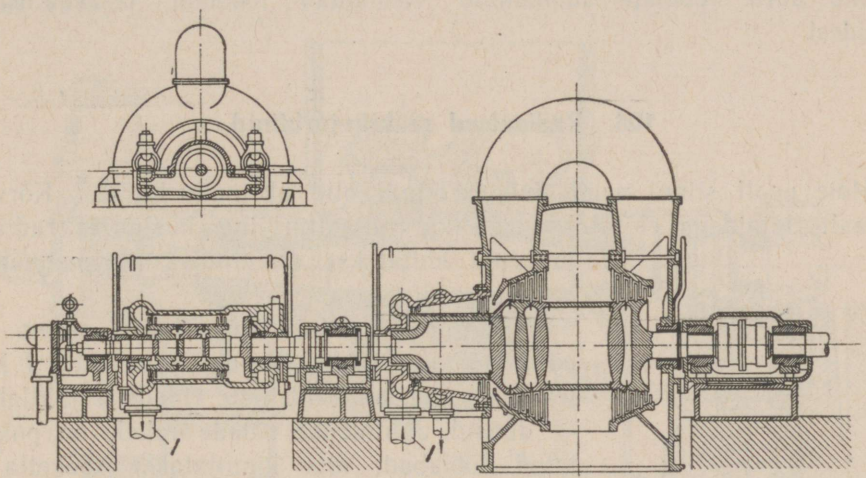
Järelikult

$$P_a'' = \frac{G}{g}(c_1 \sin \alpha_1 - c_2 \sin \alpha_2) = \frac{G}{g}(w_1 \sin \beta_1 - w_2 \sin \beta_2).$$

Täielik telgjõud P_a on võrdne jõudude P_a' ja P_a'' summaga, s. t.

$$P_a = P_a' + P_a'' = F(p_1 - p_2) + \frac{G}{g}(w_1 \sin \beta_1 - w_2 \sin \beta_2). \quad (133)$$

Puht-aktiivturbiini astme jaoks, kus p_1 (rõhk töölabade ees) peab võrduma p_2-ga (rõhk töölabade taga), relatiivsed kiirused w_1 ja w_2 peavad olema võrdsed ja nurgad β_1 ja β_2 samuti võrdsed, telgtung aga peab võrduma nulliga.



Joon. 194. Brown-Bovery turbiin võimsusega 50 000 kW.

Väikese reaktsiooni määra korral, millist tavaliselt kasutatakse nüüdisaegsetes aktiivturbiinides, telgjõud pole kuigi suured ja on vastuvõetavad tugilaagrite poolt.

Reaktiivturbiinides reaktsiooni määraga $\varrho = 0{,}5$ telgjõud on suure väärtusega ja, nagu juba märgitud, võetakse vastu kas tasakaalustava kolvi poolt või kompenseeritakse auru vooluse hargnemisega vastupidistes suundades.

Tasakaalustava kolvi toime on järgmine: kamber *4* (joon. 193) ühendatakse torustiku *3* abil turbiini vahepealse astmega, mis töötab madalrõhu piirkonnas. Seega mõjub kolvile telgjõud (paremalt vasakule) suunas, mis on vastupidine töölabadele mõjuvatele telgjõududele (vasakult paremale).

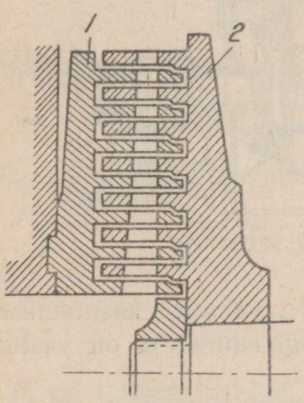
Brown-Bovery konstruktsiooni teiseks näiteks võib olla turbiin võimsusega 50 000 kW ja pöörete arvuga 3000 minutis (joon. 194).

Turbiin on kahesilindriline. Kõrgrõhusilinder koosneb aktiivsest reguleerivast astmest (Curtise ketas) ja reaktiivsest trumlist. Kõrgrõhuturbiini võlli parem laager on varustatud kahe kuulide reaga ja on ühtlasi ka tugilaagriks. Kõrgrõhusilindrist juhitakse aur mööda toru *1* madalrõhusilindrisse.

Telgjõudude tasakaalustamine selles turbiinis toimub järgmisel viisil. Auru voolused kõrgrõhusilindris ja madalrõhusilindri labade esimeses rühmas on suunatud üksteisele vastupidiselt; madalrõhusilindri teises labade rühmas hargneb auru voolus kahte ossa erinevates suundades. Selline auru vooluste suunamine võimaldab loobuda tasakaalustuskolbidest.

105. Radiaalsed reaktiivturbiinid.

Meie poolt siiani vaadeldud turbiinid olid aksiaalturbiinid. Kõrvuti aksiaalturbiinidega ehitatakse aga ka radiaalturbiine, kusjuures radiaalturbiinid ehitatakse eranditult mitmeastmeliste reaktiivturbiinidena.



Joon. 195. Radiaalturbiini läbivooluosa skeem.

Niisuguse turbiini läbivooluosa skeem on näidatud joonisel 195. Paigalseisva ketta *1* küljes asetsevad kontsentriliste ridadena juhtlabad — düüsid. Juhtlabade ridade vahele on paigutatud töölabad, mis kinnitatakse tööketta *2* külge.

Läbivoolu suund võib olla tsentrist piirde poole või vastupidi.

Seetõttu, et ühele kettale on võimalik paigutada suur arv astmeid, osutub radiaalturbiin kompaktsemaks aksiaalturbiinist. Töölabade töötingimused radiaalturbiinis on aga märksa ebasoodsamad kui aksiaalturbiinis. Aksiaalturbiinides labade paindumine toimub ainult auru joa reaktiivjõudude toimel, radiaalturbiinides aga painduvad labad nii auru joa kui ka labade massist tingitud tsentrifugaaljõudude toimel. Seepärast radiaalturbiinide labade maksimaalne ringkiirus ei ületa 180 m/sek., s. t. on märksa väiksem kui aksiaalturbiinides lubatav ringkiirus (300—400 m/sek.).

Radiaalsete reaktiivturbiinide konstruktsioonidest on levinumad Siemensi turbiinid.

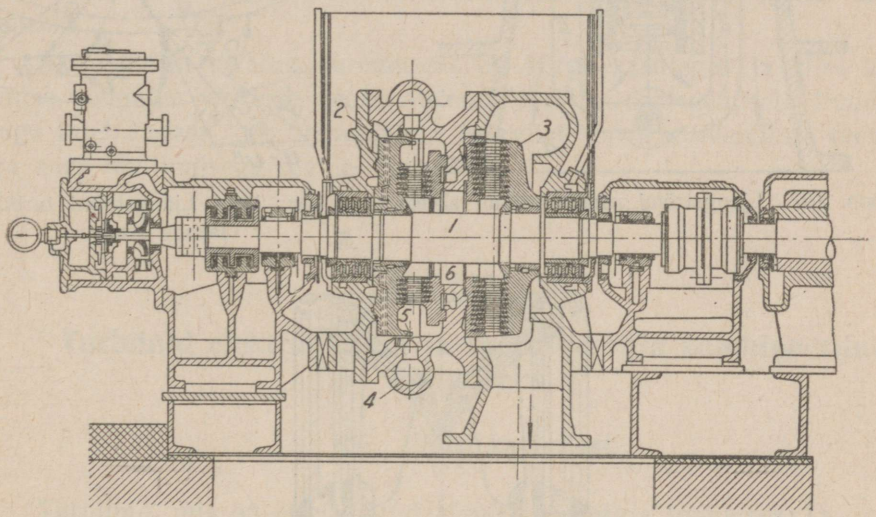
Nende turbiinide konstruktsiooni näiteks võib olla turbiin, mis on

kujutatud joonisel 196. Turbiin koosneb võllist *1*, millele on kinnitatud kaks ketast *2* ja *3*.

Katlaaur saabub kambrisse *4*, kust see suundub düüside kaudu ühe-realisele reguleerivale aktiivastmele *5* ja edasi esimese ketta radiaalse-tesse reaktiivastmetesse. Esimese ketta astmetest väljumisel saabub aur mööda võlli ümber olevat ringpilu *6* teise ketta *3* radiaalastmetesse ja väljub väljalasketoru kaudu kondensaatorisse.

Siemensi radiaalturbiinid on tavaliselt arvestatud väikesele entalpia langule.

Omapärase konstruktsiooniga paistab silma Ljungströmi turbiin (joon. 197).

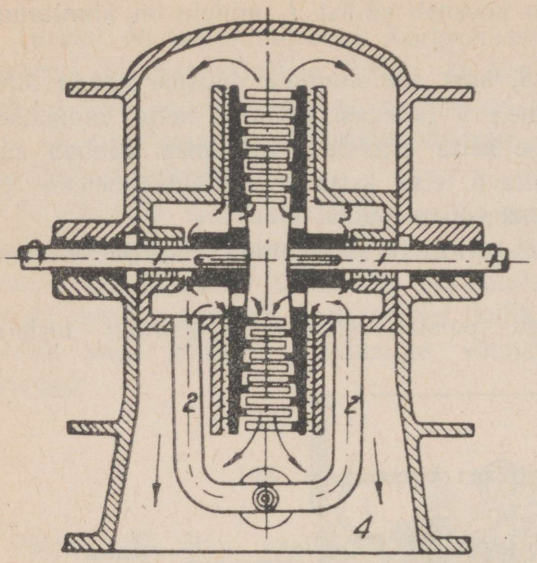


Joon. 196. Siemensi radiaalne reaktiivturbiin.

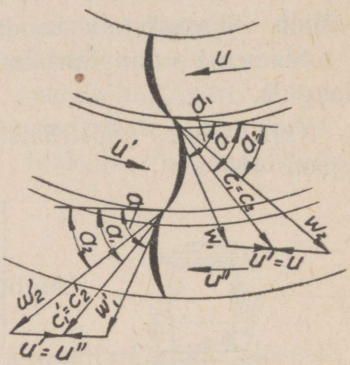
Võllide *1* ja *1'* otstel istuvad kettad, milledele kontsentriliste ringi-dena on kinnitatud labad, kusjuures paarituarvulised ringid (*1.*, *3.*, *5.* jne.) on kinnitatud vasakpoolsele, paarisarvulised aga parempoolsele kettale. Iga labade ring on ühtaegu nii töötavaks, kui ka teise ketta labadele juh-tivaks ringiks, mispärast kahe naabrusringi labade kõveruse raadiused omavad vastupidist suunda, nagu on näidatud joonisel 198, ja kettad pöörlevad teine teises suunas.

Värske aur saabub mööda torusid *2* (joon. 197) ja aukude kaudu ketastes see suundub esimesele labade reale, sealt teisele reale jne., kus-juures toimub auru järk-järguline paisumine.

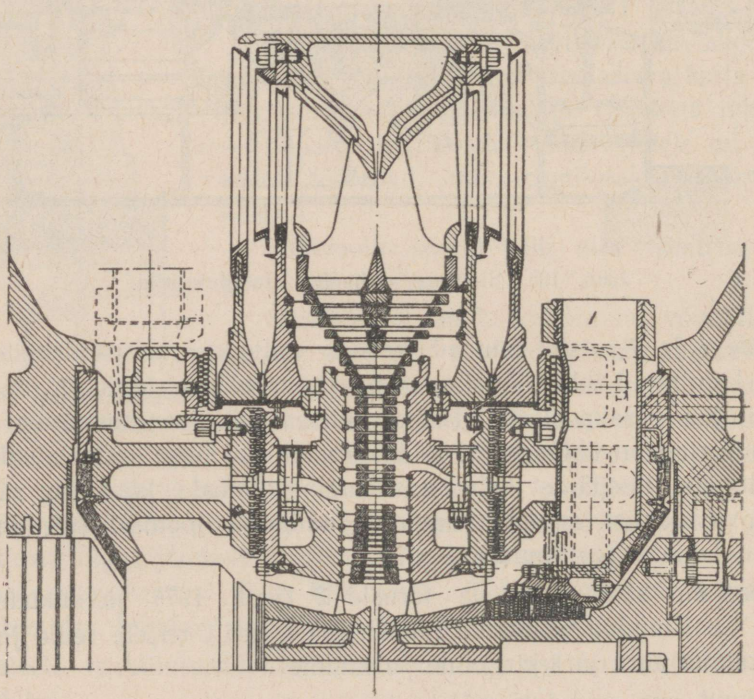
Töötanud aur suundub mööda toru *4* kondensaatorisse. Ljungströmi



Joon. 197. Ljungströmi radiaalturbiini skeem.



Joon. 198. Ljungströmi turbiini labade skeem.



Joon. 199. Ljungströmi turbiin.

turbiin kujutab endast seega turbiini kahe, iseseisvalt eri suundades pöörleva rootoriga; kumbki rootor ühendatakse oma elektrigeneraatoriga.

12 000 ja 15 000 kW võimsusega Ljungströmi turbiini pikilõige on toodud joonisel 199.

Kummagi võlli otsale on survemutrite abil kinnitatud kettad, nendele aga seitseteist radiaalset labade rida ja kaks aksiaalset rida.

Värske aur toodakse juurde mööda toru *1* ja juhitakse läbi aukude ketastes labade sisemisele reale; esimeselt realt suundub aur teisele reale ja läbinud sel viisil kõik radiaal- ja aksiaalread, väljub aur kondensaatorisse. Ljungströmi turbiini viimaste astmetena kasutatakse aksiaalridasid, selleks et saavutada suuremaid elavlõikeid auru suure mahu läbilaskmiseks.

Ljungströmi turbiini paremuseks on kõrge kasutegur ja kiire käivitamise võimalus väikeste deformatsioonide tõttu soojenemisel. Puudusteks aga tuleb lugeda kahe generaatori, keeruliste labürinttihenduste olemasolu ja auru muljumisega reguleerimist.

XXIII peatükk.

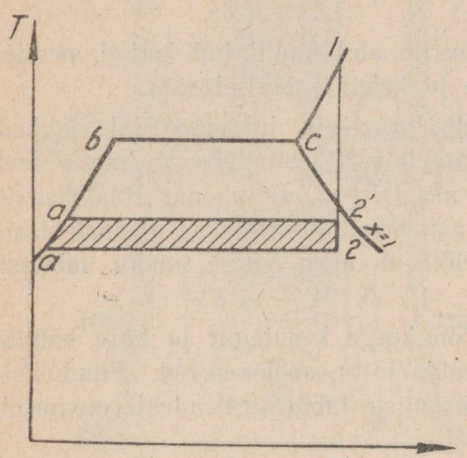
Turbiinid elektrienergia ja soojusenergia kombineeritud tootmiseks.

106. Üldisi kaalutlusi.

Turbiinid, mis on ette nähtud ainult jõuenergia tootmiseks, s. o. puhtkondensatsiooniga turbiinid, töötavad keskmise absoluutse efektiivse kasuteguriga 0,25. Madal kasutegur on seletatav sellega, et peidetud aurumissoojus, mis moodustab umbes 75% auru soojusest, läheb kaduma koos kondensaatori jahutusveega.

Märgatavaid paremusi annab soojus- ja elektrienergia kombineeritud tootmine. Nendel juhtudel, kui kõrvuti võimsuse tarbijatega on olemas ka soojusenergia tarbijad (kütteks, tehnoloogilisteks otstarveteks), on võimalik ära kasutada auruturbiini töötanud auru soojust. Kuid seejuures töötanud auru rõhk, ehk nagu seda tavaliselt nimetatakse — *vastu-rõhk* sõltub täielikult tarbijale vajalikust temperatuurist. Kuna näiteks kütte otstarbel vee temperatuur tsirkulatsioonisüsteemis ei tohi olla alla 75—80° C, siis sellele vastab auru rõhk 0,5 ata. Ligikaudu sama suur peab olema ka töötanud auru rõhk.

Kondensatsiooniturbiini ja vasturõhuga turbiini ringprotsesside võrdlemisel (joon. 200) näeme, et ühe kg auru töö kondensatsiooniturbiinis on suurem kui vasturõhuturbiinis; selles võime hõlpsalt veenduda pindalade *a-b-c-1-2* ja *a'-b-c-1-2'* võrdlemisel. Järelikult auru erikulu võimsuse ühikule on kondensatsiooniturbiinis väiksem kui vasturõhuturbiinis. See-eest aga samal ajal, kui kondensatsiooniturbiinis töötanud auru soojus läheb kaduma kasutult, vasturõhuturbiinis see kasutatakse tarbija poolt täielikult. Teiste sõnadega — selle asemel, et kulutada eraldi kütust kondensatsiooniga elektrijaama katlamajas ja tarbijaid soojusenergiaga teenindavates katlamajades, on võimalik anda tarbijale turbiini töötanud auru ja saavutada sel viisil märgatavat kütuse kokkuhoidu. N. Liidu energeetika-majanduses on sellele asjaolule pööratud väga suurt tähelepanu, mis omakorda tingib võimsate vaheltauruturbiinide tootmist, selleks et tõsta soojus-elektrijaamade kasutegurit.

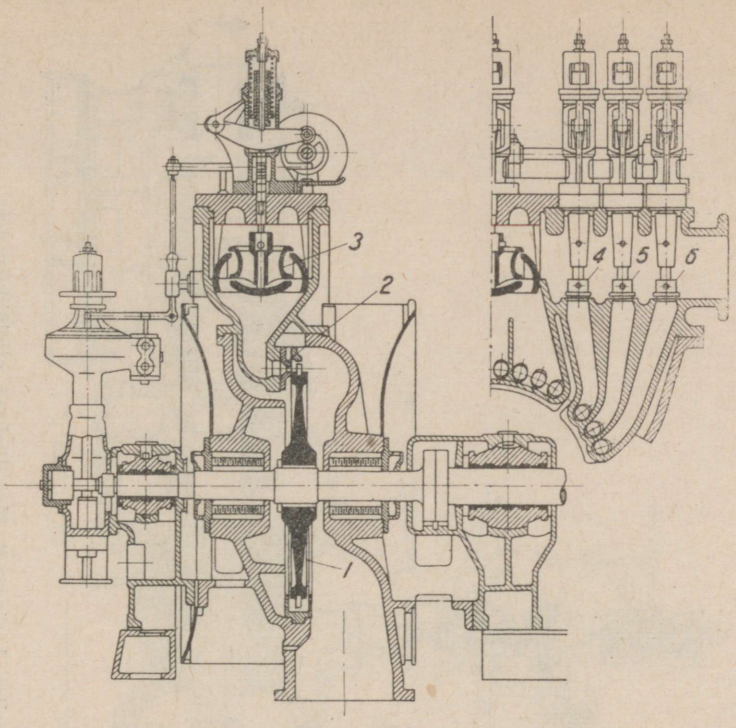


Joon. 200. Vasturõhu- ja kondensatsiooniturbiinide tsüklite võrdlus *T-s*-diagrammil.

107. Vasturõhuturbiinid.

Vasturõhuturbiini konstruktsiooni näiteks võib olla joonisel 201 kujutatud turbiin. See turbiin omab ainult üht kaherealist kiirusastmetega ketast 1. Aur juhitakse kettale nelja düüside rühma *2* poolt ventiilide *3*, *4*, *5* ja *6* kaudu. Turbiini reguleerimine toimub düüside rühmade järkjärgulise sisseühendamisega (ventiilide avamisega). Turbiin töötab auruga, mille rõhk on 15 atü ja ülekuumenduse temperatuur 320°. Töötanud auru rõhk on 4 ata. Turbiin on ette nähtud õhukompressori käitamiseks.

Sama tüüpi turbiinide hulka kuulub ka Stalini-nimelise Leningradi Metallitehase ettelülitusturbiin võimsusega 25 000 kW (joon. 202). Turbiin on arvestatud värske auru rõhule 125 ata ja ülekuumenduse temperatuurile 450° C. Vasturõhk on 34 ata. Turbiini töötanud aur juhitakse



Joon. 201. Vasturõhuturbiin.

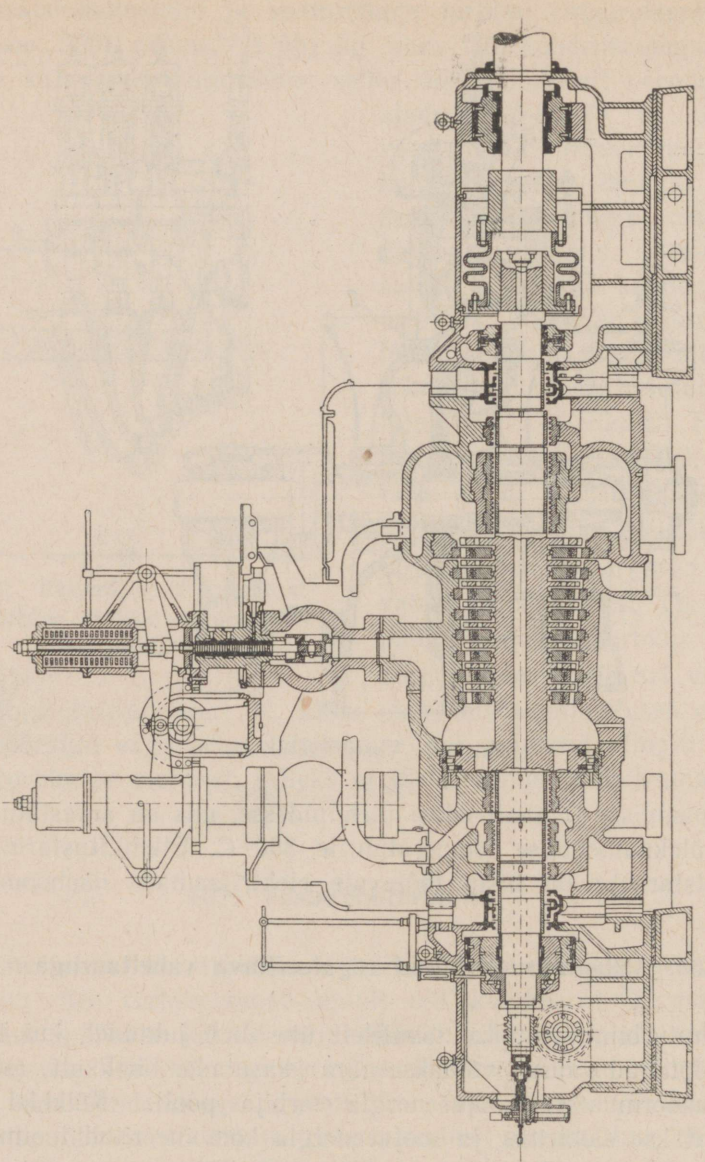
auruülekuumendisse ja sealt edasi turbiinidesse, mis on arvestatud rõhule 29 ata ja ülekuumenduse temperatuurile 350° C. Ettelülitusturbiini ülesseadmise otstarbeks on tõsta töötavate elektrijaamade ökonoomsust.

108. Vaheltauru-turbiinid reguleeritava vaheltauruga.

Vasturõhuturbiine seatakse tavaliselt üles neil juhtudel, kui turbiinist väljuvat töötanud auru võidakse ära kasutada täielikult (sõltumata turbiini jõukoormusest) soojusenergia tarbija poolt. Kõikidel muudel juhtudel seatakse elektrilise ja soojusenergia kombineeritud tootmisel üles vaheltauru-turbiinid reguleeritava vaheltauruga. Niisuguse seadme skeem on toodud joonisel 203.

Katlaaur parameetritega p_1 ja t_1 juhitakse kõrgrõhuturbiini silindrisse *1*. Kõrgrõhusilindrist väljumisel auru voolus hargneb: osa sellest suunatakse tarbijale *T*, ülejääv osa madalrõhusilindrisse *2* ja sealt kondensaatorisse *3*.

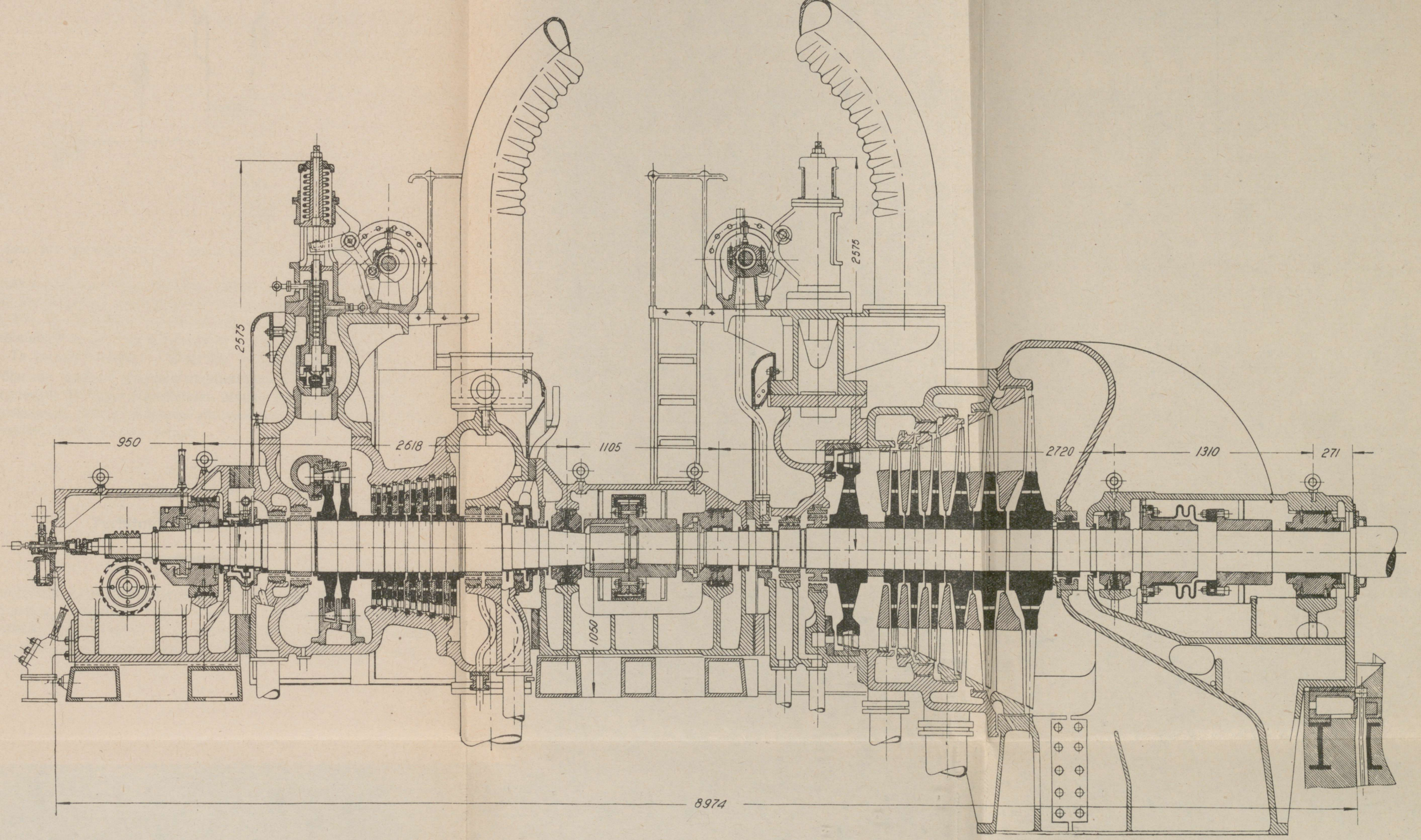
Mõnedel juhtudel, näiteks turbiini väikese elektrilise koormuse või



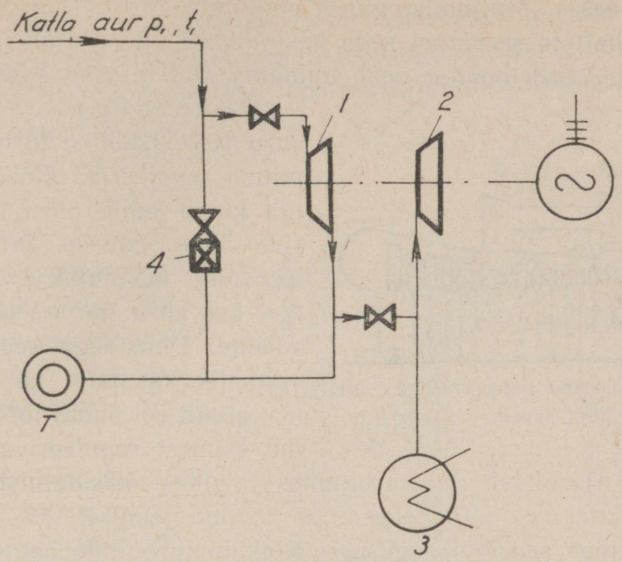
Joon. 202. Stalini-nimelise Leningradi Metallitehase ettelülitusturbiin võimsusega 25 000 kW.

auru suure tarbimise puhul, võidakse katlaauru juhtida tarbijale turbiinist möödudes, rõhuregulaatori *4* kaudu.

Sellise seadme skeemi puhul soojuse tarbimine ja võimsus võivad muutuda teineteisest sõltumata laiades piirides. Enamus NSV Liidus ehitatavatest turbiinidest on vaheltauru-turbiinid.



Joon. 204. Stalini-nimelise Leningradi Metallitehase vaheltauru-turbiin reguleeritava vaheltauruga; võimsus 25 000 kW.



Joon. 203. Vaheltauru-turbiini skeem reguleeritava vaheltauruga.

Vaheltauru-turbiini konstruktsiooni näiteks võib olla Stalini-nimelise Leningradi Metallitehase turbiin (joon. 204). See turbiin, mille võimsus on 25 000 kW, on arvestatud aururõhule 29 ata ja temperatuurile 400° C. Turbiin võimaldab vaheltauru väljavõtmist 7 ata juures tööstuslikuks otstarveteks. Ta koosneb kahest — kõrgrõhu- ja madalrõhusilindrist.

Kõrgrõhu osa koosneb esimesest reguleerivast kiirusastmega kettast ja sellele järgnevast seitsmest aktiivkettast. Madalrõhu osa koosneb kahereal-isest kiirusastmega kettast ja kuuest aktiivastmest. Auru väljavõtt toimub pärast kõrgrõhusilindri viimast ketast.

XXIV peatükk.

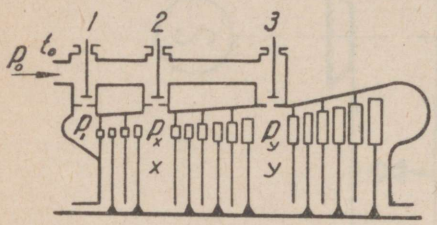
Turbiinide reguleerimine.

109. Reguleerimise viise.

Auruturbiinides kasutatakse järgmisi reguleerimisviise: reguleerimine auru muljumisega, düüsidega reguleerimine ja baipass-reguleerimine.

Auruturbiini reguleerimisel auru muljumisega kogu turbiini juhitav aur läbib ühe üldise muljumisventiili ja suundub siis esimese

astme düüsidesse. Muljumisreguleerimine pole kasulik masina ökonoomsuse seisukohalt ja seepärast seda kasutatakse ainult puht-reaktiivturbiinides, kus auru juurdetoomine peab toimuma juht- ja töölabade kogu piirdel.



Joon. 205. Baipass-reguleerimisega turbiini skeem.

Düüsidega reguleerimisel auru sisselaskmine turbiini on juhitav mitme reguleeriva klapiga, kusjuures iga klapp juhib auru iseseisva düüside rühma juurde. Düüsidega reguleerimist kasutatakse aktiivturbiinides, kus auru juurdetoomine on partsiaalne. Düüsidega reguleerimist on võimalik kasutada ka reaktiivturbiinis, ainult sel puhul turbiin peab omama esimest reguleerivat aktiivketast.

Viimasel ajal leiab auruturbiinides laialdast kasutamist baipass-reguleerimine, mille skeem on toodud joonisel 205. Baipass-reguleerimise olemus seisab järgmises. Kõikide turbiinide astmete, seehulgas ka esimese astme juurde, tuuakse aur kogu piirdel. Aur, mis läbib klapi *1*, suundub esimesse astmesse; seejuures niikaua, kui rõhk esimese astme düüside ees ei tõuse värske auru rõhuni, see klapp töötab muljumisklapina. Kui aga klapp *1* on avatud täiel määral, hakkab avanema klapp *2* ja aur hakkab liikuma düüside teise rühma juurde, möödudes astmete esimesest rühmast.

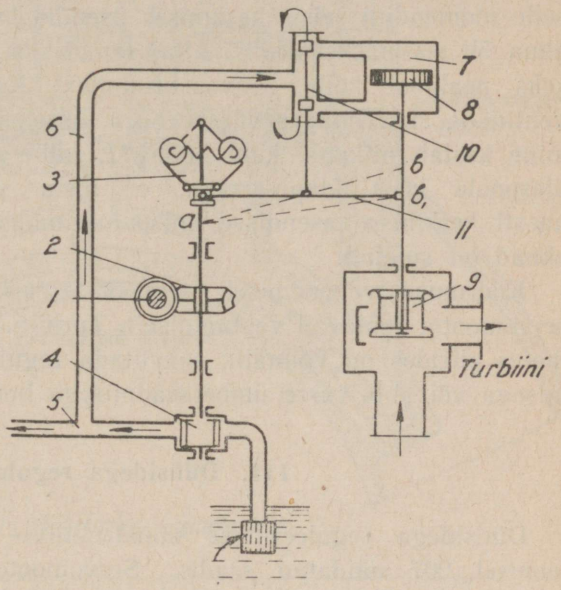
Ventiili *2* avamine võimaldab suurendada turbiinist läbilastava auru hulka ja järelikult suurendada ta võimsust. Kui klapp *2* on avatud täiel määral, hakkab avanema klapp *3* ja värske aur, möödudes turbiini astmete kahest esimesest rühmast, suundub kolmandasse rühma. Baipass-reguleerimine on levinud puht-reaktiivturbiinides, kus düüsidega reguleerimine pole vastuvõetav.

Kuid ka aktiivturbiinides kasutatakse auru astmetest mööda juhtimist selleks, et vajaduse korral turbiini üle koormata. Seega kohtame nüüdisaegsetes turbiinides kõige sagedamini kombineeritud reguleerimist — düüsidega reguleerimist tühikäigult kuni normaalkoormuseni ja värske auru juhtimist ühte vahepealsetest astmetest, kui on tarvis turbiini üle koormata.

110. Reguleerimisorganite ehitus.

Auruturbiini reguleerimisorganitele esitatakse järgmised nõuded: sujuv töötamine, väike ebaühtluse määr, tundlikkus (väike pöörete arvu muutu-

mine peab põhjustama reguleerimisorganite ümberpaigutumist) ja võimalus muuta töötamise ajal pöörete arvu teatavates piirides (normaalselt ± 5%). Igale koormusele vastab veidi teistsugune pöörete arv, kuid selline muutumine ei tohi olla märgatav: koormuse järsul suurenemisel või vähenemisel 25% võrra ei tohi pöörete arvu muutumine ületada ± 1,5% ja turbiini stabiliseerunud seisukorra puhul mitte üle 0,5%. Turbiini koormuse järsul muutumisel normaalkoormuselt tühijooksuni ei tohi pöörete arvu muutumine ületada 5%.



Joon. 206. Servomootori skeem.

Reguleerimist teostab auruturbiinides regulaator, kusjuures regulaator võib mõjutada reguleerivaid klappe kas vahetult või servomootoriga. Klappide vahetut mõjutamist regulaatori poolt kasutatakse ainult väikese võimsusega turbiinides, kus regulaatori enda poolt arendatav ümberpaigutusjõud on küllaldane reguleerivate organite (klappide ja hoobade) takistuse ületamiseks. Suure võimsusega turbiinides regulaator mõjutab klappe servomootori kaudu.

Servomootori töötamise põhimõte seisab järgmises (joon. 206). Regulaator seab ümber ainult jaotussiibri *10*, mis suunab vastava pumba poolt antavat õli surve all ühele või teisele poole kolbi *8* silindris *7*. Servomootori kolb juhib klappi *9*, mis laseb auru turbiinisse. Õli antakse siibrikarpi mööda torustikku *6* hammasrataspumba poolt *4* (sama pump mööda toru *5* annab õli laagrite määrimiseks). Siibri ümberpaigutamine toimub hoova *11* abil, mis ühe otsaga on kinnitatud klapivarre külge, teise otsaga aga on ühenduses regulaatori muhviga; regulaatori vertikaalne võll *3* on tigu-ülekande *2* abil seotud turbiini võlliga *1*.

Klapivarre ümberpaigutamine ja järelikult ka reguleerimine (antud juhul muljumisreguleerimine) toimub järgmisel viisil. Olgu hoob *11* nii, nagu joonisel on näidatud täisjoonega; hoova sellele asendile vastab

regulaatori muhvi asend kindla pöörete arvu korral, sõltuvalt turbiini koormusest.

Turbiini koormuse suurenemisel turbiini ja regulaatori pöörete arv väheneb, regulaatori muhv liigub allapoole ja tõmbab endaga kaasa hoova *11* vasakpoolse otsa. Hoob võtab asendi ab_1, kusjuures siiber, mis selle momendini seisis keskmises asendis, nihkub allapoole, avab alumise akna õli sisselaskeks kolvi alla, samuti ka ülemise akna — õli väljalaskeks pealpool kolbi asuvast ruumist. Kolb hakkab tõusma ja tõstma ventiili *9*, suurendades värske auru sisselaskmist. Kolvi ülespoole liikumine kestab niikaua, kuni hoob *11*, mille ots *b* antud momendil tõuseb ülespoole koos klapivarrega, ei tõsta siibrit tagasi ega sea teda uuesti keskmisse asendisse, mispuhul mõlemad silindrisse suubuvad õliaknad on suletud.

Koormuse vähenemisel ja pöörete arvu suurenemisel regulaator ja servomootor töötavad vastupidiselt. Turbiini pöörete arvu muutmist suuremates piirides on võimalik saavutada regulaatori vedru pingutuse muutmisega või siibrivarre ümberseadmisega hoova *ab* suhtes.

111. Düüsidega reguleerimine.

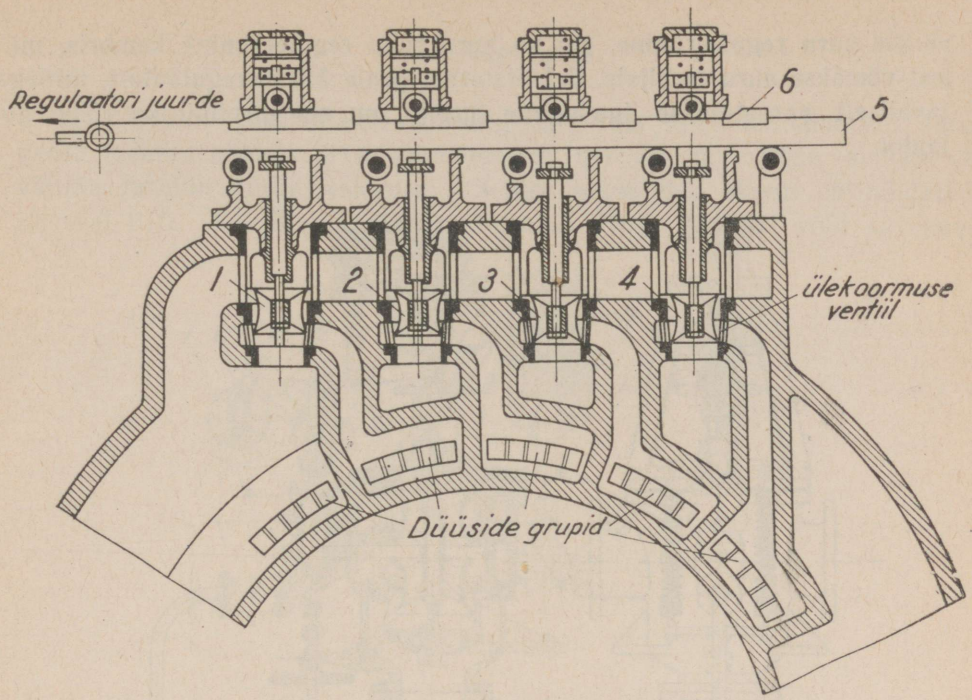
Düüsidega reguleerimise konstruktiivse teostamise näiteks võib olla joonisel 207 näidatud seadis. Servomootori abil regulaator nihutab hooba *5*, millel on neli nukki *6*; viimased asetsevad selliselt, et vasakule liikumisel nad avavad üksteise järel ventiilid *1*, *2*, *3*, *4*. Joonisel 207 näidatud asendis esimene klapp on avatud täiel määral, teine osaliselt, kolmas ja neljas klapp aga on suletud. Jooniselt nähtub, et iga klapp juhib auru andmist oma düüside rühmale.

Joonisel 201 on näidatud ehituselt veidi teistsugune düüsidega reguleerimine. Turbiini ventiilid *3*, *4*, *5* ja *6* avanevad regulaatori võllile kinnitatud nukkide abil.

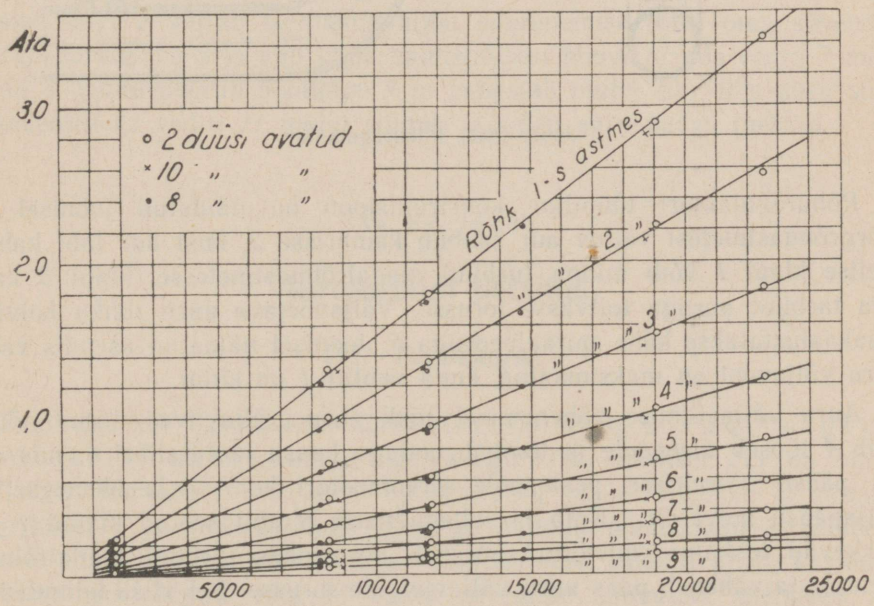
112. Vaheltauru-turbiini reguleerimine.

Vaheltauru-turbiinis, kus rõhk igas astmes muutub võrdeliselt auru kulule ja järelikult turbiini koormusele, reguleeritakse ainult värske auru sisselaskmist. Diagrammil (joon. 208) on toodud kõverad katsete tulemustest 3000 kW-lise turbiiniga, mida teostati selleks, et määrata igas astmes rõhu sõltuvust koormuse suurusest.

Vaheltauru-turbiinis aga, kus võib kõikuda nii turbiini koormus kui ka väljavõetava vaheltauru hulk, toimub nii esimesse astmesse juhitava

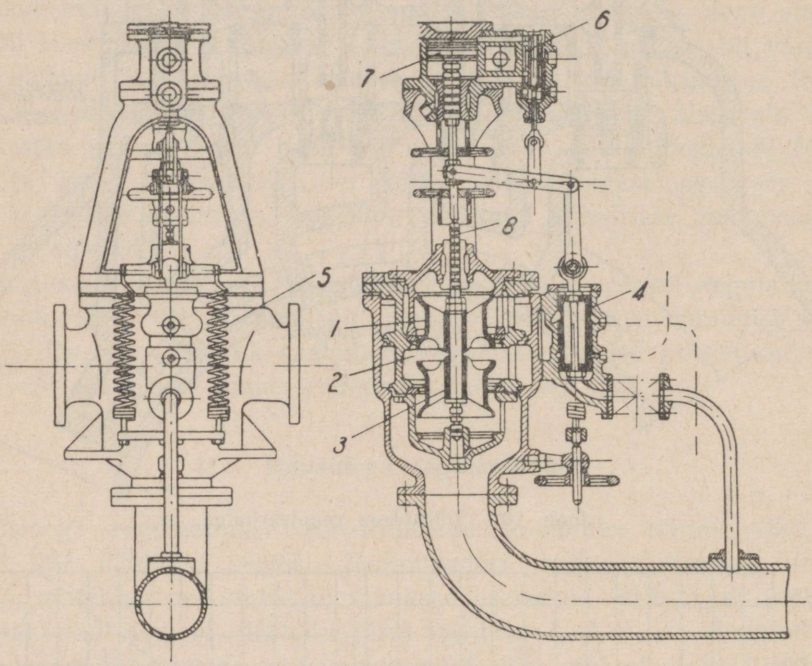


Joon. 207. Düüsidega reguleerimine.



Joon. 208. Auru rõhu kõverad eri astmetes, sõltuvalt koormusest. (Horisontaalteljele on märgitud auru kulu kg/h).

värske **auru reguleerimine**, kui ka auru rõhu reguleerimine kambris, millest võetakse **auru tarbijale**. Sel otstarbel peale kiiruseregulaatori, millega tavaliselt **varustatakse igasugune** turbiin, on sel turbiinil ka rõhuregulaator.



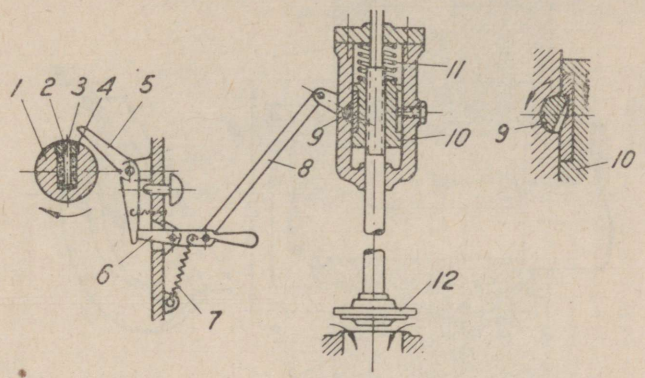
Joon. 209. Rõhuregulaator.

Rõhuregulaatori tüüpiline konstruktsioon on näidatud joonisel 209. Kõrgrõhuastmetest väljuv aur saabub kambrisse *2*, kust aur läbi kaheistmelise klapi *1* võib minna turbiini madalrõhuastmetesse, klapi *3* kaudu aga tarbijat auruga toitvasse torusse. Väljavõetava auru rõhku kolvile *4* tasakaalustatakse kahe spiraalvedruga *5*. Joonisel näidatud asendis vaheitauru väljavool on maksimaalne, kuna ventiil *1* on kinni.

Auru väljavõtmise vähenemisel rõhk auru väljaviivas torus tõuseb, kolb *4* tõuseb ülespoole ja tõmbab endaga kaasa jaotussiibri *6*, mis avab õli pääsu silindrisse pealepoole servomootori kolbi *7* ja üheaegselt õli väljapääsu kolvi alt. Kolb ja sellega varre *8* abil seotud klapid *1* ja *3* hakkavad laskuma, mistõttu suureneb auru pääs turbiini madalrõhuastmetesse ja väheneb pääs auru väljaviivasse torusse. Sel viisil toimubki turbiini reguleerimine.

113. Kiirsulgeja.

Iga turbiin varustatakse kiirsulgejaga, mis suleb automaatselt auru pääsu turbiini pöörete arvu suurenemisel 10% üle normaalse, selleks et vältida turbiini puruksjooksmist. Sellise kiirsulgeja skeem on näidatud joonisel 210. Kiirsulgeja töötab järgmisel viisil. Turbiini võlli süvendis



Joon. 210. Kiirsulgeja.

istuva tihvti *2* tsentrifugaaljõud on tasakaalustatud vedru *3* pingutusega (vedru hoitakse süvendis mutriga *4*). Pöörete arvu suurenemisel üle normaalse tihvt *2* väljub tsentrifugaaljõu suurenemise tõttu oma süvendist, pöörab nurkhooba *5* ja viib välja hambumisest hoova *6*, mis vedru *7* mõjul varda *8* kaudu pöörab pooltelge *9* ja vabastab mutri *10*. Siis auru sisselaskeventiil *12* vedru *11* mõjul sulgub ja suleb auru pääsu turbiini.

XXV peatükk.

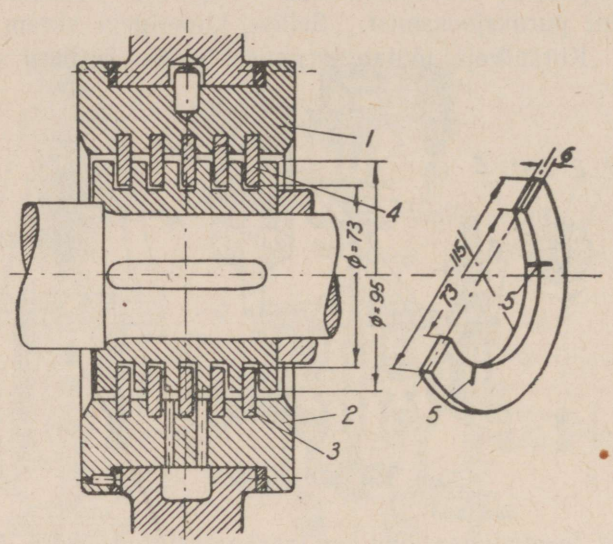
Auruturbiini detailid.

114. Tugilaagrid.

Tugilaagritest kasutatakse auruturbiinides kamm-tugilaagreid ja Mitšelli süsteemi tugilaagreid. Joonisel 211 on näidatud kamm-tugilaager väheldase aktiivturbiini jaoks. Ülemise ja alumise laagrikausi *1* ja *2* sisepindade sisse on pandud poolrõngad *3*, milledele antakse edasi telgjõud võllil istuva kammikujulise puksi *4* poolt, kusjuures alumised poolrõngad võtavad vastu paremale suunatud, ülemised aga vasakule suunatud telgjõud. Selline konstruktsioon hoiab ära võlli telg-

suunalised nihkumised, kui kammide vahel on vajalikud pilud. Paremaks määrimiseks on poolrõngastes sisselõiked *5*.

Võimsates turbiinides kasutatakse Mitšelli süsteemi tugilaagreid (joon. 212). Paremale suunatud telgjõude võtavad vastu klotsid *1*, vasa-



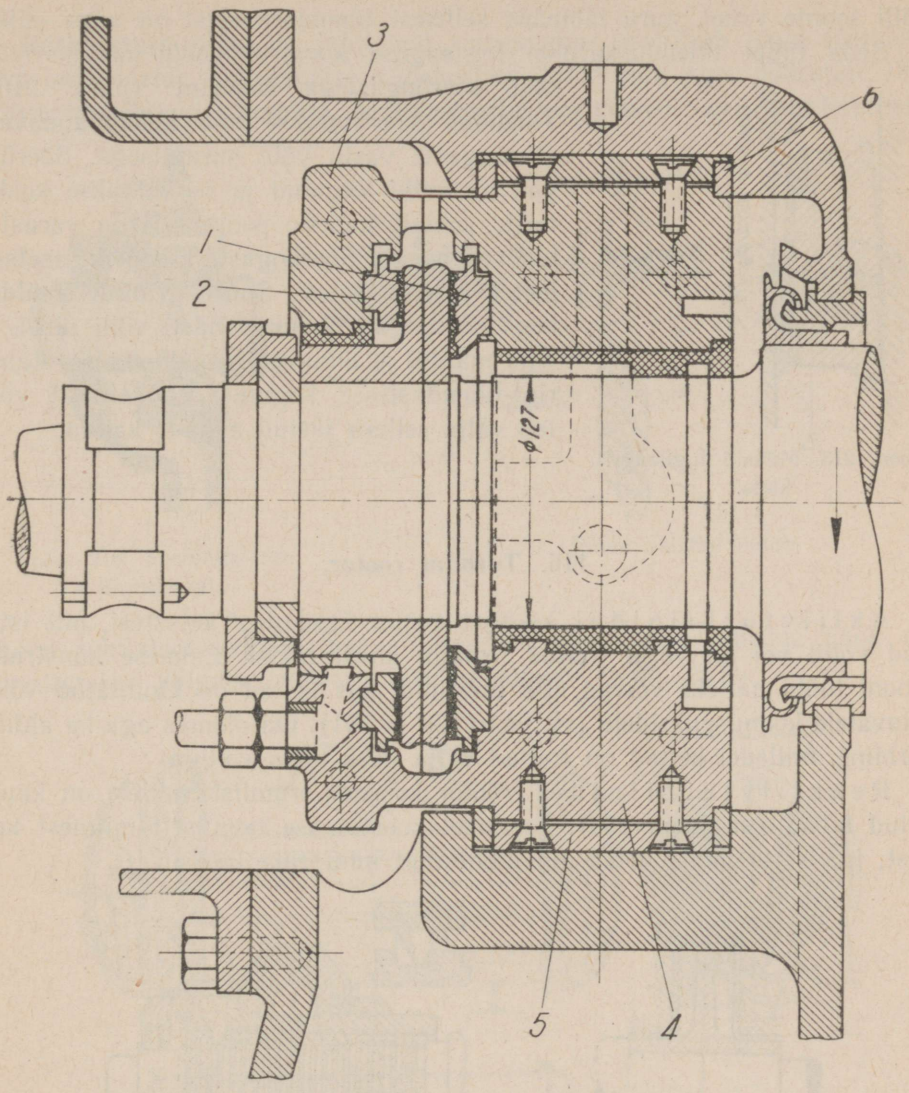
Joon. 211. Kamm-tugilaager.

kule suunatuid — klotsid *2*. Nende tugiklotside hõõrdepinnad on täis valatud pabiidiga. Samuti on pabiidiga täis valatud laagrikausid *3* ja *4*, millede asendi määravad rõngas *5* ja seib *6*.

Tugiklotsid on konstrueeritud hüdrodünaamilise määrimise teooria alusel. Kammi pöörlemise ajal tugiklotsid võtavad liikuva pinna suhtes kaldse asendi (joon. 213), õli veetakse kaasa kiilutaolisesse pilusse ja ta takistab harja ja tugiklotside metallpindade kokkupuutumist.

115. Tihenduskarbid.

Tihenduskarpe kasutatakse selleks, et vähendada auru läbijooksu piludest pöörleva võlli ja väliskesta või diafragmade vahel. Tihenduskarpe on hüdraulilisi ja labürindiga. Hüdrauliline tihendus saavutatakse auru läbipääsu hüdraulilisel sulgemisel vedeliku kihi tsentrifugaaljõu toimel (joon. 214), kusjuures vedelik pöörleb koos võlliga. Selle süsteemi paremuseks on auru läbipääsu täielik puudumine. Puuduseks aga on võrdlemisi suur energia kulu vedeliku hõõrdumisele vastu paigalseisvat seina.

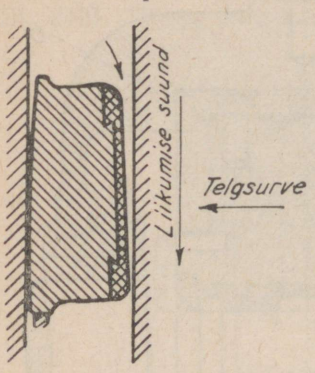


Joon. 212. Mitšelli süsteemi tugilaager.

L a b ü r i n t -tihenduskarp töötab auru mitmekordse muljumise põhimõttel. Labürint-tihenduskarpide konstruktsioonid on väga mitmesugused. Joonisel 215 on näidatud metall-tihenduskarp. Võlli sisse on treitud sooned *1*, millede sisse käivad tihenduskarbi puksi sisse kinnitatud paigalseisvad kammid *2*, mis asetsevad kaldselt auru liikumisele vastu. Auru

korduva pidurdamise tõttu läbivoolamisel kitsastest piludest kammide ja võlli soonte vahel, auru läbipääs sellisest tihenduskarbist on väga väike.

Seda tüüpi tihenduskarpide teistsuguse konstruktsiooni näiteks võib olla söerõngastega labürint (joon. 216). Tihendus saavutatakse siin kokkupandavate söerõngaste vastu võlli surumisega. Söerõngad on katki lõigatud ja tõmmatakse kokku teiste, metallrõngaste poolt, mis on varustatud vedrudega. Söerõngaste komplekt asetseb metall-juhtrõngastes. Suure grafiidi sisaldusega söerõngad lihvuvad hästi võlli järgi, ei vaja määret ja annavad hea tihenduse. Labürint-tihendustesse kogunev kondensaat voolab välja selleks jäetud aukude kaudu.

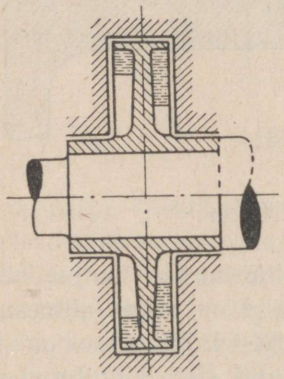


Joon. 213. Mitšelli tugilaagri klots.

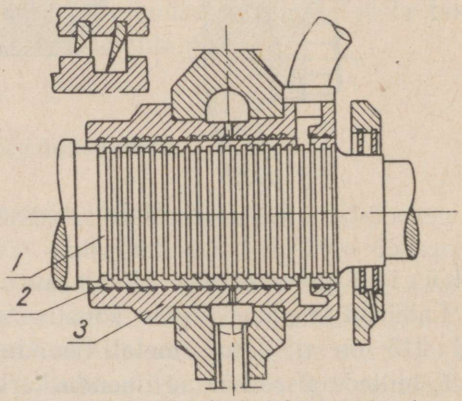
116. Turbiini rootor.

Aktiivturbiinidel koosneb rootor üksikutest ketastest, mis istuvad võllil või on välja treitud temaga ühest tükist. Esimese konstruktsiooni tüübi näiteks võivad olla turbiinid, kus kettad on kinnitatud võllil istuvatele koonuspuksidele (vt. joon. 190 ja 191). On olemas aga ka aktiivturbiine, milledel kettad on treitud välja ühes tükis võlliga.

Reaktiivturbiinidel rootor koosneb trumlist, millele on kinnitatud labad (vt. joon. 193). Trummel koostatakse tavaliselt mitmest kettast; iga ketta laiale pöiale on kinnitatud mitu rida labasid.



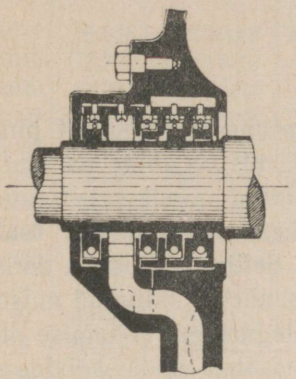
Joon. 214. Hüdrauliline tihenduskarp.



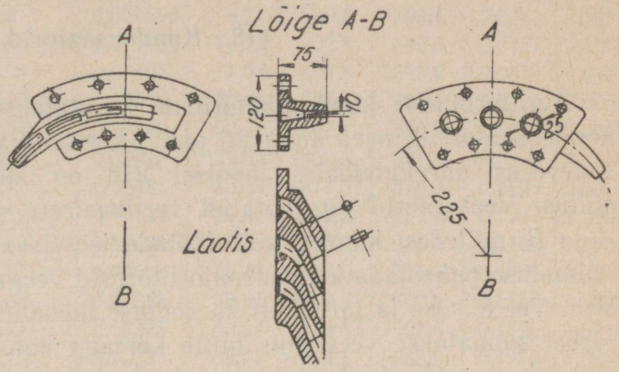
Joon. 215. Metallist labürint-tihenduskarp.

117. Juhtlabad ja töölabad.

Reaktiivturbiinidel on juhtlabad samasuguse profiiliga nagu töölabad. Üks labade rida kinnitatakse väliskestale, teine rida aga, pööratult 180° võrra, kinnitatakse trumlile. Aktiivastmetel partsiaalse auru juurdetoomise

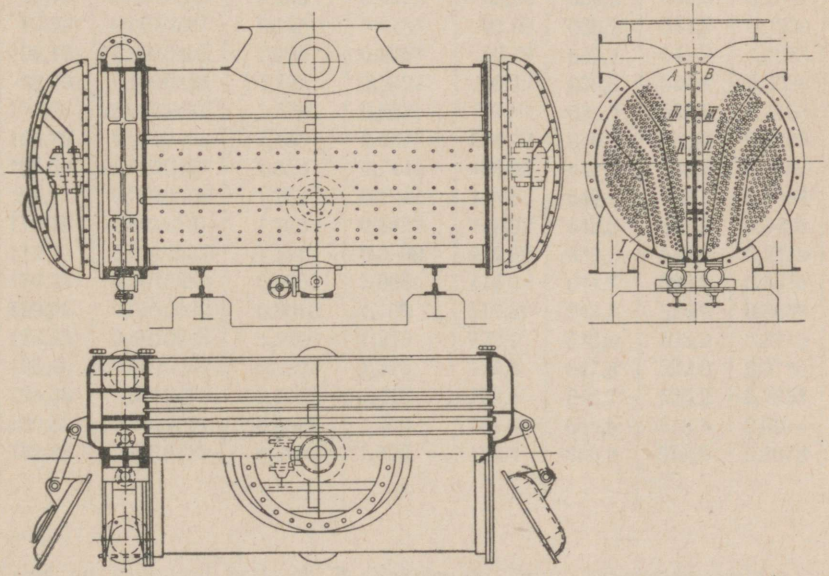


Joon. 216. Söerõngastega tihenduskarp.



Joon. 217. Rühm valatud düüse.

puhul juhtlabad valmistatakse rühmadesse koondatud düüside näol, mis kinnitatakse paigalseisvatesse diafragmadesse (joon. 217).



Joon. 218. Pindkondensaator.

Auru täieliku juurdetoomise puhul kogu labade reale juhtlabad freesitakse välja diafragmades. Aktiiv- ja reaktiivturbiinide töölabad kinnitatakse kohale oma otstega, mis omavad tavaliselt kalasaba kuju. Labade ülemine ots lõpeb väljaulatisega, mille peale käib labasid kokku siduv bandaaž.

118. Kondensaatorid.

Auruturbiinide kondensaatoritena kasutatakse peaaegu eranditult pindkondensaatoreid; need annavad puhta kondensaadi, mis on kõige paremaks toiteveeks aurukateldele. Joonisel 218 on kujutatud pindkondensaatori ehitus. Veekambrid on jaotatud vertikaalsete vaheseintega kaheks osaks *A* ja *B*, milledest kumbki võib töötada iseseisvalt. Selline ehitusviis annab võimaluse puhastada kondensaatori torusid veega nendesse sattunud mustusest. Vee kiiruse ja järelikult ka soojuse ülekande teguri suurendamise otstarbel suunatakse veevoolus mitte korraga kondensaatori poole kõikidesse torudesse, vaid algul ainult esimesse kolmandikku, siis teise ja lõpuks kolmandasse.

Tabel I.

Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt rõhust).

p	t	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
0,010	6,698	0,0010001	131,7	0,007595	6,73	600,1	593,4	0,0243	2,1447
0,015	12,737	0,0010007	89,64	0,01116	12,78	602,8	590,0	0,0457	2,1096
0,020	17,204	0,0010013	68,27	0,01465	17,24	604,8	587,6	0,0612	2,0847
0,025	20,776	0,0010020	55,28	0,01809	20,80	606,4	585,6	0,0735	2,0655
0,030	23,772	0,0010027	46,53	0,02149	23,79	607,7	583,9	0,0836	2,0499
0 040	28,641	0,0010041	35,46	0,02820	28,65	609,8	581,1	0,0998	2,0253
0,050	32,55	0,0010053	28,73	0,03481	32,55	611,5	578,9	0,1126	2,0064
0,060	35,82	0,0010064	24,19	0,04134	35,81	612,9	577,1	0,1232	1,9908
0,080	41,16	0,0010084	18,45	0,05421	41,14	615,2	574,1	0,1402	1,9664
0,10	45,45	0,0010101	14,95	0,06688	45,41	617,0	571,6	0,1538	1,9478
0,12	49,06	0,0010116	12,60	0,07938	49,01	618,5	569,5	0,1650	1,9326
0,15	53,60	0,0010137	10,21	0,09791	53,54	620,5	567,0	0,1790	1,9140
0,20	59,67	0,0010170	7,795	0,1283	59,61	623,1	563,5	0,1974	1,8903
0,25	64,56	0,0010196	6,322	0,1582	64,49	625,1	560,6	0,2120	1,8718
0,30	68,68	0,0010221	5,328	0,1877	68,61	626,8	558,2	0,2241	1,8567
0,36	72,91	0,0010246	4,491	0,2227	72,85	628,5	555,6	0,2365	1,8420
0,40	75,42	0,0010261	4,069	0,2458	75,36	629,5	554,1	0,2437	1,8334
0,50	80,86	0,0010296	3,301	0,3029	80,81	631,6	550,8	0,2592	1,8150
0,60	85,45	0,0010326	2,783	0,3594	85,41	633,4	548,0	0,2721	1,8001
0,70	89,45	0,0010355	2,409	0,4152	89,43	634,9	545,5	0,2832	1,7874
0,80	92,99	0,0010381	2,125	0,4705	92,99	636,2	543,2	0,2930	1,7767
0,90	96,18	0,0010405	1,904	0,5253	96,19	637,4	541,2	0,3018	1,7673
1,0	99,09	0,0010428	1,725	0,5797	99,12	638,5	539,4	0,3096	1,7587
1,1	101,76	0,0010449	1,578	0,6337	101,81	639,4	537,6	0,3168	1,7510
1,2	104,25	0,0010468	1,455	0,6875	104,32	640,3	536,0	0,3235	1,7440
1,3	106,56	0,0010487	1,350	0,7410	106,66	641,2	534,5	0,3297	1,7375
1,4	108,74	0,0010504	1,259	0,7942	108,85	642,0	533,1	0,3354	1,7315
1,5	110,79	0,0010521	1,180	0,8472	110,92	642,8	531,9	0,3408	1,7260
1,6	112,73	0,0010537	1,111	0,8999	112,89	643,5	530,6	0,3459	1,7209
1,8	116,33	0,0010569	0,9952	1,005	116,54	644,7	528,2	0,3554	1,7115
2,0	119,62	0,0010599	0,9016	1,109	119,87	645,8	525,9	0,3638	1,7029
2,2	122,65	0,0010628	0,8246	1,213	122,9	646,8	523,9	0,3715	1,6952
2,4	125,46	0,0010654	0,7601	1,316	125,8	647,8	522,0	0,3786	1,6884
2,6	128,08	0,0010678	0,7052	1,418	128,5	648,7	520,2	0,3853	1,6819
2,8	130,55	0,0010701	0,6578	1,520	131,0	649,5	518,5	0,3914	1,6759
3,0	132,88	0,0010725	0,6166	1,622	133,4	650,3	516,9	0,3973	1,6703

Tabel on koostatud prof. M. P. Vukalovitš'i järgi „Термодинамические свойства водяного пара“ Госэнергоиздат, 1946.

p	t	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
3,2	135.08	0,0010747	0,5804	1,723	135,6	650 9	515,3	0,4028	1,6650
3,4	137,18	0,0010769	0,5483	1,824	137,8	651 6	513,8	0,4081	1,6601
3,6	139,18	0.0010790	0,5196	1.925	139,8	652,2	512,4	0,4130	1,6557
3,8	141,09	0,0010809	0,4939	2.025	141.8	652,8	511,0	0,4176	1,6514
4,0	142,92	0,0010828	0,4706	2,125	143.6	653,4	509,8	0,4221	1,6474
4.5	147.20	0,0010875	0,4213	2,374	148,0	654.7	506,7	0,4326	1,6380
5,0	151,11	0,0010918	0,3816	2,621	152,1	655,8	503,7	0,4422	1,6297
5,6	155,41	0.0010968	0,3429	2,916	156,5	657,1	500,6	0.4527	1,6205
6,0	158,08	0,0010999	0,3213	3,112	159,3	657,8	498,5	0,4591	1,6151
6,6	161,82	0,0011043	0,2937	3,405	163 2	658,8	495,6	0,4681	1,6076
7,0	164,17	0,0011072	0,2778	3,600	165,6	659,4	493,8	0,4737	1,6029
7,6	167,51	0,0011114	0,2570	3,891	169,1	660,3	491,2	0,4815	1,5963
8,0	169,61	0,0011140	0,2448	4,085	171,3	660,8	489,5	0.4865	1,5922
8,6	172,61	0,0011178	0,2286	4,375	174,4	661,5	487,1	0,4935	1,5865
9,0	174,53	0,0011203	0,2189	4,568	176,4	662,0	485,6	0,4980	1,5827
9,6	177,28	0,0011240	0,2059	4,857	179,3	662,6	483,3	0,5044	1,5774
10,0	179,04	0,0011262	0,1981	5,049	181,2	663,0	481,8	0,5085	1,5740
11,0	183,20	0,0011318	0,1808	5.530	185,6	663,9	478,3	0,5180	1,5661
12,0	187,08	0,0011373	0,1664	6,010	189,7	664.7	475,0	0,5269	1,5592
13,0	190,71	0,0011425	0,1541	6,488	193.5	665.4	471,9	0,5352	1,5526
14,0	194,13	0,0011476	0,1435	6,967	197,1	666,0	468,9	0,5430	1,5464
15,0	197,36	0,0011524	0,1343	7,446	200.6	666,6	466,0	0,5503	1,5406
16,0	200,43	0,0011571	0.1262	7,925	203,9	667,1	463,2	0,5572	1,5351
17,0	203,35	0,0011619	0.1190	8,405	207,1	667,5	460,4	0,5638	1,5300
18,0	206.14	0,0011663	0,1126	8,886	210,1	667.9	457,8	0,5701	1,5251
19,0	208,81	0,0011707	0,1068	9.366	213,0	668,2	455,2	0,5761	1,5205
20,0	211,38	0,0011751	0,1016	9,846	215,8	668,5	452,7	0,5820	1,5160
22,0	216.23	0,0011834	0,09251	10,81	221,2	668,9	447,7	0,5928	1,5078
24,0	220,75	0,0011914	0,08492	11,78	226,1	669,3	443,2	0,6026	1,5000
26,0	224,99	0,0011991	0,07846	12,75	230,8	669,5	438,7	0,6120	1,4926
28,0	228,98	0,0012068	0,07288	13,72	235,2	669,6	434,4	0,6206	1,4857
30,0	232,76	0,0012142	0,06802	14,70	239,5	669,7	430,2	0,6290	1,4793
32	236,35	0,0012214	0,06375	15,69	243,6	669,7	426,1	0,6368	1,4732
34	239,77	0,0012285	0,05995	16,68	247,5	669,6	422,1	0,6443	1,4673
36	243,04	0,0012355	0,05658	17,68	251,2	669,5	418,3	0,6515	1,4617
38	246,17	0,0012424	0,05353	18,68	254,8	669,3	414,5	0,6584	1,4564
40	249,18	0,0012493	0,05078	19,69	258,2	669,0	410,8	0,6649	1,4513
42	252,07	0,0012561	0.04828	20,71	261.6	668,8	407,2	0,6712	1,4463
44	254,87	0,0012627	0,04601	21,73	264,9	668,4	403,5	0,6773	1,4415
46	257,56	0,0012695	0,04393	22,76	268,0	668,0	400,0	0,6832	1,4369
48	260,17	0,0012762	0,04201	23,80	271,2	667,7	396,5	0,6889	1,4324
50	262,70	0,0012828	0,04024	24.85	274,2	667,3	393,1	0,6944	1,4280
55	268,69	0,0012989	0,03636	27,50	281,4	666,2	384,8	0,7075	1,4176

p	t	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
60	274,29	0,0013150	0,03310	30,21	288,4	665,0	376,6	0,7196	1,4078
65	279,54	0,0013307	0,03033	32,97	294,8	663,6	368,8	0,7311	1,3986
70	284.48	0,0013467	0,02795	35,78	300,9	662,1	361,2	0,7420	1,3897
75	289,17	0,0013625	0,02587	38,66	307,0	660.5	353,5	0,7524	1,3813
80	293,62	0,0013786	0,02404	41,60	312,6	658,9	346,3	0,7623	1,3731
85	297,86	0,0013951	0,02241	44,62	318,2	657,0	338,8	0,7718	1,3654
90	301,92	0,001412	0,02096	47,71	323,6	655,1	331,5	0,7810	1,3576
95	305,80	0,001428	0,01964	50,91	328,8	653,2	324,4	0,7898	1,3500
100	309.53	0,001445	0,01845	54,21	334,0	651,1	317,1	0,7983	1,3424
110	316,58	0,001480	0,01637	61,08	344,0	646,7	302,7	0,8147	1,3279
120	323,15	0,001518	0,01462	68,42	353,9	641,9	288,0	0,8306	1,3138
130	329.30	0,001558	0,01312	76,23	363.0	636,6	273,6	0,8458	1.2998
140	335,09	0,001599	0,01181	84,68	372,4	631,0	258,6	0,8606	1,2858
150	340,56	0,001646	0,01065	93,90	381,7	624,9	243,2	0,8749	1,2713
160	345,74	0,001699	0,009616	104,0	390,8	618,3	227,5	0,8892	1.2564
180	355,35	0,001821	0,007809	128,0	410,2	602,5	192,3	0,9186	1,2251
200	364,08	0,00201	0,00620	161,2	431,5	582,3	150,8	0,9514	1,1883
224	373,6	0,00261	0,00394	254	478	532	54	1,022	1,10

Tabel II.

Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt temperatuurist).

t	T	p'	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
0	273,16	0,006228	0,0010002	206,3	0,004846	0	597,2	597,2	0	2,1863
5	278,16	0,008890	0,0010000	147,2	0,006795	5,03	599,4	594,4	0,0182	2,1551
10	283,16	0,012513	0,0010004	106,4	0,009396	10,04	601,6	591,6	0,0361	2,1253
15	288,16	0,017376	0,0010010	77,99	0,01282	15,04	603,8	588,8	0,0536	2,0970
20	293,16	0,02383	0,0010018	57,84	0,01729	20,03	606,0	586,0	0,0708	2,0697
25	298,16	0,03229	0,0010030	43,41	0,02304	25,02	608,2	583,2	0,0876	2,0436
30	303,16	0,04325	0,0010044	32,93	0,03036	30,00	610,4	580,4	0,1042	2,0187
35	308,16	0,05733	0,0010061	25,25	0,03960	34,99	612,5	577,5	0,1205	1,9947
40	313,16	0,07520	0,0010079	19,55	0,05114	39,98	614,7	574,7	0,1366	1,9718
45	318,16	0,09771	0,0010099	15,28	0,06544	44,96	616,8	571,8	0,1524	1,9498
50	323,16	0,12578	0,0010121	12,05	0,08298	49,95	619,0	569,0	0,1679	1,9287
55	328,16	0,16051	0,0010145	9,584	0,1043	54,94	621,0	566,1	0,1833	1,9085
60	333,16	0,2031	0,0010171	7,682	0,1302	59,94	623,2	563,3	0,1984	1,8891
65	338,16	0,2550	0,0010199	6,206	0,1611	64,93	625,2	560,3	0,2133	1,8702
70	343,16	0,3177	0,0010228	5,049	0,1981	69,93	627,3	557,4	0,2280	1,8522
75	348,16	0,3931	0,0010258	4,136	0,2418	74,94	629,3	554,4	0,2425	1,8349
80	353,16	0,4829	0,0010290	3,410	0,2933	79,95	631,3	551,3	0,2567	1,8178
85	358,16	0,5894	0,0010323	2,830	0,3534	84,96	633,2	548,2	0,2708	1,8015
90	363,16	0,7149	0,0010359	2,361	0,4235	89,98	635,1	545,1	0,2848	1,7858
95	368,16	0,8619	0,0010396	1,981	0,5045	95,01	637,0	542,0	0,2985	1,7708
100	373,16	1,0332	0,0010435	1,673	0,5977	100,04	638,9	538,9	0,3121	1,7561
105	378,16	1,2318	0,0010474	1,419	0,7045	105,08	640,7	535,6	0,3255	1,7419
110	383,16	1,4609	0,0010515	1,210	0,8265	110,12	642,5	532,4	0,3387	1,7282
115	388,16	1,7239	0,0010558	1,036	0,9650	115,18	644,3	529,1	0,3519	1,7150
120	393,16	2,0245	0,0010603	0,8914	1,122	120,3	646,0	525,7	0,3647	1,7018

Tabel on koostatud prof. M. P. Vukalovitši järgi „Термодинамические свойства водяного пара“ Госэнергоиздат, 1946.

t	T	p'	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
125	398,16	2,3666	0,0010650	0,7701	1,299	125,3	647,7	522,4	0,3775	1,6895
130	403,16	2,7544	0,0010697	0,6680	1,496	130,4	649,4	518,9	0,3901	1,6772
135	408,16	3,192	0,0010746	0,5817	1,719	135,5	650,8	515,3	0,4026	1,6652
140	413,16	3,685	0,0010798	0,5084	1,967	140,6	652,5	511,9	0,4150	1,6539
145	418,16	4,237	0,0010850	0,4459	2,243	145,8	654,0	508,2	0,4272	1,6428
150	423,16	4,854	0,0010906	0,3924	2,548	150,9	655,5	504,6	0,4395	1,6320
155	428,16	5,540	0,0010963	0,3464	2,887	156,1	656,9	500,8	0,4516	1,6214
160	433,16	6,302	0,0011021	0,3068	3,260	161,3	658,3	497,0	0,4637	1,6112
165	438,16	7,146	0,0011082	0,2724	3,671	166,5	659,6	493,1	0,4756	1,6012
170	443,16	8,076	0,0011144	0,2426	4,122	171,7	660,9	489,2	0,4874	1,5914
175	448,16	9,101	0,0011210	0,2166	4,617	176,9	662,1	485,2	0,4991	1,5818
180	453,16	10,225	0,0011275	0,1939	5,157	182,2	663,2	481,0	0,5107	1,5721
185	458,16	11,456	0,0011345	0,1739	5,749	187,5	664,3	476,8	0,5222	1,5629
190	463,16	12,800	0,0011415	0,1564	6,392	192,8	665,3	472,5	0,5336	1,5538
195	468,16	14,265	0,0011490	0,1410	7,094	198,1	666,2	468,1	0,5449	1,5448
200	473,16	15,857	0,0011565	0,1273	7,857	203,5	667,0	463,5	0,5562	1,5358
205	478,16	17,585	0,0011645	0,1151	8,687	208,9	667,7	458,8	0,5675	1,5270
210	483,16	19,456	0,0011726	0,1043	9,585	214,3	668,3	454,0	0,5788	1,5184
215	488,16	21,477	0,0011812	0,09472	10,56	219,8	668,8	449,0	0,5899	1,5099
220	493,16	23,659	0,0011900	0,08614	11,61	225,3	669,2	443,9	0,6010	1,5012
225	498,16	26,007	0,0011991	0,07845	12,75	230,8	669,5	438,7	0,6120	1,4926
230	503,16	28,531	0,0012088	0,07153	13,98	236,4	669,7	433,3	0,6229	1,4840
235	508,16	31,239	0,0012186	0,06530	15,31	242,1	669,7	427,6	0,6339	1,4755
240	513,16	34,140	0,0012291	0,05970	16,75	247,7	669,6	421,9	0,6448	1,4669
245	518,16	37,244	0,0012400	0,05465	18,30	253,5	669,4	415,9	0,6558	1,4584
250	523,16	40,56	0,0012512	0,05006	19,98	259,2	669,0	409,8	0,6667	1,4499
255	528,16	44,10	0,0012629	0,04591	21,78	265,0	668,4	403,4	0,6776	1,4413
260	533,16	47,87	0,0012755	0,04213	23,74	271,0	667,8	396,8	0,6886	1,4327
265	538,16	51,88	0,0012888	0,03870	25,84	277,0	666,9	389,9	0,6994	1,4240
270	543,16	56,14	0,0013023	0,03557	28,11	283,0	665,9	382,9	0,7103	1,4153

t	T	p'	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
275	548,16	60,66	0,0013169	0,03272	30,57	289,2	664,8	375,6	0,7212	1,4066
280	553,16	65,46	0,0013321	0,03010	33,22	295,3	663,5	368,2	0,7321	1,3978
285	558,16	70,54	0,0013484	0,02771	36,09	301,6	661,9	360,3	0,7431	1,3888
290	563,16	75,92	0,0013655	0,02552	39,18	308,0	660,2	352,2	0,7542	1,3797
295	568,16	81,60	0,0013837	0,02350	42,56	314,4	658,3	343,9	0,7653	1,3706
300	573,16	87,61	0,0014036	0,02163	46,24	321,0	656,1	335,1	0,7767	1,3613
305	578,16	93,95	0,001425	0,01991	50,22	327,7	653,6	325,9	0,7880	1,3516
310	583,16	100.64	0,001448	0,01830	54,64	334,6	650,8	316,2	0,7994	1,3415
315	588,16	107.69	0,001472	0,01682	59,46	341,7	647,8	306,1	0,8110	1,3312
320	593,16	115.13	0.001499	0,01544	64,79	349,0	644,2	295,2	0,8229	1,3206
325	598,16	122,95	0,001529	0,01415	70,68	356,5	640,4	283,9	0,8351	1,3097
330	603,16	131,18	0,001562	0,01295	77,20	364,2	636,0	271,8	0,8476	1,2982
335	608,16	139,85	0,001598	0,01183	84,55	372,3	631,1	258,8	0,8604	1,2860
340	613.16	148.96	0.001641	0,01076	92,90	380,7	625.6	244,9	0,8734	1,2728
345	618,16	158,54	0,001692	0,009759	102,4	389,6	619,3	229,7	0,8871	1,2586
350	623,16	168,63	0,001747	0,008803	113,6	398,9	611,9	213,0	0,9015	1,2433
355	628,16	179,24	0,001814	0,007875	127,0	409,5	603,2	193,7	0,9173	1,2263
360	633,16	190,42	0,001907	0,006963	143,6	420,9	592,8	171,9	0,9353	1,2072
365	638,16	202,21	0,00203	0,00606	165,0	434,2	579,6	145,4	0,9553	1,1833
370	643,16	214,68	0,00223	0,00500	200	452,3	559,3	107,0	0,9842	1,1506
371	644,16	217,3	0,00230	0,00476	210	457	554	97	0,992	1,142
372	645.16	219,9	0,00238	0.00450	222	463	547	84	1,002	1.132
373	646,16	222,5	0,00250	0,00418	239	471	539	68	1,011	1,116
374	647,16	225,2	0,00279	0,00365	274	488	523	35	1,04	1,09

Tabel II.

Ülekuumendatud veeauru tabel.

Parameetrite dimensioonid:

$v\ \frac{m^3}{kg}$, $i\ \frac{kcal}{kg}$ ja $s\ \frac{kcal}{kg\ °C}$.

p_{ata} / $t°$ C	0,05			0,06			0,08		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	29,42	615,4	2,0175	24,50	615,4	1,9972	0,0010079	40,0	0,1365
60	31,31	624,5	2,0453	26,08	624,4	2,0252	19,56	624,4	1,9932
80	33,19	633,5	2,0716	27,65	633,5	2,0514	20,74	633,5	2,0195
100	35,08	642,5	2,0964	29,23	642,5	2,0763	21,92	642,5	2,0444
120	36,96	651,5	2,1200	30,80	651,5	2,0999	23,10	651,4	2,0680
140	38,85	660,6	2,1425	32,37	660,6	2,1224	24,28	660,6	2,0906
160	40,73	669,8	2,1641	33,94	669,7	2,1439	25,46	669,7	2,1121
180	42,62	678,9	2,1847	35,51	678,9	2,1646	26,64	678,8	2,1327
200	44,50	688,1	2,2045	37,08	688,0	2,1844	27,82	688,0	2,1525
220	46,39	697,3	2,2236	38,65	697,3	2,2035	28.99	697,3	2,1717
240	48,27	706,5	2,2420	40,22	706,5	2,2219	30,17	706,5	2,1901
260	50,15	715,9	2,2599	41,79	715,9	2,2397	31,35	715,9	2,2079
280	52,04	725,3	2,2771	43,36	725,3	2,2570	32,52	725,2	2,2252
300	53,92	734,6	2,2939	44,93	734,6	2,2738	33,70	734,6	2,2420
320	55,80	744,1	2,3102	46,50	744,1	2,2901	34,88	744,0	2,2582
340	57,69	753,6	2,3260	48,07	753,6	2,3059	36,05	753,6	2,2741
360	59,57	763,3	2,3415	49,64	763,3	2,3214	37,23	763,2	2,2896
380	61,46	773,0	2,3566	51,20	773,0	2,3365	38,41	772,9	2,3046
400	63,33	782,7	2,3713	52,78	782,7	2,3512	39,59	782,7	2,3194
420	65,21	792,6	2,3858	54,35	792,6	2,3657	40,76	792,6	2,3338
440	67,09	802,6	2,4000	55,92	802,6	2,3799	41,94	802,5	2,3480
460	68,98	812,6	2,4139	57,48	812,6	2,3938	43,12	812,6	2,3619
480	70,86	822,7	2,4275	59,05	822,7	2,4074	44,30	822,7	2,3756
500	72,74	832,9	2,4409	60,62	832,9	2,4208	45,47	832,9	2,3890
520	74,62	843,2	2,4540	62,18	843,2	2,4339	46,65	843,2	2,4021
550	77,45	858,8	2,4734	64,54	858,8	2,4533	48,41	858,8	2,4215

Tabel on koostatud prof. M. P. Vukalovitš'i andmeil „Термодинамические свойства водяного пара" Госэнергоиздат. 1946.

p_{ata} / $t°$ C	0,10			0,12			0,16		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365
60	15,64	624,1	1,9685	13,02	624,1	1,9482	9,759	623,9	1,9160
80	16,58	633,3	1,9948	13,81	633,3	1,9746	10,36	633,2	1,9427
100	17,53	642,3	2,0198	14,60	642,3	1,9996	10,95	642,2	1,9678
120	18,47	651,3	2,0434	15,39	651,3	2,0232	11,54	651,2	1,9914
140	19,42	660,4	2,0659	16,18	660,4	2,0458	12,13	660,3	2,0139
160	20,36	669,5	2,0875	16,96	669,5	2,0673	12,72	669,5	2,0355
180	21,30	678,7	2,1081	17,75	678,7	2,0881	13,31	678,6	2,0562
200	22,24	687,9	2,1279	18,54	687,9	2,1079	13,90	687,8	2,0760
220	23,19	697,1	2,1470	19,32	697,1	2,1270	14,49	697,1	2,0952
240	24,13	706,4	2,1655	20,11	706,4	2,1455	15,07	706,3	2,1137
260	25,07	715,7	2,1833	20,89	715,7	2,1633	15,66	715,7	2,1314
280	26,02	725,1	2,2006	21,68	725,1	2,1806	16,25	725,0	2,1487
300	26,96	734,5	2,2174	22,46	734,5	2,1973	16,84	734,5	2,1655
320	27,90	743,9	2,2337	23,25	743,9	2,2136	17,43	743,9	2,1819
340	28,84	753,5	2,2496	24,03	753,5	2,2295	18,02	753,5	2,1977
360	29,78	763,1	2,2650	24,82	763,1	2,2449	18,61	763,1	2,2132
380	30,72	772,8	2,2801	25,60	772,8	2,2600	19,20	772,8	2,2283
400	31,67	782,6	2,2949	26,39	782,6	2,2748	19,79	782,6	2,2431
420	32,61	792,5	2,3093	27,17	792,5	2,2892	20,37	792,5	2,257
440	33,55	802,4	2,3235	27,95	802,4	2,3034	20,96	802,4	2,2716
460	34,49	812,4	2,3375	28,74	812,4	2,3174	21,54	812,4	2,2856
480	35,43	822,6	2,3511	29,52	822,6	2,3310	22,13	822,6	2,2993
500	36,38	832,8	2,3645	30,31	832,8	2,3444	22,72	832,7	2,3126
520	37,32	843,1	2,3776	31,10	843,1	2,3575	23,31	843,1	2,3258
550	38,73	858,7	2,3970	32,27	858,7	2,3769	24,20	858,7	2,3452

p_{ata} / $t°$ C	0,20			0,24			0,30		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365
60	7,797	623.7	1,8908	0,0010171	59,9	0,1984	0,0010171	59,9	0,1984
80	8,277	633,0	1,9178	6,893	632,8	1,8975	5,507	632,6	1,8722
100	8,752	642,1	1,9429	7,290	641,9	1,9227	5,826	641,8	1,8976
120	9,226	651,2	1,9667	7,685	651,0	1,9464	6,143	650,9	1,9214
140	9,699	660,3	1,9892	8,080	660,1	1,9691	6,459	660,0	1,9441
160	10,17	669,4	2,0108	8,474	669,3	1,9907	6,776	669,2	1,9657
180	10,64	678,6	2,0315	8,869	678,4	2,0113	7,092	678,4	1,9864
200	11,11	687,8	2,0513	9,262	687,6	2,0312	7,407	687,6	2,0064
220	11,58	697,0	2,0705	9,656	696,9	2,0504	7,722	696,8	2,0256
240	12,06	706,3	2,0890	10,05	706,2	2,0688	8,038	706,1	2,0441
260	12,53	715,7	2,1068	10,45	715,5	2,0867	8,352	715,5	2,0620
280	13,00	725,0	2,1241	10,84	724,9	2,1040	8,667	724,8	2,0793
300	13,47	734,5	2,1410	11,23	734,4	2,1208	8,981	734,3	2,0961
320	13,94	743,9	2,1573	11,62	743,9	2,1371	9,296	743,8	2,1124
340	14,40	753,5	2,1731	12,02	753,4	2,1530	9,610	753,4	2,1284
360	14,87	763,1	2,1886	12,41	763,1	2,1685	9,924	763,0	2,1439
380	15,34	772,8	2,2037	12,80	772,8	2,1836	10,24	772,8	2,1590
400	15,82	782.6	2,2185	13,20	782,6	2,1984	10,56	782,5	2,1737
420	16,29	792,4	2,2329	13,59	792,4	2,2128	10,87	792,4	2,1882
440	16,76	802,4	2,2470	13,98	802,4	2,2270	11,18	802,4	2,2025
460	17,23	812,4	2,2610	14,37	812,4	2,2409	11,50	812,4	2,2164
480	17,70	822.5	2,2747	14,77	822,5	2,2546	11,81	822,5	2,2300
500	18,17	832,7	2,2880	15,16	832,7	2,2679	12,13	832,7	2,2434
520	18,64	843,1	2,3012	15,55	843,0	2,2811	12,44	843,0	2,2566
550	19,34	858,7	2,3206	16,14	858,7	2,3005	12,91	858,7	2,2760

p_{ata} / t °C	0,40			0,50			0,65		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365
60	0,0010171	59,9	0,1984	0,0010171	59,9	0,1984	0,0010171	59,9	0,1984
80	4,123	632,0	1,8398	0,0010290	80,0	0,2567	0,0010290	80,0	0,2567
100	4,365	641,5	1,8658	3,487	641,2	1,8407	2,677	640,7	1,8105
120	4,604	650,6	1,8898	3,679	650,5	1,8648	2,826	650,2	1,8352
140	4,842	659,8	1,9125	3,870	659,6	1,8876	2,973	659,4	1,8581
160	5,079	669,0	1,9342	4,060	668,8	1,9094	3,120	668,6	1,8799
180	5,317	678,2	1,9550	4,250	678,0	1,9302	3,267	677,9	1,9008
200	5,553	687,4	1,9748	4,440	687,3	1,9501	3,414	687,1	1,9208
220	5,790	696,6	1,9940	4,629	696,5	1,9693	3,560	696,4	1,9400
240	6,026	705,9	2,0125	4,819	705,9	1,9878	3,706	705,8	1,9585
260	6,263	715,3	2,0304	5,008	715,2	2,0057	3,852	715,1	1,9765
280	6,500	724,7	2,0477	5,197	724,6	2,0230	3,998	724,5	1,9938
300	6,736	734,2	2,0645	5,387	734,1	2,0398	4,143	734,0	2,0107
320	6,971	743,8	2,0808	5,577	743,7	2,0561	4,288	743,6	2,0271
340	7,207	753,4	2,0967	5,767	753,3	2,0720	4,434	753,2	2,0430
360	7,443	763,0	2,1122	5,955	763,0	2,0875	4,579	762,9	2,0585
380	7,679	772,7	2,1273	6,144	772,7	2,1026	4,724	772,6	2,0736
400	7,916	782,5	2,1421	6,333	782,5	2,1173	4,870	782,4	2,0884
420	8,151	792,4	2,1565	6,521	792,3	2,1318	5,016	792,3	2,1028
440	8,387	802,3	2,1707	6,710	802,3	2,1460	5,161	802,3	2,1170
460	8,623	812,4	2,1847	6,898	812,3	2,1599	5,307	812,3	2,1310
480	8,858	822,5	2,1983	7,087	822,5	2,1736	5,452	822,4	2,1446
500	9,093	832,7	2,2117	7,275	832,7	2,1870	5,597	832,6	2,1580
520	9,329	843,0	2,2249	7,464	843,0	2,2001	5,742	842,9	2,1712
550	9,682	858,7	2,2442	7,746	858,7	2,2195	5,959	858,6	2,1906

p_{ata} / t °C	0,70			0,80			0,90		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010079	40.0	0,1365	0,0010079	40,0	0,1365
60	0,0010171	60,0	0,1984	0,0010171	60,0	0,1984	0,0010171	60,0	0,1984
80	0.0010290	80,0	0,2567	0,0010289	80,0	0.2567	0,0010289	80,0	0,2567
100	2,484	640,5	1,8020	2,169	640.1	1,7866	1,925	639,7	1,7727
120	2,623	650,1	1,8268	2,292	649,8	1,8118	2,035	649,5	1,7984
140	2,760	659,3	1,8498	2,413	659,1	1,8349	2,143	658,9	1,8216
160	2,896	668,6	1,8716	2,532	668,3	1,8568	2,249	668,2	1,8436
180	3,033	677,8	1,8925	2,652	677,6	1,8777	2,356	677,5	1,8645
200	3,169	687,1	1,9125	2,771	686,9	1,8977	2,462	686,8	1,8846
220	3,304	696,4	1,9317	2,890	696,3	1,9170	2,568	696.1	1,9039
240	3,440	705,7	1 9503	3,009	705,6	1,9356	2,672	705.5	1,9225
260	3.576	715,1	1,9682	3,127	715,0	1,9535	2,779	715,0	1,9403
280	3,711	724,5	1,9856	3,246	724,4	1,9709	2,884	724,4	1,9576
300	3,847	734,0	2,0025	3,364	733,9	1,9877	2,989	733,9	1,9746
320	3,982	743,6	2,0189	3,482	743,6	2.0040	3,095	743,4	1,9909
340	4,117	753,2	2,0348	3,601	753,2	2,0199	3,200	753,0	2,0068
360	4,252	762,9	2,0503	3,720	762,8	2,0354	3,305	762,7	2,0223
380	4,388	772,6	2,0654	3,838	772,5	2,0505	3,410	772,4	2,0374
400	4,522	782,4	2,0802	3,956	782,4	2.0653	3,515	782.3	2,0522
420	4,657	792,3	2.0946	4,074	792,2	2,0798	3.620	792,3	2,0667
440	4,792	802,2	2,1089	4,191	802,2	2,0940	3,725	802,2	2,0808
460	4,927	812,3	2,1228	4,309	812,2	2,1079	3,830	812,2	2,0947
480	5,061	822,4	2,1365	4,427	822,4	2,1216	3,936	822,3	2,1084
500	5,196	832,6	2,1498	4,545	832,6	2,1350	4,040	832,6	2,1218
520	5,331	842,9	2,1630	4,663	842,9	2,1482	4,145	842,9	2,1350
550	5,532	858,5	2,1825	4,840	858,5	2,1677	4,302	858,5	2,1545

p_{ata} / t °C	1,0			1,2			1,4		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010079	40,0	0,1365	0,0010078	40,0	0,1365	0,0010078	40,0	0,1365
60	0,0010170	60,0	0,1984	0,0010170	60,0	0,1984	0,0010170	60,0	0,1984
80	0,0010289	80,0	0,2567	0,0010289	80,0	0,2567	0,0010289	80,0	0,2567
100	1,730	639,1	1,7599	0,0010435	100,0	0,3121	0,0010435	100.0	0,3121
120	1,830	649,1	1,7861	1,521	648,6	1,7650	1,300	648.1	1,7467
140	1,926	658,6	1,8093	1,602	658,2	1,7885	1,371	657,8	1,7710
160	2,023	667,8	1,8312	1,683	667,5	1,8106	1,440	667,2	1,7933
180	2,119	677,1	1,8522	1,763	676,8	1,8318	1,509	676,6	1,8144
200	2,214	686,5	1,8724	1,843	686,1	1,8522	1,578	686,0	1,8346
220	2,310	695,9	1,8918	1,923	695,6	1,8716	1,647	695,4	1,8542
240	2,405	705,4	1,9106	2,002	705,2	1,8903	1,715	705,0	1,8730
260	2,500	714,9	1,9287	2,082	714,7	1,9084	1,783	714,6	1,8912
280	2,595	724,3	1,9464	2,161	724,3	1,9261	1,851	724,2	1,9089
300	2,690	733,8	1,9635	2,240	733,8	1,9432	1,919	733,8	1,9260
320	2,784	743,4	1,9800	2,320	743,4	1,9598	1,987	743,4	1,9426
340	2,880	753,0	1,9961	2,399	753,0	1,9759	2,056	753,0	1,9587
360	2,975	762,6	2,0116	2,478	762,6	1,9914	2,123	762,6	1,9742
380	3,068	772,4	2,0268	2,556	772,4	2,0066	2,190	772,4	1,9895
400	3,163	782,3	2,0417	2,635	782,3	2,0215	2,258	782,3	2,0044
420	3,257	792,2	2,0562	2,713	792,2	2,0360	2,325	792,2	2,0189
440	3,352	802,1	2,0703	2,792	802,1	2,0501	2,393	802,1	2,0331
460	3,446	812,2	2,0842	2,871	812,2	2,0640	2,460	812,2	2,0470
480	3,540	822,3	2,0977	2,950	822,3	2,0775	2,528	822,3	2,0605
500	3,635	832,5	2,1110	3,028	832,5	2,0908	2,595	832,5	2,0738
520	3,729	842,8	2,1240	3,107	842,8	2,1038	2,662	842,7	2,0868
550	3,871	858,3	2,1431	3,225	858,2	2,1230	2,765	858,2	2,1060

p_{ata} / t °C	1,6			1,8			2,0		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010078	40,0	0,1365	0,0010078	40,0	0,1365	0,0010078	40,0	0,1365
60	0,0010170	60,0	0,1984	0,0010170	60,0	0,1984	0,0010170	60,0	0,1984
80	0,0010289	80,0	0,2567	0,0010289	80,0	0,2567	0,0010289	80,0	0,2567
100	0,0010435	100,0	0,3121	0,0010435	100,1	0,3121	0,0010435	100,1	0,3121
120	1,135	647,5	1,7309	1,006	646,8	1,7165	0,9027	646,1	1,7033
140	1,197	657,5	1,7558	1,062	657,1	1,7419	0,9545	656,7	1,7294
160	1,258	667,0	1,7780	1,117	666,7	1,7646	1,003	666,4	1,7525
180	1,319	676,4	1,7992	1,171	676,2	1,7859	1,052	675,9	1,7740
200	1,379	685,8	1,8196	1,225	685,6	1,8063	1,101	685,3	1,7944
220	1,439	695,3	1,8392	1,278	695,1	1,8259	1,149	694,8	1,8140
240	1,499	704,8	1,8580	1,332	704,6	1,8447	1,197	704,4	1,8329
260	1,559	714,4	1,8762	1,385	714,2	1,8630	1,245	714,0	1,8513
280	1,619	724,0	1,8939	1,438	723,8	1,8807	1,293	723,6	1,8689
300	1,678	733,7	1,9111	1,491	733,5	1,8979	1,341	733,4	1,8860
320	1,738	743,3	1,9276	1,545	743,1	1,9145	1,390	743,0	1,9027
340	1,798	752,9	1,9437	1,598	752,8	1,9306	1,437	752,8	1,9190
360	1,857	762,6	1,9594	1,650	762,6	1,9463	1,485	762,6	1,9347
380	1,916	772,4	1,9747	1,702	772,4	1,9616	1,532	772,4	1,9500
400	1,975	782,3	1,9896	1,755	782,3	1,9765	1,579	782,2	1,9649
420	2,034	792,2	2,0041	1,807	792,2	1,9910	1,626	792,1	1,9794
440	2,093	802,1	2,0182	1,860	802,1	2,0052	1,673	802,1	1,9936
460	2,152	812,2	2,0321	1,913	812,2	2,0191	1,721	812,1	2,0075
480	2,211	822,3	2,0457	1,965	822,2	2,0327	1,768	822,2	2,0210
500	2,270	832,5	2,0590	2,018	832,4	2,0460	1,815	832,4	2,0343
520	2,330	842,6	2,0720	2,071	842,6	2,0590	1,864	842,6	2,0473
550	2,418	858,1	2,0912	2,149	858,1	2,0782	1,935	858,1	2,0665

p_{ata} / t °C	2,5			3,0			4,0		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010078	40,0	0,1365	0,0010078	40,0	0,1365	0,0010077	40,1	0,1365
60	0,0010170	60,0	0,1984	0,0010170	60,0	0,1983	0,0010169	60,0	0,1983
80	0,0010289	80,0	0,2567	0,0010288	80,0	0,2567	0,0010288	80,0	0,2566
100	0,0010434	100,1	0,3121	0,0010434	100,1	0,3121	0,0010433	100,1	0,3120
120	0,0010603	120,3	0,3647	0,0010602	120,3	0,3647	0,0010602	120,3	0,3646
140	0,7597	655,7	1,7030	0,6296	654,4	1,6806	0,0010798	140,7	0,4150
160	0,8003	665,7	1,7267	0,6643	664,8	1,7053	0,4940	663,3	1,6704
180	0,8399	675,3	1,7484	0,6975	674,7	1,7272	0,5197	673,5	1,6935
200	0,8790	684,7	1,7690	0,7304	684,2	1,7478	0,5448	683,2	1,7146
220	0,9179	694,3	1,7888	0,7631	693,7	1,7677	0,5697	692,8	1,7346
240	0,9567	704,0	1,8078	0,7956	703,4	1,7869	0,5944	702,5	1,7540
260	0,9953	713,7	1,8260	0,8281	713,1	1,8053	0,6190	712,4	1,7727
280	1,033	723,3	1,8437	0,8603	722,9	1,8230	0,6433	722,2	1,7907
300	1,071	733,1	1,8610	0,8923	732,7	1,8403	0,6676	732,1	1,8080
320	1,111	742,7	1,8778	0,9243	742,5	1,8572	0,6917	741,9	1,8249
340	1,149	752,5	1,8941	0,9562	752,3	1,8736	0,7158	751,8	1,8412
360	1,187	762,3	1,9098	0,9881	762,1	1,8895	0,7398	761,6	1,8571
380	1,225	772,2	1,9251	1,020	771,9	1,9048	0,7637	771,5	1,8726
400	1,262	782,0	1,9400	1,052	781,8	1,9197	0,7875	781,4	1,8876
420	1,300	791,9	1,9545	1,083	791,8	1,9342	0,8114	791,4	1,9021
440	1,338	802,0	1,9688	1,115	801,8	1,9485	0,8352	801,5	1,9164
460	1,376	812,0	1,9827	1,147	811,8	1,9624	0,8590	811,6	1,9304
480	1,414	822,0	1,9963	1,179	821,9	1,9761	0,8828	821,7	1,9441
500	1,452	832,2	2,0096	1,210	832,1	1,9894	0,9066	831,9	1,9574
520	1,490	842,4	2,0226	1,242	842,3	2,0024	0,9304	842,0	1,9705
550	1,547	857,9	2,0419	1,288	857,8	2,0216	0,9660	857,6	1,9896

p_{ata} / t °C	5,0			6,0			7,0		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010077	40,1	0,1365	0,0010077	40,1	0,1365	0,0010076	40,1	0,1365
60	0.0010168	60,0	0,1983	0,0010168	60,1	0,1983	0,0010168	60,1	0,1983
80	0,0010287	80,0	0,2566	0,0010287	80,1	0,2566	0,0010286	80,1	0,2566
100	0,0010433	100,1	0,3120	0,0010432	100,1	0,3120	0,0010432	100,1	0,3120
120	0,0010601	120,3	0,3646	0,0010601	120,3	0,3646	0,0010600	120,3	0,3646
140	0,0010797	140,7	0,4150	0,0010797	140,7	0,4150	0,0010796	140,7	0,4150
160	0,3917	661,3	1,6422	0,3232	659,1	1,6178	0,0011020	161,3	0,4637
180	0,4129	672,0	1,6667	0,3416	670,4	1,6439	0,2906	669,0	1,6242
200	0,4334	682,0	1,6881	0,3591	680,8	1,6662	0,3059	679,6	1,6473
220	0,4537	691,9	1,7085	0,3763	690,8	1,6871	0,3209	689,8	1,6686
240	0,4736	701,8	1,7282	0,3932	700,8	1,7069	0,3356	700,0	1,6887
260	0,4935	711,6	1,7471	0,4099	710,7	1,7259	0,3501	710,0	1,7079
280	0,5131	721,5	1,7652	0,4264	720,7	1,7441	0,3644	720,0	1,7263
300	0,5327	731,4	1,7827	0,4428	730,7	1,7616	0,3785	730,1	1,7439
320	0,5521	741,3	1,7997	0,4591	740,7	1,7787	0,3926	740,1	1,7610
340	0,5715	751,2	1,8161	0,4753	750,7	1,7952	0,4066	750,1	1,7776
360	0,5908	761,1	1,8320	0,4915	760,7	1,8113	0,4206	760,1	1,7937
380	0,6101	771,1	1,8475	0,5077	770,7	1,8268	0,4345	770,2	1,8094
400	0,6294	781,1	1,8626	0,5237	780,7	1,8419	0,4483	780,3	1,8246
420	0,6485	791,1	1,8773	0,5398	790,7	1,8566	0,4621	790,3	1,8393
440	0,6676	801,2	1,8916	0,5558	800,8	1,8710	0,4759	800,5	1,8538
460	0,6867	811,3	1,9055	0,5717	811,0	1,8851	0,4896	810,7	1,8679
480	0,7058	821,4	1,9192	0,5876	821,2	1,8988	0,5033	820,9	1,8816
500	0,7248	831,6	1,9326	0,6036	831,4	1,9122	0,5169	831,1	1,8950
520	0,7439	841,9	1,9457	0,6194	841,6	1,9253	0,5306	841,3	1,9081
550	0,7724	857,3	1,9649	0,6431	857,0	1,9447	0,5510	856,8	1,9275

p_{ata} / t °C	8,0			9,0			10,0		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010076	40,2	0,1365	0,0010075	40,2	0,1364	0,0010075	40,2	0,1364
60	0,0010167	60,1	0,1983	0,0010167	60,1	0,1983	0,0010166	60,1	0,1982
80	0,0010286	80,1	0,2566	0,0010285	80,1	0,2565	0,0010285	80,1	0,2565
100	0,0010431	100,2	0,3119	0,0010431	100,2	0,3119	0,0010430	100,2	0,3119
120	0,0010600	120,3	0,3646	0,0010599	120,4	0,3645	0,0010599	120,4	0,3645
140	0,0010795	140,7	0,4149	0,0010795	140,7	0,4149	0,0010794	140,7	0,4149
160	0,0011020	161,3	0,4636	0,0011019	161,3	0,4636	0,0011018	161,3	0,4635
180	0,2524	667,2	1,6067	0,2226	665,8	1,5907	0,1987	663,6	1,5755
200	0,2662	678,4	1,6307	0,2353	677,0	1,6154	0,2103	675,6	1,6015
220	0,2795	688,9	1,6523	0,2472	687,7	1,6375	0,2214	686,7	1,6241
240	0,2925	699,1	1,6726	0,2589	698,1	1,6582	0,2321	697,4	1,6454
260	0,3054	709,3	1,6920	0,2704	708,5	1,6780	0,2426	707,7	1,6654
280	0,3180	719,4	1,7106	0,2818	718,6	1,6967	0,2529	717,8	1,6841
300	0,3305	729,4	1,7284	0,2930	728,7	1,7145	0,2630	728,0	1,7020
320	0,3429	739,4	1,7455	0,3040	738,9	1,7318	0,2731	738,3	1,7195
340	0,3552	749,6	1,7622	0,3150	749,0	1,7486	0,2829	748,5	1,7364
360	0,3674	759,8	1,7785	0,3260	759,2	1,7649	0,2929	758,7	1,7528
380	0,3796	769,8	1,7942	0,3369	769,4	1,7807	0,3028	768,9	1,7687
400	0,3918	779,9	1,8095	0,3477	779,5	1,7960	0,3126	779,1	1,7840
420	0,4039	790,1	1,8242	0,3586	789,7	1,8109	0,3223	789,3	1,7989
440	0,4159	800,1	1,8387	0,3693	799,8	1,8254	0,3320	799,4	1,8134
460	0,4280	810,3	1,8528	0,3800	810,0	1,8395	0,3417	809,7	1,8275
480	0,4400	820,5	1,8665	0,3907	820,2	1,8533	0,3513	819,9	1,8414
500	0,4519	830,9	1,8799	0,4014	830,5	1,8668	0,3609	830,3	1,8549
520	0,4639	841,1	1,8931	0,4121	840,9	1,8800	0,3706	840,7	1,8682
550	0,4819	856,6	1,9126	0,4280	856,4	1,8994	0,3851	856,2	1,8875

p_{ata} / t °C	12			14			16		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010074	40,2	0,1364	0,0010073	40,3	0,1364	0,0010072	40,3	0,1364
60	0,0010165	60,2	0,1982	0,0010164	60,2	0,1982	0,0010163	60,2	0,1982
80	0,0010284	80,2	0,2565	0,0010283	80,2	0,2564	0,0010282	80,2	0,2564
100	0,0010429	100,2	0,3119	0,0010428	100,3	0,3118	0,0010427	100,3	0,3118
120	0,0010598	120,4	0,3645	0,0010596	120,4	0,3644	0,0010595	120,5	0,3644
140	0,0010793	140,8	0,4148	0,0010792	140,8	0,4148	0,0010791	140,8	0,4147
160	0,0011017	161,3	0,4635	0,0011015	161,4	0,4634	0,0011014	161,4	0,4633
180	0,0011273	182,2	0,5106	0,0011272	182,2	0,5105	0,0011270	182,3	0,5104
200	0,1728	672,7	1,5770	0,1460	669,8	1,5545	0,0011565	203,5	0,5562
220	0,1825	684,4	1,6006	0,1547	682,2	1,5802	0,1338	679,8	1,5617
240	0,1918	695,5	1,6225	0,1629	693,6	1,6026	0,1411	691,5	1,5848
260	0,2007	706,0	1,6429	0,1708	704,3	1,6233	0,1482	702,4	1,6060
280	0,2095	716,4	1,6621	0,1784	714,6	1,6428	0,1551	713,2	1,6259
300	0,2181	726,6	1,6803	0,1859	725,1	1,6614	0,1618	724,0	1,6449
320	0,2265	737,0	1,6979	0,1933	735,7	1,6793	0,1683	734,6	1,6631
340	0,2348	747,4	1,7150	0,2005	746,3	1,6966	0,1747	745,2	1,6806
360	0,2432	757,7	1,7316	0,2077	756,7	1,7134	0,1811	755,7	1,6975
380	0,2515	768,0	1,7475	0,2150	767,1	1,7295	0,1875	766,3	1,7138
400	0,2598	778,3	1,7630	0,2220	777,5	1,7451	0,1937	776,7	1,7295
420	0,2679	788,5	1,7779	0,2291	787,8	1,7602	0,2000	787,1	1,7448
440	0,2761	798,8	1,7927	0,2361	798,2	1,7749	0,2062	797,5	1,7595
460	0,2842	809,1	1,8069	0,2431	808,5	1,7892	0,2123	807,8	1,7738
480	0,2922	819,4	1,8207	0,2501	818,8	1,8031	0,2184	818,3	1,7878
500	0,3003	829,8	1,8342	0,2570	829,3	1,8168	0,2245	828,8	1,8015
520	0,3084	840,2	1,8475	0,2639	839,7	1,8301	0,2306	839,2	1,8149
550	0,3205	856,0	1,8672	0,2745	855,6	1,8498	0,2398	855,2	1,8347

p_{ata} / t °C	18			20			25		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010071	40,4	0,1364	0,0010070	40,4	0,1364	0,0010068	40,5	0,1366
60	0,0010162	60,3	0,1982	0,0010161	60,3	0,1981	0,0010159	60,4	0,1980
80	0,0010281	80,3	0,2564	0,0010280	80,3	0,2563	0,0010278	80,4	0,2562
100	0,0010425	100,3	0,3117	0,0010425	100,4	0,3117	0,0010422	100,5	0,3116
120	0,0010594	120,5	0,3644	0,0010593	120,5	0,3643	0,0010591	120,6	0,3642
140	0,0010789	140,9	0,4147	0,0010788	140,9	0,4146	0,0010785	141,0	0,4145
160	0,0011013	161,4	0,4633	0,0011011	161,4	0,4632	0,0011008	161,5	0,4630
180	0,0011268	182,3	0,5103	0,0011267	182,3	0,5102	0,0011263	182,3	0,5100
200	0,0011563	203,5	0,5561	0,0011561	203,5	0,5560	0,0011556	203,6	0,5558
220	0,1175	677,2	1,5443	0,1043	674,6	1,5284	0,0011899	225,3	0,6009
240	0,1242	689,4	1,5686	0,1108	687,3	1,5534	0,08643	681,5	1,5205
260	0,1307	700,7	1,5904	0,1168	698,9	1,5760	0,09158	694,1	1,5447
280	0,1369	711,8	1,6107	0,1225	710,2	1,5970	0,09640	706,2	1,5668
300	0,1430	722,8	1,6299	0,1281	721,3	1,6166	0,1010	717,8	1,5875
320	0,1490	733,5	1,6485	0,1334	732,3	1,6354	0,1055	729,0	1,6070
340	0,1548	744,1	1,6663	0,1386	743,2	1,6534	0,1098	740,3	1,6254
360	0,1605	754,8	1,6833	0,1438	753,8	1,6706	0,1141	751,4	1,6430
380	0,1661	765,3	1,6997	0,1491	764,5	1,6871	0,1183	762,3	1,6600
400	0,1717	775,9	1,7156	0,1542	775,1	1,7031	0,1225	773,1	1,6763
420	0,1773	786,3	1,7310	0,1592	785,6	1,7186	0,1266	783,8	1,6920
440	0,1829	796,8	1,7459	0,1642	796,1	1,7335	0,1308	794,5	1,7071
460	0,1884	807,2	1,7603	0,1692	806,6	1,7480	0,1347	805,1	1,7218
480	0,1938	817,7	1,7743	0,1741	817,2	1,7621	0,1387	815,7	1,7361
500	0,1992	828,2	1,7880	0,1790	827,7	1,7758	0,1426	826,4	1,7500
520	0,2047	838,7	1,8014	0,1840	838,3	1,7894	0,1466	837,1	1,7637
550	0,2129	854,6	1,8213	0,1913	854,2	1,8093	0,1527	853,1	1,7837

p_{ata} / $t°$ C	30			35			40		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010066	40,6	0,1362	0,0010064	40,7	0,1362	0,0010062	40,8	0,1362
60	0,0010157	60,5	0,1980	0,0010155	60,6	0,1979	0,0010152	60,7	0,1978
80	0,0010275	80,5	0,2561	0,0010273	80,6	0,2561	0,0010271	80,7	0,2560
100	0,0010419	100,5	0,3115	0,0010417	100,6	0,3114	0,0010414	100,7	0,3113
120	0,0010588	120,7	0,3641	0,0010585	120,8	0,3640	0,0010582	120,9	0,3639
140	0,0010782	141,1	0,4144	0,0010779	141,1	0,4143	0,0010776	141,2	0,4142
160	0,0011004	161,6	0,4629	0,0011001	161,6	0,4627	0,0010997	161,7	0,4625
180	0,0011259	182,4	0,5098	0,0011255	182,5	0,5096	0,0011251	182,5	0,5094
200	0,0011552	203,6	0,5556	0,0011547	203,7	0,5553	0,0011542	203,7	0,5551
220	0,0011892	225,3	0,6006	0,0011886	225,4	0,6004	0,0011880	225,4	0,6001
240	0,06987	675,1	1,4905	0,0012290	247,7	0,6448	0,0012282	247,7	0,6445
260	0,07459	688,9	1,5171	0,06233	683,8	1,4922	0,05302	678,1	1,4686
280	0,07889	701,9	1,5408	0,06630	697,7	1,5176	0,05679	693,0	1,4960
300	0,08294	714,1	1,5625	0,06998	710,5	1,5405	0,06022	706,6	1,5202
320	0,08680	725,9	1,5826	0,07344	722,6	1,5615	0,06338	719,4	1,5424
340	0,09055	737,5	1,6018	0,07675	734,6	1,5812	0,06636	731,7	1,5630
360	0,09421	749,0	1,6199	0,07997	746,3	1,5998	0,06927	743,6	1,5821
380	0,09780	760,1	1,6373	0,08314	757,7	1,6176	0,07212	755,3	1,6001
400	0,1013	771,1	1,6539	0,08624	768,9	1,6346	0,07490	766,8	1,6174
420	0,1048	781,9	1,6698	0,08927	780,0	1,6508	0,07763	778,1	1,6340
440	0,1084	792,8	1,6853	0,09228	791,0	1,6665	0,08030	789,3	1,6499
460	0,1118	803,5	1,7002	0,09525	802,0	1,6816	0,08293	800,4	1,6653
480	0,1151	814,3	1,7145	0,09820	812,9	1,6961	0,08554	811,4	1,6800
500	0,1185	825,1	1,7286	0,1011	823,8	1,7103	0,08813	822,4	1,6943
520	0,1218	835,8	1,7424	0,1039	834,6	1,7243	0,09069	833,4	1,7085
550	0,1269	852,1	1,7627	0,1083	850,9	1,7448	0,09449	849,8	1,7292

p_{ata} / $t°$ C	45			50			60		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010060	40,9	0,1361	0,0010057	41,0	0,1361	0,0010053	41,2	0,1360
60	0,0010150	60,8	0,1978	0,0010148	60,9	0,1977	0,0010144	61,1	0,1976
80	0,0010269	80,8	0,2559	0,0010266	80,9	0,2558	0,0010262	81,1	9,2556
100	0,0010412	100,8	0,3112	0,0010409	100,9	0,3111	0,0010404	101,1	0,3109
120	0,0010580	121,0	0,3638	0,0010577	121,1	0,3637	0,0010572	121,2	0,3635
140	0,0010773	141,3	0,4141	0,0010770	141,4	0,4140	0,0010764	141,5	0,4137
160	0,0010994	161,8	0,4624	0,0010990	161,8	0,4622	0,0010984	162,0	0,4619
180	0,0011247	182,6	0,5092	0,0011243	182,6	0,5090	0,0011235	182,8	0,5086
200	0,0011537	203,8	0,5549	0,0011532	203,8	0,5547	0,0011522	203,9	0,5543
220	0,0011874	225,4	0,5999	0,0011868	225,5	0,5996	0,0011857	225,5	0,5991
240	0,0012274	247,8	0,6442	0,0012266	247,8	0,6439	0,0012251	247,8	0,6433
260	0,04567	671,0	1,4456	0,0012751	271,0	0,6885	0,0012729	270,9	0,6878
280	0,04935	688,0	1,4760	0,04330	682,6	1,4566	0,03405	670,5	1,4187
300	0,05260	702,5	1,5018	0,04646	698,4	1,4844	0,03711	689,0	1,4513
320	0,05556	715,9	1,5250	0,04927	712,3	1,5087	0,03976	705,0	1,4788
340	0,05830	728,6	1,5462	0,05186	725,6	1,5307	0,04213	719,5	1,5028
360	0,06095	740,9	1,5659	0,05432	738,3	1,5510	0,04432	732,9	1,5245
380	0,06356	753,0	1,5845	0,05671	750,6	1,5701	0,04642	745,8	1,5445
400	0,06610	764,7	1,6022	0,05904	762,6	1,5881	0,04845	758,3	1,5632
420	0,06856	776,2	1,6190	0,06130	774,3	1,6052	0,05042	770,4	1,5808
440	0,07098	787,6	1,6352	0,06352	785,8	1,6216	0,05233	782,2	1,5978
460	0,07337	798,8	1,6506	0,06571	797,2	1,6373	0,05420	793,8	1,6140
480	0,07572	810,0	1,6655	0,06786	808,6	1,6524	0,05604	805,5	1,6294
500	0,07804	821,1	1,6801	0,06999	819,8	1,6671	0,05785	816,9	1,6444
520	0,08035	832,1	1,6944	0,07208	830,9	1,6815	0,05963	828,3	1,6591
550	0,08375	848,6	1,7153	0,07519	847,6	1,7028	0,06226	845,3	1,6804

t° C \ p_{ata}	70			80			90		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0910049	41,4	0,1359	0,0010045	41,6	0,1359	0,0010040	41,8	0,1357
60	0,0010139	61,3	0,1974	0,0010135	61,5	0,1973	0,0010130	61,7	0,1971
80	0,0010257	81,2	0,2555	0,0010252	81,4	0,2553	0,0010248	81,6	0,2551
100	0,0010399	101,2	0,3107	0,0010394	101,4	0,3105	0,0010389	101,6	0,3103
120	0,0010566	121,4	0,3633	0,0010561	121,6	0,3631	0,0010556	121,7	0,3628
140	0,0010758	141,7	0,4135	0,0010752	141,8	0,4133	0,0010746	142,0	0,4130
160	0,0010977	162,1	0,4617	0,0010970	162,2	0,4614	0,0010963	162,4	0,4611
180	0,0011226	182,9	0,5082	0,0011219	183,0	0,5079	0,0011211	183,1	0,5075
200	0,0011513	204,0	0,5539	0,0011504	204,1	0,5535	0,0011494	204,2	0,5532
220	0,0011845	225,6	0,5986	0,0011833	225,7	0,5982	0,0011822	225,7	0,5977
240	0,0012236	247,8	0,6428	0,0012221	247,8	0,6423	0,0012206	247,9	0,6417
260	0,0012709	270,9	0,6871	0,0012689	270,9	0,6864	0,0012669	270,9	0,6858
280	0,0013308	295,2	0,7317	0,0013279	295,1	0,7308	0,0013250	295,0	0,7300
300	0,03029	678,6	1,4196	0,02503	666,6	1,3871	0,0014024	320,9	0,7762
320	0,03287	696,9	1,4510	0,02757	687,9	1,4239	0,02336	677,6	1,3968
340	0,03512	712,8	1,4772	0,02976	705,6	1,4533	0,02553	697,9	1,4302
360	0,03714	727,2	1,5005	0,03171	721,2	1,4785	0,02745	715,0	1,4577
380	0,03903	740,8	1,5218	0,03348	735,6	1,5009	0,02914	730,1	1,4815
400	0,04084	753,7	1,5413	0,03515	749,2	1,5213	0,03070	744,3	1,5027
420	0,04260	766,3	1,5596	0,03674	762,1	1,5404	0,03218	757,8	1,5226
440	0,04430	778,6	1,5770	0,03828	774,8	1,5584	0,03359	770,9	1,5413
460	0,04596	790,5	1,5936	0,03977	787,1	1,5755	0,03496	783,6	1,5589
480	0,04759	802,3	1,6095	0,04122	799,2	1,5917	0,03629	796,1	1,5757
500	0,04918	814,1	1,6248	0,04265	811,2	1,6073	0,03758	808,2	1,5917
520	0,05073	825,7	1,6396	0,04405	823,0	1,6224	0,03884	820,3	1,6069
550	0,05303	843,0	1,6611	0,04610	840,6	1,6441	0,04070	838,4	1,6290

p_{ata} / $t°$ C	100			110			120		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010036	42,1	0,1356	0,0010032	42,3	0,1355	0,0010028	42,5	0,1355
60	0,0010126	61,9	0,1970	0,0010122	62,1	0,1968	0,0010117	62,3	0,1967
80	0,0010243	81,8	0,2550	0,0010239	82,0	0,2548	0,0010234	82,2	0,2547
100	0,0010384	101,8	0,3101	0,0010380	102,0	0,3099	0,0010375	102,1	0,3097
120	0,0010550	121,9	0,3626	0,0010545	122,1	0,3625	0,0010540	122,2	0,3623
140	0,0010740	142,1	0,4128	0,0010735	142,3	0,4126	0,0010728	142,4	0,4124
160	0,0010957	162,5	0,4608	0,0010950	162,7	0,4606	0,0010943	162,8	0,4603
180	0,0011203	183,2	0,5072	0,0011195	183,3	0,5069	0,0011188	183,5	0,5066
200	0,0011485	204,3	0,5527	0,0011476	204,4	0,5523	0,0011466	204,5	0,5520
220	0,0011810	225,8	0,5973	0,0011799	225,9	0,5968	0,0011788	225,9	0,5964
240	0,0012192	247,9	0,6412	0,0012177	247,9	0,6407	0,0012163	248,0	0,6402
260	0,0012650	270,9	0,6852	0,0012631	270,9	0,6845	0,0012613	270,8	0,6839
280	0,0013222	294,9	0,7293	0,0013194	294,7	0,7285	0,0013169	294,6	0,7278
300	0,0013979	320,7	0,7751	0,0013937	320,4	0,7739	0,0013897	320,1	0,7729
320	0,01988	665,9	1,3685	0,01689	652,4	1,3378	0,001495	348,6	0,8222
340	0,02210	689,0	1,4070	0,01925	679,4	1,3834	0,01679	668,9	1,3592
360	0,02397	707,8	1,4374	0,02112	700,6	1,4177	0,01870	692,5	1,3976
380	0,02561	724,2	1,4629	0,02273	718,3	1,4454	0,02028	712,1	1,4279
400	0,02710	739,3	1,4853	0,02416	734,2	1,4690	0,02168	729,2	1,4534
420	0,02850	753,5	1,5060	0,02548	749,2	1,4907	0,02296	744,7	1,4761
440	0,02982	767,0	1,5255	0,02672	763,4	1,5108	0,02415	759,3	1,4969
460	0,03109	780,1	1,5438	0,02791	776,8	1,5295	0,02528	773,2	1,5162
480	0,03232	792,8	1,5609	0,02906	789,8	1,5472	0,02637	786,7	1,5343
500	0,03352	805,3	1,5772	0,03018	802,6	1,5639	0,02742	799,8	1,5513
520	0,03469	817,7	1,5928	0,03127	815,2	1,5797	0,02843	812,5	1,5675
550	0,03639	836,0	1,6153	0,03285	833,5	1,6025	0,02990	831,4	1,5909

p_{ata} / $t°$ C	140			160			180		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0010019	42,9	0,1352	0,0010011	43,3	0,1351	0,0010003	43,7	0,1350
60	0,0010109	62,7	0,1965	0,0010100	63,1	0,1962	0,0010092	63,5	0,1959
80	0,0010225	82,5	0,2544	0,0010216	82,9	0,2541	0,0010207	83,3	0,2538
100	0,0010365	102,5	0,3094	0,0010356	102,9	0,3090	0,0010347	103,2	0,3087
120	0,0010529	122,6	0,3619	0,0010519	122,9	0,3615	0,0010508	123,2	0,3611
140	0,0010717	142,8	0,4119	0,0010705	143,1	0,4115	0,0010694	143,3	0,4110
160	0,0010930	163,1	0,4598	0,0010917	163,4	0,4593	0,0010905	163,6	0,4588
180	0,0011172	183,7	0,5060	0,0011157	183,9	0,5054	0,0011143	184,2	0,5048
200	0,0011448	204,7	0,5513	0,0011430	204,9	0,5506	0,0011412	205,1	0,5499
220	0,0011766	226,1	0,5955	0,0011744	226,2	0,5946	0,0011722	226,3	0,5938
240	0,0012136	248,0	0,6392	0,0012108	248,1	0,6382	0,0012082	248,2	0,6372
260	0,0012576	270,8	0,6827	0,0012541	270,7	0,6816	0,0012506	270,7	0,6804
280	0,0013118	294,5	0,7263	0,0013070	294,4	0,7250	0,0013023	294,2	0,7236
300	0,0013820	319,5	0,7709	0,0013746	319,1	0,7690	0,0013678	318,7	0,7673
320	0,001481	347,5	0,8189	0,001468	346,4	0,8159	0,001457	345,5	0,8133
340	0,01253	642,6	1,3050	0,001621	379,2	0,8705	0,001596	376,9	0,8654
360	0,01471	674,2	1,3561	0,01154	651,6	1,3106	0,00862	620,1	1,2533
380	0,01637	698,0	1,3932	0,01332	681,8	1,3581	0,01082	663,7	1,3218
400	0,01774	717,7	1,4230	0,01471	705,3	1,3934	0,01231	691,5	1,3640
420	0,01896	735,1	1,4483	0,01591	724,8	1,4219	0,01349	713,6	1,3961
440	0,02008	751,0	1,4708	0,01699	742,0	1,4463	0,01453	732,7	1,4230
460	0,02112	765,8	1,4914	0,01798	758,0	1,4684	0,01550	750,0	1,4468
480	0,02211	780,1	1,5105	0,01889	773,2	1,4888	0,01638	766,1	1,4684
500	0,02306	793,9	1,5284	0,01976	787,7	1,5077	0,01720	781,3	1,4882
520	0,02397	807,2	1,5454	0,02059	801,8	1,5254	0,01797	796,0	1,5067
550	0,02529	826,5	1,5694	0,02180	821,9	1,5500	0,01908	817,0	1,5325

p_{ata} / t °C	200			220			250		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s
40	0,0009995	44,1	0,1347	0,0009986	44,5	0,1345	0,0009974	45,1	0,1343
60	0,0010083	63,8	0,1958	0,0010075	64,2	0,1955	0,0010062	64,8	0,1952
80	0,0010198	83,7	0,2536	0,0010190	84,0	0,2533	0,0010176	84,6	0,2528
100	0,0010337	103,6	0,3084	0,0010328	103,9	0,3081	0,0010314	104,5	0,3075
120	0,0010498	123,6	0,3607	0,0010488	123,9	0,3603	0,0010473	124,4	0,3597
140	0,0010682	143,7	0,4106	0,0010671	144,0	0,4101	0,0010655	144,5	0,4095
160	0,0010892	163,9	0,4583	0,0010879	164,2	0,4578	0,0010860	164,7	0,4571
180	0,0011128	184,4	0,5042	0,0011113	184,7	0,5037	0,0011092	185,0	0,5028
200	0,0011395	205,3	0,5492	0,0011379	205,4	0,5485	0,0011354	205,7	0,5475
220	0,0011701	226,5	0,5930	0,0011680	226,6	0,5922	0,0011650	226,8	0,5910
240	0,0012055	248,2	0,6363	0,0012029	248,3	0,6353	0,0011993	248,4	0,6338
260	0,0012472	270,7	0,6792	0,0012439	270,7	0,6781	0,0012392	270,7	0,6764
280	0,0012977	294,0	0,7222	0,0012933	293,9	0,7208	0,0012870	293,7	0,7188
300	0,0013612	318,4	0,7655	0,0013549	318,0	0,7638	0,0013461	317,6	0,7614
320	0,001446	344,7	0,8109	0,001436	344,2	0,8087	0,001423	343,2	0,8054
340	0,001573	375,0	0,8611	0,001554	373,5	0,8575	0,001530	371,6	0,8528
360	0,001841	416,6	0,9280	0,001768	411,0	0,9179	0,001703	405,8	0,9080
380	0,00870	640,0	1,2777	0,00662	606,7	1,2215	0,00255	468,5	1,0049
400	0,01033	676,1	1,3330	0,00862	657,5	1,2981	0,00637	622,4	1,2378
420	0,01156	701,5	1,3701	0,00993	688,6	1,3445	0,00788	666,7	1,3029
440	0,01258	722,6	1,4001	0,01097	711,8	1,3778	0,00897	695,6	1,3435
460	0,01352	741,3	1,4259	0,01186	732,3	1,4058	0,00990	717,7	1,3759
480	0,01436	758,6	1,4491	0,01267	750,9	1,4306	0,01068	738,4	1,4036
500	0,01513	774,7	1,4700	0,01341	767,9	1,4527	0,01138	757,2	1,4277
520	0,01587	790,0	1,4893	0,01411	783,9	1,4729	0,01203	774,4	1,4494
550	0,01690	811,7	1,5161	0,01512	806,5	1,5005	0,01297	798,4	1,4788

Soovitav kirjandus.

В. П. Блюдов, Д. Н. Вырубов, С. Я. Корницкий и друг., Общая теплотехника, Госэнергоиздат, 1948.

Trükivigu

Lk.	Rida	On trükitud	Peab olema	Kelle süü läbi
18	8. ülalt	$\frac{G_t}{100}$	$\frac{C_t}{100}$	Toimetaja
22	4. „	$Q_{kv} = KH\Delta t$	$Q_{kv} = kH\Delta t$	„
42	4. „	$\eta_k =$	$\eta_{ka} =$	„
44	2. alt	$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{K\sqrt{Q/H_{krg}}}{A}}$	$\sigma = \frac{\eta_{ko}}{1 + \frac{K\sqrt{Q/H_{krg}}}{A}}$	„
122	2. „	deseraatoreid	deaeraatoreid	„
140	14. ülalt	$p_i = p_i\,(F_1 - F_2) =$	$P_i = p_i\,(F_1 - F_2) =$	„
140	17. „	$p_i S$	$P_i S$	„
166	4. „	$J = \frac{q}{g} R\omega^2 \cos\alpha =$	$J = \frac{q}{g} R\omega^2 \cos 2\alpha =$	„
169	6. „	$M = \frac{L}{u^2\delta}$	$M = \frac{\Delta L}{u^2\delta}$	„

Sisukord.

Esimene osa

Katelseadmed.

Lk.

I peatükk. Sissejuhatus ja üldmõisteid katelseadmetest 3
1. Sissejuhatus 3
2. Aurujõuseadme skeem ja katelseadme põhielemendid 4
II peatükk. Kütus ja selle põlemine 9
3. Kütuse liigitus ja koostis 9
4. Kütuse soojusväärtus ja selle määramise meetodid 10
5. Kütuse põlemine ja põlemissaaduste koostis 11
III peatükk. Soojuse ülekanne 19
6. Soojuse ülekanne kiirgamisega 19
7. Soojuse ülekanne konvektsiooni teel 22
8. Temperatuuri keskmise vahe määramine 29
9. Üheaegne soojuse ülekanne konvektsiooniga ja kiirgamisega 32
IV peatükk. Katelseadme soojusbilanss 35
10. Soojusbilansi põhivõrrand 35
11. Kasulikult ärakasutatud soojus ja katelseadme kasutegur 36
12. Soojuskaod lahkuvate suitsugaasidega 37
13. Kaod põlemise keemilisest ebatäiuslikkusest 37
14. Soojuskaod mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest 39
15. Soojuskaod ümbritsevasse keskkonda 40
V peatükk. Katelseadme soojusarvutus 41
16. Soojusarvutuse ülesanne ja vajaliku kütuse hulga määramine 41
17. Kolde ja katla tüübi valik 42
18. Kolderuumi mahu ja restipinna arvutus 42
19. Teoreetilise põlemistemperatuuri ja koldetemperatuuri määramine . . . 43
20. Esimese katlakäigu küttepinna määramine 45
21. Ülekuumendi küttepinna määramine 47
22. Teise katlakäigu arvutus 48
23. Ökonomaiseri arvutus 49

Lk.

VI peatükk. Kolded 51
24. Eelmõisteid 51
25. Käsitsi-teenindatav kolle plaanrestiga 52
26. Treppkolle 54
27. Süvikolle puude ja turba põletamiseks 55
28. Mehaanilised kolded tükk-kütuse põletamiseks 58
29. Alumise etteandmisega kolded (stokerid) 61
30. Tolmkütte-kolded 63
31. Kolded masuudi ja gaasi põletamiseks 66

VII peatükk. Aurukatelde tüübid 68
32. Silindrilised ja patareikatlad 68
33. Leektorukatlad 72
34. Suitsutorukatlad 74
35. Veetorukatlad 76
36. Tervikkambritega kaldveetorukatel piki-mudakogujaga 78
37. Sektsionaalsed kaldveetorukatlad 80
38. Suhhovi süsteemi kaldveetorukatlad 83
39. Püstveetorukatlad 85
40. Painutatud torudega katlad 86
41. Nüüdisaegse ekraaniga katla komponeerimise põhiprintsiibid 87

VIII peatükk. Erikonstruktsiooniga katlad 95
42. Üldmõisted 95
43. Prof. Ramzini süsteemi otsevoolukatel 95
44. Ülekriitilise rõhuga otsevoolukatel 97
45. Sundtsirkulatsiooniga katel 101
46. Aurugeneraatorid kõrgendatud rõhuga koldes 102
47. Kaudse aurustamisega katel auru sundtsirkulatsiooniga 103

IX peatükk. Auruülekuumendid 104
48. Auruülekuumendi otstarve ja ta ehitus 104
49. Ülekuumendustemperatuuri reguleerimine 105

X peatükk. Eelsoojendid 107
50. Veeökonomaiserid 107
51. Õhueelsoojendid 111
52. Regeneratiivne õhueelsoojendi 112

XI peatükk. Aurukatelde armatuur ja abiseadmed 113
53. Katelde toitmine 113
54. Katelde armatuur ja abiseadmed 114

XII peatükk. Tõmme 117
55. Tõmbe vajalik tugevus 117
56. Loomulik tõmme 118
57. Kunstlik tõmme. Tõmbe liigi valik 119

XIII peatükk. Toitevesi 119
58. Toitevee ettevalmistamine 119
59. Vee puhastamine 121

Aurumasinad.

Lk.

XIV peatükk. Aurumasina üldine ehitus, töötamine ja kasutegur 123
60. Aurumasina arenemine, skeem ja ta töötamise põhimõte 123
61. Aurumasina teoreetiline ja tegelik indikaatoridiagramm ja soojuskadude liigid 125
62. Kaod auru muljumisest auru masinasse sisselaskmisel 128
63. Kaod algkondensatsioonist ja abinõud nendega võitlemiseks 129
64. Kaod mitteküllaldasest paisumisest 132
65. Kaod auru muljumisest väljalaskmisel 133
66. Kaod kahjulikus ruumis 133
67. Soojuskaod ümbritsevasse keskkonda ja auru läbipääsust ebatiheduste kaudu 135
68. Kasutegurid 136
69. Auru kulu 138
70. Masina võimsus ja keskmise indikaatorirõhu määramine 139
71. Indikaator 141

XV peatükk. Aurujaotus 142
72. Siibritega aurujaotus 142
73. Klappidega aurujaotus 156
74. Kraanidega aurujaotus 158
75. Sega-aurujaotus 161

XVI peatükk. Aurumasinate dünaamika 161
76. Kolvi kiirus ja kiirendus 161
77. Kolvile ja vändale mõjuvad jõud 163
78. Hooratta massi määramine 168

XVII peatükk. Masinate reguleerimine 169
79. Reguleerimise viisid 169
80. Regulaatorite tüübid ja nende tasakaalu tingimused 170

XVIII peatükk. Kondensatsioon 174
81. Kondensatsiooni olemus ja kondensaatorite liigid 174
82. Töötanud auru puhastamine õlist 179
83. Vee teistkordne jahutamine 180

XIX peatükk. Masinate tüübid ja nende konstruktiivse kujundamise näiteid . . 181
84. Masinate liigitus 181
85. Masinate konstruktiivse kujundamise tüübid 183

XX peatükk. Aurumasinate detailid 187
86. Raam ja raamlaagrid 187
87. Ristpea 188
88. Aurumasina silinder 188
89. Kolb 188
90. Tihenduskarbid 190

Auruturbiinid.

Lk.

XXI peatükk. Teoreetilisi põhiteatmeid 193
91. Turbiini üldmõiste 193
92. Energia muundumine turbiini düüsides 196
93. Düüsi arvutamine 198
94. Turbomasina põhivõrrandite tuletamised 200
95. Kaod töölabade kanalites ja aksiaalastme kasutegur 203
96. Võimsuse kaod auruturbiinides hõõrdumisele ja auru läbijooksule . . . 211
97. Turbiini kasutegur ja auru kulu 212

XXII peatükk. Auruturbiinide konstruktiivse kujundamise näiteid 213
98. Turbiinide ehituse areng NSV Liidus 213
99. Turbiinide liigitus 215
100. Aktiivturbiin ühe rõhuastmega ja ühe kiirusastmega (Laval'i turbiin) . . 217
101. Ühe rõhuastmega ja mitme kiirusastmega aktiivturbiinid 219
102. Mitmeastmelised aktiivturbiinid 225
103. Mitmeastmeliste aktiivturbiinide teostamise näiteid 230
104. Reaktiivturbiinid 233
105. Radiaalsed reaktiivturbiinid 236

XXIII peatükk. Turbiinid elektrienergia ja soojusenergia kombineeritud tootmiseks 239
106. Üldisi kaalutlusi 239
107. Vasturõhuturbiinid 240
108. Vaheltauru-turbiinid reguleeritava vaheltauruga 241

XXIV peatükk. Turbiinide reguleerimine 243
109. Reguleerimise viise 243
110. Reguleerimisorganite ehitus 244
111. Düüsidega reguleerimine 246
112. Vaheltauru-turbiini reguleerimine 246
113. Kiirsulgeja 249

XXV peatükk. Auruturbiini detailid 249
114. Tugilaagrid 249
115. Tihenduskarbid 250
116. Turbiini rootor 252
117. Juhtlabad ja töölabad 253
118. Kondensaatorid 254

Tabel I. Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt rõhust) 255
Tabel II. Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt temperatuurist) 258
Tabel III. Ülekuumendatud veeauru tabel. 261
Soovitav kirjandus

Vastutav toimetaja
J. Ivand.
Tehniline toimetaja
E. Lellep.

Ladumisele antud 12. IV 1950.
Trükkimisele antud 7. X 1950.
Trükiarv 2000. Paber 67×95, 1/16.
Trükipoognaid 17,75 + 2 lisa 0,5
trpg. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 20,98. Arvutuspoognaid 18,16. MB-08131.
Trükikoda „Hans Heidemann“,
Tartu, Vallikraavi 4. Tellimise
nr. 1163.

На эстонском языке.
Р. Е. Левин. Машиноведение.

Hind rbl. 7.35

Rbl. 7.35

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00448704 9