J. IVAND

TEHNILINE TERMODÜNAAMIKA

II

RK

„TEADUSLIK KIRJANDUS“

621.1
I-91
2
A-16670

J. IVAND

TEHNILINE TERMODÜNAAMIKA

II

t
N. V. Gogoli nim. Tartu
Linna Keskraamatukogu
Inv. nr. 164550
(Tehnika)

RK „TEADUSLIK KIRJANDUS"
TARTU, 1948

621.1.016.7
62:536
-62
C

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

N. V. Gogoli nim.
Tartu Linna
Keskraamatukogu
(Tehnika)

EESSÕNA.

Käesolev töö on järjeks „Tehnilise termodünaamika" esimesele osale ja käsitleb reaalseid gaase, veeauru, gaaside ja aurude kineetikat, niisket õhku, gaasiturbiine ning reaktiivmootoreid. Raamat on mõeldud õpikuks Tallinna Polütehnilise Instituudi Mehhaanikateaduskonna üliõpilastele.

Sellealase eestikeelse õpiku järele on praegusel hetkel tungiv vajadus ja seda eeskätt rahvamajanduslikust lähtekohast, sest kogu energeetika laiaulatuslik rakendamine elus rajaneb sisuliselt termodünaamikale. Et võimaldada rahvamajandusele plaanikohast kiiret tempot, peab meie kütteainete ja energia tootmine ette jõudma kõigist teistest rahvamajandusharudest. Laia energiabaasi rajamiseks ongi meie viie aasta plaanis ette nähtud suured kapitalimahutused. Nimetagem vaid seda, et Nõukogude Eesti peab muutuma suurimaks põlevkivi- ja põlevkiviutmis-tööstuse keskuseks. Nende ülesannete täitmiseks on vaja süvendatud erialaliste teadmistega nõukogude insenere, mis kohustab meie õppeasutusi ja õppejõude tehnilise kaadri ettevalmistamisel tegema kõik, et õppeaja kestel õpilane omandaks maksimaalse võimaliku. „Tehnilise termodünaamika II" koostamisele asudes pidasin neid momente eriti silmas ja loodan, et käesolev õpik kujuneb üliõpilastele tulusaks abiallikaks termodünaamika alal.

Pean oma kohuseks tänada prof. A. Särev'it ja dots. E. Soonvald'i ning dots. I. Õpik'ut tulusate näpunäidete eest. Samuti tänan RK „Teaduslikku Kirjandust" autori soovidele vastutuleku eest nii raamatu esimese kui ka käesoleva teise osa kujundamisel.

Autor.

Tallinn, 1947. a.

I peatükk.

REAALSED GAASID.

1. REAALSETE GAASIDE OMADUSED.

Termodünaamika esimeses osas eeldasime, et kõik termodünaamilised protsessid toimusid ideaalsete või lähisideaalsete gaasidega, s. o. gaasidega mis allusid gaaside karaktervõrrandile. Termodünaamika teises osas vaatleme reaalseid gaase, mis ei allu kogu protsessi ulatuses gaaside karaktervõrrandile, s. o. millede füüsikalised omadused protsessis muutuvad.

Piltlikult selgitavad reaalsete gaaside neid omadusi p-v-diagrammil (joon. 1) reaalsete gaaside isotermid, s. o. $T = konst$ ja ideaalsete gaaside $pv = konst$-kõverad, sest ideaalsete gaaside puhul $pv = konst$-kõverad p-v-diagrammil on ühtlasi isotermkõverateks.

Joonisel 1 (skemaatiline diagramm) on reaalsete gaaside isotermid märgitud täisjoontena ja ideaalsete gaaside isotermid $(pv = RT = konst)$ kriipsjoontena.

Jooniselt nähtub, et kõrge rõhu ja temperatuuri piirkonnas, mida iseloomustavad kõverad AM, on reaalsete gaaside isotermide tõus järsem kui ideaalsete gaaside $pv = konst$-kõverate tõus. Järelikult on selles piirkonnas reaalse gaasi kokkusurutavus väiksem kui ideaalsel gaasil, ehk, mis on sama — reaalse gaasi kokkusurutavuse koefitsient

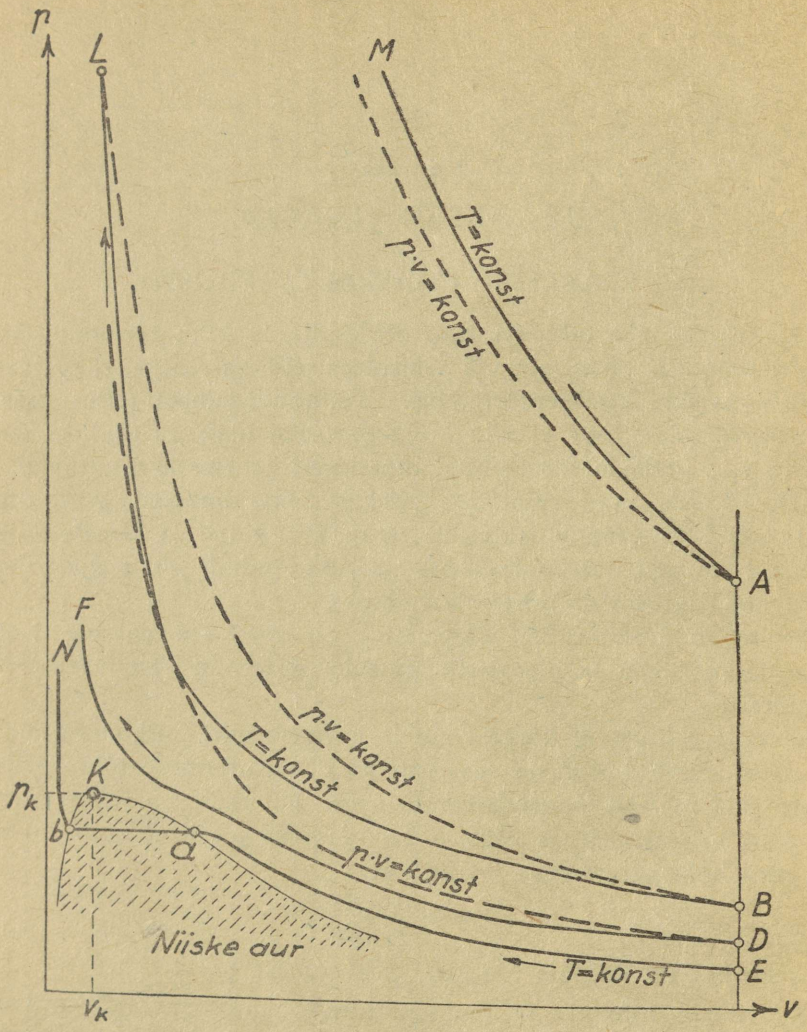
$$\alpha'_T = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$$

selles piirkonnas on väiksem ideaalse gaasi omast $\left(\alpha_T = \frac{1}{p}\right)$.

Madalamate rõhkude ja temperatuuride piirkonnas (kõverad BL ja DF) asuvad komprimeerimise alguses reaalse gaasi isotermid madalamal kui ideaalse gaasi $pv = konst$-jooned.

Komprimeerimise lõpposas aga muutub nende isotermide tõus järsemaks, mille tõttu nad peavad lõikuma ideaalse gaasi sama isotermiga teatavas kõrgrõhu piirkonnas. Punktist B ehitatud isotermide sääraseks punktiks on punkt L. Sellest järeldame, et komprimeerimise algul on α'_T suurem ja lõpul väiksem kui ideaalsetel gaasidel.

Edasi selgub jooniselt, et ühest ja samast punktist ehitatud $T = konst$- ja $pv = konst$-jooned lähevad teineteisest seda rohkem lahku, mida mada-



Joon. 1.

lam on gaasi temperatuur, kusjuures nende uus ühine lõikepunkt nihkub kaugele kõrge rõhu piirkonda.

Igale reaalsele gaasile, olenevalt tema iseloomust, leidub alati säärane algolek, s. o. temperatuur ja rõhk, millest teostatava isotermilise protsessi

puhul gaasi füüsikalised omadused erinevad põhjalikult ideaalsete gaaside omadustest. Üheks sääraseks olekuks osutub näiteks gaasi olek punktis *E*. Isotermilisel komprimeerimisel sellest punktist tõuseb gaasi rõhk ainult kuni punktini *a*. Punktist *a* alates edaspidisel komprimeerimisel gaasi maht küll väheneb, kuid rõhk jääb konstantseks kuni punktini *b*. Punktist *b* hakkab rõhk kiirelt tõusma ja isoterm muutub peatselt vertikaalsirgeks. Isotermi säärane käik piirkonnas *a-b-N* on tingitud gaasi agregaatoleku muutusest. Nimelt tekivad alates punktist *a* kõige väiksemalgi gaasi mahu vähenemisel gaasi koguses selle kondenseerumiskeskmed, kus ilmuvad vedelikupiisad, mis liitudes langevad gaasi kogusest välja, s. o. punktist *a* alates algab gaasi veeldumine. Mahu edasisel vähendamisel gaasi veeldumine kestab kuni punktini *b*. Punkt *b* juures on kogu gaas siirdunud vedelasse olekusse. Punktist *b* alates esineb komprimeerimisel uuesti rõhu tõus, ja et vedeliku kokkusurutavus on väga väike, kujuneb isotermi see osa peaaegu vertikaalsirgeks. Kui laseme veeldunud gaasil punktist *N* isotermiliselt paisuda mööda isotermi *NbaE*, siis hakkab punkti *b* jõudes vedelik aurustuma või keema, mis kestab kuni punktini *a*. Punkti *a* jõudes on kogu vedelik aurustunud. Isotermilisel aurustumisprotsessil punktist *b* kuni punktini *a* jääb ka rõhk konstantseks, vaatamata mahu suurenemisele. Järelikult aurustumise piirkonnas on isoterm *ab* ühtlasi isobaariks. Alates punktist *a* toimub isotermiline paisumine nagu tavaliselt gaasi rõhu langusega.

Gaasi olekut diagrammi *ab*-osas, kus ta moodustab heterogeense süsteemi, s. o. esineb korraga vedelas ja gaasilises olekus, nimetatakse küllastunud niiskeks auruks, ja olekut punktis *a* — kuivaks küllastunud auruks.

Joonisel 2 on näidatud niiske küllastunud auru piirkond CO_2 jaoks suurendatud kujul. Jooniselt nähtub, et mida kõrgem on isotermi temperatuur, seda väiksemaks muutub küllastunud niiske auru piirkond, s. o. seda lähemale nihkuvad teineteisele gaasi niiske auru piirkonda määravad punktid *a* ning *b*, kuni nad teataval temperatuuril T_k langevad punktis *k* ühte.

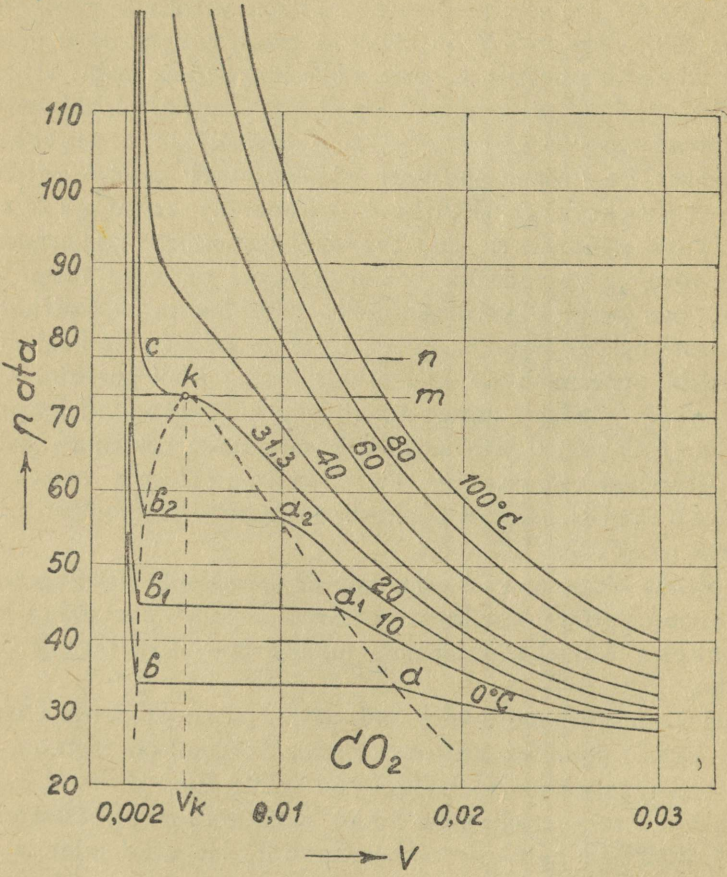
Vedeliku aurustumispunktide *b*, b_1, b_2 . . . ja gaasi kondenseerumispunktide *a*, a_1, a_2 . . . geomeetrilised kohad moodustavad nn. piirkõvera, mis joonisel 2 on märgitud kriipsjoontega *akb*.

Piirkõvera haru *ak* nimetatakse ülemiseks piirkõveraks ehk küllastusjooneks ja haru *bk* alumiseks piirkõveraks.

Punkti *k* nimetatakse kriitiliseks punktiks ja seda punkti läbivat isotermi kriitiliseks isotermiks. Punktile *k* vastavaid gaasi oleku parameetreid p_k, v_k, T_k või t_k nimetatakse gaasi kriitiliseks rõhuks, kriitiliseks mahuks ja kriitiliseks temperatuuriks.

Kriitilises punktis *k* piirkõverale tõmmatud puutuja *mk* on alati rööpne *v*-teljega.

Piirkõver jagab *p*-*v*-välja gaasi oleku suhtes kolme ossa. Vasakul pool alumist piirkõverat asub väli, kus gaas esineb vedelas faasis. Piirkõverast piiratud väljal esineb küllastunud niiske aur, s. o. gaas esineb vedelas ja



Joon. 2.

gaasilises faasis. Paremal pool ülemist piirkõverat *ak* esineb gaas või üldse aine gaasilises olekus ehk faasis. Tavaliselt nimetatakse gaase, millede kriitiline temperatuur on toatemperatuurist kõrgem, olekus paremal pool ülemist piirkõverat „ülekuumendatud aurudeks". Gaase, millede kriitiline temperatuur on toatemperatuurist madalam, nimetatakse „jäävgaasideks", sest neid ei saa veeldada ilma eeljahutuseta. Gaaside liigitamine „ülekuumendatud auruks" ja „jäävgaasiks" kannab puhtleppelist iseloomu,

teaduslikust seisukohast ei oma ta mingit tähtsust. Nimetus „jäävgaas" on tulnud sellest, et varematel aegadel gaase, millede kriitiline temperatuur oli madal, ei osatud veeldada, mille tõttu termin „jäävgaas" tol ajal omas füüsikalist mõtet.

Temperatuuridel, mis on kõrgemad antud gaasi kriitilisest temperatuurist, pole mingisuguse rõhuga võimalik gaasi veeldada. Allpool kriitilist temperatuuri aga leidub alati rõhk, millega on võimalik gaasi veeldada, nagu selgub ka diagrammilt.

Järelikult, piirkonnas kõrgemal punktile k tõmmatud puutujat mk pole näiteks võimalik isobaarilise komprimeerimisega gaasi veeldada. Küll aga toimub gaasi füüsikaliste omaduste pidev lähenemine vedeliku omadustele, s. o. suureneb gaasi tihedus ja väheneb kokkusurutavus, mis piiriliselt läheneb nullile telje p suunas, kuid mingit piiri gaasi vedela faasi ja gaasilise oleku vahel ei saa siin anda. Samuti ei toimu gaasi olekus kriitilisel isotermil punktis c mingisuguseid erimuutusi. Seega kaotab kriitiline temperatuur selles piirkonnas igasuguse füüsikalise mõtte. Üldiselt, kui selles piirkonnas rääkida gaasi vedelast ja gaasilisest faasist, kannab säärane termin puhtleppelist iseloomu, füüsikalist alust ta ei oma.

Eeltoodust järeldame, et reaalsetele gaasidele on antud oleku piirkonnas gaaside karaktervõrrand rakendatav kas teatava täpsuse ja parandustega või ta pole üldse rakendatav (niiske auru ja vedeliku piirkond). Sama on kehtiv ka teiste ideaalsete gaaside jaoks tuletatud võrrandite suhtes.

2. REAALSEID GAASE KARAKTERISEERIVAD DIAGRAMMID.

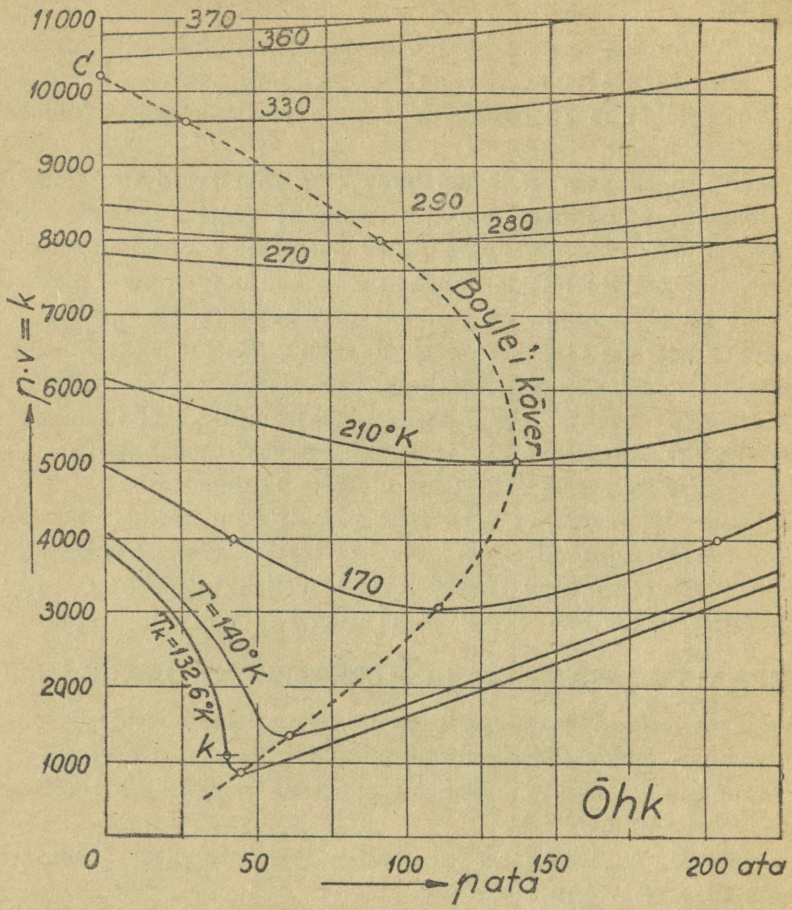
Tehnilises termodünaamikas kasutatakse reaalsete gaaside ja aurudega seotud küsimuste lahendamisel mitmesuguseid katsetele ja arvutustele rajatud diagramme, mille abil on võimalik arvutada reaalse gaasi oleku parameetreid.

Tutvume mõningate sääraste diagrammidega. Joonisel 3 on esitatud üks säärane diagramm õhu jaoks.

Diagrammil on antud õhu isotermid $(RT = konst)$ pv-p-koordinaatide süsteemis. Korrutise pv-teljeks on ordinaattelg ja p-teljeks abstsisstelg. Abstsisstelje on kantud rõhkude mõõtkava abs. atmosfäärides ja ordinaatteljele pv korrutis mõõtkavas [kg/m² · m³/kg]. Seda korrutist märgime edaspidises tähisega k, s. o. $pv = k$.

Ideaalse gaasi isotermid sel diagrammil esinevad rõhkude teljele rööpsirgetena, sest isotermiliseks protsessiks avaldub gaasi karaktervõrrand kujul $pv = RT = konst$. Reaalse õhu isoterme sel diagrammil, nagu nähtub joonisel, esindavad üldiselt kõverjooned, millest järeldame, et õhk kõigis diagrammi poolt haaratud olekuis ei allu ideaalse gaasi seadustele. Hälve

ideaalse gaasi seadustest on seda suurem, mida madalam on temperatuur. Madala temperatuuri piirkonnas (allpool punkti C) kalduvad reaalse õhu isotermid rõhu tõustes alguses rõhkude telje poole ja selle järel hakkavad



Joon. 3.

tõusma. Isotermide säärane kulgemine näitab, et õhu kokkusurutavus sõltuvalt temperatuurist kuni teatava rõhuni (Boyle'i kõverani) on suurem kui ideaalsel gaasil, kuid teatavast rõhust alates, kust algab isotermi tõus (pöördepunkt), hakkab õhu kokkusurutavus vähenema, lähenedes ideaalse gaasi kokkusurutavusele. Selle karakterliku rõhu määrab isotermi punkt, millele ehitatud puutuja on rööpne rõhkude teljega, s. o. mille suhtes on rahuldatud tingimus

$$\left[\frac{\partial(pv)}{\partial p}\right]_T = 0.$$

Punkti C temperatuurist kõrgematel temperatuuridel tõusevad isotermid rõhu suurenedes, mis näitab, et selles piirkonnas õhu kokkusurutavus on väiksem ideaalse gaasi kokkusurutavusest.

Edasi nähtub diagrammilt, et temperatuuri piirkonnas 330° K kuni rõhuni 50 ata on õhu isotermid peaaegu rööpsed rõhkude teljega. Selles piirkonnas allub õhk täpselt gaasi karaktervõrrandile. Peale isotermide on diagrammile kantud nn. Boyle'i kõver. See kõver ühendab isotermide kõige madalamaid punkte, s. o. punkte, millele ehitatud puutuja on rööpne rõhkude teljega ja milles, nagu varemalt tähendatud, õhu kokkusurutavuse omadus muutub. Punktiga k on diagrammil tähistatud õhu kriitiline punkt.

Diagrammi 3 abil on võimalik arvutada õhu parameetrit v, kui on antud parameetrid p ja T. Selleks kasutame seost

$$pv = k;\ v = \frac{k}{p};\ \gamma = \frac{p}{k}\ .$$

Suurus k on määratav diagrammilt õhu temperatuuri T ja rõhu p järgi.

Ideaalse ja reaalse õhu parameetrite vahelised seosed saame järgnevalt. Märkides ideaalse õhu kilomahu tähisega v_i ja gaasikonstandi — R_o, võime kirjutada

$$v_i = \frac{R_o T}{p},\ v = \frac{k}{p},$$

kust leiame, et

$$\frac{v}{v_i} = \frac{k}{R_o T} \tag{1}$$

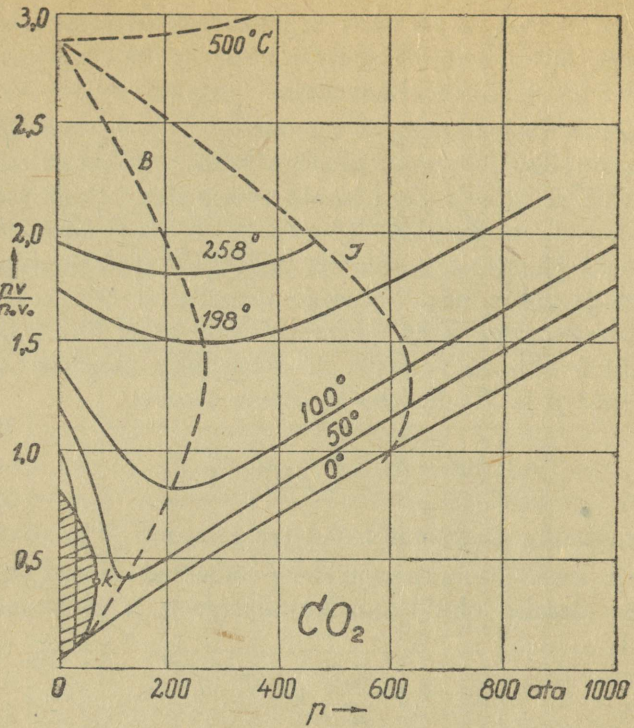
ja

$$\frac{v_i - v}{v_i} = \frac{R_o T - k}{R_o T}\ . \tag{2}$$

Näide: Seoste (1) ja (2) järgi erineb temperatuuridel 370°, 330° 270°, 210°, 170° K ja rõhul 100 ata õhu tegelik maht ideaalse õhu mahust järgnevalt:

$T =$	370° K	330° K	270° K	210° K	170° K
$k =$	11 090	9627	7609	5136	3091
$R_o T =$	10 830	9659	7903	6147	4976
$\frac{v}{v_i} =$	1,024	1,007	0,963	0,835	0,621
$\frac{v_i - v}{v_i} \cdot 100 =$	−2,4%	− 0,7%	+ 3,7%	+ 16,4%	37,9%

Teiste reaalsete gaaside pv-p-diagrammide konfiguratsioon on printsiibilt sarnane õhu diagrammiga. Üeldut näitab joonisel 4 esitatud diagramm



Joon. 4.

CO_2 jaoks. Selle diagrammi abstsissteljele on kantud gaasi rõhk abs. atmosfäärides ja ordinaatteljele suhtarv

$$\frac{pv}{p_o v_o} = k_1, \tag{a}$$

kus p_o ja v_o on gaasi oleku parameetrid normaaltingimustel ja p ning v gaasi tegelik rõhk ja kilomaht antud olekus. Jooniselt nähtub, et CO_2 isotermid sel diagrammil on sarnased õhu isotermidega diagrammil 3. Ideaalse gaasi isotermid ka selles koordinaatide süsteemis on rõhkude teljega rööpsed sirged.

Seosest (a) leiame, et

$$v = k_1 \frac{p_o v_o}{p} = k_1 \frac{p_o}{p\gamma_o}. \tag{3}$$

Seose ideaalse gaasi parameetritega leiame järgnevalt. Märkides ideaalse gaasi kilomahu normaaltingimustel v_{oi} ja antud tingimustel v_i, avaldub seos (a) ideaalse gaasi jaoks kujul

$$\frac{pv_i}{p_o v_{oi}} = \frac{T}{T_o}. \tag{b}$$

Jagades seose (a) võrdseid seose (b) võrdsetega ja oletades, et $v_{oi} = v_o$, saame

$$\frac{v}{v_i} = \frac{k_1 T_o}{T}. \tag{4}$$

Näiteks temperatuuril 100° C ja rõhul 200 ata CO_2 puhul $k_1 = 0{,}825$. Järelikult

$$\frac{v}{v_i} = \frac{0{,}825 \cdot 273}{273 + 100} = 0{,}604$$

ja

$$\frac{v_i - v}{v_i} \cdot 100 = \frac{1 - 0{,}604}{1} \cdot 100 = 39{,}6\,\%.$$

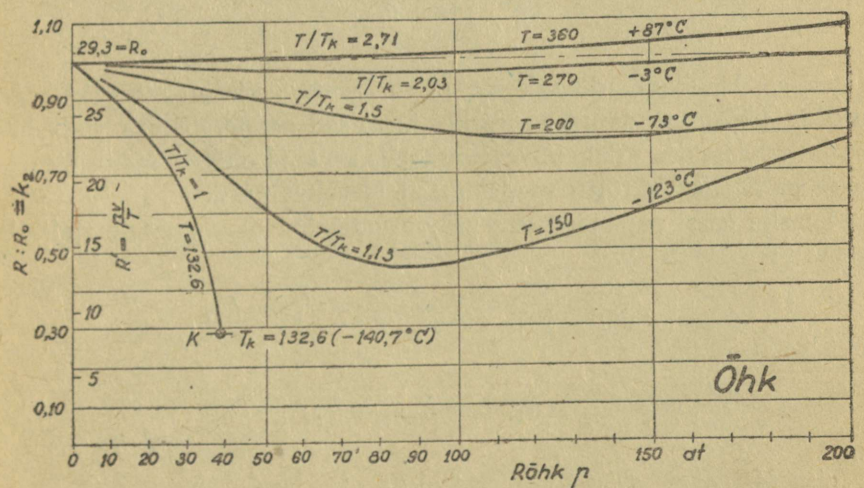
Seega annab CO_2 selles olekus ideaalse gaasi karaktervõrrand vea 39,6%.

Kujukalt iseloomustavad reaalsete gaaside omadusi diagrammid, milledel on abstsissteljele kantud gaasi abs. rõhu astmik ja ordinaatteljele suhtarvude

$$\frac{R}{R_o} = k_2$$

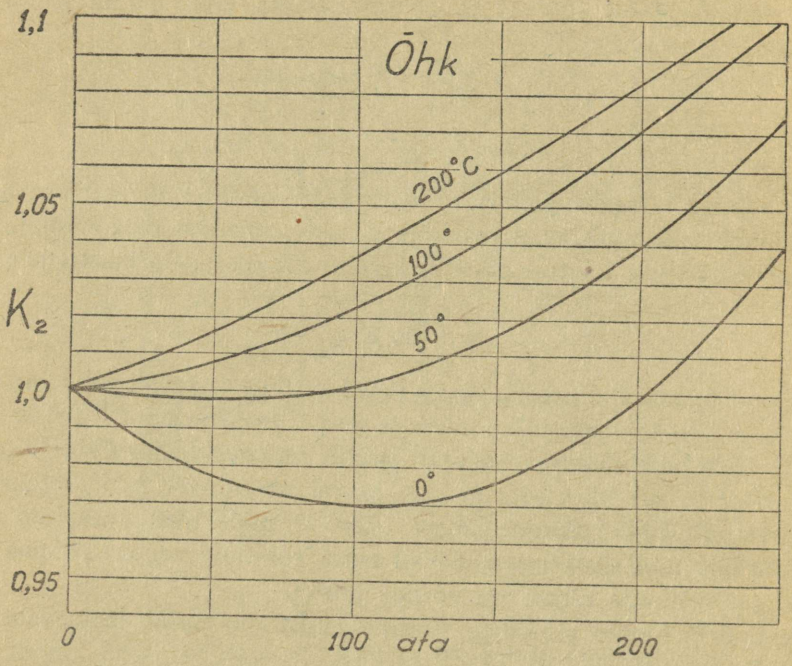
astmik (joon. 5), kus R on reaalse gaasi gaasikonstant vastavalt gaasi antud tingimustele ja R_o — samanimelise ideaalse gaasi gaasikonstant. Selles koordinaatide süsteemis antakse reaalsete gaaside isotermid, mis üldiselt kujunevad kõverjoonteks. Ideaalsete gaaside korral on suhtarv k_2 igasuguse rõhu ja temperatuuri puhul võrdne ühega ($k_2 = 1$), mille tõttu ideaalsed gaasid selles koordinaatide süsteemis annavad ainsa rõhkude teljega rööpse sirge, mille kaugus rõhkude teljest on võrdne ühega.

Need diagrammid tehniliste gaaside jaoks on antud järgnevatel joonistel: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 ja 15.



Joon. 5.

Joonistelt nähtub, et reaalsete gaaside isotermid algavad ordinaatteljelt ühisest punktist, kus suhtarvu väärtus on võrdne ühega, s. o. $k_2 = 1$. See asjaolu näitab, et rõhul $p \to 0$ alluvad kõik reaalsed gaasid ideaalse gaasi



Joon. 6.

seadustele. Järelikult, rõhkude puhul alla atmosfäärirõhu esinevad reaalsed gaasid ja ülekuumendatud aurud kui ideaalsed gaasid. Seega võib niiskes õhus ja heitgaasides esinevat veeauru (välja arvatud olek küllastuspiiril) tema väikese partsiaalrõhu tõttu vaadelda kui ideaalset gaasi.

Reaalse gaasi parameetrite v ja γ arvutamine diagrammide abil toimub järgnevalt:

$$\frac{R}{R_o} = \frac{RT}{R_o T} = \frac{pv}{pv_i} = \frac{v}{v_i} = \frac{\gamma_i}{\gamma} = k_2, \tag{5}$$

kust leiame, et

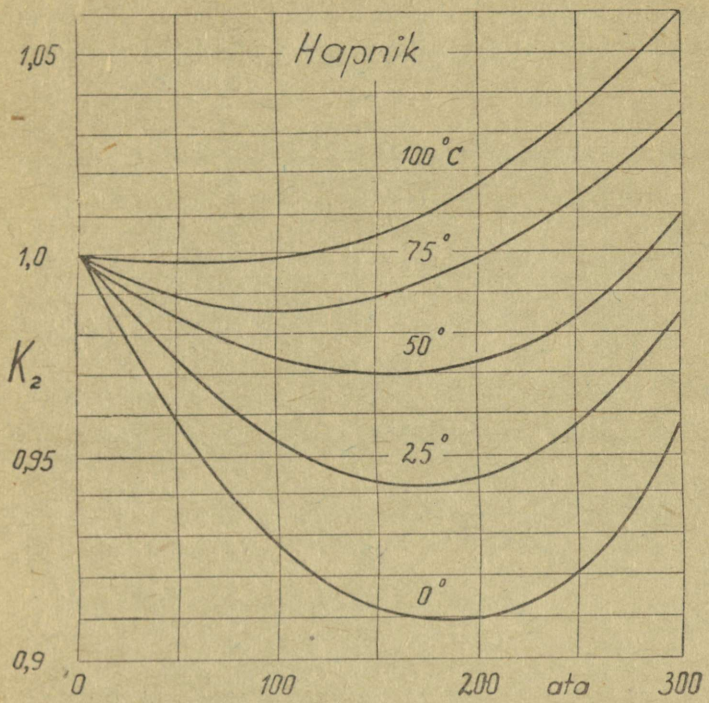
$$\frac{v}{v_i} = k_2, \; v = k_2 v_i = k_2 \frac{R_o T}{p} \tag{6}$$

ja

$$\frac{\gamma_i}{\gamma} = k_2, \; \gamma = \frac{1}{k_2} \; \gamma_i = \frac{1}{k_2} \; \frac{p}{R_o T} \; . \tag{7}$$

Näiteks diagrammilt 6 leiame, et temperatuuril 200° C ja rõhul 100 ata õhu jaoks $k_2 = 1{,}036$, s. o.

$$\frac{v}{v_i} = 1{,}036$$



Joon. 7.

ja viga, mille ideaalse gaasi karaktervõrrand annab, on

$$\frac{v_i - v}{v_i} \cdot 100 = \frac{1 - 1{,}036}{1} \cdot 100 = -3{,}6\%.$$

Samalt diagrammilt leiame, et temperatuuril 0° C ja rõhul 100 ata on $k_2 = 0{,}97$, s. o.

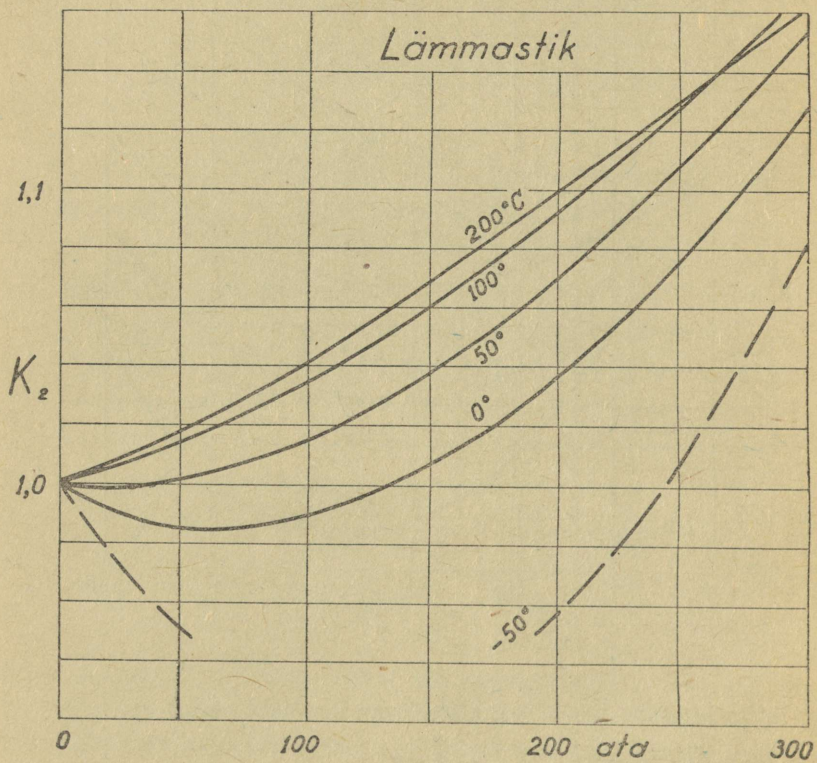
$$\frac{v}{v_i} = 0{,}97 \text{ ja } \frac{v_i - v}{v_i} \cdot 100 = \frac{1 - 0{,}97}{1} \cdot 100 = 3\%.$$

Vesiniku puhul rõhul 100 ata ja temperatuuril 0° C leiame diagrammilt 9, et $k = 1{,}06$, s. o.

$$\frac{v}{v_i} = 1{,}06 \text{ ja } \frac{v_i - v}{v_i} \cdot 100 = \frac{1 - 1{,}06}{1} \cdot 100 = -4\%.$$

3. VAN DER WAALS'I VÕRRAND.

Eeltoodust selgus, et reaalsete gaaside puhul nende parameetrite vaheline seos gaasi iga oleku jaoks ei ole avaldatav ideaalsete gaaside karaktervõrrandiga, mis on ka loomulik, sest ideaalsete gaaside karaktervõrrand ei arvesta gaaside molekulide eneste mahtu [1], millesse suurte molekulaarsete vastumõjude tõttu ei saa tungida teised molekulid ja millest tingituna



Joon. 8.

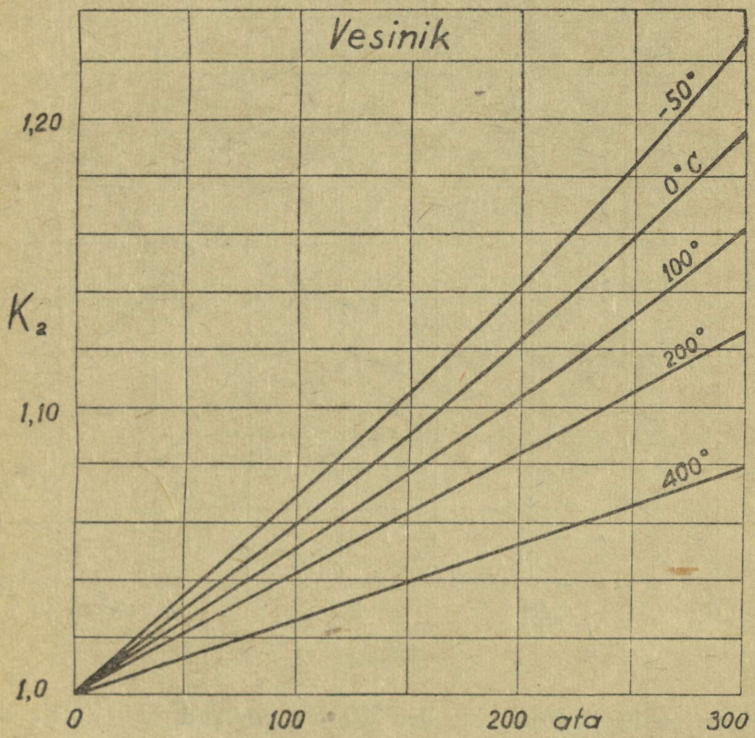
molekulidele liikumiseks vabaksjäänud maht on väiksem gaasikoguse näilisest mahust. Teiseks ei arvesta ideaalsete gaaside karaktervõrrand molekulide-vaheliste vastastikuste külgetõmbejõudude mõju. Need jõud püüavad vähendada gaasikoguse näilist mahtu ja mõjuvad seega samas suunas nagu välisrõhkki, moodustades gaasi sisemise ehk nn. kohesioonrõhu. Järelikult on manomeetri näidatav rõhk väiksem gaasi tõelisest rõhust, mis tegelikult iseloomustab gaasi termilist olekut.

[1] Ideaalsete gaaside karaktervõrrand eeldab, et molekulide maht on võrdne nulli ga

Universaalse võrrandi leidmiseks on töötanud paljud tuntud teadlased ja praegugi jätkatakse seda tööd, kuid säärast võrrandit, mis täpselt hõlmaks reaalsete gaaside omadusi kõigis nende faasides, pole veel antud.

Kõige universaalsemaks seniseist võrrandeist osutub van der Waals'i võrrand, mille kuju lihtsamas skeemis avaldub järgmiselt:

$$\left(p+\frac{a}{v^2}\right)(v-b)=RT. \tag{8}$$



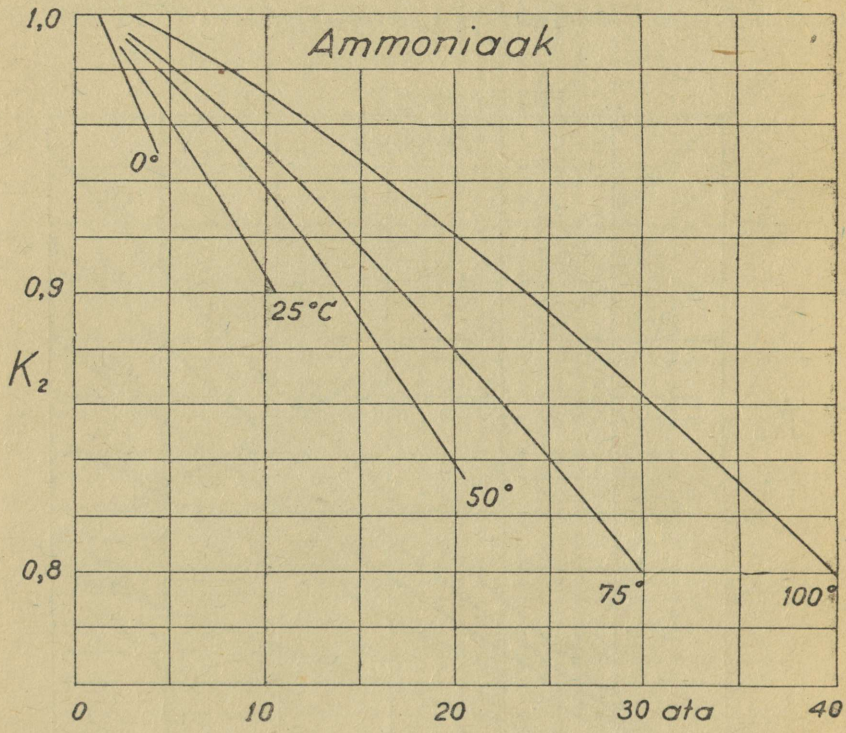
Joon. 9.

See võrrand arvestab eespool mainitud fakte. Nimelt on suurus b parandus gaasikoguse näilisele mahule v, s. o. maht $(v-b)$ avaldab gaasikoguse „vaba mahtu", milles molekulid saavad liikuda. Maht b ei ole siiski gaasikoguse molekulide maht, vaid võrdub ligikaudu neljakordse molekulide mahuga ja avaldab üldiselt mahtu, millest gaasi näiline maht v teoreetiliselt ei saa väiksemaks muutuda. Suurus a redutseerib gaasi rõhku kohesioon-

N. V. Gogoli nim. Tartu Linna Keskraamatukogu (Tehnika)

rõhu p_i suhtes, mis järelikult on võrdne avaldisega $\frac{a}{v^2}$, sest molekulide vastastikune külgetõmbejõud on võrdeline gaasi tiheduse ruuduga, s. o. γ^2-ga, ehk pöördvõrdeline erimahuga $\frac{1}{v^2}$ *

Liites rõhu $p_i = \frac{a}{v^2}$ gaasi staatilise rõhuga p, saame gaasi termilise rõhu.



Joon. 10.

Eespoolöeldu järgneb van der Waals'i võrrandist. Nimelt ilmutades võrrandi (8) $p + \frac{a}{v^2}$ suhtes, saame

$$p + \frac{a}{v^2} = \frac{RT}{v - b}. \qquad \text{(a)}$$

Sellest võrrandist nähtub, et kui $p \to \infty$, siis $v \to b$.

Järelikult piiril

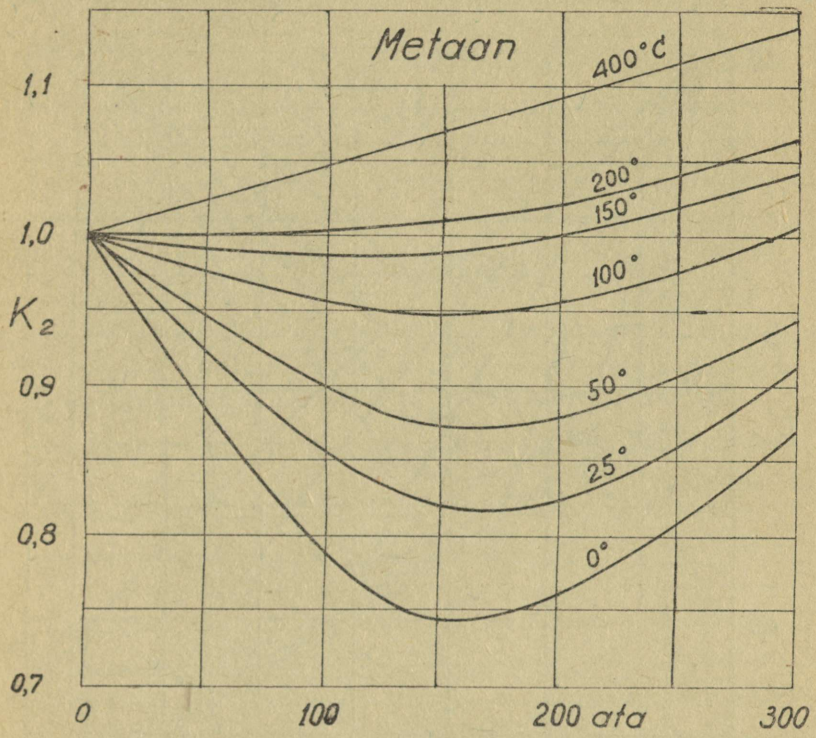
$$v = b.$$

---

* $p_i = f\,\frac{m_1 m_2}{l^2} = f\,\frac{m^2}{l^2} = a\gamma^2 = \frac{a}{v^2}$,

kus m on molekulide mass ja a võrde tegur.

Sellest võrdusest järgneb, et välisrõhu tõustes gaasi maht ei saa muutuda väiksemaks kui b, mistõttu reaalse gaasi isotermid p-v-diagrammil omavad asümptootilist tõusu. Selleks asümptoodiks on p-teljega rööpne sirge, mille kaugus p-teljest on võrdne van der Waals'i parandusteguriga b.



Joon. 11.

Ilmutades võrrandi (a) p suhtes saame

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} = \frac{RT}{v-b} - p_i .$$

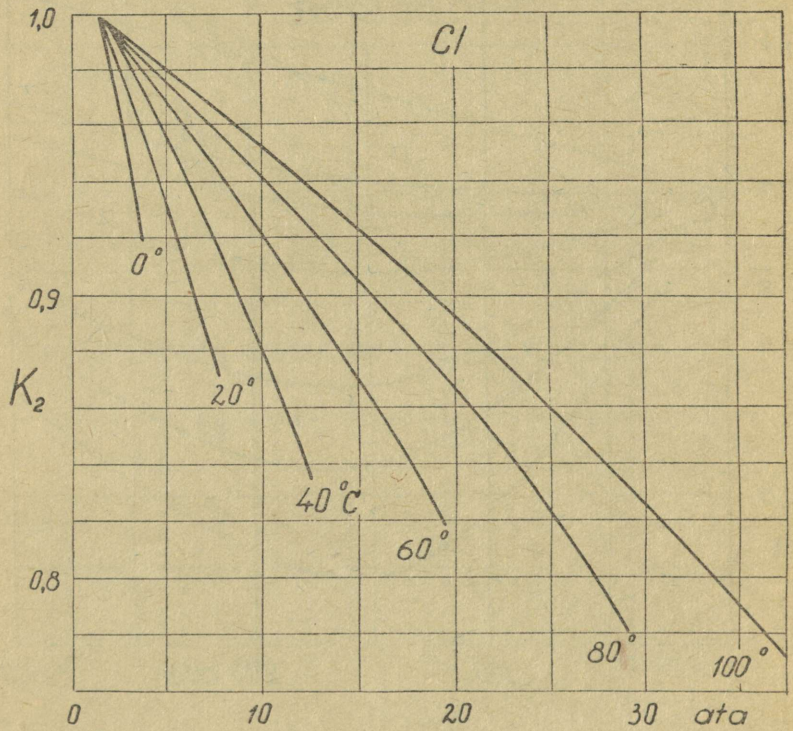
Sellest seosest nähtub, et reaalsele gaasile mõjuv staatiline rõhk p on väiksem gaasi termilisest rõhust molekulidevahelise külgetõmbejõu, s. o. kohesioonrõhu võrra. Gaasidel on see rõhk tegelikult väike, kuid suuri väärtusi omab ta vedelikkudel (vee puhul üle 10000 at), mistõttu nad pole kuigi suurel määral kokkusurutavad.

Avades sulud saame van der Waals'i võrrandi anda kujul

$$pv = RT - \frac{a}{v^2}(v - b) + bp \qquad \text{(b)}$$

ja

$$R = \frac{pv}{T} + \frac{\frac{a}{v^2}(v-b)}{T} - \frac{pb}{T}. \qquad \text{(c)}$$



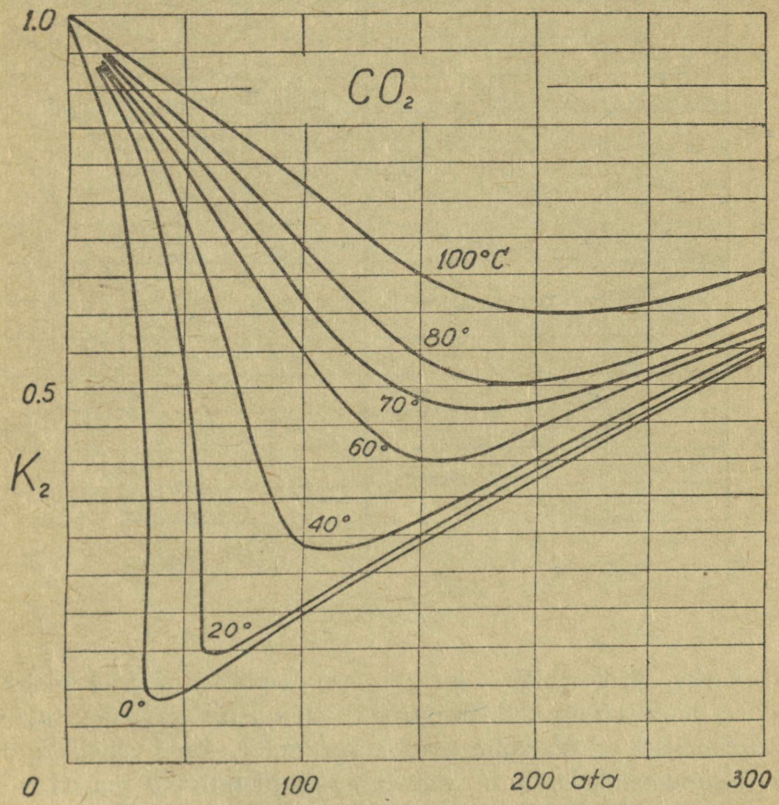
Joon. 12.

Võrrandist (b) nähtub, et kui $T = konst$, siis korrutis pv ei tarvitse olla jääv suurus, vaid oleneb sellest, kuidas antud temperatuuril gaasi maht sõltub rõhust. Kui aga võrrandi (b) parema poole kaks viimast liiget $T = konst$ puhul rõhu muutudes jäävad võrdseteks, siis selles oleku piirkonnas allub reaalne gaas ideaalse gaasi seadusele. Sellele olekule läheneb gaas, kui tema rõhk väheneb ja temperatuur tõuseb. Sel puhul vähenevad võrrandi kaks viimast liiget ja võrrand läheneb ideaalse gaasi võrrandile $pv = RT$.

Edasi selgub võrrandist (c), et isotermilisel komprimeerimisel, mis on avaldatud k_2-p-diagrammil (joon 6 kuni 15), isoterm tõuseb, kui protsessi

kulgemisel kaks esimest liiget kasvavad kiiremini viimasest liikmest $\frac{pb}{T}$.

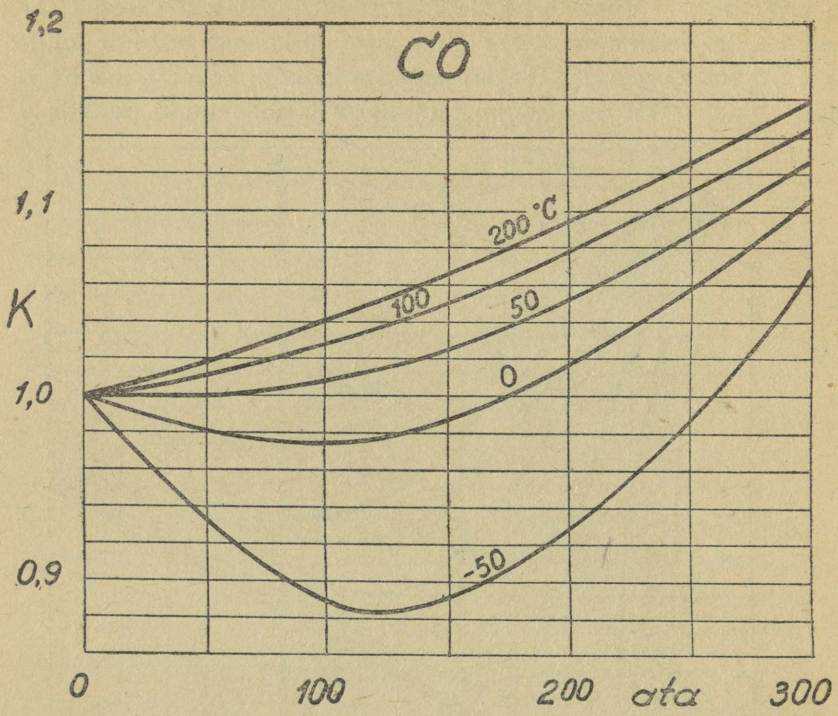
Joonisel 16 on antud van der Waals'i võrrandiga arvutatud p-v-diagramm CO_2 jaoks. Võrreldes seda diagrammi joonisel 2 antud CO_2 tegeliku diagrammiga, leiame, et näiteks niiske auru piirkonnas avaldub null-isoterm sirgena *ab*, kuna ta van der Waals'i järgi aga kujutab kõverat, mis niiske auru piirkonnas omab rõhu maksimumi punktis *m* ja miinimumi punktis *n*.



Joon. 13.

Säärane teoreetilise isotermi iseloom näitab seda, et van der Waals'i võrrandi järgi gaas või ülekuumendatud aur punktis *a* ei kondenseeru, s. o. ei veeldu, vaid tema maht väheneb ka veeldumiseta. Tegelikult esineb reaalse gaasi puhul punktis *a* kuiv küllastunud aur ja väiksemalgi mahu muutusel hakkab gaas kondenseeruma. Katsed näitavad siiski, et eriolukorras, kui gaas ei sisalda tolmu ja temas ei esine ioone on võimalik gaasi mahtu punktist *a* vasakule isotermiliselt vähendada, ilma et esineks kondenseerumist, s. o. tegelikult saab isotermi pikendada punkti *m* suunas. Isotermi sel osal

(am) gaas asub siiski tasakaalutus olekus ja võib igal hetkel iseenesest kondenseeruda. Gaasi seda tasakaalutut olekut nimetatakse metastabiil-

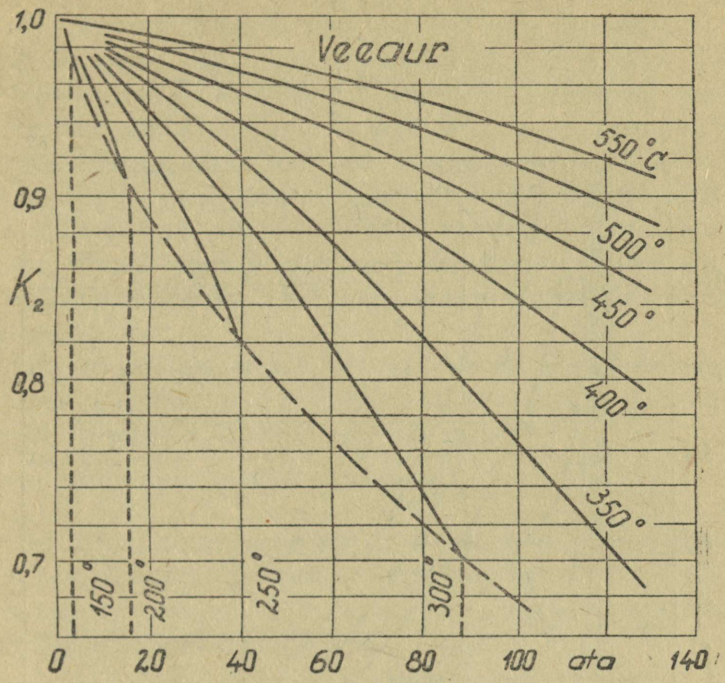


Joon. 14.

seks olekuks. Selles olekus on gaas nn. üleküllastunud ja ülejahutatud auru olekus. Punktis *b* on vedelik nn. küllastunud olekus: kõige väiksemalgi mahu suurenemisel esineb kohe tema aurustumine. Kuid vedelikku on siiski võimalik ülekuumendada, s. o. viia protsess punktist *b* punkti *n* suunas, kui temast kõrvaldatakse kõik võõrkehad ja lahustunud gaasid. Olekus teoreetilise isotermi harul *bn* on vedelik samuti metastabiilses olekus ja võib hakata igal hetkel aurustuma. Vedeliku olekut harul *bn* nimetatakse ülekuumendatud olekuks, sest punktid allpool punkti *b* vastavad tegelikult madalamat temperatuuri omavatele isotermidele. Teoreetilise isotermi harul *nm* vastab mahu suurenemisele rõhu tõus, mida tegelikult millalgi ei esine, s. o. haru *ncm* on tegelikult realiseerimatu. Olekuid punktide *m* ja *n* vahel nimetatakse labiilseteks olekuteks.

Eriti madalate temperatuuride puhul annab van der Waals'i võrrand isotermid, millede silmus *bnc* lõikub mahtude teljega nii, et punkt *n* satub

negatiivsete rõhkude piirkonda. Tegelikult on säärased nähtused võimalikud, näiteks kui täita anum täielikult puhta vedelikuga ja teostada õige ettevaatlikult vedeliku jahutamist, siis võib tema maht jääda muutumatuks.



Joon. 15.

Sel puhul asub aga vedelik nagu tõmmatud olekus ja temas esinevad tõmbepinged kuni mitme kümne atmosfäärini, näiteks etüüleetril kuni 72 ata ja külmal veel kuni 40 ata. Esitatust järeldame, et niiske auru piirkonnas ei väljenda van der Waals'i võrrand tõelist olukorda, s. o. ei anna niiske auru piirkonnas mahtude teljega rööpseid isoterme. Neid isotermi osi on siiski võimalik ehitada teoreetiliste isotermide abil. Nimelt tuleb ehitada sirge *ab*, mis niiske auru piirkonnas moodustab teoreetilise isotermiga võrdsed pindalad *amca* ja *bcnb*, nagu see on näidatud joonisel 16 teoreetilise null-isotermi jaoks (viirutatud pindalad).

Nii määratud punkt *a* vastab ülemisele piirkõverale ja punkt *b* alumisele piirkõverale. Pindala teoreetilise van der Waals'i isotermi *amnb* ja tegeliku isotermi *acb* all, kuni mahtude teljeni, on võrdne vedeliku aurustumisel sooritatud välise absoluutse mehhaanilise tööga, mis esineb mahu muutusel alumise piirkõvera punktist *b* kuni ülemise piirkõvera punktini *a*.

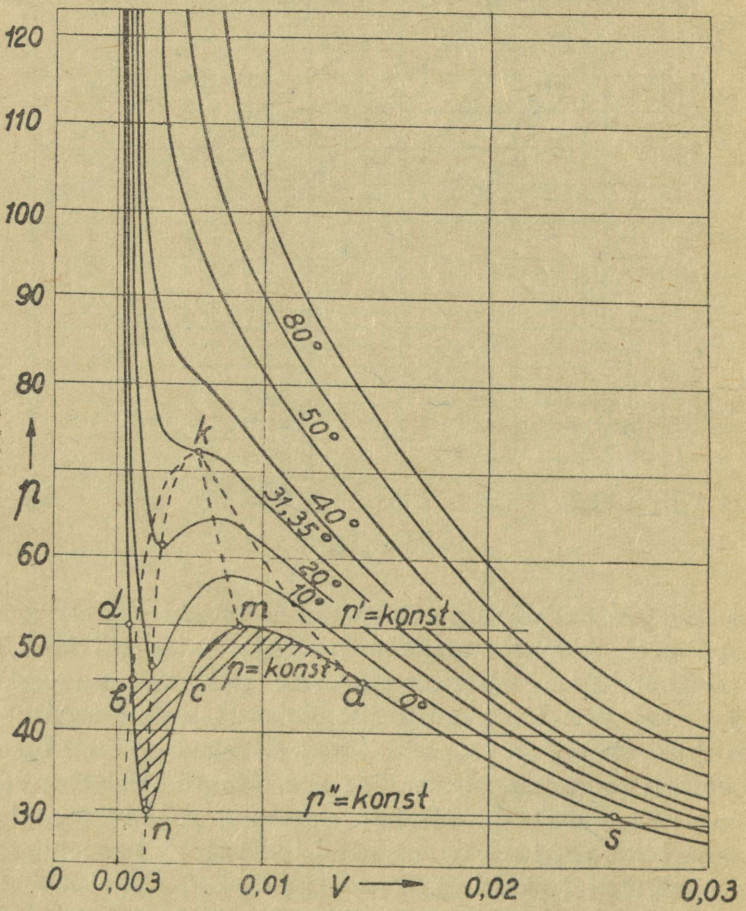
Analüüsime van der Waals'i võrrandit.

Avades sulud ja tuues liikme RT vasakule, saame võrrandile peale lihtsaid algebralisi teisendusi anda kuju:

$$pv^3 - (bp + RT)\,v^2 + av - ab = 0$$

ehk

$$v^3 - \left(b + \frac{RT}{p}\right) v^2 + \frac{a}{p}\,v - \frac{ab}{p} = 0\,. \qquad (9)$$



Joon. 16.

Saadud võrrand on v suhtes kolmanda astme võrrand ja ta omab kas üht reaalset lahendit ja kaht komplekslahendit või kolme reaalset lahendit. Graa-

filiselt tähendab see, et esimesel juhul (üks reaalne lahend) lõikub isobaar antud isotermiga ainult ühes punktis, kusjuures lõikepunkti abstsiss ongi võrrandi reaalseks lahendiks, s. o. määrab mahu v. Sellele tingimusele vastavad kõik isotermid, millede temperatuur on kõrgem antud gaasi kriitilisest temperatuurist T_k. Isotermide puhul alla gaasi kriitilist temperatuuri lõikuvad näiteks null-isotermiga kõik isobaarid rõhkude p'' ja p' intervallis kolmes punktis. Näiteks isobaar *ba* (joon. 16) lõikub null-isotermiga punktides *b*, *c* ja *a*. Nendele punktidele vastavad mahud v_b, v_c ja v_a ongi null-isotermi puhul võrrandi lahenditeks. Reaalset väärtust omavad lahendid v_b ja v_a. Isobaaride p' ja p'' puhul omavad reaalset väärtust lõikepunktid *d* ja *s*. Väljsapool rõhkude intervalli p'—p'' lõikub null-isoterm isobaaridega ainult ühes punktis, allpool rõhku p'' ülekuumendatud auru piirkonnas ja pealpool rõhku p' vedeliku piirkonnas. Sel puhul annab võrrand ühe reaalse ja kaks komplekslahendit jne.

Jooniselt 16 nähtub, et temperatuuri tõusul allpool kriitilist temperatuuri lähenevad punktid *a*, *c* ja *b* pidevalt üksteisele ja ühtivad kriitilisel temperatuuril T_k punktis *k*. Selles punktis mahud

$$v_a = v_b = v_c = v_k .$$

Van der Waals'i koefitsiendid *a* ja *b* on avaldatavad gaasi kriitilise mahu v_k ja temperatuuri T_k kaudu. Selle seose leiame järgnevalt.

Algebrast on teada, et kui v_a, v_b ja v_c on mingi kuupvõrrandi lahendid siis on võrrand avaldatav tegurite kaudu kujul:

$$(v - v_a)(v - v_b)(v - v_c) = 0 .$$

Kriitilise punkti *k* jaoks avaldub sama võrrand järelikult

$$(v - v_k)(v - v_k)(v - v_k) = 0 ,$$

$$(v - v_k)^3 = 0 ;$$

avades sulud saame:

$$v^3 - 3v^2 v_k + 3vv_k^2 - v_k^3 = 0 . \qquad (a)$$

Asendame võrrandis (9) $p = p_k$ ja $T = T_k$, saame ta kujul:

$$v^3 - \left(b + \frac{RT_k}{p_k}\right) v^2 + \frac{a}{p_k} v - \frac{ab}{p_k} = 0 . \qquad (b)$$

Et võrrandid (a) ja (b) määravad üht ja sama kõvera punkti *k*, peavad koefitsiendid sõltumatu muutuja v võrdastmete juures olema võrdsed, s. o

$$3v_k = b + \frac{RT_k}{p_k} , \qquad (c)$$

$$3\,v_k^2 = \frac{a}{p_k}, \tag{d}$$

$$v_k^3 = \frac{ab}{p_k}. \tag{e}$$

Jagades võrrandi (e) võrdseid võrrandi (d) võrdsetega, saame koefitsiendi b jaoks avaldise

$$b = {}^1/_3 v_k. \tag{10}$$

Võrrandi koefitsiendi a arvutamiseks saame võrrandist (d), ilmutades viimase koefitsiendi a suhtes, s. o.

$$a = 3\,v_k^2 p_k. \tag{11}$$

Seose kriitiliste parameetrite v_k, p_k ja T_k vahel annab võrrand (c), kui selles asendame $b = \frac{1}{3}v_k$, s. o.

$$\frac{RT_k}{p_k} = 3\,v_k - b = 3\,v_k - \tfrac{1}{3}v_k = \tfrac{8}{3}v_k,$$

$$p_k v_k = \tfrac{3}{8}RT_k. \tag{12}$$

Seose koefitsientide a ja b ning T_k ja p_k vahel saame võrrandite (10), (11) ja (12) kaudu.

Asendame võrrandis $p_k v_k = \frac{3}{8}RT_k$ võrrandi (10) põhjal $v_k = 3b$, leiame, et

$$p_k \cdot 3b = \tfrac{3}{8}RT_k,$$

$$b = \tfrac{1}{8}\frac{RT_k}{p_k}. \tag{13}$$

Asendades võrrandis $a = 3v_k^2 p_k$, kriitilise mahu $v_k = 3b$, saame avaldise:

$$a = 3\,v_k^2 p_k = 3(3b)^2 p_k,$$

$$a = 27\,b^2 p_k. \tag{14}$$

Seose kriitilise temperatuuri T_k ja koefitsientide a ja b vahel leiame, kui võrrandis

$$bp_k = \tfrac{1}{8}RT_k$$

asendame kriitilise rõhu p_k tema avaldisega võrrandist (14), s. o.

$$b \cdot \frac{a}{27b^2} = \tfrac{1}{8}RT_k,$$

$$T_k = \frac{8}{27} \cdot \frac{a}{bR}. \tag{15}$$

Nagu selgub, ei esinda van der Waals'i võrrand ka täpset reaalsete gaaside termilise oleku võrrandit, eriti, nagu nägime, gaasi vedela ja niiske auru piirkondade jaoks. Gaasilise ehk ülekuumendatud auru piirkonna suhtes annab ta siiski enam-vähem rahuldavaid tulemusi. Vaatamata sellele omab van der Waals'i võrrand suurt teoreetilist tähtsust, sest ta annab tõepärasema ainete oleku muutuste skeemi.

Matemaatilistes arutlustes kasutatakse van der Waals'i võrrandit nn. taandatud kujul. Selleks asendatakse võrrandis parameetrid p, v ja T nn. taandatud parameetritega. Taandatud parameetriteks nimetatakse tavaliste parameetrite suhet samade parameetrite kriitiliste väärtustega, s. o.

$$\pi = \frac{p}{p_k}; \quad \varphi = \frac{v}{v_k}; \quad \vartheta = \frac{T}{T_k},$$

kus π on taandatud rõhk, φ — taandatud maht ja ϑ — taandatud temperatuur. Nendest suhetest järeldame, et taandatud parameetrite puhul on parameetrite mõõtühikuiks nende kriitilised väärtused, mis iga aine jaoks on nende individuaalseiks mõõtühikuiks. Sääraste individuaalsete mõõtühikute kaudu avaldatuna ei sõltu van der Waals'i võrrand enam ainest ja määrab seega omadusi, mis on kehtivad kõigile ainetele.

Van der Waals'i võrrandi taandatud kuju saame järgnevalt.

Suhteliste parameetrite avaldiste põhjal $p = \pi p_k$; $v = \varphi v_k$ ja $T = \vartheta T_k$.

Asendame võrrandite (10), (14) ja (15) põhjal

$$p_k = \frac{a}{27b^2}; \; v_k = 3b \text{ ja } T_k = \frac{8}{27} \cdot \frac{a}{bR};$$

saame

$$p = \frac{\pi a}{27b^2}; \quad v = 3b\varphi \text{ ja } T = \frac{8}{27} \cdot \frac{a\vartheta}{bR}.$$

Asendame nüüd van der Waals'i võrrandis

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)\left(v - b\right) = RT$$

parameetrid p, v ja T saadud avaldistega:

$$\left(\frac{\pi a}{27b^2} + \frac{a}{9b^2\varphi^2}\right)\left(3b\varphi - b\right) = R\frac{8}{27} \cdot \frac{a\vartheta}{bR},$$

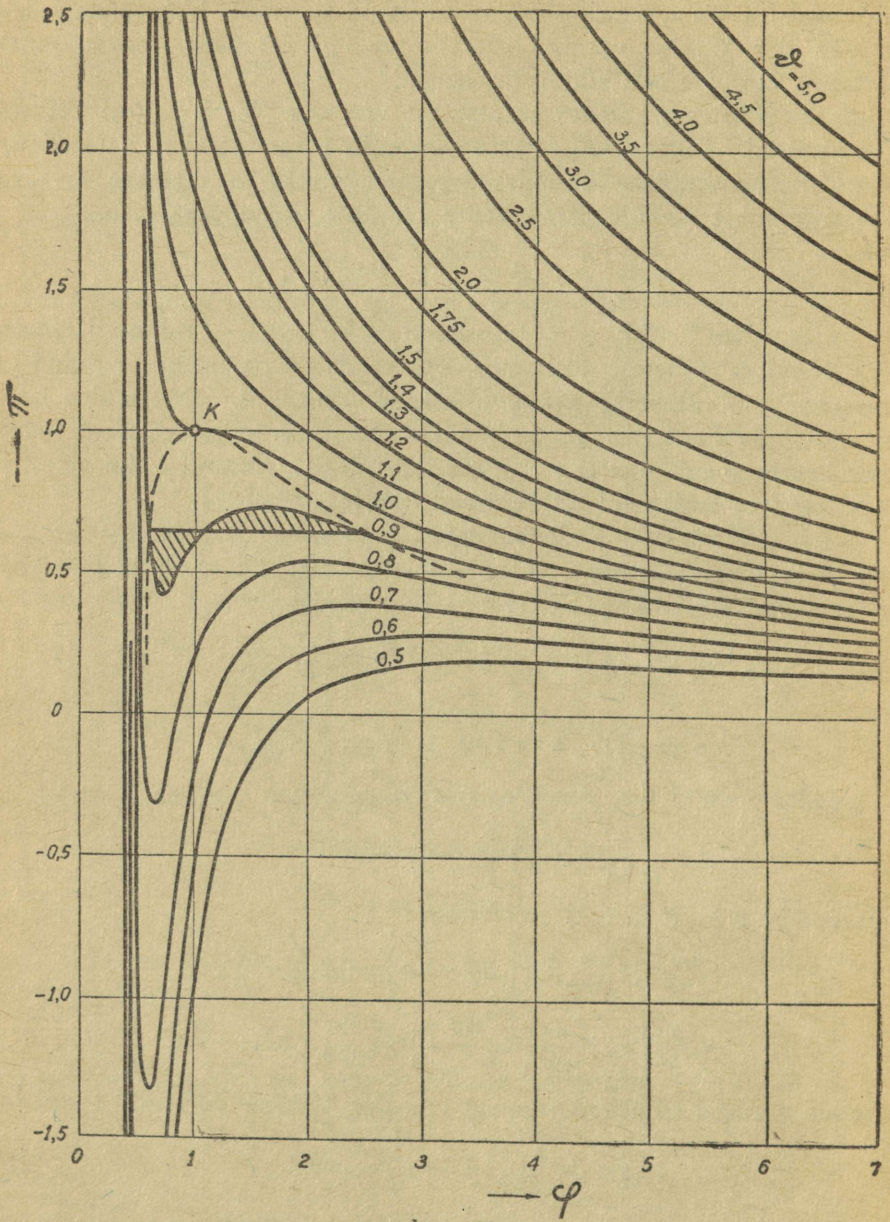
$$\frac{ab}{27b^2}\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)\left(3\varphi - 1\right) = \frac{a}{27b} \cdot 8\vartheta.$$

Taandades võrdsed suurused saamegi van der Waals'i võrrandi taandatud kujul:

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)\left(3\varphi - 1\right) = 8\vartheta. \tag{16}$$

Joonisel 17 on antud p-v-tasapinnal van der Waals'i taandatud võr-

randi järgi ehitatud isotermide võrk. See diagramm on teatud täpsusega kehtiv terve rea ainete, nagu hapniku, lämmastiku, õhu, süsihappegaasi, süsihapendi jne. jaoks.



Joon. 17.

4. M. P. VUKALOVITŠ'I VÕRRAND.

Van der Waals'i võrrand, vaatamata võrrandisse viidud korrektsioonliikmeile, mis karakteriseerivad reaalse gaasi omadusi, ei anna termiliste parameetrite vahelist seost siiski kujul, mis määraks nende parameetrite tõelisi suurusi gaasi igas olekus. Tõsi küll, paljude teadlaste poolt üksikute gaaside jaoks antud empiirilised võrrandid annavad tihti küllaltki täpseid arvutustulemusi, kuid nad ei ole üles ehitatud vastavalt aine molekulaaromadustele, mistõttu neil puudub reaalseid gaase haarav üldistav iseloom.

Püüe, anda reaalsete gaaside jaoks täpset üldistavat võrrandit, on põhjustanud van der Waals'i võrrandi edasist arendamist selles suunas. Ühe säärase töö on edukalt sooritanud Nõukogude Liidu teadlane prof. M. P. Vukalovitš. Ta on täiendanud van der Waals'i võrrandit gaasi molekulide assotsiatsiooni osas. Nimelt reaalsete gaaside puhul sõltuvalt gaasi olekust toimub „üksikute" molekulide pidev lühikesevälteline mehhaaniline (mitte keemiline) ühinemine suurteks molekulideks; seejuures moodustuvad kahe-, kolme- jne. kordsed molekulid või molekulide agregaadid, mis end avaldavad kui gaasi iseseisvad osakesed. See assotsiatsiooniprotsess põhjustabki reaalsetele gaasidele omaseid hälbeid van der Waals'i võrrandist.

Olgu mainitud, et eespooltähendatud reaalse gaasi molekulide „assotsiatsiooni" all mõistetakse nende mehhaanilist liitumist suurteks molekulideks, kusjuures arvatavasti ei toimu aatomite ümbergrupeerumist, nagu see esineb molekulide keemilisel ühinemisel, mistõttu üksikud molekulid selles „liitmolekulis" ei kaota oma individuaalseid omadusi. Küll aga võib saada piiratud üksikute molekulide mõni vabadusaste pöörlemise osas.

Esitatust on selge, et assotsiatsioonist tingituna väheneb gaasi olekutes üldine iseseisvate gaasiosakeste ehk molekulide arv, millega ühes väheneb ka gaasi rõhk.

Samast seisukohast lähtudes võib reaalset gaasi antud olekus vaadelda kui gaaside segu, mis koosneb ühe-, kahe-, kolme- jne. kordsetest molekulidest. Seda gaasisegu nimetatakse „van der Waals'i gaasiks". Märkides säärase gaasi ühes moolis sisalduva üksikmolekulide üldarvu tähisega N, võime ta liitunud molekulide arvu kaudu avaldada kujul

$$N = N_1 + 2N_2 + 3N_3 + \ldots + iN_i,$$

kus N_1, N_2, N_3 jne. on ühe-, kahe-, kolme- jne. kordselt liitunud molekulide arvud.

Järelikult, segu moodustavate samanimeliste liitmolekulide järgi on

Keskraamatukogu

gaasi segu komponentide moolkogused, nagu lihtne järeldada

$$\frac{N_1}{N}, \frac{N_2}{N}, \frac{N_3}{N}, \ldots \frac{N_i}{N} \ldots$$ [3]

Märkides edasi nende komponentide partsiaalrõhud tähistega $p_1, p_2 \ldots p_i \ldots$ ja ühe mooli mahu tähisega $\bar{v}$, võime üksikute komponentide suhtes avaldada ideaalse gaasi universaalse võrrandi kujul

$$p_1 \bar{v} = 848 \frac{N_1}{N} T,$$

$$p_2 \bar{v} = 848 \frac{N_2}{N} T,$$

$$p_i \bar{v} = 848 \frac{N_i}{N} T.$$

. . . . . .

Summeerides võrrandite võrdseid, saame

$$(p_1 + p_2 + \ldots + p_i + \ldots)\, \bar{v} = 848 \frac{\Sigma N_i}{N} T.$$

Jagades võrrandi võrdseid gaasi segu molekulaarkaaluga ja pidades silmas, et

$$p_1 + p_2 + \ldots + p_i + \ldots = p,$$

$$\frac{848}{\mu} = R \quad \text{ja} \quad \frac{\bar{v}}{\mu} = v,$$

saame

$$pv = \frac{\Sigma N_i}{N} RT.$$

Ideaalse gaasi puhul $\Sigma N_i = N$, mistõttu suhe

$$\frac{\Sigma N_i}{N} = 1.$$

Täiendades võrrandit van der Waals'i parandusliikmetega, saame ta reaalse gaasi jaoks kujul

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot \left(v - b\right) = \frac{\Sigma N_i}{N} RT. \qquad \text{(a)}$$

Selles võrrandis võib avaldist

$$\frac{\Sigma N_i}{N} R = R'$$

---

[3] $r_i = \frac{G_i}{G} \cdot \frac{\mu}{\mu_i} = \frac{i \cdot N_i}{N} \cdot \frac{\mu}{i \cdot \mu} = \frac{N_i}{N}$,

kus μ on üksiku molekuli molekulaarkaal ja μ_i on i-kordse molekuli molekulaarkaal, s. o. $\mu_i = i \cdot \mu$.

vaadelda kui reaalse gaasi konstanti. Järelikult annab oletatud assotsiatsiooniprintsiip võimaluse arvutada reaalse gaasi konstanti. Laskumata matemaatilistesse arvutustesse mainime, et prof. M. P. Vukalovitš määrab ühe-, kahe-, kolme- jne. kordsete molekulide arvu „van der Waals'i gaasis" reaktsioonide põhjal, mille sümboolsed avaldised on

$$\mathrm{I} + \mathrm{I} \rightleftarrows \mathrm{II},$$

$$\mathrm{I} + \mathrm{I} + \mathrm{I} \rightleftarrows \mathrm{III}$$

ehk

$$\mathrm{II} + \mathrm{I} \rightleftarrows \mathrm{III}.$$

Rakendades nendes reaktsioonides kahe-, kolme- jne. kordsete molekulide tekkimiseks tema enese poolt kehtestatud kujul mõjuvate masside seadust[4], saab ta vastava arvu võrrandeid, milledest N_1, N_2, N_3 jne. on määratavad kui temperatuuri funktsioonid.

Tehes võrrandis need asendused, annab ta võrrandi lõplikult kujul

$$pv = RT\left[1 - A(T)\frac{1}{v} - B(T)\frac{1}{v^2}\ldots\right], \qquad \text{(b)}$$

kus

$$A(T) = \frac{a}{RT} - b + \frac{C_{12}R}{T^{\frac{3+2m_2}{2}}},$$

ja

$$B(T) = \frac{bC_{12}R}{T^{\frac{3+2m_2}{2}}} - 4\cdot\left(1 - \frac{\frac{C_{13}}{C_{12}}}{T^{\frac{3m_3-4m_2}{2}}}\right)\cdot\left(\frac{C_{12}R}{T^{\frac{3+2m_2}{2}}}\right)^2\cdot\left(1+\frac{3b}{2}\right).$$

Funktsioonides $A(T)$ ja $B(T)$ esinevad konstandid m_2, m_3, C_{12} ja C_{13} on määratavad katseliselt.

Kasutades termodünaamilisi seoseid, annab prof. M. P. Vukalovitš võrrandi (b) põhjal võrrandid ka reaalse gaasi siseenergia, entalpia ja entroopia arvutamiseks.

Näiteks võrrand (b) veeauru jaoks avaldub kujul

$$pv = 47{,}053\,T - \frac{1}{v}\left\{\left(63{,}2 + \frac{10390{,}08}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}468}} - 0{,}04235\,T\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{v}\left[\frac{9{,}35107}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}468}} - \left(1 - \frac{21{,}5}{T^{0{,}5}}\right)\left(\frac{91786}{\left(\frac{T}{100}\right)^{5{,}936}}\right)\left(1 + \frac{0{,}0027}{v}\right)\right]\right\}.$$

[4] М. П. Вукалович и И. И. Новиков, Сборник работ Комиссии технической термодинамики.

Eespooltoodud printsiibil koostatud võrrandite põhjal on prof. M. P. Vukalovitši poolt koostatud veeauru tabelid [5]. Nendes tabelites veeauru parameetrites esinevad hälbed mahuvad viimasel, s. o. III rahvusvahelisel veeauru tabelite konverentsil 1934. a. vastuvõetud skelett-tabelite raamesse. Seega on prof. M. P. Vukalovitši poolt reaalsete gaaside üldise oleku teooria põhjal pandud alus veeauru funktsioonide ja termodünaamiliste parameetrite määramiseks.

5. REAALSETE GAASIDE JA AURUDE AGREGAATOLEKU MUUTUS.

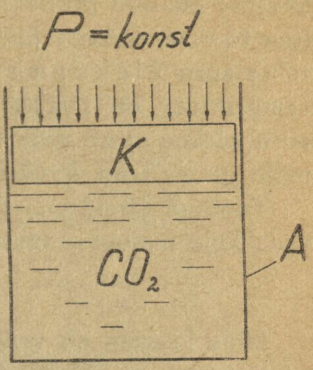
Iga aine, nagu teada, võib esineda kolmes agregaatolekus ehk kolmes erifaasis: tahkes, vedelas ja gaasilises. Ühes või teises faasis määravad oleku aine temperatuur, rõhk ja tema teised füüsikalised omadused. Peale oleku ühesainsas faasis, kus aine omab täiesti homogeenset struktuuri, võib ta esineda korraga kahes ja kolmes faasis. Sel puhul on aine struktuur heterogeenne, s. o. aine esineb korraga kahes või kolmes agregaatolekus, nagu tahkes ja vedelas, vedelas ja gaasilises, tahkes ja gaasilises, või korraga tahkes, vedelas ja gaasilises olekus.

Reaalne gaas on korraga kahes faasis nii aurustumise kui ka kondenseerumise protsessis. Siin toimub tema pidev üleminek vedelast faasist aurufaasi, kui protsessi juhitakse isotermiliselt välissoojust, ja aurufaasist vedelasse faasi, kui juhime protsessist soojust isotermiliselt eemale. Tuleb eristada vedeliku aurustumist ja keemist. Keemisprotsess esineb korraga kogu vedeliku koguses ja vedeliku õige väikesel ülekuumendamisel tekkiva auru temperatuuri suhtes. Samuti esineb auru kondenseerumine kahel kujul: kondenseerumine auru kvaasistaatilisel isotermilisel komprimeerimisel ja auru kondenseerumisel pindadele, millede temperatuur on madalam kondenseeruva auru temperatuurist, nagu see esineb tehnikas kasutatavais kondensaatoreis. Nii keemine kui ka pinnaline kondenseerumine ei ole kvaasistaatilised protsessid ja neid me siin vaatlusele ei võta. Need protsessid on käsitletavad termodünaamika, molekulaarse füüsika ja hüdromehhaanika seaduste põhjal ning kuuluvad vaatlusele soojusjuhtivuse teoorias.

Vaatleme lähemalt vedeliku aurustumise protsessi. Oletame, et mingis silindrilises anumas A (joon. 18) saab hõõrumisvabalt ja hermeetiliselt liikuda kolb K. Asetame selle kolvi alla mingisuguse vedeliku (CO_2), millele mõjub kolvi K kaudu konstantne rõhk $P=pF$ [kg], kus F on kolvi pindala ja

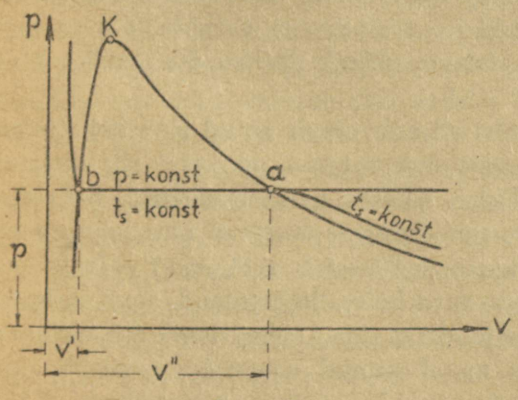
[5] Проф. М. П. Вукалович, „Термодинамические свойства водяного пара", Госэнергоиздат, 1946.

p kolvi pinnaühikule mõjuv rõhk, mis on väiksem antud gaasi või üldse aine kriitilisest rõhust p_k. Kuumendades seda vedelikku kvaasistaatiliselt võime nentida, et vedeliku temperatuur tõuseb ainult kuni teatava piirini ja jääb peale seda konstantseks, vaatamata soojuse pidevale juhtimisele vedelikku. Kuid samast momendist alates, mil vedeliku temperatuur muutub konstantseks, märkame, et kolb hakkab kerkima vedeliku pinnalt ülespoole, s. o. kolvialune ruum suureneb ja võib märgata ka vedeliku nivoopinna langemist. Kui aga laseksime kolvile peale tema ülespoole kerkimist mõjuda suuremal konstantsel rõhul, langeks kolb tagasi vedeliku pinnale, millega ühes teataval määral tõuseb ka vedeliku temperatuur (vt. veeauru T-s-diagrammilt). Soojuse edasisel protsessi juhtimisel hakkaks vedeliku temperatuur uuesti tõusma, kuni saabub jällegi moment, mil vedeliku temperatuuri tõus peatub ja kolb hakkab samaaegselt ülespoole tõusma.



Joon. 18.

Moment, mil vedeliku temperatuuri tõus peatub, vastab vedeliku aurustumise algmomendile. Sellest hetkest alates läheb protsessi juhitav soojus ainult vedeliku aurustamiseks. Auru, mis tekib aurustumisprotsessi kestel, nimetatakse *küllastunud niiskeks auruks* ehk lihtsalt *niiskeks auruks*, sest tema struktuur on heterogeenne, s. o. ta koosneb kuivast küllastunud aurust ja selles hõljuvatest väga väikestest vedeliku piisakestest. Temperatuuri, milles toimub vedeliku aurustumine, nimetatakse vedeliku *aurustumise temperatuuriks* ehk *aurustumise tasakaalu temperatuuriks*. Edaspidises käsitluses märgime seda temperatuuri tähisega t_s või T_s. p-v-diagrammil vastab aurustumise algmoment kolvile mõjuva isobaarilise rõhu p [ata] joone ja alumise piirkõvera lõikepunktile b (joon. 19).



Joon. 19.

Punktist b saavutab vedelik nn. aurustumise algoleku. Mõõtes kolvi all oleva vee ja auru temperatuuri selguks, et mõlemad temperatuurid on võrdsed ja jäävad sellisteks, kuni viimane vedeliku piisk on anuma põhjalt ära aurustunud. p-v-diagrammil vastab see moment isobaari p ja

ülemise piirkõvera lõikepunktile *a*. Selles olekus omab aur täiesti homogeenset struktuuri ja teda nimetatakse kuivaks küllastunud auruks. Soojuse edasisel protsessi juhtimisel hakkab kolvi all oleva auru temperatuur tõusma, millega ühes suureneb ka tema maht. Selles olekus nimetatakse auru ülekuumendatud auruks või gaasiks, kui tema kriitiline temperatuur on madalam tavalisest toatemperatuurist. Kuivas küllastanud auru olekus omab gaas või ülekuumendatud aur võimalikku vähimat mahtu, mille juures tema struktuur on veel homogeenne.

Toodust järeldame, et vedeliku aurustumistemperatuur on funktsioon vedelikule mõjuvast välisrõhust, s. o.

$$T_s = \varphi(p).$$

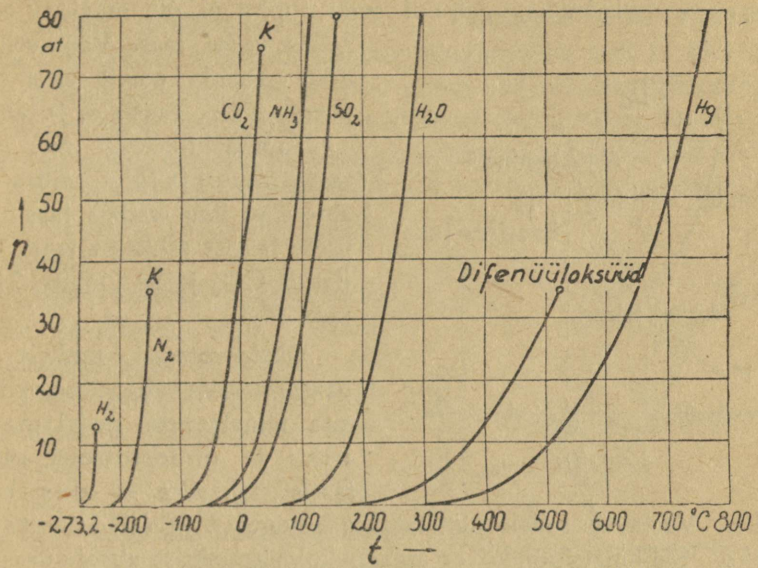
Mida kõrgem on vedelikule mõjuv rõhk, seda kõrgem on ka aurustumistemperatuur. Vastandiks aurustumisprotsessile on auru kondenseerumisprotsess, s. o. auru isobaar-isotermiline komprimeerimine. Näiteks, kui kolvi all olevat ülekuumendatud auru komprimeerime isobaariliselt sama kolvile mõjuva konstantse rõhuga, nagu esineb aurustumisprotsessis, siis auru temperatuur langeb, kuni aur saavutab kuiva küllastunud auru oleku (*p-v*-diagrammi punkt *a*). Isobaarilisel komprimeerimisel sellest olekust edasi muutub auru temperatuur konstantseks, millega ühes hakkab ka aur kondenseeruma, sadestudes anuma põhjale. See protsess kestab seni, kuni silindris olev aur on kõik veeldunud, s. o. kuni kolvi põhi puudutab veeldunud gaasi või aine nivood (*p-v*-diagrammi punkt *b*). Kui niiske auru piirkonnas anda kolvile teatav kindel asend ja see süsteem soojuslikult isoleerida, siis jäävad vedel ja auruline faas sellesse tasakaalu, mida nad omasid kolvi peatamise momendil, s. o. muutumatuks jäävad nii auru temperatuur kui ka rõhk ja vedelas ning gaasilises faasis oleva aine kogused.

Kui siiski oletada, et aurustumisprotsess selles süsteemis kestab edasi, mis ongi nii, siis samaaegselt vedeliku aurustumisega toimub ka auru kondenseerumine sellises ulatuses, et süsteem säilitab täieliku dünaamilise tasakaalu.

Kõik esitatu on kehtiv, kui kolvi all asus ainult antud aine küllastunud aur. Kui aga oletada, et enne aurustumisprotsessi on kolvi alla asetatud mingi neutraalne gaas, mis vedelikus ei lahustu, muutub olukord. Sel puhul algab kohe iseendast vedeliku aurustumisprotsess süsteemi omasoojuse arvel ilma välissoojust tarvitamata. Aurustumine kestab seni, kuni vedeliku aur saavutab süsteemi temperatuurile vastava kuiva küllastunud auru oleku ja rõhu. Ühes sellega on ka protsess jõudnud dünaamilise tasakaalu olekusse. Kolvi all aga on difusiooni tõttu moodustunud neutraalse gaasi ja auru mehhaaniline segu, milles auru küllastusrõhk esineb partsiaalrõhuna. Kolvi

all oleva gaasi ja auru segu üldine rõhk on võrdne auru ja gaasi partsiaalrõhkude summaga, mis tasakaalustab väljastpoolt kolvile mõjuva välisrõhu.

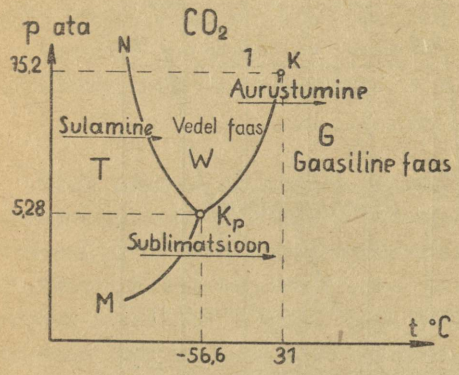
Seost küllastunud auru rõhu ja tasakaalu-temperatuuri t_s vahel näitab joonisel 20 antud p-t-diagramm.



Joon. 20.

Joonisel toodud kõverad määravad vastava aine jaoks need punktid p-t-tasapinnas, kus esineb vedeliku ja küllastunud auru kaksikfaas. Vasakul pool nn. tasakaalu-kõverat asub väli, milles kõvera poolt märgitud aine on vedelas faasis, paremal pool aga väli, kus aine omab homogeenset gaasilist faasi. Punktid k, kus kõverad katkevad, vastavad aine kriitilisele temperatuurile t_k ja kriitilisele rõhule p_k; ülalpool seda punkti, nagu varemalt juba tähendatud, ei saa enam eristada aine vedelat ega gaasilist olekut. Jooniselt nähtub, et küllastunud auru rõhk kasvab märksa kiiremini kui tasakaalu-temperatuur t_s. Kui liikuda tasakaalu-kõverast vasakule mööda mingit horisontaali, s. o. kui jahutame ainet tema vedelas faasis isobaariliselt, siis jõuame iga aine jaoks uude karakterpunkti, kus ta siirdub vedelast faasist tahkesse; s. o. punkti, kus ta külmub; liikudes aga p-teljelt paremale, jõuame säärasesse punkti, kus aine siirdub tahkest olekust ehk faasist vedelasse faasi. Seda punkti nimetatakse aine sulamispunktiks ja ta on üheselt määratav rõhust. Temperatuuri, milles aine sulab ja hangub, nimetatakse aine sulamis- ehk hangumistemperatuuriks. Kui pikendame aine sulamise

ja aurustumise tasakaalu-kõveraid, siis nad lõikuvad igale ainele omases karakterpunktis, nagu on näidatud joonisel 21 CO_2 jaoks. Selles punktis esineb aine korraga kolmes faasis igasuguses võimalikus suhtelises vahekorras. Seda punkti nimetatakse aine kolmikfaasi-punktiks ehk lihtsalt kolmikpunktiks. Gaasi olekut kolmikpunktis nimetatakse põhi- ehk fundamentaalolekuks. Allpool seda punkti ei ole mõeldav aine stabiilne vedel faas. Välja selles osas võib esineda ainult aine stabiilne auruline ehk gaasiline ja tahke faas.



Joon. 21.

Tasakaalu-kõver, mis määrab temperatuuri ja rõhu, milles toimub aine siire ilma vedela faasita gaasilisest faasist tahkesse faasi, on näidatud CO_2 jaoks joonisel 21 kõveraga K_pM.

Siirdeprotsessi tahkest faasist gaasilisse ilma vahepealse vedela faasita nimetatakse sublimatsiooniks ja siirdeprotsessi gaasilisest faasist tahkesse — desublimatsiooniks. Vastavalt sellele nimetatakse kõverat K_pM sublimatsioonikõveraks. Sublimatsioonikõver kulgeb kolmikpunktist absoluutsesse temperatuuri nullpunkti, nagu tõendavad katsed. Allpool kolmikpunkti-rõhku ei ole võimalik ühtegi gaasi veeldada. Teatava rõhu ja temperatuuri puhul, nagu seda määrab sublimatsioonikõver, võib gaas siirduda ainult gaasilisest olekust tahkesse olekusse.

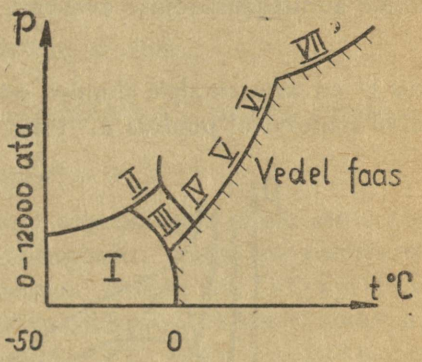
Aine aurustumis-, sulamis- ja sublimatsioonikõverad jagavad p-t-välja kolme ossa, nimelt: aurustumis- ja sublimatsioonikõverast paremal, väljal G, esineb aine gaasilises olekus; sublimatsiooni- ja sulamiskõverast vasakul, väljal T, esineb aine tahkes olekus; sulamis- ning aurustumiskõverast piiratud väljal W on aine vedelas faasis ehk olekus.

Joonisel 21* antud diagrammilt nähtub, et CO_2 saab stabiilses vedelas faasis olla ainult rõhkudel üle 5,28 ata. Näiteks temperatuuril + 20° C veeldub süsihape rõhul 58,5 ata. Kui samal temperatuuril lasta CO_2 hoideballoonist atmosfääri välja voolata, ei välju ta vedeliku, vaid gaasi kujul, sest rõhul 1 ata saab CO_2 esineda vaid gaasina (nagu see nähtub diagrammilt). CO_2 gaasistumine toimub väljavooluava juures intensiivse keemise kujul, millega ühes langeb ka gaasijuga ümbritseva õhu temperatuur pide-

* Joonis ei ole esitatud täpses mõõtkavas, vaid üldkujulises vormis.

valt kuni sublimatsiooni-temperatuurini, mis rõhul 1 ata on — 78° C. Kui gaasijoa ümbrus on saavutanud selle temperatuuri, hakkab CO_2 tahke valge ainena välja langema. Selles olekus nimetatakse CO_2 kuivaks jääks ja ta muutub uuesti gaasiks sel määral, nagu toimub ümbrusest soojuse juurdevool aurustumisprotsessi teostamiseks. Lahtises anumus, kus hoitakse „kuiva jääd", valitseb temperatuur — 78° C. Süsihapet selles agregaatolekus kasutatakse toitainete külmutusruumide jahutamiseks, sest ta siire gaasilisse olekusse tavalise temperatuuri ja rõhu puhul toimub ilma vahepealse vedela faasita, mis ruumide hooldamise seisukohast jne. pakub suuri mugavusi. Tavalise vee puhul toimub jää siire gaasi läbi vedela faasi, sest vee kolmikpunkti koordinaadid on rõhk 0,00623 ata ja temperatuur 0,0038° C, mille tõttu jahutusainena ta ei oma „kuiva jää" mugavusi.

Paljud ained omavad tahkes olekus kristallilist struktuuri, mille iseloom sõltub temperatuurist ja rõhust. Nii näiteks omab tavaline jää olenevalt temperatuurist ja rõhust seitse erinevat struktuuri.



Joon. 22.

Jää I, II, III, V, VI ja VII (IV olek on vaieldav) olek on näidatud diagrammil 22. I on tavaline jää ja omab veest väiksemat tihedust. Teised jääliigid on veest raskemad. Jääd VII nimetatakse kuumaks jääks. Tema olemasolu on jälgitud kuni temperatuurini + 190° C rõhul 40000 ata.

6. AINE FAASI MUUNDUMISE SOOJUS.

Aine faasi muundumise soojuseks nimetatakse soojust, mis läheb tarvis, et siirda ainet ühest faasist ehk agregaatolekust teise. Vastavalt faasimuutusele esinevad aurustumis-kondenseerumise, sulamis-hangumise ja sublimatsiooni-desublimatsiooni soojused. Need soojused antakse aine ühe kaaluühiku kohta, tehnilises termodünaamikas aine ühe kilogrammi kohta kilokalorites. Allpool vaatleme ainult aurustumis- ja kondenseerumis- ehk veeldumissoojust, mida nimetame üldiselt aurustumissoojuseks ja märgime tähisega r. Märgime aine kilomahu ja siseenergia alumisel piirkõveral tähistega v' ja u', ülemisel piirkõveral aga samal isobaaril v'' ning u'' (vt. joon. 23).

Arvesse võttes, et aurustumisprotsess toimub isobaar-isotermiliselt, võime

termodünaamika esimese seaduse põhjal avaldada aurustumissoojuse r soojusvõrrandi $q = u_2 - u_1 + AL$ põhjal kujul

$$r = u'' - u' + Ap(v'' - v') \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{17}$$

kus p on aurustumisprotsessi rõhk. Avaldis $p(v'' - v')$ on väline mehhaaniline töö, mida tekkiv aur sooritab aurustumisprotsessi isobaarilisel mahumuutusel alumisest piirkõverast kuni ülemise piirkõverani, nagu on näidatud joonisel 23.

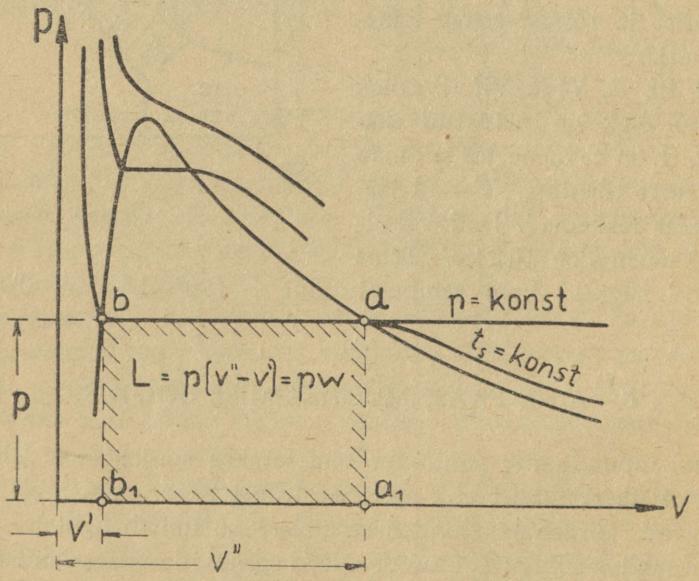
Soojusvõrrandi $q = i_2 - i_1 - A\int_{v'}^{v''} vdp$ põhjal, mis isobaarilise protsessi jaoks avaldub

$$q = i_2 - i_1,$$

võime aurustumissoojuse avaldada ka alljärgnevalt:

$$r = i'' - i', \tag{18}$$

kus i' on aine entalpia alumisel piirkõveral punktis b ja i'' — entalpia ülemisel piirkõveral punktis a. Neist soojusvõrrandeist nähtubki juba selgelt



oon. 23.

aurude erinevus ideaalsetest gaasidest. Ideaalsete gaaside puhul jäid isotermilises protsessis nii entalpia kui ka siseenergia muutmatuks. Aurude puhul aga muutuvad siseenergia ja entalpia isotermilises protsessis, nimelt suureneb aurustumisprotsessis auru siseenergia. Siseenergia suurenemine on vaja-

lik, et molekulid saavutaksid nii suure kiiruse, mis võimaldab neil eemalduda vedeliku molekulide mõjusfääri ulatusest, s. o. aurustumisprotsessis esinev siseenergia muutus esitab auru molekulaarsidestusjõudude ületamiseks tarbitavat nn. disgregatsioonitööd. Selle töö sooritamiseks vajalik energia on seda suurem, mida suurem on auru maht $(v'' - v')$, s. o. mida väiksem on aurustumisrõhk p.

Võrrandi aurustumissoojuse jaoks annab vahetult ka soojuse diferentsiaalvõrrand (105, I), s. o.

$$dq = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + Ap\right] dv.$$

Arvesse võttes, et aurustumissoojus antud protsessis on ainult mahu funktsioon või et aurustumisprotsessis $T = konst$, võime võrrandi selle juhu jaoks avaldada kujul:

$$dr = \left(\frac{du_T}{dv_T} + Ap\right) dv_T = du_T + Apdv_T.$$

Teostades integreerimist mahust v' kuni mahuni v'', saamegi võrrandi r jaoks, s. o.

$$r = u'' - u' + Ap(v'' - v').$$

Soojusvõrrandist nähtub, et osa aurustumissoojusest läheb auru siseenergia muutmiseks ja osa välistöö sooritamiseks. Seda osa aurustumissoojusest, mis läheb siseenergia muutmiseks, nimetatakse sisemiseks aurustumissoojuseks ning märgitakse tähisega ϱ. Välistöö sooritamiseks minevat aurustumissoojuse osa nimetatakse väliseks aurustumissoojuseks ja märgitakse tähisega ψ. p-v-diagrammil ψ avaldub mehhaanilise töö ühikutes pindalaga a_1abb_1. Toodud mõistete kohaselt võime aurustumissoojuse avaldada ka kujul

$$r = \varrho + \psi.$$

Aurustumise osasoojused ϱ ja ψ avalduvad:

$$\varrho = u'' - u', \tag{19}$$

$$\psi = Ap(v'' - v') = Apw, \tag{20}$$

kus $w = v'' - v'$.

Näiteks kuiva küllastunud auru tabelist raamatu lõpus leiame, et rõhul 20 ata

$$v' = 11{,}751 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^3/kg},\quad v'' = 1016 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^3/kg},\quad r = 452{,}7\ \mathrm{kcal/kg}.$$

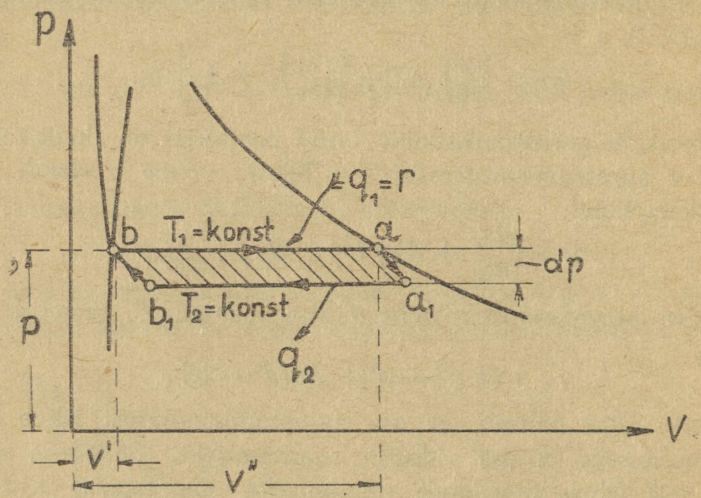
$$\psi = \frac{20 \cdot 10^4}{427}\ (1016 - 11{,}751) \cdot 10^{-4} = 47{,}0\ \frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}},$$

$$\varrho = r - \psi = 452{,}7 - 47{,}0 = 405{,}7\ \frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}}.$$

Samad suurused ψ ja ϱ jaoks on antud ka samas tabelis.

7. CLAPEYRON-GLAUSIUS'E VÕRRAND.

Clapeyron-Clausius'e võrrand seob aurustumissoojuse r aine oleku parameetritega T, p ja v. Võrrand on tuletatav niiske auru piirkonnas piirkõverate vahel teostatava elementaarse Carnot' ringprotsessiga. Nimelt võtame niiske auru piirkonnas piirkõverate vahel ükskõik millise isotermi



Joon. 24.

T_1 (joon. 24) ja temast kaugusel dp isotermi T_2. Ehitades piirkõverate punktidest a ja b adiabaadid aa_1 ning bb_1, saame elementaarse Carnot' ringprotsessi aa_1b_1b.

Selles ringprotsessis sooritatud mehhaaniline töö avaldub

$$\Delta L = (v'' - v')\, dp,$$

sest pindala aa_1b_1b võib vaadelda kui parallelogrammi, mille kõrgus on võrdne dp-ga. Selle ringprotsessi termiline kasutegur avaldub

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Antud juhul

$$q_1 = r,$$

$$q_1 - q_2 = A\,(v'' - v')\, dp,$$

$$T_1 - T_2 = dT.$$

Tehes need asendused termilise kasuteguri võrrandis, saame moodustada võrde

$$\frac{A\,(v''-v')\,dp}{r}=\frac{dT}{T},$$

kust leiame, et

$$A\,(v''-v')\,dp=r\frac{dT}{T},\quad \frac{r}{v''-v'}=AT\frac{dp}{dT}. \tag{21}$$

Saadud võrrandit nimetataksegi Clapeyron-Clausius'e ehk Thomson-Clapeyron'i võrrandiks. Sellest võrrandist on võimalik arvutada aurustumissoojust r, kui on katseliselt määratud aurustumisprotsessis esinev mahumuutus $(v''-v')$ mitmesuguse aurustumise temperatuuri jaoks ja kui on antud aine jaoks teada ka auru küllastusrõhu kõver, s. o. funktsioon $p=\varphi(T)$. Kui aga katseliselt on teada aurustumissoojus r, siis saame arvutada mahumuutuse $(v''-v')$. Clapeyron-Clausius'e võrrand on rakendatav ka ainete sulamissoojuse arvutamiseks jne.

Võrrandist (21) järeldub, et tuletise $\frac{dp}{dT}$ märgi määrab liige $(v''-v')$. Kui $(v''-v')$ on negatiivne, mis võib esineda, kui aine maht tahkes faasis on suurem tema mahust vedelas faasis (jää), siis esineb rõhu tõusul sulamistemperatuuri langus, sest sel puhul $+dp$ vastab $-dT$. Näiteks jää sulamissoojus $r'=79{,}67$ kcal/kg; $v''=1{,}0002\cdot10^{-3}$ m³/kg $v'=1{,}0912\cdot10^{-3}$ m³/kg. Järelikult $v''-v'=(1{,}0002-1{,}091)\cdot10^{-3}=-0{,}091\cdot10^{-3}$ m³/kg. Võrrandi (21) järgi selle juhu jaoks

$$\frac{dT}{dp}=\frac{(v''-v')\,AT}{r'}=\frac{0{,}091\cdot10^{-3}\cdot273}{427\cdot79{,}67}=-0{,}00073\cdot10^{-3}\ \frac{^\circ C}{kg/m^2}$$

ehk

$$\frac{dT}{dp}=-0{,}00073\cdot10332\cdot10^{-3}=-0{,}0075\ \frac{^\circ C}{Atm},$$

s. o. rõhu tõusul ühe füüsikalise atmosfääri võrra langeb jää sulamistemperatuur 0,00754° C võrra. Järelikult, et jää sulamistemperatuuri viia madalamaks 1° C võrra, peame rõhku suurendama ~ 133 atmosfääri võrra. Rõhu muutuse säärase väikese mõju tõttu jää sulamistemperatuurile ei ole vajadust termomeetrite normimisel teha rõhust tingitud korrektsiooni.

Näide: Tina (Pb) sulamistemperatuur on 600° K, sulamissoojus $r'=5{,}37$ kcal/kg ja mahumuutus $v''-v'=0{,}03076\cdot10^{-3}$ m³/kg. Sel puhul

$$\frac{dT}{dp}=\frac{(v''-v')\,AT}{r'}=\frac{0{,}03076\cdot10^{-3}\cdot600}{427\cdot5{,}37}=$$

$$=0{,}00805\cdot10^{-3}\ \frac{^\circ C}{kg/m^2}$$

ja ühe Atm kohta

$$\frac{dT}{dp} = 0{,}00805 \cdot 10^{-3} \cdot 10332 = 0{,}083 \ \frac{°C}{Atm}.$$

Järelikult rõhu tõusul 1 Atm võrra tõuseb tina sulamistemperatuur $+0{,}083°$ C võrra.

Clapeyron-Clausius'e võrrandi saab avaldada ka integreeritud kujul, kui oletame, et v' võrreldes v''-ga on niivõrd väike, et võime ta arvutustes lugeda nulliks ja et aur allub ideaalse gaasi võrrandile $pv = RT$, s. o. oletame, et $v'' = \frac{RT}{p}$.

Ilmutame võrrandi (21) r suhtes

$$r = AT\,(v'' - v')\,\frac{dp}{dT}.$$

Võtame $v' = 0$ ja asendame $v'' = \frac{RT}{p}$ saame:

$$r = \frac{AT \cdot RT}{p}\,\frac{dp}{dT} = AR\,\frac{T^2}{dT}\,\frac{dp}{p}.$$

Sellest võrrandist leiame, et

$$\frac{dp}{p} = \frac{r}{AR}\,\frac{dT}{T^2}.$$

Kui temperatuuride intervall on väike, võime oletada, et $r = konst.$ Teostades selle tingimuse kohaselt võrrandi integreerimise p_1 kuni p_2 ja T_1 kuni T_2, saame:

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{r}{AR}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right),$$

$$\log \frac{p_2}{p_1} = \frac{r}{2{,}3026\ AR}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right). \qquad (22)$$

Korrutades ja jagades võrrandi paremat poolt antud aine molekulaarkaaluga ja pidades silmas, et korrutis $AR\,\mu \cong 1{,}987$, saame võrrandi lihtsustatuna kujul:

$$\log \frac{p_2}{p_1} = \frac{r \cdot \mu}{4{,}575}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \qquad (23)$$

ehk

$$\log p_2 - \log p_1 = \frac{r \cdot \mu}{4{,}575}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right). \qquad (24)$$

Selle võrrandi kaudu on arvutatav antud temperatuuri-intervallile vastav aurustumissoojus, kui on katseliselt määratud rõhkude suhe $\frac{p_2}{p_1}$, või kui

on teada aurustumissoojus, saame arvutada rõhkude suhet $\frac{p_2}{p_1}$. Tehtud oletuse kohaselt on võrrand rakendatav väikeste temperatuuri-intervallide jaoks.

Toome näite Clapeyron-Clausius'e diferentsiaalvõrrandi kasutamise kohta vee aurustumissoojuse arvutamiseks.

Katsega on määratud, et vastavalt temperatuurile ja rõhule küllastunud auru maht $v'' - v' = \Delta v$ on

t_s °C		Δv m³/kg		p mm Hg	Δp mm Hg	
50	—	12,05	—	92,7	25,7	28,3
55	—	9,58	—	118,4	30,9	
60	—	7,68	—	149,3		

Arvutame aurustumissoojuse vastavalt 55° C. Antud juhul oletame et

$$\frac{dp}{dT} \approx \frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{28{,}3 \cdot 13{,}595}{5} = 76{,}95 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \ ^\circ\text{C}},$$

kus arv 13,595 on rõhk mm Hg ühikutes kg/m².

Võrrandi (21) põhjal

$$r = AT\,(v'' - v')\,\frac{dp}{dT} = \frac{1}{427} \cdot 328 \cdot 9{,}58 \cdot 76{,}95 = 566{,}2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Tabeli andmete järgi $r = 566{,}1$ kcal/kg.

Võrrandi (23) järgi on vee aurustumissoojus temperatuuri-intervallis 50° kuni 60°:

$$\log \frac{p_2}{p_1} = \frac{\mu r}{4{,}575} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

kust leiame, et

$$r = \frac{4{,}575 \cdot T_1 \cdot T_2}{\mu\,(T_2 - T_1)} \log \frac{p_2}{p_1} =$$

$$= \frac{4{,}575 \cdot 323 \cdot 333}{18 \cdot 10} \log \frac{149{,}3}{92{,}7} = 566 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

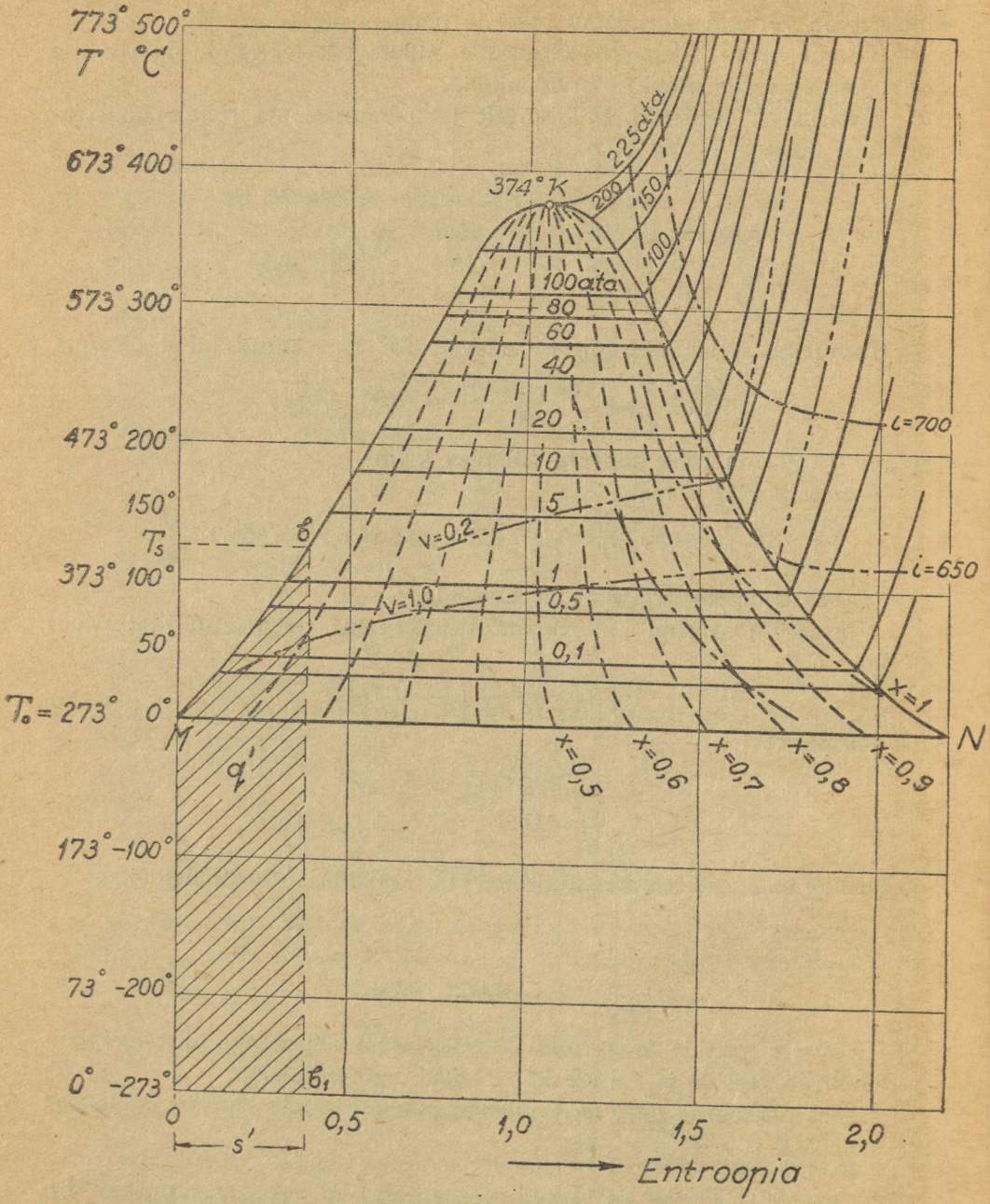
566 kcal/kg on antud temperatuuri-intervalli keskmine aurustumissoojus.

8. T-s-DIAGRAMM.

Reaalsete gaaside ja aurude T-s-diagramm allpool kriitilist temperatuuri hõlmab gaaside ja aurude kõiki kolme agregaatolekut.

Selles piirkonnas on T-s-diagrammi põhikõverateks alumine ja ülemine piirkõver MK ja KN (joon. 25).*

* Joonisel on esitatud T-s-diagramm vee ja tema auru jaoks. Ka edaspidised diagrammid antakse samuti veeauru jaoks.


773° 500°
T °C
673° 400°
573° 300°
473° 200°
150°
T_s
373° 100°
50°
T_o = 273° 0°
173° -100°
73° -200°
0° -273°
374° K
225 ata
200
150
100
100 ata
80
60
40
20
10
5
1
0,5
0,1
v=0,2
v=1,0
i=700
i=650
x=1
x=0,5
x=0,6
x=0,7
x=0,8
x=0,9
M
N
q'
6
6_1
0
s'
0,5
1,0
1,5
2,0
Entroopia

Joon. 25.

Piirkõveratest piiratud väljal on isobaarid ja isotermid entroopia teljega rööpsed sirged, sest aurustumisprotsessis on temperatuur ja rõhk jäävad suurused. Isohoorid selles piirkonnas esinevad üldiselt kõverjoontena. Ülemisel piirkõveral murduvad isobaarid ja isohoorid ja kulgevad ülekuumendatud auru piirkonnas sarnaselt kõveratega, mis esinevad ideaalsete gaaside puhul, kusjuures isohooride tõus on suurem isobaaride tõusust. Peale isotermide, isobaaride ja isohooride kantakse T-s-diagrammile vahel veel i ja $u = konst$-kõverad.

Entroopia väärtused alumisel piirkõveral, kõrgemal kolmikpunktist, määravad vedeliku entroopia muutuse kuumendamisel entroopia leppelisest nullnivoost kuni vedeliku aurustumistemperatuurini, vastavalt rõhule. Entroopia väärtused allpool kolmikpunkti alumisel piirkõveral, olenevalt entroopia nullnivoo valikust, määravad aine entroopia muutuse kuumendamis- või jahutamisprotsessis entroopia nullnivoost kuni antud rõhule vastava sublimatsiooni-temperatuurini.

Märkides ühe kilogrammi vedeliku erisoojuse kuumendamisprotsessis tähisega c' ja entroopia muutuse nullnivoost kuni vedeliku aurustumistemperatuurini, s. o. alumise piirkõverani, tähisega s' (vt. joon. 26), võime ta avaldada võrrandiga:

$$s' = \int_{T_o}^{T_s} c' \frac{dT}{T}, \qquad \text{(a)}$$

kus T_o on vedeliku absoluutne temperatuur entroopia nullnivool ja T_s — antud rõhule vastav vedeliku aurustumistemperatuur. Vedeliku kuumendamisprotsessi oletame teostuvat mööda p-v-diagrammil määratud alumist piirkõverat, s. o. muudame pidevalt vedelikule mõjuvat rõhku ja protsessi juhitavat soojushulka nii, et vedelik asuks pidevalt aurustumisprotsessi algpiiril kuni aurustumisrõhuni. Teades kuumendamisprotsessi erisoojuse funktsionaalset sõltuvust aine oleku parameetritest, saame võrrandi (a) põhjal ehitada alumise piirkõvera MK. Temperatuuride piirkonnas märksa allpool kriitilist temperatuuri on alumine piirkõver T-s-diagrammil kaunis lähedane isobaariga, omades viimasest veidi suuremat tõusu. Lähenedes kriitilisele temperatuurile, hakkab alumise piirkõvera tõus kiiresti vähenema, muutudes nulliks kriitilises punktis K, s. o. punktis K on puutuja piirkõverale rööpne entroopiateljega. Piirkõvera säärane tõusumuutus on tingitud protsessi erisoojuse c' kiirest kasvamisest lähenemisega kriitilisele temperatuurile. Kriitilises punktis saab erisoojus c' lõpmatuks, sest selles punktis on puutuja rööpne entroopia teljega, millest tingituna puutuja alus, mis, nagu teada, avaldab T-s-diagrammil protsessi erisoojust, muutub samuti lõpmatu suureks.

Alumise piirkõvera alune pindala $OMbb_1$ temperatuurist T_0 kuni temperatuurini T_s on võrdne soojushulga q'-ga, mis on vajalik, et vedeliku temperatuuri mööda piirkõverat tõsta entroopia nullnivoo temperatuurist T_0 kuni antud rõhule p vastava aurustumistemperatuurini T_s. Seda soojushulka nimetatakse vedeliku kuumendamissoojuseks ja märgitakse ka edaspidises käsitluses tähisega q'.

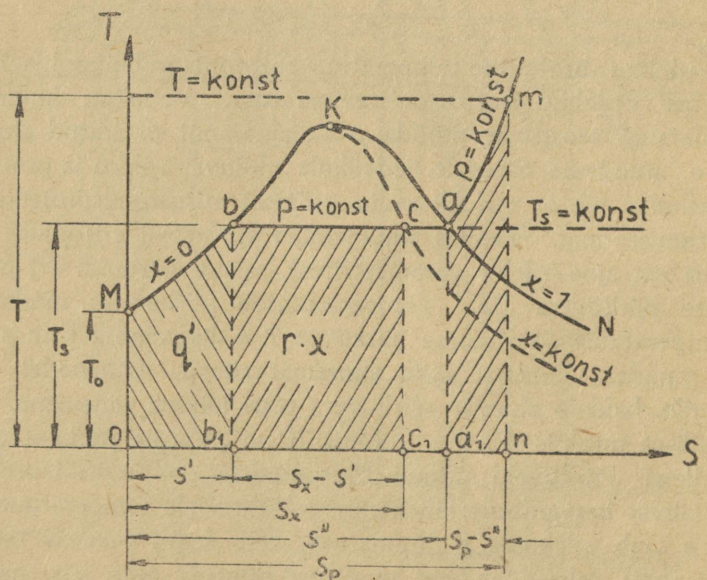
Vedeliku isobaariline aurustumisprotsess alumisest piirkõverast kuni ülemise piirkõverani on ühtlasi isotermiline protsess. Entroopia muutus selles protsessis on arvutatav vedeliku aurustumissoojuse r ja aurustumistemperatuuri T_s kaudu. Märkides kuiva küllastunud auru entroopia, s. o. entroopia muutuse nullnivoost kuni ülemise piirkõverani, tähisega s'', võime vedeliku aurustumisprotsessis entroopia muutuse avaldada kujul:

$$s'' - s' = \frac{r}{T_s} \frac{\text{kcal}}{\text{kg°C}} \tag{25}$$

ehk, arvates entroopia nullnivoost

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s} \frac{\text{kcal}}{\text{kg°C}} . \tag{26}$$

Entroopia muutuse aurustumisprotsessi ükskõik millise punkti c jaoks leiame aurustumissoojuse r omaduse alusel, et ta on võrdeline aurustunud vedeliku kaalulise kogusega. Märkides punktis c aurustunud vedeliku kaalulise



Joon. 26.

koguse, s. o. kuiva küllastunud auru kaalulise koguse, kilogrammides tähisega x, avaldub aurustumisprotsessiks bc tarbitud soojushulk $r_x = rx$ kcal/kg. Vastavalt sellele soojushulgale entroopia muutus s_x nullnivoost kuni punkti c on:

$$s_x = s' + \frac{rx}{T_s}. \tag{27}$$

Suurust x nimetatakse küllastunud niiske auru kuivusastmeks ehk aurusisaldavuseks ja avaldist $(1-x)$ auru niiskusastmeks ehk niiskusesisaldavuseks. Niiske auru piirkonnas on x alati väiksem kui üks ja muutub nullist kuni üheni, omades nullväärtust alumisel ja väärtust $x = 1$ ülemisel piirkõveral. *T-s*-diagrammi niiske auru piirkonda kantakse alati $x = konst$-kõverad, nagu see nähtub jooniselt 25. $x = konst$-joonte kandmiseks *T-s*-diagrammile jagame niiske auru piirkonna isoterm-isobaarjooned võrdseteks kümnendosadeks. Ühendades nii saadud punktid siledate kõveratega, saamegi $x = konst$-joonte võrgu; $x = konst$-joonte võrgu tihedus sõltub diagrammi mõõtkavast.

T-s-diagrammil avaldab aurustumisprotsessi ab joonealune pindala aa_1b_1b aurustumissoojust r ja pindala bcc_1b_1 — aurustumissoojust rx.

Alates ülemisest piirkõverast soojuse protsessi juhtimisel siirdub protsess ülekuumendatud auru piirkonda. Seda protsesssi nimetatakse auru ülekuumendamiseks.

Entroopia muutus ülekuumendatud auru piirkonnas isobaarilises protsessis avaldub ideaalsete gaaside isobaarilise protsessi võrrandiga:

$$s_p - s'' = \int_{T_s}^{T} c_p \frac{dT}{T} \tag{28}$$

ehk

$$s_p = s'' + \int_{T_s}^{T} c_p \frac{dT}{T}, \tag{29}$$

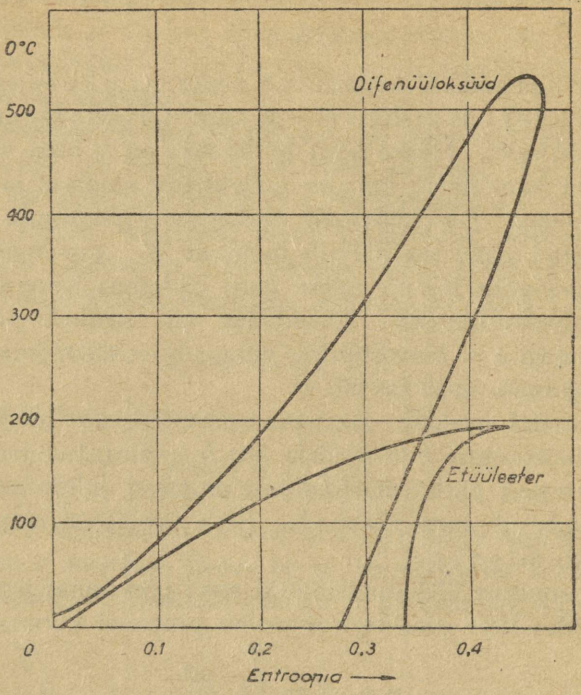
kus s_p on ülekuumendatud auru entroopia ülekuumendustemperatuuril T, s'' — aurustumistemperatuurile T_s vastav kuiva küllastunud auru entroopia ja c_p — ülekuumendatud auru isobaariline erisoojus kcal/kg°C.

Pindala $amna_1$, mis asub allpool isobaari am, avaldab auru ülekuumendussoojust. See soojushulk on võrdne ülekuumendatud auru entalpia muutusega ülemise piirkõvera punktist a kuni punktini m ja avaldub võrrandiga

$$i - i'' = \int_{T_s}^{T} c_p dT = c_{pm}(T - T_s), \tag{30}$$

kus i on ülekuumendatud auru entalpia nullnivoost kuni ülekuumendus-punktini m ja i'' — temperatuurile T_s vastava kuiva küllastunud auru entalpia, arvates samast nullnivoost.

Ülemise piirkõvera kuju oleneb otseselt aine aurustumissoojuse r muutusest vastavalt aurustumistemperatuurile. Joonisel 27 on näidatud difenüül-



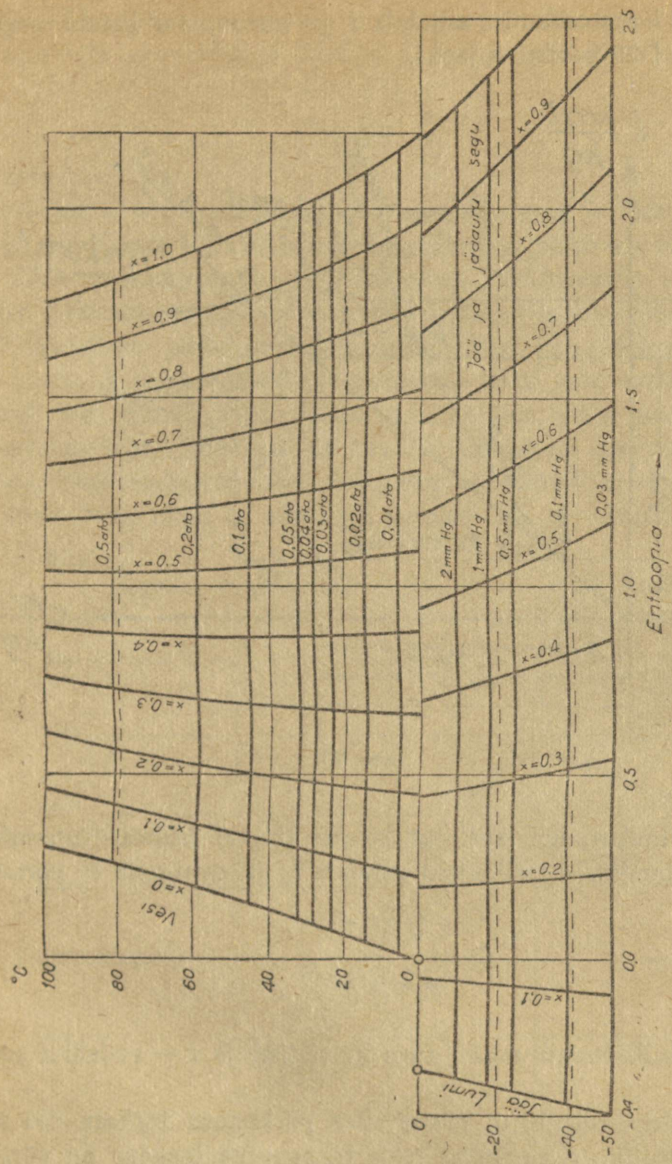
Joon. 27.

oksüüdi ($C_{12}H_8O$) ja etüüleetri [$(C_2H_5)_2O$] piirkõverate kujud. Jooniselt 27 nähtub, et vastandina veele suureneb nende ainete küllastunud niiske auru kuivusaste adiabaatilisel paisumisel ja võib isegi esineda ülekuumenemine. Nendel aurudel on ülemise piirkõvera puutuja-alused, vastandina veeaurudele, positiivsed, mis tähendab, et temperatuuri langedes peame kuiva küllastunud auru alalhoidmiseks soojust protsessist eemale juhtima. Aurude säärane omadus on tähtis aurumasinate tööprotsessis ja viimasel ajal on need aurud uurimuste objektiks aurumasinate ja jahutusseadmete töötava kehana.

Joonisel 28 on näidatud vee T-s-diagramm, mis hõlmab ka kolmikpunkti K_p. Jooniselt nähtub, et jääfaasi alumine piirkõver on nihkunud vedela faasi alumisest piirkõverast vasakule

$$\frac{r'}{273} = \frac{79{,}67}{273} = -0{,}3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg°C}}$$

võrra, mis vastab jää sulamise entroopia muutusele. Allpool kolmikpunkti temperatuuri $x = konst$-kõverad määravad jää ja jääauru suhtelist vahekorda.

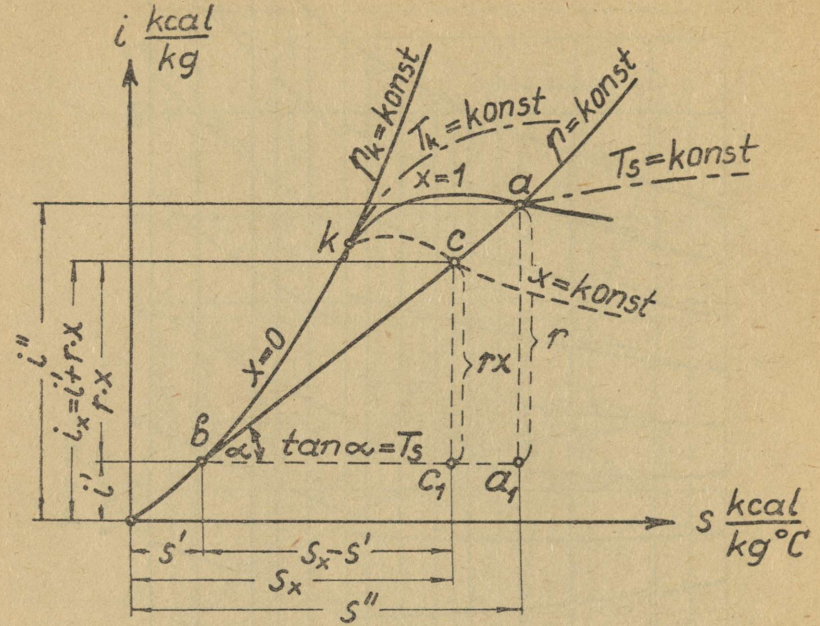


Joon. 28.

9. *i-s*-DIAGRAMM.

Sel diagrammil kantakse ordinaatteljele entalpia mõõtkava ja abstsisssteljele entroopia mõõtkava. *i-s*-diagrammil koordineeritakse alumine piirkõ-

ver vedeliku kuumendamise entalpia i' ja entroopia s' kaudu, nagu on näidatud joonisel 29 punkti b jaoks.



Joon. 29.

Niiske küllastunud auru piirkonnas (H_2O) isobaar-isotermilise protsessi mingis punktis c avalduvad entalpia i_x ja entroopia s_x võrranditega

$$i_x = i' + rx, \tag{31}$$

$$s_x = s' + \frac{rx}{T_s},$$

kus x on küllastunud niiske auru kuivusaste ja r — vedeliku aurustumissoojus.

Võrrandeist selgub, et niiske auru piirkonnas isobaar, mis ühtlasi on isotermiks, avaldub sirgjoonena, mille tõusunurga tangens on võrdne vedeliku aurustumistemperatuuriga T_s, sest

$$\tan\alpha = \frac{\partial i}{\partial s} = \left(\frac{\partial i}{\partial s}\right)_T = \frac{d\,(i' + rx)}{d\left(s' + \frac{rx}{T_s}\right)} = \frac{d\,(rx)}{d\left(\frac{rx}{T_s}\right)} = T_s,$$

mis nähtub ka jooniselt 29.

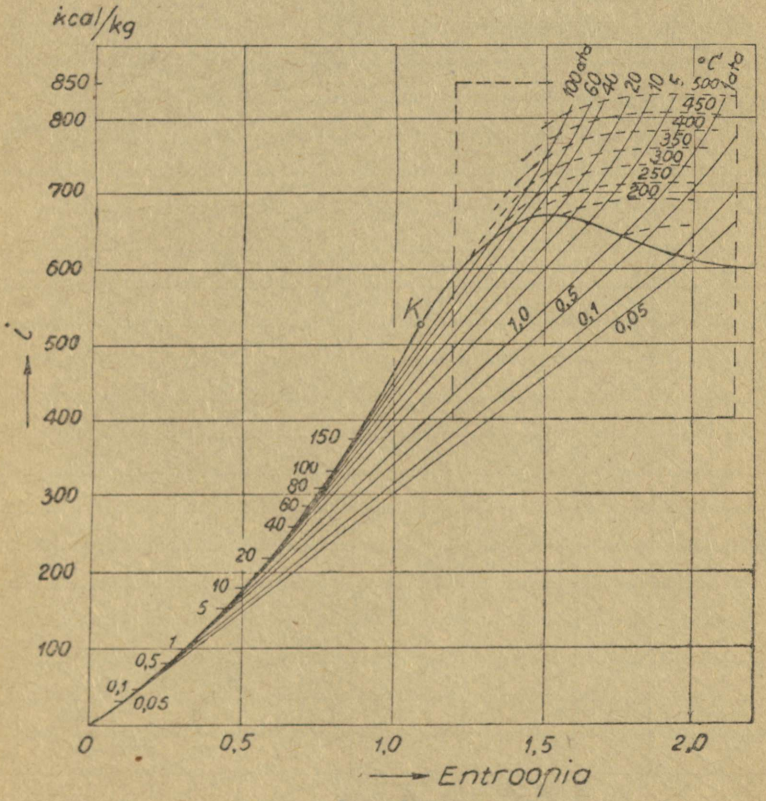
Kuiva küllastunud auru jaoks, s. o. isobaar-isotermi ja ülemise piirkõvera lõikepunktis *a*, avalduvad entalpia *i″* ning entroopia *s″*

$$i'' = i' + r, \tag{32}$$

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s},$$

sest sel puhul $x = 1$.

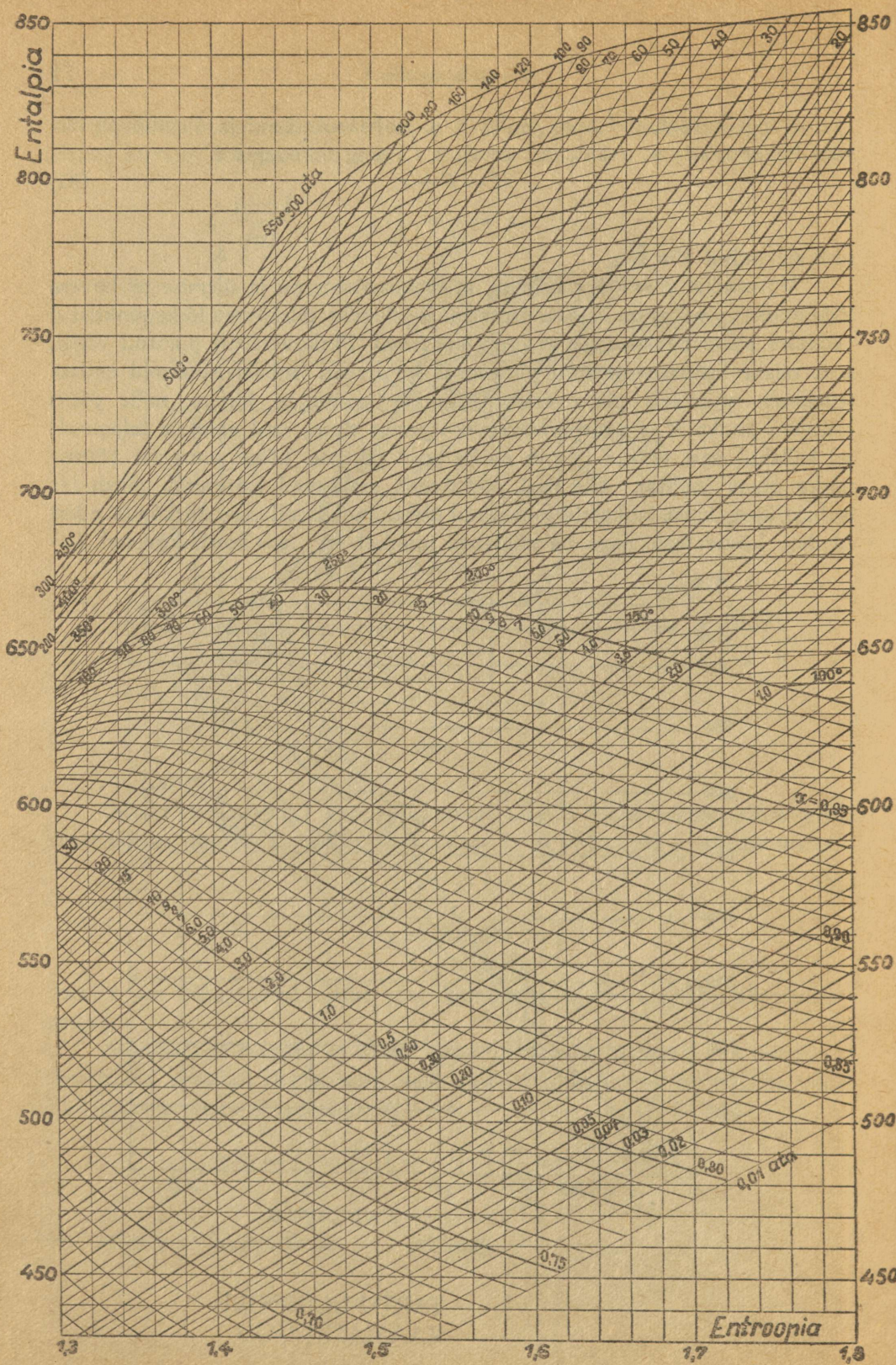
Võrrandist $i'' = i' + r$ nähtub, et isobaar-isotermi ja ülemise piirkõvera lõikepunkt *a* on sama isobaar-isotermi ja alumise piirkõvera lõikepunktist *b* vedeliku aurustumissoojuse *r* võrra kõrgemal. Piirkõveratest piiratud väljal, s. o. niiske küllastunud auru piirkonnas kujutavad isobaar-isotermid endast tegelikult alumiselt piirkõveralt lähtuvate puutujate kimpu, mille tõttu kriitiline punkt *K* ei asu piirkõvera kõrgemas tipus, vaid entalpia teljepoolsel kallakul, sest temast lähtub niiske auru piiriline, kõige suuremat tõusunurka omav isobaar. Ülemisel piirkõveral eralduvad isotermid murdudes isobaaridest, kuna isobaarid jooksevad ülekuumendatud auru piirkonda edasi siledate kõveratena, nagu on näidatud joonisel 30. $x = konst$-kõverad *i-s-*



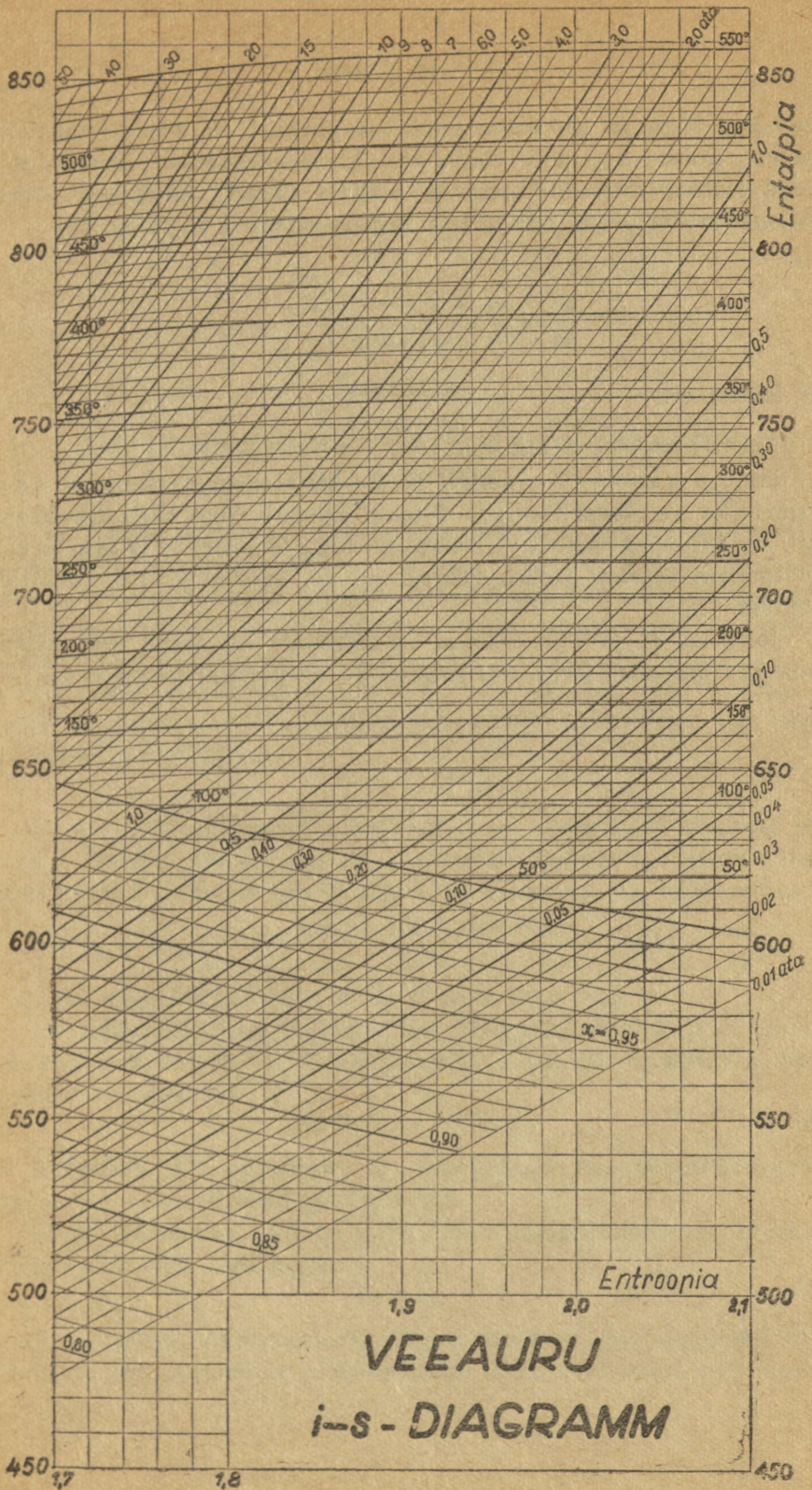
Joon. 30.

4*

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU


Entalpia
Entroopia
850
800
750
700
650
600
550
500
450
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
550° 300 ata
500°
450°
400°
350°
300°
250°
200°
150°
100°
x = 0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
0,01 ata

Joon. 31.


VEEAURU
i–s - DIAGRAMM
Entalpia
Entroopia
850
800
750
700
650
600
550
500
450
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
50
40
30
20
15
10
9
8
7
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0 ata
550°
500°
450°
400°
350°
300°
250°
200°
150°
100°
50°
1,0
0,5
0,40
0,30
0,20
0,10
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01 ata
x = 0,95
0,90
0,85
0,80

Joon. 31-a.

diagrammil lähtuvad lehvikuna kriitilisest punktist K. Nende ehitamiseks jagatakse isobaar-isotermid võrdseteks kümnendosadeks. Ühendades nii saadud isobaar-isotermide vastavad punktid siledate kõveratega, saamegi $x = konst$-joonte võrgu, sest näiteks isobaar-isotermil ba (joon. 29)

$$\frac{bc}{ba} = \frac{bc_1}{ba_1} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{\left(\frac{rx}{T_s}\right)}{\left(\frac{r}{T_s}\right)} = x,$$

kust leiame, et

$$bc = ba \cdot x.$$

Peale $p = konst$-, $T = konst$- ja $x = konst$-kõverate kantakse i-s-diagrammile ka $v = konst$-kõverad. Nende kõverate tõus, nagu T-s-diagrammilgi, on suurem $p = konst$-kõverate tõusust. Joonistel 31 ja 31-a on antud i-s-diagramm veeauru jaoks. Diagrammil on esindatud vaid isobaarid ja isotermid.

Joonistel 31 ja 31-a esitatud i-s-diagramm on antud soojustehnikas kasutatava piirkonna jaoks, mis joonisel 30 on piiratud viirgjoonega.

II peatükk.

VEEAUR.

10. VEE KUUMENDAMINE JA KALORILISTE PARAMEETRITE NULLNIVOO.

Vee kuumendamisena tuleb mõista protsessi, kus vee temperatuuri 0 °C-st, mille puhul veele mõjuv rõhk on võrdne vee küllastunud aurude rõhuga $p_0 = 0{,}00623$ ata ja kilomaht $v_0' = 1{,}0002 \cdot 10^{-3}$ m³/kg, tõstetakse (olenematult protsessi iseloomust) kuni antud aurustumisrõhule vastava temperatuurini t_s °C ehk T_s °K.

Vee olek parameetritel $t_0 = 0$ °C, $v_0' = 1{,}0002 \cdot 10^{-3}$ m³/kg ja $p_0 = 0{,}00623$ ata on võetud kaloriliste parameetrite nullnivooks, s. o. oletatakse, et neil parameetritel

$$u_0' = s_0' = i_0' = 0 .$$

Entroopia diagrammidel tähistavad need parameetrid alumisel piirkõveral nullpunkti, mis joonisel 32 on märgitud tähisega b_0. Eespool antud nullparameetrite puhul teeme i_0 suhtes siiski teatava vea, mille suurus on

$$i_0' = u_0' + Ap_0v_0' = 0 + \frac{0{,}00623 \cdot 10^4 \cdot 1{,}0002 \cdot 10^{-3}}{427} = 0{,}000146 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

See arv on siiski niivõrd väike, et ta ei ületa katse viga.

Edaspidises käsitluses tähistame vee kilomahu mistahes p_0-st erineval rõhul, kuid temperatuuril 0 °C sümboliga v_0. Kilomaht v_0 sõltuvalt rõhust on avaldatav võrrandiga

$$v_0 = v_0'(1 - \beta p) , \qquad (33)$$

Kuni rõhkudeni 200 atmosfääri on $\beta = 0{,}00005$ ühe atmosfääri kohta. Temperatuuri ja surve tõusuga β väheneb.

Sellest võrrandist nähtub, et tavalistes aurujõuseadmetes esinevate rõhkude puhul võib oletada, et

$$v_0 \approx v_0' . \qquad (34)$$

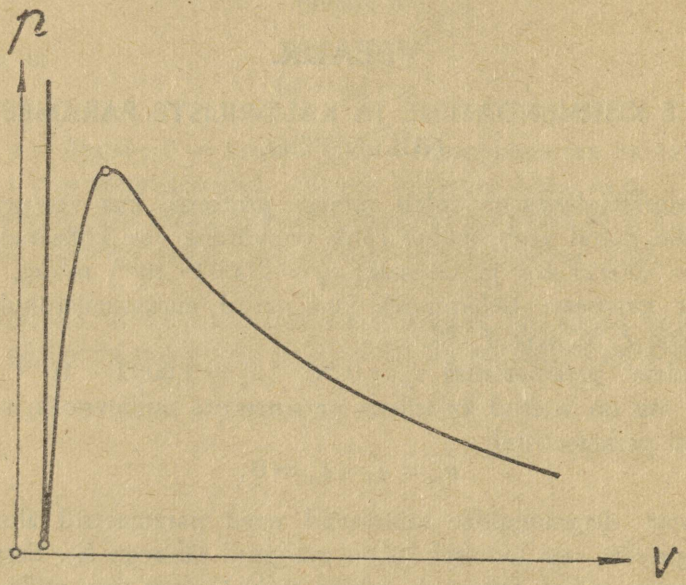
Vee säärase väikese kokkusurutavuse tõttu langevad p-v-diagrammil 0 °C juures oleva vee isotermilise ja adiabaatilise komprimeerimise jooned prak-

tiliselt ühte, kujutades peaaegu rööpsirget p-teljega, nagu on näidatud joonisel 31-b.

Funktsionaalse seose vee aurustumistemperatuuri ja -rõhu vahel kuni 100 atmosfäärini annab kaunis täpselt empiiriline võrrand

$$t_s = 100 \sqrt[4]{p_{(ata)}} - 0{,}06\, p_{(ata)} \approx 100 \sqrt[4]{p_{(ata)}}\,, \qquad (35)$$

kus rõhk p on antud atmosfäärides.



Joon. 31-b.

Rõhkude piirkonna jaoks 680 mm Hg kuni 780 mm Hg on aurustumistemperatuur avaldatav võrrandiga

$$t_s = 100{,}000 + 0{,}0367\,(p - 760) - 0{,}000023\,(p - 760)^2\,. \qquad (36)$$

Võrrandis (36) rõhk p on mm Hg.

Vee kuumendamise protsess võib toimuda mitmel viisil:

1. Vee kuumendamine teostatakse mööda alumist piirkõverat temperatuurilt 0 °C kuni antud rõhule vastava aurustumistemperatuurini T_s.

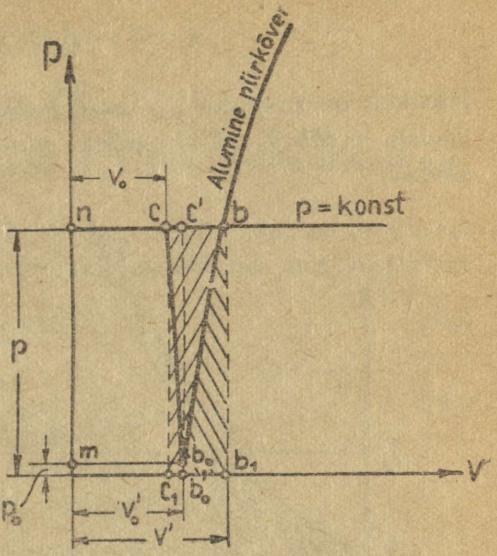
p-v-diagrammil avaldub see protsess alumise piirkõvera lõiguga b_0b (joon. 32)[8] ja T-s-diagrammil alumise piirkõvera lõiguga b_0b (joon. 33). Piirkõvera b_0b alune pindala T-s-diagrammil on võrdne vee kuumendamiseks tarbitud soojushulgaga q'.

[8] p-v-diagrammidel on selguse mõttes ka edaspidi mahtude mõõtkava moonutatud, sest tegelikult langeks alumine piirkõver ühtlase mõõtkava puhul rõhkude teljega ühte.

Soojushulk q' avaldub termodünaamika esimese seaduse põhjal

$$q' = u' + A\int_{v'_0}^{v'} pdv \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad (37)$$

kus u' on antud rõhule p vastava aurustumistemperatuurini T_s kuumendatud vee siseenergia, s. o. vee siseenergia piirkõvera punktis b ja $\int_{v'_0}^{v'} pdv$ — vee paisumise töö, mis p-v-diagrammil avaldub piirkõvera lõigu b_0b all oleva pindalaga $b'_0b_0bb_1$.



Joon. 32.

2. Külm vesi temperatuuril 0 °C komprimeeritakse isotermiliselt rõhult p_0 kuni aurustumistemperatuurile T_s vastava rõhuni p ja siis kuumendatakse isobaariliselt kuni aurustumistemperatuurini T_s. p-v-diagrammil avaldub see protsess isotermiga b_0c ja isobaarilõiguga cb (joon. 32). T-s-diagrammil tähistavad sama protsessi isotermi b_0c lõik ja isobaar cb (joon. 33). Aurustumistemperatuuri saavutab vesi alumise piirkõvera punktis b. Kirjeldatud moodus vee kuumendamiseks on rakendatav vee kuumendamisel aurukatlas. Nimelt tõstetakse pumbaga vee rõhk kuni aurukatlas valitseva rõhuni p ja surutakse vesi selle rõhu all katlasse, kus ta isobaariliselt kuumeneb 0 °C kuni temperatuurini T_s. Vee aurukatlasse toimetamiseks tarbitud mehhaaniline töö avaldub ideaalses pumbas p-v-diagrammil tehnilise tööga mb_0cn, mille võime võrduse (34) põhjal arvata võrdseks Apv_0 kilokaloriga.

Selleks vee kuumendamise protsessiks tarbitud soojushulk, mille märgime tähisega q, avaldub võrrandiga

$$q = u' + Ap(v' - v_0) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad (38)$$

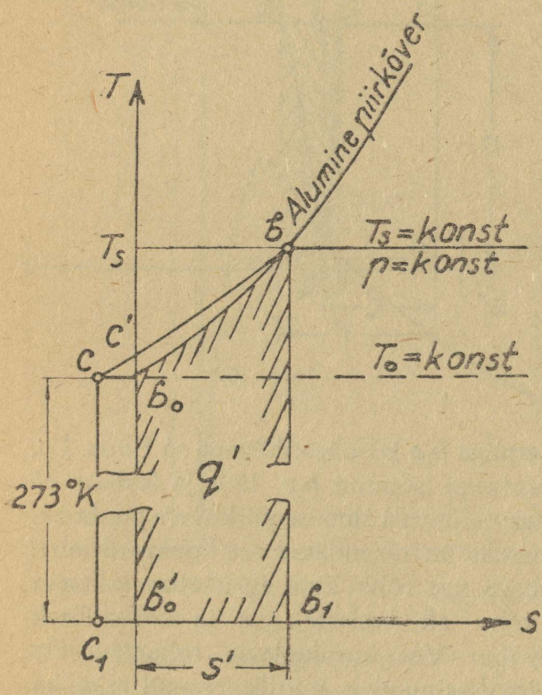
kus $p(v' - v_0)$ on vee isobaarilise paisumise töö katlas [kgm/kg] mahust v_0 kuni alumise piirkõvera punktile b vastava mahuni v', millele p-v-diagrammil vastab pindala c_1cbb_1.

Soojushulka q nimetatakse vedeliku soojuseks. T-s-diagrammil avaldub q isobaari cb all oleva pindalaga c_1cbb_1.

Lahutades võrrandi (38) võrdsetest võrrandi (37) võrdsed, leiame, et

$$q - q' = Ap(v' - v_0) - A\int_{v_0}^{v'} pdv .$$

Järelikult on soojushulk q soojushulgast q' suurem T-s-diagrammil avalduva pindala $c_1 cbb_0 b_0'$ võrra, millele p-v-diagrammil vastab sama tähistusega pindala.



Joon. 33.

Juhul, kui vee komprimeerimine pumbas toimub adiabaatiliselt, on q suurem kui q' pindala $b_0 c'b$ võrra. Tegelikult erineb q q'-st kaunis väikese suuruse võrra. Nii näiteks on rõhul 30 ata q suurem q'-st 0,1 kcal ja kriitilises punktis 2,6 kcal võrra, sest isobaarid *(cb)*, eriti madalrõhkude piirkonnas, on väga lähedased alumisele piirkõverale, mille tõttu eespooltähendatud pindalad on väikesed. Toodut aluseks võttes võime kirjutada võrduse

$$q \approx q' . \qquad (39)$$

Märkides vee kuumendamise erisoojuse mööda alumist piirkõverat tähisega c', võime vedeliku kuumendamissoojuse avaldada võrrandiga

$$q \approx q' \approx \int_0^{t_s} c'dt = c_m' t_s . \qquad (40)$$

Vee tõeline erisoojus c' temperatuuri intervallis 40° C kuni 200° C avaldub

$$c' = 0{,}9983 - 0{,}10368 \frac{t}{1000} + 2{,}0736 \left(\frac{t}{1000}\right)^2 . \qquad (41)$$

Vee keskmine erisoojus selle võrrandi põhjal on

$$c_m' = 0{,}9983 - 0{,}05184 \left(\frac{t}{1000}\right) + 0{,}6912 \left(\frac{t}{1000}\right)^2 . \qquad (42)$$

Võrrandist nähtub, et c_m' on väga lähedane ühele, mille tõttu kuni temperatuurini 170° C ($p = 8$ ata) võime c_m' arvata võrdseks ühega, s. o.

$$c'_m = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}.$$

Selle lihtsustusega järgneb võrrandist (40), et

$$q \approx q' \approx t_s \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{43}$$

Selgitame vee soojuslike parameetrite u', i' ja s' väärtusi alumise piirkõvera punktides.

Entalpia mõiste järgi (vt. võrrand 89, I osa) avaldub alumise piirkõvera mistahes punktis vee entalpia ja siseenergia vastastikune seos võrrandiga

$$i' = u' + Apv' \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{44}$$

ehk

$$u' = i' - Apv' \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{45}$$

kus p on aurustumisrõhk kg/m^2.

Seose vedeliku soojusega q annab võrrand (38), s. o.

$$q = u' + Ap(v' - v_0) = u' + Apv' - Apv_0 = i' - Apv_0,$$

sest

$$u' + Apv' = i'.$$

Järelikult

$$i' = q + Apv_0 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{46}$$

kus v_0 on rõhule p [kg/m^2] vastav vee kilomaht 0 °C juures.

Siseenergia ja vedeliku soojuse vaheline seos on antud võrrandiga (38), s. o.

$$u' = q - Ap(v' - v_0) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{47}$$

Kuni rõhkudeni 40 ata moodustab liige Apv' 0,45% i' väärtusest, mille tõttu madalrõhu-auruga toimuvates protsessides võime tegelikult oletada, et

$$i' = u' = q = q'.$$

Vedeliku entroopia s' kuumendamisprotsessiks leiame võrrandist

$$s' = \int_{273}^{T_s} c' \frac{dT}{T}.$$

Kuni rõhkudeni 10 ata võime oletada, et $c' = 1$ kcal/kg °C. Seega

$$s' = \int_{273}^{T_s} \frac{dT}{T} = \ln \frac{T_s}{273} = 2{,}303 \log \frac{T_s}{273} \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}. \tag{48}$$

Kalorilised parameetrid u', i' ja s' on antud raamatu lõpus toodud veeauru tabeleis I ja II.

Veeauru kriitilised parameetrid on

$$t_k = 374{,}2^\circ \text{ C},$$

$$p_k = 225{,}5 \text{ ata},$$

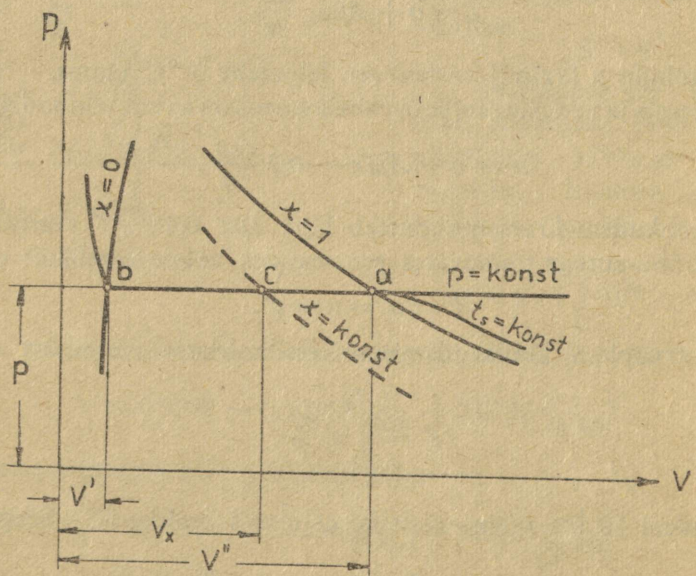
$$v_k = 3{,}07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

11. VEE AURUSTUMINE.

Vee aurustumine algab alumise piirkõvera punktist b (joon. 34) ja kestab kuni ülemise piirkõvera punktini a. Märkides nagu varemaltki veemahu aurustumise algusel v' ja kuiva küllastunud auru mahu, s. o. auru mahu ülemise piirkõvera punktis a, tähisega v'', võime niiske auru mahu isobaarilise aurustumise protsessi mistahes punktis c avaldada võrrandiga

$$v_x = v' + (v'' - v')x = (1 - x)v' + v''x, \tag{49}$$

kus x on niiske auru kuivusaste, s. o. auru sisaldavus 1 kg niiskes aurus.



Joon. 34.

Kesk- ja madalrõhu piirkonnas on maht v', võrreldes mahuga v'', praktiliselt väike ($< 1\%$), mistõttu võime liikme $(1-x)v'$ lugeda võrdseks nulliga. Selle lihtsustusega avaldub niiske auru kilomaht võrrandiga:

$$v_x \approx v''x . \tag{50}$$

Kui on antud kilomaht v_x, siis leiame auru kuivusastme x võrrandist (49), lahendades viimase x suhtes, s. o.:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} \approx \frac{v_x}{v''} . \tag{51}$$

Niiske auru erikaal avaldub

$$\gamma_x = \frac{1}{v_x} \approx \frac{1}{v''x} = \frac{\gamma''}{x} . \tag{52}$$

Võrrandist nähtub, et γ_x on alati suurem kui γ.

Kuiva küllastunud auru kilomahu saab ligikaudu arvutada empiirilise võrrandiga

$$v'' = 2\,\frac{1}{p_{\text{ata}}}\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \tag{53}$$

kus p on aurustumisrõhk abs. atmosfäärides. Võrrandi täpsus intervallis 8 kuni 60 atmosfäärini on 2% kuni $0{,}6\%$ piires.

Märkides entalpia ja siseenergia alumise piirkõvera punktis b nagu varemaltki i' ja u' ning ülemise piirkõvera punktis a, s. o. kuiva küllastunud auru entalpia ja siseenergia i'' ja u'', võime need varemantud võrrandite põhjal avaldada:

$$i'' = i' + r = i' + \varrho + \psi ,$$

$$u'' = u' + \varrho$$

ja entalpia i'' kaudu:

$$u'' = i'' - Apv'' ,$$

kus ϱ on sisemine ja ψ väline aurustumissoojus ühe kilogrammi auru kohta (vt. lk. 39).

Niiske auru jaoks avaldub i_x:

$$i_x = i' + (i'' - i')x = (1 - x)i' + i''x \tag{54}$$

ja aurustumissoojuse kaudu (vt. võrrand 31)

$$i_x = i' + rx = i'' - (1 - x)r. \tag{54-a}$$

Siseenergia avaldub:

$$u_x = u' + (u'' - u')x = (1 - x)u' + u''x \tag{55}$$

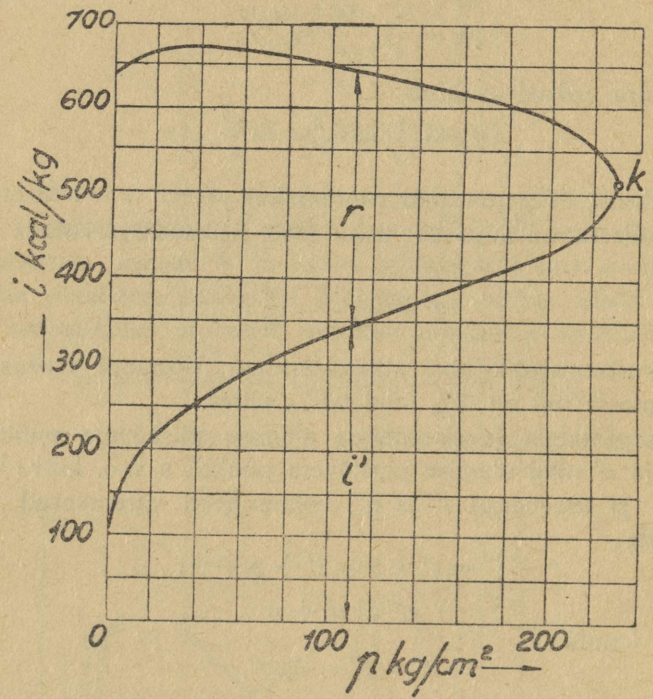
ja sisemise aurustumissoojuse kaudu kujul:

$$u_x = u' + \varrho x = u'' - (1 - x)\varrho . \tag{56}$$

Auru kuivusaste x võrrandite (54) ja (55) põhjal avaldub:

$$x = \frac{i_x - i'}{i'' - i'} = \frac{i_x - i'}{r}, \qquad x = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} = \frac{u_x - u'}{\varrho}. \tag{57}$$

Suurused v', v'', γ'', i', i'', u', u'', ϱ ja r on antud küllastunud auru tabelites.



Joon. 35.

Entalpia i' ja i'' muutuse iseloom vastavalt aurustumistemperatuurile on näidatud joonisel 35. Jooniselt nähtub, et aurustumistemperatuuri või aurustumisrõhu tõusuga kasvab vee entalpia i' pidevalt kuni kriitilise temperatuurini. Vastandiks vedeliku entalpiale on aurustumissoojus r, mis rõhu tõustes pidevalt väheneb ja muutub nulliks vedeliku kriitilises punktis k. Tingituna i' ja r säärasest muutusest esineb rõhu tõustes kuiva küllastunud auru entalpia suurenemine kuni rõhuni 32 ata (236° C). Sellelt rõhult alates hakkab i'' vähenema kuni kriitilise punktini, kus ta muutub võrdseks vee entalpiaga i' $\left(505 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right)$. Rõhu edasisel tõusul muutub vesi auruks

ilma aurustumisprotsessita. Toodust järgneb, et kõrgrõhu-auru saamiseks tarbitakse vähem soojust kui madalrõhu-auru puhul[10], kuigi kõrgrõhu-auru töövõime on suurem madalrõhu-auru omast.

Mõnedes auru tabelites on entalpia i asemel antud auru nn. „täissoojus", mis on märgitud tähisega λ. Selle parameetri avaldis on:

$$\lambda'' = q + r. \tag{58}$$

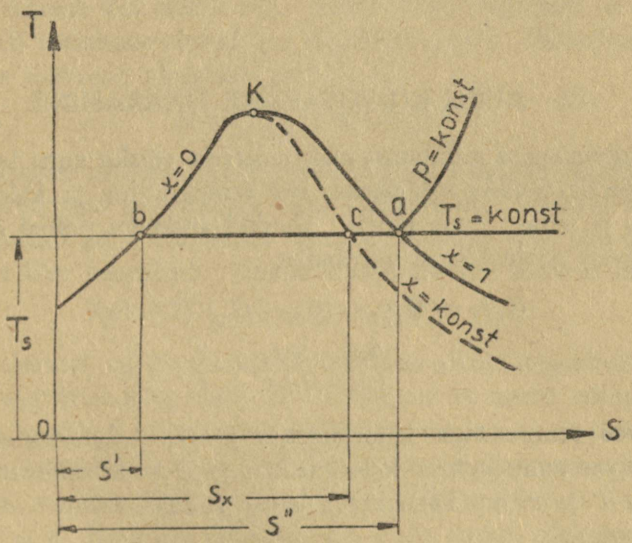
λ'' seos entalpiaga, nagu järgneb võrrandist (46), avaldub

$$\lambda'' = i' + r - Apv_0 = i'' - Apv_0 \tag{59}$$

ehk üldkujul

$$\lambda = i - Apv_0 . \tag{60}$$

Et suurus Apv_0 on väike, siis võib suurusi λ ja i praktiliselt vaadelda kui võrdseid.



Joon. 36.

Kuiva küllastunud auru entroopia, s. o. auru entroopia ülemise piirkõvera punktis a (vt. joon. 36), avaldub võrrandiga

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s} \approx \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s}. \tag{61}$$

[10] Kõrgrõhu-auruks arvatakse auru rõhu intervallis 60—225 atmosfääri.

Auru entroopia niiske auru mistahes punktis c, kus auru kuivusaste on x, avaldub

$$s_x = s' + \frac{rx}{T_s} \tag{62}$$

ehk

$$s_x = s' + (s'' - s')x = (1 - x)s' + s''x. \tag{63}$$

Auru kuivusastme entroopia muutuse kaudu saame võrrandi (63) põhjal avaldada kujul:

$$x = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}. \tag{64}$$

Võrrandist järeldub, et $x = konst$-jooned T-s-diagrammil jagavad isobaar-isotermjooned võrdelisteks osadeks, s. o.

$$x = \frac{bc}{ba} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}.$$

12. AURU KUIVUSASTME MÄÄRAMINE.

Auru kuivusastme määramist saab teostada värske auru kondenseerimisega kalorimeetris. Selleks määratakse vee temperatuur ja kalorimeetri kaal katse alguses ja pärast katse lõppu. Saadud andmete põhjal saab x-i määrata alljärgnevalt soojusbilansi võrrandist

$$G_2 t_2 = G_1 t_1 + (G_2 - G_1)(i' + rx),$$

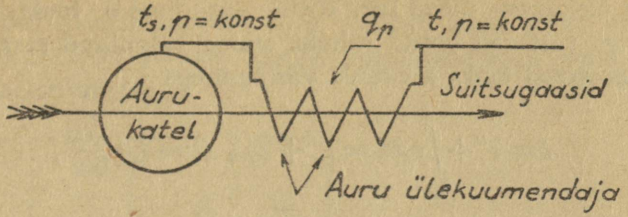
$$x = \frac{G_2 t_2 - G_1 t_1}{(G_2 - G_1) r} - \frac{i'}{r}, \tag{65}$$

kus t_1 on vee temperatuur kalorimeetris ja G_1 — kalorimeetri kaal katse alguses, t_2 — vee temperatuur kalorimeetris ja G_2 — kalorimeetri kaal pärast katse lõppu; i' ja r on katsetatava auru rõhule vastav vee entalpia ja aurustumissoojus.

13. ÜLEKUUMENDATUD AUR.

Ülekuumendatuks nimetatakse auru, mille temperatuur on kõrgem sama rõhku omava kuiva küllastunud auru temperatuurist. Tehnikas saadakse ülekuumendatud aur aurukatlast tuleva auru kuumendamisega nn. aurukuumendajas, kasutades selleks tavaliselt katla-agregaadist lahkuvate suitsugaaside soojust (vt. joon. 37). Auru ülekuumendamise protsess ideaalsel juhul toimub isobaariliselt aurukatlas esineval aurustumisrõhul. Auru

ülekuumendamist teostatakse keskmiselt 300° C kuni 500° C [11]. Ülekuumendatud auru paremuseks on, et ta ei kondenseeru enne, kui ta on kao-



Joon. 37.

tanud oma ülekuumendussoojuse, mis on olulise tähtsusega auru voolamisel aurujuhtmetes ja aurumasina silindritesse.

Peale selle omab ta mitu korda väiksemat soojuse ülekande tegurit aurujuhtme seintele kui niiske aur. Suure ülekuumenduse ja väikese rõhu puhul läheneb ülekuumendatud aur ideaalsele gaasile. Ülekuumendatud auru gaasikonstant vastavalt ideaalsele olekule on

$$R = \frac{848}{18{,}016} = 47{,}07 \frac{\text{kgm}}{\text{kg° C}}.$$

Küllastuspiiri lähedal ülekuumendatud auru suhtes on ideaalsete gaaside karaktervõrrand rakendatav väga ligikaudselt. Ülekuumendatud auru jaoks on esitatud palju empiirilisi võrrandeid, kuid kõik nad on praktiliseks kasutamiseks liiga keerukad. Üheks lihtsamaks on võrrand kujul

$$p\,(v - b') = RT,$$

mis kehtib oletusel, et $b' = konst$ ($b' = 0{,}016$). Kuid tegelikult on b' muutuv suurus, mistõttu selle võrrandi kasutamine ei osutu võimalikuks. Eespooltoodust tingituna kasutatakse ülekuumendatud auruga seotud küsimuste lahendamisel, nagu niiske auru puhulgi, vastavaid diagramme ja tabeleid, kus temperatuuri ja rõhu järgi on antud auru kilomaht v ja kalorilised parameetrid i ning s. Raamatu lõpus tabelis V on antud ülekuumendatud veeauru parameetrid v, i ja s koordineerituna auru rõhu ja temperatuuri järgi prof. M. P. Vukalovitši järgi [12].

Diagrammil (joon. 15) on antud ülekuumendatud auru isotermid $\frac{R}{R_0}$-p-koordinaatide süsteemis. Diagammilt nähtub, et mida kõrgem on temperatuur ja madalam rõhk, seda lähemal asuvad ülekuumendatud auru iso-

[11] Viimasel ajal on kõrgrõhu-auru ülekuumendusega mindud kuni 600° C ja katseseadmetes kuni temperatuurini 700° C.

[12] М. П. Вукалович, „Термодинамические свойства водяного пара", Госэнергоиздат, 1946.

termid ideaalse gaasi isotermidele. Selle diagrammi abil toimub ülekuumendatud auru kilomahu arvutamine samuti nagu reaalsete gaaside puhulgi.

Teades ülekuumendatud auru tõelise erisoojuse c_p funktsionaalset seost temperatuuriga vastavalt antud rõhule, saame kalorilised parameetrid i ja s isobaarilise protsessi jaoks arvutada võrranditega

$$i = i'' + \int_{t_s}^{t} c_p dt = i'' + c_{pm}\,(t - t_s)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{66}$$

$$s = s'' + \int_{T_s}^{T} c_p \frac{dT}{T}. \tag{67}$$

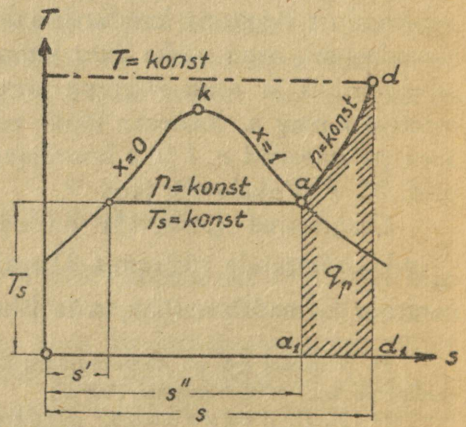
Järelikult on auru ülekuumendamisest tingitud entalpia ja entroopia muutus

$$i - i'' = c_{pm}\,(t - t_s),$$

$$s - s'' = \int_{T_s}^{T} c_p \frac{dT}{T},$$

kus T ja t on ülekuumendatud auru temperatuur ja T_s ning t_s — ülekuumendatud auru rõhule vastava kuiva küllastunud auru temperatuur ehk, mis on sama, ülekuumendatud auru rõhule vastav vee aurustumistemperatuur, nagu on näidatud joonisel 38 esitatud T-s-diagrammil. i'' ja s'' on ülekuumendatud auru rõhule vastava kuiva küllastunud auru entalpia ja entroopia, s. o. auru entalpia ja entroopia T-s-diagrammil ülemise piirkõvera punktis a. Liige $\int_{T_s}^{T} c_p \frac{dT}{T}$ on ülekuumendatud auru entroopia muutus ülemise piirkõvera punktist a kuni auru isobaarilise ülekuumendamispunktini d, sest ülekuumendamise protsess katla-agregaadis toimub isobaariliselt. Kuiva küllastunud auru ülekuumendamiseks tarbitud soojushulk q_p ühe kilogrammi auru kohta avaldub auru entalpia muutusega ülemise piirkõvera punktist a kuni punktini d, s. o.

$$q_p = i - i''\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{68}$$

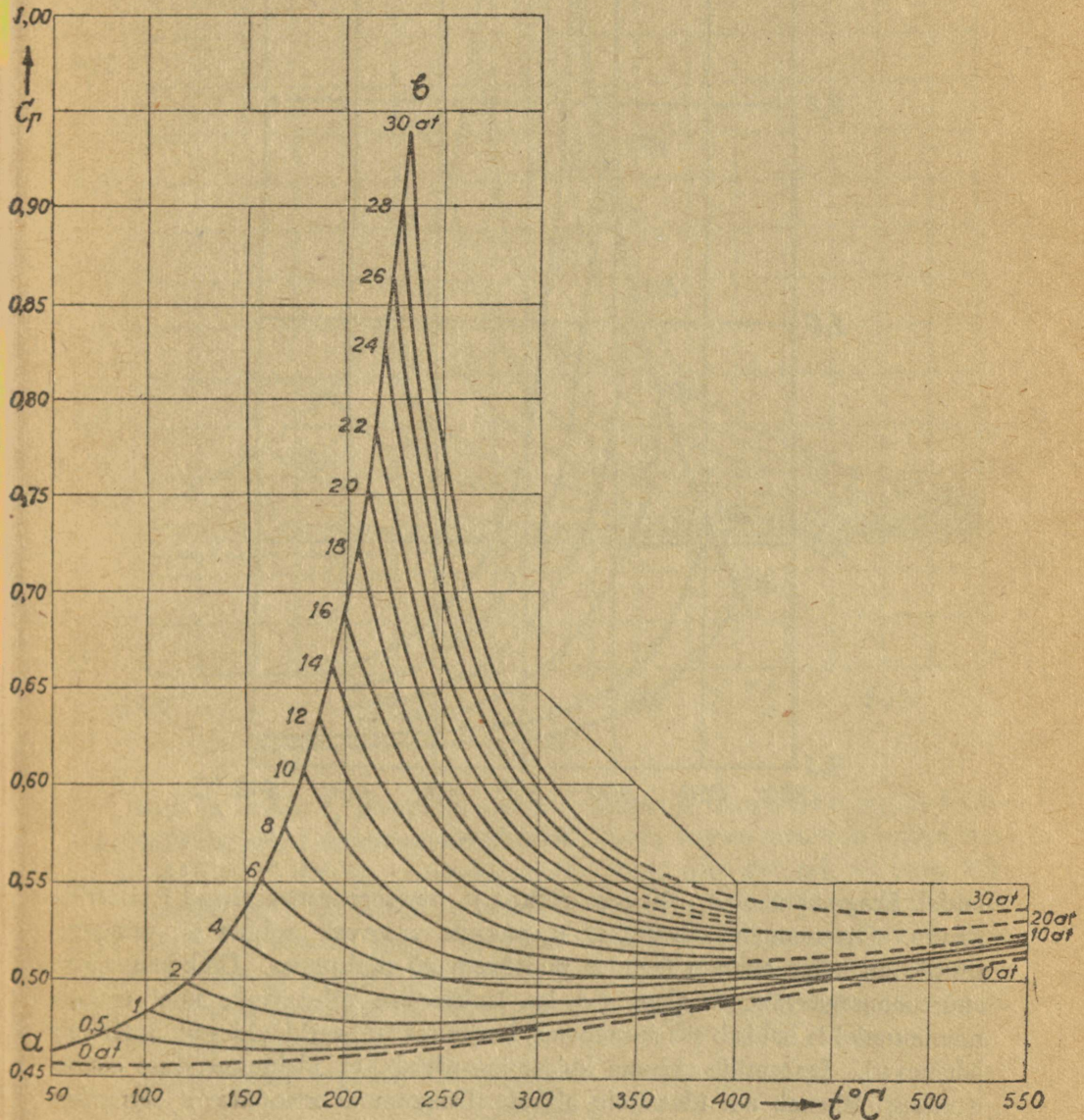


Joon. 38.

või

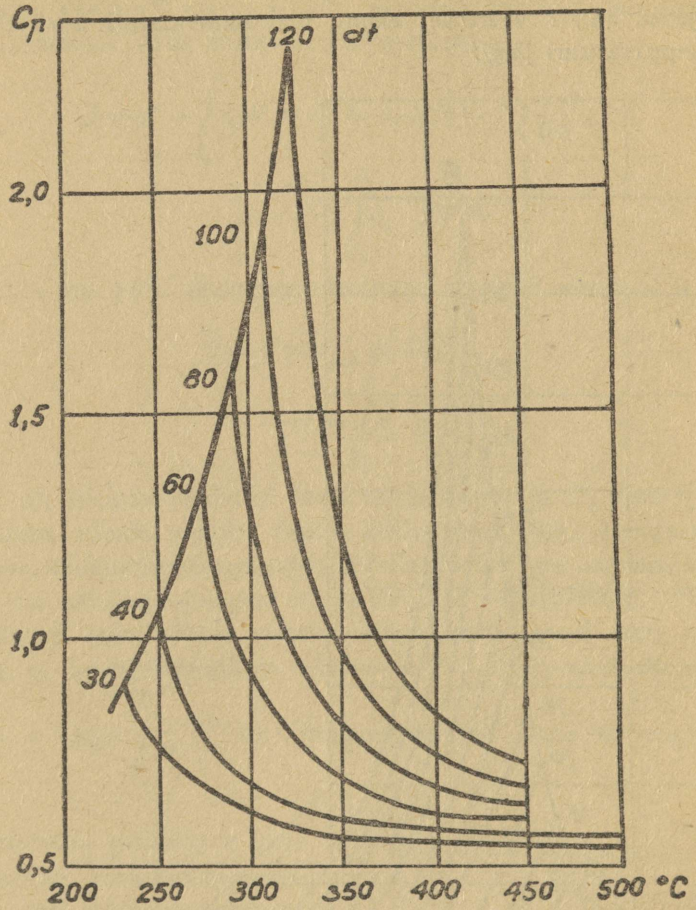
$$q_p = c_{pm}(t - t_s)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (68\text{-a})$$

T-s-diagrammil avaldub soojushulk q_p isobaari lõigu ad all oleva pindalaga add_1a_1 (joon. 38), i väärtuse leiame ülekuumendatud auru tabelist auru rõhu ja temperatuuri järgi.



Joon. 39.

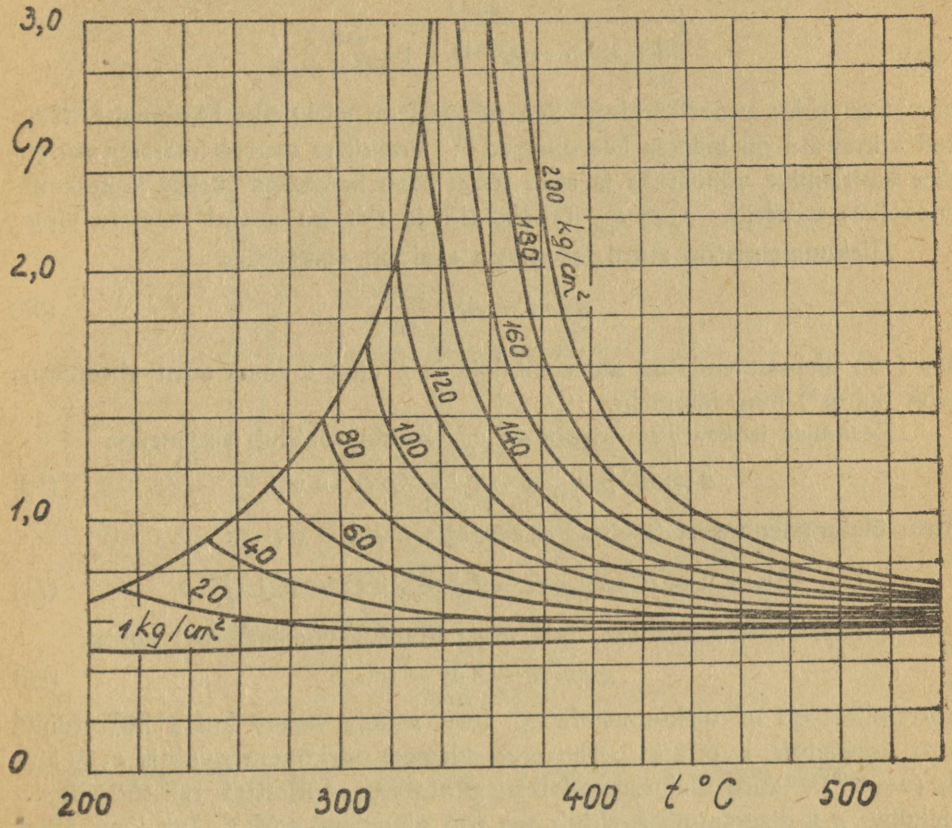
Ülekuumendatud auru tõeline erisoojus c_p on funktsioon auru temperatuurist ja rõhust, nagu on näidatud joonisel 39 ja 39-a esitatud diagram-



Joon. 39-a.

midel. Diagrammil on c_p sõltuvus rõhust ja temperatuurist antud isobaaride kaudu. Diagrammilt nähtub, et c_p muutus vastavalt rõhule ja temperatuurile on kõige suurem ülemise piirkõvera *ab* piirkonnas. Ülekuumenduse suurenemisega väheneb alguses c_p iga isobaarilise rõhu jaoks kuni teatava miinimumini ja hakkab siis suurenema, kusjuures isobaarid pidevalt üksteisele lähenevad. Isobaaride säärane kulgemine näitab, et ülekuumenduse suurenemisega läheneb aur ideaalsele olekule. Diagrammil erisoojuse c_p algpunkte ühendav piirkõver *ab* esindab kuiva küllastunud auru erisoojuse c_p'' muutust

rõhu ja temperatuuriga. Vasakul pool seda kõverat on c_p-jooned c_p-teljega rööpsed sirged, sest selles piirkonnas esindavad nad ühtlasi isotermilise protsessi erisoojust, mille väärtus, nagu teada, on võrdne lõpmatusega.



Joon. 39-b.

Kui on antud c_p graafiline sõltuvus rõhust ja temperatuurist, siis keskmise väärtuse antud temperatuuri-intervalli jaoks leiame sama meetodiga, mis on kirjeldatud „Tehnilise termodünaamika" I-ses osas (vt. ptk. VI, joon. 20).

Joonisel 39-b on antud c_p graafiline sõltuvus rõhust ja temperatuurist prof. M. P. Vukalovitši järgi. Võrreldes neid kõveraid joonistel 39 ja 39-a antud kõveratega (Koch'i järgi) näeme, et M. P. Vukalovitši järgi on ülemise piirkõvera läheduses c_p väärtused väiksemad. Vukalovitši poolt antud c_p väärtused on õigemad.

Analüütiliselt avaldub funktsionaalne seos

$$c_p = f(p, t)$$

kaunis keeruka võrrandina, näiteks Knoblauch'i järgi

$$c_p = 0{,}3929 + 0{,}000197\ t - \frac{12{,}8}{t+16{,}7} + \\ + \frac{20{,}33}{t - 315{,}87 - 0{,}37354\ p + \frac{6310{,}3}{18{,}165+p}},$$

kus p on rõhk atmosfäärides. See võrrand on siiski üks lihtsamaist. Täpsed võrrandid on märksa keerukamad[13]. Praktikas osutub sääraste võrrandite käsitlemine võimatuks ja selle tõttu peab kasutama tõelise ja keskmise erisoojuse tabeleid. c_p ja c_{pm} tabelid (III ja IV) on antud raamatu lõpus.

Ülekuumendatud auru siseenergia avaldub võrrandiga

$$u = i - Apv \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{69}$$

kus i on ülekuumendatud auru entalpia ja p ning v sama auru absoluutne rõhk (kg/m²) ning kilomaht.

Keskmise isobaarilise erisoojuse c_{pm} kaudu avaldub siseenergia

$$u = u'' + c_{pm}(t - t_s) - Ap(v - v''). \tag{70}$$

Auru ülekuumendusest tingitud siseenergia muutus on

$$\Delta u = u - u'' = c_{pm}(t - t_s) - Ap(v - v'') \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{71}$$

Entalpia kaudu avaldub siseenergia muutus võrrandi (69) põhjal

$$\Delta u = i - Apv - u''. \tag{72}$$

Võrrandites on u'' ülekuumendatud auru rõhule vastav kuiva küllastunud auru siseenergia, s. o. auru siseenergia ülemise piirkõvera punktis a, ja liige $Ap(v - v'')$ — auru ülekuumendamise protsessis sooritatud välistöö soojusühikuis. p-v-diagrammil avaldub see töö pindalaga add_1a_1 (vt. joon. 39-c).

Teades ülekuumendatud auru erisoojuse c_v funktsionaalset avaldist, saame siseenergia arvutada võrrandiga

$$u = u'' + \int_{t_s}^{t} c_v dt = u'' + c_{vm}(t - t_s) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{73}$$

kus c_{vm} on ülekuumendatud auru keskmine isohooriline erisoojus ülekuumendatud auru rõhule vastava kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni ülekuumendus-temperatuurini t.

---

[13] Vt. М. П. Вукалович, „Термодинамические свойства водяного пара", Госэнергоиздат, 1946, lk. 11.

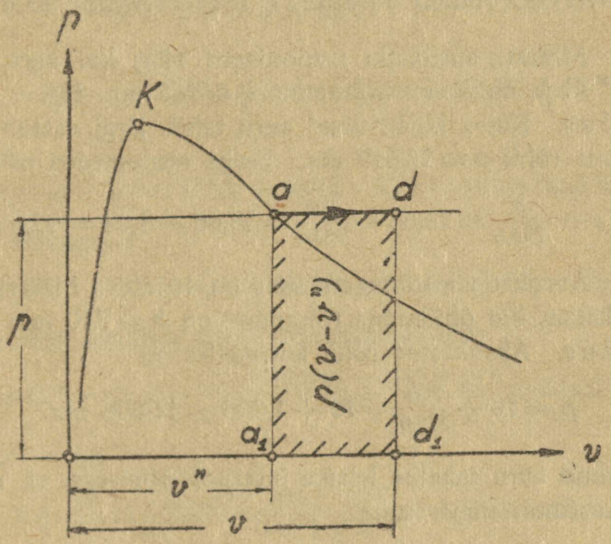
Teatava täpsusega on keskmine erisoojus c_{vm} arvutatav Mayeri võrrandiga, kujul

$$c_{vm} = c_{pm} - AR = c_{pm} - \frac{47{,}1}{427} = c_{pm} - 0{,}11 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}. \tag{74}$$

Järelikult

$$u \approx u'' + (c_{pm} - 0{,}11)(t - t_s) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{75}$$

Võrrand annab u jaoks väga ligikaudse väärtuse.



Joon. 39-c.

Ülekuumendatud auru täissoojus λ võrrandi (58) põhjal avaldub

$$\lambda = \lambda'' + q_p = \lambda'' + c_{pm}(t - t_s) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{76}$$

ja entalpia kaudu kujul

$$\lambda = i - Apv_o \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{77}$$

või

$$\lambda = i'' + c_{pm}(t - t_s) - Apv_o \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{77-a}$$

kus v_o on auru ülekuumendusrõhule vastav vee maht [m³/kg] 0° C juures.

Ülekuumendatud auru entroopia muutus avaldub kujul

$$s_p - s'' = \int_{T_s}^{T} c_p \frac{dT}{T}.$$

T-s-teljestikus avaldab see võrrand isobaare, nagu ideaalsete gaaside puhulgi, kuid ülekuumendatud aurudel nad ei esita enam ekvidistantseid (s-telje suunas) kõveraid, nagu ideaalsetel gaasidel, mis on tingitud c_p sõltuvusest peale temperatuuri ka rõhust. Sama on kehtiv ka ülekuumendatud auru isohooride suhtes.

14. NÄITED AURU TABELITE KASUTAMISE KOHTA.

Näide. Määrata aurukatla manomeetri näit, kui auru temperatuur katlas on 220° C ja õhkkonna rõhumine $b = 768$ mm Hg.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabeli järgi vastab temperatuurile 220° C auru rõhk $p = 23{,}659$ ata. Seega manomeetri näit on:

$$P = p - \frac{b}{735{,}6} = 23{,}66 - \frac{768}{735{,}6} = 23{,}66 - 1{,}04 = 22{,}62 \text{ atü.}$$

Näide. Aurukatla manomeetri näit on 10 atü. Määrata auru temperatuur aurukatlas, kui õhkkonna rõhumine on $b = 740$ mm Hg.

Lahendus. Absoluutne rõhk aurukatlas on

$$p = 10 + \frac{740}{735{,}6} \approx 10 + 1{,}006 = 11{,}006 \text{ ata.}$$

Kuiva küllastunud auru tabelist leiame interpoleerimisega, et rõhule 11,006 ata vastab aurustumistemperatuur

$$t_s = 183{,}20 + (187{,}08 - 183{,}20) \cdot 0{,}006 = 183{,}20 + 0{,}02 = 183{,}22° \text{ C.}$$

Näide. Niiske auru parameetrid on $t_s = 180°$ C ja $x = 0{,}75$. Määrata parameetrid γ_x, v_x, p_x, i_x, u_x, ψ_x ja s_x.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et aurustumistemperatuurile 180° C vastavad parameetrid:

p	= 10,225	ata,	i'	= 182,2	kcal/kg,
v'	= 1,1275	dm³/kg,	r	= 481,0	kcal/kg,
v''	= 0,1939	m³/kg,	γ''	= 5,157	kg/m³,
u'	= 181,9	kcal/kg,	s''	= 1,5721	kcal/kg°C,
u''	= 616,7	kcal/kg,	ϱ	= 434,8	kcal/kg,
s'	= 0,5107	kcal/kg°C,	ψ	= 46,2	kcal/kg.

Auru kilomaht $x = 0{,}75$ puhul on

$$v_x = v' + (v'' - v')\,x = 0{,}0011 + (0{,}1939 - 0{,}0011) \cdot 0{,}75 =$$

$$= 0{,}0011 + 0{,}1466 = 0{,}1477 \text{ m}^3/\text{kg.}$$

Ligikaudse võrrandi järgi

$$v_x = v''x = 0{,}1454 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Auru erikaal

$$\gamma_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{0{,}1477} = 6{,}7705 \text{ kg/m}^3.$$

Ligikaudse võrrandi järgi

$$\gamma_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v''x} = \frac{\gamma''}{x} = \frac{5{,}157}{0{,}75} = 6{,}876 \text{ kg/m}^3.$$

Entalpia on

$$i_x = i' + rx = 182{,}2 + 481{,}0 \cdot 0{,}75 = 542{,}95 \text{ kcal/kg}.$$

Siseenergia on

$$u_x = u' + \varrho x = 181{,}9 + 434{,}8 \cdot 0{,}75 = 508{,}0 \text{ kcal/kg}.$$

Väline aurustumissoojus

$$\psi_x = (r - \varrho)\, x = \psi x = 46{,}2 \cdot 0{,}75 = 34{,}65 \text{ kcal/kg}.$$

Võrrandi (20) järgi avaldub väline aurustumissoojus

$$\psi_x = Ap\,(v'' - v')\, x = \frac{102\,250\,(0{,}1939 - 0{,}0011)\,0{,}75}{427} = 34{,}63 \text{ kcal/kg}.$$

Entroopia väärtus on

$$s_x = s' + \frac{rx}{T_s} = 0{,}5107 + \frac{481{,}0 \cdot 0{,}75}{180 + 273{,}15} = 1{,}3068 \text{ kcal/kg°C}.$$

Teisiti on entroopia arvutatav seosega

$$s_x = s' + (s'' - s')\, x = 0{,}5107 + (1{,}5721 - 0{,}5107)\ 0{,}75 = 1{,}3067 \text{ kcal/kg°C}.$$

Näide. Auru parameetrid on $u_x = 600$ kcal/kg ja $t_s = 170°$ C. Määrata auru entalpia.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et temperatuurile 170° C vastavad auru parameetrid:

$$i' = 171{,}7 \text{ kcal/kg}, \qquad \varrho = 443{,}5 \text{ kcal/kg},$$

$$u' = 171{,}5 \text{ kcal/kg}, \qquad r = 489{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Esiteks arvutame auru kuivusastme võrrandiga

$$u_x = u' + \varrho x;\ x = \frac{u_x - u'}{\varrho} = \frac{600 - 171{,}5}{443{,}5} = 0{,}97.$$

Järelikult

$$i_x = i' + rx = 171{,}7 + 489{,}2 \cdot 0{,}97 = 646{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Näide. Auru parameetrid on $s = 1{,}5$ kcal/kg°C ja $p = 4$ ata. Määrata auru kilomaht.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabeli järgi on auru teised parameetrid:

$$v'' = 0{,}4706 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad s' = 0{,}4221 \text{ kcal/kg°C},$$

$$s'' = 1{,}6474 \text{ kcal/kg°C}.$$

Esiteks arvutame auru kuivusastme x, kasutades selleks seost entroopiaga

$$s = s' + (s'' - s')\,x,$$

$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'} = \frac{1{,}5 - 0{,}4221}{1{,}6474 - 0{,}4221} = \frac{1{,}0779}{1{,}2253} = 0{,}88.$$

Järelikult

$$v \approx v''x = 0{,}4706 \cdot 0{,}88 = 0{,}4141 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Näide. Aurumahuti maht on 4000 m³. Arvutada auru kaalulise koguse suurenemine, kui rõhk aurumahutis tõuseb rõhult 2,2 ata rõhun 2,6 ata, eeldades, et $x = 1$.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et rõhule 2,2 ata vastab $\gamma_1'' = 1{,}213$ kg/m² ja rõhule 2,6 ata — $\gamma_2'' = 1{,}418$. Järelikult on auru kaalulise koguse suurenemine

$$\Delta G = V(\gamma_2'' - \gamma_1'') = 4000\,(1{,}418 - 1{,}213) = 820 \text{ kg}.$$

Näide. Aurumasin tarvitab tunnis ühe efektiivse hobujõud-tunni kohta 7,5 kg kuiva küllastunud auru, mille rõhk on 8 ata. Arvutada aurukatla kütusekulu ühe efektiivse hobujõu-tunni kohta, kui katla kasutegur on 0,7, toitevee temperatuur 50° C ja kütuse tehniline soojusevääртus 10000 kcal/kg.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et eeltähendatud auru entalpia on $i'' = 660{,}8$ kcal/kg. Järelikult tunnis 1 EHJh kohta tarbitud soojus on

$$Q = 7{,}5\,(660{,}8 - 50) = 4581 \text{ kcal/EHJh}$$

ja vajalik kütuse kulu ühe hobujõud-tunni kohta

$$b_e = \frac{4581}{10\,000 \cdot 0{,}7} = 0{,}654 \text{ kg/EHJh}.$$

Näide. Aurujõuseadme kondensaatorisse voolab tunnis 1500 kg niisket auru, mille temperatuur on 45° C ja aurusisaldavus $x = 0{,}87$. Arvutada kondensaatorisse viiva aurutoru ristlõike pindala tingimusel, et auru kiirus torus ei ületaks 70 m/sek, ja kondensaatoris kondenseeruva vee maht.

Lahendus. II tabelist leiame, et kuiva küllastunud auru maht temperatuuril 45° C on

$$v'' = 15{,}28 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ ja } v' = 1{,}0099 \text{ dm}^3/\text{kg}.$$

Järelikult

$$v_x = v' + (v'' - v')\, x \approx v'' x = 15{,}28 \cdot 0{,}87 = 13{,}29 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Toru ristlõikest sekundis läbivoolava auru maht V_1 on

$$V_1 = \frac{v_x \cdot G}{3600} = \frac{13{,}29 \cdot 1500}{3600} = 5{,}54 \text{ m}^3/\text{sek}.$$

Sellele mahule ülesseatud tingimuste kohaselt on toru vajalik ristlõike pindala

$$F = \frac{V_1}{70} = \frac{5{,}54}{70} = 0{,}0791 \text{ m}^2,$$

$$F = 791 \text{ cm}^2.$$

Tunni kestel kondensaatoris kondenseeruva vee maht avaldub seosega

$$V_2 = v' G x = 1{,}0099 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 \cdot 0{,}87 = 1{,}318 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Näide. Auru parameetrid on $u = 600$ kcal/kg ja $t = 180°$ C. Määrata auru entalpia.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru II tabelist leiame, et temperatuuril 180° C on auru parameetrid

$$i' = 182{,}2, \quad r = 481{,}0, \quad u' = 181{,}9,$$

$$i'' = 663{,}2, \quad \varrho = 434{,}8, \quad u'' = 616{,}7.$$

Nendest parameetritest nähtub, et tegemist on niiske auruga, sest $u'' > 600$. Selle niiske auru entalpia i_x leiame järgnevalt:

$$u_x = u'' - (1 - x)\,\varrho, \quad 1 - x = \frac{u'' - u_x}{\varrho};$$

$$i_x = i'' - (1 - x)\, r, \quad 1 - x = \frac{i'' - i_x}{r}.$$

Nende seoste põhjal

$$i_x = i'' - (u'' - u_x)\,\frac{r}{\varrho} = 663{,}2 - (616{,}7 - 600)\,\frac{481}{434{,}8} =$$

$$= 644{,}73 \text{ kcal/kg}.$$

Arvutus on teostatav ka teisiti. Määrame esiteks võrrandi (57) järgi auru sisaldavuse ehk auru kuivusastme

$$x = \frac{u_x - u'}{\varrho} = \frac{600 - 181{,}9}{434{,}8} = 0{,}9616$$

ja võrrandi (54-a) järgi i_x, s. o.

$$i_x = i' + rx = 182{,}2 + 481 \cdot 0{,}9616 = 644{,}73.$$

Näide. Auru parameetrid on $p = 8$ ata ja $v = 0{,}20$ m³/kg. Määrata t, x, i, u ja s.

Lahendus. I ja II tabelist leiame, et rõhul 8 ata on kuumendatud vee ja kuiva küllastunud auru parameetrid

t	= 169,61 °C,	i'	= 171,3 kcal/kg,
v'	= 0,0011 m³/kg,	i''	= 660,8 kcal/kg,
v''	= 0,2448 m³/kg,	r	= 489,5 kcal/kg,
s'	= 0,4865 kcal/kg °C,	u'	= 171,1 kcal/kg,
s''	= 1,5922 kcal/kg °C,	u''	= 614,9 kcal/kg,
$s'' - s'$	= 1,1057 kcal/kg °C,	ϱ	= 443,8 kcal/kg.

Et $v < v''$, on tegemist niiske auruga. Võrrandi (51) järgi

$$x = \frac{v_x}{v''} = \frac{0{,}20}{0{,}2448} = 0{,}817.$$

Täpse võrrandi (51) järgi

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0{,}2 - 0{,}0011}{0{,}2448 - 0{,}0011} = 0{,}816.$$

Võrrandi (54-a) järgi on entalpia

$$i_x = i' + rx = 171{,}3 + 489{,}5 \cdot 0{,}816 = 570{,}7 \text{ kcal/kg}$$

ja siseenergia

$$u_x = u' + \varrho x = 171{,}1 + 443{,}8 \cdot 0{,}816 = 533{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Võrrandi (44) järgi

$$u_x = i_x - Apv_x = 570{,}7 - \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2}{427} = 533{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Entroopiavõrrandi (62) järgi on

$$s_x = s' + \frac{rx}{T_s} = 0{,}4865 + \frac{489{,}5 \cdot 0{,}816}{442{,}76} = 1{,}3886 \text{ kcal/kg °C}.$$

Näide. Auru parameetrid on $p = 15$ ata ja $t = 300°$ C. Määrata parameetrid v, i, u ja s.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru tabelist nähtub, et neil parameetritel aur on ülekuumendatud olekus. Ülekuumendatud auru tabelist interpoleerimisega vastavalt 14 ata ja 16 ata leiame, et

$$v = \frac{0{,}1859 + 0{,}1618}{2} = 0{,}1738 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i = \frac{725{,}1 + 724{,}0}{2} = 724{,}5 \text{ kcal/kg},$$

$$u = i - Apv = 724{,}5 - \frac{15 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1738}{427} = 663{,}5 \text{ kcal/kg},$$

$$s = \frac{1{,}6614 + 1{,}6449}{2} = 1{,}6531 \text{ kcal/kg °C}.$$

Näide. Arvutada 0 °C juures oleva ühe kilogrammi vee kuumendamiseks kuni keemistemperatuurini tarbitud soojus, kui kuumendamisprotsess toimub mööda piirkõverat rõhult 1 ata rõhuni 200 ata ja juhul, kui vesi esiteks komprimeeritakse isotermiliselt rõhuni 200 ata ja selle järel kuumendatakse isobaariliselt (vt. joon. 32).

Lahendus. Võrrandi (37) järgi

$$q' = u' + A\int_{v_o'}^{v'} p\,dv.$$

Vaadeldes ülemist piirkõverat kuni rõhuni 200 ata sirgena, avaldab integraal kolmnurga pindala, mille kõrgus on $(p - p_o)$ ata ja alus $(v' - v_o')$ m³/kg. Seega

$$q' = u' + \frac{A(p - p_o)(v' - v_o')}{2} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et rõhule 200 ata vastab

$$u' = 422{,}1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ ja } v' = 0{,}00201 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Võrrandi (33) järgi

$$v_o = v_o'(1 - \beta p) = 0{,}001\,(1 - 0{,}00005 \cdot 200) = 0{,}00099 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Järelikult

$$q' = 422{,}1 + \frac{(200 - 1)\,(0{,}00201 - 0{,}00100) \cdot 10^4}{2 \cdot 427} =$$

$$= 422{,}1 + 2{,}353 = 424{,}453 \text{ kcal/kg}.$$

Teisel juhul avaldub soojushulk võrrandiga

$$q = u' + Ap\,(v' - v_o) =$$

$$= 422{,}1 + \frac{200 \cdot 10^4 \cdot (0{,}00201 - 0{,}00099)}{427} = 422{,}1 + 4{,}777 = 426{,}877 \text{ kcal/kg.}$$

Teisel juhul vee kuumendamiseks tarbitud soojushulk on suurem

$$\Delta q = 426{,}877 - 424{,}353 = 2{,}524 \text{ kcal/kg}$$

võrra, mis soojushulga q suhtes moodustab 0,59%. Eeltoodu järgi võime praktiliselt oletada, et $q' = q$.

III peatükk.

TERMODÜNAAMILISED PROTSESSID VEEAURUGA.

Termodünaamilised protsessid veeauruga erinevad protsessidest ideaalsete gaasidega selle poolest, et veeaur, olles töötavaks kehaks, muudab protsessis agregaatolekut, kui protsess haarab niiske auru piirkonda.

Sellest asjaolust tingituna vaatleme auruga toimuvates protsessides kolme võimalikku erijuhtu, s. o. protsessi niiske ja ülekuumendatud auru piirkonnas ning protsessi, milles aur muudab agregaatolekut, s. o. faasi. Kõikide protsesside puhul eeldame, et nad on tagastatavad.

15. ISOHOORILINE PROTSESS.

Protsess niiske auruga.

Protsessi kulgemine on näidatud joonistel 40 ja 41 esitatud p-v- ja T-s-diagrammil. Märgime auru algoleku parameetrid p_1, v, t_1 ja x_1 ning protsessi lõppoleku parameetrid p_2, v, t_2 ja x_2. Oletame, et on antud auru oleku parameetrid protsessi algul ja auru rõhk p_2 protsessi lõpul. Otsitavateks parameetriteks sel puhul on t_2 ja x_2.

Auru temperatuuri t_2 leiame kuiva küllastunud auru tabelist rõhu p_2 järgi. Peale selle leiame rõhkude p_1 ja p_2 järgi tabelist veel mahu v'_1 ja v'_2 ning kuiva küllastunud auru mahud v''_1 ja v''_2. Nende mahtude kaudu on võimalik arvutada auru kuivusastet x_2 järgnevalt:

$$v = v'_1 + (v''_1 - v'_1)x_1 = v'_2 + (v''_2 - v'_2)x_2 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \tag{78}$$

kust leiame, et

$$x_2 = \frac{v''_1 - v'_1}{v''_2 - v'_2}\, x_1 + \frac{v'_1 - v'_2}{v''_2 - v'_2}. \tag{79}$$

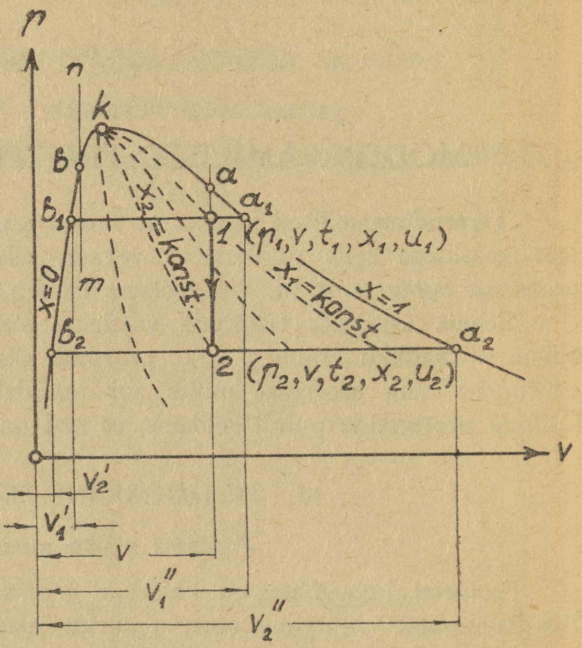
Madalrõhkude piirkonnas, kui x_1 ja x_2 on lähedased ühele, on mahud v'_1 ja v'_2 võrreldes mahtudega v''_1 ja v''_2 väikesed, mille tõttu selle piirkonna jaoks võime võrrandi (79) kirjutada kujul

$$x_2 \approx \frac{v''_1}{v''_2}\, x_1. \tag{80}$$

Kui teame isohoorilist mahtu v, siis x_2, nagu nähtub võrrandist (78) on arvutatav võrrandiga

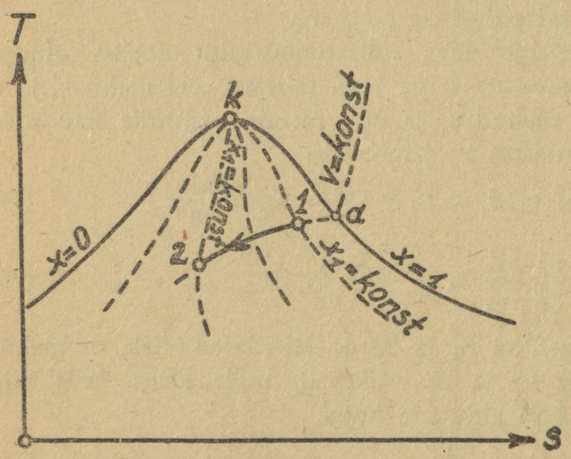
$$x_2 = \frac{v - v_2'}{v_2'' - v_2'}. \qquad (81)$$

p-v- ja *T-s*-diagrammilt (joon. 40 ja 41) selgub, et isohoorilises jahtumisprotsessis ülemiselt piirkõveralt alates aur niiskub, s. o. kondenseerub, kuid ei muutu täielikult veeks, sest isohoor niiske auru piirkonnas jahtumisprotsessis ei lõiku alumise piirkõveraga, nagu seda selgelt fikseerib *p-v*-diagramm. Järelikult ei lõiku isohoor niiske auru piirkonnas alumise piirkõveraga ka *T-s-* ja *i-s*-diagrammil, vaatamata sellele, kuivõrd ta lähenebki alumisele piirkõverale.



Joon. 40.

Edasi järeldame *p-v*-diagrammilt, et kui isohoorilises protsessis maht v on väiksem kriitilisest mahust v_k, nagu see esineb protsessis *mn* (joon. 40), siis kuumendumise puhul väheneb x pidevalt ja muutub nulliks alumise piirkõvera punktis b, s. o. aur kondenseerub täielikult. Kui aga $v > v_k$, siis kuumendumisprotsessis aur kuivab ja võib ülekuumeneda.



Joon. 41.

Isohoorilise protsessi teostamiseks tarbitud väline

soojushulk soojusvõrrandi

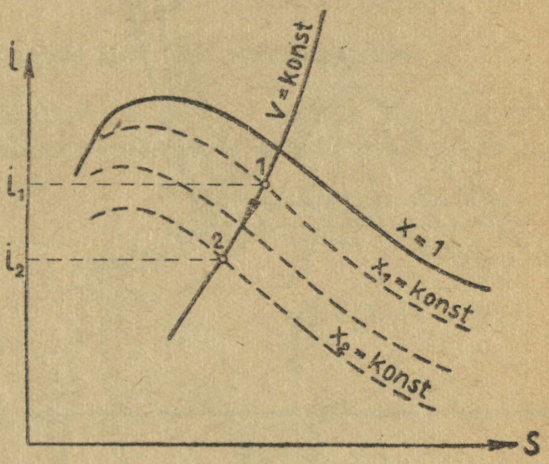
$$dq = du + Apdv$$

põhjal avaldub

$$dq_v = du,$$

$$q_v = \Delta u = u_2 - u_1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{82}$$

kus u_1 on auru siseenergia protsessi algul ja u_2 protsessi lõpul, s. o. isohooriliste protsessis tarbitakse väline soojus auru siseenergia muutmiseks nagu gaaside puhulgi.



Joon. 42.

Arvesse võttes, et võrrandi (56) põhjal

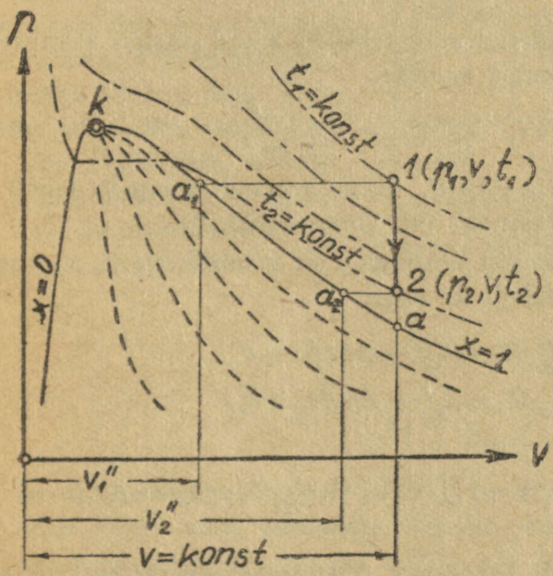
$$u_2 = u_2' + \varrho_2 x_2$$

ja $u_1 = u_1' + \varrho_1 x_1$,

saame võrrandi (82) esitada ka kujul

$$\Delta u = u_2' + \varrho_2 x_2 - $$

$$-(u_1' + \varrho_1 x_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{83}$$



Joon. 43.

Soojusvõrrandi

$$dq = di - Avdp$$

põhjal avaldub isohooriliseks protsessiks tarbitud väline soojushulk

$$q_v = \Delta u = i_2 - i_1 -$$

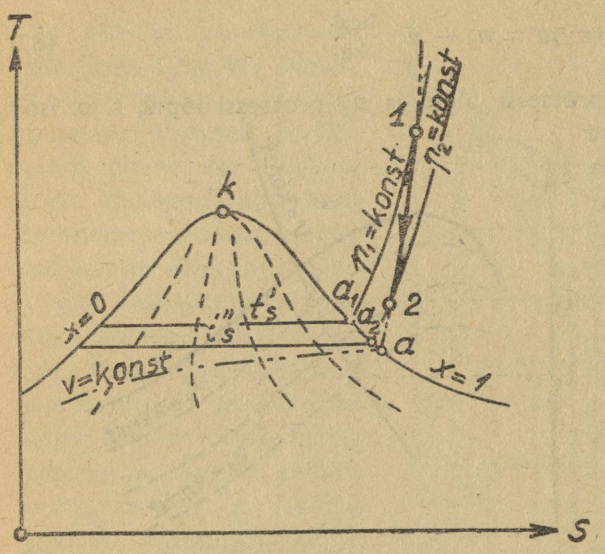
$$-Av(p_2 - p_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{84}$$

Isohooriline protsess *i-s*-diagrammil on esitatud joonisel 42.

Protsess ülekuumendatud auruga.

Protsess *p-v*- ja *T-s*-diagrammil on esitatud joonistel 43 ja 44.

Oletame, et on antud auru parameetrid t_1 ja p_1 protsessi algul ning rõhk p_2 protsessi lõpul. On tarvis määrata auru maht v ja temperatuur t_2 protsessi lõpul ning väline soojushulk q_v.



Joon. 44.

Kasutades ülekuumendatud auru tabelit, saame rõhu p_1 ja temperatuuri t_1 kaudu interpoleerimisega määrata mahu v. Saadud mahu v ja rõhu p_2 kaudu on tabelist võimalik leida protsessi lõpptemperatuuri t_2. Arvutuse täpsus on seda suurem, mida väiksemate rõhu- ja temperatuuri-intervallide järgi on antud tabel [14].

Protsessist osavõttev väline soojushulk ehk protsessis esinev auru siseenergia muutus on

$$q_v = \Delta u = u_2 - u_1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \quad (85)$$

Tavaliselt on ülekuumendatud auru tabelites antud entalpia väärtused. Entalpia kaudu avaldub siseenergia muutus

$$\Delta u = i_2 - i_1 - Av(p_2 - p_1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad (86)$$

sest $u_2 = i_2 - Ap_2v$ ja $u_1 = i_1 - Ap_1v$. Sama võrrandi saame ka tehnilise töö kaudu avaldatud soojusvõrrandist (vt. võrrand 103, I).

Kasutades keskmist isobaarilist erisoojust, on võimalik u_1 ja u_2, nagu selgub joonistelt 43 ja 44, avaldada ka kujul

$$u_1 = u_1'' + c_{pm}'(t_1 - t_s') - Ap_1(v - v_1''),$$
$$u_2 = u_2'' + c_{pm}''(t_2 - t_s'') - Ap_2(v - v_2'').$$

Järelikult

$$\Delta u = u_2'' + c_{pm}''(t_2 - t_s'') - Ap_2(v - v_2'') - [u_1'' + c_{pm}'(t_1 - t_s') - Ap_1(v - v_1'')]$$

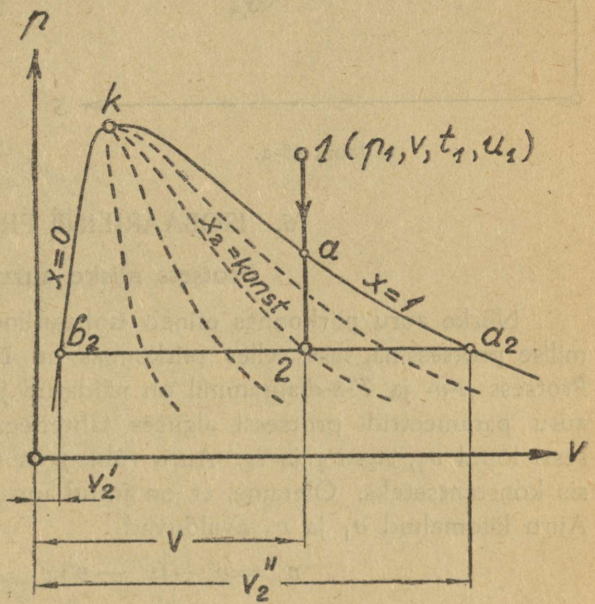
[14] Soovitatav on raamat: М. П. Вукалович, „Термодинамические свойства водяного пара", Госэнергоиздат, 1946.

kus c''_{pm} on keskmine isobaariline erisoojus protsessi lõpprõhule p_2 vastavast aurustumistemperatuurist t''_s kuni protsessi lõpptemperatuurini t_2 ja c'_{pm} samanimeline erisoojus protsessi algrõhule p_1 vastavast aurustumistemperatuurist t'_s kuni protsessi algtemperatuurini t_1. Keskmiste isohooriliste erisoojuste kaudu avaldub siseenergia muutus

$$\Delta u = u''_2 + c''_{vm}(t_2 - t''_s) - [u''_1 + c'_{vm}(t_1 - t'_s)] \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (87)$$

Aur muudab protsessis faasi ehk agregaatolekut.

Protsess on esitatud joonistel 45 ja 45-a *p-v-* ja *T-s*-diagrammil. Oletame, et protsess kulgeb ülekuumendatud auru piirkonnast niiske auru piirkonda (aur jahtub) ja on antud ülekuumendatud auru parameetrid p_1, t_1 ning auru rõhk p_2 protsessi lõpul. Tarvis on määrata v, u_1, u_2, x_2 ja t_2. Auru mahu leiame ülekuumendatud auru tabelist interpoleerimisega rõhu p_1 ja temperatuuri t_1 kaudu. Temperatuur t_2 on määratav kuiva küllastunud auru tabelist rõhu p_2 järgi. Teades isohoorilist mahtu v, leiame niiske auru tabelist saadud mahtude v'_2 ja v''_2 kaudu auru kuivusastme x_2 tuntud seosest



Joon. 45.

$$v = v'_2 + (v''_2 - v'_2)x_2 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}},$$

$$x_2 = \frac{v - v'_2}{v''_2 - v'_2}.$$

Olgu tähendatud, et mahu v''_2 kaudu on võimalik kontrollida, kas protsess siirdub niiske auru piirkonda. Nimelt, kui $v < v''_2$, siis siirdub protsess niiske auru piirkonda, kui aga $v > v''_2$, siis lõpeb protsess ülekuumendatud auru piirkonnas. Juhul, kui $v = v''_2$, lõpeb protsess ülemisel piirkõveral.

Protsessist osavõttev väline soojus avaldub võrrandiga

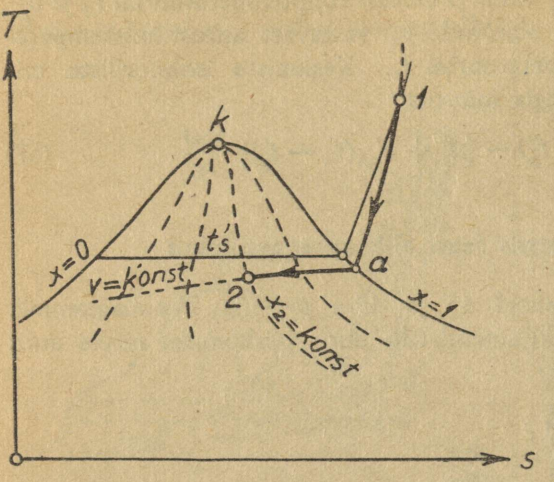
$$q_v = \Delta u = u_2 - u_1 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

kus

$$u_2 = u'_2 + \varrho_2 x_2 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

ja

$$u_1 = i_1 - Ap_1 v \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$



Joon. 45-a.

Entalpia i_1 väärtuse leiame ülekuumendatud auru tabelist rõhu p_1 ja temperatuuri t_1 kaudu. Keskmise isobaarilise erisoojuse kaudu on

$$u_1 = u''_1 + c'_{pm}(t_1 - t'_s) - Ap_1(v - v''_1) \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

16. ISOBAARILINE PROTSESS.

Protsess niiske auruga.

Niiske auru piirkonnas esineb isobaariline protsess ühtlasi ka isotermilise protsessina, sest selles piirkonnas on isobaar ühtlasi ka isotermiks. Protsess p-v- ja T-s-diagrammil on näidatud joonistel 46 ning 47. Märgime auru parameetrid protsessi alguses tähtedega v_1, x_1, u_1 ja i_1 ning protsessi lõpul v_2, x_2, u_2 ja i_2. Auru rõhk p ja temperatuur t jäävad protsessis konstantseteks. Oletame, et on antud auru parameetrid p ja x_1 ning v_2. Auru kilomahud v_1 ja v_2 avalduvad

$$v_1 = v' + (v'' - v')x_1 \approx v''x_1,$$
$$v_2 = v' + (v'' - v')x_2 \approx v''x_2.$$

Nendest võrranditest nähtub, et

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{x_1}{x_2}.$$

Protsessiks tarbitud väline soojus soojusvõrrandi

$$dq = di - Avdp$$

kaudu avaldub

$$dq_p = di,$$

$$q_p = \Delta i = i_2 - i_1 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (88)$$

Entalpia i_1 ja i_2 väärtused avalduvad

$$i_1 = i' + rx_1 \text{ ja } i_2 = i' + rx_2.$$

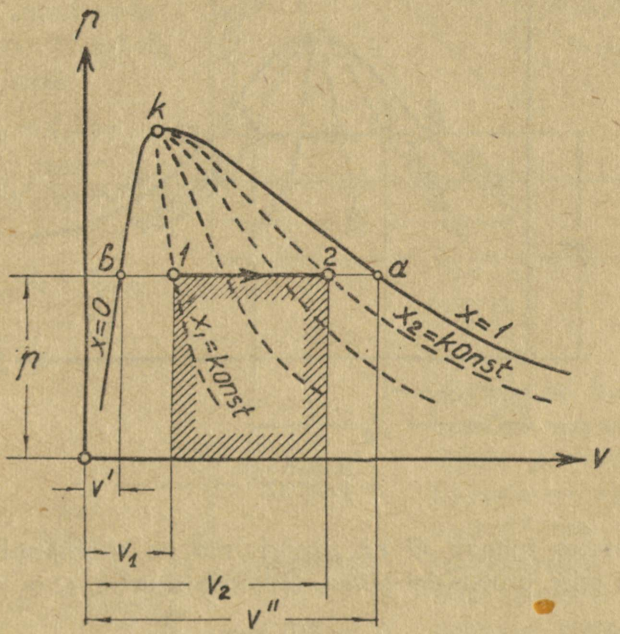
Järelikult

$$q_p = (i' + rx_2) - (i' + rx_1) = (x_2 - x_1)r \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{89}$$

Analoogiliselt leiame auru siseenergia muutuse protsessis,

$$\Delta u = (x_2 - x_1)\varrho \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{90}$$

sest $u_2 = u' + \varrho x_2$ ja $u_1 = u' + \varrho x_1$.



Joon. 46.

Protsessis sooritatud absoluutne mehhaaniline töö, nagu nähtub jooniselt 46, on

$$L = p(v_2 - v_1) \approx p(v''x_2 - v''x_1) \approx pv''(x_2 - x_1) \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{91}$$

Suurused ϱ, r, u', u'', i' ja i'' leiame protsessi rõhu p või temperatuuri t_s kaudu kuiva küllastunud auru tabelist.

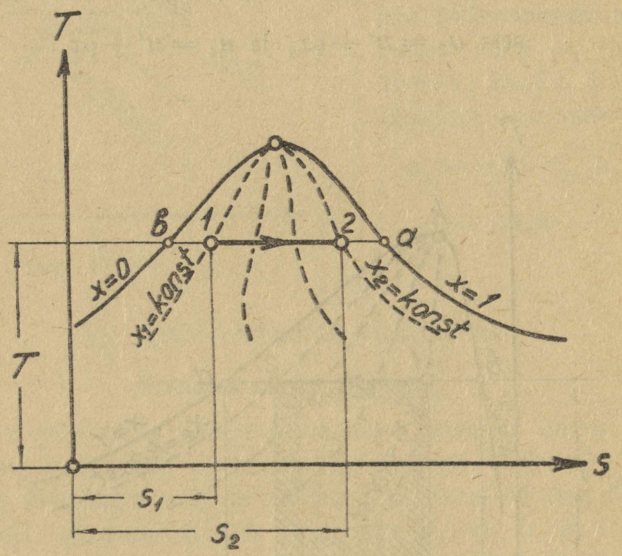
Absoluutne mehhaaniline töö avaldub veel järgnevalt.

Asendame soojusvõrrandi $q = \Delta u + AL$ liikmed $\Delta u = (x_2 - x_1)\varrho$ ja $q = q_p = (x_2 - x_1)r$, siis saame võrrandi AL arvutamiseks kujul

$$AL = (x_2 - x_1)r - (x_2 - x_1)\varrho = (x_2 - x_1)(r - \varrho) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (92)$$

Arvesse võttes, et $r - \varrho = \psi$ ja $A = 1/427$, võime võrrandi (92) esitada ka kujul

$$L = 427(x_2 - x_1)(r - \varrho) = 427(x_2 - x_1)\psi \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \qquad (93)$$



Joon. 47.

Kui protsess toimub G kg auruga, siis on sooritatud mehhaaniline töö, nagu iga teise protsessigi puhul, G korda suurem, s. o.

$$L_G = GL \text{ kgm}. \qquad (94)$$

Võrrandeist (89), (90) ja (93) nähtub, et aurustumisprotsessis on siseenergia koefitsient jääv suurus ja väheneb aurustumisrõhu tõustes.

Protsess ülekuumendatud auruga.

Protsess p-v- ja T-s-diagrammil on näidatud joonistel 48 ja 49.

Vaatleme isobaarilist paisumisprotsessi. Oletame, et on antud auru parameetrid protsessi alguses p_1 ja t_1 ning parameeter t_2 protsessi lõpul. Auru kilomahu v_1 määrame, nagu tavaliselt, ülekuumendatud auru tabelist

parameetrite p_1 ja t_1 kaudu ja kilomahu v_2 parameetrite $p_1 = p_2 = p$ ja temperatuuri t_2 kaudu.

Protsessiks tarbitud väline soojus avaldub entalpia muutusega, s. o.

$$q_p = \Delta i = i_2 - i_1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

i_1 ja i_2 on määratavad kas *i-s*-diagrammilt (vt. joon. 50) või ülekuumendatud auru tabelist.

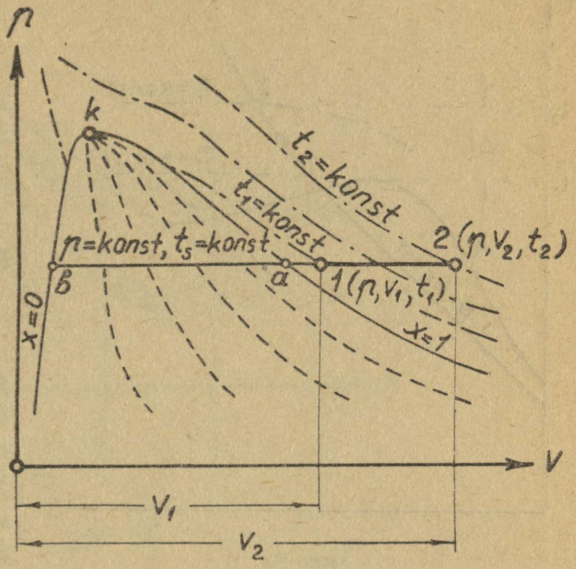
Keskmiste isobaariliste erisoojuste kaudu, millede väärtused on antud vastavates tabelites (vt. IV tabel), avaldub soojushulk

$$q_p = c''_{pm}(t_2 - t_s) - c'_{pm}(t_1 - t_s) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad (95)$$

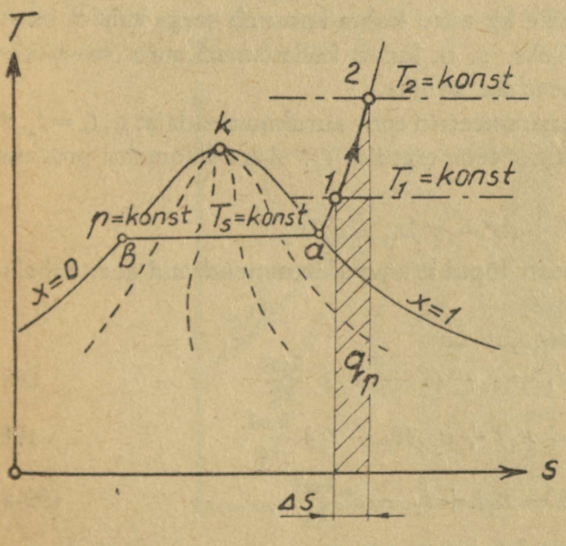
sest

$$i_2 = i'' + c''_{pm}(t_2 - t_s),$$

$$i_1 = i'' + c'_{pm}(t_1 - t_s),$$



Joon. 48.



Joon. 49.

kus c''_{pm} on keskmine isobaariline erisoojus protsessi rõhule p vastavast kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni protsessi lõpptemperatuurini t_2, ja c'_{pm} samast temperatuurist t_s kuni protsessi algtemperatuurini t_1 võetud keskmine erisoojus.

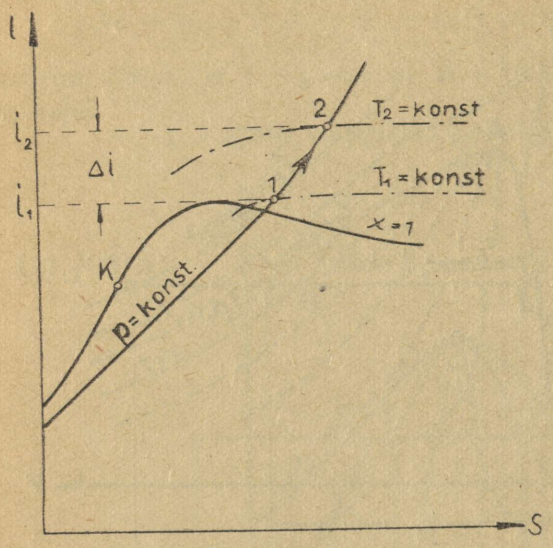
T-s-diagrammil on soojushulk q_p võrdne protsessi joone *12* aluse pindalaga (vt. joon. 49).

Auru siseenergia muutus protsessis on

$$\Delta u = u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - Ap(v_2 - v_1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{96}$$

sest $u_2 = i_2 - Apv_2$,

$u_1 = i_1 - Apv_1$.



Joon. 50.

Protsessis sooritatud absoluutne mehhaaniline töö avaldub

$$L = p(v_2 - v_1) \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{97}$$

Protsessis esineb auru faasi muutus.

Vaatleme juhtu, kui protsess siirdub niiske auru piirkonnast ülekuumendatud auru piirkonda, nagu on näidatud joonistel 51 ja 52. See protsess esineb aurukuumendajas. Nimelt omab aurukatlast aurukuumendajasse voolav aur tavaliselt alati teatavat niiskust, mis auru kuivusastme x_1 kaudu avaldub $(1 - x_1)$ kg/kg. Järelikult, aurukuumendajas ülekuumendatud auru saamiseks tarbitud soojushulk ühe kg auru kohta koosneb seega kahest osast: üks osa läheb auru kuivatamiseks, s. o. kuiva küllastunud auru saamiseks ja teine osa on auru ülekuumenduse soojus.

Olgu antud auru algoleku parameetrid enne aurukuumendajat $p, t_1 = t_s, x_1$ ja aurukuumendajast väljuva auru temperatuur t_2. Auru kilomahu protsessi algul arvutame võrrandiga

$$v_1 = v' + (v'' - v')x_1 \approx v''x_1.$$

Auru kilomahu v_2 protsessi lõpul leiame ülekuumendatud auru tabelist rõhu p ja temperatuuri t_2 järgi.

Protsessiks tarbitud välissoojus on

$$q_p = i_2 - i_1 = i_2 - (i' + rx_1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{98}$$

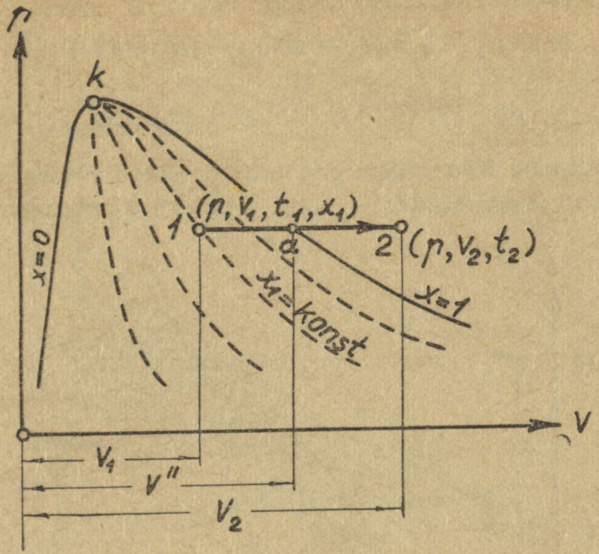
ehk

$$q_p = r(1 - x_1) + c_{pm}(t_2 - t_s) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{99}$$

$$q_p = r(1 - x_1) + i_2 - i'' \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{99-a}$$

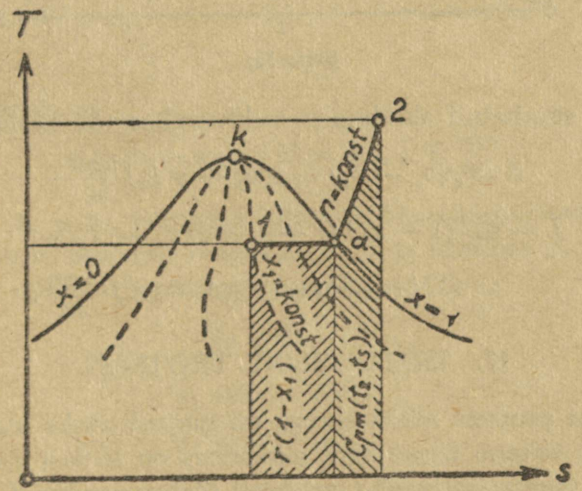
kus $r(1 - x_1)$ on niiske auru piirkonnas aurustumata vee aurustamiseks, s. o.

auru kuivatamiseks tarbitav väline soojus ja $c_{pm}(t_2 - t_s)$ auru ülekuumendamiseks tarbitav väline soojus. T-s-diagrammil esindab soojushulka $r(1 - x_1)$



Joon. 51.

niiske auru piirkonna protsessis joonealune pindala ja soojushulka $c_{pm}(t_2 - t_s)$ — ülekuumendatud auru piirkonda ulatuva protsessi joonealune pindala (vt. joon. 52).



Joon. 52.

Vahetult saab soojushulga q_p määrata i-s-diagrammilt, nagu on näidatud joonisel 53.

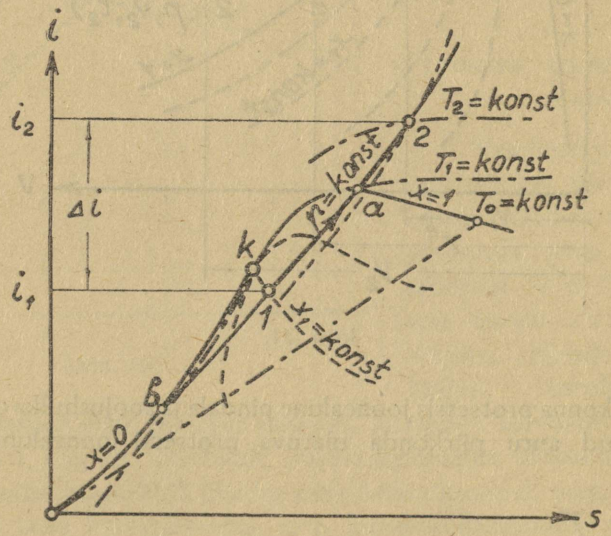
Protsessis esinev siseenergia muutus on

$$\Delta u = u_2 - u_1 = i_2 - Apv_2 - (u' + \varrho x_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{100}$$

ehk

$$\Delta u = \varrho(1 - x_1) + c_{vm}(t_2 - t_s) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

kus c_{vm} on keskmine isohooriline erisoojus protsessi rõhule vastavast kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni protsessi lõpptemperatuurini t_2.



Joon. 53.

Protsessis sooritatud absoluutne mehhaaniline töö avaldub võrrandiga

$$L = p(v_2 - v_1) \approx p(v_2 - v'' x_1) \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}} \tag{101}$$

ehk

$$L = 427\,(1 - x_1)\,(r - \varrho) + p(v_2 - v'') =$$

$$= 427\,(1 - x_1)\,\psi + p(v_2 - v'') \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{102}$$

17. ISOTERMILINE PROTSESS.

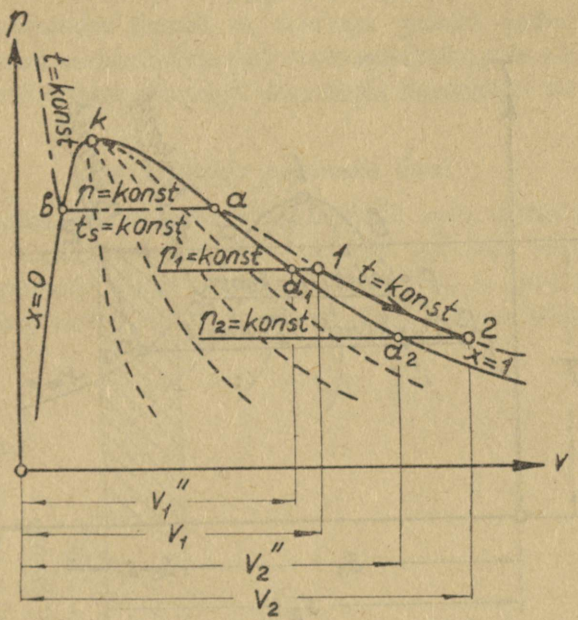
Isotermiline protsess niiske auruga on samane niiske auru isobaarilise protsessiga, sest isoterm niiske auru piirkonnas on ühtlasi isobaar.

Vaatleme esiteks isotermilist protsessi ülekuumendatud auruga. Protsessi jooned p-v- ja T-s-diagrammil on näidatud joonistel 54 ja 55. Auru

parameetrid v_1 ja v_2 leiame interpoleerimisega ülekuumendatud auru tabelist protsessi alg- ning lõpprõhu p_1 ja p_2 ning protsessi temperatuuri järgi. Protsessi sooritamiseks tarbitava välise soojushulga määrame protsessis esineva entroopia muutuse kaudu, mille suurus on

$$(s_2 - s_1)_T = \Delta s_T = \frac{q}{T} \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}},$$

kus T on protsessi temperatuur.



Joon. 54.

Sellest järgneb, et

$$q_T = (s_2 - s_1)_T \cdot T = \Delta s_T \cdot T \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{103}$$

Entroopia s_1 ja s_2 väärtused määrame interpoleerimisega ülekuumendatud auru tabelist protsessi temperatuuri T ja rõhkude p_1 ning p_2 järgi.

Protsessis esinenud siseenergia muutus on

$$\Delta u_T = u_2 - u_1,$$

kus

$$u_1 = i_1 - Ap_1v_1,$$

$$u_2 = i_2 - Ap_2v_2.$$

Järelikult

$$\Delta u_T = i_2 - i_1 - A(p_2v_2 - p_1v_1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{104}$$

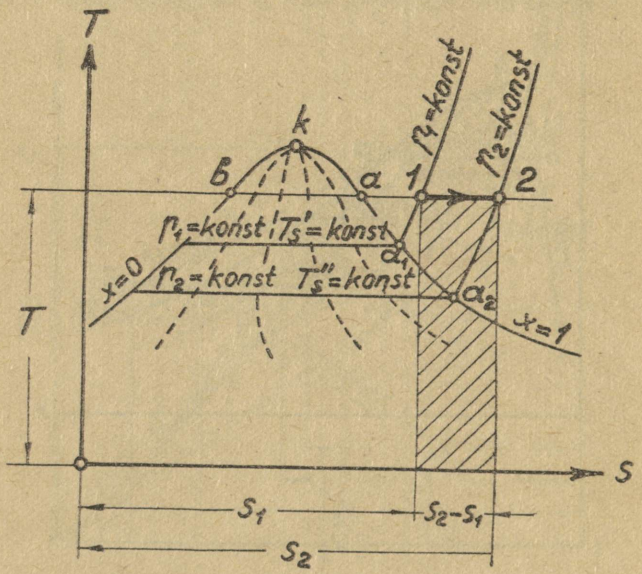
Keskmiste isobaariliste erisoojuste kaudu u_1, i_1 ja u_2, i_2 avalduvad:

$$u_1 = u_1'' + c_{pm}' (t - t_s') - Ap_1 (v_1 - v_1''),$$

$$u_2 = u_2'' + c_{pm}'' (t - t_s'') - Ap_2 (v_2 - v_2''),$$

$$i_1 = i_1'' + c_{pm}' (t - t_s'),$$

$$i_2 = i_2'' + c_{pm}'' (t - t_s'').$$



Joon. 55.

Nendes võrrandites on c_{pm}' keskmine isobaariline erisoojus rõhule p_1 vastavast kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s' kuni isotermilise temperatuurini t, c_{pm}'' — keskmine isobaariline erisoojus protsessi lõpprõhule p_2 vastavast kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s'' kuni sama isotermilise temperatuurini. Suurused v_1'' ja v_2'' on rõhule p_1 ja p_2 vastavad kuiva küllastunud auru kilomahud, nagu selgub joonistelt 54 ja 55.

Liige $Ap_1 (v_1 - v_1'')$ on isobaariline välistöö (kcal/kg) ülemise piirkõvera punktist a_1 kuni protsessi algpunktini *1* ja liige $Ap_2 (v_2 - v_2'')$ isobaariline välistöö ülemise piirkõvera punktist a_2 kuni protsessi lõpp-punktini *2*, sest soojusvõrrandi järgi $\Delta u_p = q_p - AL$.

Eeltoodust järgneb, et aurudega, s. o. reaalsete gaasidega toimuvas isotermilises protsessis ei jää siseenergia konstantseks, nagu ideaalsete gaaside

puhul, vaid tingituna disgregatsiooni tööst on muutuv suurus. Muutus on seda suurem, mida rohkem reaalne gaas kaldub kõrvale ideaalse gaasi seadustest.

Teades q_T ja Δu_T väärtust on võimalik soojusvõrrandi $q = \Delta u + AL$ järgi arvutada protsessis sooritatud absoluutset mehhaanilist tööd, s. o.

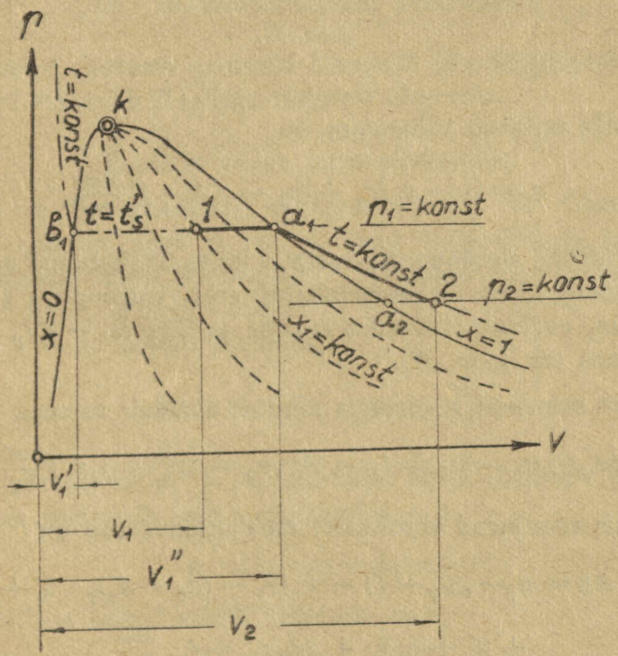
$$AL = q_T - \Delta u_T = (s_2 - s_1)_T \cdot T - (i_2 - i_1) + A(p_2 v_2 - p_1 v_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \quad (105)$$

Ka sellest võrrandist ilmneb, et reaalsete gaaside puhul isotermilises protsessis sooritatud mehhaaniline töö (soojusühikuis) pole võrdne protsessi välissoojusega, vaid erineb viimasest siseenergia muutuseks tarbitud soojushulga võrra.

Aur muudab protsessis faasi.

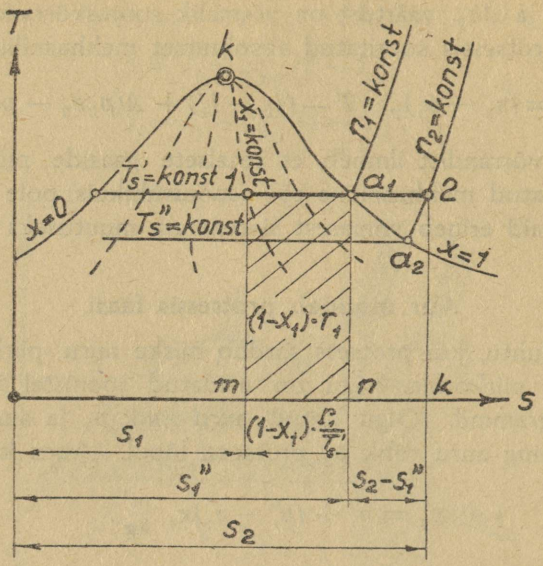
Vaatleme juhtu, kui protsess siirdub niiske auru piirkonnast ülekuumendatud auru piirkonda, nagu on näidatud joonistel 56 ja 57 esitatud p-v- ja T-s-diagrammil. Olgu antud auru rõhk p_1 ja auru kuivusaste x_1 protsessi algul ning auru rõhk p_2 protsessi lõpul. Auru kilomaht protsessi algul on

$$v_1 = v_1' + (v_1'' - v_1')x_1 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$



Joon. 56.

Auru kilomahu v_2 protsessi lõpul leiame ülekuumendatud auru tabelist rõhu p_2 ja protsessi temperatuuri järgi.



Joon. 57.

Protsessiks tarbitud välissoojus on

$$q_T = (1 - x_1)r_1 + (s_2 - s_1'')_T \cdot T \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{106}$$

kus s_1'' on protsessi algrõhule p_1 vastava kuiva küllastunud auru entroopia ja s_2 — protsessi lõpus ülekuumendatud auru entroopia. T-s-diagrammil liige $(1 - x_1)r_1$ avaldub ristküliku $1a_1nm$ ja liige $(s_2 - s_1'')_T \cdot T$ ristküliku na_12k pindalana (vt. joon. 57).

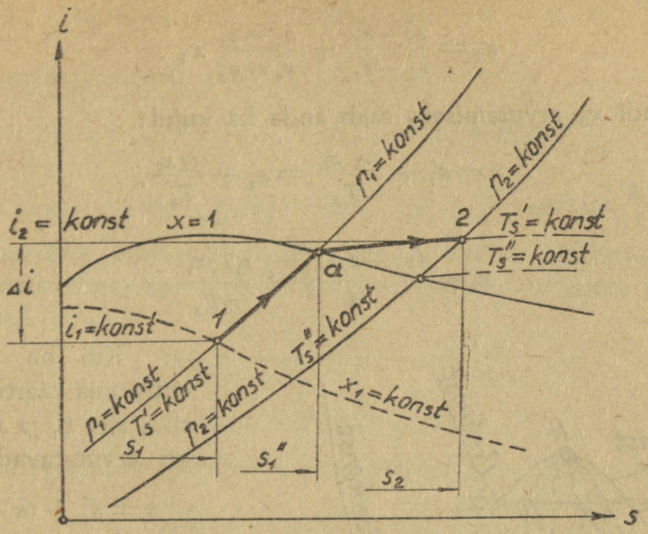
Protsessis esinenud siseenergia muutus avaldub seosega

$$\Delta u_T = u_2 - u_1 = i_2 - Ap_2v_2 - (u_1' + \varrho_1 x_1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{107}$$

Protsessis sooritatud absoluutne mehhaaniline töö on

$$AL = q_T - \Delta u_T = (1 - x_1)r_1 + (s_2 - s_1'')_T \cdot T + \\ + u_1' + \varrho_1 x_1 + Ap_2v_2 - i_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{108}$$

i-s-diagrammil on esitatud protsess joonisel 58.



Joon. 58.

18. ADIABAATILINE PROTSESS.

Adiabaatilise protsessi uurimise teostame *T-s*-diagrammil. Adiabaadid sel diagrammil esinevad *T*-teljega rööpsete sirgetena.

Protsess niiske auru piirkonnas.

Protsess on *T-s*-diagrammil näidatud joonisel 59. Olgu antud auru parameetrid protsessi algul p_1 ja x_1 ning auru rõhk p_2 protsessi lõpul. Tarvis on määrata auru parameeter v_1 protsessi algul ja auru kuivusaste x_2 ning kilomaht v_2 protsessi lõpul.

Kilomahu v_1 arvutame võrrandiga

$$v_1 = v_1' + (v_1'' - v_1')x_1 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Auru parameetrid v_2 ja x_2 protsessi lõpul arvutame tingimusest, et auru entroopia protsessis jääb muutmatuks, s. o.

$$s_1 = s_2 = s = konst.$$

Selle võrduse põhjal võime kirjutada, et

$$s_1' + (s_1'' - s_1')x_1 = s_2' + (s_2'' - s_2')x_2 .$$

Ilmutades võrrandi x_2 suhtes, saame

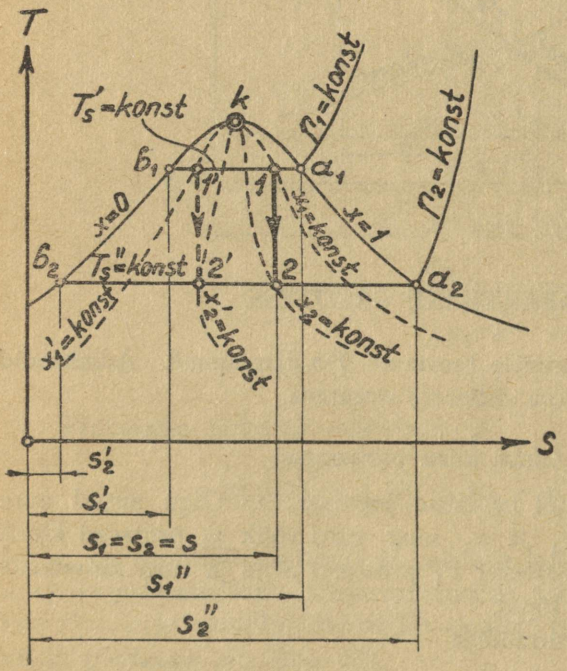
$$x_2 = \frac{s_1' - s_2'}{s_2'' - s_2'} + \frac{s_1'' - s_1'}{s_2'' - s_2'} x_1 . \tag{109}$$

Võrrandi x_2 arvutamiseks saab anda ka kujul:

$$s = s_1' + \frac{r_1 x_1}{T_s'} = s_2' + \frac{r_2 x_2}{T_s''} ,$$

kust

$$x_2 = \frac{(s_1' - s_2') T_s''}{r_2} + \frac{r_1 T_s'' x_1}{r_2 T_s'} . \tag{110}$$



Joon. 59.

Kui on antud auru entroopia väärtus s protsessiks, siis x_1 ja x_2 väärtused on arvutatavad järgnevalt:

$$s = s_1' + (s_1'' - s_1')x_1 ,$$

$$x_1 = \frac{s - s_1'}{s_1'' - s_1'} . \tag{111}$$

$$s = s_2' + (s_2'' - s_2')x_2 ,$$

$$x_2 = \frac{s - s_2'}{s_2'' - s_2'} . \tag{112}$$

Entroopia väärtused s_1', s_1'' ja s_2', s_2'' leiame kuiva küllastunud auru tabelitest rõhkude p_1 ja p_2 või aurustumistemperatuuride t_s' ja t_s'' kaudu (vt. joon. 59).

Teades x_2 suurust, arvutame mahu v_2 võrrandiga

$$v_2 = v_2' - (v_2'' - v_2')\, x_2 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} .$$

Auru temperatuuri t_s'' protsessi lõpul leiame kuiva küllastunud auru tabelist protsessi lõpprõhu p_2 järgi.

Siseenergia muutus protsessis on

$$\Delta u = u_2 - u_1 = u_2' + \varrho_2 x_2 - (u_1' + \varrho_1 x_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{113}$$

ehk

$$\Delta u = u_2 - u_1 = u_2' + (u_2'' - u_2')x_2 - u_1' - (u_1'' - u_1')x_1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \quad (114)^{15}$$

Entalpia muutus protsessis avaldub

$$\Delta i = i_2 - i_1 = i_2' + r_2 x_2 - (i_1' + r_1 x_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (115)$$

ehk

$$\Delta i = i_2 - i_1 = i_2' + (i_2'' - i_2')x_2 - i_1' - (i_1'' - i_1')x_1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \quad (116)^{16}$$

Adiabaatilises protsessis sooritatud absoluutne mehhaaniline töö on arvutatav soojusvõrrandist $q = \Delta u + AL$ tingimusel, et väline soojus q on võrdne nulliga, s. o.

$$AL = -\Delta u = u_1 - u_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (117)$$

või

$$L = 427\,(u_1 - u_2). \quad (118)$$

Analoogiliselt leiame, et adiabaatilises protsessis sooritatud tehniline töö on

$$AL_t = -\Delta i = i_1 - i_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (119)$$

või

$$L_t = 427\,(i_1 - i_2) \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \quad (120)$$

Võrranditest järgneb, et aurudega toimuvates adiabaatilistes protsessides, nagu ideaalsete gaaside puhulgi, on sooritatud absoluutne mehhaaniline töö võrdne protsessis esinenud auru siseenergia muutusega ja tehniline töö protsessis esinenud entalpia muutusega, võetud vastupidise märgiga.

Võrrandist (119) nähtub, et adiabaatiliste protsesside käsitlemist on kõige lihtsam teostada *i-s*-diagrammil. Kandes sellele diagrammile protsess algrõhu p_1 ja x_1 ning lõpprõhu p_2 järgi protsessi joone, saame vahetult x_2 ja sooritatud tehnilise töö AL_t (vt. joon. 60).

Absoluutse mehhaanilise töö sel puhul võib arvutada võrrandiga

$$L = 427\,(i_1 - i_2) - (p_1 v_1 - p_2 v_2) \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \quad (121)$$

v_1 ja v_2 saab määrata protsessi alg- ja lõpp-punkti läbiva isohoori järgi, kui see on kantud diagrammile.

Adiabaatilist protsessi niiske auru jaoks saab ligikaudu avaldada ideaalse gaasi adiabaadi võrrandiga, s. o.

$$pv^k = konst. \quad (122)$$

Kuiva küllastunud auru puhul on

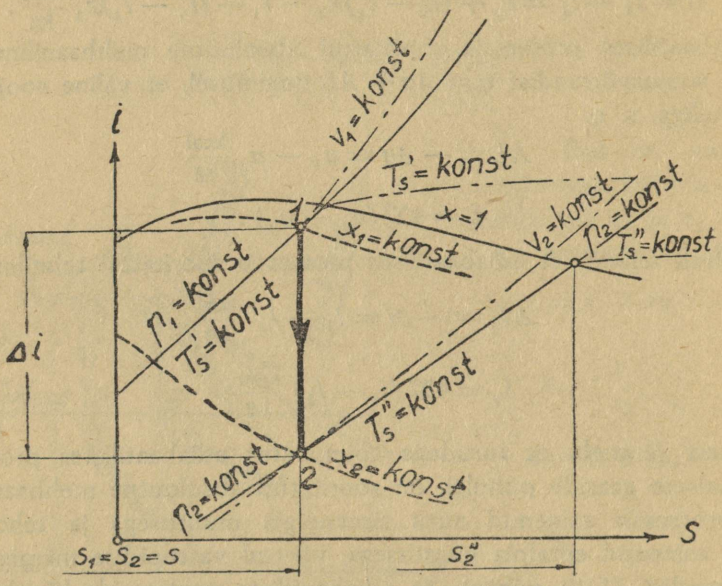
$$k = 1{,}135.$$

[15] Vt. võrrand 55. [16] Vt. võrrand 54.

Niiske auru jaoks on

$$k = 1{,}035 + 0{,}1\,x,$$

kus x on auru kuivusaste paisumisprotsessi algul või komprimeerimisprotsessi lõpul. Võrrand (122) on kehtiv, kui $x > 0{,}7$ ja $\frac{p_1}{p_2} < 20$. Suure suhtarvu p_1/p_2 puhul on õigem auru kuivusastmeks võtta protsessi keskmine kuivusaste.



Joon. 60.

Astendaja k väärtus ei ole sel puhul siiski võrdne auru erisoojuste c_p ja c_v suhtega, vaid etendab lihtsalt aurule kohastatud empiirilise võrrandi astendaja osa.

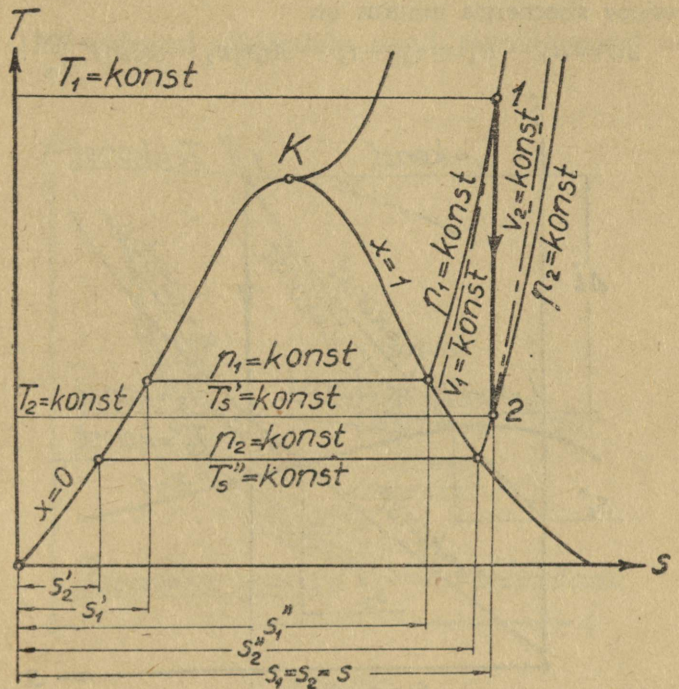
Kinnitades auru kohta võrrandi (122) kehtivust, järgneb sellest, et veeauru suhtes võime teatava täpsusega rakendada ka ideaalse gaasi töövõrrandeid, võttes nendes k võrdseks eelantud väärtusega, s. o.

$$L = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right] = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \quad (123)$$

Uurides adiabaatilist protsessi niiske auruga, selgub nii T-s- kui ka i-s-diagrammilt, et adiabaatilisel paisumisel auru niiskussisaldus suureneb, kui $x_1 > 0{,}5$. Kui aga $x_1 < 0{,}5$, siis aur paisumisel kuivab, s. o. $x_1 < x_2$. Adiabaatilisel komprimeerimisel on nähted vastupidised. Peale selle nähtub diagrammidelt, et mida suurem on niiske auru rõhk, seda rohkem ta adiabaatilisel paisumisel niiskub.

Protsess ülekuumendatud auruga.

Adiabaatiline protsess ülekuumendatud auruga T-s- ja i-s-diagrammil on esitatud joonistel 61 ja 62. Tavaliselt on sel puhul antud auru parameetrid p_1 ja T_1 protsessi algul ja auru parameeter p_2 protsessi lõpul. Parameetrid v_1, v_2 ja T_2 leiame ülekuumendatud auru tabelist parameetrite p_1, T_1, p_2 ja s kaudu.



Joon. 61.

Seose temperatuuri ja rõhuga annab kaunis täpselt empiiriline võrrand:

$$\frac{p_2}{T_2^{13/3}} = \frac{p_1}{T_1^{13/3}} = konst. \qquad (124)$$

Hea täpsusega on ülekuumendatud auru suhtes rakendatav ka adiabaadivõrrand, kui adiabaadi astendajaks võtta arv $k = 1{,}3$, s. o.

$$pv^{1,3} = konst. \qquad (125)$$

Entalpia muutus protsessis on

$$\Delta i = i_2 - i_1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Entalpia muutus Δi on vahetult määratav i-s-diagrammilt.

Keskmiste isobaariliste erisoojuste kaudu avaldub entalpia muutus (vt. joon. 61)

$$\Delta i = i_2'' + c_{pm}''(t_2 - t_s'') - \left[i_1'' + c_{pm}'(t_1 - t_s') \right] \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \qquad (126)$$

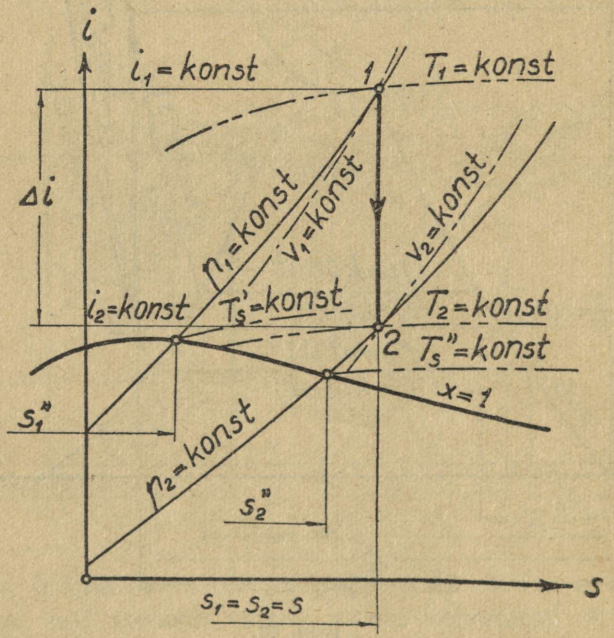
sest

$$i_1 = i_1'' + c_{pm}'(t_1 - t_s'),$$

$$i_2 = i_2'' + c_{pm}''(t_2 - t_s'').$$

Protsessis esinev siseenergia muutus on

$$\Delta u = u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - A(p_2 v_2 - p_1 v_1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (127)$$



Joon. 62.

Keskmiste isobaariliste erisoojuste kaudu avaldub ta kujul:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = u_2'' + c_{pm}''(t_2 - t_s'') - Ap_2(v_2 - v_2'') - u_1'' - c_{pm}'(t_1 - t_s') + \\ + Ap_1(v_1 - v_1'') \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (127\text{-a})$$

Protsessis sooritatud tehniline ja absoluutne mehhaaniline töö on

$$L_t = -427\ \Delta i = 427\,(i_1 - i_2) \frac{\text{kgm}}{\text{kg}},$$

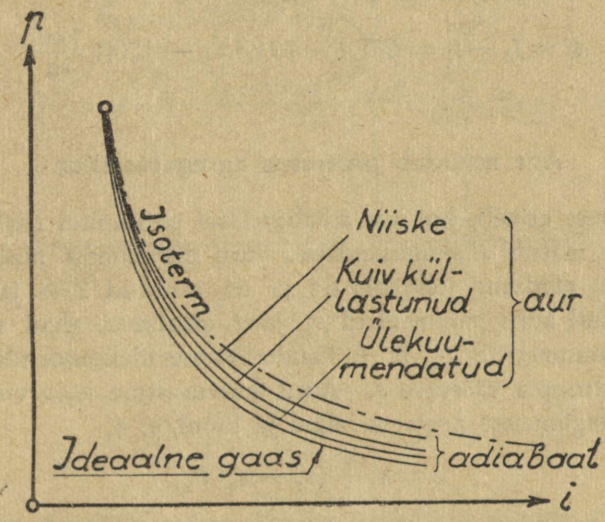
$$L = -427\ \Delta u = 427\,(u_1 - u_2) \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}.$$

Adiabaadivõrrandi järgi, kui võtame $k = 1{,}3$, avalduvad tehniline ja absoluutne töö

$$L_t = 4{,}33\,(p_1v_1 - p_2v_2) = 4{,}33\,p_1v_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0{,}231}\right]\frac{\text{kgm}}{\text{kg}}, \qquad (128)$$

$$L = 3{,}33\,(p_1v_1 - p_2v_2) = 3{,}33\,p_1v_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0{,}231}\right]\frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \qquad (129)$$

Võrrandiga (125) määratud adiabaatide asend p-v-diagrammil on näidatud joonisel 63.



Joon. 63.

Näide. Ülekuumendatud aur, mille rõhk $p_1 = 50$ ata ja temperatuur $t_1 = 450°$ C, paisub adiabaatiliselt kuni rõhuni $p_2 = 7$ ata. Arvutada auru temperatuur t_2 ja kilomaht v_2 protsessi lõpul ning sooritatud tehniline töö.

Ülekuumendatud auru tabelist leiame, et auru parameetritele $p_1 = 50$ ata ja $T_1 = 450 + 273 = 723°$ K, vastab auru entroopia $s = 1{,}6216 + 0{,}0079 = 1{,}6295$ kcal/kg °C ja kilomaht $v_1 = 0{,}06352 + 0{,}00109 = 0{,}06461$ m³/kg. Temperatuuri t_2 ja kilomahu v_2 leiame ülekuumendatud auru tabelist rõhu $p_2 = 7$ ata lahtrist interpoleerimisega veergude vahelt, kus asub entroopia väärtus $s = 1{,}6295\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}$, s. o. $t_2 = 180 + 4{,}6 = 184{,}6°$ C ja $v_2 = 0{,}2906 + 0{,}0035 = 0{,}2941$ m³/kg.

Võrrandi (124) järgi leiame, et

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{3}{13}} = 723\ \left(\frac{7}{50}\right)^{\frac{3}{13}} = 459^\circ\ \text{K}$$

ehk $t_2 = 186^\circ$ C.

Adiabaadivõrrandi järgi on auru kilomaht protsessi lõpul

$$v_2 = v_1\ \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{1,3}} = 0{,}06457 \cdot \left(\frac{50}{7}\right)^{\frac{1}{1,3}} = 0{,}2930\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Tabeli järgi on entalpia muutus

$$\Delta i = i_2 - i_1 = 671{,}4 - 791{,}5 = -120{,}1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Aur muudab protsessis agregaatolekut.

See protsess esineb, kui aur adiabaatilisel paisumisel niiskub, s. o. kui protsessi joon ulatub ülekuumendatud auru piirkonnast niiske auru piirkonda, nagu on näidatud joonistel 64 ja 65 esitatud *T-s-* ja *i-s*-diagrammil. Olgu antud auru parameetrid p_1 ja t_1 protsessi algul ning p_2 protsessi lõpul. Parameetrite p_1 ja t_1 kaudu leiame ülekuumendatud auru tabelist v_1 ja entroopia väärtuse s. Auru kuivusastme x_2 arvutame entroopia võrdsuse tingimusest protsessi algul ja lõpul, s. o.

$$s = s_2' + (s_2'' - s_2')\,x_2,$$

kust leiame, et

$$x_2 = \frac{s - s_2'}{s_2'' - s_2'}.$$

Entroopia väärtused s_2' ja s_2'' on antud kuiva küllastunud auru tabelis rõhu p_2 järgi. Samast tabelist leiame rõhu p_2 kaudu auru temperatuuri protsessi lõpul.

Auru kilomaht protsessi lõpul on

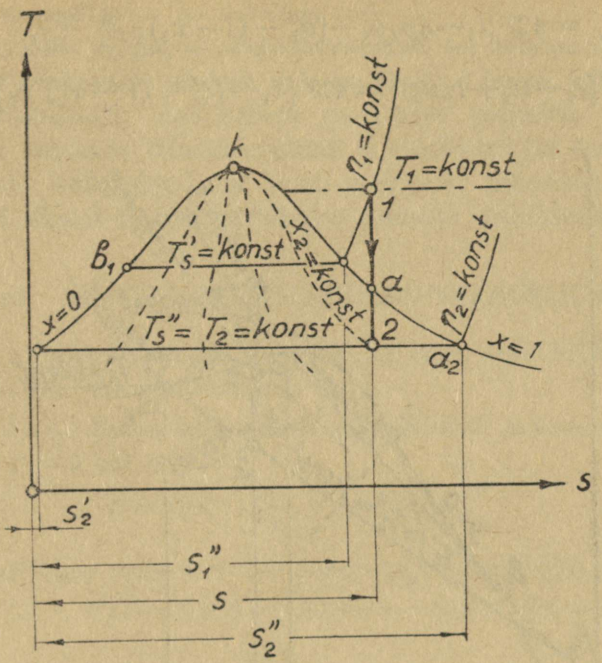
$$v_2 = v_2' + (v_2'' - v_2')\,x_2 \approx v_2'' x_2\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Teatava täpsusega saame arvutada ülemise piirkõvera punkti a, kus adiabaat lõikub ülemise piirkõveraga. Selleks lahendame võrranditesüsteemi

$$p\,(v'')^{1,3} = p_1 v_1^{\,1,3},$$

$$v'' = 2\,\frac{1}{p}.$$

Esimene neist võrrandeist on ülekuumendatud auru adiabaadivõrrand ja teine empiiriline ülemise piirkõvera võrrand (53). Lahendades selle võr-



Joon. 64.

randitesüsteemi p suhtes saame ülemise piirkõvera punkti a läbiva isobaari p_a= *konst* rõhu, mille kaudu on kuiva küllastunud auru tabelist määratavad auru oleku teised parameetrid punktis a. Nende võrrandite lahend annab p_a jaoks avaldise

$$p_a = \frac{1}{p_1^{3{,}33}} \cdot \left(\frac{2}{v_1}\right)^{4{,}33} \text{ata}, \tag{130}$$

kus p_1 ja v_1 on ülekuumendatud auru parameetrid protsessi algul.

Võrrandis (130) on p_1 mõõde [ata] ja v_1 mõõde — [m³/kg]. Täpsemalt saab punkti a läbivat isobaari määrata i-s-diagrammilt (joon. 31 ja 31a)

Entalpia muutus protsessis on

$$\Delta i = i_2 - i_1 = i_2' + r_2 x_2 - i_1 = i_2'' - (1 - x_2) r_2 - i_1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{131}$$

ja siseenergia muutus

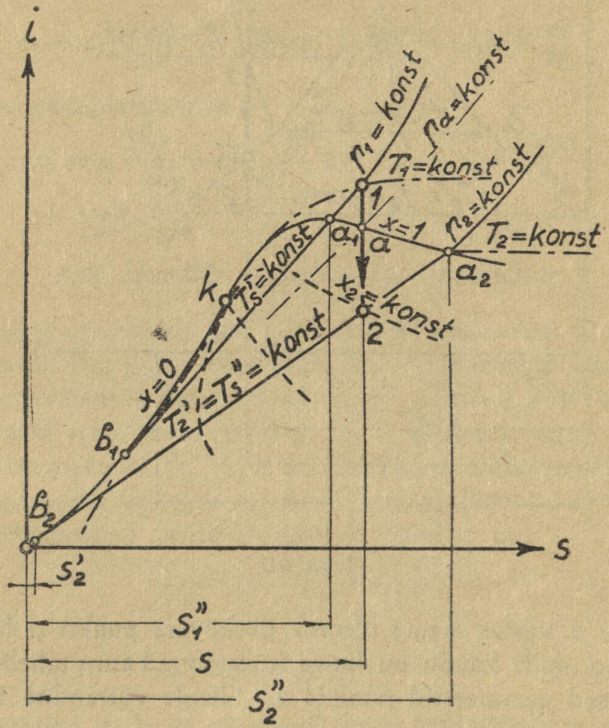
$$\Delta u = u_2 - u_1 = u_2' + \varrho_2 x_2 - (i_1 - A p_1 v_1) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{132}$$

Absoluutne ja tehniline töö, nagu on lihtne järeldada, avalduvad võrranditega

$$L = 427\,[i_1 - Ap_1v_1 - (u_2' + \varrho_2 x_2)] =$$

$$= 427\,\{i_1 - Ap_1v_1 - [u_2'' - (1-x_2)\varrho_2]\}\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}, \qquad (133)$$

$$L_t = 427\,[i_1 - (i_2' + r_2 x_2)] = 427\,\{i_1 - [i_2'' - (1-x_2)\ r_2]\}\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \qquad (134)$$



Joon. 65.

Aluseks võttes ideaalse gaasi adiabaatilise protsessi töövõrrandit on absoluutne mehhaaniline töö teatava täpsusega avaldatav võrrandiga

$$L = L_{üa} + L_{na} = \frac{1}{0{,}3}\,(p_1v_1 - p_a v_a'') +$$

$$+ \frac{1}{0{,}135}\,(p_a v_a'' - p_2 v_2)\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}} \qquad (135)$$

ehk

$$L = \frac{p_1v_1}{0{,}3}\left[1 - \left(\frac{p_a}{p_1}\right)^{\frac{0{,}3}{1{,}3}}\right] + \frac{p_a v_a}{0{,}135}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_a}\right)^{\frac{0{,}135}{1{,}135}}\right]\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}, \qquad (135\text{-a})$$

kus $L_{üa}$ on absoluutne mehhaaniline töö ülekuumendatud auru piirkonnas, s. o. protsessi algusest kuni ülemise piirkõverani, ja L_{na} — absoluutne mehhaaniline töö ülemise piirkõvera punktist *a* kuni protsessi lõpp-punktini. Analoogiliselt on avaldatav ka tehniline töö.

Eespooltoodust selgus, et ülekuumendatud aur adiabaatilisel paisumisel allpool ülemist piirkõverat niiskub, mis on tingitud kuiva küllastunud auru negatiivsest erisoojusest. See nähtus on omane paljudele vedelikkudele. Erandina võiks nimetada difenüüloksüüdi ja etüüleetrit (vt. joon. 27). Nende vedelikkude kuiv küllastunud aur omab positiivset erisoojust ja adiabaatilisel paisumisel allpool ülemist piirkõverat muutub ülekuumendatud auruks.

19. NÄITEID PROTSESSIDEKS VEEAURUGA.

N ä i d e. Kinnises anumas on 0,370 kg auru, mille rõhk on 2 ata ja kuivusaste $x = 0{,}6$. Arvutada anuma maht.

L a h e n d u s. Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et auru parameetrid rõhul $p = 2$ ata on

$$v' = 0{,}0011 \frac{m^3}{kg}, \quad v'' = 0{,}9016 \frac{m^3}{kg}.$$

Ühe kilogrammi auru maht $x = 0{,}6$ puhul on võrrandi (49) järgi

$$v = v' + (v'' - v')\,x = 0{,}0011 + (0{,}9016 - 0{,}0011)\,0{,}6 = 0{,}5414 \frac{m^3}{kg}.$$

Järelikult

$$V = G \cdot v = 0{,}370 \cdot 0{,}5414 = 0{,}2003 \text{ m}^3.$$

N ä i d e. Reservuaaris mahuga 3 m³ on veeaur 3 ata rõhu all. Kui palju soojust on tarvis, et muuta aur kuivaks küllastunud auruks, oletades, et auru niiskussisaldus on 0,3.

L a h e n d u s. Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et rõhule 3 ata vastavad auru parameetrid:

$v_1' = 1{,}0725$ dm³/kg, $\quad u_1'' = 607{,}0$ kcal/kg,

$v_1'' = 0{,}6166$ m³kg, $\quad \varrho_1 = 473{,}7$ kcal/kg,

$u_1' = 133{,}3$ kcal/kg, $\quad x_1 = 1 - 0{,}3 = 0{,}7.$

Võrrandi (78) järgi on auru kilomaht reservuaaris

$$v = v_1' + (v_1'' - v_1')\,x_1 = 0{,}0011 + (0{,}6166 - 0{,}0011)\,0{,}7 =$$

$$= 0{,}4320 \text{ m}^3/\text{kg} = \textit{konst}$$

ja auru kaaluline kogus

$$G = \frac{V}{v} = \frac{3}{0{,}4320} = 6{,}944 \text{ kg}.$$

Veeauru tabelist leiame, et kilomaht $v = v_2'' = 0{,}4320$ m³/kg = *konst* asub rõhu 4,0 ata ja 4,5 ata vahel, s. o.

4,0 ata — 0,4706 m³/kg,

4,5 ata — 0,4213 m³/kg.

Interpoleerimisega leiame, et

$$p_2 = 4 + \frac{0{,}5 \cdot (0{,}4706 - 0{,}4320)}{0{,}4706 - 0{,}4213} = 4{,}39 \text{ ata.}$$

Samast tabelist interpoleerimisega saame u_2'' jaoks väärtuse

$$u_2'' = 610{,}1 \text{ kcal/kg.}$$

Algolekus auru siseenergia on

$$u_1 = u_1'' - (1 - x_1)\varrho_1 = 607{,}0 - 473{,}7 \cdot 0{,}3 = 464{,}9 \text{ kcal/kg.}$$

Järelikult on ühe kilogrammi auru kuivatamiseks vajalik soojus

$$\Delta q_v = \Delta u = u_2'' - u_1 = 610{,}1 - 464{,}9 = 145{,}2 \text{ kcal/kg}$$

ja reservuaaris asuva auru kuivatamiseks tarbitav soojus

$$Q_v = \Delta u \cdot G = 145{,}2 \cdot 6{,}944 = 1008{,}3 \text{ kcal.}$$

Näide. Aurukatlas rõhul 6 ata on 15000 kg vett ja 60 kg kuiva auru. Määrata vajalik soojushulk, et auru rõhku aurukatlas isohooriliselt tõsta kuni rõhuni 24 ata. (Aurukatla soojuspaisumise tööd ei arvestata.)

Lahendus. Üldine auru ja vee kaal katlas on

$$G = G_w + G_a = 15000 + 60 = 15060 \text{ kg.}$$

Selles olukorras avaldub segu aurusisalduse suhtarv, s. o. auru kuivusaste x, seosega:

$$x_1 = \frac{G_a}{G} = \frac{60}{15060} = 0{,}00398.$$

I tabelist leiame, et rõhul 6 ata on kuiva küllastunud auru ja vee parameetrid

$p_1 = 6{,}0$ ata, $u_1' = 159{,}1$ kcal/kg,

$t_1 = 158{,}08°$ C, $u_1'' = 612{,}6$ kcal/kg,

$v_1' = 0{,}0011$ m³/kg, $\varrho_1 = 453{,}5$ kcal/kg.

$v_1'' = 0{,}3213$ m³/kg,

Auru kilomaht ja siseenergia algolekus on võrrandi (78) järgi

$$v = v_1' + (v_1'' - v_1')\, x_1 = 0{,}0011 + (0{,}3213 - 0{,}0011) \cdot 0{,}004 = 0{,}0024 \text{ m}^3\text{/kg,}$$

$$u_1 = u_1' + \varrho_1 x_1 = 159{,}1 + 453{,}5 \cdot 0{,}004 = 160{,}9 \text{ kcal/kg.}$$

Rõhul 24 ata on kuiva küllastunud auru ja vee parameetrid

$p_2 = 24$ ata, $u_2' = 225{,}4$ kcal/kg,
$t_2 = 220{,}75°$ C, $u_2'' = 621{,}5$ kcal/kg,
$v_2' = 0{,}0012$ m³/kg, $\varrho_2 = 396{,}1$ kcal/kg.
$v_2'' = 0{,}0849$ m³/kg,

Auru kuivusaste protsessi lõppolekus, s. o. rõhul 24 ata, on võrrandi (81) järgi

$$x_2 = \frac{v - v_2'}{v_2'' - v_2'} = \frac{0{,}0024 - 0{,}0012}{0{,}0849 - 0{,}0012} = 0{,}01433.$$

Siseenergia u_2 avaldub

$$u_2 = u_2' + \varrho_2 x_2 = 225{,}4 + 396{,}1 \cdot 0{,}0143 = 231{,}1 \text{ kcal/kg}.$$

Järelikult on protsessiks vajalik soojus

$$Q = G(u_2 - u_1) = 15060 \cdot 70{,}2 = 1057212 \text{ kcal}.$$

N ä i d e. Aur, mille rõhk on 26 ata ja $x_1 = 0{,}8$, jahtub isohooriliselt kuni temperatuurini 180° C. Määrata v, x_2, s_2'' ja protsessist eemale juhitud soojus.

L a h e n d u s. I tabelist leiame, et rõhul 26 ata on kuiva küllastunud auru ja vee parameetrid:

$v_1' = 0{,}0012$ m³/kg, $u_1' = 230{,}1$ kcal/kg,
$v_1'' = 0{,}07846$ m³/kg, $u_2'' = 621{,}8$ kcal/kg.
$t_1 = 224{,}99°$ C,

II tabeli järgi vastavad temperatuurile 180° C kuiva küllastunud auru ja vee parameetrid:

$p_2 = 10{,}225$ ata, $u_2' = 181{,}9$ kcal/kg,
$v_2' = 1{,}1275$ dm³/kg, $u_2'' = 616{,}7$ kcal/kg,
$v_2'' = 0{,}1939$ m³/kg, $\varrho_2 = 434{,}8$ kcal/kg.

Auru kilomaht ja siseenergia algolekus on

$$v = v_1' + (v_1'' - v_1')x_1 = 0{,}0012 + (0{,}07846 - 0{,}0012) \cdot 0{,}8 = 0{,}06301 \text{ m}^3/\text{kg},$$
$$u_1 = u_1' + (u_1'' - u_1')x_1 = 230{,}1 + (621{,}8 - 230{,}1) \cdot 0{,}8 = 544{,}6 \text{ kcal/kg}.$$

Auru kuivusaste ja siseenergia protsessi lõppolekus avalduvad võrrandite (81) ja (56) järgi, s. o.

$$x_2 = \frac{v - v'_2}{v''_2 - v'_2} = \frac{0{,}06301 - 0{,}00113}{0{,}1939 - 0{,}00113} = 0{,}32,$$

$$u_2 = u''_2 - (1 - x_2)\,\varrho_2 = 616{,}7 - 434{,}8 \cdot 0{,}68 = 322{,}0.$$

Järelikult on protsessist eemale juhitud soojushulk

$$q_v = u_2 - u_1 = 322{,}0 - 544{,}6 = -222{,}6 \text{ kcal/kg}.$$

Näide. Aurule, mille rõhk on 12 ata ja $x_1 = 0{,}56$, juhitakse isobaariliselt juurde 200 kcal/kg soojust. Määrata auru oleku parameetrid protsessi lõpul ja sooritatud absoluutne mehhaaniline töö.

Lahendus. I tabelist leiame, et kuiva küllastunud auru ja aurustumispiiril oleva vee parameetrid on:

$p = 12$ ata $= konst$, $v'' = 0{,}1664$ m³/kg,

$t_s = 187{,}08°$ C, $i' = 189{,}7$ kcal/kg,

$v' = 0{,}00114$ m³/kg, $i'' = 664{,}7$ kcal/kg,

$\psi = 46{,}4$ kcal/kg, $r = 475{,}0$ kcal/kg.

Auru kilomaht ja entalpia protsessi algul on

$$v_1 = v' + (v'' - v')\,x_1 = 0{,}00114 + (0{,}1664 - 0{,}00114) \cdot 0{,}56 = 0{,}0939 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_1 = i' + r x_1 = 189{,}7 + 475{,}0 \cdot 0{,}56 = 455{,}7 \text{ kcal/kg}.$$

Entalpia protsessi lõpul on võrrandi (88) järgi

$$i_2 = i_1 + q_p = 455{,}7 + 200 = 655{,}7 \text{ kcal/kg}.$$

Auru kuivusastme x_2 leiame seosest

$$i_2 = i' + r x_2;\; x_2 = \frac{i_2 - i'}{r} = \frac{655{,}7 - 189{,}7}{475} = 0{,}981.$$

Auru kilomaht protsessi lõpul on

$$v_2 = v' + (v'' - v')\,x_2 = 0{,}00114 + (0{,}1664 - 0{,}00114) \cdot 0{,}981 = 0{,}1633 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Protsessis sooritatud absoluutne mehhaaniline töö on võrrandi (91) järgi

$$L = p\,(v_2 - v_1) = 12 \cdot 10^4\,(0{,}1633 - 0{,}0939) = 8328 \text{ kgm/kg}.$$

Võrrandi (93) järgi on L väärtus

$$L = 427\,(x_2 - x_1)\,\psi = 427\,(0{,}981 - 0{,}56) \cdot 46{,}4 = 8341 \text{ kgm/kg}.$$

Näide. Niiske aur, mille rõhk on 80 ata ja niiskussisaldus 20%, juhitakse läbi aurukuumendaja, kus aur saab ülekuumenduse kuni 480° C.

Arvutada auru kuivatamiseks ja ülekuumendamiseks tarbitud soojus ning auru sooritatud väline absoluutne mehhaaniline töö.

Lahendus. I tabeli järgi on rõhul 80 ata piirkõveratel asuvates punktides auru ja vee parameetrid:

$p = 80$ ata $= konst$, $v'' = 0{,}02404$ m³/kg,

$t_s = 293{,}62°$ C, $i' = 312{,}6$ kcal/kg,

$v' = 1{,}3786$ dm³/kg, $i'' = 658{,}9$ kcal/kg,

$r = 346{,}3$ kcal/kg, $\psi = 42{,}5$ kcal/kg.

$u'' = 613{,}8$ kcal/kg,

Auru kilomaht ja entalpia protsessi algul on:

$$v_1 = v' + (v'' - v')\,x_1 = 0{,}00138 + (0{,}02404 - 0{,}00138) \cdot 0{,}8 =$$
$$= 0{,}01951 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_1 = i' + rx_1 = 312{,}6 + 346{,}3 \cdot 0{,}8 = 589{,}6 \text{ kcal/kg}.$$

Järelikult on auru kuivatamiseks tarbitav soojushulk

$$q_p = i'' - i_1 = 658{,}9 - 589{,}6 = 69{,}3 \text{ kcal/kg}$$

ja sooritatud absoluutne töö

$$L_n = 427\,(1 - x)\,\psi = 3629{,}5 \text{ kgm/kg}.$$

Sama töö on võrrandi (91) järgi

$$L_n = p\,(v'' - v_1) = 80 \cdot 10^4\,(0{,}02404 - 0{,}01951) = 3624 \text{ kgm/kg}.$$

Ülekuumendatud auru tabelist (V) leiame, et auru parameetritel $p = 80$ ata ja $t = 480°$ C on auru entalpia ja kilomaht

$$v_2 = 0{,}04122 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad i_2 = 799{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Järelikult on auru ülekuumendamiseks tarbitud soojushulk $q_{ü}$ ja sooritatud töö $L_{ü}$

$$q_{ü} = i_2 - i'' = 799{,}2 - 658{,}9 = 140{,}3 \text{ kcal/kg},$$

$$L_{ü} = p(v_2 - v'') = 80 \cdot 10^4\,(0{,}04122 - 0{,}02404) = 13744 \text{ kgm/kg}.$$

Keskmise erisoojuse c_{pm} kaudu on auru ülekuumendamiseks tarbitud soojus

$$q_{ü} = c_{pm}(t_2 - t_s) = 0{,}785\,(480 - 294) = 146 \text{ kcal/kg}.$$

Keskmine erisoojus c_{pm} on võetud IV tabelist.

Auru siseenergia protsessi lõpul on

$$u_2 = i_2 - Apv_2 = 799{,}2 - \frac{80 \cdot 10^4 \cdot 0{,}04122}{427} = 722{,}0 \text{ kcal/kg}.$$

Ligikaudse erisoojuse [vt. võrrand (74)] $c_{vm} = c_{pm} - 0{,}11$ järgi on siseenergia

$$u_2 = u'' + (c_{pm} - 0{,}11)(t_2 - t_s) =$$
$$= 613{,}8 + (0{,}785 - 0{,}11)(480 - 294) = 739{,}4 \text{ kcal/kg}.$$

Seega annab ligikaudne võrrand vea 17,4 kcal/kg.

Näide. Veeaur, mille parameetrid $p_1 = 10$ ata ja $x_1 = 0{,}9$, paisub isotermiliselt kuni rõhuni $p_2 = 2$ ata. Määrata auru parameetrid protsessi lõpul, entalpia ja siseenergia muutus, protsessis sooritatud mehhaaniline töö ja tarbitud soojushulk.

Lahendus. Auru algparameetrid (I tabel) on:

$p_1 = 10$ ata,	$s_1'' = 1{,}5740$ kcal/kg °C,
$x_1 = 0{,}9$	$i_1' = 181{,}2$ kcal/kg,
$t_1 = 179{,}04°$ C,	$i_1'' = 663{,}0$ kcal/kg,
$T_1 = 452{,}2°$ K,	$u_1' = 180{,}9$ kcal/kg,
$r_1 = 481{,}8$ kcal/kg,	$u_1'' = 616{,}6$ kcal/kg,
$s_1' = 0{,}5085$ kcal/kg °C,	$\varrho_1 = 435{,}7$ kcal/kg.

Algolekus on auru entalpia ja siseenergia

$$i_1 = i_1'' - (1 - x_1) r_1 = 663{,}0 - 0{,}1 \cdot 481{,}8 = 614{,}8 \text{ kcal/kg},$$
$$u_1 = u_1'' - (1 - x_1)\varrho_1 = 616{,}6 - 0{,}1 \cdot 435{,}7 = 573{,}0 \text{ kcal/kg}.$$

Antud juhul lõpeb protsess ülekuumendatud auru piirkonnas, sest $p_1 > p_2$. Rõhule $p_2 = 2$ ata ja $t = t_1 = t_2 = 179{,}04°$ C V tabelist otseselt vastavaid v_2, i_2 ja s_2 väärtusi määrata ei saa, vaid nad tuleb määrata interpoleerimisega temperatuuri kaudu, s. o.

$t°$ C	v m³/kg	i kcal/kg	s kcal/kg °C
160	1,003	666,4	1,7525
179,04	—	—	—
180	1,052	676,0	1,7740
$\Delta' t = 20$	$\Delta' v = 0{,}049$	$\Delta' i = 9{,}6$	$\Delta' s = 0{,}0215$
$\Delta t = 19{,}04$	$\Delta v = 0{,}047$	$\Delta i = 9{,}1$	$\Delta s = 0{,}0205$

Järelikult

$$v_2 = 1{,}003 + 0{,}047 = 1{,}050 \text{ m}^3/\text{kg},$$
$$i_2 = 666{,}4 + 9{,}1 = 675{,}5 \text{ kcal/kg},$$
$$s_2 = 1{,}7525 + 0{,}0205 = 1{,}7730 \text{ kcal/kg°C}.$$

Siseenergia väärtus on

$$u_2 = i_2 - Ap_2v_2 = 675{,}5 - \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 1{,}050}{427} = 626{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Protsessis esinev entalpia ja siseenergia muutus on

$$\Delta i = i_2 - i_1 = 675{,}5 - 614{,}8 = 60{,}7 \text{ kcal/kg},$$
$$\Delta u = u_2 - u_1 = 626{,}2 - 573{,}0 = 53{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Protsessiks tarbitud soojus avaldub võrrandi (106) järgi

$$q = r_1(1 - x_1) + (s_2 - s_1'')T_1 = 481{,}8 \cdot 0{,}1 + (1{,}7730 - 1{,}5740) \cdot 452{,}2 =$$
$$= 48{,}18 + 90{,}0 = 138{,}18 \text{ kcal/kg}.$$

Protsessis sooritatud absoluutne paisumistöö avaldub võrrandiga (108)

$$L = \frac{q - \Delta u}{A} = (138{,}18 - 53{,}2) \cdot 427 = 36286 \text{ kgm/kg}.$$

Siseenergia protsessi lõpul on arvutatav ka võrrandiga

$$u_2 = u_2'' + c_{pm}''(t_2 - t_s'') - Ap_2(v_2 - v_2'').$$

Kuiva küllastunud auru I tabelist leiame, et rõhul 2 ata on

$$v_2'' = 0{,}9016 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad u_2'' = 603{,}5 \text{ kcal/kg},$$
$$t_s'' = 119{,}62 \text{ °C}.$$

Ülekuumendatud auru keskmise erisoojuse tabelis (IV-a) vastab rõhule 2 ata ja temperatuurile 179,04° C keskmine erisoojus

$$c_{pm}'' = 0{,}487 \text{ kcal/kg °C}.$$

Järelikult

$$u_2 = 603{,}5 + 0{,}487(179{,}04 - 119{,}62) - \frac{2 \cdot 10^4 \cdot (1{,}050 - 0{,}9016)}{427} =$$
$$= 625{,}5 \text{ kcal/kg}.$$

Näide. Aur, mille parameetrid $p_1 = 10$ ata, $x_1 = 0{,}990$, paisub adiabaatiliselt kuni rõhuni $p_2 = 0{,}04$ ata. Arvutada auru parameetrid protsessi lõpul ja sooritatud absoluutne ning tehniline töö kgm/kg.

Lahendus. Kuiva küllastunud auru I ja II tabeli järgi rõhul 10 ata

$v_1' = 0{,}0011$ m³/kg, $\quad i_1'' = 663{,}0$ kcal/kg,
$v_1'' = 0{,}1981$ m³/kg, $\quad r_1 = 481{,}8$ kcal/kg,
$s_1' = 0{,}5085$ kcal/kg °C, $\quad u_1' = 180{,}9$ kcal/kg,
$s_1'' = 1{,}5740$ kcal/kg °C, $\quad u_1'' = 616{,}6$ kcal/kg,
$i_1' = 181{,}2$ kcal/kg, $\quad \varrho_1 = 435{,}7$ kcal/kg.

Rõhul 0,04 ata on samad suurused:

$t_2 = 28{,}64°$ C $\quad i_2'' = 609{,}8$ kcal/kg,
$v_2' = 0{,}0010$ m³/kg, $\quad r_2 = 581{,}1$ kcal/kg,
$v_2'' = 35{,}46$ m³/kg, $\quad u_2' = 28{,}65$ kcal/kg,
$s_2' = 0{,}0998$ kcal/kg °C, $\quad u_2'' = 576{,}6$ kcal/kg,
$s_2'' = 2{,}0253$ kcal/kg °C, $\quad \varrho_2 = 547{,}9$ kcal/kg.
$i_2' = 28{,}65$ kcal/kg,

Nende andmete järgi on auru maht, siseenergia, entalpia ja entroopia protsessi alguses:

$$v_1 = v_1' + (v_1'' - v_1')x_1 = 0{,}0011 + (0{,}1981 - 0{,}0011) \cdot 0{,}99 = 0{,}1961 \text{ m}^3/\text{kg},$$
$$u_1 = u_1' + (u_1'' - u_1')x_1 = 180{,}9 + 435{,}7 \cdot 0{,}99 = 612{,}2 \text{ kcal/kg},$$
$$i_1 = i_1' + r_1 x_1 = 181{,}2 + 481{,}8 \cdot 0{,}99 = 658{,}2 \text{ kcal/kg},$$
$$s_1 = s_1' + (s_1'' - s_1')x_1 = 0{,}5085 + (1{,}5740 - 0{,}5085) \cdot 0{,}99 = 1{,}5633 \text{ kcal/kg °C}.$$

Auru kuivusastme protsessi lõppolekus määrame võrrandiga (112), s. o.

$$x_2 = \frac{s - s_2'}{s_2'' - s_2'} = \frac{1{,}5633 - 0{,}0998}{2{,}0253 - 0{,}0998} = 0{,}76.$$

Auru maht, siseenergia ja entalpia protsessi lõpul on:

$$u_2 = u_2' + \varrho_2 x_2 = 28{,}65 + 547{,}9 \cdot 0{,}76 = 445{,}1 \text{ kcal/kg},$$
$$i_2 = i_2' + r_2 x_2 = 28{,}65 + 581{,}1 \cdot 0{,}76 = 470{,}3 \text{ kcal/kg},$$
$$v_2 \approx v_2'' x_2 = 35{,}46 \cdot 0{,}76 = 26{,}95 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Järelikult on sooritatud absoluutne ja tehniline töö

$$L = 427(u_1 - u_2) = 427 \cdot (612{,}2 - 445{,}1) = 71351{,}7 \text{ kgm/kg},$$
$$L_t = 427(i_1 - i_2) = 427 \cdot (658{,}2 - 470{,}3) = 80233{,}3 \text{ kgm/kg}.$$

Võrrandi (123) järgi on absoluutne töö

$$L = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{10^4}{0{,}134}(10 \cdot 0{,}1961 - 0{,}04 \cdot 26{,}95) = 65896 \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}.$$

Järelikult ei ole antud juhul võrrand (123) rakendatav, sest $\frac{p_1}{p_2} > 20$. Joonisel 31 antud *i-s*-diagrammi järgi on entalpia muutus ja auru kuivusaste protsessi lõpul

$$\Delta i = 658 - 472 = 186 \text{ kcal/kg},$$
$$x_2 = 0{,}762.$$

Näide. Aur, mille parameetrid $p_1 = 0{,}5$ ata ja $x_1 = 0{,}2$, komprimeeritakse adiabaatiliselt kuni auru täieliku veeldumiseni. Arvutada komprimeerimiseks tarbitud absoluutne mehhaaniline töö.

Lahendus. I tabelist auru algoleku jaoks leiame, et

$p_1 = 0{,}5$ ata, $\quad s_1' = 0{,}2592$ kcal/kg °C,

$x_1 = 0{,}2$, $\quad \frac{r_1}{T_1} = 1{,}5558$ kcal/kg °C,

$T_1 = 354{,}02°$ K, $\quad u_1' = 80{,}80$ kcal/kg.

$\varrho_1 = 512{,}2$ kcal/kg,

Algolekus on auru entroopia ja siseenergia:

$$s_1 = s_1' + \frac{r_1}{T_1} x_1 = 0{,}2592 + 1{,}5558 \cdot 0{,}2 = 0{,}5704 \text{ kcal/kg °C},$$

$$u_1 = u_1' + \varrho_1 x_1 = 80{,}80 + 512{,}2 \cdot 0{,}2 = 183{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

Et määrata adiabaatilise protsessi joone ja alumise piirkõvera vahelise lõikepunkti koordinaate, s. o. rõhku, mille puhul aur on veeldunud, otsime I tabelist aurustumistemperatuurini kuumendatud vee entroopia lahtrist entroopia väärtuse, mis on võrdne auru algoleku entroopia väärtusega $s_1 = 0{,}5704$. Entroopia see väärtus asub rõhkudele 18 ata ja 19 ata vastavate väärtuste vahel, s. o.

$$p = 18 \text{ ata} \quad s' = 0{,}5701 \text{ kcal/kg °C},$$

$$p = 19 \text{ ata} \quad s' = 0{,}5761 \text{ kcal/kg °C}.$$

Interpoleerimisega entroopia kaudu leiame, et

$$\Delta p = \frac{1}{0{,}5761 - 0{,}5701} (0{,}5704 - 0{,}5701) = 0{,}05 \text{ at}$$

ja

$$p_2 = 18 + 0{,}05 = 18{,}05 \text{ ata}.$$

Siseenergia protsessi lõpul, s. o. ülemise piirkõvera punktis, millele vastab rõhk $p_2 = 18{,}05$ ata, on I tabeli järgi

$$u_2 = 209{,}6 + (212{,}5 - 209{,}6) \cdot 0{,}05 = 209{,}7 \text{ kcal/kg}.$$

Järelikult on protsessis esinev siseenergia muutus

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 209{,}7 - 183{,}2 = 26{,}5 \text{ kcal/kg}$$

ja protsessis tarbitud absoluutne töö

$$L = -427 \Delta u = -427 \cdot 26{,}5 = -11315{,}5 \text{ kgm/kg}.$$

Näide. Ühe kg auru adiabaatiliseks komprimeerimiseks tarbitud tehniline töö on 150 kcal/kg. Arvutada auru parameetrid komprimeerimisprotsessi lõpul, kui auru parameetrid komprimeerimisprotsessi alguses on $p_1 = 5$ ata ja $x_1 = 0{,}85$.

Lahendus. Protsessi alguses on I tabeli järgi auru entalpia, siseenergia ja entroopia:

$$i_1 = i_1' + r_1 x_1 = 152{,}1 + 503{,}7 \cdot 0{,}85 = 580{,}2 \text{ kcal/kg},$$
$$u_1 = u_1' + \varrho_1 x_1 = 152{,}0 + 459{,}1 \cdot 0{,}85 = 542{,}2 \text{ kcal/kg},$$
$$s_1 = s_1' + \frac{r_1}{T_1} x_1 = 0{,}4422 + 1{,}1875 \cdot 0{,}85 = 1{,}4516 \text{ kcal/kg° C}.$$

Entalpia on protsessi lõpul

$$i_2 = i_1 + 150 = 580{,}2 + 150 = 730{,}2 \text{ kcal/kg}.$$

i_2 väärtusest nähtub, et protsess siirdub ülekuumendatud auru piirkonda.

Ülekuumendatud auru tabelist V leiame, et $s_2 = s_1 = 1{,}4516$ ja $i_2 = 730{,}2$ väärtused asuvad temperatuuri järgi 400° C ja 420° C vahel ning rõhu järgi 120 ata ja 140 ata vahel. Interpoleerimisega leiame, et protsessi lõpul on auru temperatuur 400° C ja rõhk 122 ata. Samad väärtused temperatuurile ja rõhule annab joonisel 31 esitatud *i-s*-diagramm.

IV. peatükk.

RINGPROTSESSID AURUGA.

Käesolevas peatükis vaatleme ringprotsesse aurudega, mis toimuvad aurujõuseadmetes. Need jõuseadmed on varustatud kas auruturbiinidega või, nagu vanemad ja väiksemad jõuseadmed, kolbaurumasinatega.

Üldiselt leiutati jõumasinatest esimesena kolbaurumasin. Esimese töös-tuslikult kõlbliku aurumasina leiduriks oli vene mehhaanik I. I. Polzunov (1723—1766), kuid tol ajal Venemaal valitseva pärisorjuse tõttu jäi I. I. Polzunovi leiutis unarusse [17].

Hiljem konstrueeris kolbaurumasina J. Watt (1736—1819) Inglismaal. Seega tuleb aurumasina ja ka soojustehnika arengu alguseks arvata XVIII sajandit. Aurumasina progressiivse arengu tulemuseks oli tema tarvituselevõtmine mitte üksnes statsionaarse jõuallikana, vaid ta levis ka veduri-na, pannes sellega aluse raudteede ehitusele, jõuvankrina maanteedel ja jõumasinana laevadel.

Tehnika edasises arengus leiutatakse kolbaurumasinast lihtsam ja ökonoomsem aurumasin — auruturbiin (Laval, 1845—1913), mis koos elektrigeneraatoriga ja soojustehnika üldise progressiga paneb aluse soojusjõujaamade arengule ning nendes kasutatavate termodünaamiliste protsesside järkjärgulisele moderniseerimisele.

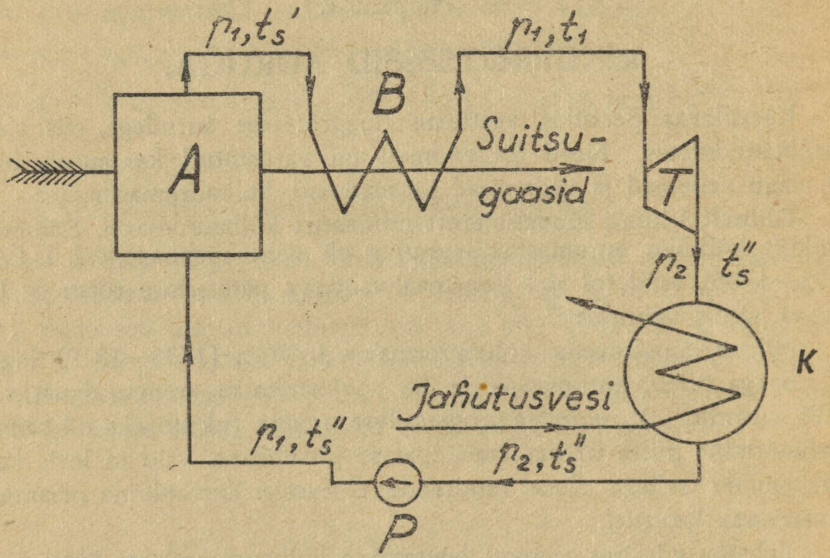
Käesoleva peatüki ülesandeks ongi uurida aurujõuseadme termodünaamiliste ringprotsesside kasutegureid ja selgitada neid faktoreid, millest sõltub aurujõuseadme termodünaamiliste ringprotsesside ökonoomsus jne.

Samuti nagu plahvatusmootorite puhul, nii ka aurujõuseadmete ökonoomsuse uurimistel jne. lähtutakse teoreetilistest ringprotsessidest, võttes neid kriteeriumideks, millede suhtes võrreldakse, kuivõrd täiuslikult on soojus tehniliselt ära kasutatud ühes või teises tegelikus ringprotsessis. Teoreetiliste ringprotsesside uurimisel, nagu varemaltki, ei võeta arvesse mitmesugustest füüsikalistest nähtustest tingitud soojuskadusid (materjali soojusejuhtivus, hõõrumised, kiirguskaod jne.), vaid

[17] В. В. Данилевский, „И. И. Ползунов, труды и жизнь первого русского теплотехника". Изд. Академии наук СССР, 1940.

vaadeldakse termilise kasuteguri sõltuvust ainult auru parameetritest ja protsessi elementidest. Aurujõuseadmete teoreetilisteks põhiprotsessideks on Carnot' ja Rankine'i ringprotsessid.

Enne kui asuda ringprotsesside vaatlusele, selgitame lühidalt normaalses aurujõuseadmes töötava kehaga toimuvat ringprotsessi, mille elementaarne skeem on antud joonisel 67.

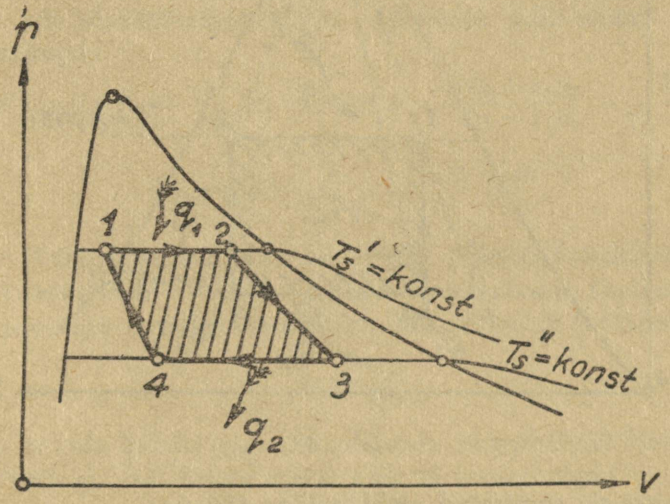


Joon. 67.

Aurujõuseadme elementideks on: aurukatel A, aurumasin või -turbiin T, auru kondensaator K ja aurukatla toitepump P. Selle skeemi järgi on auruga toimuv ringprotsess järgmine. Aurukatlast voolab aur parameetritel p_1 ja t_s' suitsugaasidega köetavasse auru ülekuumendajasse B, kus aur isobaariliselt $(p_1 = konst)$ kuivab ja saab ülekuumenduse kuni ettenähtud temperatuurini t_1. Auru ülekuumendajast väljub aur parameetritel p_1 ja t_1 ning voolab mööda magistraaljuhet aurumasinasse või turbiini. Turbiinis toimub auru adiabaatiline paisumine kuni kondensaatori rõhuni p_2, sooritades tehnilist tööd. Kondensaatoris annab aur isobaariliselt ära rõhule p_2 vastava aurustumissoojuse kondensaatori jahutustorustikku läbivale jahutusveele, mille tagajärjel ta veeldub. Veeldunud kondensaadi, mille temperatuur on võrdne rõhule p_2 vastava niiske auru temperatuuriga t_s'', saadab katla toitepump parameetritel p_1 ning t_s'' tagasi aurukatlasse, kust ringprotsess algab uuesti jne.

20. CARNOT' RINGPROTSESS.

Vaatleme Carnot' ringprotsessi niiske auruga. Protsess on näidatud joonisel 68; tema elementideks on: auru isobaar-isotermiline paisumine aurukatlas punktist *1* kuni punktini *2*, mille vältel juhitakse protsessi vee aurustamiseks vajalik soojushulk q_1, adiabaatiline paisumine soojusjõumasinas punktist *2* kuni punktini *3*, siis isobaar-isotermiline komprimeerimine punktist *3* punktini *4*. Sel protsessil toimub auru kondenseerumine kondensaatoris, millega ühes juhitakse jahutajasse auru kondenseerumisel vabanev soojushulk q_2. Isobaar-isotermilisele protsessile järgneb erilises kompressoris auru adiabaatiline komprimeerimine punktist *4* kuni punktini *1*, millega taastatakse aurule tema algolek.



Joon. 68.

Protsessi käik T-s-diagrammil on näidatud joonisel 69.

Kasutades sama sümboolikat nagu varemaltki avaldub Carnot' ringprotsessi termiline kasutegur võrrandiga:

$$\eta_C = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{AL}{q_1} = \frac{T'_s - T''_s}{T'_s} . \qquad (136)$$

Protsessi juhitud väline soojushulk q_1 ja protsessis jahutajale ülekandunud soojushulk q_2 (abs. väärtus) avalduvad võrranditega:

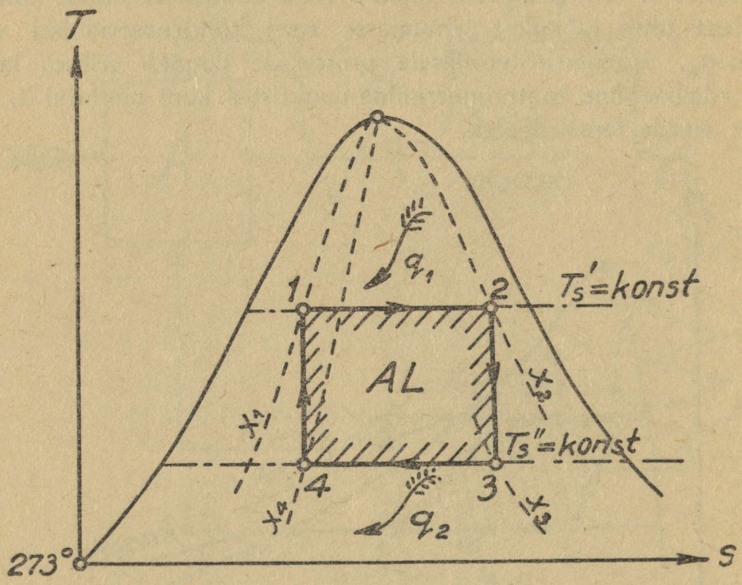
$$q_1 = r_1(x_2 - x_1) , \quad q_2 = r_2(x_3 - x_4) ,$$

kus r_1 ja r_2 on isobaarile *12* ja *34* vastavad vedeliku aurustumissoojused

ning x_1, x_2, x_3 ja x_4 auru kuivusastmed Carnot' ringprotsessi punktides *1*, *2*, *3* ja *4*.

Asendades võrrandis (136) q_1 ja q_2 neile vastavate avaldistega saame:

$$\eta_C = \frac{r_1(x_2 - x_1) - r_2(x_3 - x_4)}{r_1(x_2 - x_1)} = \frac{T_s' - T_s''}{T_s'} . \qquad (137)$$



Joon. 69.

Ringprotsessis sooritatud mehhaaniline töö on:

$$AL = (q_1 - q_2) = r_1(x_2 - x_1) - r_2(x_3 - x_4) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Termilise kasuteguri võrrandist järgneb, et

$$r_1(x_2 - x_1) - r_2(x_3 - x_4) = r_1(x_2 - x_1) \frac{T_s' - T_s''}{T_s'} .$$

Järelikult on mehhaaniline töö AL avaldatav võrrandiga:

$$AL = r_1(x_2 - x_1) \frac{T_s' - T_s''}{T_s'} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} . \qquad (138)$$

Teades soojushulka AL, mille üks kilogramm auru transformeerib ringprotsessis mehhaaniliseks tööks, on võimalik arvutada auru teoreetilist eri-

kulu ühe hobujõud-tunni kohta. Nimelt võrdub hobujõud-tunni aurukulu, mille märgime tähisega d, ekvivalendiga 632 kcal/HJh, jagatud soojushulgaga AL, s. o.

$$d = \frac{632}{AL} = \frac{632}{r_1(x_2 - x_1)} \cdot \frac{T_s'}{T_s' - T_s''} \quad \frac{\text{kg}}{\text{HJh}} . \tag{139}$$

Võrrandist nähtub, et d omab miinimumi, kui $x_2 = 1$ ja $x_1 = 0$, s. o. kui Carnot' ringprotsessi punkt *1* asub alumisel ja punkt *2* ülemisel piirkõveral:

$$d_{min} = \frac{632}{r_1} \cdot \frac{T_s'}{T_s' - T_s''} \quad \frac{\text{kg}}{\text{HJh}} . \tag{140}$$

Tähtsaks näitajaks igas ringprotsessis on veel soojuse erikulu ühe hobujõud- või kilovatt-tunni kohta. Märkides selle näitaja tähisega W_C avaldub ta kujul:

$$W_C = d \cdot q_1 = \frac{632}{AL}(x_2 - x_1)r_1 = \frac{632(x_2 - x_1)r_1}{(x_2 - x_1)r_1} \cdot \frac{T_s'}{T_s' - T_s''},$$

$$W_C = 632 \frac{T_s'}{T_s' - T_s''} = \frac{632}{\eta_C} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}} . \tag{141}$$

Võrrandist (141) nähtub, et soojuse erikulu on pöördvõrdeline ringprotsessi termilise kasuteguriga. Soojuse erikulu ringprotsessis karakteriseerib täielikult ringprotsessi termilist kasutegurit, sest võrrandi (141) järgi

$$\eta_C = \frac{632}{W_C} . \tag{142}$$

Auru erikulu kaudu aga ei saa hinnata ringprotsessi kasutegurit, sest peale d sõltub η_C veel ringprotsessi juhitud soojushulgast q_1, s. o.

$$\eta_C = \frac{632}{W_C} = \frac{632}{d \cdot q_1} .$$

Nii η_C kui ka d_{min} väärtused auru ühe ja sama T_s' (algoleku) puhul sõltuvad veel jahutaja temperatuurist T_s''. Mida väiksem on T_s'', seda suurem on η_C ja seda väiksem d_{min}. Tehnilisest seisukohast võib siin esineda kaks juhtu.

1. Auru kondenseerimine teostatakse välise õhkkonna rõhul. Sel puhul $T_s'' \approx 273 + 100 = 373°$ K.

2. Auru kondenseerimine toimub vaakuumis. Sel korral määravad temperatuuri T_s'' looduslikud tingimused, s. o. saadaval oleva jahutusvee temperatuur. Viimane kui kõige ökonoomsem moodus leiab kasutamist kõigis suuremates aurujõuseadmetes. Selle kohta olgu toodud järgmine näide.

Oletame, et Carnot' ringprotsess teostatakse niiske auruga, mille rõhk on 12 ata; sel puhul $T'_s \cong 460°$ K ja $r_1 = 475$ kcal/kg.

Teostades auru kondenseerimist välisõhkkonna rõhul, s. o. $T''_s = 373°$ K, leiame, et

$$\eta_C = \frac{460 - 373}{460} = 0{,}19 = 19\%,$$

$$d_{min} = \frac{632}{475} \cdot \frac{460}{460 - 373} \approx 7{,}0 \text{ kg/HJh}.$$

Kui teostaksime auru kondenseerimist temperatuuril 28° C, s. o. rõhul $p \approx 0{,}04$ ata, siis

$$\eta_C = \frac{460 - 302}{460} = 0{,}34 = 34\%,$$

$$d_{min} = \frac{632}{581} \cdot \frac{460}{460 - 302} = 3{,}17 \text{ kg/HJh}.$$

Soojuse erikulu esimesel juhul on

$$W_C = \frac{632}{0{,}19} = 3326 \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}$$

ja teisel juhul

$$W_C = \frac{632}{0{,}34} = 1859 \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}.$$

Järelikult on termiline kasutegur teisel juhul 79% suurem ja aurukulu väheneb 7,0 kilogrammilt 3,17 kilogrammini.

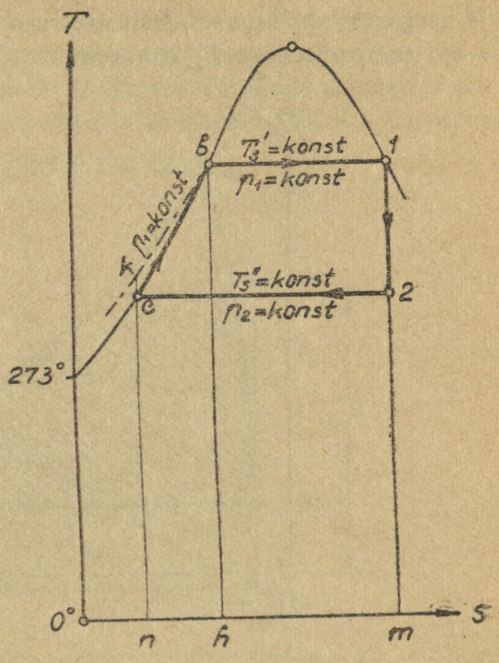
Toodud näitest on selge, et aurujõuseadme termiline kasutegur sõltub suurel määral jahutaja temperatuurist, s. o. kondensaatoris teotsevast alarõhust ehk vaakuumist, mille funktsiooniks on auru temperatuur.

Tegelikult Carnot' ringprotsessi ei kasutata, sest peale kondensaatori on ringprotsessi teostamiseks vajalik veel eri kompressorseade, millega saab kondensaatorist väljunud niiskele aurule, mis vastab auru olekule ringprotsessi punktis *4*, adiabaatilise komprimeerimisega taastada algoleku, mis vastab diagrammil punktile *1*. Tegelikus olukorras selle kompressori tegevuses hoidmiseks tarbitav energiakulu on niivõrd suur, et seade end ei õigusta. Aurujõuseadmetes on põhiringprotsessiks Rankine'i ringprotsess. Selles ringprotsessis, vastandina Carnot' ringprotsessile, on kulukas kompressorseade asendatud kompaktse katla toiteveepumbaga (vt. joon. 67), mille energiakulu ringprotsessis sooritatava mehhaanilise töö suhtes osutub äärmiselt väikeseks.

21. RANKINE'I RINGPROTSESS.

Rankine'i ringprotsess on õieti ideaalses aurujõuseadmes toimuv auru ringprotsess. Vaatleme esiteks ringprotsessi niiske auru piirkonnas.

Ringprotsess on näidatud joonisel 70 antud *T-s*-diagrammil. Ringprotsessi käik on järgmine: vesi või üldse vedelik aurustatakse rõhule p_1 vastavast alumise piirkõvera punktist *b* aurukatlas isobaariliselt kuni ülemise piirkõvera punktini *1* ja juhitakse siis aurumasinasse või auruturbiini, kus ta adiabaatiliselt paisub kuni kondensaatori rõhule p_2 vastava punktini *2*. Kondensaatoris toimub auru isobaar-isotermiline jahtumine (komprimeerimine) kuni alumise piirkõvera punktini *c*. Punkti *c* jõudes on aur kondenseerunud vedelikuks, omades rõhule p_2 vastavat niiske auru temperatuuri T_s''. Sellelt temperatuurilt kuumendatakse veeldunud aur ehk kondensaat mööda alumist piirkõverat *cb* kuni punktini *b*, s. o. rõhule p_1 vastava niiske auru temperatuurini T_s', ja surutakse katlasse, millega töötavale kehale on taastatud tema algolek. Kondensaadi kuumendamise protsessi mööda piirkõverat *cb* võib kujutleda teostuvana eripumbas, milles kondensaat vastavalt rõhu suurenemisele paisub mööda piirkõverat.

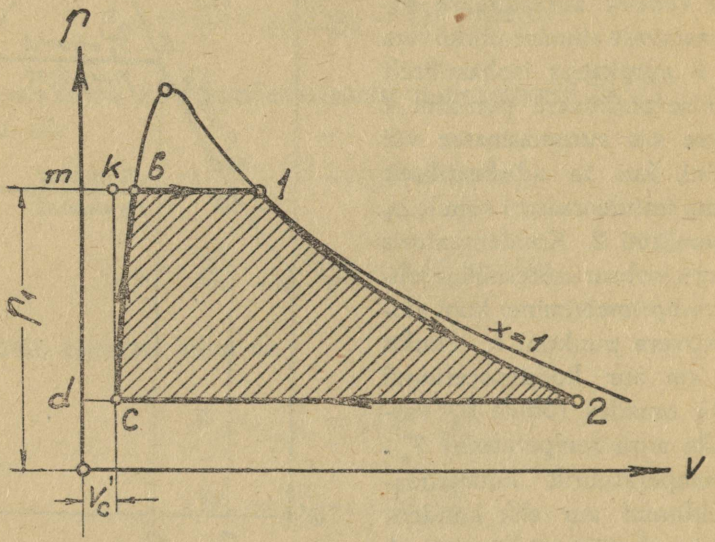


Joon. 70.

p-v-diagrammil on Rankine'i ringprotsess näidatud joonisel 71. Ringprotsess algab alumise piirkõvera punktist *b* ja kulgeb isoterm-isobaariliselt kuni ülemise piirkõvera punktini *1*. Sellele järgneb auru adiabaatiline paisumine jõumasina silindris või turbiinis kuni kondensaatori rõhu p_2 punktini *2*. Punktist *2* teostub auru isobaar-isotermiline komprimeerimine, s. o. jahtumine kondensaatoris kuni alumise piirkõvera punktini *c*. Punktist *c* teostub kondensaadi kuumendamine mööda piirkõverat *cb* kuni punktini *b*, millega töötav keha saavutab oma algoleku, jne.

Siiski erineb tegelik ringprotsess aurujõuseadmes Rankine'i omast ja nimelt kondensaadi kuumendamise osas, mida tegelikult ei saa teostada

mööda alumist piirkõverat. Tegelikus ringprotsessis komprimeeritakse kondensaat katla toitepumbas kuni punktile *b* vastava rõhuni p_1 ja surutakse siis pumba poolt katlasse. Kondensaadi komprimeerimisprotsess pumbas teostub adiabaatiliselt, kusjuures kondensaadi temperatuur jääb peaaegu konstantseks [18] ja seega tegelik kuumendamisprotsess toimub katlas isobaariliselt kondensaadi temperatuurilt T_s'' kuni temperatuurini T_s', vastavalt auru rõhule katlas.



Joon 71.

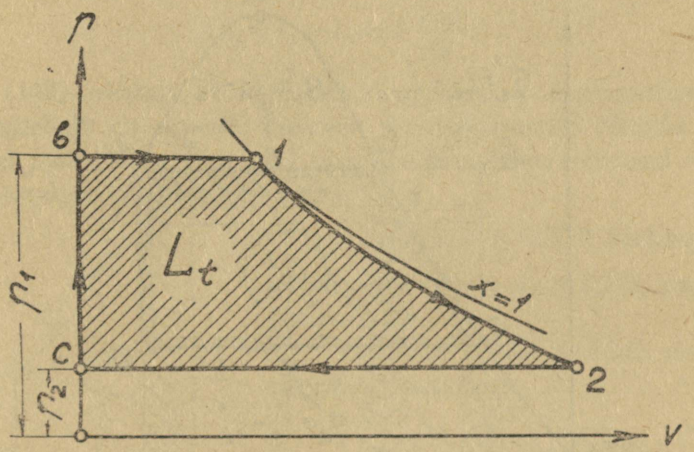
T-s-diagrammil avaldub tegelik protsess kondensaadi komprimeerimise osas adiabaadiga *ck* (joon. 70) ja kuumendamine isobaariga *kb*.

p-v-diagrammil (joon. 71) avaldub vee komprimeerimine katla toitepumbas joonlõiguga *ck* ja kondensaadi katlas kuumendamine isobaariga *kb*. Pindala *dckm* on võrdne tegelikus ringprotsessis katla ideaalses toitepumbas tarbitud tehnilise tööga $v_c'(p_1 - p_2)$ ja pindala *dcbm* on võrdne tehnilise tööga, mis on vajalik Rankine'i ringprotsessis katla toitepumba tegevuseks. Katla toitepumba tehnilise töö ülekulu Rankine'i ringprotsessis, mis *p-v*-diagrammil avaldub pindalaga *ckb*, on ekvivalentne kondensaadi kuumendamissoojuse ülekuluga tegelikus ringprotsessis, mida *T-s*-diagrammil avaldab pindala *ckb*.

Toodust järgneb, et tegelik Rankine'i ringprotsess avaldub *T-s*-diagrammil kontuuriga *ckb12* ja *p-v*-diagrammil kontuuriga *ck12*. Arvesse

[18] Näiteks muutub adiabaatilisel komprimeerimisel kuni rõhuni 200 ata vee temperatuur kõigest 0,71° C.

võttes, et pindala *ckb* *T-s*-diagrammil on tavaliste aururõhkude intervallis võrdlemisi väike, võime oletada, et isobaar *kb* langeb ühte alumise piirkõveraga. Selle oletuse põhjal ühtib tegelik Rankine'i ringprotsess *T-s*-diagrammil ideaalse ringprotsessiga. *p-v*-diagrammi suhtes tehakse samuti lihtsustus. Nimelt oletatakse, et ringprotsessi ulatuses langeb alumine piirkõver *cb* ühte rõhkude teljega, sest katla toitepumba tegevuseks tarbitav tehniline töö, mida avaldab pindala *dckm*, on võrreldes protsessis sooritatava mehhaanilise tööga suhteliselt väike. Näiteks rõhul 30 ata on pumba töö $Av_0(p-1) = \frac{1}{427} \cdot 0{,}001\,(30-1)10^4 = 0{,}7$ kcal/kg.



Joon. 72.

Selle lihtsustusega avaldub Rankine'i ringprotsess *p-v*-diagrammil kontuuriga *b12c*, nagu on näidatud joonisel 72. Jooniselt nähtub veel, et Rankine'i lihtsustatud ringprotsessis sooritatud mehhaaniline töö on võrdne auru adiabaatilisel protsessil *12* sooritatud tehnilise tööga L_t, mis soojusühikutes on võrdne adiabaatilisel protsessil esineva entalpia muutusega, s. o.

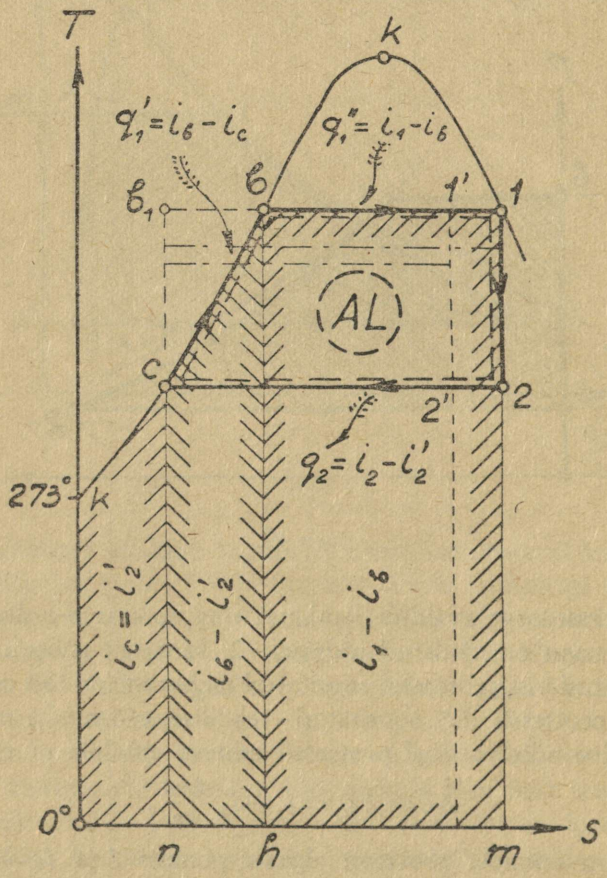
$$AL = AL_t = i_1 - i_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

kus i_1 on auru entalpia protsessi alguses punktis *1* ja i_2 — auru entalpia protsessi lõpus punktis *2*. Sama tulemuse annab ka *T-s*-diagramm, kui tuletame meelde, et *T-s*-diagrammil avaldab protsessi joone alune pindala protsessist osavõtvat välissoojust. *T-s*-diagrammi järgi (joon. 73) avaldub Rankine'i ringprotsessi juhitud väline soojushulk q_1 pindalaga *ncb1m*. See pindala omakorda koosneb pindaladest:

pindala $0°kbh$ — pindala $0°kcn = i_b - i_2'$,
pindala $b1mh = i_1 - i_b$,
kus i_2' on kondenseerunud auru entalpia alumise piirkõvera punktis c ja i_b—värske auru rõhule p_1 vastav vee entalpia alumise piirkõvera punktis b. Entalpia i_b ja i_2' suurused on määratavad kuiva küllastunud auru I tabelist rõhkude p_1 ja p_2 järgi.

Järelikult on ringprotsessi juhitud väline soojus ühe kilogrammi auru kohta

$$q_1 = \text{pindala } ncb1m = (i_b - i_2') + (i_1 - i_b) = i_1 - i_2', \qquad \text{(a)}$$



Joon. 73.

Analoogiliselt leiame, et ringprotsessis jahutajale, s. o. kondensaatori jahutusveele ülekantud soojushulk q_2 avaldub

$$q_2 = \text{pindala } 0°kc2m - \text{pindala } 0°kcn = i_2 - i_2'.$$

Toodu põhjal on ringprotsessis mehhaaniliseks tööks muutuv soojushulk AL_t

$$AL_t = q_1 - q_2 = (i_b - i_2') + (i_1 - i_b) - (i_2 - i_2'),$$

$$AL_t = i_1 - i_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{143}$$

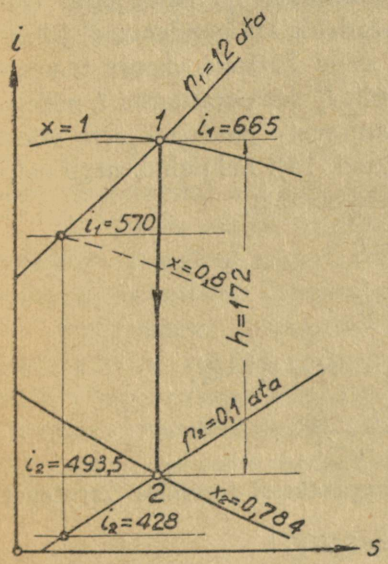
ehk

$$L_t = 427\,(i_1 - i_2) \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}.$$

Võrrandis (143) esinevat entalpia muutust nimetatakse kasutatavaks entalpia adiabaatiliseks languseks ja see märgitakse tihti tähega h, s. o.

$$AL_t = i_1 - i_2 = h \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{143-a}$$

Võrrandist (143) nähtub, et Rankine'i ringprotsessis mehhaaniliseks tööks muutuv soojushulk on otseselt määratav i-s-diagrammilt. Näiteks auru algparameetritel $p_1 = 12$ ata ja $x_1 = 1$ ning kondensaatoris valitseval rõhul $p_2 = 0{,}1$ ata on entalpia adiabaatiline langus



Joon. 74.

$$h = i_1 - i_2 = 172 \text{ kcal/kg},$$

ja auru kuivusaste $x_2 = 0{,}784$, nagu nähtub jooniselt 74.

Eeltoodu põhjal avaldub ringprotsessi termiline kasutegur

$$\eta_R = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{h}{i_1 - i_2'}, \tag{144}$$

kus i_2' on kondensaadi entalpia alumise piirkõvera punktis c (joon. 73), s. o. kondensaatori rõhule p_2 vastava temperatuurini kuumendatud vee entalpia.

Auru erikulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$d = \frac{632}{i_1 - i_2} \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}} \tag{145}$$

ja ühe kilovatt-tunni kohta

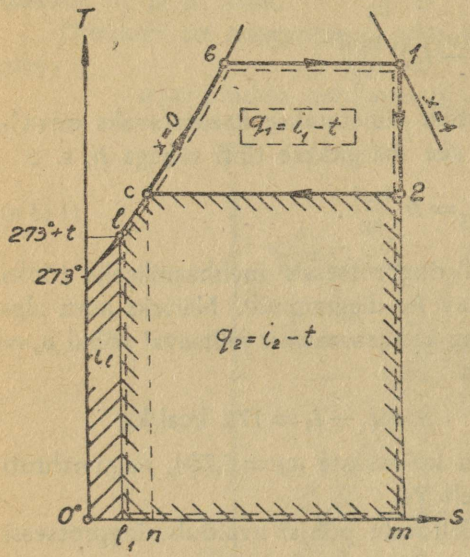
$$d_W = \frac{860}{i_1 - i_2} \ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}. \tag{146}$$

Soojuse erikulu ühe hobujõud-tunni ja kilovatt-tunni kohta avaldub

$$W = d \cdot q_1 = 632 \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2} = \frac{632}{\eta_R} \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}, \tag{147}$$

$$W_W = d_W q_1 = 860 \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2} = \frac{860}{\eta_R} \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}. \quad (148)$$

Arvesse võttes, et kondensaadi, s. o. katla toitevee temperatuur on alati madalam kui 100° C, võime võrrandites esineva entalpia $i_c = i_2'$ väärtuse võtta võrdseks katla toitevee temperatuuriga t, s. o.



Joon. 75.

$$i_2' = t. \quad (149)$$

Sel puhul avaldub näiteks termilise kasuteguri võrrand kujul

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} = \frac{h}{i_1 - t}. \quad (150)$$

Võrrandid jäävad kehtivaks ka sel puhul, kui katla toiteks ei kasutata kondensaati, vaid vett, mille temperatuur on madalam kondensaadi temperatuurist t_s''. Seda juhtu võime vaadelda kui kondensaadi jahtumist enne katlasse viimist tempelratuurilt t_s'' temperatuurini t, millega q_2 suureneb pindala e_1ecn võrra (vt. joon. 75). Sel puhul, nagu nähtub diagrammilt,

$$q_1 = i_1 - i_e = i_1 - t$$

ja

$$q_2 = i_2 - i_e = i_2 - t.$$

Järelikult

$$AL_t = q_1 - q_2 = (i_1 - t) - (i_2 - t) = i_1 - i_2,$$

$$\eta_R = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{AL_t}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t}.$$

Joonisel 74 esitatud näite puhul on ringprotsessi termiline kasutegur

$$\eta_R = \frac{h}{i_1 - t} = \frac{172}{665 - 45{,}5} = 0{,}277,$$

sest rõhule 0,1 ata vastab temperatuur 45,5° C (I tabel).

Auru- ja soojuskulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$d = \frac{632}{h} = \frac{632}{172} = 3{,}67 \text{ kg/HJh},$$

$$W = \frac{632}{\eta_R} = \frac{632}{0{,}277} = 2280 \text{ kcal/HJh}.$$

Sama temperatuuri-intervalli puhul on Carnot' ringprotsessi termiline kasutegur

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{460{,}3 - 318{,}6}{460{,}3} = 0{,}308.$$

Järelikult on Carnot' ringprotsessi kasutegur 30,8 — 27,7 = 3,1% võrra suurem Rankine'i ringprotsessi kasutegurist. See on tingitud asjaolust, et Rankine'i ringprotsessis juhitakse osa soojusest protsessi isobaariliselt (veekuumendussoojus), mille tõttu ringprotsessi pindala jääb väiksemaks Carnot' ringprotsessi omast, nagu nähtub jooniselt 73, pindala cbb_1 võrra.

T-s-diagrammilt selgub, et niiske auru piirkonnas auru samal alg- ja lõpprõhul on Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur kõige suurem siis, kui vee aurustumisprotsess viiakse ülemise piirkõverani, s. o. kui adiabaatilise paisumise algul auru niiskussisaldus on null ($1 - x = 0$). Värske auru niiskuse suurenemisega, s. o. paisumise algpunkti nihkumisega mööda isobaari *b1* alumise piirkõvera poole, väheneb ringprotsessi termiline kasutegur, sest sel puhul väheneb ringprotsessis soojuseprotsessi juhtimise keskmine temperatuur. Kui eespooltoodud näite puhul (joon. 74) teostaksime adiabaatilise paisumise auruga, mille niiskussisaldus on $1 - x = 0{,}2$, siis oleks ringprotsessi termiline kasutegur

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{570 - 428}{570 - 45{,}5} = 0{,}271 = 27{,}1\%,$$

mis on 27,7 — 27,1 = 0,6% võrra väiksem kui kuiva küllastunud auru puhul. Seda ringprotsessi tähistab joonisel 73 kontuur *cb1'2'*.

Et hinnata mingit ringprotsessi soojuse ärakasutamise seisukohast teoreetiliselt võimalikul määral, on tarvitusele võetud ringprotsessi suhtelise termodünaamilise kasuteguri mõiste.

Ringprotsessi suhteliseks termodünaamiliseks kasuteguriks nimetatakse antud ringprotsessi termilise kasuteguri suhet samale ringprotsessile vastava Carnot' ringprotsessi kasuteguriga. Märkides termodünaamilise suhtelise kasuteguri tähisega η_{td} võime Rankine'i ringprotsessi suhtelise termodünaamilise kasuteguri avaldada kujul

$$\eta_{td} = \frac{\eta_R}{\eta_C}.$$

Eespooltoodud näite puhul

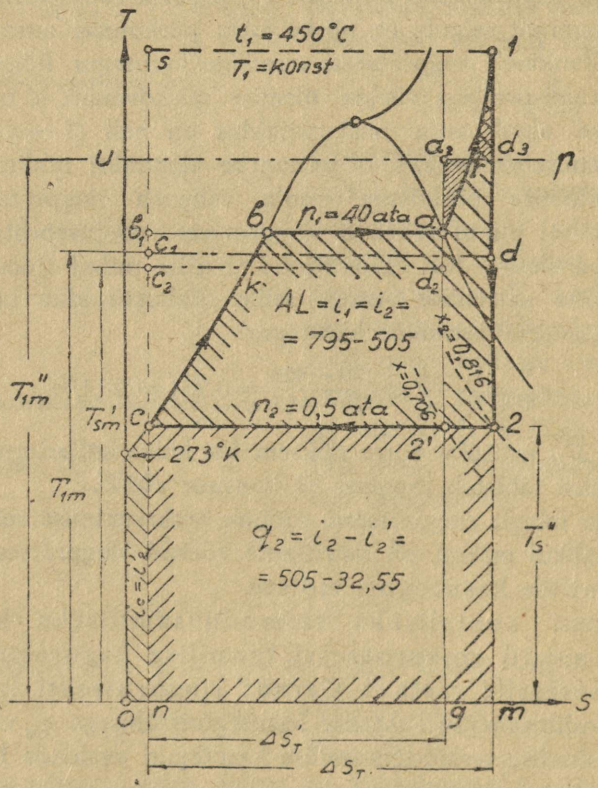
$$\eta_{td} = \frac{\eta_R}{\eta_C} = \frac{0{,}277}{0{,}308} = 0{,}899.$$

Suhteline termodünaamiline kasutegur näitab, kuivõrd ringprotsess on lähendatud Carnot' ringprotsessile.

22. RANKINE'I RINGPROTSESS ÜLEKUUMENDATUD AURUGA.

Ringprotsess ülekuumendatud auruga on näidatud joonisel 76* esitatud T-s-diagrammil.

Ringprotsess algab punktist b vee isobaar-isotermilise aurustumisega aurukatlas kuni ülemise piirkõvera punktini a. Aurustumisele järgneb auru isobaariline ülekuumendamine kuni valitud temperatuurini T_1 punktis *1*. Selle järel voolab aur neil parameetritel aurumasinasse ja paisub seal adia-



Joon. 76.

baatiliselt rõhuni p_2 punktis *2*, mis vastab kondensaatoris valitsevale auru temperatuurile T_s''. Kondensaatoris jahtub aur isobaar-isotermiliselt kuni täieliku kondenseerumiseni mööda isobaar-isotermi *2c*. Kondensaatoris kondenseerunud aur ehk kondensaat saadetakse katla toitepumbaga tagasi

* Joonisel 76 arvsuurused on määratud i-s-diagrammilt. Rõhk p_2, mis joonisel on märgitud 0,5 ata, peab olema $p_2 = 0{,}05$ ata.

aurukatlasse, kus talle taastatakse algolek. Seda protsessi tähistab alumise piirkõvera lõik *cb*.

Jooniselt nähtub, et protsessi juhitud soojushulk on

$$q_1 = \text{pindala } ncba1m = i_1 - i_2'$$

ja protsessist jahutajale ülekandunud soojushulk

$$q_2 = \text{pindala } nc2m = i_2 - i_2',$$

kus i_2' on kondensaadi entalpia alumise piirkõvera ja isobaar-isotermi $2c$ lõikepunktis c ja i_2 entalpia punktis 2.

Järelikult on kasuteguri avaldis

$$\eta_R = \frac{AL_t}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{h}{i_1 - i_2'}. \tag{151}$$

Auru ja soojuse erikulu avalduvad endiste võrranditega, s. o.

$$d = \frac{632}{AL} = \frac{632}{i_1 - i_2} = \frac{632}{h} \quad \frac{\text{kg}}{\text{HJh}'}$$

$$d_W = \frac{860}{AL} = \frac{860}{i_1 - i_2} = \frac{860}{h} \quad \frac{\text{kg}}{\text{kWh}'}$$

$$W = d \cdot q_1 = 632 \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2} = \frac{632}{\eta_R} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}'},$$

$$W_W = d_W \cdot q_1 = 860 \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2} = \frac{860}{\eta_R} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}.$$

Selgitame auru ülekuumenduse mõju ringprotsessi termilisele kasutegurile. Selleks võrdleme ülekuumendatud auru ringprotsessi termilist kasutegurit samale ringprotsessile vastava kuiva küllastunud auru ringprotsessi termilise kasuteguriga.

Ringprotsessi *cba12* ülekuumendatud auruga võime vaadelda kahe iseseisva ringprotsessina: esimene, *cba2'*, toimub kuiva küllastunud auruga ja teine, *a122'*, teostatakse ülekuumendatud auruga.

Taandades kuiva küllastunud auru ringprotsessi pindala *cba2'* temaga ekvivalentsele ristküliku pindalale $c_2d_2 2'c$, võime ringprotsessi termilise kasuteguri avaldada ekvivalentse Carnot' ringprotsessi kasuteguriga, s. o.

$$\eta_R' = \frac{AL'}{q_1} = \frac{(T_{sm}' - T_s'') \cdot \Delta s_T'}{T_{sm}' \cdot \Delta s_T'} = 1 - \frac{T_s''}{T_{sm}'},$$

kus T_{sm}' on soojuse q_1 ringprotsessi juhtimise keskmine temperatuur, mida joonisel 76 tähistab isoterm c_2d_2. Selle isotermi ehitamiseks tõmbame entroopiateljega rööpse sirge nii, et pindala cc_2k oleks võrdne pindalaga $kbad_2$.

Analoogiliselt avaldub ka ringprotsessi *a122'* termiline kasutegur η_t, s. o.

$$\eta_t = \frac{AL''}{c_{pm}(T_1 - T_s')} = \frac{(T_{1m}'' - T_s'')\ (\Delta s_T - \Delta s_T')}{T_{1m}''(\Delta s_T - \Delta s_T')} = 1 - \frac{T_s''}{T_{1m}''},$$

kus T_{1m}'' on auru ülekuumendamise soojuse $c_{pm}(T_1 - T_s')$ ringprotsessi juhtimise keskmine temperatuur. Seda temperatuuri tähistab isoterm *up* (joon. 76), mis ehitatakse analoogiliselt eelmisele juhule (näidatud viirutatud pindalaga aa_2r ja $r1d_3$). *T-s*-diagrammilt nähtub, et isoterm *up* asub kõrgemal kui isoterm c_2d_2, mistõttu temperatuur T_{1m}'' on suurem temperatuurist T_{sm}'.

Järelikult on ringprotsessi *a122'* termiline kasutegur η_t suurem ringprotsessi *cba2'* termilisest kasutegurist η_R', s. o.

$$\eta_t > \eta_R'.$$

Mõlemad ringprotsessid *cba2'* ja *a122'* on ülekuumendatud auruga toimuvat Rankine'i ringprotsessi *cba12* moodustavaiks elementideks. Seega on ülekuumendatud auruga toimuva Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur alati suurem kuiva küllastunud auruga toimuva ringprotsessi *cba2'* termilisest kasutegurist ja väiksem ringprotsessi *a122'* termilisest kasutegurist, s. o.

$$\eta_R' < \eta_R < \eta_t.$$

Eespooltoodust võime edasi teha järelduse, et ülekuumendatud auruga toimuva Rankine'i ringprotsessi keskmine soojuse isotermiliselt protsessi juhtimise temperatuur T_{1m} on alati suurem samale ringprotsessile vastava kuiva küllastunud auruga toimuva Rankine'i ringprotsessi samanimelisest keskmisest temperatuurist T_{sm}'. *T-s*-diagrammil (joon. 76) on ülekuumendatud auruga toimuva Rankine'i ringprotsessi keskmine soojuse isotermiliselt protsessi juhtimise temperatuur märgitud isotermiga T_{1m}. Selle temperatuuri järgi avaldub ringprotsessis termiline kasutegur

$$\eta_R = \frac{AL}{q_1} = \frac{(T_{1m} - T_s'') \cdot \Delta s_T}{T_{1m} \cdot \Delta s_T} = 1 - \frac{T_s''}{T_{1m}}.$$

Et T_{1m} on suurem kui T_{sm}', siis

$$1 - \frac{T_s''}{T_{1m}} > 1 - \frac{T_s''}{T_{sm}'},$$

millest samuti järgneb, et

$$\eta_R > \eta_R',$$

s. o. auru ülekuumendamisega suureneb Rankine'i ringprot-

sessi termiline kasutegur, kusjuures sama rõhu puhul vastab suuremale ülekuumendusele ka suurem termiline kasutegur.

Näiteks joonisel 76 esitatud ülekuumendatud auru ringprotsessi termiline kasutegur on joonisel antud arvsuuruste järgi

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{795 - 505}{795 - 32{,}55} = 0{,}380$$

ja kuiva küllastunud auru ringprotsessi *ba2'c* termiline kasutegur

$$\eta_R = \frac{i_a'' - i_2'}{i_a'' - i_2'} = \frac{669 - 442}{669 - 32{,}55} = 0{,}356.$$

Seega suurenes ringprotsessi kasutegur ülekuumenduse tõttu

$$\frac{0{,}380 - 0{,}356}{0{,}356}\ 100 = 6{,}4\%.$$

Nendele ringprotsessidele vastavate Carnot' ringprotsesside kasutegurite väärtused on:

ülekuumendatud aurul

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_s''}{T_1'} = \frac{723 - 305{,}71}{723} = 0{,}577$$

ja kuival küllastunud aurul

$$\eta_C' = \frac{T_s' - T_s''}{T_s'} = \frac{522{,}34 - 305{,}71}{522{,}34} = 0{,}415.$$

Auru ülekuumenduse mõju ringprotsessi termilisele kasutegurile illustreerib alljärgnev tabel *A*. Värske auru rõhuks on võetud $p_1 = 26$ ata ja kondensaatoris valitsevaks auru rõhuks $p_2 = 0{,}04$ ata. Auru neil parameetritel $T_s' = 498{,}15°$ K, $T_s'' = 301{,}8°$ K ja $i_2' = 28{,}65$ kcal/kg.

Tabel *A*.

t °C	224,99	350	450	500	550
T_1°K	498,15	623,15	723,15	773,15	823,15
i_1	669,5	746	799	826	853
i_2	449	491	516	526	538
η_R	0,344	0,355	0,367	0,376	0,382
η_C	0,394	0,516	0,583	0,610	0,633
η_{td}	0,873	0,688	0,630	0,616	0,603

Toodust järgneb, et auru isobaarilise ülekuumendamisega Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur üldiselt suureneb, kuid ühes sellega eemaldub ringprotsess Carnot' ringprotsessist, sest ringprotsessi suhteline termodünaamiline kasutegur väheneb, s. o. ülekuumendatud auru puhul ei saa soojus termodünaamiliselt nii täielikult ära kasutatud kui kuiva küllastunud auru puhul. See on seletatav soojuse isobaarilise protsessi juhtimisega ülekuumendusprotsessil, mille tõttu ringprotsessi pindala ei kasva samal määral, nagu Carnot' ringprotsessi oma. Jooniselt 76 nähtub, et kuival küllastunud aurul on Carnot' ringprotsessi pindala suurem Rankine'i omast pindala cbb_1 võrra, ülekuumendatud aurul aga on ta pindala *cba1s* võrra suurem kui Rankine'i ringprotsessis.

Üldiselt võime öelda, et kõigil juhtudel, kus soojus juhitakse ringprotsessi madalamal temperatuuril kui ringprotsessi maksimaalne temperatuur, on ringprotsessi suhteline termodünaamiline kasutegur seda väiksem, mida madalam on soojuse ringprotsessi juhtimise keskmine temperatuur.

Praegustes aurujõuseadmetes tingivad auru ülekuumendamist peale termilise kasuteguri suurendamise auru füüsikalised eelised. Tähtsam nendest on, et ülekuumendatud auru saab paisutada sügavate vaakuumideni, ilma et ta liigselt niiskuks, sest praegusaja turbiinides ei tohi auru niiskussisaldus tõusta üle 10 — 13% ($x = 0{,}87$), et vältida turbiini labidate korrosiooni ja kulumist. Aurumasinate silindrites muutub aga kondensaat ohtlikuks nii kolbidele kui ka silindritele jne.

23. RANKINE'I RINGPROTSESSI TERMILISE KASUTEGURI SÕLTUVUS AURU ADIABAATILISE PAISUMISE LÕPPRÕHUST.

Olenevalt paisumisprotsessi lõpprõhust jagunevad aurujõuseadmed kondensatsioon- ja vasturõhuseadmeteks. Vastavalt sellele liigitusele nimetatakse ka aurumasinaid kondensatsioon- ja vasturõhujõumasinateks.

Kondensatsioonseadmetes on paisuva auru lõpprõhk alla 1 ata ja vasturõhu puhul 1 ata või vajaduse korral üle selle. Vasturõhuseadmetes töötanud aur kasutatakse tavaliselt tehnoloogilisteks ja teisteks tehnilisteks otstarveteks või lastakse vahetult atmosfääri, nagu vedurite, lokomobiilide jne. puhul.

Sõltuvalt paisumisprotsessi lõpprõhust on ringprotsessi termiline kasutegur seda suurem, mida madalam on adiabaatilise paisumisprotsessi lõpprõhk, s. o. mida sügavam vaakuum valitseb kondensaatoris.

Sellest asjaolust tingituna kasutatakse kondensatsioon-aurujõuseadmetes võimalikult sügavat vaakuumi. Kolbaurumasinatel kasutatav paisumisprot-

sessi lõpprõhk on 0,15 kuni 0,1 ata ja auruturbiinidel 0,05 kuni 0,03 ata, mis nõuab kondensaatoris vaakuumi 95 kuni 97%. Nendele rõhkudele vastavad veeauru kondenseerimise temperatuurid on 32° C kuni 24° C.

Üldiselt limiteerivad kondensaatoris valitseva vaakuumi või lõpprõhu looduslikud tingimused, s. o. saadaoleva jahutusvee temperatuur, ja kondensaatori jahutuse intensiivsus, mis sõltub nn. jahutuse kordarvust, s. o. ühe kilogrammi auru kondenseerimiseks tarbitud jahutusvee kogusest kilogrammides. Mida suurem on jahutusvee kordarv, seda madalamaks saab viia jahutusvee ühe ja sama algtemperatuuri puhul auru kondenseerumise temperatuuri kondensaatoris, sest kordarvu suurendamisel väheneb kondensaatorist väljuva jahutusvee temperatuur.

Jahutuse kordarvu väärtus on tavaliselt 30 kuni 100. Jahutusvee algtemperatuuril + 9° C on nende kordarvudega võimalik saavutada kondensaatoris vaakuumi 96 kuni 98%, mis vastab rõhule 0,04 kuni 0,02 ata. On ka jõujaamu, kus jahutuse kordarv tõuseb kuni 200. Säärane suur kordarv aga suurendab märksa kondensaatori jahutusveepumpade võimsust, mis omakorda mõjutab jõuseadme üldist kasutegurit.

NSV Liidus on aasta keskmisteks jahutusvee temperatuurideks:

Moskva	9,2° C
Kašira (Oka)	9,0° C
Leningrad (Neeva)	9,2° C
Bakuu (merevesi)	15,9° C
Kuibõšev (Volga)	8,5° C
Orehhovo (gradeerimisseadmetes) . .	28,6° C

Auru adiabaatilise paisumise lõpprõhu mõju ringprotsessi termilisele kasutegurile nähtub tabelist *A*, kus on antud ülekuumendatud auruga toimuva Rankine'i ringprotsessi kasuteguri muutused vastavalt mitmesugustele adiabaatilise paisumise lõpprõhkudele. Auru algparameetrid on $p_1 = 12$ ata, $t_1 = 360°$ C ja $i_1 = 757{,}7$ kcal/kg. Vasturõhu-ringprotsessides on katla toitevee temperatuur võetud 28° C.

Tabel *A*.

p_2 ata	3	2	1	0,7	0,4	0,1	0,07	0,04
η_R	0,111	0,139	0,176	0,213	0,239	0,297	0,306	0,324

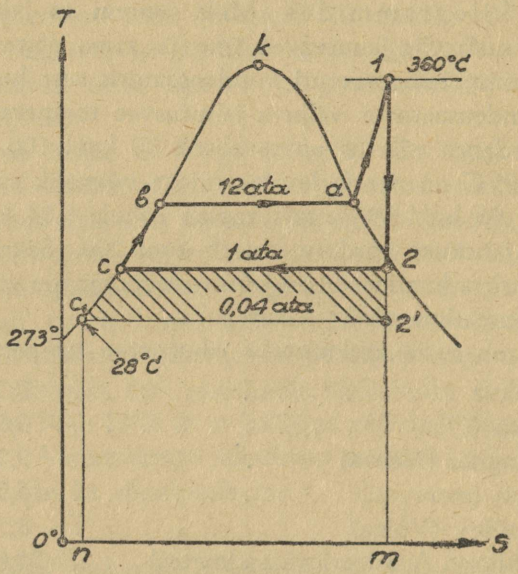
Tabelist nähtub, et vähendades lõpprõhku 3 ata-lt kuni rõhuni 0,04 ata, suureneb ringprotsessi termiline kasutegur

$$\frac{0{,}324 - 0{,}111}{0{,}111} 100 = 192\%$$

ja lõpprõhu vähendamisel 1 ata-lt kuni sama lõpprõhuni 0,04 ata suureneb termiline kasutegur

$$\frac{0{,}324 - 0{,}176}{0{,}176}\ 100 = 84\,\%\,.$$

Termilise kasuteguri säärane suur tõus on tingitud jahutusveele ülekanduva soojushulga q_2 vähenemisest auru kondenseerumistemperatuuri langemisel.



Joon. 77.

T-s-diagrammilt, joon. 77, selgub, et paisumise lõpprõhu vähendamisega 1 ata-lt kuni rõhuni 0,04 ata väheneb soojushulka q_2 määrav pindala nc_1c2m pindala c_1c22' võrra. Toodust järgneb veel, et vasturõhu-jõumasinate puhul on ringprotsessi termiline kasutegur väike ja väheneb vasturõhu tõusul. Näiteks vasturõhu tõusul 1 ata-lt kuni 3 ata-ni väheneb termiline kasutegur tabeli *A* andmete järgi 37 %.

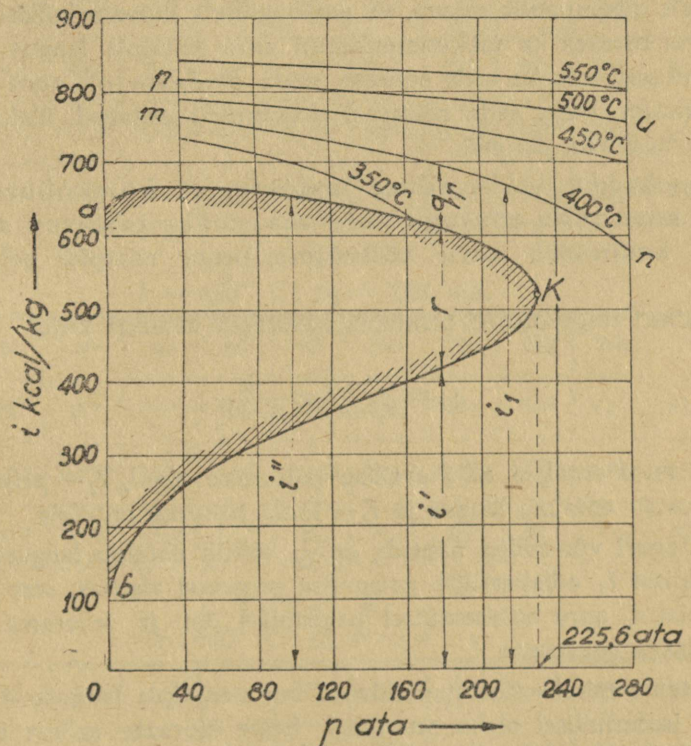
Vasturõhu-ringprotsesside termilist kasutegurit, nagu edaspidi selgub, saab tõsta auru algrõhu suurendamisega. Näiteks, tõstes auru algrõhku 12 ata-lt 60 ata-ni, saame ringprotsessi termilise kasuteguri 1 ata vasturõhu puhul 0,255, mis vastab termilise kasuteguri paranemisele 45 %.

Tehnikas kasutatakse vasturõhu-jõuseadmeid tavaliselt sel puhul, kui tehnilisteks, tehnoloogilisteks või kommunaalmajanduslikeks (aurküte jne.) otstarveteks vajatakse madalrõhuauru. Nendes soojusjõujaamades on otstarbekas kasutada ainult kõrgrõhu-auru, millega tõuseb jõuseadme termiline

kasutegur. Soojusjõujaama üldine teoreetiline kasutegur on võrdne ühega, sest sel puhul kasutatakse ära ka jõuseadmest väljuva töötanud auru soojus, s. o. T-s-diagrammil pindalaga $c2mnc_1$ fikseeritud soojushulk q_2 (joon. 77).

24. RANKINE'I RINGPROTSESSI TERMILISE KASUTEGURI SÕLTUVUS AURU ALGPARAMEETRITEST. KÕRGRÕHU-AUR.

Ühenduses metallurgia edusammudega katelde ehituse alal on viimasel ajal NSV Liidu moodsas eesrindlikus soojusjõumajanduses üle mindud kõrgrõhu-aurudele, mis märksa tõstab aurujõuseadmete ökonoomsust. Kõrgrõhu-auruks nimetatakse üldiselt auru, mille rõhk on 60 kuni 225 at.



Joon. 78.

Enne kui asuda kõrgrõhu-auruga toimuvate ringprotsesside uurimisele, selgitame täpsemalt vee kuumendamis-, aurustumis- ja auru ülekuumendus-soojuse sõltuvuse rõhust.

Joonisel 78 esitatud *i-p*-diagrammilt selgub, et rõhu suurenemisega suureneb vee entalpia i' kuni auru kriitilise punktini K, mida diagrammil tähistab alumine piirkõver bK. Vee aurustumissoojus r väheneb pidevalt rõhu tõustes ja muutub nulliks kriitilises punktis K, nagu seda näitab alumise *(bK)* ja ülemise *(aK)* piirkõvera kulgemine. Järelikult kriitilisel rõhul ja rõhkudel üle kriitilise (225,6 ata) toimub vee üleminek ülekuumendatud auruks ilma aurustumisfaasita. Üleminek vedelast faasist ülekuumendatud auruks ei toimu siiski hetkeliselt, vaid teatavas temperatuuri-intervallis, mis sõltub vee erisoojuse c_p muutusest ja tema maksimumist kriitilises piirkonnas. Aurustumissoojusest tingituna esineb rõhu tõustes kuiva küllastunud auru entalpia i'' kasvamine kuni 31 ata-ni ($i''_{max} = 669{,}7$). Selle järel hakkab ta vähenema ja väheneb kuni auru kriitilise punktini K, kus tema väärtus on 505 kcal/kg. i'' muutust tähistab diagrammil ülemine piirkõver aK.

Samalt diagrammilt selgub, et analoogiliselt kuivale küllastunud aurule esineb rõhu tõustes ka ülekuumendatud auru entalpia langus isotermilisel oleku muutusel, mis on seda suurem, mida madalam on auru ülekuumendustemperatuur, nagu seda näitavad diagrammil esitatud ülekuumendatud auru isotermid *mn*, *pu* jne.

Eespooltoodut kokku võttes järeldame, et kõrgrõhuauru puhul väheneb auru rõhu tõusuga auru saamiseks tarbitav soojushulk (kcal/kg), kusjuures auru töövõime, nagu edaspidi selgub, siiski kasvab.

Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur avaldus kujul

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} = \frac{h}{i_1 - i'_2},$$

kus i_1 on auru entalpia adiabaatilise paisumise algul, i_2 — paisumise lõpul h — kasustatav entalpia langus ja i'_2 — katla toitevee entalpia.

Kasuteguri võrrandist nähtub, et η_R sõltub entalpia langusest ja värske auru entalpiast i_1 adiabaatilise paisumise protsessi alguses, sest katla toitevee entalpiat i'_2 auru adiabaatilisel paisumisel ühe ja sellesama lõpprõhuni vaatleme jääva suurusena.

Selgitame esiteks ülekuumendatud auru entalpia languse sõltuvust rõhust auru isotermilisel oleku muutusel. Selge ülevaate sellest annavad tabelid. Tabelites A, B, C ja D on arvutatud entalpia langused, Rankine'i ringprotsessi termilised kasutegurid ja auru niiskuse protsent paisumise lõpul, vastavalt auru rõhu muutusele ülekuumendatud auru nelja isotermilise olekumuutuse jaoks. Kõikides tabelites on auru adiabaatilise paisumise lõpprõhuks võetud $p_2 = 0{,}04$ ata.

Tabel *A*.

$t_1 = 350°$ C; $p_2 = 0{,}04$ ata.

p_1 ata	10	20	40	60	80	100	120	140
$h \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	232	249	264	272	273	271	265	258
η_R	0,320	0,346	0,372	0,390	0,399	0,405	0,406	0,410
$100\,(1-x)$ % %	14,8	18,9	24,4	26,6	29,0	31,2	33,5	36,0

Tabel *B*.

$t_1 = 400°$ C; $p_2 = 0{,}04$ ata.

p_1 ata	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$h \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	242	263	281	288	292	294	293	291	286	280	275
η_R	0,322	0,353	0,380	0,395	0,405	0,413	0,418	0,421	0,422	0,423	0,425
$100\,(1-x)$ %%	12,6	16,8	21,2	23,9	26,7	28,0	29,7	31,2	32,7	34,2	35,8

Tabel *C*.

$t_1 = 450°$ C; $p_2 = 0{,}04$ ata.

p_1 ata	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$h \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	257	277	295	305	310	312	314	314	313	310	308
η_R	0,331	0,359	0,386	0,402	0,412	0,419	0,425	0,429	0,432	0,435	0,437
$100\,(1-x)$ % %	10,7	14,8	19,0	21,7	23,7	25,4	26,9	28,2	29,4	30,7	31,7

Tabel *D*.

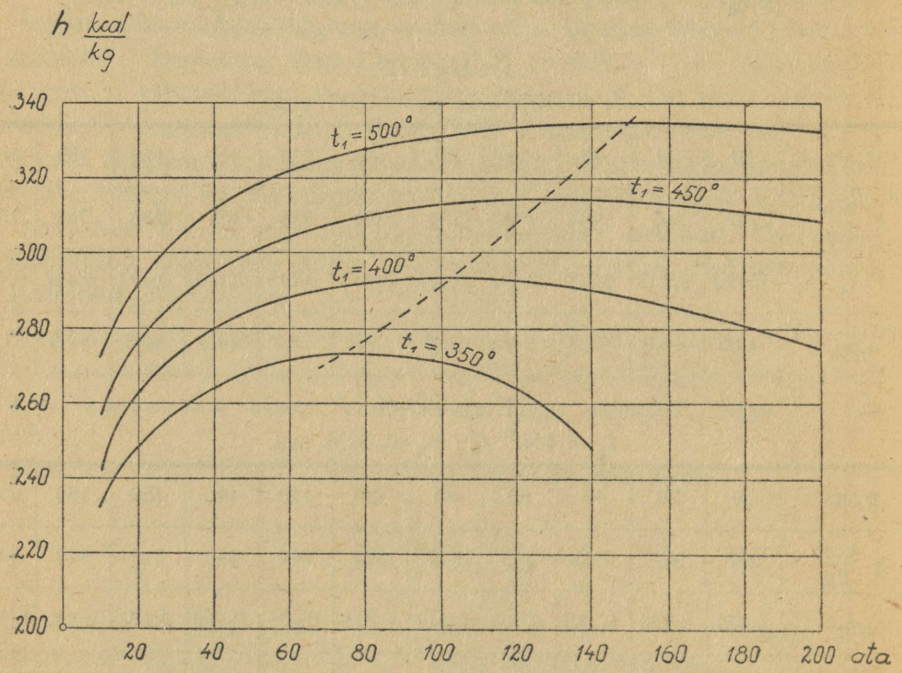
$t_1 = 500°$ C; $p_2 = 0{,}04$ ata.

p_1 ata	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$h \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	272	292	312	322	328	331	333	335	335	334	333
η_R	0,340	0,366	0,393	0,409	0,419	0,426	0,431	0,437	0,441	0,443	0,445
$100\,(1-x)$ % %	8,9	12,9	17,2	19,7	21,7	23,3	24,4	25,7	26,7	27,6	28,6

Piltlikuma ülevaate saamiseks on tabelites arvutatud entalpia langused kantud *h-p*-tasapinnale, mis on antud joonisel 79.

Diagrammilt järeldub:

1. Auru rõhu tõustes kasvab entalpia langus alguses kuni teatava maksimumini ja selle järel hakkab vähenema, kusjuures h_{max} väärtused nihkuvad seda rohkem kõrgrõhu piirkonda, mida suurem on auru ülekuumendustemperatuur.



Joon. 79.

2. Kasustatav entalpia langus ehk auru adiabaatiline töövõime on seda suurem, mida kõrgem on auru rõhk ja ülekuumendustemperatuur.

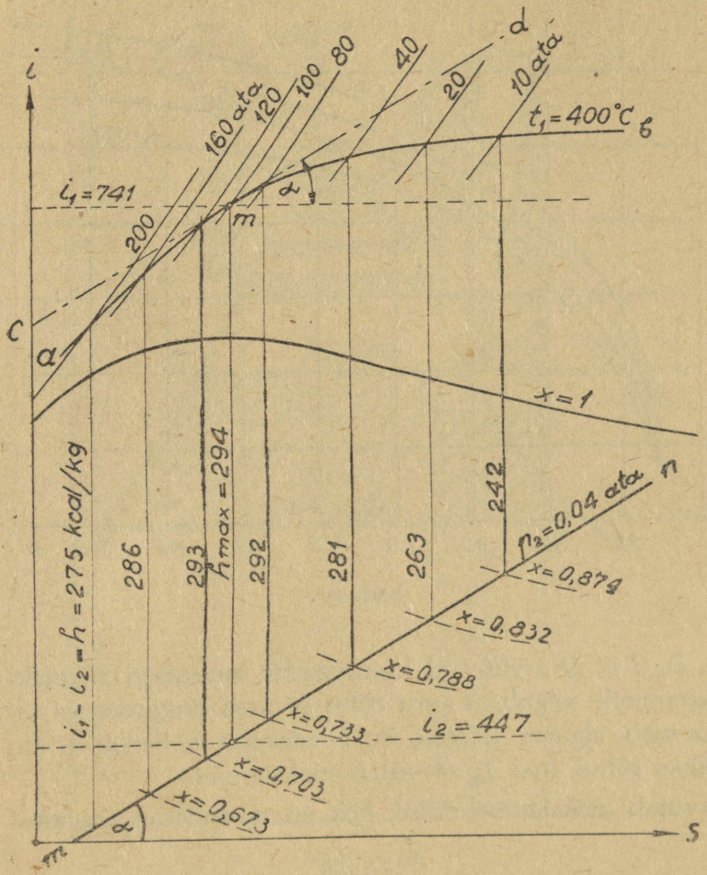
Joonisel 80 esitatud *i-s*-diagrammil on näidatud kasustatud entalpia langused tabeli *B* jaoks. Sellelt diagrammilt nähtub, et auru adiabaatiline töövõime kasvab seni, kuni isotermi $t_1 = 400°$ C tõus on suurem kondenseeruva auru isobaari $p_2 = konst$ tõusust, s. o. kuni

$$\left(\frac{\partial i_1}{\partial s}\right)_{T_1} > \left(\frac{\partial i_2}{\partial s}\right)_{p_2},$$

ja saavutab maksimumi adiabaadil, s. o. vertikaalil, kus

$$\left(\frac{\partial i_1}{\partial s}\right)_{T_1} = \left(\frac{\partial i_2}{\partial s}\right)_{p_2}.$$

Järelikult on h_{max} leidmiseks tarvis vaid isotermile $T_1 = konst$ tõm-

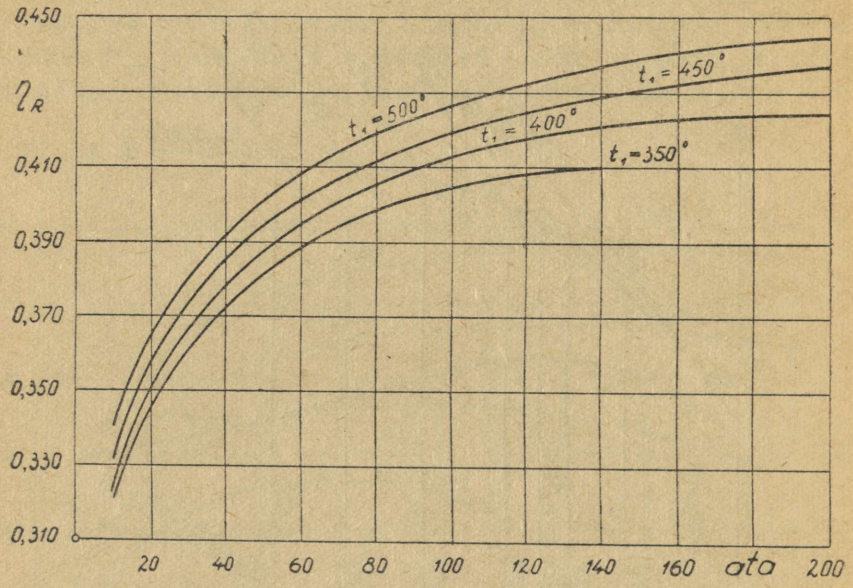


Joon. 80.

mata puutuja rööpselt $p_2 = konst$ joonega. Puutuja puutepunkt m määrabki h_{max} asukoha i-s-diagrammil.

Kui värske auru entalpia i_1 oleks auru rõhust sõltumatu, siis määraks h_{max} ühtlasi ka ringprotsessi termilise kasuteguri maksimumi. Tegelikult on i_1 auru rõhu funktsiooniks ja väheneb rõhu tõustes (vt. joon. 78), mistõttu ringprotsessi termiline kasutegur kasvab ka pärast seda, olgugi et rõhu edaspidisel tõusul h väheneb, s. o. auru adiabaatiline töövõime langeb.

Ringprotsessi termilise kasuteguri suurenemist auru rõhu tõustes pärast h_{max} väärtust näitavad ka eespoolantud tabelid. Piltlikult näitab termilise kasuteguri sõltuvust auru algrõhust ülekuumendatud auru isotermilisel olekumuutusel joonisel 81 antud diagramm, kus on graafiliselt esitatud



Joon. 81.

tabelites A, B, C ja D arvutatud kasutegurite muutused funktsioonina auru rõhust. Diagrammilt selgub, et auru rõhu tõustes ringprotsessi termiline kasutegur suureneb alguses kiiresti, kuid edaspidi väheneb tõusu kiirus ja muutub nulliks rõhul, kus η_R saavutab maksimumi.

η_R saavutab maksimumi rõhul, kus on rakendatav tingimus

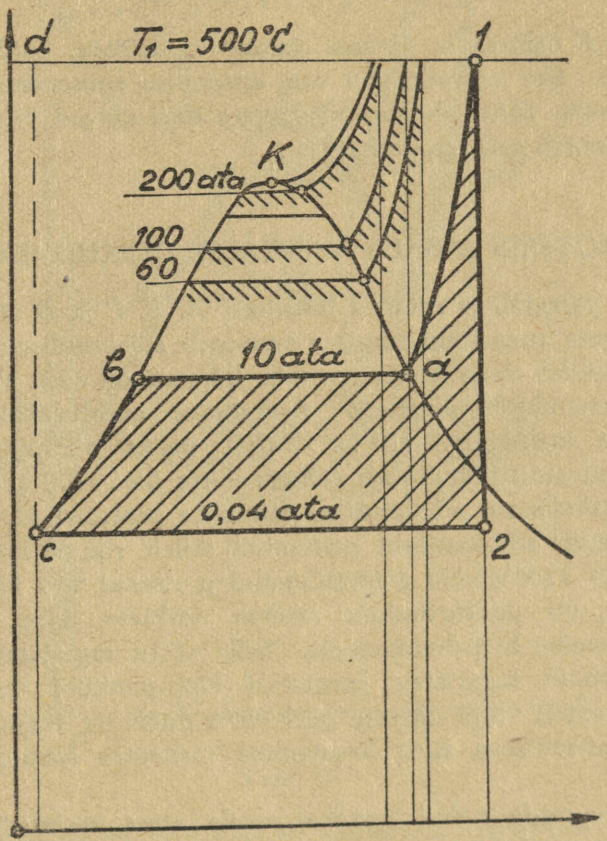
$$\frac{\Delta h}{\Delta p} = \frac{\Delta q_1}{\Delta p}.$$

Selles võrduses $q_1 = i_1 - i_2'$ tähistab ringprotsessi juhitavat soojushulka See võrdus ütleb, et η_R saavutab maksimumi rõhu intervallis Δp, kus entalpia muutuse kiirus sõltuvalt rõhust on võrdne protsessi juhitava soojuse muutuse kiirusega. $\eta_{R_{max}}$ on määratav h ja q_1 kõverate kaudu, mis on ehitatud funktsioonidena rõhust.

T-s-diagrammi järgi on ringprotsessi termilise kasuteguri tõus rõhuga seletatav ringprotsessi lähenemisega Carnot' ringprotsessile, sest igal eelmi-

sest kõrgemal algrõhul suureneb Rankine'i ringprotsessi pindala suhe (vt. joon. 82) temale vastava Carnot' ringprotsessi pindalaga.

Ringprotsessi lähenemist Carnot' ringprotsessile rõhu tõustes näitab ka Rankine'i ringprotsessi suhtelise termodünaamilise kasuteguri suurenemine



Joon. 82.

värske auru rõhuga. Näiteks on tabelis *D* esitatud ülekuumenduse ja kondensaatoris valitseva temperatuuri-intervalli jaoks Carnot' ringprotsessi terminline kasutegur

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{773 - 302}{773} = 0{,}61.$$

Vastavalt tabelis *D* antud auru algrõhkudele on Rankine'i ringprotsessi suhtelise termodünaamilise kasuteguri muutus alljärgnev.

Tabel *E*.

p_1	10	40	60	80	100	120	160	200
η_{td}	0,56	0,64	0,67	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73

Tabelist *E* nähtub, et alguses kasvab η_{td} kiiresti, kuid rõhu tõustes kiirus väheneb. See on seletatav vee erisoojuse suurenemisega temperatuuri tõusul, mille tõttu alumise piirkõvera tõus kiiresti väheneb ja seega kõver ise eemaldub temperatuuriteljest.

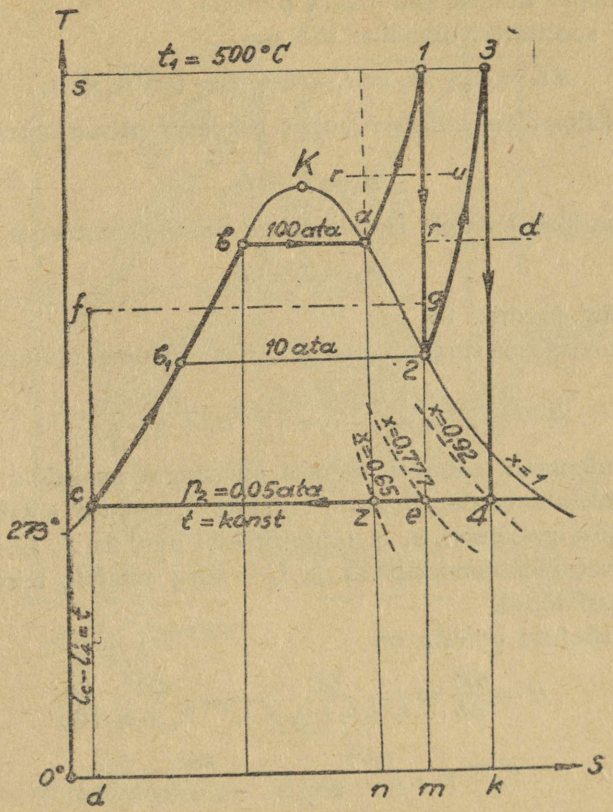
25. RINGPROTSESS AURU VAHEPEALSE ÜLEKUUMENDAMISEGA.

Eelmises paragrahvis esitatud tabelitest *A*, *B*, *C* ja *D* ning jooniselt 80 nähtub, et värske auru rõhu tõusuga suureneb adiabaatilise paisumise lõpul auru niiskussisaldus seda rohkem, mida kõrgem on auru algrõhk ja madalam ülekuumendustemperatuur. Arvestades auruturbiinides lubatavat niiskussisalduse maksimumi (10 . . . 13%), peaks piirduma 500° C-ni ülekuumendatud auru puhul auru rõhuga mitte üle ~100 ata, sest kõrgema rõhu korral niiskuks aur adiabaatilise paisumise protsessi lõpul üle lubatud piiri. Tagastataval adiabaatilisel paisumisel sellelt rõhult kuni rõhuni 0,04 ata aur niiskub 22,5%, kuid tagastatamatul protsessil, mis tegelikult esineb auruturbiinides, on niiskussisaldus märksa väiksem, mida, nagu teame, tingib auru sisemine hõõrdumissoojus. Selle tõttu tagastatamatu protsessi lõpp-punkt nihkub tagastatava protsessi lõpp-punktist mööda isobaari entroopia kasvamise võrra ülemise piirkõvera poole ja seega osutub eeltähendatud parameetritega auru kasutamine uuemates auruturbiinides võimalikuks.

Kõrgrõhu-aurude puhul antakse aurule auru niiskumise vältimiseks adiabaatilisel paisumisel pärast esimest ülekuumendamist, kui ta on läbinud aurujõumasina teatavad astmed, veel täiendavaid vahepealseid ülekuumendusi ja juhitakse siis tagasi aurujõumasina madalamatesse astmetesse, kus ta paisub edasi ettenähtud lõpprõhuni.

Ringprotsess auru täiendava ülekuumendamisega on näitena joonisel 83 esitatud *T*-*s*-diagrammil. Jooniselt nähtub, et värsket, temperatuurini t_1 ülekuumendatud auru lastakse aurumasinas adiabaatiliselt paisuda kuni ülemise piirkõvera punktini 2 (10 ata). Selle järel juhitakse aur jõumasinast uuesti ülekuumendajasse, kus ta saab isobaariliselt ($p = 10$ ata) uue täiendava vahepealse ülekuumenduse, antud juhul kuni endise algtem-

peratuurini t_1 (500° C). Pärast ülekuumendamist juhitakse aur tagasi aurumasina järgmisesse astmesse, kus ta paisub kuni kondensaatori rõhuni ($p_2 =$ 0,05 ata), niiskudes seejuures ainult 8%-ni, jne.



Joon. 83.

Jooniselt nähtub, et adiabaatilisel paisumisel vahepealse ülekuumendamiseta kuni rõhuni $p_2 = 0{,}05$ ata oleks aur niiskunud 23,3% ja ülekuumenduseta kuiv küllastunud aur 35%-ni. Tegelikus ringprotsessis oleks auru niiskumine adiabaatilisel paisumisel palju väiksem, sest sel puhul nihkuksid protsesside tagastatamatuse tõttu adiabaatiliste protsesside lõpp-punktid *e* ja *4* mööda isobaare entroopia juurdekasvu võrra paremale.

Joonisel 83 toodud ringprotsessis on auruga protsessi juhitud soojushulk

$$q_1 = \text{pindala } dcba1m + \text{pindala } m23k =$$
$$= i_1 - i_1' + i_2 - i_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ringprotsessist jahutajale ülekandunud soojushulk on

$$q_2 = \text{pindala } dc4k = i_4 - i_4',$$

kus i_4' on entalpia alumise piirkõvera punktis c.
Ringprotsessis sooritatud tehniline töö on

$$AL = q_1 - q_2 = i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = h_1 + h_2,$$

kus h_1 on adiabaatiline entalpia langus esimeses paisumisprotsessis *12*, s. o.

$$h_1 = i_1 - i_2,$$

ja h_2 — adiabaatiline entalpia langus teises paisumisprotsessis, *34*, s. o.

$$h_2 = i_3 - i_4,$$

mis on näidatud joonisel 84.

Järelikult avaldub ringprotsessi termiline kasutegur võrrandiga

$$\eta_t = \frac{AL}{q_1} = \frac{i_1 + i_3 - i_2 - i_4}{i_1 + i_3 - i_2 - i_4'} = \frac{h_1 + h_2}{i_1 + i_3 - i_2 - i_4'}, \tag{152}$$

kus i_4' on kondensaadi entalpia alumise piirkõvera punktis c (vt. joon. 83) i_1 on värske ülekuumendatud auru entalpia, i_2 — auru entalpia peale esimest adiabaatilist paisumist, s. o. ringprotsessi punktis *2*, i_3 — auru entalpia pärast täiendavat ülekuumendamist ja i_4 — auru entalpia teise adiabaatilise paisumisprotsessi lõpul.

Auru ja soojuse erikulu on

$$d = \frac{632}{AL} = \frac{632}{i_1 + i_3 - i_2 - i_4} = \frac{632}{h_1 + h_2} \frac{\text{kg}}{\text{HJh}}, \tag{153}$$

$$d_w = \frac{860}{i_1 + i_3 - i_2 - i_4} = \frac{860}{h_1 + h_2} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \tag{154}$$

$$W = \frac{632}{\eta_t} = \frac{632\,(i_1 + i_3 - i_2 - i_4')}{i_1 + i_3 - i_2 - i_4} =$$

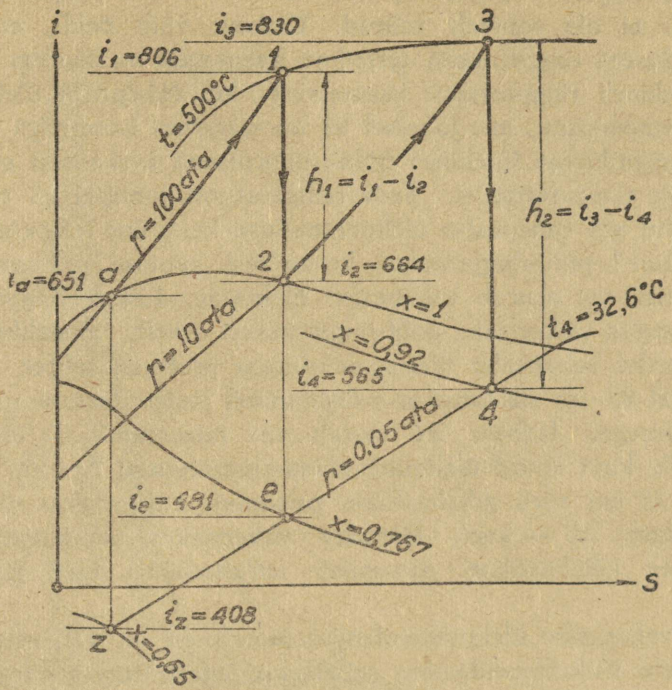
$$= \frac{632\,(i_1 + i_3 - i_2 - i_4')}{h_1 + h_2} \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}, \tag{155}$$

$$W_w = \frac{860}{\eta_t} = \frac{860\,(i_1 + i_3 - i_2 - i_4')}{i_1 + i_3 - i_2 - i_4} = \frac{860\,(i_1 + i_3 - i_2 - i_4')}{h_1 + h_2} \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}. \tag{156}$$

Auru parameetrite määramine ringprotsessi üksikutes punktides on lihtsalt teostatav *i-s*-diagrammilt. Selleks kanname *i-s*-diagrammile auru parameetrite järgi auru ülekuumenduse ja adiabaatilise paisumise protsessi jooned, nagu on näidatud joonisel 84, kus joon *a1* tähistab värske kuiva küllastunud auru ülekuumendamist, *12* — auru esimest adiabaatilist paisumist, *23* — paisunud auru vahepealset ülekuumendamist ja *34* — auru teist

paisumist aurumasina madalas astmes kuni kondensaatori rõhuni $p_2 =$ 0,05 ata.

Joonisel esitatud andmete järgi on põhi-ringprotsessi termiline kasute-



Joon. 84.

gur ühekordse ülekuumendamise puhul

$$\eta_R' = \frac{i_1 - i_e}{i_1 - t} = \frac{806 - 481}{806 - 32,6} = 0,420$$

ja vahepealse ülekuumenduse korral

$$\eta_t = \frac{i_1 + i_3 - i_2 - i_4}{i_1 + i_3 - i_2 - t} = \frac{806 + 830 - 664 - 565}{806 + 830 - 664 - 32,6} = 0,433.$$

Carnot' ringprotsessi termiline kasutegur mõlemate ringprotsesside puhul on üks ja seesama ning võrdub

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_s''}{T_1} = \frac{773 - 305,7}{773} = 0,605.$$

Ringprotsessis kuiva küllastunud auruga

$$\eta_R = \frac{i_a - i_z}{i_a - t} = \frac{651 - 408}{651 - 32,6} = 0,393.$$

Näitest järgneb, et auru vahepealse ülekuumendamisega suureneb ringprotsessi termiline kasutegur.

Ringprotsessides auru vahepealse ülekuumendamisega võib esineda ka termilise kasuteguri vähenemine, kui vahepealse ülekuumenduse rõhk ja temperatuur ei ole sobivalt valitud. Üldiselt võib öelda, et vahepealse ülekuumendusega ringprotsessi termiline kasutegur on suurem ülekuumendusega Rankine'i ringprotsessi kasutegurist, kui vahepealse ülekuumenduse keskmine temperatuur, mis joonisel 83 on märgitud isotermiga *rd*, on suurem ülekuumendusega Rankine'i põhi-ringprotsessi keskmisest soojuse protsessijuhtimise temperatuurist. Seda temperatuuri joonisel 83 tähistab isoterm *fg*. Kui aga vahepealse ülekuumenduse keskmine temperatuur on madalam Rankine'i põhi-ringprotsessi keskmisest soojuse protsessi juhtimise temperatuurist, siis osutub vahepealse ülekuumendusega ringprotsessi termiline kasutegur väiksemaks põhi-ringprotsessi omast. Eelöeldu on kehtiv ka mitmekordse vahepealse ülekuumendusega protsessi suhtes.

Joonisel 85 on näidatud *p-v*-diagrammil ringprotsess auru vahepealse ülekuumendusega. Isobaar *b1* vastab vee aurustumis- ja ülekuumendamisprotsessile kuni antud ülekuumendustemperatuurini t_1 (500° C). Protsessi joon *12* on auru adiabaatiline paisumine aurumasinas pärast esimest ülekuumendust, *23* — auru täiendav vahepealne ülekuumendamine ja *34* — järgnev adiabaatiline paisumine auruturbiinis kuni kondensaatori rõhuni p_2.

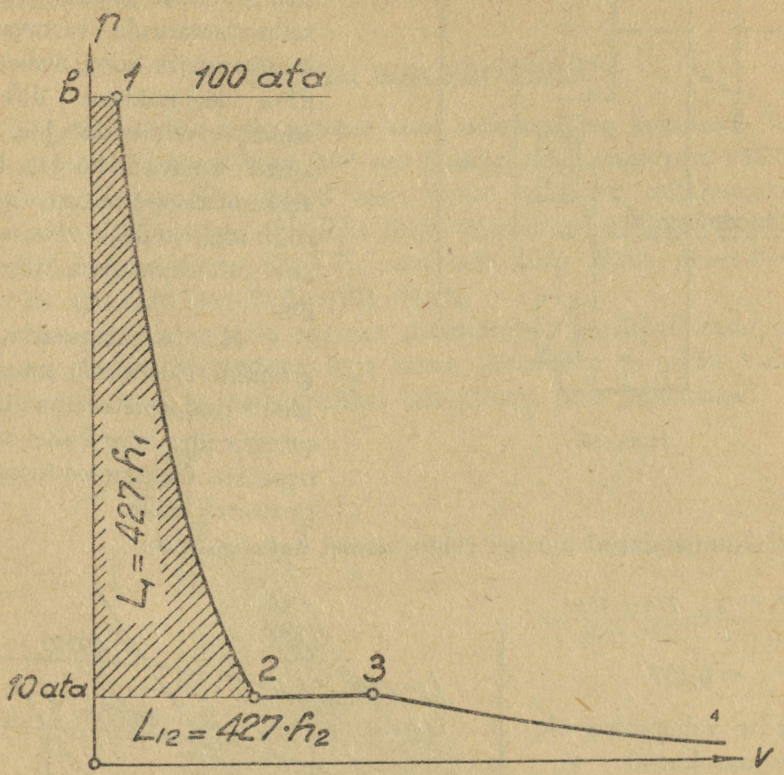
Auru vahepealse ülekuumendamise moodused on mitmesugused:

1. Auru ülekuumendamine suitsugaasidega töötavas auruülekuumendajas. Sel puhul juhitakse turbiini või üldse aurumasina kõrgrõhu-astmeid läbinud aur, kui ta on saavutanud vastava rõhu, tagasi katlamajasse suitsugaasidega töötavasse teise auruülekuumendajasse, sealt tagasi turbiini järgmisse madalamasse astmesse jne.

2. Kuumendamine värske auruga. Selle mooduse puhul juhitakse ülekuumendatud värske aur enne turbiini voolamist läbi soojusvahetusaparaadi, kus ta osa oma soojusest annab ülekuumendatavale, nn. sekundaararurule. Sõltuvalt värske auru ülekuumendusest lastakse tema temperatuuril soojusevahetusaparaadis langeda 50° kuni 80° C. Sekundaararuru temperatuuri on tema väiksema erisoojuse tõttu (vt. erisoojuste diagramm, joon. 39) selle moodusega võimalik tõsta 80° kuni 95° C võrra. Vahel kasutatakse ülekuumendamist värske auruga sekundaararuru temperatuuri reguleerimiseks pärast ülekuumendamist suitsugaasidega.

3. Ülekuumendamine värske kondenseeruva auruga. Sel juhul annab värske aur soojusevahetusaparaadis sekundaararurule kogu oma ülekuumendus- ja aurustumissoojuse, mille tagajärjel ta ise kondenseerub. Kondensaat

juhitakse tavaliselt regeneraatorite kaudu tagasi aurukatlasse. Selle süsteemi puhul on sekundaaraurule võimalik anda ülekuumendusi, mis ületavad

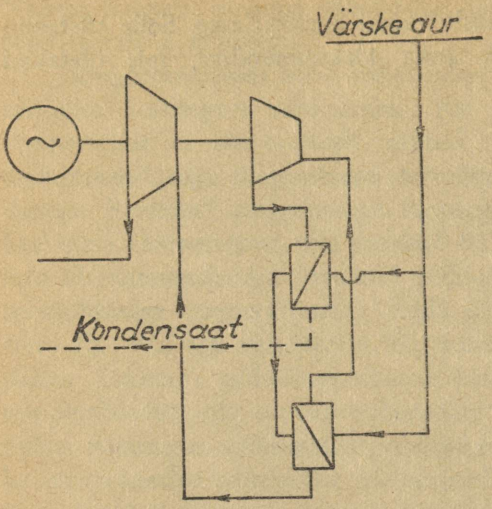


Joon. 85.

10° kuni 20° C võrra kondenseeruva värske auru kondenseerumistemperatuuri.

4. Sekundaarauru ülekuumendamine teostatakse osalt läbivoolava värske ja osalt kondenseeruva värske auruga. Selles ülekuumendamissüsteemis on tavaliselt kaks soojusevahetusaparaati, millede läbi juhitakse sekundaar-, s. o. ülekuumendatav aur. Esimene neist töötab värske kondenseeruva auruga ja teine turbiini toitva värske läbivoolava auruga. See ülekuumendusskeem on esitatud joonisel 86. Selle süsteemiga on võimalik saavutada sekundaarauru ülekuumendusi 400° kuni 420° C.

5. Vahepealne ülekuumendamine teostatakse iseseisva soojusvahetusagendiga, s. o. soojusekandjaga. Selles süsteemis töötab soojusvahetusapa-



Joon. 86.

raat iseseisva soojusvahetusagendiga, mis saab soojuse suitsugaasidega köetavast soojusvahetusaparaadist ja annab selle edasi sekundaaraurule vastavas aurukuumendajas. Soojusvahetusagendina kasutatakse difenüüloksüüdi, elavhõbedat jne. Need ained omavad kõrget kondenseerumistemperatuuri madalatel rõhkudel, millega vähenevad tugevusnõuded aparaatide suhtes jne.

Näide. Arvutada *i-s*-diagrammil (joon. 87) antud Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur ühe- ning kahekordse vahepealse ülekuumendusega ringprotsessi jaoks.

Ülekuumendatud auruga ringprotsessi kasutegur on

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_a}{i_1 - t} = \frac{774 - 454}{774 - 24} =$$

$$= 0{,}427.$$

Ühekordse vahepealse ülekuumenduse korral

$$\eta_R = \frac{i_1 + i_3 - i_2 - i_n}{i_1 + i_3 - i_2 - t} =$$

$$= \frac{774 + 751 - 667 - 501}{774 + 751 - 667 - 24} =$$

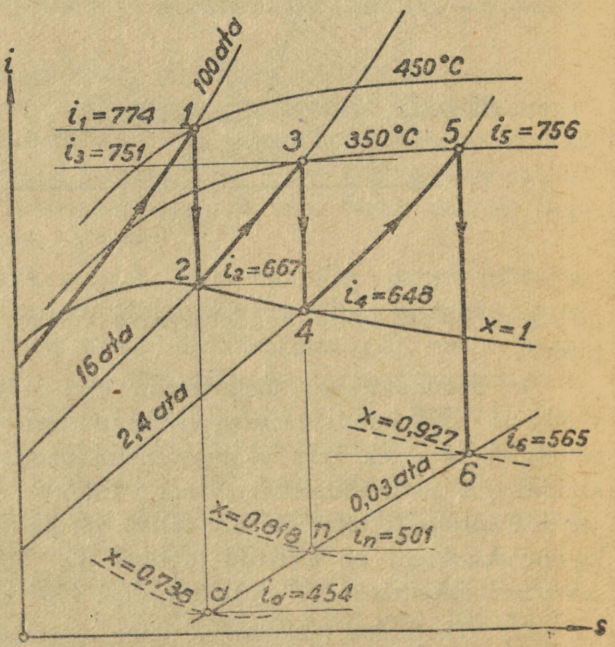
$$= 0{,}428$$

ja kahekordsel vahepealsel ülekuumendamisel

$$\eta_R = \frac{i_1 + i_3 + i_5 - i_2 - i_4 - i_6}{i_1 + i_3 + i_5 - i_2 - i_4 - t} =$$

$$= \frac{774 + 751 + 756 - 667 - 648 - 565}{774 + 751 + 756 - 667 - 648 - 24} =$$

$$= 0{,}426.$$



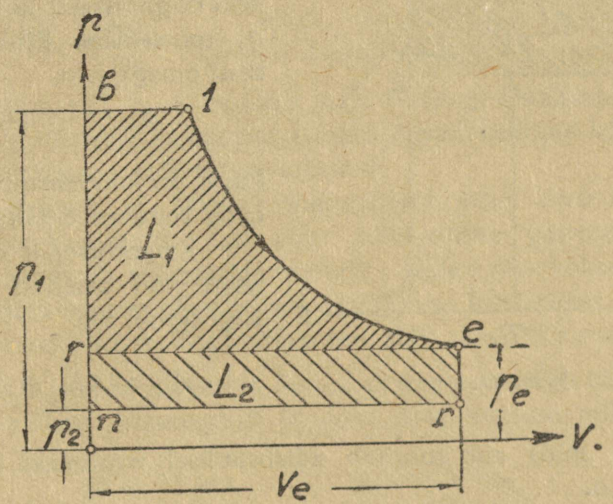
Joon. 87.

Näitest järgneb, et vahepealne ülekuumendus ei mõjuta antud juhul ringprotsessi termilist kasutegurit tähelepanuväärselt. Üldiselt on auru parameetrite sobival valikul vahepealse ülekuumendusega võimalik parandada ringprotsessi termilist kasutegurit kuni 6%.

26. MAYERI RINGPROTSESS.

Rankine'i ringprotsessis teostus auru adiabaatiline paisumine kondensatsioonseadmetes kuni rõhuni 0,04 ata ja isegi veel sügavama vaakuumini. Nii sügavate vaakuumide puhul auru maht suureneb mitmesajakordselt, võrreldes tema algmahuga. Näiteks ülekuumendatud auru puhul, mille rõhk on 40 ata ja temperatuur 480° C, suureneb auru maht paisumisel kuni rõhuni 0,04 ata $29{,}0774 : 0{,}855 = 308$ korda.

Kolbaurumasinates pole nii suur paisumisaste tegelikult kasutatav, sest see nõuaks madalrõhusilindrite liiga suuri läbimõõte ja pikka kolvikäiku, mis konstruktiivsetel ja majanduslikel kaalutlustel pole õigustatud.



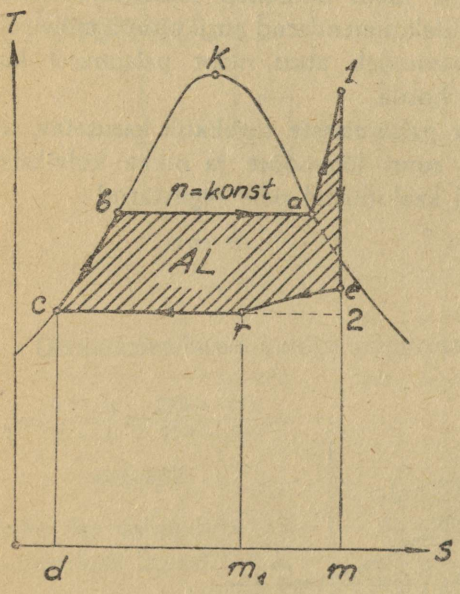
Joon. 88.

Neil asjaoludel lastakse kolbaurumasinates aurul adiabaatiliselt paisuda ainult kuni teatava rõhuni p_e (vt. joon. 88) ja pärast seda juhitakse töötanud aur kas atmosfääri (vedurid, lokomobiilid jne.) või kondensaatorisse, kus ta isohooriliselt jahtub kuni kondensaatoris valitseva rõhuni p_2 ning veeldub. Selle menetlusega Rankine'i ringprotsess on näidatud joonisel 88 kontuuriga *b1ern*. Selle kontuuriga määratud ringprotsessi nimetatakse

Mayeri ringprotsessiks ja ta esindab ideaalse kolbaurumasina ringprotsessi.

Järelikult erineb Mayeri ringprotsess Rankine'i ringprotsessist selle poolest, et aurul ei lasta aurumasinas paisuda kondensaatori rõhuni p_2, vaid ainult rõhuni p_e, millele järgneb auru isohooriline jahtumine *er* kuni kondensaatori rõhuni p_2. Ringprotsessi edasine käik on samane Rankine'i ringprotsessiga.

T-s-diagrammil on Mayeri ringprotsess esitatud joonisel 89 ja ta avaldub kontuuriga *ba1erc*, kus protsessi element *er* on auru isohooriline jahtumine.



Joon. 89.

T-s-diagrammilt nähtub, et Mayeri ringprotsessis sooritatud tehniline töö *AL* on pindala *r2e* võrra väiksem Rankine'i ringprotsessi omast, sest Rankine'i ringprotsessi kujutab pindala *ba12c*.

Mayeri ringprotsessi teostamiseks ringprotsessi juhitud soojushulk q_1 on samane Rankine'i ringprotsessi omaga, s. o.

$$q_1 = i_1 - i_2' \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

kus i_2' on kondenseerunud auru, s. o. katla toitevee entalpia.

Ringprotsessis sooritatud tehniline töö avaldub *p-v*-diagrammi järgi (joon. 88)

$$AL = AL_1 + AL_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

AL_1 on töö, mida aur sooritab adiabaatilisel paisumisel rõhult p_1 kuni rõhuni p_e, s. o.

$$AL_1 = i_1 - i_e.$$

AL_2 esindab ristküliku *rern* (joon. 88) kaudu määratavat tööd ja avaldub võrrandiga

$$AL_2 = Av_e(p_e - p_2) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ringprotsessis sooritatud summaarne töö on

$$AL = i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (157)$$

Toodud võrrandite põhjal avaldub ringprotsessi termiline kasutegur, mille märgime tähisega η_M,

$$\eta_M = \frac{AL}{q_1} = \frac{i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2)}{i_1 - i_2'} \tag{158}$$

ehk

$$\eta_M = \frac{i_1 - i_e}{i_1 - i_2'} + \frac{v_e(p_e - p_2)}{427(i_1 - i_2')}. \tag{159}$$

Auru erikulu ühe hobujõud- ja kilovatt-tunni kohta on:

$$d = \frac{632}{AL} = \frac{632}{i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2)} \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}}, \tag{160}$$

$$d_W = \frac{860}{i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2)} \ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}. \tag{161}$$

Soojuse erikulu avaldub

$$W = \frac{632}{\eta_M} = \frac{632(i_1 - i_2')}{i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2)} \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}, \tag{162}$$

$$W_W = \frac{860}{\eta_M} = \frac{860(i_1 - i_2')}{i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2)} \ \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}. \tag{163}$$

Võrrandites $i_2' = t$, s. o. avaldab katla toitevee entalpiat.

Mayeri ringprotsessi kasuteguri suhtes jäävad kehtima kõik Rankine'i ringprotsessi kasutegurit mõjutavad asjaolud.

Toodust järgneb, et Mayeri ringprotsessi, peale auru alg- ja lõpp-parameetrite, karakteriseerib veel auru adiabaatilise paisumise lõpprõhk aurumasinas, mis sõltub aurumasina tüübist. Sellest seisukohast lähtudes on õige aurumasinates soojuse kasutamise täielikkuse kriteeriumi aluseks võtta Rankine'i ringprotsess, mis on karakteriseeritav auru alg- ja lõpp-parameetritega.

Näide: Arvutada Mayeri ja Rankine'i ringprotsessiga töötava ideaalse aurumasina termilised kasutegurid ja auru ning soojuse erikulud, kui on antud:

$p_1 = 25$ ata, $\quad p_e = 1{,}4$ ata,
$t_1 = 450°$ C, $\quad p_2 = 0{,}10$ ata.

i-s-diagrammilt (joon. 31) leiame, et

$i_1 = 799$ kcal/kg, $\quad x_e = 0{,}978$,
$i_e = 635$ kcal/kg, $\quad v_e'' = 1{,}259$ m³/kg,
$i_2 = 542$ kcal/kg, $\quad i_2'' = 45{,}4$ kcal/kg.

Aurumaht adiabaatilise paisumise lõpul on

$$v_e = v_e'' x_e = 1{,}259 \cdot 0{,}978 = 1{,}23 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Mayeri ja Rankine'i ringprotsessi termilised kasutegurid on

$$\eta_M = \frac{i_1 - i_e}{i_1 - i_2'} + \frac{v_e(p_e - p_2)}{427\,(i_1 - i_2')} = \frac{799 - 635}{799 - 45{,}4} +$$

$$+ \frac{1{,}23\,(1{,}4 - 0{,}1)\cdot 10^4}{427\,(799 - 45{,}4)} = 0{,}267\,,$$

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{799 - 542}{799 - 45{,}4} = 0{,}341\,.$$

Auru ja soojuse erikulud on

$$d_{Mayer} = \frac{632}{i_1 - i_e + Av_e(p_e - p_2)} = \frac{632}{(799 - 635) + \frac{(1{,}4 - 0{,}1)\cdot 10^4}{427}\cdot 1{,}23} =$$

$$= 3{,}14 \text{ kg/HJh},$$

$$d_{Rankine} = \frac{632}{i_1 - i_2} = \frac{632}{799 - 542} = 2{,}46 \text{ kg/HJh},$$

$$W_{Mayer} = \frac{632}{\eta_M} = \frac{632}{0{,}267} = 2367 \text{ kcal/HJh},$$

$$W_{Rankine} = \frac{632}{\eta_R} = \frac{632}{0{,}341} = 1853 \text{ kcal/HJh}.$$

Järelikult on antud juhul Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur parem

$$\frac{0{,}341 - 0{,}267}{0{,}267}\,100 = 27{,}7\,\%\,.$$

27. REGENERATIIVNE RINGPROTSESS.

Eespooltoodust selgus, et aurujõuseadme termilist kasutegurit on võimalik parandada auru ülekuumendamisega, aurustumise rõhu tõstmisega ja adiabaatilise paisumise lõpprõhu vähendamisega, s. o. vaakuumi süvendamisega kondensaatoris. Peale nende mooduste saab aurujõuseadme ringprotsessi termilist kasutegurit tõsta, kui katla toitevee kuumendamine teostada regeneratiivse menetluse järgi. Sel põhimõttel töötavat aurujõuseadme ringprotsessi nimetatakse regeneratiivseks ringprotsessiks.

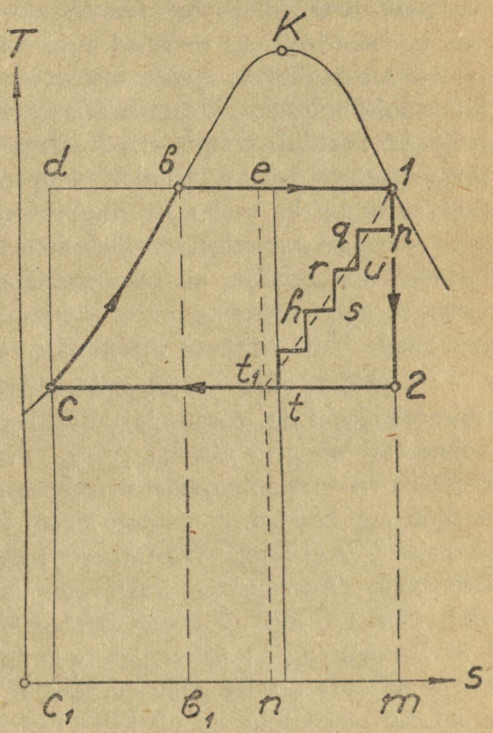
Täies ulatuses pole regeneratiivne menetlus aurujõuseadmes realiseeritav, kuid teataval määral saab auruturbiiniga töötava jõuseadme ringprotsessi vee kuumendamise osas lähendada teoreetilisele regeneratiivsele ringprotsessile.

Selguse mõttes vaatleme esiteks teoreetilist võimalust Rankine'i ringprotsessi muutmiseks täielikuks regeneratiivseks ringprotsessiks. Teoreetiliselt

osutub see võimalikuks, kui ringprotsess toimub niiske või kuiva küllastunud auruga.

Rankine'i ringprotsessi muutmiseks regeneratiivseks ringprotsessiks („karnotiseerimiseks") peame osa auru soojusest adiabaatilisel paisumis-perioodil kasutama katla toitevee, s. o. kondensaadi astmeliseks eelkuumendamiseks regeneraatorites enne katlasse saatmist.

Selleks asendame Rankine'i ringprotsessis auru adiabaatilise paisumise protsessi *12* astmeliselt adiabaatiliste ja isotermiliste protsessidega, nagu on näidatud joonisel 90 esitatud *T-s*-diagrammil murdjoonega *1pqursht*, mille keskjoon $1t_1$ on ekvidistantne *s*-telje suunas alumise piirkõvera lõiguga *cb*.



Joon. 90.

Ringprotsessi murdjoone-osa saab teostada järgnevalt:

Värskel aurul laseme turbiinis paisuda kuni isobaar-isotermini *pq*. Seejärel juhime auru turbiinist esimesse regeneraatorisse, kus ta annab isobaari *pq* rõhul ära osa oma aurustumissoojusest. Protsessi seda osa kujutab isobaar-isotermi lõik *pq*. Regeneraatorist juhime auru tagasi turbiini järgmisse astmesse ja laseme paisuda mööda adiabaati *qu* kuni isobaar-isotermini *ur*. Seejärel juhime auru teise madalama temperatuuriga regeneraatorisse, kus aur isobaari *ur* rõhul annab uuesti osa oma soojusest katla toiteveele, kondenseerudes ise mööda isobaari *ur* kuni punktini *r*. Seejärel voolab aur tagasi turbiini kolmandasse astmesse ja paisub seal mööda adiabaati *rs* kuni isobaar-isotermini *sh* jne. Läbides nii kõik regeneraatorid ja turbiini astmed, saavutab aur lõpuks kondensaatori rõhu, seejuures lõplikult veeldudes. Saadud kondensaat saadetakse pumbaga uuesti läbi regeneraatorite katlasse jne.

Säärases protsessis on regeneraatorite kuumenduspinnad valitud nii suurtena, et igas regeneraatoris annab aur katla toiteveele küllalt soojust toitevee temperatuuri tõstmiseks regeneraatorit läbiva auru rõhule vastava

vee aurustumistemperatuurini. Järelikult määrab igast regeneraatorist väljuva toitevee temperatuuri regeneraatorit läbiva auru rõhk.

Jooniselt 90 nähtub, et mida suurem on regeneraatorite arv, seda enam läheneb kirjeldatud ringprotsess regeneratiivsele ringprotsessile. Suurendades regeneraatorite arvu lõpmatuseni, muutub murdjoon alumise piirkõvera lõiguga *cb* ekvidistantseks kõveraks, millega ühes ka ringprotsess ise muutub täielikuks regeneratiivseks ringprotsessiks $b1t_1c$, sest katla toitevee kuumendamiseks tarbitud auru soojus, mis väljendub pindalaga $nt_1 1m$, on võrdne pindalaga $c_1 cbb_1$ määratud katla toitevee kuumendamiseks vajaliku soojushulgaga. Ringprotsessis mehhaaniliseks tööks muutunud soojushulk AL avaldub sel puhul pindalaga $cb1t_1$, mis on võrdne regeneratiivsele ringprotsessile vastava Carnot' ringprotsessi $cdet_1$ kasuliku töö pindalaga; selle tõttu on ka mõlemate ringprotsesside termilised kasutegurid võrdsed.

Toodust on selge, et ülekuumendatud auruga toimuva ringprotsessi termilist kasutegurit ei saa regeneratiivse menetlusega muuta võrdseks Carnot' ringprotsessi termilise kasuteguriga. Teda saab vaid teataval määral parandada katla toitevee regeneratiivse eelkuumendamisega.

Tegelikus olukorras on eelkirjeldatud regeneratiivsusastmete arv piiratud puht-tehnilistel ja soojusmajanduslikel põhjustel; sõltuvalt aurujõuseadme võimsusest on neid üks kuni viis. Peale selle ei saa tegelikus olukorras teostada ka eespoolkirjeldatud regenereerimismoodust, sest sel menetlusviisil niiskub aur niivõrd, et ta pole enam kasutatav ei auruturbiinis ega aurumasinas. Tegelikult teostatakse regeneratiivne protsess aurujõuseadmes järgnevalt. Auruturbiini vastavatest astmetest eraldatakse teatav osa nn. vaheltauru, mis juhitakse vastavatesse regeneraatoritesse, kus aur täielikult kondenseerub; siis voolab ta kondensaadina edasi kondensaadikogujasse. Ülejäänud osa aurust läbib turbiini tavalises järjekorras. Turbiini astmest eraldatav aurukogus on nii kalkuleeritud, et selle aurustumissoojusest jätkub vastavat regeneraatorit läbiva katlatoitevee temperatuuri tõstmiseks kuni regeneraatoris kondenseeruva auru kondensaadi temperatuurini [19]. Toitevee mitmeastmelise regenereerimise puhul valitakse auru rõhud sääraselt, et toitevee temperatuur tõuseb igas regeneraatoris võrdselt (keskmiselt 30° C võrra). Toodust järeldame, et tegelik regeneratiivne ringprotsess on vaid teatav lähendus teoreetilisele regeneratiivsele ringprotsessile, olles siiski suurema termilise kasuteguriga kui Rankine'i ringprotsess.

Regeneratiivne ringprotsess osutub soodsaks eriti katla kütmisel suuremal määral niiskust sisaldavate kütustega, sest siis saab suitsugaaside

[19] Tegelikult on regeneraatorist väljuva toitevee temperatuur 4—7° C madalam regeneraatoris kondenseeruva auru kondensaadi temperatuurist.

soojusega töötavat ökonomaiserit asendada katla kütteks tarvismineva õhu eelsoojendajaga.

Arvutame turbiini astmetest regeneraatoritesse saadetavad aurukogused turbiini voolava ühe kilogrammi auru kohta. Oletame, et soojuskaod seadmetes on võrdsed nulliga, et igast regeneraatorist väljuva katlatoitevee temperatuur on võrdne regeneraatoris kondenseeruva auru kondensaadi temperatuuriga ning et aur annab regeneraatoris ära kogu oma aurustumissoojuse.

Vaatleme kaht juhtu pinnaliste regeneraatoritega: esiteks, kui iga kõrgema temperatuuriga regeneraatorist väljuv kondensaat läbib järjestikku kõik madalama temperatuuriga regeneraatorid, ja teiseks, kui regeneraatorid töötavad rööpselt, s. o. kui igast regeneraatorist voolab kondensaat otse kondensaadi üldkogujasse [20].

Aurujõuseadme skeem vastavalt esimesele juhule on antud joonisel 91, kus tähistega on märgitud: A — aurukatel, $\ddot{U}$ — auru ülekuumendaja, T — turbiin, K — kondensaator, Q — kondensaadi kogunemisanum, I, II ja III — esimese, teise ning kolmanda astme regeneraatorid.

Võtame arvutamiseks skeemil antud tähised.

Turbiini voolava ühe kilogrammi auru suhtes on kehtiv võrdus

$$\alpha_{\mathrm{I}} + \alpha_{\mathrm{II}} + \alpha_{\mathrm{III}} + \alpha_2 = 1, \tag{164}$$

kus α_{I}, α_{II} ja α_{III} on turbiinist esimese, teise ja kolmanda astme regeneraatoritesse voolavad auru kaalulised kogused ja α_2 turbiini kõiki astmeid läbiv auru kaaluline kogus, arvatuna ühe kilogrammi turbiini voolava auru kohta.

Jooniselt selgub, et esimese regeneraatori jaoks tehtud oletuse kohaselt võime soojusbilansi kirjutada:

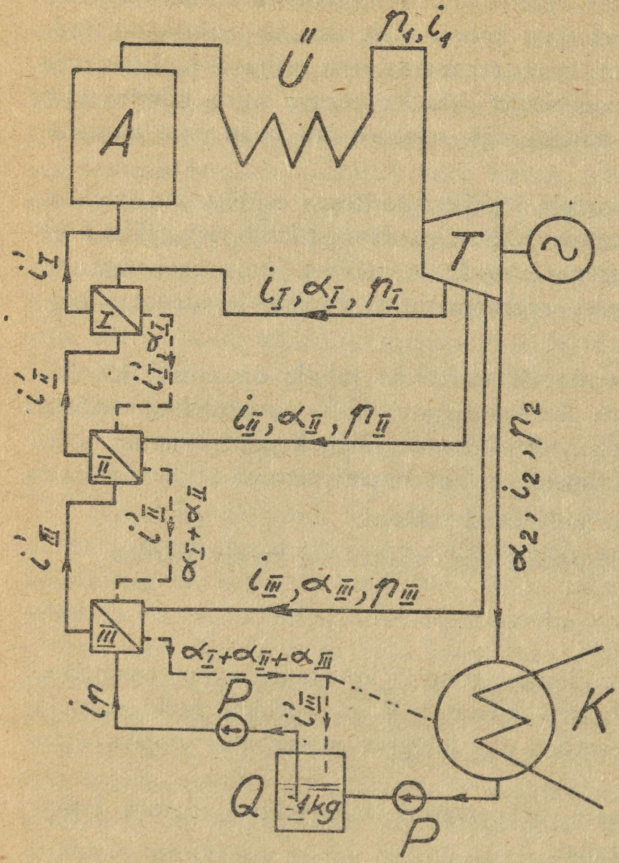
$$i'_{\mathrm{I}} - i'_{\mathrm{II}} = (i_{\mathrm{I}} - i''_{\mathrm{I}})\,\alpha_{\mathrm{I}},$$

$$\alpha_{\mathrm{I}} = \frac{i'_{\mathrm{I}} - i'_{\mathrm{II}}}{i_{\mathrm{I}} - i''_{\mathrm{I}}} \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kg}}, \tag{165}$$

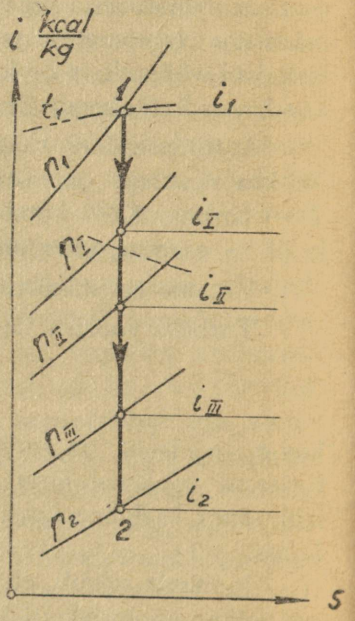
kus i_{I} on turbiinist esimesse regeneraatorisse juhitava auru entalpia [kcal/kg], mille väärtuse leiame i-s-diagrammilt rõhu p_{I} järgi, nagu on näidatud joonisel 92 esitatud i-s-diagrammil. i''_{I} on esimesest regeneraatorist väljuva katlatoitevee entalpia, mis on võrdne regeneraatoris kondenseeruva auru

[20] Juhul, kui üldkogujas rõhk on kõrge, juhitakse viimase regeneraatori kondensaat kondensaatorisse. Sama on kehtiv ka esimesel juhul.

kondensaadi entalpiaga. Entalpia selle väärtuse leiame kuiva küllastunud auru tabelist rõhu p_I järgi. i_{II}' on esimesse regeneraatorisse voolava ja teisest regeneraatorist väljuva katlatoitevee entalpia, mille leiame kuiva küllastunud auru tabelist rõhu p_{II} järgi.



Joon. 91.



Joon. 92.

Teise regeneraatori soojusbilanss on:

$$i_{II}' - i_{III}' = \alpha_{II}\,(i_{II} - i_{II}'') + \alpha_I (i_I' - i_{II}''),$$

kus liige $\alpha_{II}(i_{II} - i_{II}'')$ on teise vaheltauru kondenseerumissoojus ja $\alpha_I(i_I' - i_{II}'')$ – esimese regeneraatori kondensaadi poolt teises regeneraatoris katla toiteveele ülekantud soojushulk. Ilmutades võrrandi α_{II} suhtes saame:

$$\alpha_{II} = \frac{(i_{II} - i_{III}') - \alpha_I (i_I' - i_{II}'')}{i_{II} - i_{II}''} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \qquad (166)$$

Selles võrrandis on i_{II} teise regeneraatorisse voolava auru entalpia, mille leiame *i-s*-diagrammilt rõhu p_{II} järgi punktis, kus turbiinis toimuva adiabaatilise paisumise joon lõikub p_{II} isobaariga.

i'_{III} on kolmandast regeneraatorist väljuva katlatoitevee entalpia, mis on võrdne regeneraatoris kondenseeruva auru kondensaadi entalpiaga. Entalpia i'_{III} väärtuse leiame kuiva küllastunud auru tabelist rõhu p_{III} järgi.

Kolmanda regeneraatori (III) soojusbilanss väljendub võrrandiga

$$i''_{III} - i_p = \alpha_{III}(i_{III} - i'_{III}) + (\alpha_I + \alpha_{II})(i''_{II} - i'_{III}). \qquad (a)$$

See võrrand sisaldab kahte tundmatut α_{III} ja i_p. Teise võrrandi saame kondensaadi bilansi kaudu, s. o,

$$i_p = (\alpha_I + \alpha_{II} + \alpha_{III})i'_{III} + (1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III})i'_2. \qquad (b)$$

Lahendades võrrandite (a) ja (b) süsteemi, leiame, et

$$\alpha_{III} = \frac{i''_{III} - i_2 - (\alpha_I + \alpha_{II})(i''_{II} - i'_2)}{i_{III} - i'_2} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \qquad (167)$$

Võrrandites on i'_2 kondensaadi entalpia kondensaatoris ja i_p — katla toitevee entalpia enne regeneraatorseadmesse voolamist.

Joonisel 93 on antud aurujõuseadme skeem vastavalt teisele juhule. Analoogiliselt esimesele juhule võime kirjutada, et

$$\alpha_I + \alpha_{II} + \alpha_{III} + \alpha_2 = 1.$$

Soojusbilanss esimese regeneraatori kohta on:

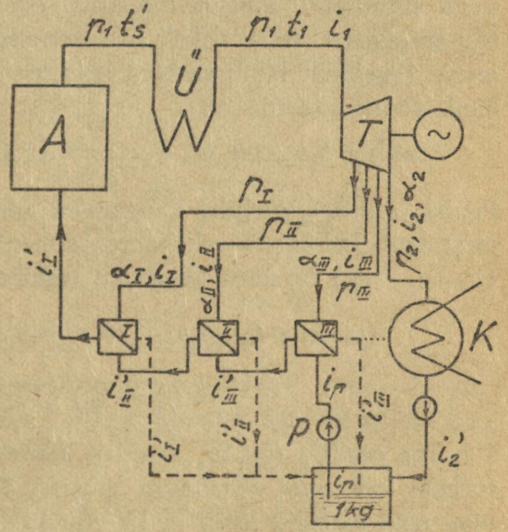
$$(i_I - i'_I)\alpha_I = i'_I - i''_{II},$$

$$\alpha_I = \frac{i'_I - i''_{II}}{i_I - i'_I} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}.$$

Teise regeneraatori soojusbilanss väljendub kujul:

$$(i_{II} - i'_{II})\alpha_{II} = i''_{II} - i''_{III},$$

$$\alpha_{II} = \frac{i''_{II} - i''_{III}}{i_{II} - i'_{II}} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}.$$



Joon. 93.

Soojusbilansi kolmanda regeneraatori jaoks võime kirjutada kujul

$$(i_{III} - i'_{III})\alpha_{III} = i''_{III} - i_p, \qquad (a)$$

kus i_p on kondensaadi entalpia kondensanumas. Entalpia i_p väärtuse arvutame võrrandiga

$$i_p = i'_I\alpha_I + i'_{II}\alpha_{II} + i'_{III}\alpha_{III} + i'_2(1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III}). \qquad (b)$$

Lahendades võrrandite (a) ja (b) süsteemi, saame α_{III} arvutamiseks võrrandi

$$\alpha_{III} = \frac{i'_{III} - i'_2 - \alpha_I(i'_I - i'_2) - \alpha_{II}(i'_{II} - i'_2)}{i_{III} - i'_2} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \qquad (168)$$

Teades auru kaaluliste koguste α_I, α_{II}, α_{III} ja α_2 väärtusi, on võimalik arvutada ringprotsessis kasulikuks tööks muutuvat soojushulka AL, mis joonise 92 põhjal avaldub võrrandiga

$$AL = (i_1 - i_1) + (i_I - i_{II})(1 - \alpha_I) + (i_{II} - i_{III})(1 - \alpha_I - \alpha_{II}) + \\ + (i_{III} - i_2)\alpha_2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \qquad (169)$$

Sama selgub ka joonisel 94 esitatud T-s-diagrammilt. Sellel diagrammil

$$\text{pindala } b_1 ba1na_1 = AL_1 = i_1 - i_1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

avaldab ühe kilogrammi auru adiabaatilist tööd turbiinis kuni esimese vaheltauru võtmiseni. Pindala $b_2b_1a_1nn_1$ on ühe kilogrammi auru adiabaatiline töö turbiinis esimese vaheltauru võtmise astmest kuni teise vaheltauru astmeni. Tegelikult läbib turbiini neid astmeid $(1 - \alpha_I)$ kg auru, mistõttu tegelikult sooritatud töö on

$$(\text{pindala } b_2b_1a_2nn_1)(1 - \alpha_I) = AL_I(1 - \alpha_I) = (i_I - i_{II})(1 - \alpha_I) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Pindala $b_2n_1n_2b_3$ on ühe kilogrammi auru töö turbiini teise vaheltauru astmest kuni kolmanda vaheltauru astmeni. Turbiini seda osa läbib tegelikult $(1 - \alpha_I - \alpha_{II})$ kg auru, seega on tegelik töö

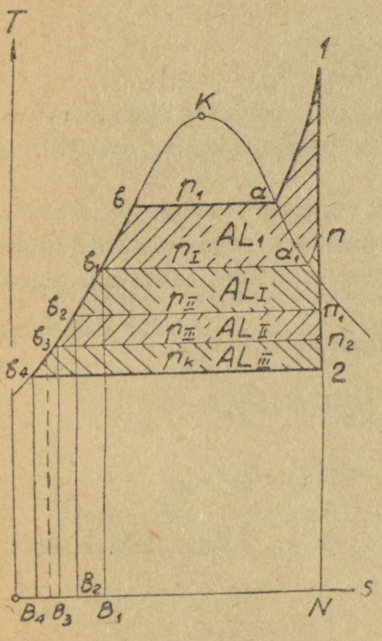
$$(\text{pindala } b_2n_1n_2b_3)(1 - \alpha_I - \alpha_{II}) = AL_{II}(1 - \alpha_I - \alpha_{II}) = \\ = (i_{II} - i_{III})(1 - \alpha_I - \alpha_{II}) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Viimane pindala $b_3n_22b_4$ avaldab ühe kilogrammi auru adiabaatilist tööd turbiini kolmanda vaheltauru astmest kuni paisumisprotsessi lõpuni. Turbiini neid astmeid läbib α_2 kg ehk $(1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III})$ kg auru. Selle aurukoguse poolt sooritatud töö turbiinis on

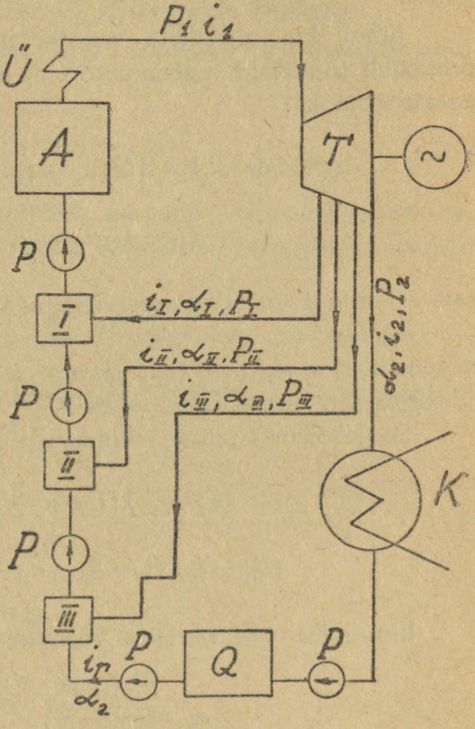
$$(\text{pindala } b_3n_22b_4)(1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III}) = AL_{III}(1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III}) = \\ = (i_{III} - i_2)(1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III}) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Nende tööde summa annabki turbiini summaarse töö, mis on avaldatud võrrandiga (169).

Selles ringprotsessis regeneraatorite kaudu katla toiteveele ülekantud soojushulk avaldub pindalaga $B_4b_4b_1B_1$. Pindalad $B_2b_2b_1B_1$, $B_3b_3b_2B_2$, $B_4b_4b_3B_3$ on I, II ja III regeneraatori poolt katla toiteveele ülekantud soojushulgad.



Joon. 94.



Joon. 95.

Kasutades T-s-diagrammi, saame koostada üksikute regeneraatorite jaoks soojusbilansi võrrandid. Näiteks I regeneraatorile kui jahutajale ringprotsessist b_1ba1na_1 ülekantud soojushulk on

$$(\text{pindala } B_1b_1a_1nN)\alpha_1 = (i_1 - i_1')\alpha_1.$$

Teisest küljest on sama soojushulk võrdne vee kuumendumisprotsessi b_2b_1 soojushulgaga, mis avaldub

$$\text{pindala } B_2b_2b_1B_1 = i_I' - i_{II}'.$$

Järelikult $$(i_I - i'_I)\alpha_I = i'_I - i'_{II},$$

$$\alpha_I = \frac{i'_I - i'_{II}}{i_I - i'_I} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}.$$

Analoogiliselt on koostatavad bilansivõrrandid ka teiste regeneraatorite kohta.

Juhul, kui pinnaliste regeneraatorite asemel kasutatakse segunemise printsiibil töötavaid regeneraatoreid, on soojusbilansi võrrand esimese regeneraatori jaoks:

$$(\text{pindala } B_1 b_1 a_1 n N)\alpha_I = (\text{pindala } B_2 b_2 b_1 B_1)(1 - \alpha_I),$$

$$(i_I - i'_I)\alpha_I = (i'_I - i'_{II})(1 - \alpha_I),$$

sest sel puhul voolab teisest regeneraatorist esimesse regeneraatorisse ainult $(1 - \alpha_I)$ kg vett, aga mitte 1 kg, nagu pinnaliste regeneraatorite puhul. Regeneratiivse ringprotsessi skeem segunemise printsiibil töötavate regeneraatoritega on esitatud joonisel 95.

Soojusbilanss teise ja kolmanda regeneraatori kohta on

$$(i'_{II} - i'_{III})(1 - \alpha_I - \alpha_{II}) = (i_{II} - i'_{II})\alpha_{II},$$

$$(i'_{III} - i_p)(1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III}) = (i_{III} - i'_{III})\alpha_{III}.$$

Ilmutades soojusbilansi võrrandid α_I, α_{II} ja α_{III} suhtes, leiame, et

$$\alpha_I = \frac{i'_I - i'_{II}}{i_I - i'_{II}},$$

$$\alpha_{II} = \frac{(i'_{II} - i'_{III})(1 - \alpha_I)}{i_{II} - i'_{III}},$$

$$\alpha_{III} = \frac{(i'_{III} - i_p)(1 - \alpha_I - \alpha_{II})}{i_{III} - i_p}.$$

Neis võrrandeis i'_I, i'_{II} ja i'_{III} on I-sest, II-sest ja III-dast regeneraatorist väljuva katlatoitevee entalpia ehk esimese, teise ja kolmanda vaheltauru kondensaadi entalpia väärtused. α_2 leiame võrdusest (164), s. o.

$$\alpha_2 = 1 - (\alpha_I + \alpha_{II} + \alpha_{III}).$$

Kui soojustehnilisest seisukohast võrrelda pinnalisi ja segunemis-printsiibil töötavaid regeneraatoreid, on segunemis-printsiibil töötavad regeneraatorid eelistatavamad, sest soojuse ülekandmiseks vaheltaurult katla toiteveele ei esine nendes tegelikus olukorras temperatuuri langust.

Pinnaliste regeneraatorite puhul on vajalik soojuse ülekandmiseks vaheltaurult katla toiteveele, sõltuvalt regeneraatori soojuse ülekandepinna suurusest, temperatuuri diferents 4° kuni 7° C või isegi rohkem.

Regeneratiivsesse ringprotsessi juhitud soojushulk q_1 avaldub pindalaga

$$q_1 = B_1 b_1 ba1N = i_1 - i'_I,$$

kus i'_I on katla toitevee entalpia väljumisel esimesest regeneraatorist, sest vee kuumendamiseks regeneraatorite kaudu ülekantud soojushulka avaldab

$$\text{pindala } B_4 b_4 b_1 B_1 = i'_I - i'_2.$$

Märkides ringprotsessi termilise kasuteguri tähisega η_{Rg} võime ta eespooltoodu põhjal avaldada võrrandiga

$$\eta_{Rg} = \frac{AL}{q_1} = \frac{i_1 - i_I + (i_I - i_{II})(1 - \alpha_I) + (i_{II} - i_{III})(1 - \alpha_I - \alpha_{II}) + (i_{III} - i_2)\alpha_2}{i_1 - i'_I}. \quad (170)$$

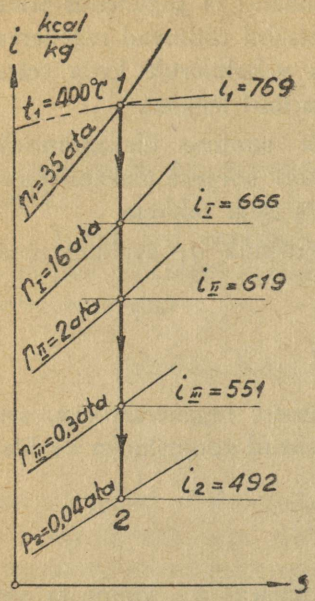
Auru erikulu võrrandid avalduvad

$$d = \frac{632}{AL} \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$

$$d_W = \frac{860}{AL} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}.$$

Regeneratiivse ringprotsessi ökonoomsus sõltub katla toitevee temperatuurist, regeneraatorite arvust ja värske auru parameetritest. Värske auru parameetritele vastab alati teatav optimaalne toitevee temperatuur, mille puhul antud regeneraatorite arvu korral on ringprotsessi termiline kasutegur maksimaalne.

Järelikult regeneratiivse ringprotsessi puhul regeneraatorite arvu suurendamisel ringprotsessi termiline kasutegur üldiselt suureneb. Tegelikult on regeneraatorite arv piiratud, sest regeneraatorite arvu



Joon. 96.

suurendamisega muutub jõuseade liiga tülikaks ja peale selle tõuseb ka seadme hind, mis ei tasu end majanduslikult. Nii näiteks kuni võimsuseni 2000 kW kasutatakse toitevee üheastmelist regenereerimist ja võimsuste puhul üle 50 000 kW kuni 5 regenereerimisastet. Üldiselt on regeneratiivse menetlusega võimalik jõuseadme kasutegurit suurendada kuni 9 %.

Kõigi eespoolkirjeldatud menetluste kombinatsioonidega on praegusaja moodsate soojuselektri-jõujaamade kasutegur tõstetud kuni 0,32—0,33-ni.

Regeneratiivse ringprotsessiga töötava auruturbiini aurukulu tunnis on suurem kui Rankine'i ringprotsessil, kuid kogu jõuseadme termiline kasutegur on selle eest suurem Rankine'i omast, nagu see selgub alljärgnevast näitest.

Näide. Värske auru parameetrid on $p_1 = 35$ ata, $t_1 = 400°$ C. Arvutame kolmeastmelise regeneraatiivse ringprotsessi esimese skeemi järgi, kui kondensaatori rõhk on 0,04 ata.

Valime $p_I = 6$ ata, $p_{II} = 2$ ata ja $p_{III} = 0{,}3$ ata.

Küllastunud veeauru tabelist leiame, et

$$i'_I = 159,\ i'_{II} = 120,\ i'_{III} = 69 \text{ ja } i'_2 = 29 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Entalpia teised väärtused on antud joonisel 96 esitatud *i-s*-diagrammil.

$$\alpha_I = \frac{i''_I - i''_{II}}{i_I - i'_I} = \frac{159 - 120}{666 - 159} = 0{,}077 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

$$\alpha_{II} = \frac{i''_{II} - i''_{III} - \alpha_I (i'_I - i''_{II})}{i_{II} - i''_{II}} = \frac{120 - 69 - 0{,}077\,(159 - 120)}{619 - 120} = 0{,}096 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

$$\alpha_{III} = \frac{i''_{III} - i'_2 - (\alpha_I + \alpha_{II})(i''_{II} - i'_2)}{i_{III} - i'_2} =$$

$$= \frac{69 - 29 - (0{,}077 + 0{,}096)(120 - 29)}{551 - 29} = 0{,}046 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_I - \alpha_{II} - \alpha_{III} = 0{,}781,$$

$$AL = (i_1 - i_1) + (i_1 - i_{II})(1 - \alpha_1) + (i_{II} - i_{III})(1 - \alpha_1 - \alpha_{II}) + (i_{III} - i_2)\alpha_2 =$$
$$= (769 - 666) + (666 - 619)(1 - 0{,}077) + (619 - 551)(1 - 0{,}077 - 0{,}096) +$$
$$+ (551 - 492) \cdot 0{,}781 = 248{,}7 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$
$$\eta_{Rg} = \frac{AL}{i_1 - i_1'} = \frac{248{,}7}{769 - 159} = 0{,}41.$$

Auru ja soojuse erikulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$d = \frac{632{,}3}{AL} = \frac{632{,}3}{248{,}7} = 2{,}54 \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$
$$W = \frac{632{,}3}{\eta_{Rg}} = \frac{632{,}3}{0{,}41} = 1542 \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}.$$

Rankine'i ringprotsessi kasutegur on

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{769 - 492}{769 - 29} = 0{,}37$$

ja auru ning soojuse erikulu

$$d = \frac{632{,}3}{AL} = \frac{632{,}3}{277} = 2{,}28 \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$
$$W = \frac{632{,}3}{0{,}37} = 1709 \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}.$$

Carnot' ringprotsessi puhul oleks termiline kasutegur

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{371}{673} = 0{,}55.$$

Teise skeemi puhul saame

$$\alpha_1 = \frac{i_1' - i_{II}'}{i_1 - i_1'} = \frac{159 - 120}{666 - 159} = 0{,}077 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$
$$\alpha_{II} = \frac{i_{II}' - i_{III}'}{i_{II} - i_{II}'} = \frac{120 - 69}{619 - 120} = 0{,}102 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$
$$\alpha_{III} = \frac{i_{III}' - i_2'' - \alpha_1(i_1' - i_2'') - \alpha_{II}(i_{II}' - i_2'')}{i_{III} - i_2'} =$$
$$= \frac{69 - 29 - 0{,}077(159 - 29) - 0{,}102(120 - 29)}{551 - 29} = 0{,}040 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$
$$\alpha_2 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_{II} + \alpha_{III}) = 1 - 0{,}219 = 0{,}781 \ \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$
$$AL = (769 - 666) + (666 - 619)(1 - 0{,}077) + (619 - 551)(1 - 0{,}07 - 0{,}102) +$$
$$+ (551 - 492) \cdot 0{,}781 = 248{,}3 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Näitest järgneb, et ringprotsessid mõlemate skeemide järgi on soojustehniliselt samaväärsed.

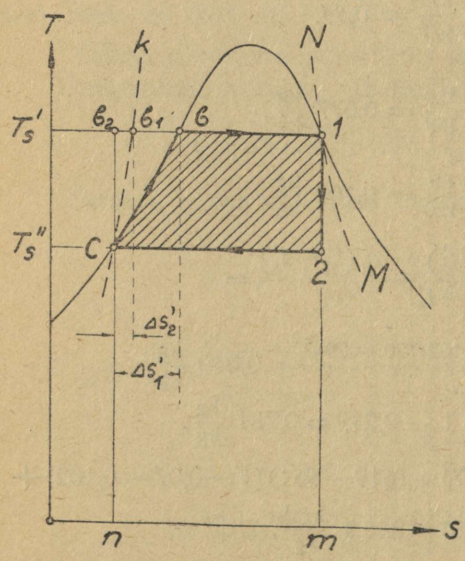
28. BINAARNE RINGPROTSESS.

Eespooltoodud ringprotsessides veeauruga käsitleti kaasaegse tehnika põhimenetlusviise, mis võimaldasid tõsta veeauruga toimuva ringprotsessi termilist ja termodünaamilist kasutegurit. Tekib küsimus, kas termodünaamiliste ringprotsesside termilist ja termodünaamilist kasutegurit on võimalik tõsta töötava keha valikuga. Carnot' ringprotsessi suhtes on selge, et selle ringprotsessi termiline kasutegur ei sõltu töötavast kehast [21], kuid näiteks Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur on üldiselt sõltuv töötava keha füüsikalistest omadustest.

Eespooltoodust on selge, et Rankine'i ringprotsessis saab termilist kasutegurit tõsta, kui töötavaks kehaks valida aine, mis omab kõrget kriitilist temperatuuri ja mille erisoojus vedelas faasis on väiksem vee erisoojusest. Sel puhul, nagu nähtub vedeliku kuumendamise entroopia muutuse võrrandist (vt. joon. 97)

$$\Delta s' = \int_{T''_s}^{T'_s} c\,\frac{dT}{T} = c \ln \frac{T'_s}{T''_s},$$

läheneb alumine piirkõver temperatuuriteljele, millega ühes suureneb niiske auru piirkonnas ringprotsessi kasuliku töö pindala.



Joon. 97.

Seda olukorda fikseerib joonisel 97 esitatud T-s-diagramm. Kontuuriga $b12c$ on joonisel märgitud Rankine'i ringprotsess kuiva küllastunud veeauruga ja kontuuriga $b_1 12c$ sama ringprotsess aine jaoks, mille erisoojus vedeliku kuumendamise osas on väiksem vee kuumendamise erisoojusest. Jooniselt nähtub, et teisel juhul on ringprotsessi kasulik töö suurem veeauruga toimuva ringprotsessi $b12c$ omast pindala cb_1b võrra, sest väiksemat vedeliku kuumendamise erisoojust omava aine alumise piirkõvera cb_1 tõus on märksa suurem vee omast. Soojustehnilisest seisukohast on tähtis, et ka ülemine piirkõver tegelike ringprotsesside piirkonnas kulgeks võimalikult

[21] Vt. J. Ivand, „Tehniline termodünaamika", I osa, ptk. XI, lk. 230.

suure tõusuga, sest sel puhul on adiabaatilisel paisumisel auru niiskumise protsent väike. See tingimus täitub teataval määral, kui aine aurustumissoojus ei sõltu kuigi suurel määral temperatuurist.

Säärase töötava keha puhul läheneb Rankine'i ringprotsessi kasuliku töö pindala *T-s*-diagrammil märksa rohkem Carnot' ringprotsessi pindalale kui veeauruga toimuva ringprotsessi oma.

Sellest seisukohast hinnatakse ringprotsessi täiuslikkust Carnot' ringprotsessi suhtes peale suhtelise termodünaamilise kasuteguri ka antud ringprotsessi kasuliku töö pindala suhtega samale ringprotsessile vastava Carnot' ringprotsessi kasuliku töö pindalaga. Seda suhet nimetatakse ringprotsess katteteguriks.

Loetletud tingimusi rahuldab kaunis hästi elavhõbe. Vedelas faasis on elavhõbeda erisoojus temperatuuril 100° C 0,03 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, seega ~ 33 korda väiksem kui veel. Aurustumissoojus rõhult 0,01 ata kuni 10 ata muutub 71,9 kuni 69,45 kcal/kg, nagu see nähtub VI tabelist. Elavhõbeda kriitilised parameetrid on:

$$p_k = 3300 \text{ at}, \quad \gamma_k = 4500 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$t_k = 1650° \text{ C}, \quad v_k = 0{,}000222 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

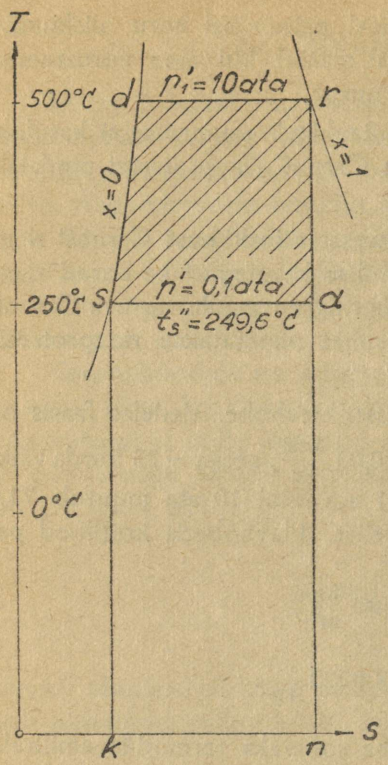
Loetletud omaduste tõttu on elavhõbe sobivaks termodünaamiliseks töötavaks kehaks ja on sellepärast võetud moodsates aurujõuseadmetes eksperimentaalse töötava kehana tarvitusele.

Arvestades elavhõbeda kõrget aurustumistemperatuuri, on seni jõuseadmetes piirdutud elavhõbedaauru rõhuga keskmiselt 6 kuni 10 ata, millele vastab aurustumistemperatuur 473° C kuni 515,5° C. Adiabaatilise paisumise optimaalseks lõpprõhuks on 0,1 ata. Sellele rõhule vastab temperatuur 249,6° C ≈ 250° C.

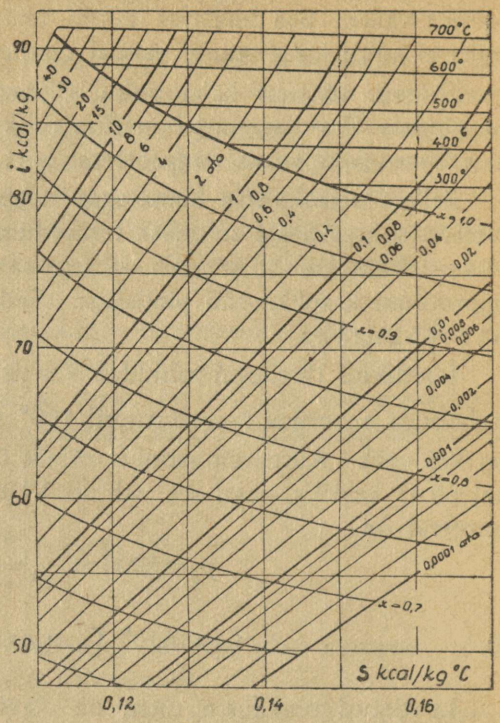
Selgitame, kui suur on elavhõbedaauruga töötava Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur, kui ringprotsess toimub kuiva küllastunud auruga, mille rõhk on 10 ata ja adiabaatilise paisumise lõpprõhk 0,1 ata.

$$\eta_R = \frac{i_{1Hg} - i_{2Hg}}{i_{1Hg} - i'_{2Hg}},$$

kus i_{1Hg} on kuiva küllastunud elavhõbedaauru entalpia ülemise piirkõvera punktis *r* (joon. 98) adiabaatilise paisumise alguses, i_{2Hg} — adiabaatilise paisumise lõpul punktis *a* ja i'_{2Hg} — kondenseerunud elavhõbeda entalpia alumise piirkõvera punktis *s*.



Joon. 98.



Joon. 99.

i-s-diagrammilt (joon. 99) ja VI tabelist leiame, et

$$i_{1Hg} = 86{,}7 \text{ kcal/kg}, \qquad T'_{sHg} = 788{,}7^\circ \text{ K},$$

$$i_{2Hg} = 62{,}2 \text{ kcal/kg}, \qquad t'_{sHg} = 515{,}5^\circ \text{ C},$$

$$i'_{2Hg} = 8{,}25 \text{ kcal/kg}, \qquad T''_{sHg} = 522{,}8^\circ \text{ K},$$

$$t''_{sHg} = 249{,}6^\circ \text{ C}.$$

Järelikult

$$\eta_R = \frac{86{,}7 - 62{,}2}{86{,}7 - 8{,}25} = 0{,}312.$$

Carnot' ringprotsessi termiline ja Rankine'i ringprotsessi suhteline termodünaamiline kasutegur on

$$\eta_C = \frac{T'_{sHg} - T''_{sHg}}{T'_{sHg}} = \frac{788{,}7 - 522{,}8}{788{,}7} = 0{,}337,$$

$$\eta_{td} = \frac{0{,}312}{0{,}337} = 0{,}926.$$

Auru erikulu hobujõud-tunni kohta on

$$d = \frac{632{,}3}{AL} = \frac{632{,}3}{i_{1Hg} - i_{2Hg}} = \frac{632{,}3}{24{,}5} = 25{,}8 \text{ kg/HJh.}$$

Auru selline suur kulu on tingitud elavhõbeda väikesest aurustumissoojusest.

Veeauru korral on Rankine'i ringprotsessi termiline kasutegur kuiva küllastunud auruga, auru samade rõhkude puhul,

$$\eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{663 - 498}{663 - 45{,}41} = 0{,}267$$

ja auru erikulu

$$d = \frac{632{,}3}{i_1 - i_2} = \frac{632{,}3}{663 - 498} = 3{,}83 \text{ kg/HJh.}$$

Järelikult on elavhõbeda korral auru erikulu 6,73 korda suurem kui ringprotsessis veeauruga.

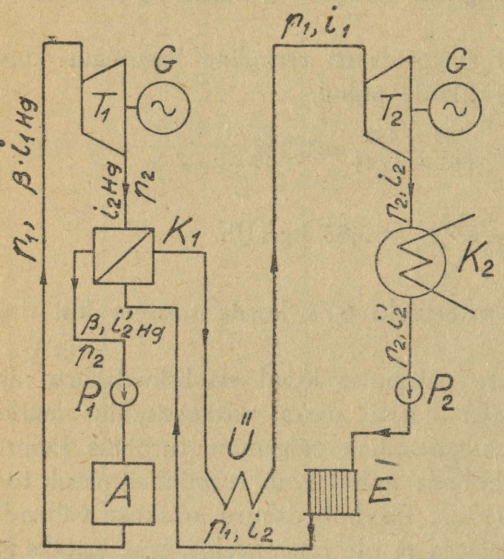
Toodud näites on adiabaatilise paisumise lõpul elavhõbedaauru niiskus 25%. Tagastatamatu protsessi korral oleks niiskussisaldus märksa väiksem (~ 17%), mistõttu auru adiabaatiline paisumine turbiinis lõpprõhuni 0,1 ata on lubatav, sest elavhõbeda puhul võib turbiin laitmatult töötada auru niiskumiseni 17 kuni 19%. Elavhõbedaauru niiskuse vähendamise menetlus auru ülekuumendamisega ei ole ratsionaalne, sest esiteks vähendaks see ringprotsessi suhtelist termodünaamilist kasutegurit ja teiseks vähendaks ülekuumendus kuni 600° C auru niiskussisaldust kõigest mõne protsendi võrra (~ 3%), mis ei õigusta keerukat ülekuumendusseadeldist.

Joonisel 98 esitatud *T-s*-diagrammilt nähtub ja toodud näitest järgneb, et lastes elavhõbedaaurul Rankine'i ringprotsessis paisuda ainult rõhuni 0,1 ata, läheb kondensaatori kaudu kaotsi väärtuslik kõrgetemperatuuriline ($t_s'' = 249{,}6°$ C) töövõimeline soojushulk $q_2 = i_{2Hg} - i_{2Hg}' = 62{,}2 - 8{,}25 = 53{,}95$ kcal/kg, mis joonisel 98 avaldub pindalaga ***anks***. Osa sellest soojusest saab veel muuta tööks, lastes aurul turbiinis paisuda 0,1 ata-lt sügavama vaakuumini, näiteks kuni rõhuni 0,00254 mm Hg, millele vastab kondenseerumistemperatuur 28° C.

Tegelikus olukorras ei saa kondensaatori rõhku viia nii madalaks, sest sellel rõhul on elavhõbedaaurude maht niivõrd suur, et jõuseade (turbiin ja kondensaator) omaksid ennenähtamatuid mõõtmeid.

Kaasaegne tehnika on selle küsimuse siiski lahendanud, kuigi teisel teel. Nimelt kasutatakse elavhõbedaauru ringprotsessist eemalejuhitav soojushulk q_2 vee aurukatla kütteks, s. o. elavhõbedaauru kondensaator muudetakse vee aurukatlaks. Toodud näites, kus elavhõbedaauru kondenseerumistemperatuur on 250° C, suudaks aurukatel-kondensaator teoreetiliselt

toota 40 abs. atmosfäärilist auru. Kasutades nii saadud auru vastavas aurujõumasinas, saame märksa tõsta seadme üldist termilist kasutegurit. Sel printsiibil töötavat kaksikringprotsessi, s. o. liidetud elavhõbeda- ja veeauru ringprotsessi, nimetatakse binaarseks ringprotsessiks. Säärase jõuseadme skeem on antud joonisel 100, kus tähistega on märgitud:



Joon. 100.

A — elavhõbedakatel,
T_1 — elavhõbedaauru turbiin,
K_1 — elavhõbedaauru kondensaator, s. o. aurukatel-kondensaator,
P_1 — elavhõbedakatla toitepump,
G — generaatorid,
$Ü$ — veeauru ülekuumendaja,
T_2 — veeauruga töötav turbiin,
K_2 — veeauru kondensaator,
P_2 — veekatla toitepump,
E — ökonomaiser, s. o. suitsugaasidega töötav katla toitevee eelkuumendaja,

Binaarne ringprotsess on näidatud joonisel 101 esitatud T-s-diagrammil. Ringprotsessi elavhõbedaauruga tähistab kontuur *d2as* ja ringprotsessi veeauruga kontuur *12cba*.

Selgitame skeemil esitatud binaarse ringprotsessi kasuteguri väärtuse.

Selleks peame eelkõige määrama elavhõbeda- ja veeauru kaalulise suhte, eeldusel, et kondensaatoris K_1 kondenseeruva elavhõbedaauru kondenseerumissoojusest jätkub, et täielikult aurustada üks kilogramm vett, mille entalpia on i'_6.

Oletame, et vee aurustumise isoterm *ba* ühtib elavhõbedaauru kondenseerumise isotermiga *as*, s. o. oletame, et soojuse ülekanne elavhõbedaaurudelt veele toimub temperatuurilise pingeta. Sel puhul toimub vee aurustumine elavhõbedaauru kondenseerumise temperatuuril T''_{sHg}, millele vastavad veeauru küllastusrõhk $p_1 = p'_2$ ja temperatuur $T''_{sHg} = T'_s$ (vt. joon. 101).

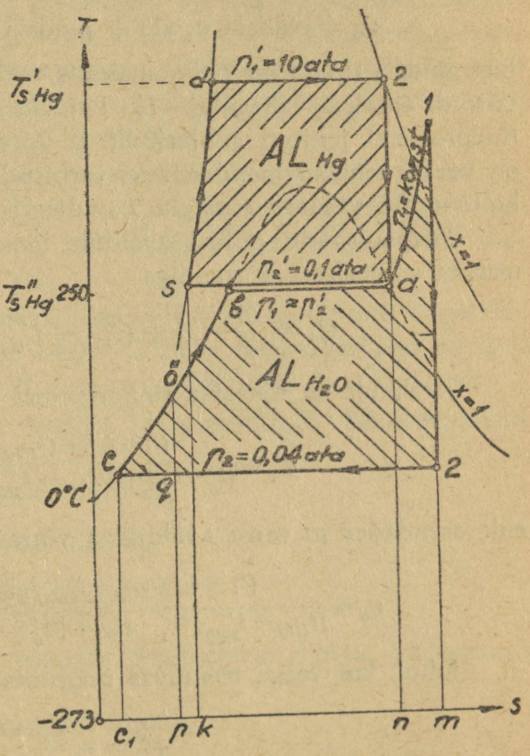
Märkides elavhõbeda- ja veeauru kaalulise suhte binaarses ringprotses-

sis tähisega m, võime tehtud eelduse kohaselt kirjutada kondensaatori K_1 suhtes alljärgneva soojusbilansi

$$(i_{2Hg} - i'_{2Hg}) \cdot m = i''_1 - i'_ö, \qquad \text{(a)}$$

kus i_{2Hg} on ühe kilogrammi elavhõbedaauru entalpia pärast adiabaatilist paisumist turbiinis, s. o. elavhõbedaauru entalpia T-s-diagrammi punktis a.

Entalpia i_{2Hg} väärtuse leiame elavhõhedaauru i-s-diagrammilt adiabaatilise paisumise lõpp-punkti a kaudu. i'_{H2g} on kondensaatoris K_1 veeldunud elavhõbeda entalpia alumise piirkõvera punktis s, mille leiame elavhõbeda küllastunud auru tabelist rõhu p'_2 järgi. i''_1 on kuiva küllastunud veeauru entalpia ülemise piirkõvera punktis a vastavalt rõhule p_1, $i'_ö$ on vee entalpia T-s-diagrammi punktis $ö$, s. o. vee entalpia pärast ökonomaiserit ($i'_ö$ väärtus peab olema antud).



Joon. 101.

Võrdusest (a) järgneb, et pindala *sank* T-s-diagrammil on võrdne pindalaga *pöban* eeldusel, et T-s-diagramm on koostatud m kg elavhõbeda jaoks. Lahendades võrrandi (a) m suhtes, saamegi võrrandi elavhõbeda- ja veeauru kaalulise suhte arvutamiseks, s. o.

$$m = \frac{i''_1 - i'_ö}{i_{2Hg} - i'_{2Hg}} \frac{\text{kgHg}}{\text{kgH}_2\text{O}}. \qquad (171)$$

Veega toimuvas ringprotsessis sooritatud adiabaatiline paisumistöö on

$$AL_{H_2O} = i_1 - i_2 \text{ kcal}$$

ja elavhõbedaga toimuvas ringprotsessis

$$AL_{Hg} = (i_{1Hg} - i_{2Hg}) \cdot m \text{ kcal},$$

kus i_{1Hg} on elavhõbedaauru entalpia adiabaatilise protsessi alguses, s. o. ülemise piirkõvera punktis 2. Entalpia i_{1Hg} on määratav kas *i-s*-diagrammilt (joon. 99) või tabelist VI.

Binaarses ringprotsessis sooritatud summaarne töö on:

$$AL = AL_{H_2O} + AL_{Hg} = (i_1 - i_2) + (i_{1Hg} - i_{2Hg}) \cdot m \text{ kcal.} \qquad (172)$$

Binaarsesse ringprotsessi juhitud soojushulk on

$$Q_1 = \text{pindala } c_1 c\ddot{o}p + \text{pindala } ksd2n + \text{pindala } na1m,$$

kus pindala $c_1 c\ddot{o}p$ on ökonomaiseris veele antud eelkuumendussoojus ja see võrdub entalpia vahega $i'_{\ddot{o}} - i'_2$. Pindala *ksd2n* on elavhõbedaga toimuvasse ringprotsessi juhitud soojushulk ja võrdub $(i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m$. Pindala *na1m* on veeauru ülekuumendamiseks tarbitud soojushulk $i_1 - i''_1$, kus i''_1 on kuiva küllastunud veeauru entalpia *T-s*-diagrammi punktis *a*.

Eespooltoodu põhjal avaldub binaarsesse ringprotsessi juhitud summaarne soojushulk võrrandiga

$$Q_1 = (i'_{\ddot{o}} - i'_2) + (i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m + (i_1 - i''_1) \text{ kcal.}$$

Järelikult on binaarse ringprotsessi termiline kasutegur

$$\eta_b = \frac{(i_1 - i_2) + (i_{1Hg} - i_{2Hg})\, m}{(i'_{\ddot{o}} - i'_2) + (i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m + (i_1 - i''_1)}, \qquad (173)$$

ehk, asendades m tema avaldisega võrrandist (171),

$$\eta_b = \frac{(i_1 - i_2)(i_{2Hg} - i'_{2Hg}) + (i_{1Hg} - i_{2Hg})(i''_1 - i'_{\ddot{o}})}{(i_{1Hg} - i'_{2Hg})(i''_1 - i'_{\ddot{o}}) + [(i'_{\ddot{o}} - i'_2) + (i_1 - i''_1)](i_{2Hg} - i'_{2Hg})}.$$

Juhul, kui veega toimuvas ringprotsessis ökonomaiser puudub,

$$m = \frac{i''_1 - i'_2}{i_{2Hg} - i'_{2Hg}},$$

$$Q_1 = (i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m + i_1 - i''_1,$$

ja

$$\eta_b = \frac{i_1 - i_2 + (i_{1Hg} - i_{2Hg})\, m}{(i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m + (i_1 - i''_1)}. \qquad (174)$$

Analoogiliselt toimub ringprotsessi arvutus ka toodud skeemidest erinevatel juhtudel.

Binaarse ringprotsessi *T-s*-diagrammilt ja toodud võrrandeist järgneb, et binaarse ringprotsessi termiline kasutegur elavhõbedaga toimuva ring-

protsessi samadel parameetritel omab suurimat väärtust, kui veega toimuvas ringprotsessis puudub ökonomaiser ja suitsugaasidega töötav auru ülekuumendaja, sest mõlemate seadmete puhul väheneb ringprotsessi keskmine soojuse protsessi juhtimise temperatuur, millega ühes väheneb ka ringprotsessi suhteline termodünaamiline kasutegur. Üldiselt, kõik need seadmed katla-agregaadis, milledes veeaur saab vahetult kütuse soojuse, s. o. väljastpoolt elavhõbedat või tema auru, kutsuvad esile ringprotsessi kasuteguri languse.

Binaarse ringprotsessi termilist kasutegurit nii vee eelkuumendamisega kui ka veeauru ülekuumendamisega saab suurendada, kui vee eelkuumendamine teostatakse regeneratiivse menetlusega ja veeauru ülekuumendamine elavhõbedaauru-turbiini vaheltauruga, s. o. kui neis seadmetes kasutatakse soojust, mis saadakse elavhõbedalt või tema aurult.

Näide. Binaarses ringprotsessis on elavhõbedaauru rõhk $p_1' = 10$ ata ja rõhk kondensaatoris $p_2' = 0{,}1$ ata. Arvutada ringprotsessi termiline kasutegur veeauruga toimuva ringprotsessi mitmesugusel menetlusviisil, kui veeauru rõhk kondensaatoris on 0,04 ata.

Küllastunud elavhõbedaauru tabeli järgi vastab rõhule 0,1 ata elavhõbedaauru kondenseerumistemperatuur 249,6° C. Selle temperatuuriga on teoreetiliselt võimalik saada küllastunud veeauru, mille rõhk $p_1 = \sim 40$ ata.

Küllastunud elavhõbedaauru tabelist ja elavhõbeda i-s-diagrammilt leiame, et

$$i_{1Hg}' = 86{,}7 \text{ kcal/kg},$$

$$i_{2Hg} = 62 \text{ kcal/kg},$$

$$i_{2Hg}' = 8{,}25 \text{ kcal/kg}.$$

Oletame, et veeauru osas toimub ringprotsess kuiva küllastunud auruga. Sel puhul

$$i_1 = i_1'' = 669{,}0 \text{ kcal/kg},$$

$$i_2 = 436{,}0 \text{ kcal/kg},$$

$$i_2' = 28{,}65 \text{ kcal/kg}.$$

Arvutame elavhõbeda suhtarvu m. T-s-diagrammilt nähtub, et

$$(i_{2Hg} - i_{2Hg}')\, m = i_1'' - i_2',$$

$$m = \frac{i_1'' - i_2'}{i_{2Hg} - i_{2Hg}'} = \frac{669{,}0 - 28{,}65}{62{,}0 - 8{,}25} = 11{,}91.$$

Järelikult

$$AL = (i_{1Hg} - i_{2Hg})\, m + i''_1 - i_2 =$$
$$= (86{,}7 - 62) \cdot 11{,}91 + 669{,}0 - 436{,}0 = 527{,}18 \text{ kcal},$$
$$Q_1 = (i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m = (86{,}7 - 8{,}25) \cdot 11{,}91 = 934{,}34 \text{ kcal},$$
$$\eta_b = \frac{AL}{Q_1} = \frac{527{,}18}{934{,}34} = 0{,}564.$$

Carnot' ringprotsessi termodünaamiline ja suhteline kasutegur on

$$\eta_C = \frac{T'_{sHg} - T''_{sH_2O}}{T'_{sHg}} = \frac{788{,}65 - 301{,}79}{788{,}65} = 0{,}617,$$

$$\eta_{td} = \frac{\eta_b}{\eta_C} = \frac{0{,}564}{0{,}617} = 0{,}914.$$

Oletades, et veeauruga toimuvasse ringprotsessi on lülitatud ökonomaiser, millest väljudes kondensaadi entalpia on $i'_ö = 141$ kcal/kg, saame

$$m = \frac{i''_1 - i'_ö}{i_{2Hg} - i'_{2Hg}} = \frac{669{,}0 - 141}{62{,}0 - 8{,}25} = 9{,}82$$

ja

$$AL = (i_{1Hg} - i_{2Hg})\, m + i''_1 - i_2 =$$
$$= (86{,}7 - 62) \cdot 9{,}82 + 669{,}0 - 436{,}0 = 475{,}55 \text{ kcal},$$
$$Q_1 = i'_ö - i'_2 + (i_{1Hg} - i'_{2Hg})\, m =$$
$$= 141 - 28{,}65 + (86{,}7 - 8{,}25) \cdot 9{,}82 = 882{,}73 \text{ kcal}.$$

Järelikult on ringprotsessi termiline ja suhteline termodünaamiline kasutegur

$$\eta_b = \frac{AL}{Q_1} = \frac{475{,}55}{882{,}73} = 0{,}539,$$

$$\eta_{td} = \frac{\eta_b}{\eta_C} = \frac{0{,}539}{0{,}617} = 0{,}873.$$

Selgitame veel kolmandat juhtu, kui veeauruga toimuvasse ringprotsessi on peale ökonomaiseri lülitatud ka suitsugaasidega töötav veeauru ülekuumendaja, milles veeaur saab ülekuumenduse 450° C. Sel puhul veeauruga toimuvas ringprotsessis on

$$i_1 = 795 \text{ kcal/kg ja } i_2 = 499 \text{ kcal/kg}.$$

Ringprotsessis sooritatud summaarne adiabaatiline töö on

$$AL = i_1 - i_2 + (i_{1Hg} - i_{2Hg})\, m =$$
$$= 795 - 499 + (86{,}7 - 62) \cdot 9{,}82 = 538{,}55 \text{ kcal}$$

ja $Q_1 = i_6 - i_2' + (i_{1Hg} - i_{2Hg}') m + i_1 - i_1'' =$

$= 141 - 28{,}65 + (86{,}7 - 8{,}25) \cdot 9{,}82 + 795 - 669 = 1008{,}73,$

$\eta_b = \frac{538{,}55}{1008{,}73} = 0{,}534,$

$\eta_{td} = \frac{0{,}534}{0{,}617} = 0{,}865.$

Eespooltoodust selgub, et binaarse ringprotsessi kaudu on võimalik aurujõuseadme kasutegurit viia samale tasemele diiseljõujaama kasuteguriga. Olgu nimetatud, et praegusajal töötavad juba binaarsete ringprotsessidega jõujaamad, milledes üksiku elavhõbedaauru-turbiini võimsus on 20 000 kW.

Kui lähtuda veeauruturbiini konstruktsiooni seisukohast, siis on kasulik turbiini madalrõhuaste asendada turbiiniga, mis töötaks mõne madalal temperatuuril keeva vedeliku auruga (eeter, ammoniaak), kasutades selle töötava keha katlana veeaurukondensaatorit. Sel puhul jääks ära veeauruturbiini liiga kogukas madalrõhuaste, mis teeb kondensatsioonjõuseadme keerukaks, sest veeauru maht rõhkudel 0,05 — 0,03 ata on suur ja nii turbiini rootori kui ka kondensatsioonseadme peab ehitama vastavalt sellele mahule. Säärase menetlusega pole küll võimalik tõsta jõuseadme üldist kasutegurit, kuid jõumasinate osas muutuks jõuseade palju kompaktsemaks. Sel puhul töötaks jõuseade trinaarse ringprotsessiga. Kas säärane jõuseade leiab kasutamist, seda näitab tulevik.

29. TERMOKEEMILISED RINGPROTSESSID.

Peatume lühidalt mõningate termokeemiliste ringprotsesside juures, mis pakuvad huvi soojustehnilisest seisukohast.

Termokeemiliste ringprotsessidega on võimalik transformeerida veeauru rõhku ühelt rõhult teisele ja teostada binaarseid ringprotsesse.

Termokeemilised ringprotsessid teostatakse mitmesuguste kaksiklahustega (KOH ja NaOH vesilahused); nad rajanevad nende lahuste kontsentratsiooni muutmisega seotud soojuslikule efektile ning lahuse aurustumisel lahustaja auru parameetrite sõltuvusele lahuse kontsentratsioonist.

Tutvume lühidalt lahuste eespooltähendatud omadustega. Märkides kaksik-, s. o. binaarset lahust moodustavate lahustunud komponentide moolkogused m_1 ja m_2, on nende komponentide kontsentratsioonid lahuses

$$k_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad \text{ja} \quad k_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Märkides edasi esimese komponendi auru partsiaalrõhu lahuse pinnal p_1

ning tema küllastunud auru rõhu samal temperatuuril puhtas olekus p_1° ja teise komponendi vastavad rõhud tähistega p_2 ja p_2°, võime avaldada nn. Raoult'i seaduse kujul

$$\frac{p_1^\circ - p_1}{p_1^\circ} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = k_2, \qquad (a)$$

$$\frac{p_2^\circ - p_2}{p_2^\circ} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = k_1.$$

See on empiiriline seadus ja ta ütleb, et kaksiklahuse puhul on esimese komponendi auru suhteline rõhu langus võrdne teise komponendi suhtelise moolkogusega lahuses, antud juhul kontsentratsiooniga k_2.

Seosest *(a)* järgneb, et

$$\frac{p_1^\circ - p_1}{p_1^\circ} = 1 - \frac{p_1}{p_1^\circ} = k_2,$$

$$p_1 = (1 - k_2)\, p_1^\circ \qquad (175)$$

ja

$$\frac{p_2^\circ - p_2}{p_2^\circ} = 1 - \frac{p_2}{p_2^\circ} = k_1,$$

$$p_2 = (1 - k_1)\, p_2^\circ. \qquad (176)$$

Juhul, kui teine komponent esindab mõnda tahket keha, mille auru rõhu p_2° võime arvata võrdseks nulliga, s. o. $p_2^\circ = 0$, siis esineb lahuse pinnal vaid lahustaja auru rõhk p_1, mille väärtus avaldub võrrandiga (175), s. o.

$$p_1 = p_1^\circ (1 - k_2), \qquad (b)$$

kus k_2 on lahustunud tahke aine kontsentratsioon lahuses ja p_1° antud temperatuurile vastav puhta lahustaja küllastunud auru rõhk, s. o. lahustaja auru rõhk, kui $k_2 = 0$.

Nagu teada, saadab iga keemilist protsessi teatav soojuslik efekt, mis sõltuvalt ühendusseastuvate ainete iseloomust toimub kas soojuse neeldumisega — endotermiline protsess — või soojuse eraldumisega — eksotermiline protsess.

Samad soojuslikud efektid esinevad ka lahuste moodustamisel s u l a m i s s o o j u s e n ä o l. Lahuse kontsentratsiooni muutmist saadab samuti soojuslik efekt nn. l a h u s t u s s o o j u s e n a. Nii sulamis- kui ka lahustumissoojus arvatakse lahustuva aine ühe mooli või kaaluühiku kohta ja nende väärtus on sõltuv lahuse kontsentratsioonist.

Lahuseid, mis alluvad Raoult'i seadusele, s. o. rahuldavad võrrandeid

(175) ja (176), nimetatakse ideaalseteks lahusteks. Reaalsed lahused omavad alati teatavaid hälbeid sellest seadusest.

Edaspidises käsitluses mõistame lahustes, mis moodustuvad lahustajast ja lahustuvast kujusainest, s. o. tahkest ainest, lahuse kontsentratsioonina tahke aine kontsetratsiooni lahuses.

Soojustehnilisest seisukohast pakuvad huvi KOH ja NaOH vesilahused. Mõlematel ainetel on eespooltähendatud soojuslikud efektid positiivsed, s. o. näiteks saadab lahuse kontsentratsiooni vähendamist (lahuse lahjendamine) soojuse eraldumine. Vee isobaariline aurustumine lahusest toimub soojuse neeldumisega, s. o. lahusest vee aurustumiseks vajalik soojushulk on võrdne vee aurustumissoojuse ja lahuse kontsentratsiooni muutmiseks tarbitava soojushulga summaga.

Lahuse kahele erinevale kontsentratsioonile vastav lahustussoojuse hulk on määratav kui neile kontsentratsioonidele vastavate sulamissoojuste vahe.

Edaspidises vaatlemegi kahekomponendilisi lahuseid, milles lahustaja esineb vedelas ja aurufaasis. Selle süsteemi parameetriteks on lahuse kontsentratsioon k, temperatuur t ja lahustaja auru rõhk. Gibbs'i faasideseaduse põhjal [22] võib kahte nendest parameetritest vaadelda kui sõltumatuid muutujaid, kuna kolmas on nende ühiselt määratavaks funktsiooniks. Näiteks muutes lahuse temperatuuri ja kontsentratsiooni, saab lahustaja auru rõhk alati kindla ettemääratud väärtuse, s. o.

$$p = p\,(t,\ k). \tag{d}$$

Samuti võime kirjutada, et

$$t = t\,(p,\ k) \tag{e}$$

ja

$$k = k\,(t, p). \tag{f}$$

Esimene neist seostest *(d)* avaldab Raoult'i seadust *(b)*, kui oletame, et $t = konst$, s. o.

$$p = p\,(k)_t = p^{\circ}\,(1 - k).$$

Sellest seosest võime teha järgneva järelduse.

---

22 Faasideseaduse analüütiline avaldis on

$$F = n + 2 - r.$$

Selles võrrandis on n süsteemi komponentide arv, r — faaside arv ja F — süsteemi vabadusastmete arv, s. o. süsteemi parameetrite arv, milliseid saab üksteisest sõltumatult muuta. Antud juhul $n = 2$ ja $r = 2$, seega

$$F = 2 + 2 - 2 = 2.$$

Järelikult omab süsteem kahte vabadusastet, s. o. süsteemi olekut määravast kolmest pa-

1. Lahuse isotermilisel aurustumisel dünaamiliselt tasakaalustunud protsessis on lahustaja auru rõhk p_1 madalam lahuse temperatuurile vastava puhta lahustaja küllastunud auru rõhust p° ja seda rohkem, mida suurem on lahuse kontsentratsioon, s. o. lahuse kontsentratsiooni suurenemisega väheneb lahustaja auru rõhk ja kontsentratsiooni vähenemisel suureneb lahustaja auru rõhk, kusjuures piirrõhuks on lahuse temperatuurile vastav puhta lahustaja küllastunud auru rõhk.

Aluseks võttes asjaolu, et puhta lahustaja aurustumistemperatuur jääval rõhul on kindlalt määratud jääv suurus (näiteks vee isobaariline aurustumine), võime kahekomponendilise kahefaasilise lahuse suhtes, milles lahustuva aine auru rõhk on võrdne nulliga ($p_2^\circ = 0$), püstitada väite.

2. Antud kontsentratsiooniga lahuse isobaarilisel aurustumisel, dünaamiliselt tasakaalustunud protsessis, lahustaja aur esineb ülekuumendatud olekus, kusjuures ülekuumendus on seda suurem, mida suurem on lahuse kontsentratsioon.

Järelikult on lahuse isobaarilisel aurustumisel lahustaja auru temperatuur kõrgem samale rõhule vastava puhta lahustaja kuiva küllastunud auru temperatuurist ja seda rohkem, mida suurem on lahuse kontsentratsioon. Toodust järgneb veel, et lahuse isobaarilisel aurustumisel tõuseb lahuse temperatuur lahuse kontsentratsiooni suurenemisel.

Eespooltoodud kahte järeldust illustreerib piltlikult joonis 102. Sellel joonisel on isobaaride kaudu esitatud veeauru rõhu ja temperatuuri muutus söövbekaaliumi (KOH) vesilahuse jaoks, sõltuvalt lahuse temperatuurist ja kontsentratsioonist. Jooniselt nähtub, et lahuse isobaarilisel aurustumisel tõuseb veeauru temperatuur ühes lahuse kontsentratsiooniga. Näiteks isobaarilisel rõhul 15 ata tõuseb lahuse kontsentratsiooni muutusel 0% kuni 87% veeauru temperatuur 197° C kuni 500° C-ni. Järelikult annab KOH

---

rameetrist p, t ja k saab kahte vaadelda kui sõltumatut muutujat, kuna kolmas on nende ühiselt määratavaks funktsiooniks. Rakendades faasideseadust näiteks ühekomponendilisele süsteemile, kus esineb kaks faasi (nagu vee aurustumisprotsessis), on vabadusastmete arv

$$F = 1 + 2 - 2 = 1.$$

Järelikult, muutes aurustumisrõhku, muutub seega ka aurustumistemperatuur, sest sel puhul

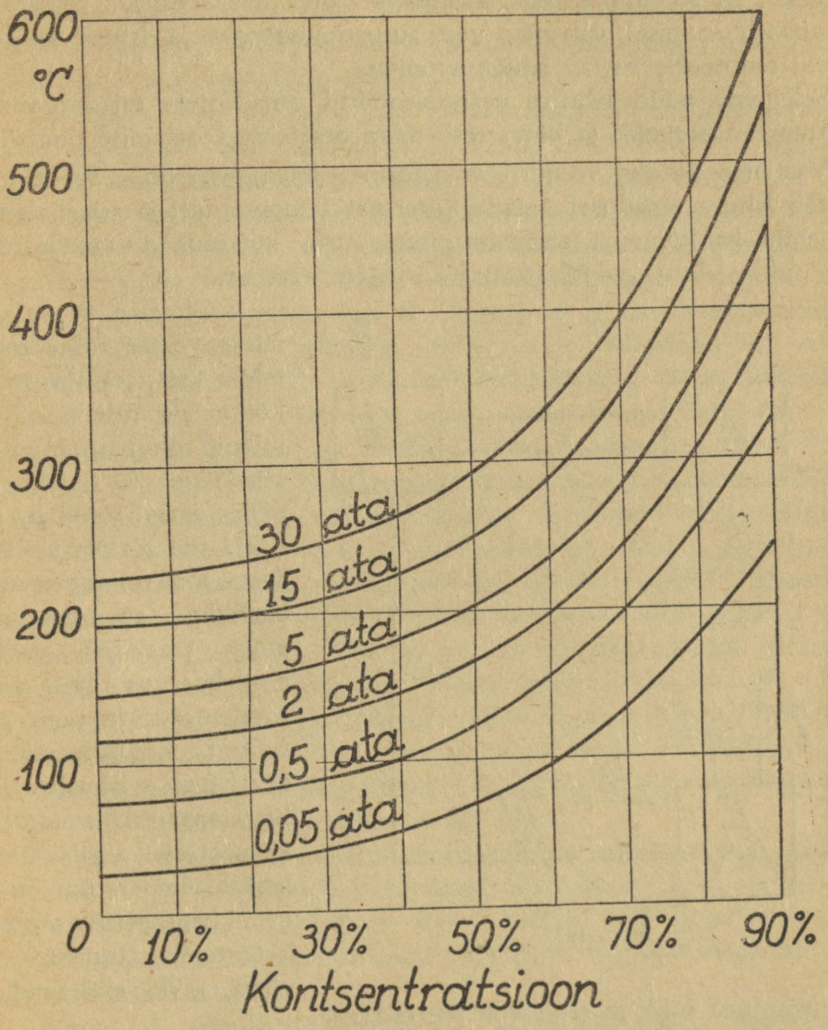
$$t = f(p). \qquad (c)$$

Kui ühekomponendiline süsteem esineb kolmes faasis, nagu seda on gaasi olek kolmikpunktis (vt. joon. 21), on vabadusastmete arv võrdne nulliga, s. o.

$$F = 1 + 2 - 3 = 0.$$

Järelikult saab gaas kolmikfaasis esineda vaid kindla rõhu ja temperatuuri puhul. CO_2-le on säärasteks parameetriteks $p = 5{,}28$ ata, $t = -56{,}6°$ C. H_2O saab kolmikfaasis esineda vaid $p = 0{,}00623$ ata ja $t = 0{,}0098°$ C juures jne.

vesilahus rõhul 15 ata ja kontsentratsioonil 87% aurustumisel veeauru, mille ülekuumendus on 303° C, sest rõhule 15 ata vastab küllastunud veeauru temperatuur 197° C.



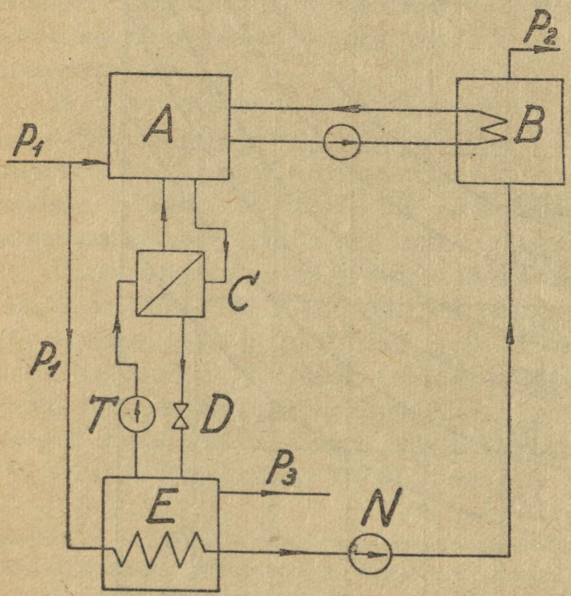
Joon. 102.

Edasi selgub jooniselt, et lahuse isotermilisel kontsentratsiooni suurenemisel veeauru rõhk väheneb. Näiteks muutes temperatuuril 197° C lahuse kontsentratsiooni 0% kuni 83%-ni, muutub veeauru rõhk 15 ata-lt kuni 0,05 ata-ni.

Peale eespooltoodu on KOH kui ka NaOH vesilahuse tähtsaks omaduseks ahnelt absorbeerida veeauru, mis võimaldab neid lahuseid kasutada veeauru absorber-kondensaatoritena ja lahuse kõrge temperatuuri tõttu samaaegselt ka soojusallikatena, kusjuures kasutatavaks osutub lahuses veeauru absorbeerumisel vabanev vee aurustumissoojus ja lahuse kontsentratsiooni muutusele vastav lahustussoojus.

Selgitame nüüd lahuste eespooltoodud omadustele rajatud veeauru rõhu transformeerimise ja binaarsete ringprotsesside teostamise printsiipe.

Vaatleme esiteks veeauru transformeerimise printsiipi. See printsiip põhjeneb lahuse omadusel omada kõrgemat temperatuuri ja seega aurustumisel anda ka kõrgema temperatuuriga auru, kui seda on samale rõhule vastav puhta lahustaja küllastunud auru temperatuur.



Joon. 103.

Oletame, et on antud niiske veeaur rõhul p_1 ata, mida vaja transformeerida kõrgemale rõhule. Selleks juhime rõhul p_1 antud auru segajasse A (joon. 103), milles samal rõhul p_1 asub KOH või NaOH vesilahus. Segajas A toimub auru isobaariline absorbeerumine, mille tagajärjel vabaneb absorbeeruva auru aurustumissoojus ja segu kontsentratsiooni langusele vastav segu lahustussoojus. Statsionaarsel absorbeerumisprotsessil segajas saadava lahuse temperatuur on kõrgem absorbeeruva auru küllastustemperatuurist vahe võrra, mille määravad absorbeeruva auru rõhk ja segu kontsentratsioon.

Edasi nähtub jooniselt, et segaja A on ühendatud aurustaja B küttekehaga, milles tsirkuleerib segajas saadav lahus, mis, andes oma soojuse küttekeha kaudu aurustajas olevale veele, teostab viimase aurustamise. Selle menetlusega saame aurustajas sekundaarse niiske veeauru, mille temperatuur on peaaegu võrdne küttekehas tsirkuleeriva lahuse temperatuuriga. Sekundaarauru rõhk on aga kõrgem segajasse juhitava primaarauru rõhust Δp

võrra, mille määrab sekundaarauru ja lahustajas absorbeeruva primaarauru küllastustemperatuuride vahe.

Näiteks, kui primaarauru rõhk on 15 ata ja KOH vesilahuse kontsentratsioon statsionaarsel töörežiimil 50%, siis selgub joonisel antud diagrammist, et soojuskadudeta protsessil sekundaarauru temperatuur $t = 250°$ C, millele vastab sekundaarauru rõhk $p_2 = 40$ ata.

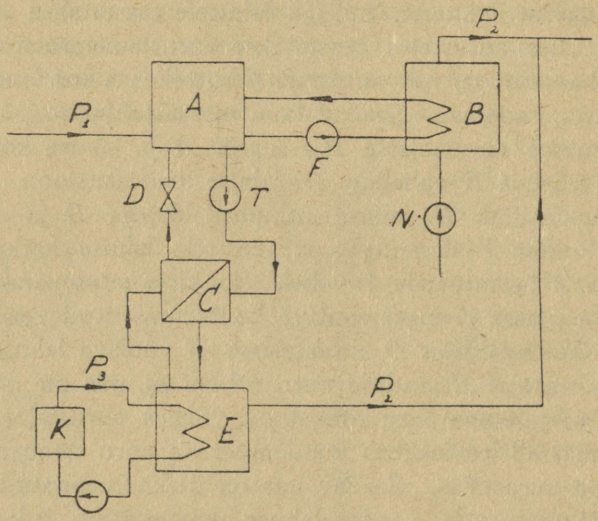
Et segajas A hoida vesilahuse kontsentratsiooni konstantsena, varustatakse seade veel teise aurustajaga E, milles toimub vee väljaaurustamine segajas A saadavast lahusest, millega lahusele taastatakse vajalik algkontsentratsioon. Selles aurustajas teostatakse aurustamisprotsess segajasse A juhitava auru haruauruga, mis aurustaja E küttekehas kondenseerudes annab ära oma aurustumissoojuse. Saadav kondensaat juhitakse pumba N kaudu toiteveena esimesse aurustajasse B. Segaja A ja lahuse kontsentratsiooni stabiliseeriva aurustaja E vaheline vesilahuse tsirkulatsioon on varustatud soojusvahetusaparaadiga C, lahuse rõhumadaldajaga D ja tsirkulatsioonipumbaga T. Pumba T ülesandeks on teostada lahuse katkematut tsirkulatsiooni segaja A ja aurustaja E vahel. Soojusvahetusaparaadis C toimub aurustajast E segajasse A tagasivoolava kontsentreeritud vesilahuse eelsoojendus, ning rõhumadaldajas D aurustajasse E voolava lahuse rõhu vähendamine kuni aurustajas E saadava auru rõhuni p_3, mis on madalam aurustaja küttekehasse juhitava auru rõhust p_1. Selles aurustajas saadava veeauru rõhu p_3 määrab küttekehas kondenseeruva auru temperatuur ja lahuse kontsentratsioon aurustajas. Saadav aur on ülekuumendatud olekus. Ülekuumenduse Δt väärtus on võrdne lahuse temperatuuri ja auru rõhule p_3 vastava puhta lahustaja kuiva küllastunud auru temperatuuri vahega. Eespoolantud näites oli $p_1 = 15$ ata, kui aurustajas taastatakse KOH vesilahusele kontsentratsioon 60%, oleks joonisel 102 esitatud diagrammi järgi aurustajas E auru rõhk 2 ata ja ülekuumendus 80° C.

Toodust järgneb, et esitatud skeemi korral primaarauruga, mille rõhk on p_1 ata, on võimalik saada kahesugust erirõhku p_2 ja p_3 omavat sekundaarauru, kusjuures $p_2 > p_1$ ja $p_3 < p_1$. Valides sobivalt primaarauru rõhu, on võimalik lahuse kontsentratsiooni töörežiimi valikuga saada ka sobivaid rõhke sekundaaraurudele.

Juhul, kui transformeerimisel on ülesandeks saada vaid üherõhulist sekundaarauru, on transformeerimismenetlus teostatav joonisel 104 esitatud skeemi järgi.

Protsessi käik on järgmine. Transformeeritav aur, mille rõhk on p_1 ata, juhitakse segajasse A, milles, nagu esimesel skeemilgi, on KOH või NaOH sobiva kontsentratsiooniga vesilahus. Segajas absorbeerudes annab aur oma aurustumissoojuse vesilahusele. Segajast A juhitakse vesilahus pumbaga F

aurustaja B küttekehasse ja sealt tagasi segajasse. Aurustajas B saame lahuse temperatuurile võrdse (kadudeta protsess) temperatuuriga sekundaarse niiske auru, mille rõhu p_2, mis on kõrgem primaarauru rõhust p_1, määrab auru temperatuur. Aurustajast B juhitakse aur edasi tarbija magistraali. Aurustajat B varustab toiteveega pump N.



Joon. 104.

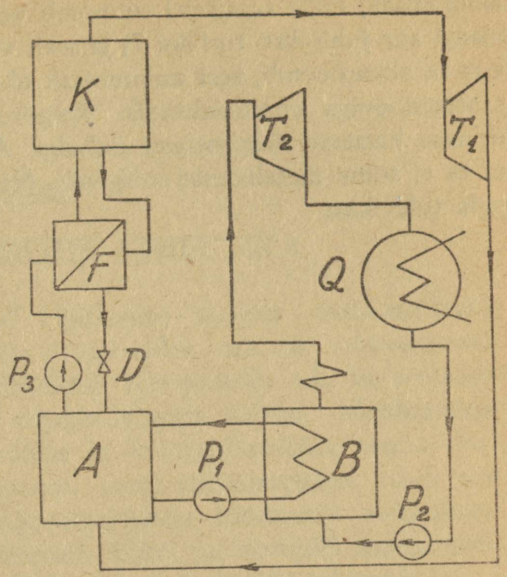
Lahuse kontsentratsiooni pidev taastamine segajas toimub aurustajas E, kus lahusest aurustatakse välja segajas auru näol absorbeerunud vesi. Aurustaja E küttekeha toidab auruga eri veeaurukatel K, mille rõhk p_3 ata on valitud nii kõrge, et auru temperatuur on võrdne aurustajas E saadava ülekuumendatud auru temperatuuriga, mille rõhk on samane aurustajast B saadava niiske auru rõhuga p_2. Auru rõhk p_3 on alati kõrgem rõhust p_2. Aurustajas E lahusest aurustatav aur, mis on ülekuumendatud olekus ja võrdne rõhuga p_2, juhitakse aurustajast B saadava auruga ühisesse magistraali jne.

Skeemil näidatud soojusvahetusaparaat C, pump T ja lahuse rõhumadaldaja D täidavad samu ülesandeid nagu esimesel juhulgi.

Näiteks, kui oletame, et primaarauru rõhk $p_1 = 0{,}5$ ata ja lahuse kontsentratsioon segajas $k_1 = 60\%$ ning aurustajas E on kontsentratsioon

$k_2 = 70\%$, siis $p_2 = 5$ ata ja $p_3 = 65$ ata. Kui aga oletame, et $p_1 = 2$ ata, $k_1 = 40\%$ ja $k_2 = 50\%$, siia $p_2 = 5$ ata ja $p_3 = 16$ ata.

Peale auru rõhu transformeerimise on printsipiaalselt võimalik termokeemilisi ringprotsesse kasutada binaarsete ringprotsesside teostamiseks soojusjõuseadmetes. Binaarse jõuseadme ringprotsessi skeem on näidatud joonisel 105.



Joon. 105.

Tavalise kütusega köetavast vesilahuse (KOH või NaOH) katlast K, milles toimub lahusest vee aurustumine, saadakse vastava rõhuga ülekuumendatud aur, mis juhitakse turbiini T_1. Turbiini läbinud töötanud aur juhitakse absorber-kondensaatorisse A (endistel skeemidel nimetatud segajaks), kus ta absorbeerub KOH või NaOH vesilahuses ja annab lahusele ära oma aurustumissoojuse. Absorber-kondensaator A on ühendatud aurustaja B küttekehaga ja lahuse aurukatlaga K. Aurustaja B toodab lahuse temperatuurile vastava rõhuga niisket veeauru, mis läbi auru ülekuumendaja juhitakse teise turbiini T_2. Turbiinist T_2 väljuv töötanud aur juhitakse pinnalisse kondensaatorisse Q, kus ta kondenseerub; kondensaadina antakse ta pumbaga P_2 tagasi aurustajasse B jne.

Peale aurustaja B küttekeha toitmise on absorber-kondensaatori ülesandeks veel pidevalt toita aurukatelt lahjendatud lahusega. Selleks on katla K ja absorber-kondensaatori toitemagistraali lülitatud katla toitepump P_3, lahuse eelsoojendaja F ja lahuse rõhu madaldaja D.

Toodud termokeemiliste protsesside varjuküljeks on nii KOH kui ka NaOH sööbiv mõju metallidesse.

KOH ja NaOH asendamiseks on ette pandud kasutada binaarsetes ringprotsessides töötava kehana ammoniakaate, nimelt ammoniaagi ja kloortsingi ühendeid, nagu $ZnCl_2NH_3$ ja $ZnCl_22NH_3$. Selle töötava keha puhul jääb ringprotsessi skeem samaks, nagu on esitatud joonisel 105. Ainult KOH või NaOH vesilahus katlas K ja absorber-kondensaatoris asendub ammoniakaadiga.

Need komplekssoolad aurukatlas K (joon. 105) veelduvad. Vedela ammoniakaadi kuumendamisel eraldub vedelikust vastavarõhulise auruna ammoniaak, mille tagajärjel suureneb vedeliku kontsentratsioon [23]. Ammoniaagi aur juhitakse turbiini T_1 ja sealt väljudes absorber-kondensaatorisse A, kus ta absorbeerub, sest ammoniaak absorbeerub intensiivselt suure kontsentratsiooniga ammoniakaadis. Ringprotsessi edaspidine käik on sama, mis eelmise binaarse ringprotsessi puhulgi. Ammoniakaadi heaks omaduseks on, et ta ei toimi metallidesse sööbivalt. Neile ringprotsessidele võib ehk ennustada tulevikku.

[23] Sel puhul mõistame kontsentratsiooni all kloortsingi kaalulise koguse suhet ühendi üldkaaluga.

V peatükk.

GAASIDE JA AURUDE KINEETIKA.

„Tehnilises termodünaamikas I" käsitlesime soojuse mehhaaniliseks tööks muundumist termodünaamilistes protsessides, mis on rakendatavad kolb-soojusjõumasinates. Nende protsesside iseärasuseks oli, et protsessi vältel töötava keha näiv kineetiline energia võrdus nulliga. Mehhaanilise töö sooritas töötav keha temasse soojuse ja komprimeerimise kaudu akumuleeritud potentsiaalse ehk rõhuenergia arvel paisumistööna, nagu see esines Otto, Dieseli ja Sabathé ringprotsessidega töötavates mootorites. Neis jõumasinais antakse gaasi paisumistöö kolvi ja väntvõlli mehhanismi kaudu juba mehhaanilise energiana edasi energiat tarbivaile masinaile jne.

Peale kolb-soojusjõumasinate on teine kategooria soojusjõumasinaid, milledes töötavasse kehasse soojuse ja ka komprimeerimise teel akumuleeritud potentsiaalne energia muudetakse töötava keha paisumisega kineetiliseks energiaks ning seejärel mehhaaniliseks energiaks. Nendeks soojusjõumasinateks on auru- ja gaasiturbiinid. Nii auru- kui ka gaasiturbiinides lastakse töötaval kehal (aur või gaas) ülerõhu toimel voolata läbi eriliste düüside. Düüsides esineb töötava keha paisumine kiireneva liikumise näol, millega ta saavutab suure kiiruse ja ühes sellega ka kineetilise energia.

Düüsidest juhitakse töötav keha edasi turbiini rootori labidatele, mille ta oma kineetilise energia arvel paneb tiirlema, muutes seega oma kineetilise energia rootori mehhaaniliseks tööks jne. Sõltuvalt gaasi või auru voolamise protsessi iseloomust läbi turbiini rootori labidate jagunevad turbiinid kahte põhirühma, nimelt *aktiiv-* ja *reaktiivturbiinideks*.

Toodust on selge, et auru ja gaasi voolamisprotsess omab soojustehniliselt suurt tähtsust. Käesolevas paragrahvis käsitlemegi seda protsessi ulatuses, mis on vajalik rakendusteks auru- ja gaasiturbiinide teoorias. Peale eelöeldu rajanevad gaaside kineetikale reaktiivprintsiibil töötavad *reaktiivmootorid* ja *-lennukid*, millede konstruktiivne arendamine on praegusaja põnevamaks küsimuseks. Reaktiivlennuaparaatide teooria loojaks, nagu teada, oli Nõukogude Liidu professor *Tsiolkovski*, kes kogu oma eluaja pühen-

das sellele probleemile, mis praegusajal on tegelikult ellu viidud. Võib ka arvata, et seisame ehk ajastu lävel, mil teostub prof. Tsiolkovski suurim unistus — lend maailmaruumi reaktiivaparaadiga.

30. GAASI STATSIONAARSE VOOLAMISE MÕISTED.

Gaasi voolamist nimetatakse statsionaarseks, kui gaasi oleku parameetrid ja kiirus voolujuhtme mistahes ristlõikes on jäävad suurused, s. o. ei sõltu ajast.

Seda definitsiooni ei tule siiski mõista selliselt, et statsionaarsel voolamisel vaadeldava gaasiosakese parameetrid p, v, T ja kiirus c on konstantsed ka tema liikumisel ühest kohast teise. Statsionaarse voolamise üldjuhul on gaasiosakeste oleku parameetrid ja kiirus gaasi voolamisel ristlõikest ristlõikeni muutuvad suurused, kuid iga kindlalt fikseeritud ristlõiget läbides saavutavad gaasiosakesed alati kindlad ettemääratud oleku parameetrid ja kiiruse. Näiteks gaasi voolamisel ristlõikest 1 kuni ristlõikeni 2 muutuvad gaasi parameetrid ja kiirus nende ristlõigete vahelises osas väärtustelt p_1, v_1, T_1, c_1 väärtusteni p_2, v_2, T_2 ja c_2 (vt. joon. 106).

Järelikult võib gaasi voolamine statsionaarse voolamise üldjuhul voolujuhtmes kahe vaadeldava ristlõike vahelises osas toimuda kas kiirenevalt või aeglustuvalt, mis sõltub voolujuhtme telje suunas mõjuva rõhugradiendi märgist. Rõhugradient on vektoriaalne suurus ja tema avaldis on $\frac{dp}{ds}$.

Ideaalse gaasi korral on nii gaasi parameetrid kui ka kiirus vaadeldava ristlõike pinna igas punktis võrdsed suurused. Reaalsel gaasil on gaasi kiirus ja parameetrid ristlõike pinna ulatuses sisemise hõõrdumise tõttu üldiselt muutuvad suurused, kuid käesolevates rakendustes oletame nad ristlõike ulatuses asendatuiks keskmiste väärtustega, mida oleme õigustatud vaatlema jäävate suurustena *(c = konst, v = konst, p = konst)*. Aluseks võttes eespoolantud, s. o. statsionaarset voolamist määravaid tingimusi, võime öelda, et statsionaarsel voolamisel ajaühikus voolujuhtme iga ristlõiget läbiv gaasi kaaluline kogus on jääv suurus. Analüütiliselt avaldub see tingimus seosega

$$G = Fc\gamma = \frac{Fc}{v} = konst, \qquad (177)$$

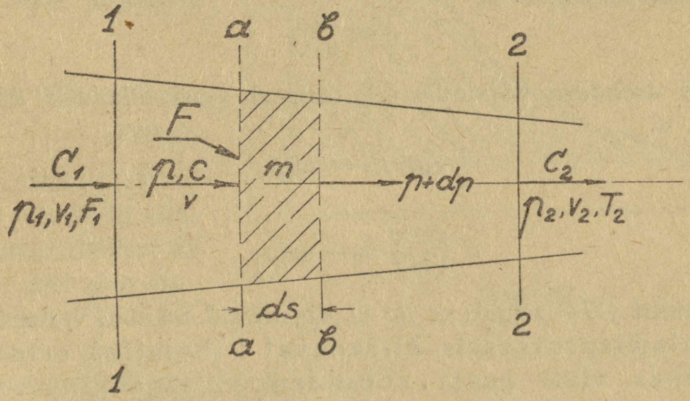
kus F on voolujuhtme ristlõike pindala [m^2], c — gaasi voolamise kiirus samas ristlõikes [m/sek], γ — erikaal [kg/m^3], v — kilomaht [m^3/kg] ja G — sekundis ristlõiget läbiv gaasi kaaluline kogus kilogrammides [kg/sek].

Võrrandit (177) nimetatakse gaasi voolamise pidevusvõrrandiks.

31. IDEAALSE GAASI VOOLAMISVÕRRANDID.

Järgneval gaasi voolamise võrrandi tuletamisel eeldame, et voolamisprotsessis gaas ei soorita välistööd, s. o. tööd, mis süsteemist eemalduks. Selleks oletame, et gaasijuhtme seinad on deformeerumatud ja et vaadeldavas juhtmeosas gaasivoolus ei läbi mingit jõumasinat, milles võiks toimuda gaasis akumuleerunud energia muundumine väliseks mehhaaniliseks tööks.

Säärases voolamisprotsessis on võimalik vaid gaasis akumuleerunud energiavormide vastastikune muundumine.



Joon. 106.

Võrrandi tuletamiseks vaatleme gaasi kiirenevat voolamist gaasijuhtme kahe teineteisele lõpmata ligidal asetseva ristlõike *aa* ja *bb* ulatuses, mille kaugus teineteisest on ds (vt. joon. 106). Oletame, et ristlõikes *aa*, mille pindala on F, mõjub gaasi rõhk p; siis on ristlõikes *bb* mõjuva rõhu suurus $p + dp$, kusjuures dp, sõltuvalt gaasi voolamise iseloomust, võib omada nii pluss- kui ka miinusmärgi. Järelikult on ristlõigete *aa* ja *bb* vahel asuvale gaasi massile tema liikumise suunas mõjuv jõud

$$Fp - F(p + dp) = - Fdp.$$

Teisest küljest saame gaasimassile m mõjuva jõu gaasi kiiruse c kaudu avaldada kujul

$$- Fdp = m \frac{dc}{d\tau}.$$

kus $d\tau$ on aja diferentsiaal.

Arvesse võttes, et

$$m = \frac{F \cdot \gamma \cdot ds}{g},$$

saame

$$-Fdp = \frac{F \cdot \gamma \cdot ds}{g} \cdot \frac{dc}{d\tau}$$

ehk

$$-dp = \frac{1}{gv} \cdot \frac{ds}{d\tau} \cdot dc, \qquad (a)$$

sest

$$\gamma = \frac{1}{v}.$$

Vaadeldes ds kui gaasimassi m liikumise teekonda, avaldab suhe $\frac{ds}{d\tau}$ gaasi liikumise kiirust, s. o.

$$c = \frac{ds}{d\tau}.$$

Tehes selle asenduse võrrandis (a), saamegi gaasi liikumise diferentsiaalvõrrandi, s. o.

$$\frac{1}{g} cdc = -vdp \qquad (178)$$

ehk

$$d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = -vdp. \qquad (179)$$

Võrrandist (178) selgub, et dc ja dp märgid on alati vastupidised, s. o. gaasi voolamisprotsessis kiireneval liikumisel esineb liikumise suunas alati gaasi rõhu langus ja aeglustuva liikumise suunas gaasi rõhu tõus.

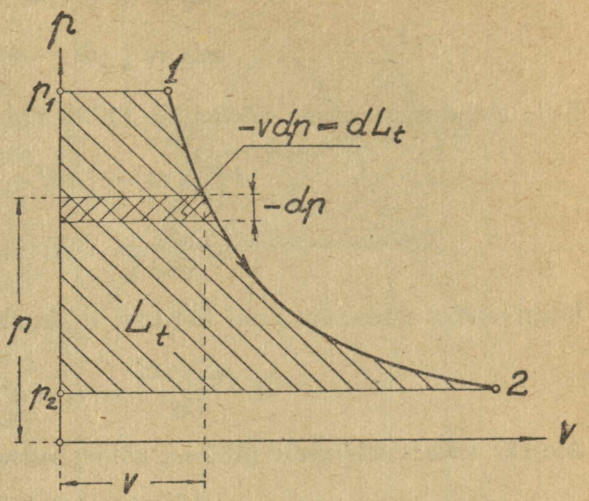
Võrrandis (178) on liige $\frac{1}{g} cdc$ gaasi kineetilise energia diferentsiaal ja liige $-vdp$ gaasi elementaarne paisumistöö. See paisumistöö esindab gaasi kiirenduse paisumistööd ehk lihtsalt kiirendustööd, mis on põhjustatud gaasi mahu ja rõhu muutusest tema kiireneval liikumisel gaasijuhtmes. See töö sooritatakse gaasis akumuleerunud potentsiaalse energia arvel. Selle potentsiaalse energia moodustavad siseenergia, potentsiaalne mehhaaniline energia ja üldjuhul ka protsessi juhitav soojus.

Gaasi kiirendustööna toimubki gaasis akumuleeritud potentsiaalse energia muundumine kineetiliseks energiaks. Järelikult on gaasi kiirendustöö nii märgilt kui ka absoluutselt väärtuselt võrdne gaasi kineetilise energia muutusega voolamisprotsessis. Peale selle esindab ta gaasis olemasolevat töövaru, mida gaas on alati võimeline sooritama välise mehhaanilise tööna vastavas jõumasinas (auru- või gaasiturbiin). Sellest seisukohast lähtudes nimetame edaspidises gaasi kiirendustööd kasustatavaks tööks. P-v-tasapinnal avaldub kasustatav töö, nagu seda näitab tema diferentsiaal $(-pdv)$, protsessi joonest *12* ja rõhkude teljest piiratud pindalaga $p_1 12 p_2$ (vt. joon. 107).

Järelikult, kasustatav töö *p-v*-diagrammil avaldub sama pindalaga, mis tehniline töögi [24]. Tegelikult see ongi nii, sest kasustatav töö välistööd sooritavates protsessides on võrdne tehnilise tööga. Edaspidises märgime kasustatava töö tähega L_t'.

Eespooltoodut aluseks võttes, võime võrrandi (179) põhjal kirjutada võrduse

$$d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = -vdp = dL_t'. \qquad (179\text{-a})$$



Joon. 107.

Integreerides võrdust (179-a) gaasijuhtme või düüsi ristlõikest *11* kuni ristlõikeni *22* (joon. 106), mis *p-v*-diagrammil (joon. 107) vastab integreerimisele protsessijoone punktist *1* kuni punktini *2*, saame

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = -\int_1^2 vdp \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}} \qquad (180)$$

ehk

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = L_t' \ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}, \qquad (180\text{-a})$$

sest $-\int_1^2 vdp = L_t'$. Võrrandis (180) ja (180-a) avaldab liige $\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}$ ühe kilogrammi gaasi või auru kineetilise energia muutust voolujuhtme ristlõigete *11* ja *22* vahelises osas (joon. 106) ning integraal $-\int_1^2 vdp = L_t'$ samas ristlõigetevahelises osas ühe kilogrammi gaasi või auru kasustatavat tööd.

Selleks, et kineetilist energiat, mis on avaldatud võrrandiga (179), s. o.

$$d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = -vdp,$$

[24] Vt. J. Ivand, „Tehniline termodünaamika I", §§ 35, 53, 54, 59.

siduda gaasi oleku kalorilise parameetriga (entalpiaga) ja välise soojusega, asendame liikme $-vdp$ tema avaldisega soojusvõrrandist

$$dq = di - Avdp,$$

$$vdp = \frac{1}{A}(di - dq).$$

Selle asendusega saame võrrandile (179) anda kuju

$$d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = -\frac{1}{A}(di - dq),$$

$$Ad\left(\frac{c^2}{2g}\right) = -di + dq. \qquad (181)$$

Integreerides võrrandit gaasi kiiruselt c_1 kuni kiiruseni c_2, saame võrrandi

$$A\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = i_1 - i_2 + q. \qquad (182)$$

Aluseks võttes võrrandit (180-a), võime võrrandi (182) anda ka kujul

$$AL_t' = i_1 - i_2 + q. \qquad (183)$$

Võrrand (183) näitab, et kiirendusega voolamisprotsessis sooritatakse gaasi sisemine paisumistöö, s. o. kasustatav töö, protsessi juhitava välise soojuse ja gaasis akumuleerunud potentsiaalse mehhaanilise energia ning siseenergia arvel, sest entalpia esindab gaasi siseenergia ja potentsiaalse mehhaanilise energia summat, s. o. $i = u + Apv$.

Võrrandiga (183) avaldatud kasustatavat tööd, nagu varemalt tähendatud, esindab p-v-diagrammil tehnilist tööd avaldav pindala (joon. 107).

Veeauru puhul T-s-diagrammil võrrandiga (183) antud kasustatav töö või kineetilise energia muutus avaldub pindalaga $cba12a_1$ (vt. joon. 108), sest q on võrdne protsessijoone-aluse pindalaga $12mn$, entalpia i_1 avaldub pindalaga $0T_0cba1n$ ja entalpia i_2 — pindalaga $0T_0ca_12m$.

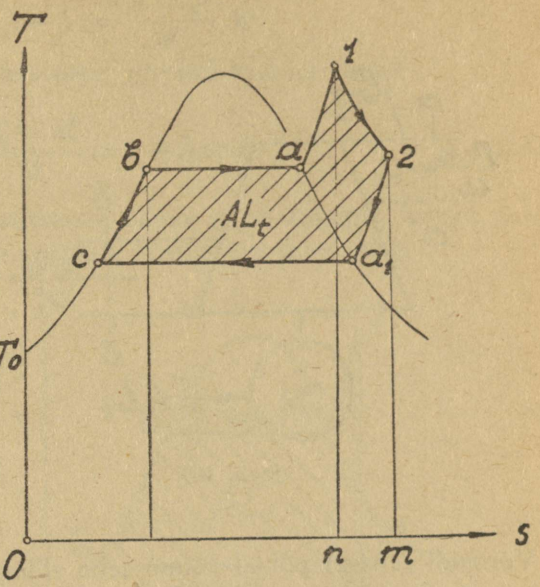
Võrrand (183) on tuletatav ka järgmisel viisil, mille esitame gaasijoa energia bilansi koostamisega tutvumise mõttes.

Võrrandi tuletamise aluseks võtame joonisel 109 antud skeemi. Skeem koosneb auru- või gaasijuhtmest, mida läbib sekundis G kg gaasi ja mille ristlõigete aa ja bb vahelisse ossa on lülitatud gaasi- või auruturbiin, mis sekundis sooritab GAL_t kilokalorit välistööd. Peale selle oletame veel, et sellesse süsteemi juhitakse sekundis väljastpoolt soojushulk Gg kcal.

Koostame selle süsteemi kohta energiabilansi, võttes aluseks, et energia jäävuse seaduse põhjal on juhtme ristlõiget bb läbiva gaasikoguse energia võrdne juhtme ristlõikest aa sissevoolava gaasikoguse energia ja

ristlõigete *aa* ning *bb* vahelises osas juurdetulnud ning äratarbitud energia algebralise summaga.

Juhtme ristlõikest *aa* sekundis sissevoolanud gaasikoguse energia moodustub gaasi siseenergiast Gu_1 kcal/sek, potentsiaalsest mehhaanilisest energiast (rõhuenergiast) GAp_1v_1 kcal/sek ja kineetilisest energiast $AG\frac{c_1^2}{2g}$ kcal/sek. Neile energia liikidele lisandub ristlõigete *aa* ja *bb* vahelises osas soojushulk Gq kcal/sek ja turbiinis väliseks mehhaaniliseks tööks tarbitav soojushulk GAL_t, mida tuleb vaadelda kui süsteemist eemalejuhitud komponenti.



Joon. 108.

Läbi juhtme ristlõike *bb* voolava gaasikoguse energia moodustab gaasi siseenergia Gu_2 kcal/sek, potentsiaalne mehhaaniline energia GAp_2v_2 kcal/sek ja kineetiline energia $GA\frac{c_2^2}{2g}$ kcal/sek.

Järelikult on energiabilanss avaldatav võrrandiga

$$Gu_1 + GAp_1v_1 + Gq + GA\frac{c_1^2}{2g} - GAL_t = Gu_2 + GAp_2v_2 + GA\frac{c_2^2}{2g}.$$

Koondades võrrandi võrdseid gaasi kaalulise kogusega G kg/sek, saame võrrandi avaldatuna ühe kilogrammi gaasi jaoks, s. o.

$$u_1 + Ap_1v_1 + q + A\frac{c_1^2}{2g} - AL_t = u_2 + Ap_2v_2 + A\frac{c_2^2}{2g}$$

ehk

$$i_1 + q + A\frac{c_1^2}{2g} - AL_t = i_2 + A\frac{c_2^2}{2g},$$

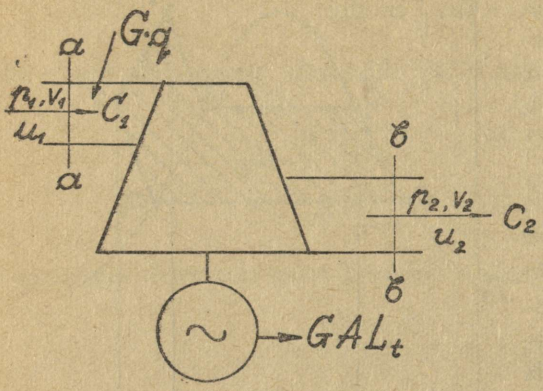
sest

$$u_1 + Ap_1v_1 = i_1,$$

$$u_2 + Ap_2v_2 = i_2.$$

Süsteemis esinenud kineetilise energia muutuse kaudu saab võrrandile anda kuju

$$A\,\frac{c_2^2-c_1^2}{2g}=i_1-i_2+q-AL_t. \qquad (184)$$



Joon. 109.

Kui oletame, et kogu kineetilise energia muutus tarbitakse turbiinis väliseks mehhaaniliseks tööks, s. o. oletame, et $c_2=c_1$, siis avaldub võrrand kujul

$$i_1-i_2+q-AL_t=0$$

ehk

$$i_1-i_2+q=AL_t.$$

Arvesse võttes, et võrrandi (183) järgi $i_1-i_2+q=AL_t'$, võime kirjutada võrduse

$$AL_t'=AL_t. \qquad (184\text{-a})$$

Võrrandi (184-a) põhjal võime teha alljärgnevad järeldused:

1. Turbiinis sooritatav väline mehhaaniline töö esindab alati tehnilist tööd, s. o. mehhaanilist tööd, mis *p-v*-diagrammil on piiratud protsessijoonest ja rõhkude teljest.

2. Kasustatav töö ideaalses turbiinis on täielikult muudetav väliseks mehhaaniliseks tööks, s. o. tehniliseks tööks.

Kui joonisel 109 esitatud skeemil ristlõigete *aa* ja *bb* vahelises osas turbiin puudub, siis $AL_t=0$ ja võrrand (184) muutub võrrandiks (182), s. o.

$$A\,\frac{c_2^2-c_1^2}{2g}=i_1-i_2+q.$$

Selle võrrandi diferentsiaalne kuju on

$$A\,\frac{c}{g}\,dc=-di+dq. \qquad (184\text{-b})$$

32. GAASI KIIRUS STATSIONAARSEL ADIABAATILISEL VOOLAMISEL.

Vaatleme juhtu, kui ideaalne gaas rõhu languse tõttu liigub statsionaarselt mööda mistahes ristlõikega toru või düüsi, mille seinad on soojakindlad ja seega ei võimalda gaasi ning väliskeskkonna vahelist soojusvahetust, s. o. vaatleme nn. gaasi adiabaatilist voolamist.

Gaasi adiabaatilisel voolamisel on võrrandis (183), s. o.

$$AL_t' = A\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = q + i_1 - i_2,$$

välissoojust esindav liige $q = 0$, mistõttu võrrand avaldub kujul

$$AL_t' = A\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = i_1 - i_2 = h, \qquad (185)$$

kus h on vaadeldavas voolamisprotsessis esinev gaasi entalpia langus, s. o. toru ristlõigete *aa* ja *bb* vaheline entalpia langus (vt. joon. 108).

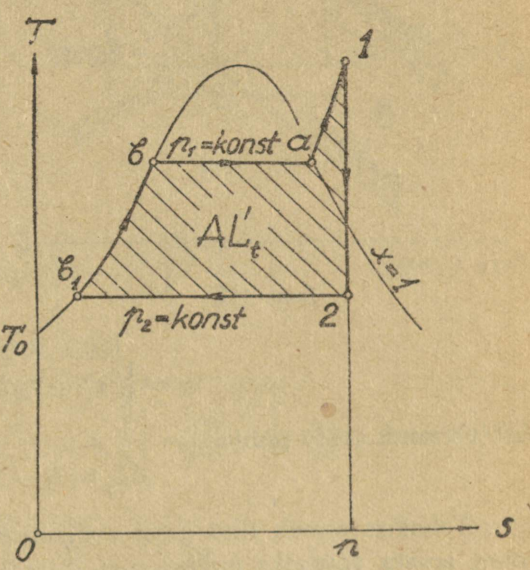
Võrrandi (185) diferentsiaalne kuju on

$$\frac{A}{g}\,cdc + di = 0 \qquad (186)$$

ehk

$$\frac{A}{g}\,cdc - dh = 0. \qquad (187)$$

Võrrand (185) annab ühtlasi adiabaatilises voolamisprotsessis esineva kasustatava töö, mis p-v-tasapinnal avaldub adiabaadist *12* ja rõhkude teljest piiratud pindalaga $p_1 12 p_2$ (vt. joon. 107). Auru puhul avaldub see töö T-s-diagrammil (vt. joon. 110) isobaarist $p_1 = konst$, $p_2 = konst$ ja adiabaadist *12* ning alumisest piirkõvera lõigust $b_1 b$ piiratud pindalaga, s. o.



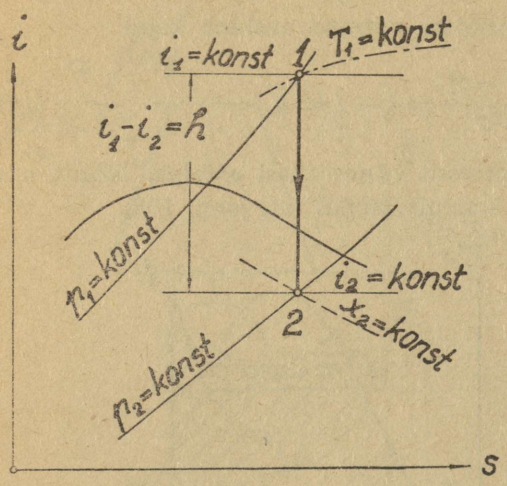
Joon. 110.

$$A\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = AL_t' = \text{pindala } b_1 ba12,$$

sest i_1 = pindala $0T_0 ba1n$ ja i_2 = pindala $0Tb_1 2n$, kui oletame, et vedeliku osas isobaar $p_1 = konst$ ühtib alumise piirkõveraga. i-s-diagrammil avaldub gaasi kineetilise energia muutus ehk kasustatav töö adiabaatilises protsessis *12* esineva entalpia langusega (vt. joon. 111), kusjuures protsessi algpunkti määravad kiirusele c_1 vastavad gaasi oleku parameetrid p_1 ja T_1 ning protsessi lõpp-punkti gaasi kiirusele c_2 vastav gaasi rõhk p_2 ja auru kuivusaste x_2.

Ilmutame võrrandi (185) kiiruse c_2 suhtes:

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + \frac{2g}{A}(i_1 - i_2)} = \sqrt{c_1^2 + 8378\,(i_1 - i_2)}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}. \qquad (188)$$



Joon. 111.

Võrrandist nähtub, et kui entalpia langus $i_1 - i_2$ on positiivne, siis esineb gaasi kiirenev liikumine, kui aga entalpia langus on negatiivne, siis gaas liigub aeglustuvalt.

Võrrandi (185) põhjal määrab liikme $(i_1 - i_2)$ märgi gaasi rõhu muutus gaasi liikumise suunas. Kui gaasi liikumise suunas gaasi rõhk väheneb, on entalpia langus positiivne, vastasel korral on ta negatiivne.

Võrrandi (188) võime esitada ka kujul

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + \frac{2g}{A} \cdot AL_t'},$$

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2gL_t'}, \qquad (189)$$

sest võrrandi (185) põhjal

$$AL_t' = i_1 - i_2.$$

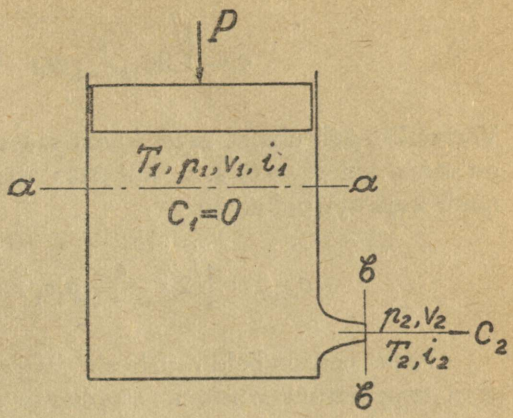
Tehnikas esineb tihti gaasi voolamise protsesse, kus gaasi algkiiruse c_1 võime arvata võrdseks nulliga, s. o. $c_1 = 0$. Sel puhul võrrand (188) avaldub kujul

$$c = \sqrt{\frac{2g}{A}(i_1 - i_2)} = \sqrt{8378\,(i_1 - i_2)} = 91{,}53\sqrt{(i_1 - i_2)}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}, \qquad (190)$$

kus i_1 on gaasi või auru entalpia gaasijoa ristlõikes *aa*, kus $c_1 = 0$ ja i_2 gaasi entalpia vaadeldavas ristlõikes *bb*, milles gaas liigub kiirusega c_2 m/sek. (joon. 112). Juhtu, kus gaasi liikumise algkiiruse võime arvata võrdseks nulliga ($c_1 = 0$), esindab näiteks gaasi väljavoolamine atmosfääri lõplikku ristlõiget omava düüsi kaudu aurumahutist või suurest gaasireservuaarist, kus gaasi parameetrid on p_1, v_1 ja T_1, või juht, milline on näidatud joonisel 112. Selles voolamisprotsessis gaasijoa ristlõikest *aa* ristlõikeni *bb* toimub pidev gaasi termiliste parameetrite muutus väärtustelt

p_1, v_1 väärtusteni p_2, v_2 ja gaasi või auru kiiruse muutus väärtuselt c_1 kuni väärtuseni c_2.

Arvutuse lihtsustamiseks on tihti auru *i-s*-diagrammidel võrrand (190) esindatud astmiku kaudu, millelt entalpia languse järgi on otseselt loetav kiirus c [m/sek].



Joon. 112.

Ilmutame gaasi kiiruse võrrandi (189) gaasi olekut määravate termiliste parameetrite kaudu. Selleks asendame võrrandis (189), s. o.

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2gL_t},$$

esineva kasustatava töö avaldisega võrrandist (193, I osa), s. o.

$$L_t = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \qquad \text{(193, I osa)}$$

Tehes selle asenduse, saame võrrandi kujul

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \ \frac{\text{m}}{\text{sek}} \qquad (191)$$

ehk, märkides rõhkude suhte

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}, \qquad (192)$$

saame

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \qquad (193)$$

Võrrandites (191), (192) ja (193) on p_1 ja v_1 gaasi rõhk [kg/m^2] ja kilomaht [m^3/kg] kiirusele c_1 vastavas gaasijoa ristlõikes ja p_2 gaasi rõhk kiirusele c_2 vastavas gaasijoa ristlõikes. Ideaalsete gaaside puhul saab võrrandi (193) esitada ka kujul

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2g \frac{k}{k-1} R(T_1 - T_2)}, \qquad (194)$$

sest võrrandi (192, I osa) järgi

$$L_t' = L_t = \frac{k}{k-1} R(T_1 - T_2). \qquad \text{(192, I osa)}$$

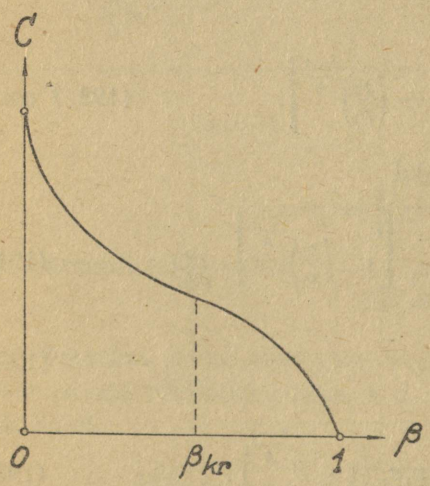
Juhul, kui gaasi liikumise kiirus c_1 on tähtsusetult väike ja märgime $c_2 = c$, saame võrrandi (193) kujul

$$c = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} \frac{\text{m}}{\text{sek}}. \qquad (195)$$

Võrrandist nähtub, et gaasi kiirus saavutab maksimumi, kui $\beta = 0$ ehk, mis on sama, kui $p_2 = 0$, s. o. kui gaas voolab absoluutsesse tühjusesse. Võrrandi kuju sel puhul on

$$c_{max} = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1} = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_1} \frac{\text{m}}{\text{sek}}. \qquad (196)$$

Peale eespoolöeldu nähtub võrrandist (194), et c_{max} puhul peab ka gaasi temperatuur võrduma absoluutse nulliga, s. o. $T_2 = 0$ °K.



Joon. 113.

Tegelikkuses ei saa seda olukorda esineda, sest reaalne gaas veeldub enne absoluutse nulli saavutamist.

Gaasi kiiruse sõltuvus suhtarvust β on näidatud joonisel 113 esitatud diagrammil. Jooniselt nähtub, et kiiruse muutus on kõige suurem piirkondades, kus $\beta = 1 \ldots 0{,}8$ ja $\beta = 0 \ldots 0{,}1$, kuna piirkonnas $\beta = 0{,}1 \ldots 0{,}8$ on kiiruse muutus lähedane lineaarsele seadusele. Piirkonnas $\beta = 0{,}5 \ldots 0{,}6$ omab kiiruse muutuse kõver käänupunkti. Käänupunktile vastava suhtarvu märgime edaspidises tähega β_{kr}. Suhtarvu selle väärtuse puhul, nagu edaspidi selgub, esineb nn. kriitiline kiirus.

Tehnilist tööd avaldav võrrand (193, I osa) on tuletatud eeldusel, et $k = konst.$ Paljudel juhtudel ei ole k siiski konstantne suurus, vaid sõltub gaasi temperatuurist, mille tõttu täpsetes arvutustes, kus see võimalik, on soovitav kasutada entalpia muutuse kaudu avaldatud kiiruse võrrandeid. Nii näiteks ülekuumendatud auru puhul $k = 1{,}3$, kuiva küllastunud auru jaoks 1,135 ja niiske auru korral $1{,}035 + 0{,}1\,x$. Seega muutub auru adiabaatilisel voolamisel astendaja k väärtus hüppeliselt.

Vedelikkude puhul, mille suhtes võib oletada, et maht ei sõltu rõhust, s. o. $v = konst$, saame kiiruse diferentsiaalvõrrandi (178)

$$\frac{c}{g}\,dc = -\,vdp$$

integreerimisega, s. o.

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp = -\,v\,(p_2 - p_1) = v\,(p_1 - p_2).$$

Ilmutades võrrandi c_2 suhtes ja pidades silmas, et $v = 1/\gamma$, saame

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2g\,\frac{p_1 - p_2}{\gamma}}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}\ ; \qquad (197)$$

kui algkiirus on tähtsusetult väike, s. o. $c_1 \approx 0$, siis

$$c_2 = \sqrt{2g\,\frac{p_1 - p_2}{\gamma}}\ . \qquad (198)$$

Võrrandid (197) ja (198) on rakendatavad kõigile ideaalsetele vedelikkudele ja erijuhtudel ka gaasidele, kui gaasi liikumise kiirus on niivõrd väike, et võib oletada seost $v = konst$.

33. GAASIJOA PIKIPROFIIL GAASI KIIRENEVAL LIIKUMISEL.

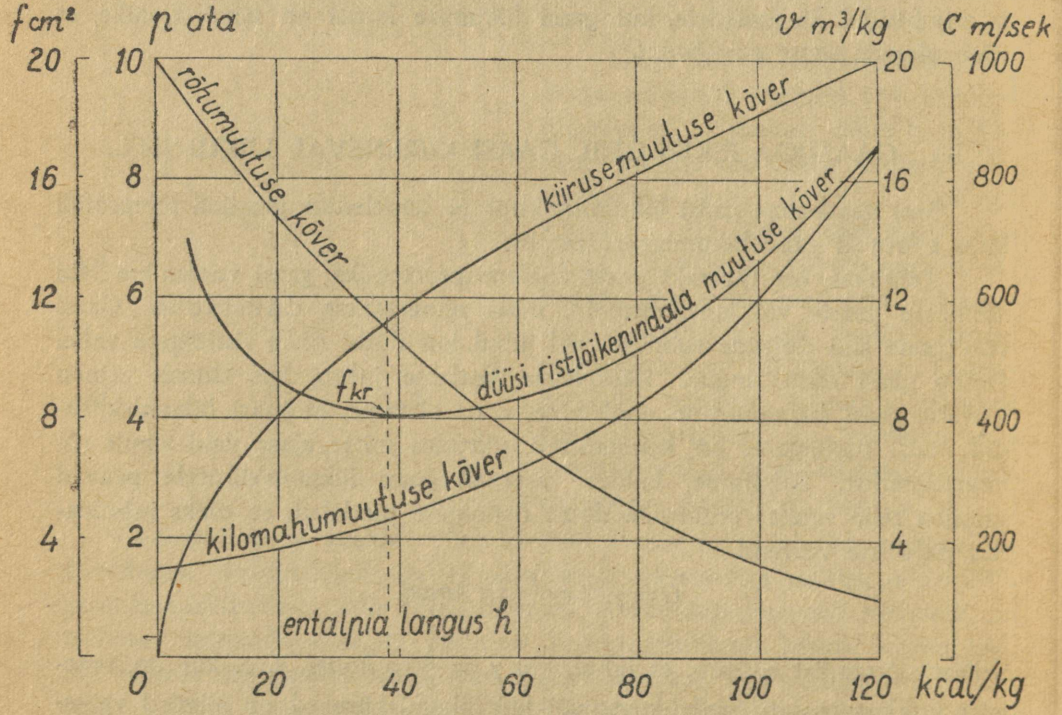
Seni vaatlesime gaasi liikumist, kuid ei käsitlenud gaasijoa pikiprofiili kuju sõltuvalt gaasi liikumiskiirusest jne.

Tehnikas on tähtsaks gaasi voolamisprotsessiks gaasi voolamine läbi lühikeste gaasi- või aurujuhtmete, mida nimetatakse **düüsideks**. Gaasi voolamine läbi düüside toimub vaid juhul, kui düüsi otste ristlõigete vahel esineb gaasi rõhu langus. Käesolevas vaatleme juhtu, kus düüsis esineb ideaalse gaasi statsionaarne voolamine, s. o. oletame, et gaasi liikumiskiirused düüsi ristlõigetes on konstantsed, sõltudes mitte ajast, vaid ainult rõhugradiendist. Selgitame, kuidas vastavalt gaasi liikumiskiirusele peavad gaasijoa telje suunas muutuma düüsi ristlõigete pindalad, et oleks rahuldatud pidevuse võrrand

$$G = \gamma Fc = \frac{Fc}{v} = konst.$$

Sellest võrrandist nähtub, et juhul, kui $\gamma = \frac{1}{v} = konst$, s. o. kui on tegemist kokkusurumatu vedelikuga, või kui liikumiskiirused on niivõrd väikesed, et ka gaasi puhul võime oletada seost $v = konst$, peab gaasi liikumise

suunas, kiiruse suurenemisel, vastavalt vähenema ristlõike pindala. Kui see nõue pole täidetud, ei rahulda voolamine pidevuse tingimust, mis tegelikult avaldub tühimikkude tekkimisega düüsis. Gaasi kiirel adiabaatilisel voolamisel ei jää kilomaht v konstantseks, vaid muutub ühes gaasi liikumiskiirusega. Nimelt langeb gaasi kiireneval liikumisel gaasi rõhk pidevalt gaasi liikumise suunas, millele vastavalt esineb gaasi paisumine ja ühes sellega kilomahu suurenemine. Pidevusvõrrandist järeldub, et düüsi osas, kus kilomahu suurenemine toimub aeglasemalt gaasi kiiruse muutusest, peab gaasijoa või düüsi ristlõike pindala voolamise suunas pidevalt vähenema. Düüsi osas aga, kus kilomaht suureneb kiiremini gaasi liikumiskiiruse muutusest, peab gaasijuhtme ristlõike pindala gaasi voolamise suunas pidevalt suurenema vastavalt gaasi paisumisele. Eelöeldut selgitab joonisel 114 esitatud diagramm, kus entalpia languse $i_1 - i_2$ järgi on antud ülekuumendatud auru rõhu, kilomahu, kiiruse ja düüsi ristlõike pindala muutus auru adiabaatilisel voolamisel. Jooniselt nähtub, et düüsi ristlõike pindala düüsi telje suunas gaasijoas esineva rõhu langusega pidevalt väheneb kuni miinimumini ja hakkab siis suurenema, kusjuures gaasi düüsisse sissevoolu rist-



Joon. 114.

lõige teoreetiliselt peaks saama lõpmatuks, kui selles ristlõikes oletame gaasi liikumiskiiruse võrdseks nulliga, s. o. $c_1 = 0$.

Selgitame eespooltoodut matemaatilise analüüsiga, kasutades gaasijoa pidevuse võrrandit (177). Ilmutame võrrandi düüsi ristlõike pindala F suhtes ja diferentseerime võrrandit, silmas pidades, et $F = \varphi(v, c)$:

$$F = G\frac{v}{c},\quad dF = G\frac{v}{c}\left(\frac{dv}{v} - \frac{dc}{c}\right).$$

Asendame $G = F\frac{c}{v}$ ja jagame võrrandi võrdseid F-ga, saame

$$\frac{dF}{F} = \frac{dv}{v} - \frac{dc}{c}. \tag{199}$$

Avaldame võrrandi parema poole gaasi rõhu kaudu. Selle teostame järgnevalt. Võrrandi (178) põhjal

$$\frac{dc}{c} = -\frac{gvdp}{c^2}.$$

Adiabaadivõrrandi $pv^k = konst$ diferentseerimisega leiame, et

$$pkdv = -vdp,$$

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dp}{kp}.$$

Asendades võrrandis (199) suhted $\frac{dv}{v}$ ja $\frac{dc}{c}$ saadud avaldistega, võime võrrandi kirjutada kujul

$$\frac{dF}{F} = \frac{gvdp}{c^2} - \frac{dp}{kp},$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{gkpv - c^2}{kc^2}\cdot\frac{dp}{p}. \tag{200}$$

Juhul, kui düüsis esineb gaasi kiirenev liikumine, s. o. toimub gaasi entalpia muundumine kineetiliseks energiaks, on suhe $\frac{dp}{p}$ düüsi teljel negatiivne. Seda aluseks võttes selgub võrrandist (200), et suhe $\frac{dF}{F}$ on negatiivne vaid düüsi telje selles osas, kus kiiruse ruut c^2 on väiksem korrutisest $gkpv$. Düüsi telje punktis, kus $c^2 = gkpv$, saavutab ristlõike pindala oma miinimumi. Sellest punktist edasi liikudes hakkab ristlõike pindala suurenema, sest siis muutub suhe $\frac{dF}{F}$ positiivseks, kuna sel puhul korrutis $gkpv$ jääb väiksemaks kiiruse ruudust, s. o. $gkpv - c^2 < 0$. Gaasi kiirust düüsi ristlõikes, kus esineb ristlõike pindala miinimum, nimetatakse kriiti-

liseks kiiruseks. Kriitilise kiiruse väärtuse, mille tähistame c_{kr}, leiame tingimusest

$$gkpv - c_{kr}^2 = 0,$$

$$c_{kr} = \sqrt{gkpv} = \sqrt{gkp_{kr}v_{kr}} = \sqrt{gkRT_{kr}}, \tag{201}$$

kus p ja v on gaasi parameetrid kriitilises ristlõikes, milliseid edaspidises tähistame sümbolitega p_{kr}, T_{kr} ja v_{kr}.

Arvesse võttes, et $\gamma = 1/v$ ning $\gamma/g = \varrho$ kg · sek^2 · m^{-4}, võime võrrandi avaldada ka kujul:

$$c_{kr} = \sqrt{gkp_{kr}v_{kr}} = \sqrt{k\frac{p_{kr}}{\varrho_{kr}}}, \tag{202}$$

kus ϱ_{kr} on gaasi tihedus kriitilises ristlõikes, s. o. ühe kuupmeetri gaasi mass. Füüsikast teame, et võrrand (202) avaldab helilevimiskiirust keskkonnas, mille tihedus on ϱ_{kr} ja rõhk p_{kr}. Selle põhjal võime öelda, et gaasi kiireneval liikumisel peab düüsi ristlõike pindala vähenema pidevusvõrrandi kohaselt kuni ristlõikeni, kus gaas saavutab oma parameetritele vastava helilevimiskiiruse. Kiirustel üle helikiiruse peab düüsi ristlõike pindala suurenema, sest sel puhul paisub gaasi maht kiiremini, kui suureneb gaasi liikumiskiirus. Järelikult gaasi väljavoolamisel düüsi kaudu suurt mahtu omavast gaasireservuaarist või anumast, mis on esitatud joonisel 112 jne., omab düüs kriitilist ristlõiget ehk nn. kurku, kui väliskeskkonna ja reservuaaris oleva gaasi rõhkude vahe tingib gaasi voolamiskiiruse düüsis, mis on suurem helilevimiskiirusest. Kui aga gaasi voolamise kiirus düüsis ei ületa helilevimiskiirust, siis ei oma düüs kriitilist ristlõiget, vaid esindab lihtsat reservuaarist väljapoole kitsenevat koonust jne.

Vaatleme nüüd gaasi voolamise pöördprotsessi, s. o. juhtu, mil toimub gaasi voolamine läbi düüsi gaasireservuaari väljastpoolt. Selles voolamisprotsessis esineb düüsi telje ulatuses gaasi aeglustuv liikumine ja ühes sellega gaasijoa kineetilise energia muundumine potentsiaalseks energiaks, mis väljendub gaasi siseenergia ja ühes sellega ka gaasi rõhu suurenemises vastavalt gaasi liikumiskiiruse vähenemisele ehk, mis on sama, gaasi entalpia suurenemises.

Võrrandist (200) järeldame, et juhul, kui gaasi voolamise kiirus düüsisse on väiksem voolava gaasi parameetritele p ja v vastavast helilevimiskiirusest, siis peab düüsi ristlõike pindala suurenema väljastpoolt reservuaari suunas, s. o. düüs ei oma kriitilist ristlõiget, sest sel puhul on võrrandi parem pool positiivne:

$$\frac{dp}{p} > 0 \text{ ja } gkpv - c^2 > 0.$$

Kui gaasi voolamine düüsisse toimub helikiirusest suurema kiirusega, siis omab düüs võrrandi (200) põhjal kriitilist ristlõiget, s. o. selles voolamisprotsessis peab düüsi ristlõike pindala gaasi liikumise suunas vastavalt vähenema kuni kriitilise ristlõikeni ja tagapool kriitilist ristlõiget suurenema. See on tingitud asjaolust, et kuni kriitilise ristlõikeni on võrrandi (200) parem pool negatiivne $\left(\frac{dp}{p} > 0 \text{ ja } gkpv - c^2 < 0\right)$ ja tagapool kriitilist ristlõiget positiivne $\left(\frac{dp}{p} > 0 \text{ ja } gkpv - c^2 > 0\right)$.

Düüsi pikkus ideaalse gaasi puhul, nagu seda saab järeldada ka gaasi voolamise võrranditest, ei mõjuta gaasi liikumise kiirust, vaid määrab ainult gaasi rõhu jaotuse düüsi telje ulatuses.

34. GAASI KULU VÕRRAND STATSIONAARSEL ADIABAATILISEL VOOLAMISEL.

Vaatleme esiteks statsionaarse voolamise üldjuhtu, kui gaas voolab parameetritel p_1, v_1 ja T_1 algkiirusega c_1 gaasijuhtmest läbi düüsi keskkonda, kus kogu voolamisprotsessi vältel keskkonna rõhk p_2 jääb konstantseks, kuid on soovikohaselt muudetav mõnele teisele jäävale väärtusele.

Tuletame gaasi kulu võrrandi, kasutades selleks pidevusvõrrandit

$$G = f_2 \frac{c_2}{v_2} \frac{\text{kg}}{\text{sek}},$$

kus c_2 ja v_2 on gaasi kiirus [m/sek] ja kilomaht [m³/kg] düüsist väljavoolamisel, f_2 — düüsi väljavooluotsa elavristlõike pindala [m²] ja G — sekundis düüsi läbiv gaasi kaaluline kogus kilogrammides. Edaspidises nimetame suurust G gaasivoolu hulgaks ehk ka gaasi kuluks.

Asendame pidevusvõrrandis adiabaatilise protsessi võrrandist $p_2 v_2^k = p_1 v_1^k$ parameetri v_2 avaldisega

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = v_1 \frac{1}{\beta^{\frac{1}{k}}}$$

ja gaasi kiiruse c_2 võrrandist (193), saame gaasi kulu võrrandi kujul

$$G = f_2 \beta^{\frac{1}{k}} \frac{1}{v_1} \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right) + c_1^2} =$$

$$= f_2 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \beta^{\frac{2}{k}} \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right) + \left(\frac{c_1}{v_1}\right)^2 \beta^{\frac{2}{k}}},$$

$$G = f_2 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right) + \left(\frac{c_1}{v_1} \right)^2 \cdot \beta^{\frac{2}{k}}}. \qquad (203)$$

Selles võrrandis on p_1, v_1 ja c_1 gaasijuhtme mingis kindlalt fikseeritud ristlõikes esinev gaasi rõhk, kilomaht ja kiirus. Edaspidises nimetame gaasi algkiirusele c_1 vastavaid parameetreid gaasi algoleku parameetriteks.

Et jõuda üldiselt selgusele gaasi kulu, s. o. sekundis düüsi läbiva gaasi kaalulise koguse olenevuse kohta gaasi algoleku parameetritest, anname suhtele p_1/v_1 kuju

$$\frac{p_1}{v_1} = \frac{p_1^2}{v_1 p_1} = \frac{p_1^2}{RT_1}.$$

Selle suhte ja võrrandi (203) põhjal võime öelda, et gaasi kulu G väärtus gaasi samal algkiirusel ja temperatuuril sõltub gaasi iseloomust, s. o. adiabaadi astendajast k, gaasi algrõhust p_1 ja suhtarvust β, s. o. keskkonna rõhu suhtest gaasi algrõhuga, kusjuures oletame, et keskkonna rõhk p_2 on võrdne gaasi rõhuga düüsiotsa ristlõikes. Edasi nähtub võrrandist (203), et maksimumi saavutab G suhtarvu β säärasel väärtusel, mil juuremärgi all olev avaldis omab maksimumi. Suhtarvu β seda väärtust nimetame kriitiliseks suhteks ja märgime, nagu eespool juba tähendatud, tähisega β_{kr}.

Kriitilise suhte leiame juuremärgi all oleva avaldise esimese tuletise nullväärtuse tingimusest [25], s. o.

$$2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k} \beta^{\frac{2-k}{k}} - \frac{k+1}{k} \beta^{\frac{1}{k}} \right) + \left(\frac{c_1}{v_1} \right)^2 \cdot \frac{2}{k} \beta^{\frac{2-k}{k}} = 0.$$

Korrutades võrdust suurusega $\beta^{\frac{k-2}{k}}$ ja ilmutades suhtarvu β_{kr}, saame

$$2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k} - \frac{k+1}{k} \beta^{\frac{k-1}{k}} \right) + \left(\frac{c_1}{v_1} \right)^2 \cdot \frac{2}{k} = 0,$$

$$\beta_{kr} = \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{c_1^2 (k-1)}{2g k p_1 v_1} \right) \right]^{\frac{k}{k-1}}. \qquad (204)$$

Teades suhtarvu β_{kr} suurust on kriitiline rõhk arvutatav võrrandiga

$$p_{kr} = \beta_{kr} \cdot p_1. \qquad (204\text{-a})$$

Võrrandist (204) nähtub, et kriitiline suhe sõltub gaasi algparameetrite p_1 ja v_1 korrutisest, s. o. gaasi algtemperatuurist T_1, sest $p_1 v_1 = RT_1$, gaasi algkiirusest c_1 ja gaasi iseloomust, mida karakteriseerib adiabaadi astendaja k. Välisele

[25] Antud juhul määrab esimese tuletise nullväärtus G_{max}, sest teine tuletis on negatiivne.

rõhule p_2 vastava kriitilise rõhu, nagu järeldub võrrandist (204-a), leiame β_{kr} pöördväärtuse kaudu, s. o.

$$p'_{kr} = p_2 \cdot \frac{1}{\beta_{kr}} = p_2 \beta'_{kr} = p_2 \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \qquad (204\text{-b})$$

Juhul, kui gaasi algkiirus $c_1 = 0$, s. o. kui voolamisprotsessi lähteristlõikena vaatleme gaasijoa säärast ristlõiget, kus võime oletada voolamiskiiruse võrdseks nulliga, avalduvad võrrandid (203) ja (204) kujul

$$G = f_2 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{v_0} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)}, \qquad (205)$$

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \qquad (206)$$

Nendes võrrandites on p_0 ja v_0 gaasi termilised parameetrid gaasijoa ristlõikes, milles gaasi voolamise kiirus $c_1 = 0$. Säärase ristlõikena võime vaadelda näiteks gaasireservuaari mingit ristlõiget, milles gaasi liikumiskiirus on tähtsusetult väike jne.

Juhul, kui p_0, v_0 ja T_0 on teadmata ja on antud p_1, v_1, T_1 ja neile parameetritele vastav gaasi kiirus c_1, siis on parameetrid p_0, v_0 ja T_0 arvutatavad fiktiivse adiabaatilise voolamisprotsessi tingimustest, milles oletame gaasi kiiruse muutust nullist kuni kiiruseni c_1. Selles oletatavas voolamisprotsessis on ideaalse gaasi kineetiline energia avaldatav võrrandiga

$$\frac{c_1^2}{2g} = \frac{k}{k-1} R(T_0 - T_1),$$

kust leiame T_0 väärtuse, s. o.

$$T_0 = T_1 + \frac{(k-1)c_1^2}{2gRk}. \qquad (207)$$

Parameetrid p_0 ja v_0 arvutame adiabaadi võrranditega

$$p_0 = p_1 \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \qquad (208)$$

$$v_0 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}}. \qquad (209)$$

Kasutades *i-s*-diagrammi, saame parameetrid p_0 ja T_0 määrata võrrandi (185) kaudu, s. o.

$$A \frac{c_1^2}{2g} = i_0 - i_1 = h, \qquad (210)$$

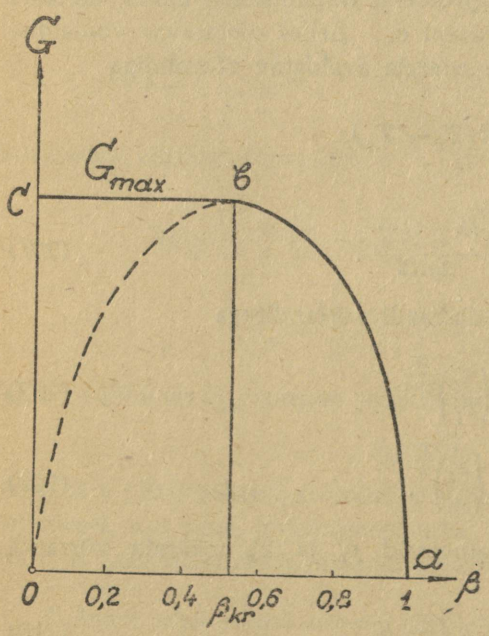
kus h on gaasi oletatav entalpia langus gaasi nullkiiruselt kuni kiiruseni c_1. Teades h väärtust, asetame i-s-diagrammil parameetritega p_1 ja T_1 määratud punktist (vt. joon. 117) mööda adiabaati, s. o. mööda vertikaali, ülespoole entalpia languse h ja saamegi parameetreid i_0, p_0 ja T_0 määrava punkti.

Võrrandeist (205) ja (206) nähtub, et $c_1 = 0$ puhul gaasi ühel ja samal temperatuuril sõltub G gaasi iseloomust, s. o. adiabaadi astendajast k, gaasi algrõhust ja suhtarvust β. Kriitiline suhe aga sõltub üksnes gaasi iseloomust.

Analüüsime gaasi kulu avaldavat võrrandit (205)

$$G = f_2 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{v_0} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)} \frac{\text{kg}}{\text{sek}}.$$

Valime täisnurkse koordinaatide süsteemi (joon. 114-a), kus abstsissteljele on kantud β väärtused $\beta = 0$ kuni $\beta = 1$ ja ordinaatteljele gaasi hulga G väärtused. Andes β-le väärtusi 1 kuni β_{kr}, avaldub gaasihulga muutus kõverana ab, kusjuures punktis b, mis vastab $\beta = \beta_{kr}$, G omab maksimumi. Seda G väärtust nimetatakse ka gaasi kriitiliseks ehk maksimaalseks kuluks, mille edaspidises märgime tähisega G_{max}. Suhtarvu β vähendamisel allapoole β_{kr}-st esineb võrrandi (205) põhjal G vähenemine, kusjuures G muutub nulliks $\beta = 0$ puhul, nagu on joonisel 114-a näidatud kriipsjoonega bo.



Joon. 114-a.

Võrrandiga (205) fikseeritud gaasi kulu vähenemine kriitilisest rõhust

$$p_2 = p_{kr} = p_0 \beta_{kr}$$

väiksematel rõhkudel on seletatav gaasi paisumisega. Nimelt rõhu p_2 vähenemisel alla kriitilist rõhku muutub gaasi paisumiskiirus suuremaks gaasi kiiruse juurdekasvust, mistõttu düüsi otsa ristlõike läbilaskevõime väheneb. Näiteks kui $\beta = 0$, on ka $p_2 = 0$, s. o. kui gaas düüsist voolab absoluutsesse tüh-

jusse, on võrrandi (205) järgi $G = 0$, sest rõhul $p_2 \to 0$ gaasi kilomaht $v_2 \to \infty$.

Võrrandiga (205) fikseeritud säärane gaasi kulu muutus diagrammi haru *bo* osas on siiski absurdne. See ongi nii, sest katsed näitavad, et gaasi kulu muutust mööda kõvera *bo* haru tegelikult ei esine, vaid alates punktist *b*, kus G omab maksimumi, muutub G konstantseks ja gaasi kulu määrav joon avaldub diagrammil β-teljega rööpse sirgena *bC*. Järelikult, gaasi kulu suureneb gaasi voolamisel läbi düüsi keskkonna rõhu vähenemisel ainult kuni kriitilise rõhuni ($p_2 = \beta_{kr} p_0$), kuid keskkonna rõhu vähendamine alla kriitilist rõhku kuni absoluutse tühjuseni ei suurenda ajaühikus düüsist väljavoolavat gaasi kaalulist kogust.

Selle nähtuse selgitamiseks vaatleme gaasi kulu ja kiirust määravate võrrandite (205) ja (195) rakendamist voolamisprotsessile.

Vaatleme esiteks gaasi voolamist läbi voolamise suunas kitseneva düüsi. Sel puhul asub minimaalset pindala omav ristlõige düüsi väljavooluotsal.

Düüsist gaasi väljavoolu kiirus ja gaasi kulu alakriitilises piirkonnas, s. o. suhtarvu β muutusel 1-st kuni β_{kr}-ni, on arvutatavad võrranditega (195) ja (205), s. o.

$$c_2 = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_0 v_0\left(1-\beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}RT_0\left(1-\beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad \frac{\text{m}}{\text{sek}}$$

ehk

$$c_2 = 91{,}53\sqrt{i_0 - i_2} \quad \frac{\text{m}}{\text{sek}},$$

$$G = f_{min}\sqrt{2g\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{v_0}\left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)} \quad \frac{\text{kg}}{\text{sek}},$$

kus f_{min} on düüsi väljavooluotsa, s. o. düüsi suudme ristlõike pindala [m^2] ja β — keskkonna rõhu p_2 suhe gaasi algrõhuga p_0, s. o.

$$\beta = \frac{p_2}{p_0}.$$

Juhul, kui $\beta = \beta_{kr}$, s. o. kui keskkonna rõhk p_2, kuhu gaas voolab, on võrdne või väiksem kui

$$p_2 = p_0\beta_{kr} = p_0\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^2},$$

saame gaasi kiirust ja kulu määravad võrrandid, asendades võrrandites (195) ja (205)

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Selle asendusega taanduvad need võrrandid kujusse

$$G_{max} = f_{min}\sqrt{gk\frac{p_0}{v_0}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}\ \frac{\text{kg}}{\text{sek}} \tag{211}$$

ehk

$$G_{max} = f_{min}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{2g\frac{k}{k+1}\frac{p_0}{v_0}}\ \frac{\text{kg}}{\text{sek}}, \tag{212}$$

$$c_{kr} = \sqrt{2g\frac{k}{k+1}p_0v_0} = \sqrt{2g\frac{k}{k+1}RT_0}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}. \tag{213}$$

Entalpia kaudu avaldub kriitiline kiirus

$$c_{kr} = 91{,}53\sqrt{i_0 - i_{kr}}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}, \tag{214}$$

kus i_{kr} on kriitilisele rõhule p_{kr} vastav entalpia, mis on määratav i-s-diagrammile kantud adiabaatilisest voolamisprotsessist rõhu p_{kr} kaudu.

Kriitilist kiirust avaldavale võrrandile (213) on võimalik anda veel teine kuju, kui asendame võrrandis esineva korrutise p_0v_0 tema avaldisega adiabaatilise voolamisprotsessi võrrandist

$$\frac{c_{kr}^2}{2g} = \frac{k}{k-1}(p_0v_0 - p_{kr}v_{kr}).$$

Selle võrrandi järgi

$$p_0v_0 = \frac{k-1}{k}\cdot\frac{c_{kr}^2}{2g} + p_{kr}v_{kr}.$$

Tehes võrrandis (213) selle asenduse, saame ta pärast tehteid kujul

$$c_{kr} = \sqrt{gkp_{kr}v_{kr}}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}},$$

kus v_{kr} on kriitilisele rõhule p_{kr} vastav gaasi kilomaht.

Saadud võrrand on samane võrrandiga (202) ja avaldab gaasi kriitilistele parameetritele p_{kr} ja v_{kr} vastavat helilevimiskiirust.

Sellest järgneb, et kitseneva düüsi kaudu voolava gaasi kogus sekundis on maksimaalne, kui gaasi väljavoolu kiirus

düüsist on võrdne gaasi kriitilistele parameetritele vastava helilevimiskiirusega. See juhtum leiab aset, kui keskkonna rõhk, kuhu gaas düüsist voolab, on võrdne kriitilise rõhuga või on sellest väiksem.

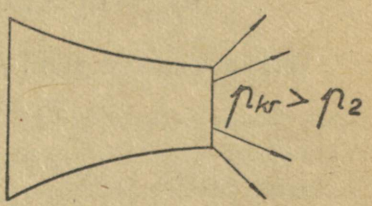
Keskkonna rõhu vähendamine alla kriitilist rõhku, nagu varem tähendatud, ei suurenda düüsist voolava gaasi kaalulist kogust.

See nähtus on tingitud sellest, et keskkonna rõhu p_2 vähendamisel alla kriitilist rõhku moodustub düüsi suudmes, s. o. düüsi otsa juures, kriitilisele rõhule võrdne konstantne vasturõhk, mis ei ole enam mõjutatav temast madalamast keskkonna rõhust. Rõhu muutuste levik keskkonnas, nagu see on teada füüsikast, toimub keskkonna oleku parameetritele vastava helilevimiskiirusega, sest heli ongi keskkonnas esinevate pikirõhulainete levik. Järelikult, kui oletame, et muudame keskkonna rõhu, millesse düüsi kaudu voolab gaas, madalamaks kriitilisest rõhust, siis see rõhu muutuse olukord ei kandu enam edasi düüsi suudmeni, kuna gaasi voolamiskiirus düüsist on niisama suur nagu rõhu muutuse levimiskiiruski.

Eespooltoodust on selge, et kitseneva düüsi puhul on gaasi kiiruse ja gaasi kulu võrrandid kehtivad ainult alakriitilise piirkonna jaoks, s. o. rõhult p_0 kuni kriitilise rõhuni, kusjuures gaasi hulk ja kiirus düüsis saavutavad oma maksimumi rõhkude suhtarvu kriitilisel väärtusel. Gaasi voolamiskiiruse piirdumine kitseneva düüsi puhul kriitilise kiirusega ei võimalda nende düüsidega gaasi adiabaatilisel voolamisel muuta kogu kasutada olevat rõhu langust ja ühes seega ka kogu kasustatavat tööd või kasustatavat entalpia langust kineetiliseks energiaks, vaid ainult seda osa, mida määrab antud gaasi või auru algrõhule vastav kriitiline rõhk. Allpool kriitilist rõhku esinev entalpia langus või kasustatav töö jääb kasutamata.

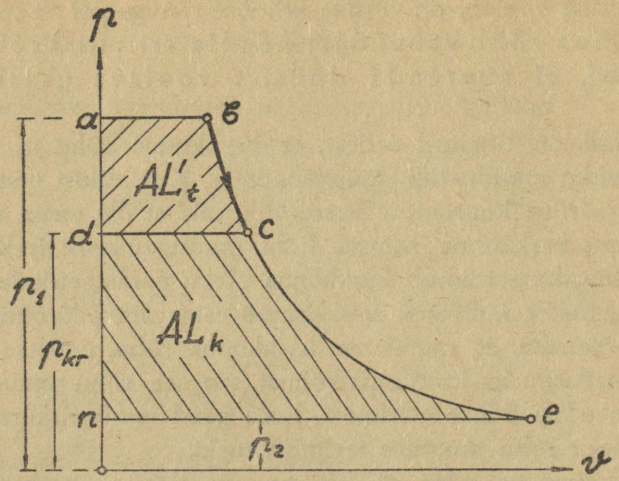
Gaasi paisumine kui ka kiiruse edasine muutus toimub väljaspool düüsi, keskkonnas, kus gaasi kineetiline energia muundub tagasi soojuseks, jne.

Gaasi väljavool düüsist keskkonda ei toimu sel puhul rööpselt düüsi teljega, nagu siis, kui keskkonna rõhk on suurem kriitilisest rõhust, vaid düüsi suudmest alates paiskub juga koonuseliselt laiali (vt. joon. 115). Laialipaiskumise nurk on seda suurem, mida suurem on kriitilise rõhu ja keskkonna rõhu vahe. Seda nähtust tingib düüsist kriitilisel rõhul väljuva auru või gaasi tung paisuda keskkonna rõhuni jne.



Joon. 115.

i-s-diagrammil määrab kasustatava entalpia languse entalpia langus h_{kr} ja kasutamata osa entalpia langus h_k, nagu on näidatud joonisel 117.



Joon. 116.

p-v-diagrammil (joon. 116) vastab h_{kr}-le pindala *abcd* ja h_k-le pindala *dcen*, mis on kaotsi läinud kasustatava töö osa.

Vastavalt üksikutele gaasidele kujunevad gaasi kriitilist kiirust ja kriitilist gaasi hulka määravad võrrandid alljärgnevaiks.

Võttes kaheaatomilistel gaasidel $k = 1{,}4$ leiame, et

$$p_{kr} = 0{,}528 \cdot p_0. \tag{215}$$

Välisrõhule p_2 vastav kriitiline rõhk võrrandi (204-b) järgi avaldub

$$p'_{kr} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot p_2 = 1{,}894\ p_2. \tag{215-a}$$

$$\left.\begin{aligned} c_{kr} &= 3{,}38 \sqrt{p_0 v_0} = 3{,}38 \sqrt{RT_0}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}, \\ G_{max} &= G_{kr} = 2{,}145\, f_{min} \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}\ \frac{\text{kg}}{\text{sek}}. \end{aligned}\right\} \tag{215-b}$$

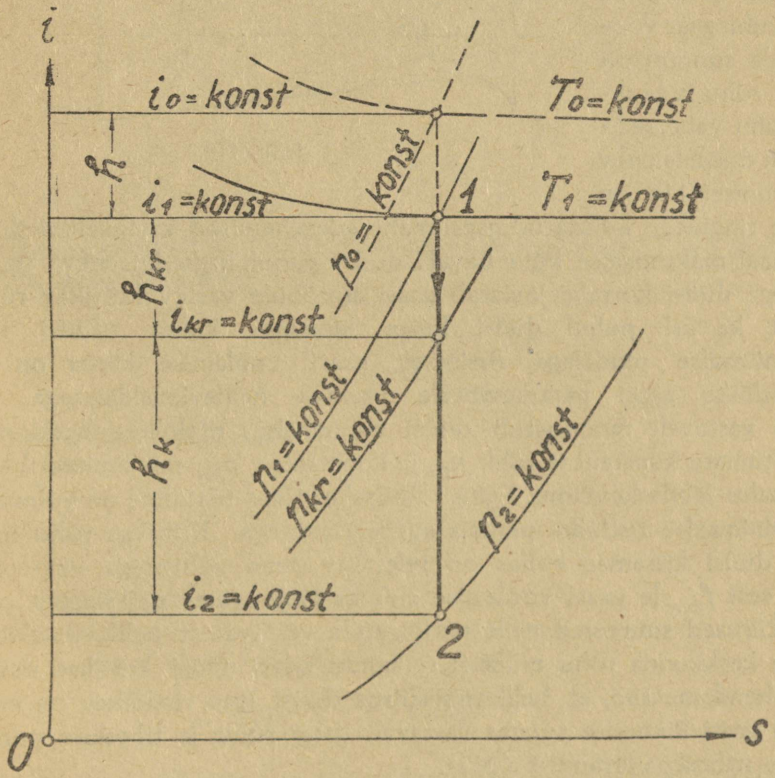
Ülekuumendatud aurul $k = 1{,}3$, järelikult

$$\left.\begin{aligned} p_{kr} &= 0{,}546\ p_0, \\ c_{kr} &= 3{,}33 \sqrt{p_0 v_0}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}, \\ G_{max} &= G_{kr} = 2{,}09\ f_{min} \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}\ \frac{\text{kg}}{\text{sek}}. \end{aligned}\right\} \tag{216}$$

Kuival küllastunud aurul $k = 1{,}135$, seega

$$\left.\begin{aligned} p_{kr} &= 0{,}577\ p_0\,, \\ c_{kr} &= 3{,}23\sqrt{p_0 v_0}\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}\,, \\ G_{max} &= G_{kr} = 1{,}99\, f_{min}\sqrt{\frac{p_0}{v_0}}\ \frac{\text{kg}}{\text{sek}}\,. \end{aligned}\right\} \qquad (217)$$

Gaaside või aurude voolamisprotsessides, kui keskkonna rõhk, kuhu gaas voolab, on madalam kriitilisest rõhust, saab kogu kasustatava entalpia

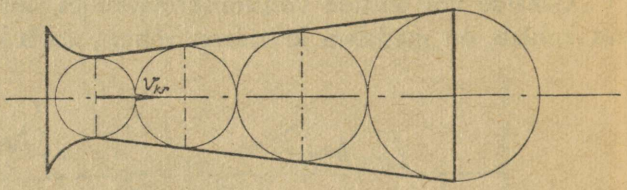


Joon. 117.

languse muuta kineetiliseks energiaks, kui düüsi, alates minimaalsest ristlõikest, pikendada gaasi voolamise suunas osaga, mille ristlõike pindala gaasi voolamise suunas suureneb vastavalt gaasi paisumisele (vt. eelmine paragrahv). Sääräses düüsis suureneb gaasi kiirus pidevalt ristlõikest ristlõikeni kuni väljavoolu suudmeni, kus ta saavutab oma maksimaalse väärtuse. Düüsi

suudmele õigesti valitud ristlõike pindala puhul on düüsist väljavoolava gaasi rõhk võrdne keskkonna rõhuga p_2.

Kirjeldatud kriitilise ristlõikega düüsi nimetatakse Laval'i düüsiks. Järelikult tuleb kasutada neid düüse, kui keskkonna rõhk, kuhu gaas voolab, on väiksem antud juhule vastavast kriitilisest rõhust. Rõhkude piirkonda allpool kriitilist rõhku nimetatakse ülekriitiliseks piirkonnaks. Laval'i düüsi laienemine algab kriitilisest ristlõikest 8—11°-lise nurga all (vt. joon. 118), kusjuures laieneva koonilise osa pikkus sõltub keskkonna rõhust, kuhu gaas voolab. Mida suurem on kriitilise rõhu ja keskkonna rõhu vahe, seda pikem on düüsi laienev osa. Joonisel 118 on üksikute ringidega kujutatud gaasi mahu suurenemised vastavalt ristlõigetele.



Joon. 118.

Gaasi maksimaalse kulu Laval'i düüsi puhul, nagu kitseneva ühepoolse koonusega düüsi korralgi, määrab gaasi algrõhule vastav kriitiline rõhk ehk β_{kr}, sest ka sel puhul düüsi kõige kitsamas kohas (düüsi kurgus), s. o. minimaalse pindalaga ristlõikes, gaasi voolamise kiirus on võrdne selle ristlõike gaasi parameetritele vastava helilevimiskiirusega. Sellele kiirusele vastavalt moodustub düüsi minimaalses ristlõikes keskkonna rõhust sõltumatu konstantne rõhk p_{kr} ja konstantne v_{kr}, mis limiteeribki düüsi maksimaalse läbilaskevõime. Düüsi läbilaskevõime tõstmine on võimalik vaid düüsi minimaalse ristlõike pindala suurendamisega. Kriitilise rõhu moodustumine düüsi kitsamas kohas on seletatav sama nähtusega, nagu eelmisel juhulgi, sest f_{min}-le gaasi voolamise suunas järgnevates ristlõigetes on gaasi liikumiskiirused suuremad neile ristlõigetele vastavatest helilevimiskiirustest, mistõttu keskkonna rõhu muutus ei kandu edasi düüsi kriitilise ristlõikeni.

Tähendame siin, et helilevimiskiirus düüsi igas ristlõikes on erinev ja väheneb gaasi liikumise suunas vastavalt gaasi rõhu ja tiheduse muutusele, nagu see nähtub võrrandist (202).

Düüsi minimaalse ristlõike pindala f_{min} väärtuse, mis vastab düüsi läbilaske võimele G kg gaasi sekundis, saame arvutada võrrandiga (211), lahendades viimase f_{min} suhtes, s. o.

$$f_{min} = \frac{G}{\sqrt{gk \frac{p_0}{v_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \text{ m}^2, \qquad (218)$$

$$\frac{G}{f_{min}} = \sqrt{gk \frac{p_0}{v_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{sek}} \tag{219}$$

ehk

$$\frac{G}{f_{min}} = \sqrt{gk \frac{p_0^2}{p_0 v_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = p_0 \sqrt{\frac{gk}{RT_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{sek}} \tag{220}$$

Ühe cm²-lise pindala kohta võrrandid avalduvad

$$\frac{G}{f_{min}} = 10^{-4} \sqrt{gk \frac{p_0}{v_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2\text{sek}} \tag{221}$$

$$\frac{G}{f_{min}} = 10^{-4} \cdot p_0 \sqrt{\frac{gk}{RT_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2\text{sek}} \cdot \tag{222}$$

Võrrandite (215-b), (216) ja (217) põhjal avalduvad f_{min} väärtused kaheaatomiliste gaaside jaoks:

$$f_{min} = \frac{G}{2{,}145 \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}} \text{ m}^2. \tag{223}$$

Ülekuumendatud auru puhul on

$$f_{min} = \frac{G}{2{,}09 \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}} \text{ m}^2 \tag{224}$$

ja kuiva küllastunud auru jaoks

$$f_{min} = \frac{G}{1{,}99 \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}} \text{ m}^2. \tag{225}$$

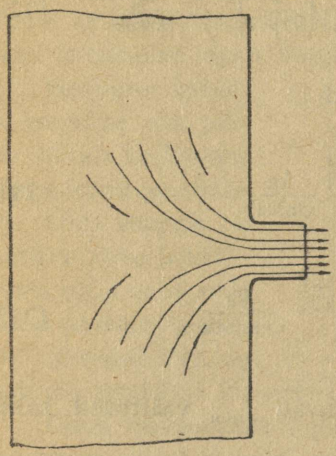
Selgitame gaasi statsionaarset voolamist läbi düüsi, mille ristlõike pindala kogu düüsi pikkuse ulatuses on konstantne suurus. Selle düüsi puhul, aluseks võttes pidevusvõrrandit

$$G = f \cdot c \cdot \gamma \quad \frac{\text{kg}}{\text{sek}},$$

on kogu düüsi pikkuse ulatuses gaasi voolamise kiirus jääv suurus.

Gaasi kiirustevälja voolujooni eespool düüsi sissevoolu otsa näitab

joonis 119. Kui välisrõhk on väiksem kriitilisest rõhust, moodustub düüsi väljavooluotsa suudmes kriitiline rõhk, nagu voolamissuunas kitseneva düüsi puhulgi. Järelikult limiteerib ka selle düüsi korral gaasi kiiruse c_{max} ja düüsi läbiva gaasi kulu G_{max} kriitiline rõhk.



Joon. 119.

Gaasi voolamine õhukesse seina tehtud ava kaudu ei allu eespooltoodud seadusele. Nimelt ei limiteeri kriitiline rõhk siin G_{max} väärtust. Katsed näitavad, et gaasivoolu vastuvõtva keskkonna rõhu vähendamisel ka alla kriitilise rõhu suureneb läbi ava voolav gaasikogus. See on seletatav asjaoluga, et avast väljuv gaasijuga kuni teatava kauguseni seinast moodustab nagu kitseneva düüsi (joon. 120), mille minimaalne kriitiline pindala on sõltuv keskkonna rõhust.

Eespooltoodust selgus, et gaasi voolamisprotsesside uurimisel on kõigepealt vaja selgitada, kas uuritava juhul esineb kriitiline olukord, ja vastavalt sellele lahendada voolamisega seosesolevad küsimused.

Näide. Kompressordiislis on kütuse pihustusõhu rõhk $p_1 = 65$ ata ja temperatuur $t_1 = 30°$ C.

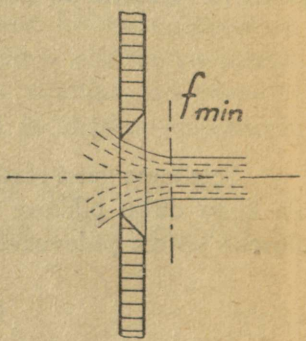
Arvutada pihustusõhu silindrisse voolamise kiirus c_2, temperatuur t_2 ja õhukulu sekundis, kui vasturõhk silindris on $p_2 = 40$ ata ning õhupihusti ava läbimõõt $d = 3{,}5$ mm. (Oletame ideaalset voolamist.)

Lahendus. Antud juhul võime oletada, et pihustusõhu voolamine mootori silindrisse toimub läbi silindrilise düüsi.

Kõigepealt selgitame, kas antud juhul esineb kriitiline olukord. Kaheaatomiliste gaaside puhul on kriitiline rõhk määratud võrrandiga (215)

$$p_{kr} = 0{,}528\ p_1 = 0{,}528 \cdot 65 = 34{,}32 \text{ ata}$$

ja on väiksem silindris komprimeerimistakti lõpul teotsevast vasturõhust ($p_2 = 40$ ata). Järelikult peame ülesande lahendamiseks kasutama võrrandeid vastavalt alakriitilisele olukorrale.



Joon. 120.

Pihustusõhu silindrisse voolamise kiiruse arvutame võrrandiga (195)

$$c_2 = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}RT_1\left(1-\beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \cdot 29{,}27 \cdot 303\left[1-\left(\frac{40}{65}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}\right]} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}5 \cdot 29{,}27 \cdot 303\ (1-0{,}8703)} =$$

$$= \sqrt{78990{,}047} = 281{,}05 \text{ m/sek.}$$

Õhu temperatuuri arvutame adiabaadi võrrandiga

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{40}{65}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}},$$

$$T_2 = T_1\ (0{,}6153)^{0{,}286} = 303 \cdot 0{,}8703 \approx 264^\circ \text{ K},$$

$$t_2 = 264 - 273 = -9^\circ \text{ C}.$$

Õhu kulu sekundis arvutame võrrandiga (205)

$$G = f\sqrt{2g\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)}.$$

Antud juhul

$$f_1 = \frac{\pi d^2}{4} = 9{,}616 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.$$

Gaaside karaktervõrrandi põhjal

$$\frac{p_1}{v_1} = \frac{p_1^2}{RT_1} = \frac{65^2 \cdot 10^8}{29{,}27 \cdot 303} = 47638860,$$

$$\beta^{\frac{2}{k}} = \left(\frac{40}{65}\right)^{\frac{2}{1{,}4}} = (0{,}6153)^{1{,}429} = 0{,}4996,$$

$$\beta^{\frac{k+1}{k}} = \left(\frac{40}{65}\right)^{\frac{1{,}4+1}{1{,}4}} = (0{,}6153)^{1{,}714} = 0{,}4350,$$

$$\frac{k}{k-1} = \frac{1{,}4}{1{,}4-1} = 3{,}5,$$

$$\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} = 0{,}4996 - 0{,}4350 = 0{,}0646.$$

Tehes need asendused kuluvõrrandis, saame

$$G = 9{,}616 \cdot 10^{-2} \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}4764 \cdot 0{,}0646} =$$

$$= 9{,}616 \cdot 10^{-2} \cdot 1{,}4537 = 0{,}140 \ \frac{\text{kg}}{\text{sek}}.$$

Näide. Õhu rõhk kompressorseadme ressiivris on $p_1 = 5$ ata ja temperatuur $t_1 = 20°$ C.

1. Arvutada õhuvoolu kiirus õhkkonda läbi kitseneva düüsi, mille suudme läbimõõt on 10 mm, kui õhkkonna baromeetriline rõhk $B =$ $= 760$ mm Hg.

2. Arvutada läbi düüsi väljavoolava õhu kaaluline kogus minutis.

3. Arvutada õhu väljavoolu kiirus ja kulu läbi Laval'i düüsi, kui düüsi kurgu läbimõõt on 10 mm.

Lahendus. Esiteks selgitame, kas antud juhul esineb kriitiline olukord. Kaheaatomiliste gaaside puhul on kriitilise rõhu suurus

$$p_{kr} = 0{,}528 \cdot p_1 = 0{,}528 \cdot 5 = 2{,}64 \text{ ata},$$

mis on suurem õhkkonna rõhust. Järelikult tuleb arvutused vastavalt esimesele ja teisele küsimusele lahendada kriitilise olukorra tingimuste kohaselt.

Õhu väljavoolu kiiruse leiame võrrandiga (215-b), s. o.

$$c_{max} = c_{kr} = 3{,}38 \sqrt{RT_1} = 3{,}38 \sqrt{29{,}27 \cdot 293} =$$

$$= 3{,}38 \cdot 92{,}61 = 313{,}02 \ \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Düüsi suudme läbimõõt ja õhkkonna rõhk düüsist väljavoolava õhu kiirusele mõju ei avalda.

Õhu kulu läbi düüsi arvutame võrrandi (215-b) järgi, mille antud juhu jaoks avaldame kujul

$$G_{max} = G_{kr} = 2{,}145 \cdot 60 \cdot f_{min} \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \ \frac{\text{kg}}{\text{min}}.$$

Düüsi suudme ristlõikepindala on

$$f_{min} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 100}{4} \cdot 10^{-6} = 78{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2,$$

$$\frac{p_1}{v_1} = \frac{p_1^2}{RT_1} = \frac{5^2 \cdot 10^8}{29{,}27 \cdot 293} = 291{,}5074 \cdot 10^4.$$

Tehes need asendused võrrandis, saame

$$G_{max} = G_{kr} = 2{,}145 \cdot 60 \cdot 78{,}50 \cdot 10^{-4} \sqrt{291{,}5074} =$$

$$= 2{,}145 \cdot 60 \cdot 78{,}50 \cdot 17{,}07 \cdot 10^{-4} = 17{,}25 \frac{\text{kg}}{\text{min}}.$$

Laval'i düüsi puhul jääb õhu kulu samaks, sest düüsi kurgu ristlõike pindala on ülesande tingimuste kohaselt võrdne kitseneva düüsi suudme ristlõikega. Õhu väljavoolu kiirust õhkkonda läbi Laval'i düüsi arvutame võrrandiga

$$c_2 = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}.$$

Eeldame, et gaas paisub düüsis kuni õhkkonna rõhuni $B = 760$ mm Hg. Rõhkude suhe antud juhul on

$$\beta = p_2 : p_1 = \frac{B}{735{,}6} : p_1 = \frac{760}{735{,}6 \cdot 5} = 0{,}20663,$$

$$\beta^{\frac{k-1}{k}} = (0{,}20663)^{0{,}4/1{,}4} = 0{,}63701,$$

$$1 - \beta^{0{,}286} = 1 - 0{,}63701 = 0{,}36299.$$

Tehes need asendused võrrandis leiame, et

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}5 \cdot 29{,}27 \cdot 293 \cdot 0{,}36299} = \sqrt{213772{,}61} = 462{,}3 \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Näide. Ülekuumendatud aur, mille rõhk on 25 ata ja temperatuur 500° C, voolab läbi Laval'i düüsi, paisudes düüsis kuni rõhuni 1 ata. Määrata düüsi kurgu ja välise suudme ristlõikepindalad ning auru väljavoolu kiirus düüsist (kadudeta voolamine).

Lahendus. Ülekuumendatud auru tabelist leiame, et $p_1 = 25$ ata ja $t_1 = 500°$ C puhul on auru parameetrid

$$v_1 = 0{,}1426 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}},$$

$$i_1 = 826{,}4 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$s_1 = 1{,}7500 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Auru parameetrid düüsist väljumisel leiame adiabaatilise protsessi tingimustest.

Kuiva küllastunud auru tabeli järgi vastavalt rõhule 1 ata on

$$v_2' = 0{,}0010428 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}},$$

$$i_2' = 99{,}12 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$s_2' = 0{,}3096 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}},$$

$$v_2'' = 1{,}725 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}},$$

$$i_2'' = 638{,}5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$s_2'' = 1{,}7587 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Auru kuivusastme ehk auru sisalduse protsessi lõpuks määrame võrrandiga

$$s_2 = s_2' + (s_2'' - s_2')\, x_2,$$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = \frac{1{,}7500 - 0{,}3096}{1{,}7587 - 0{,}3096} = 0{,}994.$$

Auru kilomaht v_2 ja entalpia i_2 protsessi lõpul on

$$v_2 = v_2' + (v_2'' - v_2')\, x_2 =$$

$$= 0{,}0010 + (1{,}725 - 0{,}0010) \cdot 0{,}994 = 1{,}715 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}},$$

$$i_2 = i_2' + (i_2'' - i_2')\, x_2 =$$

$$= 99{,}12 + (638{,}5 - 99{,}12) \cdot 0{,}994 = 536{,}14 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Järelikult on auru väljavoolamise kiirus düüsist

$$c_2 = 91{,}5 \sqrt{i_1 - i_2} = 91{,}5 \sqrt{826{,}4 - 536{,}14} =$$

$$= 91{,}5 \cdot 17{,}0 = 1555{,}5 \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Düüsi välise suudme ristlõike pindala arvutame pidevusvõrrandiga, s. o.

$$G = \frac{f_2 \cdot c_2}{v_2},\quad f_2 = \frac{v_2}{c_2} G = \frac{1{,}715}{1555{,}5} G = 0{,}0011025\ G\ \text{m}^2.$$

Düüsi ristlõike pindala düüsi kurgus arvutame võrrandiga (224), s. o.

$$f_{min} = \frac{G}{2{,}09 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} = \frac{G}{2{,}09 \sqrt{\frac{25 \cdot 10^4}{0{,}1426}}} =$$

$$= \frac{G}{2{,}09 \cdot 1324{,}07} = 0{,}000361\ G\ \text{m}^2.$$

Düüsi ristlõigete pindalade suhe on

$$\frac{f_2}{f_{min}} = \frac{0{,}0011025}{0{,}000361} = 3{,}054.$$

Näide. Kompressorita diisli kütteainepihustis on kütuse rõhk 300 ata. Arvutada kütuse väljavoolu kiirus düüsist, kui vasturõhk silindris on 40 ata ja kütuse erikaal $\gamma = 900$ kg/m^3. Tehes oletuse, et kütus on kokkusurumatu, võime kiiruse arvutamiseks kasutada võrrandit (198), s. o.

$$c_2 = \sqrt{2g\frac{p_1 - p_2}{\gamma}} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{(300 - 40) \cdot 10^4}{900}} = 238 \ \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

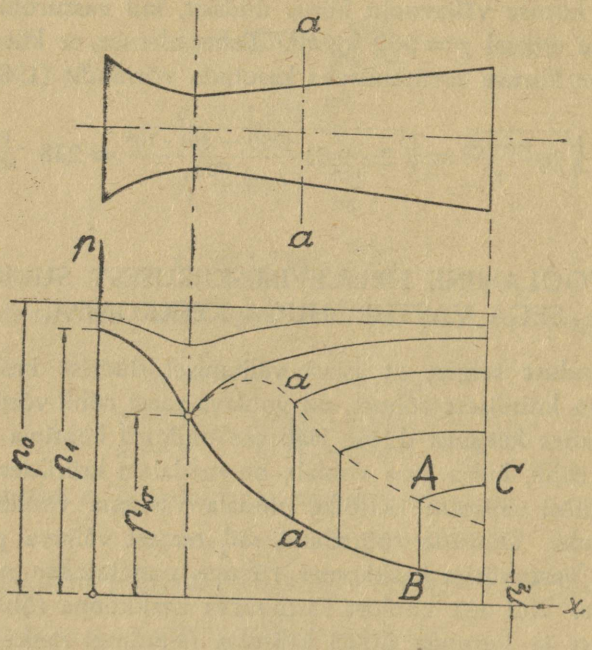
35. GAASI VOOLAMINE HELILEVIMISKIIRUSEST SUUREMA KIIRUSEGA VASTURÕHUGA KESKKONDA.

Eespooltoodust selgus, et gaasi väljumisel düüsist keskkonda, mille rõhk on kõrgem kriitilisest rõhust, on voolava gaasi rõhk võrdne keskkonna rõhuga. Kasutades kurguga düüsi, jääb see olukord kehtima ka sel puhul, kui keskkonna rõhk, kuhu gaas voolab, on madalam kriitilisest rõhust, kuid selleks peab düüsi välisotsa ristlõike pindala vastama voolust vastuvõtva keskkonna rõhule. Düüside töörežiimi, mil temast väljuva gaasi rõhk on võrdne voolust vastuvõtva keskkonna rõhuga, nimetatakse normaalseks tööreżiimiks. Kui aga voolust vastuvõtva keskkonna rõhk on madalam kriitilisest rõhust ja kurguga düüsi välisotsa (suudme) ristlõike elavpindala on suurem, kui seda määrab voolust vastuvõtva keskkonna rõhk, siis peaks düüsist väljuva gaasi rõhk düüsi välisotsa ristlõikes teoreetiliselt olema madalam voolust vastuvõtva keskkonna rõhust. Säärast voolamisprotsessi nimetatakse voolamiseks vasturõhuga keskkonda. Vasturõhu puhul võib tegelikult esineda kaks juhtu. Kui düüsi koonus on normaalsest suurem, siis katkeb gaasijuga düüsi seinalt kohas, kus rõhk on võrdne vasturõhuga. Sel puhul kohandab end düüs ise vasturõhuga.

Kui aga düüsi koonus on väike, s. o. normaalne, siis gaasijuga ei katke düüsi seinalt, vaid paisub edasi madalama rõhuni, kui seda on keskkonna vasturõhk. Kuid teataval kaugusel välisotsast gaasi rõhk düüsis tõuseb järsu hüppena ja tasandub edasivoolamisel kuni keskkonna rõhuni, nagu on näidatud joonisel 121 joonena *BAC*. Seda nähtust nimetatakse gaasi tihenduslöögiks. Teda saadab alati gaasijoa kineetilise energia kadu, sest rõhu tõusuga kui ka löögiga on alati seotud gaasi kiiruse langus. Suurendades vasturõhku nihkub rõhu tõus düüsi kurgu poole, millele vastavalt muutub

ka rõhu tõusu iseloom, nagu see joonisel 121 on näidatud rõhu muutuse kõveratega.

Düüsi läbiv gaasi kaaluline kogus vasturõhuga töörežiimil on samane gaasi kaalulise kogusega normaalsel töörežiimil seni, kuni düüsi kurgus voolamine toimub helilevimiskiirusega.



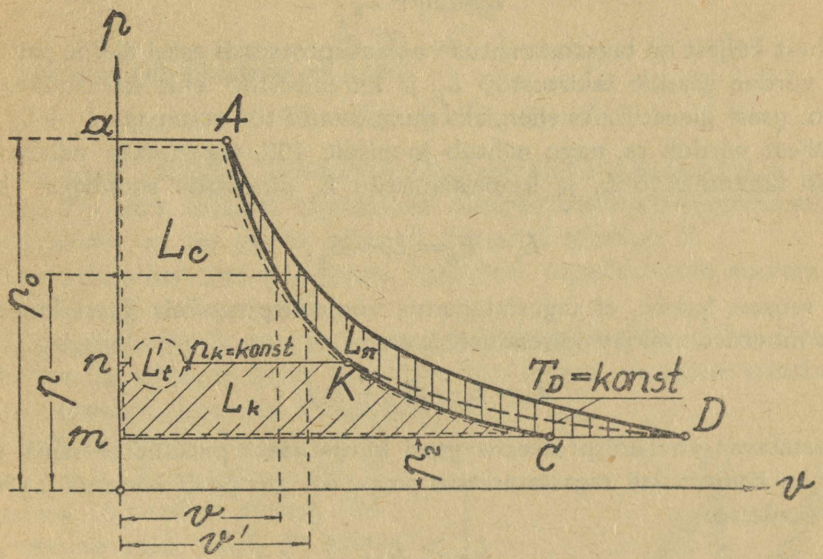
Joon. 121.

36. REAALSE GAASI ADIABAATILINE VOOLAMINE LÄBI DÜÜSI.

Reaalse gaasi või auru voolamine läbi düüside ja torude toimub termodünaamika seisukohast tagastatamatult. Tingituna reaalse gaasi sitkusest (püdelusest) esineb voolamisprotsessis nii molekulide eneste kui ka gaasi ja düüsi seinte vaheline hõõrdumine, mille tagajärjel osa gaasi kineetilisest energiast tarbitakse hõõrdumistöö sooritamiseks. See osa kineetilisest energiast muutub samaaegselt tagastatamatult h õ õ r d u m i s s o o j u s e k s. Hõõrdumissoojuse pideva tekkimisega on lisapaisumisest tingituna vooluse ristlõigetes gaasi rõhk tagastatamatus voolamisprotsessis suurem kui tagastatavas protsessis, või tagastatava ja tagastatamatu protsessi korral on ühel ja samal isobaaril tagastatamatus protsessis gaasi või auru kilomaht suurem kui tagastatavas protsessis (vt. joon. 122, mahud v ja v').

Sel põhjusel kulgeb tagastatamatu voolamisprotsessi joon *p-v*-diagrammil alati pealpool tagastatava protsessi joont, nagu on näidatud joonisel 122 esitatud *p-v*-diagrammil.

Joonisel 122 tähistab joon *AC* tagastatavat ja joon *AD* — tagastatamatut adiabaatilist voolamisprotsessi gaasi kiireneva liikumise jaoks. Prot-



Joon. 122.

sessi joon *AD* esindab ühtlasi tagastatamatu protsessi tasakaalukõverat [26], kusjuures oletame, et töötav keha protsessi lõppolekus saavutab tasakaalu tagastatava protsessi lõppoleku isobaari mööda, s. o. rõhul $p_2 = konst$, mistõttu nii tagastatava kui ka tagastatamatu protsessi lõppoleku punktid asuvad alati ühel ja samal isobaaril.

Selgitame tagastatamatus voolamisprotsessis gaasi kasustatava ehk kiirendus-, hõõrdumis- ja kadutöö vahelisi seoseid, kasutades selleks joonisel 122 esitatud *p-v*-diagrammi.

Märgime gaaside üldise mahulise paisumistöö tagastatamatus voolamisprotsessis *AD* tähisega *L* (pindala *ADma*), tagastatavas adiabaatilises protsessis *AC* tähisega L_t' (pindala *ACma*), hõõrdumissoojusest tingitud lisapaisumistöö, mida avaldab pindala *ADC*, tähisega L_n, gaasi hõõrdumistöö tähisega L_R ja tegelikus, s. o. tagastatamatus voolamisprotsessis gaasi

[26] J. Ivand, „Tehniline termodünaamika I", paragrahv 88.

kiirendamiseks tarbitud, s. o. kineetiliseks energiaks muundunud töö (kasustatava töö), tähisega L_c. Nende tööliikide kaudu saame tagastatamatu voolamisprotsessi üldise töö L avaldada seoste kaudu

$$L = L_c + L_R,$$

$$L = L_t' + L_n,$$

sest ühest küljest on tagastatamatus voolamisprotsessis gaasi üldine paisumistöö L võrdne gaaside takistustöö L_R ja kiirendustöö ehk kasustatava töö L_c, s. o. gaasi kineetiliseks energiaks muundunud töö summaga $L_c + L_R$; teisest küljest võrdub ta, nagu nähtub jooniselt 122, tagastatava adiabaatilise protsessi kiirendustöö L_t' ja lisapaisumistöö L_n pindalade summaga. Järelikult

$$L_c + L_R = L_t' + L_n. \tag{226}$$

Sellest seosest leiame, et tagastatamatus voolamisprotsessis gaasi kineetilise energia muutust avaldav kiirendustöö on

$$L_c = L_t' - (L_R - L_n). \tag{a}$$

Et tagastatavas voolamisprotsessis gaasi kiirus gaasi paisumisel sama lõpprõhuni on suurem kui tagastatamatus protsessis, siis peab võrrandi (a) põhjal kehtima võrratus

$$L_R > L_n.$$

Sellest selgub, et võrrandis (a) esinev suurus $L_R - L_n$ on positiivne ja avaldab tagastatamatus voolamisprotsessis esinevat töökadu, mis järelikult on väiksem gaasi hõõrdumistööst L_R. Märkides töökao tähisega L_k, võime ta avaldada kujul

$$L_k = L_R - L_n. \tag{b}$$

Võrrandeist (a) ja (b) järgneb, et tagastatamatus voolamisprotsessis tagastub osa hõõrdumistööst kasuliku soojusena ja muutub gaasijoa rõhu energiaks. See soojushulk on ekvivalentne p-v-diagrammi pindalaga ADC.

Töökadu L_k on määratav eksperimentaalselt, nn. energia kao ehk takistuskoefitsiendi kaudu. Märkides selle koefitsiendi tähisega ξ, võime ta tagastatava voolamiprotsessi kasustatava, s. o. kiirendustöö L_t' kaudu avaldada kujul

$$\xi = \frac{L_k}{L_t'} \tag{c}$$

või

$$L_k = \xi \cdot L_t'. \tag{d}$$

Selle koefitsiendi kaudu avaldub võrrandite (a) ja (b) põhjal reaalse voolamisprotsessi kiirendustöö ehk gaasijoa kineetilise energia muutus võrrandiga

$$L_c = L_t' - \xi L_t' = L_t'(1-\xi). \qquad (e)$$

Arvesse võttes, et võrrandi (185) järgi

$$L_t' = \frac{i_0 - i_2}{A},$$

saame võrrandi (e) avaldada ka kujul

$$AL_c = (i_0 - i_2)(1-\xi), \qquad (f)$$

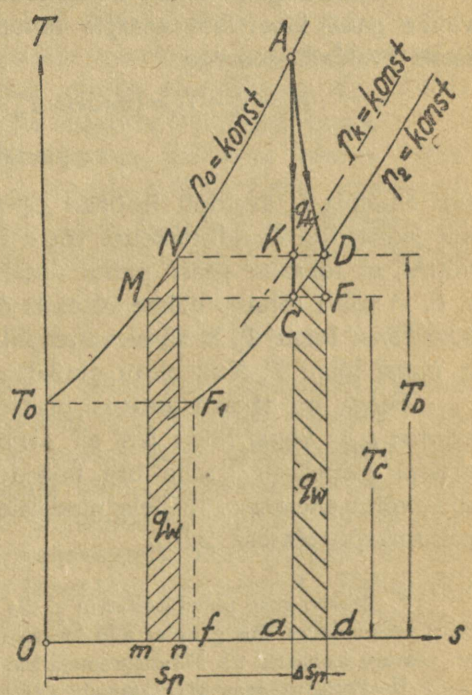
kus i_0 on gaasi või auru entalpia voolamisprotsessi alguses, kui $c_1 = 0$, ja i_2 — gaasi või auru entalpia tagastatava adiabaatilise voolamisprotsessi lõpul. T-s-diagrammil on see punkt edaspidi märgitud tähisega C.

Eespooltoodust annab selgema kujutluse tagastatamatu voolamisprotsessi uurimine T-s-diagrammil.

Et selgusele jõuda tagastatamatus voolamisprotsessis esineva kineetilise energia kao ja töötava keha töövõime kao suhtes, vaatleme esiteks joonisel 122 esitatud protsessi T-s-diagrammil.

Põhiliselt jäävad ka sel puhul kehtima kõik „Termodünaamika I" paragrahvis 88 toodud alused. Erinevus seisneb vaid selles, et paragrahvis 88 vaatlesime tagastatamatuid protsesse, milles töötav keha saavutas sisemise tasakaaluoleku isohooriliselt, voolamisprotsessides oletame aga, et töötav keha saavutab sisemise tasakaalu isobaariliselt, s. o. jäával rõhul.

Gaasi adiabaatiline voolamisprotsess T-s-diagrammil on antud joonisel 123. Joon AC tähistab tagastatava ja joon AD tagastatamatu protsessi joont. Mõlemad protsessid algavad gaasi algrõhu isobaari $p_0 = konst$ punktist A ja kulgevad kuni düüsi väljavoolu suudmes mõjuva rõhu isobaarini $p_2 = konst$. Tagastatamatu protsessi lõpp-punkt D on nihkunud tagas-



Joon. 123.

tatava protsessi lõpp-punktist C gaasi sisemisest hõõrdumissoojusest tingitud entroopia juurdekasvu Δs_p võrra mööda isobaari $p_2 = konst$ paremale.

Selles protsessis gaasi kineetilise energia arvel tekkiva hõõrdumissoojushulga q_r määrab protsessi joone AD alune pindala $ADda$. Märkides tagastatavas voolamisprotsessis gaasi kineetilise energia muutuse tähisega E_t ja tagastatamatu protsessi oma tähisega E_c ning oletades, et diagrammil on entalpia nullnivooks temperatuur T_0 ja et gaasi erisoojus c_p on vaid temperatuuri funktsioon, s. o. ei sõltu rõhust, võime tagastatava protsessi puhul kineetilise energia muutuse avaldada seosega

$$E_t = i_0 - i_2 = \text{pindala } T_0AaO - \text{pindala } T_0MmO = \\ = \text{pindala } MAam,$$

sest entalpia i_0 avaldub isobaari $p_0 = konst$ lõigu T_0A all oleva pindalaga T_0AaO ja entalpia i_2 isobaari $p_2 = konst$ lõigu F_1C all oleva pindalaga F_1Caf, mis isobaaride ekvidistantsuse tõttu on võrdne pindalaga T_0MmO. Seega on E_t võrdne isobaari $p_0 = konst$ lõigu MA all oleva pindalaga $MAam$.

Märkides gaasi entalpia tagastatamatu protsessi lõppolekus tähisega i_D, võime gaasi kineetilise energia muutuse E_c tagastatamatus voolamisprotsessis avaldada seosega

$$E_c = i_0 - i_D = \text{pindala } T_0AaO - \text{pindala } T_0NnO = \\ = \text{pindala } NAan,$$

sest entalpia i_D avaldub isobaari $p_2 = konst$ lõigu F_1D all oleva pindalaga, mis isobaaride ekvidistantsuse tõttu on võrdne pindalaga T_0NnO. Arvesse võttes, et ideaalse gaasi puhul entalpia on vaid temperatuuri funktsioon, s. o. ei sõltu rõhust, võime otseselt öelda, et entalpia i_2 avaldub isobaari $p_0 = konst$ lõigu T_0M all oleva pindalaga T_0MmO ja entalpia i_D isobaari $p_0 = konst$ lõigu T_0N all oleva pindalaga T_0NnO *.

Seega on tagastatamatus protsessis gaasi kineetilise energia muutus võrdne $p_0 = konst$ lõigu NA all oleva pindalaga $NAan$. Jääkpindala ADC määrab leppeliselt [27] selle osa hõõrdumissoojusest, mis muutub tagasi gaasijoa rõhu energiaks. Sellele pindalale on p-v-diagrammil ekvivalentne lisapaisumistöö pindala ADC.

---

* Reaalse gaasi puhul isobaarid ei ole ekvidistantsed kõverad neis rõhu ja temperatuuri piirkondades, kus gaas ei allu ideaalse gaasi karaktervõrrandile. Näiteks selle kohta on veeauru isobaarid nii T-s-diagrammil kui ka i-s-diagrammil.

[27] Protsessi joon AD kannab puhtleppelist iseloomu. Protsessi käigus ta pole määratav.

Toodust järgneb, et võrreldes tagastatava protsessiga on tagastatamatus protsessis gaasi kineetilise energia kadu, mille märgime tähisega E_k, avaldatav isobaari $p_2 = konst$ lõigu CD all oleva pindalaga $CDda = q_w$, mis on võrdne isobaari $p_0 = konst$ lõigu MN all oleva pindalaga $MNnm$, s. o.

$$E_k = q_w = i_D - i_2 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{227}$$

ehk

$$AL_k = E_k = c_{pm}(T_D - T_2). \tag{227-a}$$

Võrrandiga (227-a) määratud soojushulk on ekvivalentne p-v-diagrammil tagastatava adiabaatilise protsessi AC (joon. 122) kiirendustööd avaldava pindalaga, mis asetseb temperatuurile T_D ja protsessi lõpptemperatuurile T_2 vastavate isobaaride vahel, sest võrrandi (227-a) põhjal on L_k vaadeldav adiabaatilise tehnilise tööna, mille saame, kui gaas paisub temperatuurile T_D vastavast rõhust p_k kuni protsessi lõpprõhule p_2 vastava temperatuurini.

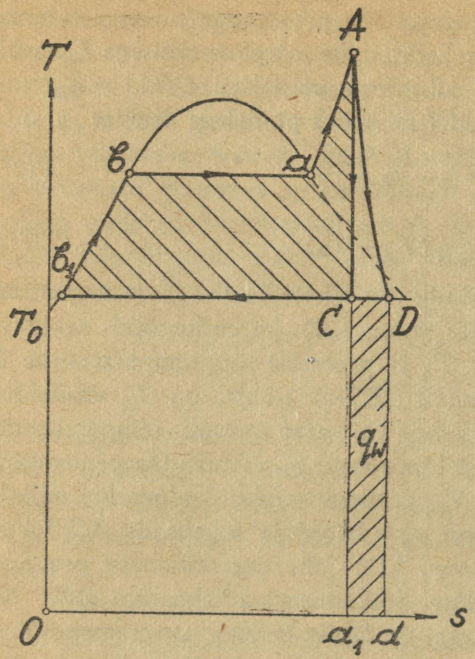
Adiabaadil AC temperatuurile T_D vastava punkti leidmiseks, milleks T-s-diagrammil (joon. 123) on isobaari $p_k = konst$ ja adiabaadi AC lõikepunkt k, ehitame p-v-diagrammil (joon. 122) läbi tagastatamatu protsessi lõpp-punkti D isotermi $T_D = konst$ kuni lõikumiseni adiabaadiga AC. Nii saadud lõikepunkt ongi otsitav. Punkti k läbiv isobaar on samane T-s-diagrammi isobaariga $p_k = konst$. Isobaaride $p_k = konst$ ja $p_2 = konst$ vahel asuv pindala $mnkC$ ongi soojusühikuis võrdne energiakaoga E_k. Selle soojushulga viib kasutult kaasa düüsist väljuv gaas.

Järelikult on p-v-diagrammil tagastatamatus protsessis esineva kineetilise energia muutusega E_c ekvivalentne pindala $aAkn$. Gaasi summaarset hõõrdumistööd avaldab pindala $ADmnkA$, s. o. $L_R = L_k + L_n$. Aluseks võttes võrrandeid (a) ja (b) järeldame, et lisapaisumistöö L_n lülitub üldisest tööbilansist välja, sest

$$L_c = L_t' - (L_R - L_n) = L_t' - (L_k + L_n - L_n) = L_t' - L_k. \tag{227-b}$$

Tagastatamatu protsessi lõppolekus D omab gaas tagastatava protsessi lõppoleku suhtes kõrgema temperatuuri näol veel teatavat töövaru. Selle teoreetilise töövaru suuruse leiame, kui laseme gaasil tagastatamatu protsessi lõppolekust D adiabaatiliselt paisuda kuni tagastatava protsessi lõppoleku temperatuurini, mis joonisel 123 on tähistatud punktiga F, ja teostame punktist F gaasi isotermilist komprimeerimist kuni punktini C, millega gaas saavutab tagastatava protsessi lõppoleku parameetrid. Kontuuriga DFC piiratud pindala ongi tagastatamatu protsessi lõppolekus gaasi töövaru tagastatava protsessi lõppoleku suhtes.

Eespooltoodust järgneb, et protsessi tagastatamatusest tingitud gaasi töövõime kadu avaldub T-s-diagrammil ristküliku $aCFd$ pindalaga (joon. 123).



Joon. 124.

$$= \text{pindala } b_1baAC -$$

$$- \text{pindala } CDda_1.$$

i-s-diagrammil (joon. 125) tähistab tagastatavat voolamisprotsessi joon $A2$ ja tagastatamatut protsessi joon AD.

Entalpia langus h_0 on võrdne tagastatava protsessi kineetilise energia muutusega, s. o.

$$E_t = AL_t' = i_0 - i_2 = h_0,$$

ja entalpia langus h_1 tagastatamatu protsessi kineetilise energia muutusega, s. o.

$$E_c = AL_c = i_C - i_D = h_1,$$

kus tähisega AL_c on märgitud

Märkides töövõime kao tähisega AL_k', võime ta avaldada seosega

$$AL_k' = \Delta s_p \cdot T_2 \qquad (228)$$

Kõik eespoolöeldu jääb jõusse ka veeauru voolamisel, nagu selgub joonisel 124 esitatud T-s-diagrammilt. Diagrammil tähistab joon AC tagastatavat ja joon AD tagastatamatut adiabaatilist voolamisprotsessi. Energia kadu avaldub pindalaga Dda_1C, s. o.

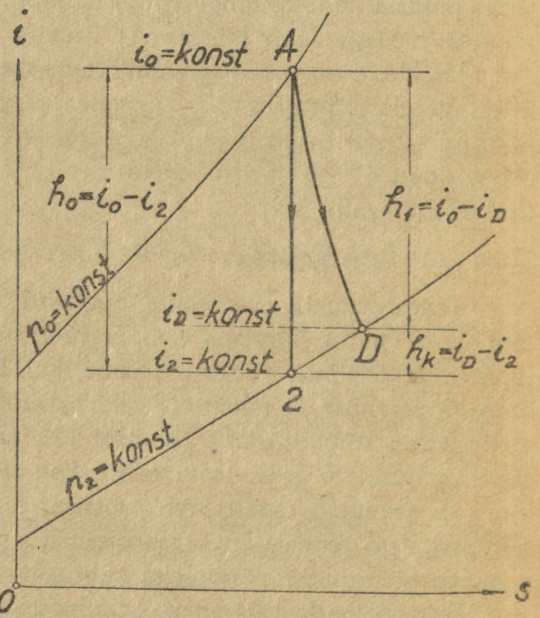
$$AL_k = E_k = q_w = i_D - i_c = h_k$$

ja

$$AL_c = E_c = i_0 - i_D =$$

$$= \text{pindala } OT_0baAa_1 -$$

$$- \text{pindala } OT_0b_1Dd =$$



Joon. 125.

tagastatamatus protsessis esinev kiirendustöö, s. o. kasutatav töö. Protsessi tagastatamatusest tingitud energiakadu on

$$E_k = AL_k = i_D - i_2 = h_k = h_0 - h_1.$$

Diagrammilt nähtub, et tagastatamatus protsessis aur niiskub märksa vähem kui tagastatavas protsessis, mis on tingitud hõõrdumistöö soojusest, mida aur protsessi kulgemisel kineetilise energia arvelt saab. Sellest asjaolust tingituna on reaalses protsessis võimalik lasta aurul paisuda sügavama vaakuumini, kui seda määrab tagastatav adiabaatiline paisumine.

Kõik eespooltoodu jääb kehtima ka sel puhul, kui voolamisprotsessi juhitakse väljastpoolt soojust.

Tuletame nüüd seose reaalses voolamisprotsessis esineva kineetilise energia kao määramiseks, lähtudes gaasi voolamiskiirusest.

Märkides reaalse gaasi kiiruse protsessi lõpul tähisega C_2 ja ideaalse gaasi kiiruse nagu varemaltki tähisega c_2, võime need kiirused siduda võrdusega

$$C_2 = \varphi c_2 \frac{\text{m}}{\text{sek}} \tag{229}$$

ehk

$$C_2 = \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} = 91{,}53\ \varphi \sqrt{i_0 - i_2}, \tag{229-a}$$

kus φ on võrdetegur ja teda nimetatakse kiiruskoefitsiendiks. φ on määratav ainult eksperimentaalselt. Ta on alati väiksem kui üks, s. o. $\varphi < 1$. Koefitsiendi φ väärtus sõltub düüsi geomeetrilisest kujust, mõõdetest ja suhtarvust β. Auruturbiini düüsidel $\varphi = 0{,}93 \ldots 0{,}98$.

Teades φ väärtust, on võimalik arvutada reaalses voolamisprotsessis esinevat kineetilise energia kadu ja selle kaudu voolamisprotsessis esinevat entalpia langust.

Märkides reaalses adiabaatilises voolamisprotsessis, mis toimub isobaaride p_1 ja p_2 vahelises rõhu languses, entalpia languse tähisega h_1 ja ideaalse gaasi või auru entalpia languse samas rõhu intervallis tähisega h, võime kineetilise energia kaole võrdse entalpia languse h_k avaldada kujul

$$h_k = h - h_1 = A \cdot \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} - A \frac{C_2^2 - c_1^2}{2g} =$$

$$= \frac{A}{2g}(c_2^2 - C_2^2) = \frac{A}{2g}(c_2^2 - \varphi^2 c_2^2) =$$

$$= \frac{A}{2g} c_2^2 (1 - \varphi^2). \tag{m}$$

Tegur $(1-\varphi^2)$ märgitakse tavaliselt

$$1-\varphi^2=\xi, \tag{230}$$

kust leiame, et

$$\varphi=\sqrt{1-\xi}. \tag{231}$$

Koefitsienti ξ, nagu varemalt juba tähendatud, nimetatakse energiakao koefitsiendiks.

Tehes selle asenduse võrrandis (m), saame

$$h-h_1=h_k=\frac{A}{2g}c_2^2\xi. \tag{232}$$

Elimineerime võrrandist tundmatu c_2, kasutades selleks seost

$$h=A\frac{c_2^2-c_1^2}{2g},$$

$$A\frac{c_2^2}{2g}=h+A\cdot\frac{c_1^2}{2g}. \tag{233}$$

Selle asendusega omandab võrrand (232) pärast algebralisi tehteid kuju

$$h_k=h-h_1=(h+A\frac{c_1^2}{2g})\xi; \tag{234}$$

kui $c_1=0$, siis

$$h_1=h_0(1-\xi)=(i_0-i_2)(1-\xi), \tag{235}$$

$$h_k=h_0\xi=(i_0-i_2)\xi. \tag{236}$$

Võrrandis (236) on i_0 entalpia voolamisprotsessi alguses ja i_2 entalpia tagastatava adiabaatilise protsessi lõpul ning h_0 entalpia langus tagastatavas protsessis, kui $C_1=0$. Saadud võrrand (235) on samane varemtuletatud võrrandiga (f).

Lahendades võrrandi (236) energiakao koefitsiendi ξ suhtes, saame

$$\xi=\frac{h_k}{i_0-i_2}=\frac{i_D-i_2}{i_0-i_2},$$

kus i_D on gaasi või auru entalpia tagastatamatu protsessi lõppolekus, peale sisemise tasakaalu saavutamist.

Arvesse võttes, et

$$i_D-i_2=c_p\Big|_{T_2}^{T_D}\cdot(T_D-T_2),$$

$$i_0-i_2=c_p\Big|_{T_2}^{T_0}\cdot(T_0-T_2),$$

on koefitsient ξ avaldatav ka kujul

$$\xi = \frac{c_p \Big|_{T_2}^{T_D} \cdot (T_D - T_2)}{c_p \Big|_{T_2}^{T_0} \cdot (T_0 - T_2)} \approx \frac{T_D - T_2}{T_0 - T_2} . \qquad (237)$$

Vaatleme lühidalt veel gaasi aeglustuvat liikumist tagastatamatus protsessis ja sellega seotud takistustööd.

See protsess on pöördprotsessiks gaasi kiirenevale liikumisele läbi düüsi ja esindab gaasi adiabaatilist komprimeerimisprotsessi gaasi kineetilise energia arvel. Selle protsessi saame, kui juhime teatavat kineetilist energiat omava gaasijoa reservuaari gaasi kiirendusdüüsile pöörd-düüsi kaudu. Selle düüsi telje ulatuses esineb gaasi aeglustuv liikumine, kusjuures düüsi ristlõigetes, vastavalt gaasijoa kineetilise energia langusele, esineb gaasi entalpia suurenemine, s. o. gaasi siseenergia ja staatilise rõhu suurenemine. Sel printsiibil on võimalik saada surugaasi gaasi kineetilise energia arvel.

Sõltuvalt gaasi algkiirusest võib düüs selles voolamisprotsessis, nagu eespool (§ 33) juba tähendatud, omada kahte eri kuju.

1. Düüs omab kriitilist ristlõiget, s. o. kurku. See düüs on vajalik, kui gaasi kiirus düüsisse voolamisel on suurem gaasi parameetritele p_1 ja v_1 vastavast helilevimiskiirusest.

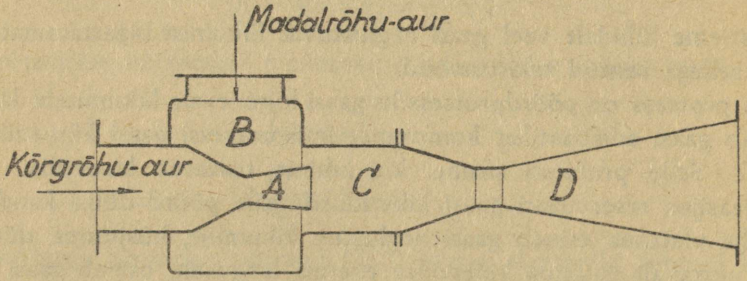
2. Düüsi ristlõigete pindalad suurenevad pidevalt voolamissuunas, s. o. düüs ei oma kriitilist ristlõiget. Seda düüsi kasutatakse, kui gaasi kiirus düüsisse voolamisel on väiksem gaasi parameetritele p_1 ja v_1 vastavast helilevimiskiirusest.

Mõlemaid düüse nimetame *survedüüsideks*. Ka nimetatakse neid *difusooorideks*.

Kineetilist energiat komprimeerimise otstarbeks kasutatakse nn. *jugakompressorites* ehk *inžektorites*. Nende kompressorite eeliseks on konstruktsiooni lihtsus ja asjaolu, et nad ei vaja komprimeerimiseks mehhaanilist energiat, vaid selleks saab kasutada komprimeeritavast aurust või gaasist kõrgemarõhulist auru või gaasi. Jugakompressorite varjuküljeks on nende madal kasutegur, mistõttu nad leiavad kasutamist vaid erijuhtudel. Laskumata jugakompressorite teooriasse, mis on eridistsipliini ülesanne, anname vaid nende aparaatide lühikese kirjelduse.

Jugakompressori keem on näidatud joonisel 125-a. Kompressor koosneb värske, s. o. komprimeeriva auru kiirendusdüüsist A, segunemisruumist

C ja survedüüsist *D*. Komprimeeriv aur juhitakse läbi kiirendusdüüsi *A* segunemisruumi *C*, kuhu ruumist *B* voolab ka komprimeeritav madalrõhu-aur. Selles ruumis segunevad mõlemad aurud ja moodustunud segu voolab teatava keskmise kiirusega survedüüsi *D*. Selles düüsis muundub segu kineetiline energia tagasi rõhuenergiaks. Survedüüsist väljuv komprimeeritud aur juhitakse edasi aurutarbijatesse. Survedüüsi valik sõltub düüsi voolava aurusegu kiirusest. Kui kiirus ületab helilevimiskiiruse, tuleb kasutada Laval'i, s. o. kurguga düüsi, jne.



Joon. 125-a.

Jugakompressorid on kahte liiki. Esimese liigi kompressorites on kiirendusdüüs arvutatud sääraselt, et temast segunemisruumis väljuva komprimeeriva auru rõhk on madalam komprimeeritava auru rõhust. Sellest tingituna voolab komprimeeritav aur ruumist *B* segunemisruumi teatava algkiirusega, millega vähenevad segunemiskaod.

Teise liigi kompressorites on kiirendusdüüs sääraselt arvutatud, et düüsist segunemisruumi voolava komprimeeriva auru rõhk on võrdne komprimeeritava auru rõhuga. Sel puhul on komprimeeritava auru segunemisruumi voolamise kiirus praktiliselt võrdne nulliga, mistõttu neis kompressoreis esineb suuremaid tagastatamatuid segunemiskadusid kui esimese liigi kompressoreis.

Komprimeerimise protsessist annab hea ülevaate joonisel 126 esitatud *T-s*-diagramm. Diagrammil esindab joon *AC* tagastatavat ja joon *AD* tagastatamatut gaasijoa kineetilise energia arvel toimuvat adiabaatilist komprimeerimisprotsessi, s. o. gaasi aeglustuvat voolamist nn. survedüüsis. Selles protsessis tõuseb gaasi rõhk gaasijoas rõhult p_1 kuni rõhuni p_2 ja temperatuur algtemperatuurilt T_1 kuni temperatuurini T_2 tagastatavas ja temperatuurini T_D tagastatamatus protsessis.

Tagastatava protsessi teostamiseks tarbitud kineetiline energia E_t avaldub pindalaga *CamM*, s. o.

$$E_t = AL_t' = i_1 - i_2 = \text{pindala } CamM,$$

ja tagastatamatus protsessis tarbitud kineetiline energia E pindalaga $DdmM$, s. o.

$$E = AL = i_1 - i_D = \text{pindala } DdmM.$$

Gaasi hõõrdumistööd AL_R avaldab tagastatamatu protsessi joone AD (tasakaalukõver) all olev pindala $ADda$, s. o.

$$AL_R = q_r = \text{pindala } ADda.$$

Hõõrdumissoojusest tingitud lisapaisumistööd esindab pindala ACD, s. o.

$$AL_n = \text{pindala } ACD.$$

Protsessi tagastatamatusest tingitud üldine takistustöö ehk töökadu on

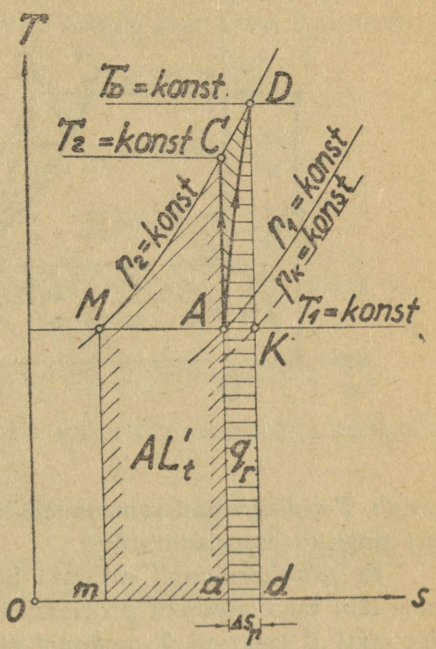
$$AL_k = -AL_n - AL_R = i_2 - i_D =$$
$$= \text{pindala } DdaC.$$

Järelikult

$$AL = -AL_t' - AL_n - AL_R = i_1 - i_D \quad (238)$$

või

$$L = -L_t' - L_n - L_R. \quad (239)$$



Joon. 126.

Sama tulemuse annab ka võrrand (226), kui selles L_c asendada L-ga ja silmas pidada, et antud juhul on L_t' ja L_n negatiivsed.

Märkides gaasi algkiiruse tähisega c_1 ja gaasi kiiruse tagastatamatul protsessil, vastavalt rõhule p_2, tähisega C_2, võime võrrandi (238) avaldada ka kujul

$$A\frac{C_2^2}{2g} - A\frac{c_1^2}{2g} = -AL_t' - AL_n - AL_R \quad (240)$$

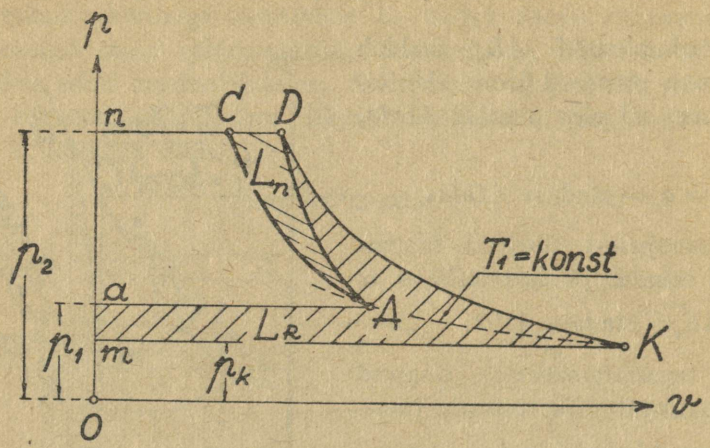
ehk

$$\frac{c_1^2}{2g} - \frac{C_2^2}{2g} = L_t' + L_n + L_R. \quad (241)$$

p-v-diagrammil tagastatamatuks protsessiks tarbitud kineetiline energia ei ole otseselt avaldatav, kuid tema kohta saab siiski anda vastava tõlgenduse, nagu on näidatud joonisel 127.

Joonisel 127 tähistab joon AC gaasi tagastatavat ja joon AD tagastatamatut adiabaatilist voolamisprotsessi.

Pindala *nCAa* on ekvivalentne tagastatavas protsessis tarbitud kineetilise energiaga, mis *T-s*-diagrammil vastab pindalale *MCam*. Pindala *CDA*



Joon. 127.

vastab *T-s*-diagrammi samanimelisele pindalale ja avaldab hõõrdumissoojusest tingitud lisapaisumistööd.

Et *p-v*-diagrammil määrata hõõrdumistööle L_R võrdset pindala, ehitame läbi tagastatamatu protsessi lõpp-punkti *D* adiabaadi ja läbi protsessi algpunkti *A* isotermi $T_1 = konst$ ning pikendame mõlemaid kõveraid kuni nende ühise lõikumispunktini *K*.

Punkti *K* läbiva isobaari $p_k = konst$, adiabaadi *DK*, isobaari $p_1 = konst$ ja tagastatamatu protsessi joone *AD* poolt piiratud pindala ongi võrdne takistustööga L_R. Ehituse õigustus selgub *T-s*-diagrammilt (joon. 126). Nimelt määrab isobaari $p_k = konst$ asendi, nagu nähtub *T-s*-diagrammilt, adiabaadi *DK* ja isotermi *AK* lõikepunkt *K*.

N ä i d e. Ülekuumendatud aur, mille rõhk on 20 ata ja temperatuur 300° C, paisub läbi Laval'i düüsi voolates kuni rõhuni 1 ata, omades niiskusesisaldust 2%. Arvutada auru düüsist väljavoolamiskiirus ja kiiruse koefitsient φ ning energiakao koefitsient ξ.

Väljavoolamiskiiruse arvutamiseks määrame tegeliku kasustatava entalpia languse vastavalt tagastatamatule voolamisprotsessile. Ülekuumendatud auru tabelist leiame, et auru rõhule $p = 20$ ata ja $t = 300°$ C vastavad alljärgnevad parameetrid:

$$v_1 = 0{,}1281 \frac{m^3}{kg},$$

$$i_1 = 721{,}3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$s_1 = 1{,}6166 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Kuiva küllastunud auru tabeli järgi vastavad rõhule $p = 1$ ata suurused:

$$v_2' = 0{,}0010428 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \qquad i_2'' = 638{,}5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$v_2'' = 1{,}725 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \qquad s_2' = 0{,}3096 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}},$$

$$i_2' = 99{,}12 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \qquad s_2'' = 1{,}7587 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Antud juhul on auru niiskusesisaldus düüsist väljumisel 2%, seega $x_2 = 0{,}98$. Järelikult on auru entalpia auru lõppolekus

$$i_D = i_2' + (i_2'' - i_2')\, x_2 = 99{,}12 + (638{,}5 - 99{,}12)\, 0{,}98 = 627{,}71 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Seega on tegelik kasustatav entalpia langus selles tagastatamatus voolamisprotsessis

$$h_1 = i_1 - i_D = 721{,}3 - 627{,}71 = 93{,}59 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Auru düüsist väljavoolamiskiiruse võime määrata ideaalse protsessi võrrandiga, sest entalpia languse kadu on juba arvesse võetud, s. o.

$$C_2 = 91{,}5 \sqrt{h_1} = 91{,}5 \sqrt{93{,}59} = 884{,}8 \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Protsessi tagastatamatusest tingitud entalpia kao määramiseks oletame, et aur paisub algolekust tagastatavalt kuni rõhuni 1 ata. Selle tagastatava ja tagastatamatu protsessi entalpia languste vahe ongi otsitav entalpia kadu.

Entalpia languse arvutamiseks, vastavalt tagastatavale protsessile, peame esiteks määrama auru kuivusastme tagastatava protsessi lõppolekus. Selleks kasutame adiabaatilise protsessi võrrandit (112), s. o.

$$s_1 = s_2' + (s_2'' - s_2')\, x_2',$$

$$x_2' = \frac{s_1 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = \frac{1{,}6166 - 0{,}3096}{1{,}7587 - 0{,}3096} = 0{,}902.$$

Järelikult on auru entalpia i_c tagastatava adiabaatilise voolamisprotsessi lõppolekus

$$i_c = i_2' + (i_2'' - i_2')\, x' =$$

$$= 99{,}12 + (638{,}5 - 99{,}12)\ 0{,}902 = 585{,}64 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Seega on teoreetiline kasustatav entalpia langus

$$h_0 = i_1 - i_c = 721{,}3 - 585{,}64 = 135{,}66 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Entalpia languse kadu, mis on tingitud protsessi tagastatamatusest, s. o. hõõrdumisest, avaldub seosega

$$h_k = h_0 - h_1 = 135{,}66 - 93{,}59 = 42{,}07 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Järelikult on energia kao ja kiiruse koefitsiendi väärtused

$$\xi = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{h_k}{h_0} = \frac{42{,}07}{135{,}66} = 0{,}31,$$

$$\varphi = \sqrt{1 - \xi} = \sqrt{1 - 0{,}31} = \sqrt{0{,}69} = 0{,}83.$$

Võrrandi (229-a) järgi saame auru düüsist väljavoolamiskiiruse jaoks väärtuse

$$C_2 = 91{,}5 \cdot \varphi \sqrt{h_0} = 91{,}5 \cdot 0{,}83 \sqrt{135{,}66} = 884{,}8 \ \frac{\text{m}}{\text{sek}},$$

s. o. sama väärtuse nagu esimesel juhulgi.

N ä i d e. Ülekuumendatud auru rõhk on $p_1 = 30$ ata ja temperatuur $t_1 = 400°$ C. Arvutada düüs, kui auru kulu $G = 4 \ \frac{\text{kg}}{\text{sek}}$, kiiruse koefitsient $\varphi = 0{,}95$ ja paisumise lõpprõhk $p_2 = 2$ ata.

L a h e n d u s. Energiakao koefitsiendi suurus võrrandi (230) järgi on

$$\xi = 1 - \varphi^2 = 1 - 0{,}95^2 = 0{,}1.$$

Määrame esiteks kasustatava entalpia languse ideaalse protsessi jaoks. Ülekuumendatud auru tabeli järgi vastavad rõhule 30 ata ja temperatuurile 400° C parameetrid

$$v_1 = 0{,}1013 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}},$$

$$i_1 = 771{,}1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$s_1 = 1{,}6539 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et rõhul $p_2 = 2$ ata on

$$v_2'' = 0{,}9016 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \qquad i_2'' = 645{,}8 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$i_2' = 119{,}87 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \qquad s_2' = 0{,}3638 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}},$$

$$s_2'' = 1{,}7029 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Aluseks võttes entalpia jäävust adiabaatilisel voolamisel, leiame auru kuivusastme võrrandiga

$$s = s'_2 + (s''_2 - s'_2)\, x'_2,$$

$$x'_2 = \frac{s - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{1{,}6539 - 0{,}3638}{1{,}7029 - 0{,}3638} = 0{,}956.$$

Vastavalt sellele kuivusastmele on auru entalpia protsessi lõpul

$$i_c = i'_2 + (i''_2 - i'_2)\, x'_2 =$$

$$= 119{,}87 + (645{,}8 - 119{,}87)\, 0{,}956 = 622{,}7 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Järelikult on teoreetiline kasustatav entalpia langus

$$h_0 = 771{,}1 - 622{,}7 = 148{,}4 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Tegelik kasustatav entalpia langus on

$$h_1 = h_0\,(1 - \xi) = 148{,}4 \cdot (1 - 0{,}1) = 133{,}6 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Auru entalpia i_D, kuivusastme x_2 ja kilomahu v_2 tegeliku protsessi lõpuks leiame seostega

$$i_D = i_1 - h_1 = 771{,}1 - 133{,}6 = 637{,}5.$$

$$i_D = i'_2 + (i''_2 - i'_2)\, x_2,$$

$$x_2 = \frac{i_D - i'_2}{i''_2 - i'_2} = \frac{637{,}5 - 119{,}87}{645{,}8 - 119{,}87} = 0{,}984,$$

$$v_2 = v''_2 x_2 = 0{,}9016 \cdot 0{,}984 = 0{,}8872.$$

Entalpia langusele h_1 vastab auru väljavoolamiskiirus

$$C_2 = 91{,}53 \sqrt{h_1} = 91{,}53 \sqrt{133{,}6} = 91{,}53 \cdot 11{,}56 = 1058 \ \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Düüsi välisotsa vajaliku ristlõike pindala leiame pidevusvõrrandiga, s. o.

$$G = \frac{f_2 C_2}{v_2}, \quad f_2 = \frac{G \cdot v_2}{C_2} =$$

$$= \frac{4 \cdot 0{,}8872}{1058} = 0{,}003354 \ \text{m}^2 = 3354 \ \text{mm}^2.$$

Et antud juhul esineb ülekriitiline olukord, siis omab düüs ka kurku. Kurgu ristlõike pindala arvutame võrrandiga

$$f_{min} = \frac{G}{2{,}09\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} = \frac{4}{2{,}09\sqrt{\frac{30 \cdot 10^4}{0{,}1013}}} =$$

$$= \frac{4}{2{,}09 \cdot 1720{,}9} = 0{,}001112 \text{ m}^2 = 1112 \text{ mm}^2.$$

Pindalade suhe on

$$\frac{f_{min}}{f_2} = \frac{3354}{1112} = 3{,}016.$$

37. TAGASTATAMATU VOOLAMISPROTSESSI DIFERENTSIAALVÕRRANDID.

Tuletame tagastatamatu voolamisprotsessi diferentsiaalvõrrandi, kasutades selleks võrrandit (226), s. o.

$$L_t' + L_n = L_c + L_R,$$

kus L_t' on gaasi kiirendustöö (kasustatav töö) tagastatavas adiabaatilises protsessis, L_n — tagastatamatus protsessis hõõrdumissoojusest tingitud lisapaisumistöö, mis p-v-diagrammil avaldub pindalaga ADC, L_c — tagastatamatus protsessis esinev gaasi kiirendustöö ja L_R — tagastatamatus, s. o. reaalses voolamisprotsessis esinev hõõrdumistöö.

p-v-diagrammilt nähtub, et

$$L_t' + L_n = -\int_{v_1}^{v_2} v\,dp.$$

Kiirendustöö L_c gaasi tagastatamatus voolamisprotsessis avaldub kineetilise energia kaudu

$$L_c = A\,\frac{C_2^2}{2g} - A\,\frac{c_1^2}{2g}.$$

Järelikult võime võrrandi (226) avaldada kujul

$$-\int_{v_1}^{v_2} v\,dp = A\,\frac{C_2^2}{2g} - A\,\frac{c_1^2}{2g} + L_R.$$

Diferentsides seda võrrandit ja silmas pidades, et antud juhul tuleb muutuva kiirusena vaadelda reaalse protsessi kiirust C_2, saame

$$-v\,dp = d\left(\frac{C^2}{2g}\right) + dL_R \qquad (242)$$

ehk

$$\frac{C}{g}\,dC + vdp + dL_R = 0. \qquad (242\text{-a})$$

Arvesse võttes, et gaasi üldist paisumistööd avaldav liige on sisuliselt negatiivne (sest dp on negatiivne), võime võrrandite (242) ja (242-a) põhjal öelda, et gaasi või auru reaalses kiirenevas voolamisprotsessis on gaasi kineetilise energia muutus võrdne gaasi üldise paisumistöö ja hõõrdumistöö vahega. Sama järgneb vahetult ka võrrandist (226).

Juhul, kui tagastatamatu voolamisprotsessi võrrand avaldada vaid kiirendustöö kaudu, avaldub ta samasugusel kujul nagu tagastatava protsessi võrrandki, sest sel puhul esineb takistustöö nii võrrandi paremal kui ka vasakul poolel, mistõttu võrrandis need liikmed koonduvad.

Asendame võrrandis (235), s. o.

$$h_1 = h_0\,(1 - \xi) = h_0 - \xi h_0,$$

tagastatamatus protsessis esineva entalpia languse h_1, mis avaldab selles protsessis esinevat kineetilise energia muutust, avaldisega

$$h_1 = A\,\frac{C_2^2}{2g},$$

ja silmas pidades, et

$$h_0 = i_0 - i_2,$$

$$\xi h_0 = i_D - i_2,$$

saame

$$A\,\frac{C_2^2}{2g} = i_0 - i_D, \qquad (243)$$

kus i_0 on gaasi või auru entalpia voolamisprotsessi alguses ja i_D — entalpia tagastatamatu protsessi lõpul.

Võrrandis ei esine takistustööd avaldavat liiget ja ta ütleb, et tagastatamatus adiabaatilises voolamisprotsessis on kineetilise energia muutus võrdne protsessis esineva auru või gaasi entalpia langusega, nagu tagastatava protsessi puhulgi.

Diferentsides võrrandit (243) leiame, et

$$Ad\,\frac{C^2}{2g} = -\,di$$

ehk

$$\frac{A}{g}\,CdC = -\,di. \qquad (244)$$

Ee spooltoodu üldistamiseks tähendame, et võrrand (242) või (242-a)

on vahetult tuletatav ka üldisest paisumistööd avaldavast soojusvõrrandist

$$dq = di - Avdp,$$

mis tagastatamatuks protsessiks avaldub kujul

$$dq + dq_r = di - Avdp.$$

Adiabaatiliseks protsessiks on võrrandi kuju

$$dq_r = di - Avdp.$$

Asendades di tema avaldisega võrrandist (244), s. o.

$$di = -\frac{A}{g} CdC,$$

saame

$$dq_r = -A\frac{C}{g} dC - Avdp,$$

$$-Avdp = A\frac{C}{g} dC + dq_r; \qquad (245)$$

asendades ka $dq_r = AdL_R$, saamegi võrrandi (242-a), s. o.

$$\frac{C}{g} dC + vdp + dL_R = 0.$$

Võrrand (242-a) on kehtiv ka gaasi aeglustuvaks liikumiseks, s. o. komprimeerimisprotsessiks. Nimelt diferentsides võrrandit (241), s. o.

$$\frac{c_1^2 - C_2^2}{2g} = L_t + L_n + L_R,$$

saame

$$-\frac{C}{g} dC = d(L_t + L_n) + dL_R.$$

Silmas pidades, et komprimeerimisel on dp positiivne, avaldub $d(L_t + L_n)$ kujul

$$d(L_t + L_n) = vdp.$$

Järelikult

$$-\frac{C}{g} dC = vdp + dL_R$$

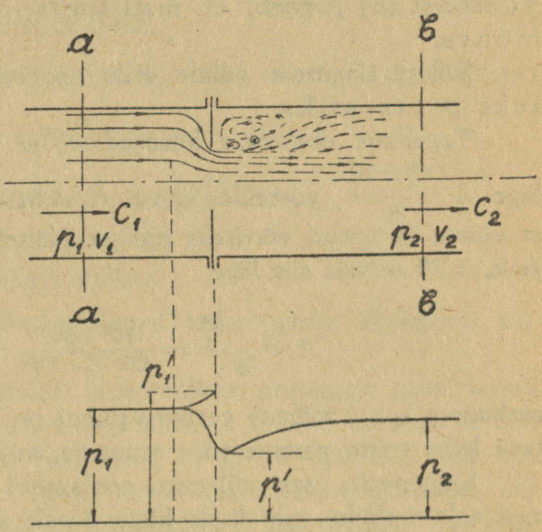
ehk

$$\frac{C}{g} dC + vdp + dL_R = 0.$$

38. GAASIDE JA AURUDE MULJUMINE.

Gaasi või auru muljumisprotsess esineb, kui gaas või aur voolab läbi kohaliku takistuse, milleks on toru ristlõike järsk vähenemine, ventiili, gaasiklapi, membraani, torupõlve jne. näol. Selle voolamisprotsessi puhul esineb nähtus, et voolava keha rõhk takistuse taga, ka ristlõigetes, kus gaas on saavutanud protsessieelse kiiruse, on alati väiksem protsessieelsest rõhust, s. o. rõhu langus on suurem tavalisest rõhu langusest (vt. joon. 128). Selle protsessi tulemuseks on alati protsessist osavõtva keha entroopia kasvamine ja ühes sellega keha töövõime langus, protsessi saadab keha energia teatav mandumine, s. o. degradeerumine.

Säärast gaasi või auruga toimuvat protsessi nimetatakse muljumisprotsessiks. Auru rõhu langust muljumise kaudu kasutatakse näiteks aurumasinate ja turbiinide võimsuse reguleerimiseks ning torustikus voolava gaasi või auru hulga mõõtmiseks, kitsendades selleks otstarbeks toru ristlõiget sellekohase membraaniga või düüsiga.



Joon. 128.

Üldiselt peab gaasi ja auru muljumist voolu juhtmetes võimaluse piires vältima, kuna see protsess on seotud keha töövõime langusega.

Muljumisest tingitud surve langus tagapool kohalikku takistust on seda suurem, mida väiksem on kohaliku takistuse suhteline ristlõikepindala.

Üldiselt võib gaasi ja auru muljumist vaadelda kui soojuslikult isoleeritud olukorras toimuvat voolamisprotsessi. Seda aluseks võttes võime selle protsessi suhtes rakendada võrrandit (185), s. o.

$$i_1 - i_2 = A \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}, \qquad \text{(a)}$$

kus i_1 ja c_1 on torus voolava gaasi või auru entalpia ja kiirus enne kitsendatud ristlõiget ja i_2 ning c_2 — entalpia ja kiirus tagapool kitsendatud ristlõiget (vt. joon. 128).

Kui ajaühikus voolujuhet läbiv gaasi- või aurukogus on jääv suurus ja muljumine toimub ühtlast ristlõiget omavas voolujuhtmes, siis võime voolamise kiiruse tagapool kohalikku takistust, kus voolus on stabiliseerunud, arvata võrdseks kiirusega eespool takistust, s. o.

$$c_1 = c_2 .$$

Järelikult taandub sel juhul võrrand (a) kujusse

$$i_1 = i_2 = i = konst. \qquad (b)$$

Võrrandist (b) järgneb, et muljumisprotsessis keha entalpia ei muutu.

Sellest tingituna võime seda protsessi nimetada ka isoentalpiliseks protsessiks.

Tegelikus olukorras kiirused c_1 ja c_2 siiski erinevad ($c_2 > c_1$), kuid liige $A\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}$, võrreldes i_1 või i_2 väärtusega, on praktiliselt niivõrd väike, et võime ta arvata võrdseks nulliga. Näiteks kui oletame, et $c_1 = 30$ m/sek ja $c_2 = 70$ m/sek, siis liige

$$A\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = \frac{70^2 - 30^2}{427 \cdot 2 \cdot 9{,}81} = 0{,}477 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

sealjuures aga i väärtus veeauru puhul on üle 600 kcal/kg. Selgitame töötava keha teiste parameetrite muutuse, mis on tingitud muljumisest.

Kõigepealt, gaasi või auru voolamisel läbi kohaliku takistuse suureneb vastavalt ristlõike suhtelisele kitsendusele voolamiskiirus, s. o. toimub gaasi potentsiaalse energia osaline muundumine kineetiliseks energiaks, mille tagajärjel gaasi või auru rõhk langeb rõhult p_1 kuni rõhuni p' (vt. joon. 128). Kitsenduse taga, tingituna seal esinevast keerisliikumisest ja löökidest, muutub osa kineetilisest energiast tagastatamatult soojuseks ja ainult teatav osa muundub tagasi potentsiaalseks energiaks, mistõttu gaas või aur ei saavuta enam endisi termilisi parameetreid. Nimelt jääb gaasi või auru rõhk madalamaks rõhust, mida ta omas enne kitsendust, s. o. enne protsessi, kuna aga maht tekkinud soojuse ja rõhu languse mõjul suureneb, s. o. $v_2 > v_1$. Entalpia aga saavutab kineetilise energia muundumise arvel soojuseks tagasi oma endise väärtuse, kuna entroopia tekkinud soojuse ja gaasi parameetrite muutuse arvel kasvab. Järelikult, gaasi ja auru muljumine esindab tüüpilist tagastatamatut protsessi.

Selgitame muljumisprotsessi rakendatuna ideaalsele ja reaalsele gaasile ning veeaurule.

39. IDEAALSE GAASI MULJUMINE.

Ideaalse gaasi puhul on entalpia muutuse avaldis

$$i_2 - i_1 = c_p (t_2 - t_1).$$

Muljumisprotsessiks avaldub võrrand

$$i_1 - i_2 = c_p (t_1 - t_2) = 0. \qquad (a)$$

Sellest võrrandist järgneb, et ideaalse gaasi muljumisel gaasi temperatuur ei muutu, s. o.

$$t_1 = t_2 = konst. \qquad (b)$$

Avaldades entalpia i_1 ja i_2 siseenergia kaudu, võime võrrandi (a) kirjutada kujul

$$u_1 + Ap_1v_1 - (u_2 + Ap_2v_2) = 0$$

ehk

$$c_v(t_1 - t_2) - A(p_1v_1 - p_2v_2) = 0.$$

Kuna $t_1 - t_2 = 0$, siis

$$p_1v_1 = p_2v_2. \qquad (c)$$

Võrduse (c) põhjal võime muljumisprotsessi kohta anda alljärgneva tõlgenduse.

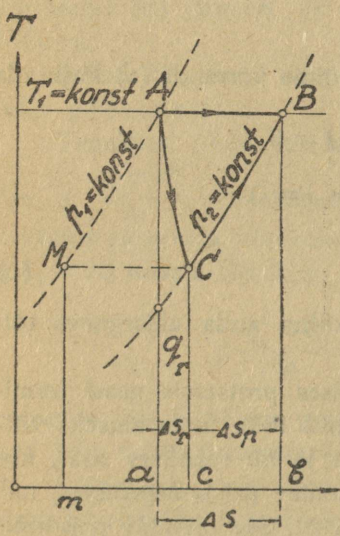
Avaldis $p_1v_1 - p_2v_2 = 0$ esindab isotermilises protsessis gaasi termiliste parameetrite vahelist seost (vt. I osa, võrrand 163). Seda aluseks võttes võime teha oletuse, et toru ristlõigete *aa* ja *bb* vahelises osas, kus leiab aset gaasi muljumine, toimub gaasi isotermiline paisumisprotsess, milles gaasi maht suureneb mahult v_1 kuni mahuni v_2. See oletatav paisumisprotsess saab esineda vaid protsessijuhitava soojuse arvel, mille väärtus on ekvivalentne sooritatava paisumistööga.

Et antud juhul protsess toimub soojuslikult isoleeritud olukorras, on välissoojus siiski võrdne nulliga, mistõttu protsessiks vajalik soojushulk tegelikult saadakse samast süsteemist gaasi potentsiaalse energia arvelt kineetilise energia kaudu, s. o. osa müljumisel esinevast kineetilisest energiast muundub soojuseks. Selle tulemuseks on tagapool kohalikku takistust stabiliseerunud vooluses gaasi potentsiaalse energia vähenemine, mis avaldub staatilise rõhu languses. Kirjeldatud protsessi tagajärjeks on gaasi entroopia kasvamine, sest süsteemi sisemise soojuse eraldumine (tekkimine) kutsub entroopia suhtes esile sama efekti nagu välissoojuski.

Võrranditega (a), (b) ja (c) antud gaasi olek tagapool kohalikku takistust esineb tegelikult voolujuhtme ristlõigetes, mis on teataval kaugusel kohalikust takistusest, kus gaasivoolus on saavutanud juba tasakaalu. Voo-

lujuhtme vahepealsetes ristlõigetes, s. o. ristlõigete *aa* ja *bb* vahelises osas (joon. 128), on parameetrid p, i ja t muutuvad suurused, sest voolujuhtme selles osas on gaasi kineetiline energia muutuv suurus. Selle tõttu pole ka ideaalse gaasi puhul põhiliselt päris õige kogu ristlõigete *aa* ja *bb* vahelises osas karakteriseerida muljumisprotsessi $i = konst$ ja $t = konst$ protsessidena.

T-s-diagrammil võime muljumisprotsessi ideaalse gaasiga leppeliselt kujutada isotermiga $T = konst$, mis ühendab gaasi oleku punkti A isobaaril $p_1 = konst$ isobaari $p_2 = konst$ punktiga B, nagu on näidatud joonisel 129.



Joon. 129.

Arvesse võttes, et gaasi voolamist läbi kohaliku takistuse võime vaadelda kui adiabaatilist voolamisprotsessi, oleks muljumist õigem kujutada kahe iseseisva protsessina: esiteks tagastatamatu adiabaatilise voolamisena AC läbi kohaliku takistuse, milles gaasijoa kineetiline energia suureneb entalpia langusele ekvivalentse pindala $mMAa$ võrra, ja teiseks isobaarilise paisumise protsessina CB, milles gaasi poolt adiabaatilises protsessis AC saadud kineetiline energia muutub soojuseks ja millega ühes gaasile taastub endine temperatuur ja entalpia. Jooniselt nähtub, et selles protsessis kasvab gaasi entroopia Δs_p võrra. Üldine entroopia kasv on

$$\Delta s = \Delta s_r + \Delta s_p,$$

kus Δs_r on adiabaatilise protsessi AC tagastatamatusest tingitud entroopia kasv. Loomulikult ei ole ka säärane tõlgendus õige, kuid ta esindab ristlõigete *aa* ja *bb* osas siiski täpsemalt tõelist olukorda kui protsess $i = konst$ ja $t = konst$.

40. REAALSE GAASI MULJUMINE.

Reaalse gaasi muljumisel jääb kehtima tingimus, et

$$i_1 = i_2 = konst.$$

Temperatuuri suhtes esineb reaalse gaasi muljumisel eriolukord, mille selgitamiseks tuletame sellekohase võrrandi, mis protsessis $i = konst$ seob gaasi rõhu ja temperatuuri elementaarseid muutusi.

Asendades soojusvõrrandis

$$dq = du + Apdv$$

siseenergia ja kilomahu diferentsiaalid nende avaldistega võrranditest (79, I osa) ja (17, I osa), s. o.

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T dp,$$

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dT,$$

saame soojusvõrrandi kujul

$$dq = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right] dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T\right] dp. \qquad (a)$$

Et saada seost ainult gaasi termiliste parameetrite kaudu, elimineerime tuletised $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p$ ja $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T$. Avaldise osatuletisele $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p$ saame võrrandist (a), avaldades viimase isobaariliseks protsessiks, s. o.

$$dq_p = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right] dT,$$

kust leiame, et

$$\frac{dq_p}{dT} = c_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p. \qquad (b)$$

Järelikult

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p = c_p - Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p. \qquad (c)$$

Avaldise osatuletise $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T$ jaoks leiame järgnevalt. Jagades võrrandi (a) võrdseid absoluutse temperatuuriga T, saame avaldise entroopia diferentsiaali jaoks, s. o.

$$\frac{dq}{T} = ds = \frac{1}{T}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right] dT + \frac{1}{T}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T\right] dp. \qquad (d)$$

Et entroopia diferentsiaal on täisdiferentsiaal, kehtib dT ja dp ees olevate koefitsientide suhtes seos (vt. I osa, § 11)

$$\frac{\partial}{\partial p}\left\{\frac{1}{T}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right]\right\}_T = \frac{\partial}{\partial T}\left\{\frac{1}{T}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T + Ap\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T\right]\right\}_p,$$

$$\frac{1}{T}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial T \partial p}+A\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p+Ap\frac{\partial^2 v}{\partial T \partial p}\right]=-\frac{1}{T^2}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T+Ap\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T\right]+$$

$$+\frac{1}{T}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial T \partial p}+Ap\frac{\partial^2 v}{\partial T \partial p}\right].$$

Korrutades võrrandi võrdseid T^2-ga, avades sulud ja teostades algebralised teisendused, saame võrrandi ilmutatuna osatuletise $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T$ suhtes kujul

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T=-A\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p+p\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T\right]. \qquad \text{(e)}$$

Asendame nüüd võrrandis (a) osatuletised $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p$ ja $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T$ saadud avaldistega, leiame, et

$$dq=\left[c_p-Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p+Ap\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right]dT+\left[-AT\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p-\right.$$

$$\left.-Ap\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T+Ap\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T\right]dp,$$

$$dq=c_p dT-AT\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp. \qquad (246)$$

Entalpia kaudu on soojusvõrrandi avaldis (vt. I osa, § 37)

$$dq=di-Avdp.$$

Selle võrrandi järgi avaldub entalpia diferentsiaal

$$di=dq+Avdp.$$

Asendades selles võrrandis soojuse diferentsiaali tema avaldisega võrrandist (246), saame

$$di=c_p dT-A\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p-v\right]dp. \qquad (247)$$

Gaasi muljumisel $di=0$. Järelikult on otsitav võrrand, mis seob gaasi rõhu ja temperatuuri elementaarset muutust muljumisprotsessis,

$$c_p dT-A\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p-v\right]dp=0$$

ehk

$$dT=\frac{A\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p-v\right]}{c_p}dp. \qquad (248)$$

Seda võrrandit nimetatakse Thomson-Joule'i efekti diferentsiaalvõrrandiks ja avaldist

$$\frac{A}{c_p}\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right] = \frac{dT}{dp} = \alpha$$

gaasi muljumiskoefitsiendiks.

Thomson-Joule'i efektiks nimetatakse nähtust, et reaalse gaasi muljumisel esineb sõltuvalt gaasi algoleku parameetritest gaasi temperatuuri tõus või langus, s. o. esineb gaasi soojenemise või jahtumise efekt.

Nagu eespool tähendatud, esineb muljumisel alati gaasi rõhu langus, s. o. dp on alati negatiivne, mistõttu võrrandi (248) järgi on dT märk vastupidine avaldise

$$T\left(\frac{dv}{dT}\right)_p - v$$

märgiga. Järelikult võib gaasi muljumisel gaasi temperatuuri suhtes esineda kolm eri juhtu:

1) $$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v = 0.$$

Sellest tingimusest järgneb, et reaalne gaas vastavalt antud rõhule omab säärast algolekut, mille puhul $dT = 0$, s. o. muljumisel sellest algolekust jääb gaasi temperatuur muutumatuks, ehk teiste sõnadega, gaasi muljumisel sellest algolekust ei esine Thomson-Joule'i efekti.

Gaasi oleku seda algtemperatuuri, vastavalt antud rõhule, mille puhul ei esine Thomson-Joule'i efekti, nimetatakse inversioonitemperatuuriks.

2) $$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v > 0, \text{ sel puhul } dT < 0,$$

s. o. gaasi muljumisel algolekust, kus on rahuldatud tingimus $T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v > 0$, esineb gaasi temperatuuri langus.

3) $$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v < 0, \text{ sel puhul } dT > 0.$$

Sellest tingimusest järgneb, et gaasi muljumisel algolekust, kui $T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v < 0$, esineb gaasi temperatuuri tõus.

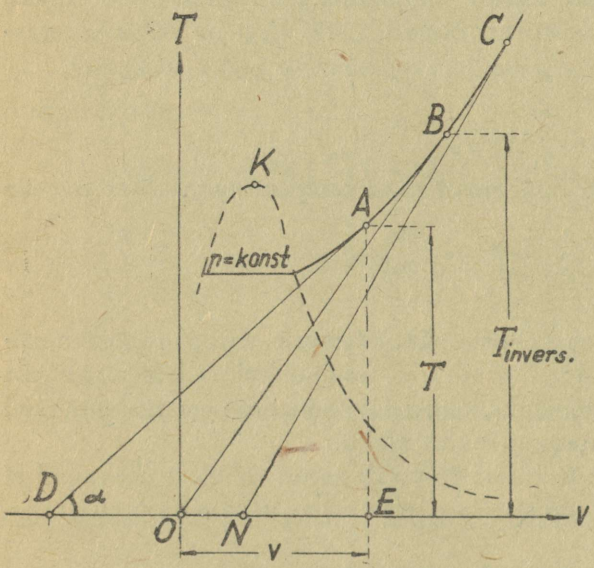
Et saada piltlikku kujutlust eespooltoodud kolmest tingimusest, ehitame T-v-teljestikus mingi reaalse gaasi karaktervõrrandi põhjal isobaari. See isobaar on temperatuuritelje poole tõusev kõver, nagu on näidatud joonisel 130.

Ehitame isobaarile mingis punktis A puutuja DA. Selle puutuja alus DE, nagu nähtub joonisel 130, on

$$DE = T \cdot \frac{1}{\tan\alpha} = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p,$$

sest $\tan\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p$. Järelikult joonlõik

$$DO = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v. \qquad (249)$$



Joon. 130.

Seose (249) põhjal saame kolm eespooltoodud tingimust avaldada järgnevalt:

1. Reaalse gaasi muljumisel ei esine Thomson-Joule'i efekti, kui isobaarile ehitatud puutuja läbib koordinaatide alguse. Sel puhul määrab puutuja ja isobaari vaheline puutepunkt inversioonitemperatuuri, sest selle puutuja puhul

$$DO = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v = 0.$$

Isobaari seda punkti nimetatakse inversioonipunktiks.

2. Muljumisel esineb gaasi temperatuuri langus, kui isobaarile ehitatud puutuja lõikub v-teljega vasakul T-teljest. Sel puhul asub isobaari ja puutuja puutepunkt allpool inversioonipunkti.

3. Muljumisel esineb gaasi temperatuuri tõus, s. o. gaas soojeneb, kui puutuja lõikub v-teljega paremal T-teljest. Isobaari ja puutuja vaheline puutepunkt asub sel puhul pealpool inversioonipunkti.

Toodust võime teha järgneva kokkuvõtte:

Gaasi temperatuur muljumisel suureneb, kui gaasi algtemperatuur on suurem inversioonitemperatuurist. Kui ta aga on väiksem inversioonitemperatuurist, siis väheneb muljumisel gaasi temperatuur, s. o. gaas jahtub. Seda nähtust kasutatakse gaaside veeldamiseks.

Inversioonitemperatuuri saab määrata, lahendades ühiselt isobaari puutuja võrrandi

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T}$$

ja reaalse gaasi olekut karakteriseeriva võrrandi

$$f(p, v, T)_p = 0.$$

Van der Waals'i võrrand taandatud kujul annab taandatud inversioonitemperatuuri, rõhu ja mahu jaoks avaldised

$$\vartheta_{invers} = \frac{15}{4} - \frac{1}{12}\pi \mp \sqrt{9-\pi}, \tag{250}$$

$$\pi_{invers} = 24\sqrt{3\vartheta} - 12\vartheta - 27, \tag{251}$$

$$\varphi_{invers} = \frac{1}{1 \mp \sqrt{1 - \frac{1}{9}\pi}}. \tag{252}$$

Märk pluss ruutjuure ees vastab aine gaasilisele ja märk miinus vedelale olekule. Nende võrranditega on võimalik iga isobaari jaoks arvutada inversioonitemperatuuri, s. o. isobaaride inversioonipunktide koordinaate.

Võrranditest (250) ja (251) järgneb, et rõhul $p = 9p_{kr}$ on inversioonitemperatuur $3T_{kr}$ ja rõhkudel, mis on väiksemad kui $9p_{kr}$, on inversioonitemperatuur suurem kui $3T_{kr}$, s. o.

$$T_{invers} > 3T_{kr}\,[°\mathrm{K}].$$

Järelikult esineb allpool seda temperatuuri gaasi muljumisel igal juhul gaasi jahtumise efekt.

Toodust on ka selge, et gaasi ei saa veeldada, kui tema temperatuur on kõrgem inversioonitemperatuurist.

41. VEEAURU MULJUMINE.

Veeauru muljumisele on rakendatavad samad põhiseadused nagu reaalse gaasi puhulgi, s. o.

$$i_1 = i_2 = konst$$

ja

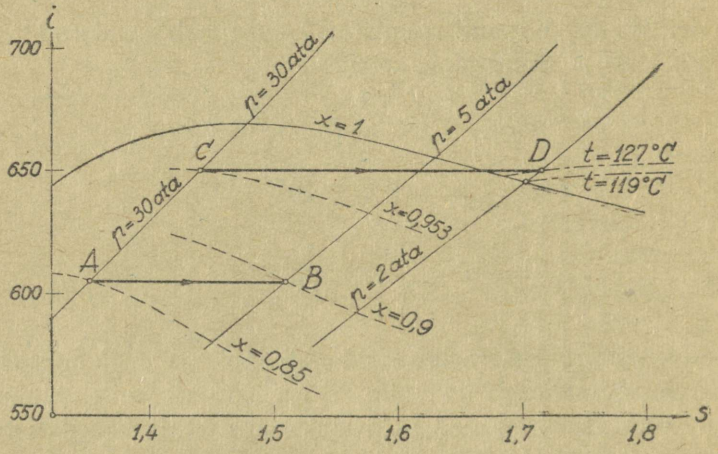
$$p_1 > p_2,$$

$$v_1 < v_2,$$

$$ds > 0.$$

Auru temperatuur langeb protsessis igal juhul, sest auru inversioonitemperatuur on üle 1000° C, s. o. ta asub märksa kõrgemal soojusenergeetikas kasutatavate aurude temperatuuridest.

Auru parameetrite muutusest auru muljumisprotsessis annab kõige piltlikuma ülevaate protsessi uurimine *i-s*-diagrammil. Selleks oletame, et protsess toimub isoentalpiliselt, mistõttu protsessi *i-s*-diagrammil kujutab entroopiateljega rööpne sirge. Vaatleme esiteks protsessi niiske auruga.



Joon. 131.

i-s-diagrammilt (joon. 131) nähtub, et niiske aur madal- ja keskrõhu piirkonnas kuivab muljumisprotsessis ja võib saada ka ülekuumenduse. Näiteks protsessis *AB* suureneb auru kuivusaste väärtuselt $x_1 = 0{,}85$ väärtuseni $x_2 = 0{,}90$, kusjuures auru rõhk langeb rõhult $p_1 = 30$ ata rõhuni $p_2 = 5$ ata ja temperatuur temperatuurilt $t_1 = 233°$ C kuni temperatuurini 151° C. Auru ülekuumenduse leiame, nagu teame, kui lahutame *i-s*-diagrammil ülekuumendatud auru oleku punkti läbiva isotermi temperatuurist t sama punkti läbivale isobaarile vastava kuiva küllastunud auru temperatuuri t_s, s. o.

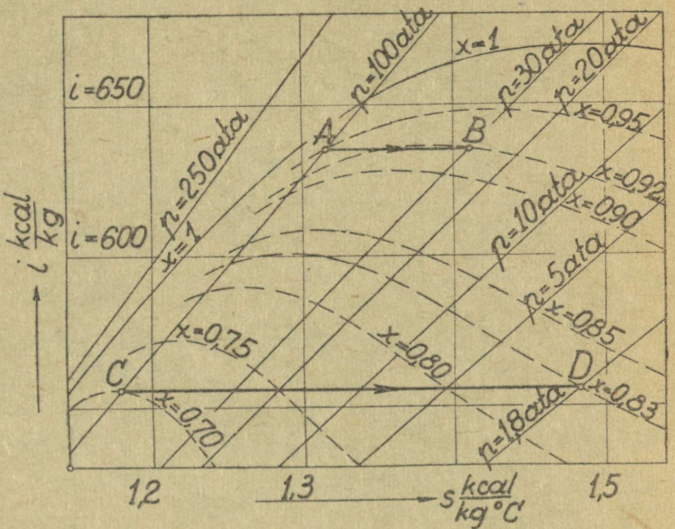
$$\Delta t = t - t_s.$$

Näiteks protsessis *CD*, kus auru algrõhk $p_1 = 30$ ata ja $x_1 = 0{,}953$, saab aur muljumisel kuni rõhuni $p_2 = 2$ ata ülekuumenduse $t_2 - t_s'' = 127 - 119 = 8°$ C.

Kõrgerõhuline niiske aur võib muljumisel, sõltuvalt algparameetritest, niiskuda, kuivada ja saada ka ülekuumenduse, nagu see selgub jooniselt 132. Näiteks protsessis *AB*, muljumisel rõhult $p_1 = 100$ ata ja $x_1 = 0{,}95$ kuni rõhuni $p_2 = 30$ ata, niiskub aur 3%, sest sel puhul $x_2 = 0{,}92$. Protsessi edasisel jätkamisel hakkab aur kuivama.

Kui aga sama rõhuga auru niiskus on $x_1 = 0{,}7$, siis väheneb muljumisprotsessis auru niiskusesisaldus, nagu seda näitab protsess *CD*.

Ülekuumendatud aurude muljumisel madal- ja keskrõhu piirkonnas suureneb auru ülekuumendus. Auru temperatuuri langus protsessis on aga seda väiksem, mida suurem on auru algülekuumendus. Suurtel algülekuumendustel on temperatuuri muutus peaaegu võrdne nulliga, sest sel puhul muutuvad isotermid peaaegu rööpseteks isoentalpia joontega, s. o. ülekuumenduse suurenemisega läheneb aur ideaalsele olekule.



Joon. 132.

Näiteks protsessis *AB* (joon. 133) väheneb auru temperatuur temperatuurilt $t_1 = 300°$ C temperatuurini $t_2 = 275°$ C ja rõhk rõhult 30 ata rõhuni 10 ata. Protsessi alguses on auru ülekuumendus

$$t_1 - t'_s = 300 - 233 = 67° \text{ C}$$

ja protsessi lõpul

$$t_2 - t''_s = 275 - 179 = 96° \text{ C}.$$

Kui auru temperatuur algolekus oleks olnud 500° C, siis ülekuumendus protsessi alguses oleks

$$t_1 - t'_s = 500 - 233 = 267° \text{ C}$$

ja protsessi lõpul

$$t_2 - t''_s = 490 - 179 = 311° \text{ C}.$$

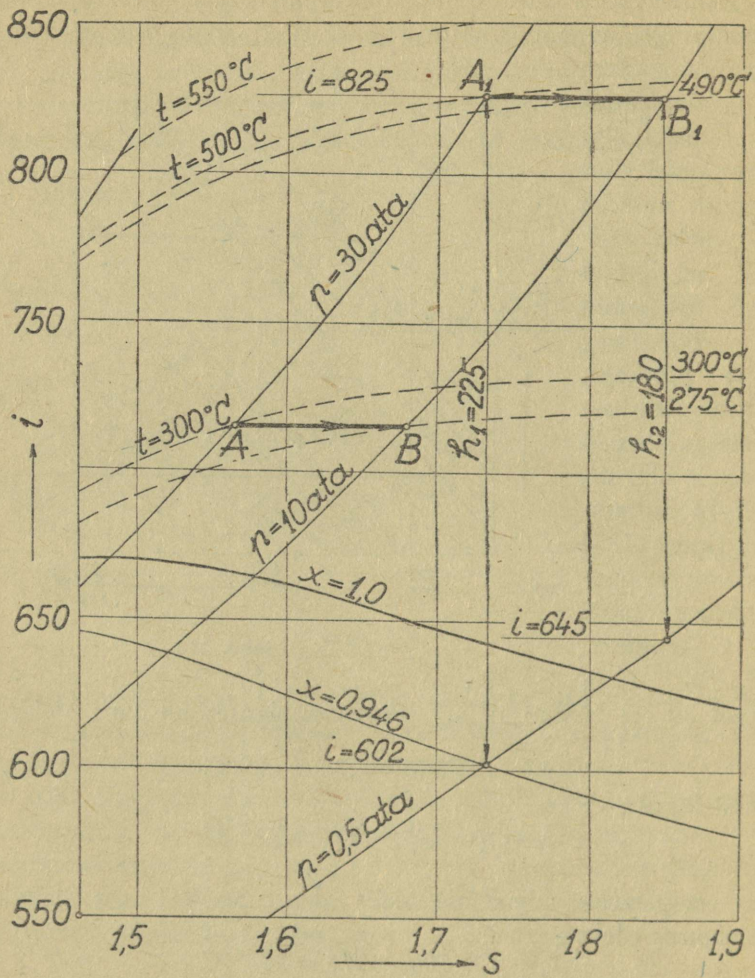
Temperatuuri muutus protsessis oleks

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 500 - 490 = 10° \text{ C}.$$

Esimesel juhul oli temperatuuri muutus protsessis

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 300 - 275 = 25° \text{ C}.$$

Oletades, et aur paisub adiabaatiliselt protsessi algusest A_1 ja lõpust B_1 kuni rõhuni 0,5 ata (joon. 133), oleks esimesel juhul entalpia langus



Joon. 133.

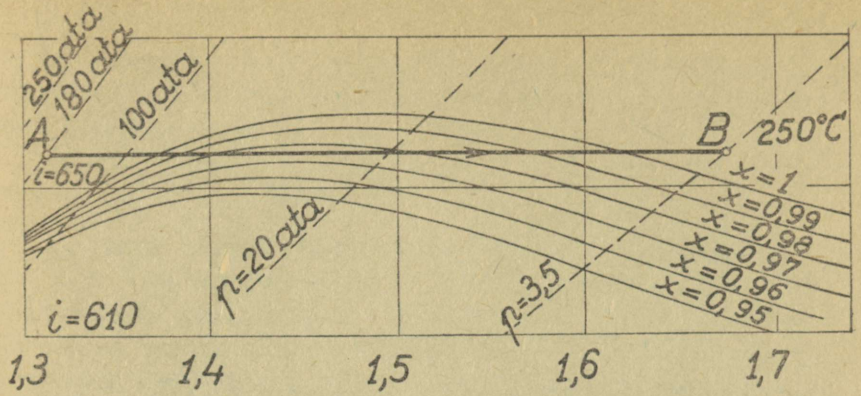
$$h_1 = 825 - 602 = 223 \text{ kcal/kg}$$

ja teisel juhul

$$h_2 = 825 - 645 = 180 \text{ kcal/kg.}$$

Järelikult on auru muljumisest tingitud kasustatava töö kadu

$$\frac{223 - 180}{223} 100 = 19\%.$$



Joon. 134.

Kõrgrõhu piirkonnas väikestel ülekuumendustel võib aur muljumisprotsessis niiskuda, kuid protsessi jätkamisel võib ta uuesti kuivada ja saada ka ülekuumenduse, nagu seda joonisel 134 illustreerib protsess *AB*. Ülekuumendatud aurudega toimuvates protsessides leiame auru mahud ülekuumendatud auru tabelist, kui diagrammil puuduvad isohoorid.

VI peatükk.

AURUJÕUSEADME SOOJUSBILANSS.

42. AURUMASINATE JA JÕUAGREGAADI KASUTEGURITE MÕISTED.

Aurumasinate termilised kasutegurid jagunevad kahte gruppi. Esimesse gruppi arvame kasutegurid, mis karakteriseerivad aurumasina täiuslikkust soojuse mehhaaniliseks tööks transformeerimisel aurumasina ringprotsessi auruga juhitava kütuse soojushulga suhtes. Neid kasutegureid nimetatakse absoluutseteks kasuteguriteks.

Teise gruppi kuuluvad aurumasinate nn. suhtelised kasutegurid. Need kasutegurid karakteriseerivad reaalse aurumasina täiuslikkust soojuse mehhaaniliseks tööks transformeerimisel ideaalse aurumasina suhtes, s. o. nad esindavad reaalses aurumasinas mehhaaniliseks tööks transformeerunud kütuse soojushulga suhet ideaalse masina vastava soojushulgaga.

Alljärgnevas avaldame kasutegurid ühes kilogrammis aurus sisalduva kütuse-soojushulga kaudu, s. o. oletame, et aurumasina ringprotsessi juhitakse korraga kütuse soojushulk, mida sisaldab üks kilogramm auru.

Märkides auru entalpia aurumasinasse voolamisel tähisega i_1 ja katla toitevee entalpia tähisega t, on ühes kilogrammis aurus kütuselt saadud soojushulk

$$q_1 = i_1 - t \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad \text{(a)}$$

Tegelikus olukorras on see soojushulk väiksem aurukatla seadmes ühe kilogrammi auru tekitamiseks tarbitud soojushulgast kadude võrra, mis esinevad auru transportimisel aurukatla seadmest aurumasinasse, s. o. katlamajast masinasaali.

Ideaalne termiline kasutegur η_t.

See kasutegur, nagu teame, on ideaalse aurumasina ringprotsessis mehhaaniliseks tööks muundunud soojushulga AL_t suhe ringprotsessi auruga juhitud kütusesoojusega $q_1 = i_1 - t$, s. o.

$$\eta_t = \frac{AL_t}{i_1 - t} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} = \frac{h}{i_1 - t}, \tag{253}$$

kus i_2 on auru entalpia tagastatava adiabaatilise paisumisprotsessi lõpul, i_1 on, nagu juba tähendatud, auru entalpia aurumasinasse voolamisel, s. o. enne adiabaatilist paisumist, ja t — katla toitevee entalpia, mis madalrõhkude piirkonnas on võrdne toitevee temperatuuriga Celsiuse järgi. Ideaalse aurumasina puhul ringprotsessis mehhaaniliseks tööks muundunud soojushulka $AL_t = i_1 - i_2$ nimetame ideaalse aurumasina indikaatortööks.

Absoluutne indikaatorkasutegur η_i ehk lihtsalt indikaatorkasutegur.

See kasutegur esineb kolbaurumasinate puhul ja väljendab tegeliku aurumasina silindris mehhaaniliseks tööks muundunud soojushulga, s. o. indikaatortöö AL_i suhet auruga aurumasina silindrisse juhitud kütusesoojushulgaga $i_1 - t$, s. o.

$$\eta_i = \frac{AL_i}{i_1 - t}. \tag{254}$$

See kasutegur karakteriseerib tegeliku aurumasina täiuslikkust soojuse transformeerimisel mehhaaniliseks tööks.

Võrreldes ideaalse masinaga on reaalse aurumasina indikaatortöö AL_i väiksem ideaalse masina omast tegelikus aurumasinas esinevate mitmesuguste soojuslikkude kadude tõttu, nagu seda on auru muljumine silindrisse voolamisel, auru mittetäielik paisumine, kahjulik ruumala silindris, soojuskaod jne.

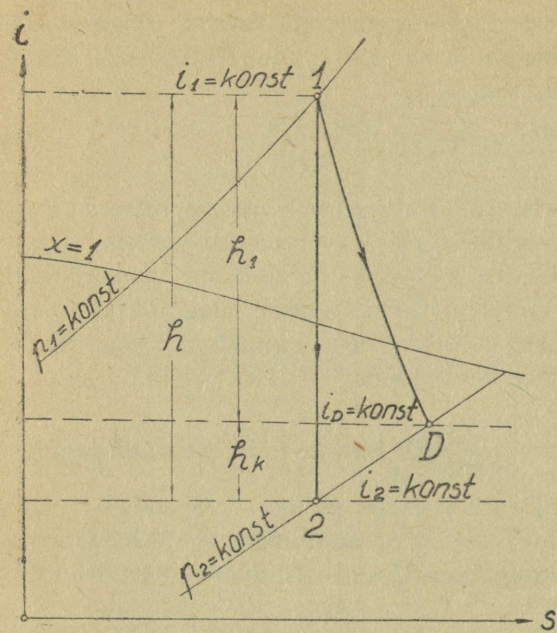
Indikaatortöö järgi arvutatud jõumasinate võimsust nimetatakse jõumasina indikaatorvõimsuseks ja märgitakse tähisega N_i.

Auruturbiini sisemine absoluutne kasutegur η_i.

See kasutegur esineb auruturbiinide puhul ja on sisult identne aurumasina indikaatorkasuteguriga. Seda kasutegurit nimetatakse ka lihtsalt turbiini sisemiseks kasuteguriks ning me märgime teda sama tähisega nagu indikaatorkasuteguritki. See kasutegur avaldub seosega

$$\eta_i = \frac{i_1 - i_D}{i_1 - t} = \frac{h_1}{i_1 - t} = \frac{h(1-\zeta)}{i_1 - t}, \tag{255}$$

kus h_1 on entalpia langus auru tagastatamatus voolamisprotsessis ja i_D — auru entalpia tagastatamatu voolamisprotsessi lõpul, nagu see nähtub jooniselt 135. See kasutegur, nagu indikaatorkasutegurgi, karakteriseerib turbiini täiuslikkust soojuse mehhaaniliseks tööks transformeerimisel. Auruturbiinis mehhaaniliseks tööks muundunud soojushulka $i_1 - i_D = h_1$ nimetatakse turbiini sisemiseks tööks ja selle töö järgi arvutatud võimsust turbiini sisemiseks võimsuseks. Turbiini see võimsus märgitakse tavaliselt sama tähisega N_i, nagu aurumasina indikaatorvõimsuski.



Joon. 135.

Suhteline indikaatorkasutegur η_{oi}.

Kasutegur η_{oi} karakteriseerib tegelikku aurumasinat ideaalse aurumasina suhtes ja näitab, kuivõrd täiuslikult toimub reaalses aurumasinas soojuse mehhaaniliseks tööks transformeerimine võrreldes ideaalse masinaga. Järelikult on suhteline indikaatorkasutegur reaalse aurumasina indikaatortöö AL_i suhe ideaalse aurumasina indikaatortööga $i_1 - i_2 = AL_t$, s. o.

$$\eta_{oi} = \frac{AL_i}{i_1 - i_2}. \tag{256}$$

Turbiini sisemine suhteline kasutegur η_{oi}.

See kasutegur on sisuliselt identne aurumasina suhtelise indikaatorkasuteguriga, mistõttu märgime ta sama tähisega nagu suhtelise indikaatorkasutegurigi. Auruturbiini sisemise suhtelise kasuteguri avaldis on

$$\eta_{oi} = \frac{i_1 - i_D}{i_1 - i_2} = \frac{h_1}{h} = 1 - \xi. \tag{257}$$

Korrutades võrranditega (253) ja (256) avaldatud kasutegureid leiame, et

$$\eta_t \cdot \eta_{oi} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} \cdot \frac{AL_i}{i_1 - i_2} = \frac{AL_i}{i_1 - t} = \eta_i,$$

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi}, \tag{258}$$

sest võrrandi (254) järgi

$$\frac{AL_i}{i_1 - t} = \eta_i.$$

Analoogiliselt leiame, et auruturbiini sisemine kasutegur avaldub sama seosega, s. o.

$$\eta_t \cdot \eta_{oi} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} \cdot \frac{i_1 - i_D}{i_1 - i_2} = \frac{i_1 - i_D}{i_1 - t} = \eta_i,$$

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi},$$

sest võrrandi (255) järgi

$$\frac{i_1 - i_D}{i_1 - t} = \eta_i.$$

Absoluutne efektiivne kasutegur η_e ehk lihtsalt efektiivne kasutegur.

See kasutegur on aurumasina ehk üldse soojusjõumasina võllilt tegelikult saadava mehhaanilise töö AL_e suhe soojusjõumasinasse juhitud kütusesoojusega $i_1 - t$, s. o.

$$\eta_e = \frac{AL_e}{i_1 - t}. \tag{259}$$

Järelikult määrab see kasutegur selle osa kütuse soojusest, mis soojusjõumasinas tegelikult muutub kasutatavaks ehk nn. efektiivseks tööks. Selle töö järgi arvutatud jõumasina võimsust, nagu teame, nimetatakse jõumasina efektiiv-võimsuseks ja märgitakse tähisega N_e.

Mehhaaniline kasutegur η_m.

Mehhaaniline kasutegur on aurumasina ehk üldse jõumasina efektiivse töö või efektiivse võimsuse suhe indikaatortööga või -võimsusega, s. o.

$$\eta_m = \frac{AL_e}{AL_i} = \frac{N_e}{N_i}. \tag{260}$$

Auruturbiini puhul

$$\eta_m = \frac{AL_e}{i_1 - i_D} = \frac{N_e}{N_i}. \tag{261}$$

Mehhaaniline kasutegur hindab jõumasinas esinevaid mehhaanilisi kadusid, nagu seda on hõõrdumised laagrites ja silindrites, abimehhanismide tegevuseks tarbitav töö jne.

Korrutades võrranditega (254) ja (260) avaldatud kasutegureid, saame

$$\eta_i \cdot \eta_m = \frac{AL_i}{i_1 - t} \cdot \frac{AL_e}{AL_i} = \frac{AL_e}{i_1 - t} = \eta_e,$$

$$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_i. \tag{262}$$

Auruturbiini puhul saame sama avaldise

$$\eta_i \cdot \eta_m = \frac{i_1 - i_D}{i_1 - t} \cdot \frac{AL_e}{i_1 - i_D} = \frac{AL_e}{i_1 - t} = \eta_e.$$

Asendades seoses (262) η_i tema avaldisega võrrandist (258), leiame, et

$$\eta_e = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m. \tag{263}$$

Suhteline efektiivne kasutegur η_{oe}.

Mehhaanilise kasuteguri η_m ja suhtelise kasuteguri η_{oi} korrutist nimetatakse suhteliseks efektiivseks kasuteguriks. Märkides selle kasuteguri tähisega η_{oe}, võime ta avaldada kujul

$$\eta_{oe} = \eta_m \cdot \eta_{oi}. \tag{264}$$

See kasutegur karakteriseerib tegeliku aurumasina (kolbaurumasin või auruturbiin) täiuslikkust ideaalse aurumasina suhtes.

Järelikult on suhteline efektiivne kasutegur tegeliku aurumasina efektiivse töö või võimsuse suhe ideaalse aurumasina efektiivse tööga või võimsusega, mis selles masinas kadude puudumise tõttu on võrdne sisemise või indikaatortööga.

Toodu põhjal on tegeliku aurumasina efektiivne kasutegur avaldatav ka seosega

$$\eta_e = \eta_t \cdot \eta_{oe}. \tag{265}$$

Elektrigeneraatori ja ajami kasutegurid η_g ja η_{aj}.

Elektrienergia tootmisel elektrigeneraatori klemmidelt saadav elektriline võimsus on väiksem aurujõumasina efektiivsest võimsusest ajamis tekkivate mehhaaniliste kadude ja elektrigeneraatoris esinevate mitmesuguste elektriliste ja mehhaaniliste kadude võrra. Neid kadusid hinnatakse ajami η_{aj} ja elektrigeneraatori η_g suhteliste kasuteguritega η_{aj} ja η_g. Ajami kasutegur on ajamilt elektrigeneraatorile ülekanduva võimsuse N_{aj} suhe aurumasina efektiivse võimsusega N_e, s.o.

$$\eta_{aj} = \frac{N_{aj}}{N_e}. \tag{266}$$

Elektrigeneraatori kasutegur on generaatori klemmidelt saadava võimsuse N_{el} suhe ajamilt generaatorile ülekanduva võimsusega N_{aj}, s. o.

$$\eta_g = \frac{N_{el}}{N_{aj}}. \tag{267}$$

Korrutades võrranditega (266) ja (267) avaldatud kasutegureid, saame

$$\eta_{aj} \cdot \eta_g = \frac{N_{aj}}{N_e} \cdot \frac{N_{el}}{N_{aj}} = \frac{N_{el}}{N_e},$$

$$\frac{N_{el}}{N_e} = \eta_{aj} \cdot \eta_g. \tag{268}$$

Võrrandites (266), (267) ja (268) esinevad võimsused on avaldatud samades mõõtühikutes, s. o. kilovattides või hobujõududes. Eespooltoodud võrrandid on tuletatavad ka mehhaanilise või elektrilise töö kaudu, sest sooritatav töö on võrdeline ajaga ja võimsusega.

Masinasaali kasutegur η_{el} ja suhteline elektriline kasutegur η_{oel}.

Märkides aurumasinasse aja τ [sek] vältel juhitud kütuse-soojushulga Q_1 [kcal], on võrrandis (268) esinevad võimsused hobujõududes avaldatavad kujul

$$N_e = \frac{427\, Q_1 \cdot \eta_e}{75 \cdot \tau} \tag{a}$$

ja

$$N_{el} = \frac{427\, Q_1 \cdot \eta_{el}}{75 \cdot \tau}, \tag{b}$$

kus $Q_1 \cdot \eta_{el}$ on soojushulk, mis muutub elektrienergiaks või temale ekvivalentseks mehhaaniliseks tööks ja on saadav elektrigeneraatori klemmidelt. Seega on η_{el} kasutegur, mis karakteriseerib jõuagregaadi (aurumasin, ajam ja generaator) täiuslikkust soojuse transformeerimisel elektrienergiaks. Seda kasutegurit nimetatakse masinasaali kasuteguriks ja ka elektriliseks kasuteguriks.

Asendades võrrandis (268) N_e ja N_{el} võrduste (a) ja (b) kaudu, saame masinasaali kasuteguri jaoks avaldise

$$\frac{N_{el}}{N_e} = \frac{427 \cdot Q_1 \cdot \eta_{el}}{75 \cdot \tau} \cdot \frac{75 \cdot \tau}{427 \cdot Q_1 \cdot \eta_e} = \frac{\eta_{el}}{\eta_e} = \eta_{aj} \cdot \eta_g,$$

$$\eta_{el} = \eta_e \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g. \tag{269}$$

Aluseks võttes, et võrrandi (263) järgi $\eta_e = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m$, saame masinasaal kasuteguri avaldada ka kujul

$$\eta_{el} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g. \tag{270}$$

Korrutist $\eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g$ nimetatakse elektriliseks suhteliseks kasuteguriks. See kasutegur karakteriseerib jõuagregaadi, s. o. jõumasina, ajami ja generaatori täiuslikkust ideaalse jõumasina suhtes. Järelikult on see kasutegur generaatori klemmidelt saadava võimsuse või töö suhe ideaalse masina võimsusega või kasuliku tööga. Märkides selle kasuteguri tähisega η_{oel}, võime ta avaldada võrrandiga

$$\eta_{oel} = \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g . \tag{271}$$

Eespooltoodust järgneb, et aurumasinasse juhitav kütuse soojushulk Q_1 ja elektrienergiaks transformeeruv soojushulk, mille märgime tähisega Q_{el}, on seotud võrdusega

$$Q_{el} = Q_1 \cdot \eta_{el} = Q_1 \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g . \tag{272}$$

43. AURUJÕUSEADME KARAKTERISTIKA JA SOOJUSBILANSS.

Katelseadme kasutegur η_{ks}.

Aurujõuseadme üldine soojusbilanss käsitab kütuse soojuse muundumist mehhaaniliseks tööks või kasutatavaks energiaks ühes vastavate kadudega, arvates aurukatla koldesse viidud kütuse soojusest kuni produtseeritava kasuliku energiani.

Käesolevas vaatleme ainult lihtsa aurujõuseadme soojusbilansi tähtsamaid punkte, sest selle küsimuse detailne käsitlus kuulub eridistsipliini „Soojusmajandus" valdkonda.

Aurukatla koldesse kütuse näol viidud soojust ei ole võimalik täielikult üle kanda töötavale kehale, vaid osa temast läheb paratamatult kaduma. Nendeks kadudeks on näiteks põlemissaaduste soojusena katlast eemalejuhitav soojus, katla müürituse kaudu toimuvad soojuse kiirgus- ja konvektiivsed kaod, kütuse mehhaanilisest ja keemilisest mittetäielikust põlemisest tingitud kaod jne. Katelseadme kadusid hinnatakse nn. katelseadme üldise kasuteguriga η_{ks}. See kasutegur on katelseadmes töötavale kehale ülekandunud kütuse-soojushulga suhe samal ajavahemikul katla koldesse viidud kütuse soojusega.

Märkides katelseadmes töötavale kehale ülekandunud soojushulga tähisega ΔQ_k ja temale vastava kütuse üldise soojushulga tähisega Q_k, on katelseadme kasutegur, mille märgime tähisega η_{ks}, avaldatav kujul

$$\eta_{ks} = \frac{\Delta Q_k}{Q_k} . \tag{273}$$

Sellest seosest leiame, et katelseadmes töötavale kehale ülekandunud soojushulk on

$$\Delta Q_k = Q_k \cdot \eta_{ks}. \tag{274}$$

Aurujuhtme kasutegur η_{tr}.

Auru kadudeta transportimisel mööda aurujuhet katelseadmest aurumasinani läheb osa soojusest kaduma läbi aurujuhtme isolatsiooni. Seda kadu hinnatakse aurujuhtme kasuteguriga η_{tr}, mis on aurumasinasse juhitud kütuse-soojushulga Q_1 suhe katelseadmes töötava keha samale kaalulisele kogusele ülekandunud kütuse-soojushulgaga ΔQ_k, s. o.

$$\eta_{tr} = \frac{Q_1}{\Delta Q_k}. \tag{275}$$

Sellest seosest avaldub aurumasinasse juhitud soojushulk

$$Q_1 = \eta_{tr} \cdot \Delta Q_k; \tag{276}$$

asendades ΔQ_k tema avaldisega võrrandist (274), saame

$$Q_1 = \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot Q_k. \tag{277}$$

Jõujaama ehk ökonoomsuse kasutegur $\eta_{ö}$.

Asendades võrrandis (272) soojushulga Q_1 tema avaldisega võrrandist (277), saame katlakoldesse viidud kütuse-soojushulga Q_k ja elektrienergiaks muundunud soojushulga Q_{el} vahelise seose, s. o.

$$Q_{el} = Q_k \cdot \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g. \tag{278}$$

Võrrandis esinevat kasutegurite korrutist nimetatakse jõujaama ehk ökonoomsuse kasuteguriks. Märkides selle kasuteguri tähisega $\eta_{ö}$, võime ta avaldada seosega

$$\eta_{ö} = \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{aj} \cdot \eta_g = \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{el}. \tag{279}$$

Järelikult

$$Q_{el} = Q_k \cdot \eta_{ö}. \tag{280}$$

Jõujaama kütusekulu.

Märkides soojusjõujaamas tunnis tarbitud kütuse kaalulise koguse kilogrammides tähisega B ja kütuse tehnilise soojusväärtuse, mida katelde kütuste puhul nimetame tarbimisküttevääruseks ehk lihtsalt küttevää-

tuseks, tähisega Q_t^k kcal/kg, saame võrrandi (280) põhjal sellest soojusest elektrienergiaks muunduva osa Q_{el} avaldada kujul

$$Q_{el} = B \cdot Q_t^k \cdot \eta_{ö} \frac{\text{kcal}}{\text{h}} . \tag{281}$$

Kui soojusjõujaama efektiivne elektriline võimsus on N_{el} kilovatti, võime soojushulga Q_{el} avaldada seosega

$$Q_{el} = 860 \cdot N_{el} \frac{\text{kcal}}{\text{h}} , \tag{282}$$

kus 860 on ühe kilovatt-tunni töö kilokalorites. Asendades võrrandis (281) Q_{el} selle avaldisega ja lahendades võrrandi B suhtes, saame võrrandi jõujaama tunnise kütusekulu arvutamiseks, s. o.

$$B = \frac{860 \cdot N_{el}}{Q_t^k \cdot \eta_{ö}} \frac{\text{kg}}{\text{h}} . \tag{283}$$

Ühe kilovatt-tunni kohta on kütusekulu

$$b_{el} = \frac{B}{N_{el}} = \frac{860}{Q_t^k \cdot \eta_{ö}} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} . \tag{284}$$

Soojusekulu ühe kilovatt-tunni kohta, mille märgime tähisega q_{el}, on

$$q_{el} = b_{el} \cdot Q_t^k = \frac{860}{\eta_{ö}} \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}} . \tag{285}$$

Kui jõujaama võimsus on antud efektiivsetes hobujõududes N_e, siis avaldub jõujaama tunnine kütusekulu võrrandiga

$$B = \frac{632 \cdot N_e}{Q_t^k \cdot \eta_{ö}} \frac{\text{kg}}{\text{h}} \tag{286}$$

ja kütusekulu b_e ühe hobujõud-tunni kohta võrrandiga

$$b_e = \frac{B}{N_e} = \frac{632}{Q_t^k \cdot \eta_{ö}} \frac{\text{kg}}{\text{EHJh}} . \tag{287}$$

Soojusekulu q_e efektiivse hobujõud-tunni kohta on

$$q_e = b_e \cdot Q_t^k = \frac{632}{\eta_{ö}} \frac{\text{kcal}}{\text{EHJh}} . \tag{288}$$

Jõujaama aurukulu.

Soojusjõujaama karakteriseerivaks tähtsaks näitajaks peale kütusekulu on jõujaama auru-erikulu. Märkides ideaalse aurumasina aurukulu ühe

kilovatt-tunni kohta tähisega d_W ja hobujõud-tunni kohta tähisega d ning reaalse aurumasina auru-erikulu vastavalt d_E ja d_e, võime nad avaldada seostega

$$d_E = \frac{d_W}{\eta_{oe}} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \tag{289}$$

$$d_e = \frac{d}{\eta_{oe}} \frac{\text{kg}}{\text{EHJh}}, \tag{290}$$

kus η_{oe} on võrrandiga (264) avaldatud efektiivne suhteline kasutegur. Elektrigeneraatori klemmidel teotseva võimsuse kohta on auru-erikulu, mille märgime tähisega d_g,

$$d_g = \frac{d_W}{\eta_{oel}} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \tag{291}$$

kus η_{oel} on võrrandiga (271) avaldatud elektriline suhteline kasutegur.

Kui aurujõumasin töötab Rankine'i ringprotsessiga, siis avalduvad võrrandid kujul

$$d_E = \frac{860}{(i_1 - i_2)\,\eta_{oe}} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \tag{292}$$

$$d_e = \frac{632}{(i_1 - i_2)\,\eta_{oe}} \frac{\text{kg}}{\text{EHJh}}, \tag{293}$$

$$d_g = \frac{860}{(i_1 - i_2)\,\eta_{oel}} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}. \tag{294}$$

Näide. Aurujõuseadme kasutegurid on:
katelseadme kasutegur $\eta_{ks} = 0{,}80$,
aurujuhtme kasutegur $\eta_{tr} = 0{,}98$,
ideaalse aurumasina termiline kasutegur $\eta_t = 0{,}37$,
reaalse turbiini suhteline sisemine kasutegur $\eta_{oi} = 0{,}83$,
mehhaaniline kasutegur $\eta_m = 0{,}98$,
turbiiniga otseselt sidurdatud elektrigeneraatori kasutegur $\eta_g = 0{,}97$.

Aluseks võttes neid kasutegureid, anda üksikud liitkasutegurid ja koostada ühe kilogrammi kütuse kohta soojusbilanss jõujaama ulatuses, kui kütuse tarbimisküttevääртus on 3500 kcal/kg.

Lahendus. Turbiini sisemine kasutegur

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi} = 0{,}37 \cdot 0{,}83 = 0{,}31.$$

Turbiini efektiivne kasutegur

$$\eta_e = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m = \eta_i \cdot \eta_m = 0{,}31 \cdot 0{,}98 = 0{,}304.$$

Suhteline efektiivne kasutegur

$$\eta_{oe} = \eta_{oi} \cdot \eta_m = 0{,}83 \cdot 0{,}98 = 0{,}81 .$$

Masinasaali ehk elektriline kasutegur

$$\eta_{el} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g = \eta_e \cdot \eta_g = 0{,}30 \cdot 0{,}97 = 0{,}29 .$$

Suhteline elektriline kasutegur

$$\eta_{oel} = \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g = \eta_{oe} \cdot \eta_g = 0{,}81 \cdot 0{,}97 = 0{,}79 .$$

Soojusjõujaama ehk ökonoomsuse kasutegur

$$\eta_{ö} = \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g = \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{el} = 0{,}80 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}29 = 0{,}23 .$$

See kasutegur näitab, et 23% kütuse soojusest transformeerub elektrienergiaks.

Ühe kilogrammi kütusega viiakse koldesse tarbimisküttevääртuse näol 3500 kcal/kg. Sellest soojusest kandub katelseadmes töötavale kehale üle

$$\Delta Q_k = Q_t^k \cdot \eta_{ks} = 3500 \cdot 0{,}80 = 2800 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Katelseadmest lahkub kasutult

$$Q_t^k \cdot (1 - \eta_{ks}) = 3500 \ (1 - 0{,}80) = 700 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Turbiini juhitakse soojushulk

$$Q_1 = 2800 \cdot \eta_{tr} = 2800 \cdot 0{,}98 = 2744 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Soojuse kadu aurujuhtme kaudu katlamajast masinasaali on

$$2800 \ (1 - \eta_{tr}) = 2800 \ (1 - 0{,}98) = 56 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Turbiinis muutub sisemiseks tööks soojushulk

$$Q_i = Q_1 \cdot \eta_i = 2744 \cdot 0{,}31 = 851 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

ja juhitakse jahutajasse soojushulk

$$Q_2 = Q_1 \ (1 - \eta_i) = 2744 \ (1 - 0{,}31) = 1893 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Efektiivseks tööks muutuv soojushulk on

$$Q_e = Q_1 \cdot \eta_e = 2744 \cdot 0{,}304 = 834 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Mehhaaniline kadu turbiinis on

$$Q_i \ (1 - \eta_m) = 851 \ (1 - 0{,}98) = 17 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} .$$

Elektrienergiaks muutub soojushulk

$$Q_{el} = Q_e \cdot \eta_g = 834 \cdot 0{,}97 = 809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

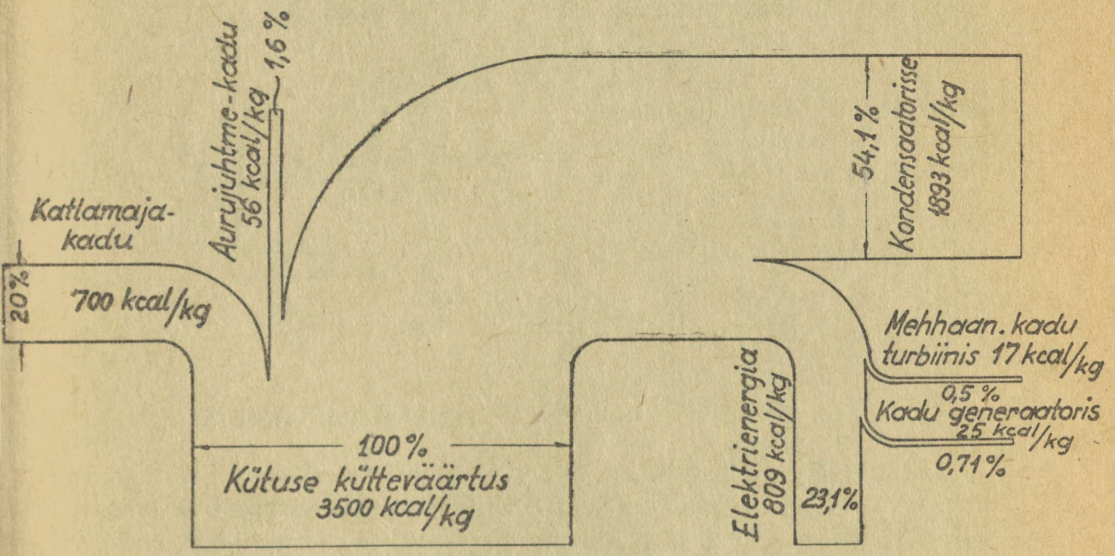
ehk

$$Q_{el} = Q_t^k \eta_ö = 3500 \cdot 0{,}231 = 809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Kadu generaatoris on

$$Q_e (1 - \eta_g) = 834 (1 - 0{,}97) = 25 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Joonisel 136 on soojusbilanss esitatud graafiliselt diagrammina.



Joon. 136.

Näide. Auru rõhk on $p_1 = 26$ ata ja $t_1 = 450°$ C. Määrata eelmises näites toodud soojusbilansi alusel aurukulu ühe kilovatt-tunni kohta ja kütusekulu 24 tunni vältel, kui auru rõhk kondensaatoris on 0,04 ata, jõujaama võimsus 6000 kW ja kütuse tarbimisküttevääртus 3500 kcal/kg (põlevkivi).

Lahendus. *i-s*-diagrammilt leiame, et

$$i_1 = 799 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad i_2 = 516 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Entalpia säärase languse puhul on ideaalse auruturbiini aurukulu ühe kilovatt-tunni kohta

$$d_W = \frac{860}{i_1 - i_2} = \frac{860}{799 - 516} = 3{,}04 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}.$$

Eelmisest näitest leiame, et jõujaama suhteline elektriline kasutegur $\eta_{oel} = 0{,}79$. Järelikult jõujaama aurukulu ühe kilovatt-tunni kohta on

$$d_g = \frac{860}{(i_1 - i_2)\,\eta_{oel}} = \frac{860}{(799 - 516)\,0{,}79} = 3{,}85 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}.$$

Aurukulu 24 tunni vältel on

$$D_g = 24 \cdot N_{el} \cdot d_g = 24 \cdot 6000 \cdot 3{,}85 = 554\,400 \text{ kg}.$$

Oletades, et katla toitevee temperatuur on 28° C, on töötavale kehale katelseadmes ülekandunud soojushulk 24 tunni vältel

$$D_g \cdot (i_1 - t) \cdot \frac{1}{\eta_{tr}} \text{ kcal}.$$

Järelikult on kütusekulu tonnides

$$\frac{D_g\,(i_1 - t)}{Q_t^k \cdot \eta_{ks} \cdot \eta_{tr} \cdot 1000} = \frac{55400\,(799 - 28)}{3500 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}98 \cdot 1000} \approx 154 \text{ tonni}.$$

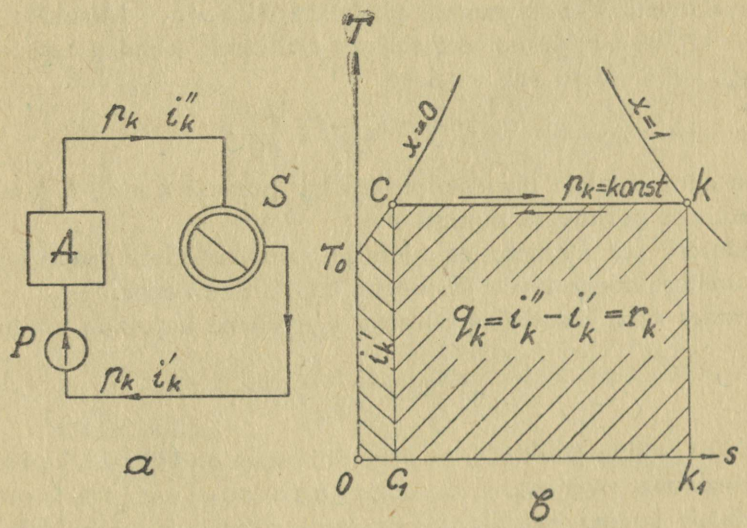
Võrrandi (283) järgi on kütusekulu

$$\frac{24 \cdot 860 \cdot N_{el}}{Q_t^k \cdot \eta_{\ddot{o}} \cdot 1000} = \frac{24 \cdot 860 \cdot 6000}{3500 \cdot 0{,}231 \cdot 1000} \approx 154 \text{ tonni}.$$

44. SOOJUSE KOMBINEERITUD KASUTAMINE.

Eelmisest peatükist selgus, et aurujõuseadme keskmine kasutegur on piires 0,20 — 0,30, mistõttu 80 kuni 70% kütuse soojusest jääb kasutamata. Sellest kasutamata soojusest esindavad paratamatuid kadusid kaod suitsugaasiga, kiirgusega, hõõrdumised jne., mis kokku moodustavad umbes 25%. Ülejäänud 45 — 55% soojuskadudest moodustab turbiinist väljuva töötanud auru soojusesisaldavus, mis juhitakse ringprotsessist eemale kondensaatori jahutusveega, s. o. mis termodünaamika teise seaduse põhjal kandub üle jahutajale. Tavaliselt ei ole see soojus tehniliselt enam kasutatav, sest jõujaamad, et tõsta ringprotsessi termilist kasutegurit, töötavad niivõrd sügavatel kondensaatori vaakuumidel, et auru kondenseerumisel vabanev soojus pole madala temperatuuri tõttu kõlblik tehnilisteks otstarveteks. Näiteks on praegusaegsetes NSV Liidu kondensatsioonturbiinides paisumise lõpprõhuks 0,03 kuni 0,04 ata, millele vastab auru kondenseerumistemperatuur 23,8° kuni 28,6° C. Arvestades soojuse ülekandeks vajalikku temperatuurilist pinget, peab kondensaatorist lahkuva jahutusvee temperatuur olema veelgi madalam. Et tõsta soojusjõujaama kasutegurit kütuse soojuse täie-

likumaks ärakasutamiseks, on NSV Liidus suuremates tööstus- ja majanduskeskustes üle mindud kombineeritud soojus- ja elektrijaamadele (ТЭЦ). Neid kombineeritud jõujaamu nimetatakse soojuselektrijaamadeks (Теплоэлектроцентраль, lüh. ТЭЦ). Soojuselektrijaamade ülesandeks on varustada ümbrust ja tööstusettevõtteid vajaliku elektrienergia ning soojusega, mis tarbitakse tehnoloogilisteks otstarveteks, majade kütteks jne.



Joon. 137.

Tekib küsimus, kui suurel määral on nendes jõujaamades ära kasutatud kütuse soojus ja eriti see osa soojusest, mis katelagregaadis kandub üle töötavale kehale. Et küsimuses selgusele jõuda, vaatleme esiteks soojusjaamas esinevat ringprotsessi ning selle ringprotsessi soojuse kasutatavuse kasutegurit. Soojusjaama skeem on antud joonisel 137-*a*. Soojusjaam koosneb katlast *A*, millest vastavarõhuline aur juhitakse torustiku kaudu edasi tarbijateni *S*, näiteks rajooni keskkütete radiaatoritesse, kus aur annab ära oma aurustumissoojuse ning kondenseerub. Kondensaat juhitakse tagasi soojusjaama, kus ta pumbaga *P* surutakse tagasi katlasse, millega ringprotsess on teostunud.

T-*s*-diagrammil on kadudeta ringprotsess esitatud joonisel 137-*b*. Ringprotsess algab katlasse pumbaga antud kondensaadi isobaarilise aurustamisega rõhul $p_k = konst$ alumise piirkõvera punktist *c* kuni ülemise piirkõvera punktini *k*. Punktis *k* on kondensaat aurustunud ja juhitakse soojuskadudeta torustiku kaudu soojusetarbijatesse. Nendes soojusetarbijates

toimub auru isobaariline kondenseerumine ülemise piirkõvera punktist k kuni tagasi alumise piirkõvera punktini c, kus aur on kondenseerunud, ja antakse pumbaga tagasi aurukatlasse.

Toodust järgneb, et vee aurustumisprotsess aurukatlas kui ka auru kondenseerumine soojusetarbijates toimub ühel ning samal rõhul $p_k = konst$, mistõttu vee aurustamiseks tarbitud soojus aurukatlas on võrdne soojusetarbijates eraldunud auru kondenseerumissoojusega, s. o. mõlemad soojushulgad avalduvad T-s-diagrammil pindalaga ckk_1c_1. Märkides aurustumissoojuse tähisega r_k ja soojusetarbijates eraldunud kondenseerumissoojuse tähisega q_k, võime kirjutada võrduse

$$q_k = r_k = i''_k - i'_k \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \qquad \text{(a)}$$

kus i''_k on auru entalpia ülemise piirkõvera punktis k ning i'_k kondensaadi entalpia alumise piirkõvera punktis c.

Võrdusest (a) järgneb, et ideaalse, s. o. kadudeta soojusjaama ringprotsessi soojusekasutatavuse kasutegur on võrdne ühega.

Märkides selle kasuteguri tähisega η_{sj}, võime kirjutada võrduse

$$\eta_{sj} = \frac{q_k}{r_k} = \frac{i''_k - i'_k}{i''_k - i'_k} = 1.$$

Toodust võime järeldada, et aurujõujaamas on võimalik kondensaatori kaudu eemalduvat soojust, s. o. töötanud soojust, ära kasutada, kui aurul turbiinis laseme paisuda ainult kuni rõhuni, mis rahuldab soojusetarbija nõudeid, ja säärase töötanud auru juhime edasi soojusetarbijatele, kust ta kondensveena tuleb tagasi aurujõujaama jne.

Säärase nn. soojuselektrijaama skeem on esitatud joonisel 138. Skeemilt nähtub, et ta erineb tavalise lihtsa aurujõujaama skeemist kondensaatoriosas, mida asendab soojusetarbija S. Selle soojuselektrijaama ringprotsess T-s-diagrammil on esitatud joonisel 138-b. Diagrammil avaldab pindala $ba1kc$ turbiinis mehhaaniliseks tööks muutunud soojushulka AL_t ja pindala ckk_1c_1 soojusetarbijale juhitud, turbiinis töötanud soojushulka. Ringprotsessis katelseadmes töötavale kehale ülekandunud kütuse-soojushulk q_1 avaldub pindalaga c_1cba1k_1.

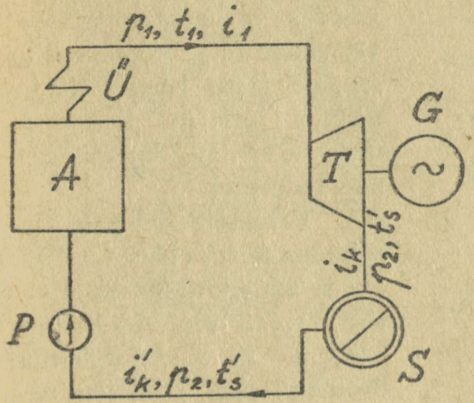
Entalpia kaudu avalduvad need soojushulgad

$$AL_t = i_1 - i_k,$$
$$q_k = i_k - i'_k,$$
$$q_1 = i_1 - i'_k,$$

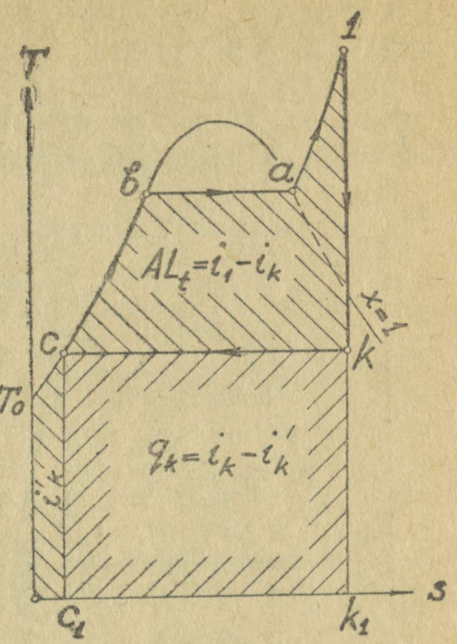
kus i_1 on ülekuumendatud, s. o. värske auru entalpia auruturbiini voolamisel diagrammi punktis 1, i_k — turbiinist väljuva, s. o. töötanud auru

entalpia, millele vastab diagrammi punkt k, ja i_k' — soojusetarbijatest tagasi voolava kondensaadi entalpia, mis vastab diagrammi punktile c.

Toodust järgneb, et kadudeta ringprotsessi soojusekasutatavuse kasutegur, mille märgime tähisega η_{sj}, avaldub seosega



Joon. 138-a.



Joon. 138-b.

$$\eta_{sj} = \frac{AL_t + q_k}{q_1} = \frac{i_1 - i_k + i_k - i_k'}{i_1 - i_k'} = \frac{i_1 - i_k'}{i_1 - i_k'} = 1 . \qquad \text{(b)}$$

Järelikult on ringprotsessis soojusekasutatavuse kasutegur töötavasse kehasse juhitud üldise soojuse suhtes võrdne ühega, s. o. kogu ringprotsessi juhitud soojus tarbitakse kasulikult.

Võrdus (b) jääb kehtima ka sel puhul, kui jõumasinaosas arvestame paisumisprotsessi tagastatamatusega, sest sel puhul saab soojusetarbija töökaole võrdselt suurema soojushulga kui tagastatava protsessi puhul. See olukord selgub joonisel 139 esitatud T-s-diagrammilt. Nimelt on sel puhul jõumasinas mehhaaniliseks tööks muutunud soojushulk, mille märgime tähisega AL_t', töökao võrra, mida avaldab pindala $mka_1nn_1 = i_n - i_k$, väiksem tagastatava protsessi tööst AL_t, s. o.

$$AL_t' = AL_t - (i_n - i_k) = i_1 - i_k - i_n + i_k = i_1 - i_n .$$

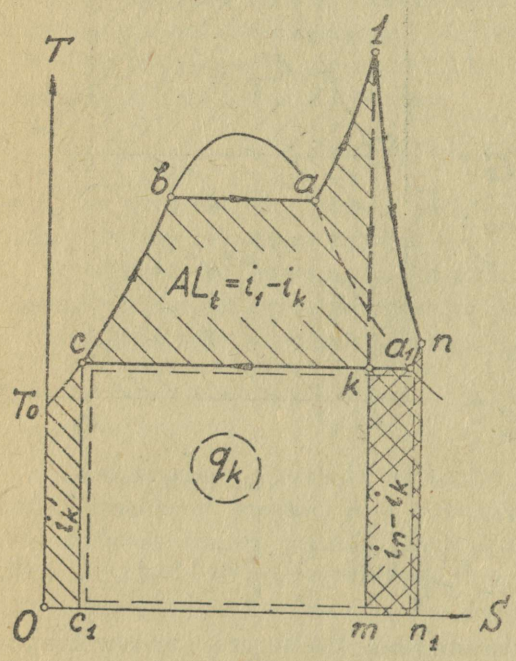
Edasi võime kirjutada, et

$$q_k = i_n - i_k' ,$$
$$q_1 = i_1 - i_k' ,$$

kus i_n on töötanud auru entalpia diagrammi punktis n, i_1 — värske auru entalpia ja i_k' — kondensaadi entalpia. Järelikult avaldub soojusekasutatavuse kasutegur sel puhul

$$\eta_{sj} = \frac{AL_t' + q_k}{q_1} = \frac{i_1 - i_n + i_n - i_k'}{i_1 - i_k'} = \frac{i_1 - i_k'}{i_1 - i_k'} = 1 .$$

Säärased kombineeritud soojuselektrijaamad, kui nad rahuldavad nõudeid soojusetarbija osas, tavaliselt ei suuda rahuldada elektrienergia-vajadusi, sest soojusetarbija arvel väljalülitatud kondensatsioonseadme tõttu langeb tunduvalt turbiini termiline kasutegur ja ühes sellega ka jõujaama elektriline kasutegur.



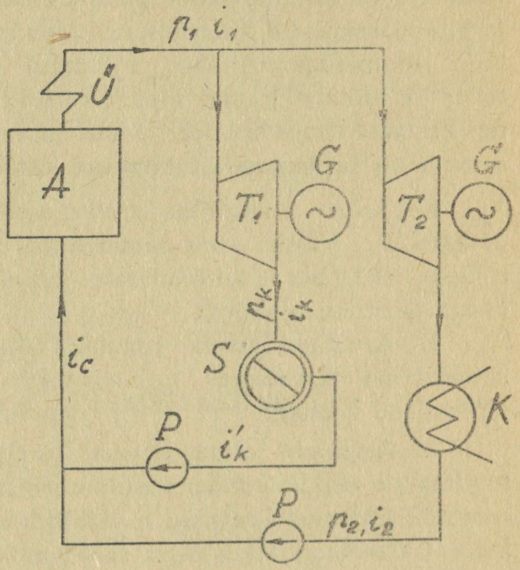
Joon. 139.

Tavaliselt peab näiteks auru rõhk aurkütteks olema 1,2 ... 1,5 ata ja tehnoloogilisteks otstarveteks 2 ... 3 ata, erijuhtudel ka kõrgem. Et saada sellerõhulist töötanud auru, peab jõuseadme-osas tarvitusele võtma vasturõhuturbiinid, milledest väljuv töötanud aur omab soojusetarbijale kohaseid parameetreid. Et rahuldada elektrienergia-vajadusi, peab tõstma jõuseadme termilist kasutegurit, s. o. suurendama Rankine'i ringprotsessi kattetegurit, mida saab teostada, nagu teame, auru algparameetrite suurendamisega, katla toitevee regeneratsiooniga, binaarse ringprotsessi kasutamisele võtmisega jne. Sellest seisukohast saab soojuselektrijaama karakteriseerida nn. energiatooteteguriga, mis on ringprotsessis mehhaaniliseks tööks muundunud soojushulga suhe soojusetarbija soojushulgaga. Märkides selle teguri tähisega E võime ta avaldada kujul

$$E = \frac{AL_t}{q_k} = \frac{q_1 - q_k}{q_k} . \qquad (295)$$

Võrrand näitab, et energiatootetegur on seda suurem, mida suurem on jõuseadme ringprotsessi termiline kasutegur, sest ühe ja sama q_k puhul suureneb AL_t suurenemisega ringprotsessi termiline kasutegur.

Kui soojuselektrijaam antud konstantse soojusetarbija puhul pole suuteline katma vajadusi elektrienergia suhtes, peab jaama varustama lisakondensatsioonturbiiniga, nagu on näidatud joonisel 140. Säärase segasoojuselektrijaama puhul, et säästa kütust, s. o. tõsta soojusekasutatavuse kasutegurit, peab võimaluse piires elektritootmisest suurema osa teostama vasturõhu-turbiiniga T_1, sest kondensatsioonturbiini töötanud auru soojust ei saa ära kasutada, mistõttu kondensatsioonturbiini koormuse suurenemisel väheneb jaama soojusekasutatavuse kasutegur.



Joon. 140.

Üldiselt võib joonisel 140 esitatud skeemi järgi töötava soojuselektrijaama suhtes öelda, et selles jaamas sõltub kütuse kokkuhoid alljärgnevatest asjaoludest.

1. Kütuse kokkuhoid on võrdeline soojusetarbija soojushulgaga.
2. Kokkuhoid suureneb kondensatsioonturbiini koormuse langusega.
3. Kokkuhoid suureneb ringprotsessi kattetegurite suurendamisega.
4. Kokkuhoid suureneb vasturõhu-turbiini vasturõhu vähendamisega.

Sõltuvalt soojuselektrijaamade vajadustest jagunevad nendes jõujaamades kasutatavad turbiinid järgnevatesse liikidesse:

1. Vasturõhu-turbiinid.
2. Halvendatud ehk väikese vaakuumiga turbiinid.
3. Vaheltauru-turbiinid.

Vasturõhu-turbiinid, nagu juba teame, ei oma kondensatsioonseadet, mistõttu nad on märksa odavamad. Nende turbiinide koormus sõltub soojusetarbija soojushulgast, s. o. turbiini läbivast auruhulgast. Neid turbiine saab kasutada ratsionaalselt vaid jaamades, millede soojuslik koormus on konstantne ning sõltumatu aastaajast. Soojuse tarvituse languse puhul peab elektrilise koormuse säilitamiseks osa töötanud auru juhtima atmosfääri.

Halvendatud vaakuumiga turbiini kasutatakse juhul, kui saab soojusetarbijale soojusekandjaks kasutada kondensaatori jahutusvett. Sel puhul

lastakse aurul kondensaatoris kondenseeruda temperatuuril, mis tagab soojusetarbijale vajaliku temperatuuriga kondensaatori-jahutusvee. Nende turbiinide koormus sõltub samuti soojusetarbija soojushulgast, kuid need turbiinid saavad töötada ka puht kondensatsioonirežiimil, kui soojusetarbija välja lülitada, jne.

Vaheltauru-turbiinid võimaldavad jaama töötamist igasugusel soojusetarbimise töörežiimil, alates puht kondensatsiooni-töörežiimist kuni soojusetarbija maksimaalse koormuseni. Nende turbiinide puhul on võimalik kasutada mitmesuguserõhulist töötanud auru. Jaama soojusekasutatavuse tegur on sõltuv jaama soojuslikust koormusest, s. o. soojusetarbija poolt tarvitatavast soojushulgast. Mida suurem on jaama soojuslik koormus, seda suurem on ka soojusekasutatavuse kasutegur.

N ä i d e. Vasturõhu-turbiiniga töötava soojuselektrijaama võimsus on 25000 kW. Värske auru parameetrid on $p_1 = 90$ ata, $t_1 = 480°$ C, vasturõhk $p_2 = 2{,}5$ ata ja turbiini sisemine ning generaatori kasutegur on võrdne ühega (ideaalne olukord).

1. Arvutada jaama tunnine kütusekulu ja energiatootetegur, kui katelseadme kasutegur $\eta_{ks} = 0{,}85$ ja kütuse tarbimisküttevääртus $Q_t^k = 6500$ kcal/kg.

2. Arvutada sama jaama tunnine kütusekulu, kui elektrienergia toodetakse eraldi kondensatsioonturbiiniga, mille $p_2 = 0{,}04$ ata, ja jaama soojuslik koormus kaetakse madalrõhu-aurukatlast, mis annab samarõhulist kuiva küllastunud auru, nagu seda on vasturõhu-turbiinis auru vasturõhk (2,5 ata). Madalrõhu-katelseadme kasutegur $\eta_{ks} = 0{,}85$.

L a h e n d u s. i-s-diagrammilt ja kuiva küllastunud auru tabelist leiame, et

$$i_1 = 800 \text{ kcal/kg}, \qquad i_2'' = 648{,}3 \text{ kcal/kg},$$
$$i_2 = 604 \text{ kcal/kg}, \qquad i_2' = 127{,}3 \text{ kcal/kg}.$$
$$x_2 = 0{,}915,$$

Antud juhul on turbiini termiline kasutegur, mis ühtlasi avaldab masinasaali kasutegurit,

$$\eta_t = \frac{AL_t}{i_1 - i_2'} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{800 - 604}{800 - 127{,}3} = 0{,}291$$

ja aurukulu ühe kilovatt-tunni kohta

$$d_W = \frac{860}{AL_t} = \frac{860}{i_1 - i_2} = \frac{860}{800 - 604} = 4{,}388 \ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}.$$

Energiatooteteguri leiame võrrandiga

$$E = \frac{AL_t}{q_2} = \frac{i_1 - i_2}{i_2 - i_2'} = \frac{800 - 604}{604 - 127{,}3} = 0{,}411.$$

Tunnine soojusekulu soojusetarbijale on

$$Q_s = N_{el} \cdot d_w (i_2 - i_2') = 25000 \cdot 4{,}388\,(604 - 127{,}3) = 52293990 \ \frac{\text{kcal}}{\text{h}}.$$

Soojuselektrijaama tunnise kütusekulu arvutame võrrandiga

$$B_{\text{I}} = \frac{860 \cdot N_{el}}{Q_t^k \cdot \eta_{\ddot{o}}} = \frac{860 \cdot N_{el}}{Q_t^k \cdot \eta_{ks} \cdot \eta_t} = \frac{860 \cdot 25000}{6500 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}291} = 13373 \ \frac{\text{kg}}{\text{h}},$$

sest antud juhul $\eta_{\ddot{o}} = \eta_{ks} \cdot \eta_t = 0{,}85 \cdot 0{,}291 = 0{,}2474$.

Teise juhu jaoks leiame i-s-diagrammilt, et $i_2 = 475$ kcal/kg ja $i_2' = 28$ kcal/kg. Seega turbiini termiline kasutegur, mis antud juhul on ühtlasi võrdne ka masinasaali kasuteguriga, omab väärtust

$$\eta_t = \frac{800 - 475}{800 - 28} = 0{,}421.$$

Järelikult on kõrgrõhukatla tunnine kütusekulu

$$B_{\text{II}} = \frac{860 \cdot N_{el}}{Q_t^k \cdot \eta_{ks} \cdot \eta_t} = \frac{860 \cdot 25000}{6500 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}421} = 9267 \ \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

Madalrõhukatla tunnise kütusekulu B_{III} arvutame seosest

$$Q_s = B_{\text{III}} \cdot Q_t^k \cdot \eta_{ks},$$

$$B_{\text{III}} = \frac{Q_s}{Q_t^k \cdot \eta_{ks}} = \frac{52293990}{6500 \cdot 0{,}85} = 9465 \ \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

Jaama üldine kütusekulu on

$$B = B_{\text{II}} + B_{\text{III}} = 9267 + 9465 = 18732 \ \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

Järelikult on esimesel juhul kütuse kokkuhoid võrreldes teise juhuga

$$\frac{B - B_{\text{I}}}{B} \cdot 100 = \frac{18732 - 13373}{18732} \cdot 100 = 28{,}6\ \%.$$

Soojusekasutatavuse kasutegur on esimesel juhul kütuse soojuse suhtes võrdne katelseadme kasuteguriga, s. o. võrdub 0,85-ga. Teisel juhul on kütuse kasutatavuse kasutegur kütuse soojuse suhtes

$$\frac{860 \cdot N_{el} + Q_s}{B \cdot Q_t^k} = \frac{860 \cdot 25000 + 52293990}{18732 \cdot 6500} = \frac{73793990}{121758000} = 0{,}606.$$

VII peatükk.

NIISKE ÕHK.

45. VEEAURU PARTSIAALRÕHK. ABSOLUUTNE JA RELATIIVNE NIISKUS.

Niiske õhk esineb paljudes tehnilistes seadmetes, mille ülesandeks on mitmesuguste ainete kuivatamisoperatsioonide teostamine, elu-, ühiskondlike ja tööstushoonete ventileerimine, kütmine jne., mistõttu on oluline niiske õhu termodünaamiliste parameetrite määramine. Selle küsimuse käsitlemine ongi käesoleva paragrahvi ülesandeks.

Õhku nimetatakse niiskeks, kui ta sisaldab veeauru. Järelikult on niiske õhk kuiva õhu ja veeauru mehhaaniline segu. Selle segu suhtes on rakendatavad kõik ideaalsete gaaside segude kohta käivad võrrandid, sest esinevatel niiske õhu temperatuuridel on veeauru partsiaalrõhk niivõrd väike, et neil rõhkudel võib veeauru vaadelda ideaalse gaasina.

Daltoni seaduse põhjal on niiske õhu üldrõhk võrdne niisket õhku moodustava kuiva õhu ja veeauru partsiaalrõhkude summaga. Märkides niiskes õhus kuiva õhu partsiaalrõhu mm Hg tähisega b ja veeauru rõhu mm Hg tähisega e, on niiske õhu üldrõhk B, s. o. baromeetriline rõhk, avaldatav võrrandiga

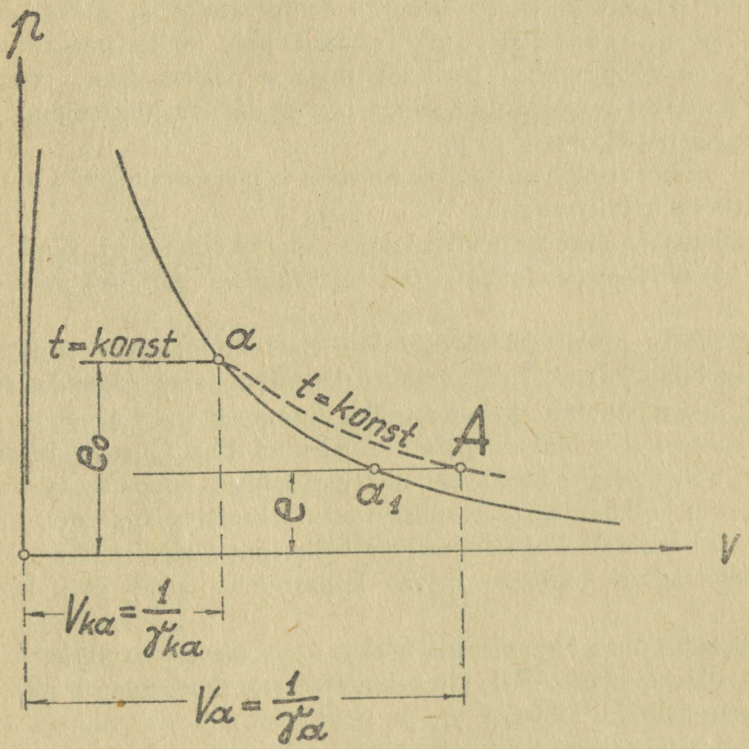
$$B = b + e \text{ mm Hg.} \tag{296}$$

Veeauru partsiaalrõhk niiskes õhus sõltub ühes kuupmeetris niiskes õhus sisalduva veeauru kaalulisest kogusest. Maksimaalse väärtuse, vastavalt niiske õhu temperatuurile, saavutab veeauru partsiaalrõhk, kui veeaur õhus asub kuiva küllastunud auru olekus. Veeauru seda partsiaalrõhku nimetatakse küllastusrõhuks ja säärast niisket õhku küllastunud niiskeks õhuks. Küllastunud niiske õhk esindab olekut, milles mahuühik [m³] niisket õhku sisaldab maksimaalsel määral veeauru. Kui vee kaaluline kogus niiske õhu mahuühikus on suurem sellest määrast, siis asub osa veeauru õhus kondenseerunud olekus, s. o. vedelas faasis. Säärast õhku nimetatakse üle-

küllastatud niiskeks õhuks ehk märjaks õhuks. Käesolevas õhus seda olekut ei vaadelda.

Veeauru küllastusrõhk ei sõltu niiske õhu üldrõhust B, vaid oleneb niiske õhu temperatuurist ja on määratav kuiva küllastunud veeauru tabelist niiske õhu temperatuuri järgi.

Eespooltoodust järgneb, et niiskes õhus veeaur asub ülekuumendatud olekus, nagu seda karakteriseerib joonisel 141 esitatud p-v-diagramm. Selle



Joon. 141.

diagrammil punkt A karakteriseerib veeauru olekut niiskes õhus vastavalt partsiaalrõhule e ja niiske õhu temperatuurile t. Veeauru kaaluline kogus sel puhul ühes kuupmeetris niiskes õhus on $\gamma_a \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Teostades sellest olekust auru isotermilise komprimeerimise kuni ülemise piirkõvera punktini a, saavutab veeaur vastavalt niiske õhu temperatuurile t oma küllastusoleku, milles tema kaaluline kogus ühes kuupmeetris niiskes õhus on $\gamma_{ka} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ja partsiaalrõhk võrdne küllastusrõhuga e_o. Punk-

tist a auru edasiselisotermilisel komprimeerimisel ehk, mis on sama, küllastunud niiske õhu isobaarilisel jahutamisel esineb veeauru kondenseerumine, s. o. üleminek vedelasse faasi, mis tegelikult ilmneb kaste või udu tekkimise näol.

Kui punktist A teostame auru isobaarilise jahutamise $e = konst$ kuni ülemise piirkõvera punktini a_1, siis auru ülekuumendus niiskes õhus pidevalt väheneb, kuni saavutame ülemise piirkõvera punktis a_1 kuiva küllastunud auru oleku. Punkti a_1 läbiva isotermi temperatuuri t_1 nimetatakse auru partsiaalrõhu e kastetäpi temperatuuriks. Selles punktis auru küllastusrõhk on võrdne auru partsiaalrõhuga e niiskes õhus. Toodust on selge, et kastetäpi temperatuuri saame määrata kuiva küllastunud auru tabelist auru partsiaalrõhu e järgi.

Õhu niiskust iseloomustatakse füüsikas ja meteoroloogias absoluutse ja relatiivse niiskusega.

Absoluutseks niiskuseks nimetatakse ühes kuupmeetris õhus sisalduva veeauru kaalulist kogust grammides. Edaspidises märgime selle niiskuse tähisega D.

Relatiivseks niiskuseks nimetatakse ühes kuupmeetris õhus sisalduva veeauru kaalulise koguse suhet veeauru kaalulise kogusega, mida samal temperatuuril üldse suudab mahutada üks kuupmeeter. Ka võime relatiivse niiskuse kohta niiske õhu temperatuuridel kuni 100° C anda järgneva definitsiooni. Relatiivseks niiskuseks nimetame ühes kuupmeetris õhus sisalduva veeauru kaalulise koguse suhet veeauru kaalulise kogusega, mida samal temperatuuril sisaldab üks kuupmeeter küllastunud niisket õhku, s. o. suhet sama temperatuuri omava kuiva küllastunud auru ühe kuupmeetri kaaluga.

Tähistades ühes kuupmeetris niiskes õhus oleva veeauru kaalu tähisega γ_a, niiske õhu temperatuuril ühes kuupmeetris küllastunud niiskes õhus oleva veeauru kaalu tähisega γ_{ka} ja relatiivse niiskuse tähisega φ, võime avaldada õhu relatiivse niiskuse seosega

$$\varphi = \frac{\gamma_a}{\gamma_{ka}}. \tag{297}$$

γ_a on ühtlasi niiskes õhus oleva veeauru erikaal kg/m³ vastavalt õhu temperatuurile ja veeauru partsiaalrõhule ning γ_{ka} õhu temperatuuri omava kuiva küllastunud veeauru erikaal kg/m³, mille leiame kuiva küllastunud veeauru II tabelist õhu temperatuuri järgi.

Märkides veeauru partsiaalrõhu õhus mm Hg tähisega e ja õhu temperatuurile vastava veeauru küllastusrõhu mm Hg tähisega e_o ning silmas pidades, et

$$\gamma_a = \frac{1}{v_a}, \quad \gamma_{ka} = \frac{1}{v_{ka}},$$

võime gaasi karaktervõrrandi põhjal kirjutada seosed

$$\gamma_a = \frac{e}{R_a' T}, \quad \gamma_{ka} = \frac{e_o}{R_a' T},$$

kus R_a' on veeauru gaasikonstant, mille arvsuurus rõhu mõõtmisel mm Hg on

$$R_a' = \frac{848}{18{,}02} \cdot \frac{735{,}6}{10000} = 3{,}461. \tag{298}$$

Jagades esimese seose teisega ja oletades, et temperatuurid on võrdsed, saame

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_{ka}} = \frac{e}{e_o},$$

Järelikult on relatiivne niiskus avaldatav ka kujul

$$\varphi = \frac{\gamma_a}{\gamma_{ka}} = \frac{e}{e_o}, \tag{299}$$

s. o. relatiivne niiskus on ka niiskes õhus esineva veeauru partsiaalrõhu suhe õhu temperatuurile vastava küllastusrõhuga. Relatiivne niiskus φ on määratav hügromeetriga.

Võrrandist (299) järgneb, et

$$\gamma_a = \varphi \cdot \gamma_{ka} \tag{300}$$

ja

$$e = \varphi \cdot e_o. \tag{301}$$

Küllastusrõhu e_o, nagu eespool tähendatud, leiame kuiva küllastunud auru tabelist õhu temperatuuri järgi ja e samast tabelist kastetäpi temperatuuri järgi.

Veeauru partsiaalrõhk niiskes õhus on määratav psühromeetriga kuiva ning märja termomeetri lugemite järgi sellekohaste tabelite abil või võrrandiga

$$e = e_o' - c\,(t_k - t_n)\,B, \tag{302}$$

kus B on baromeetriline rõhk mm Hg, t_k — kuiva termomeetri poolt näidatud temperatuur, t_n — märja termomeetri poolt näidatud temperatuur, e_o' — temperatuurile t_n vastav kuiva küllastunud auru rõhk mm Hg ja c — konstant, mis teatud määral sõltub psühromeetri tundmiku juures teotseva õhuvoolu kiirusest ja ka psühromeetri tüübist. c määratakse kindlaks psühromeetri samaaegse kontrollimisega kondensatsioonhügromeetriga. Katsete

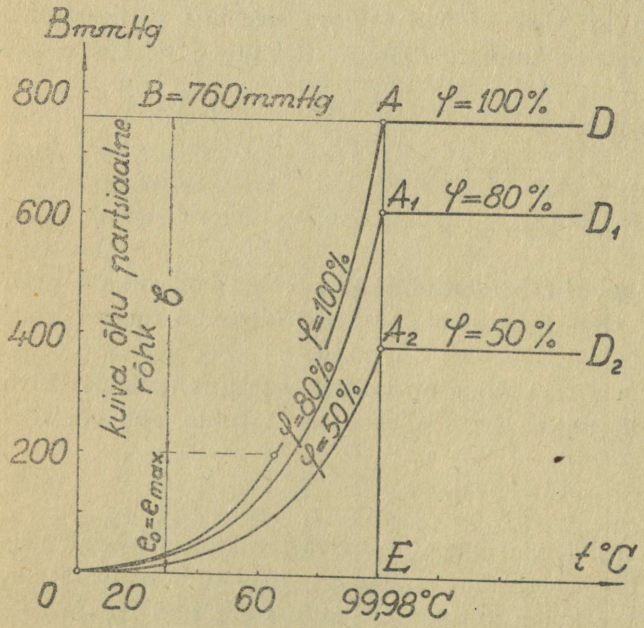
põhjal on c keskmine väärtus paigalseisva toaõhu jaoks $c = 0{,}00128$ ja vaba välisõhu jaoks, mis teatava kiirusega möödub termomeetri tundmikust, $c = 0{,}0008$. Ligikaudselt on e määratav järgneva võrrandiga

$$e = e_o' - \frac{0{,}48\,(t_k - t_n)\,B}{610 - t_n}. \qquad (303)$$

Nagu eespool tähendatud, saavutab veeauru partsiaalrõhk niiskes õhus vastavalt antud temperatuurile oma suurima väärtuse niiske õhu küllastunud olekus. Sel puhul on veeauru partsiaalrõhk võrdne veeauru küllastusrõhuga. Järelikult, märkides niiske õhu temperatuurile vastava küllastusrõhu tähisega e_o ja võimaliku suurima partsiaalrõhu tähisega e_{max}, võime kirjutada võrduse

$$e_{max} = e_o.$$

See võrdus on kehtiv kuni temperatuurini, mille puhul veeauru küllastusrõhk niiskes õhus saavutab niiske õhu baromeetrilise rõhu B, s. o. saavutab niiske õhu üldrõhu. Edaspidises nimetame seda temperatuuri niiske õhu kriitiliseks temperatuuriks. Näiteks vastab baromeetrilisele rõhule 760 mm Hg, nagu nähtub kuiva küllastunud veeauru I tabelist, niiske õhu kriitiline temperatuur 99,98° C [28]. Sellelt temperatuurilt alates, temperatuuri edasisel tõusul, muutub veeauru maksimaalne võimalik partsiaalrõhk niiskes küllastunud õhus konstantseks, võrdudes küllastunud niiske õhu baromeetrilise rõhuga (vt. joon. 142). Joon OA tähistab küllastunud niiskes õhus ($\varphi = 100\%$) veeauru partsiaalrõhu muutust vastavalt temperatuurile. Punktis A saavutab vee-



Joon. 142.

[28] Selle temperatuuri leiame interpoleerimisega.

auru partsiaalrõhk ($e_{max} = e_o$), mis vastab temperatuurile 99,98° C, niiske õhu baromeetrilise rõhu 760 mm Hg. Sellest punktist alates temperatuuri edasisel tõusul muutub veeauru partsiaalrõhk konstantseks ja avaldub isobaarina $B = 760$ mm Hg $= konst$, mida tähistab temperatuuriteljega rööpne sirge AD. Joone AD osas, s. o. temperatuuridel üle 99,98° C, on küllastunud niiskes õhus õhu osamaht tegelikult võrdne nulliga, sest õhu partsiaalrõhk $b = 0$, mistõttu nendes olekutes esineb vaid ülekuumendatud veeaur, mille relatiivne niiskus on eespoolantud definitsiooni põhjal võrdne ühega ehk $\varphi = 100\%$ [29].

Toodust on selge, et veeauru võimalik maksimaalne rõhk niiskes õhus on piiratud ühelt poolt küllastunud veeauru rõhuga (joon OA) ja teiselt poolt niiske õhu baromeetrilise rõhuga.

Seose (301) põhjal, s. o.

$$e = \varphi e_o = \varphi e_{max},$$

ja jooniselt 142 võime järeldada, et antud konstantsel relatiivsel niiskusel ($\varphi = konst$) suureneb veeauru partsiaalrõhk temperatuuri tõustes kuni isotermini EA, mille puhul e_{max} saavutab niiske õhu baromeetrilise rõhumise ($t = 99{,}98°$ C). Sellelt temperatuurilt alates muutub temperatuuri edasisel tõusul veeauru partsiaalrõhk e konstantseks, s. o.

$$e = \varphi e_o = \varphi e_{max} = konst, \qquad (a)$$

sest sel puhul peale $\varphi = konst$ on ka $e_o = e_{max} = konst$.

Järelikult B-t-diagrammil veeauru partsiaalrõhu jooned antud kindla relatiivse niiskuse väärtuste jaoks, kuni niiske õhu kriitilise temperatuurini, kulgevad tõusvate kõveratena. Temperatuuri edasisel tõusul muutuvad nad temperatuuriteljega rööpseteks sirgeteks, nagu on näidatud joonisel 142 relatiivse niiskuse $\varphi = 80\%$ ja $\varphi = 50\%$ jaoks. Sellest järgneb, et antud konstantse relatiivse niiskuse puhul temperatuuri tõustes suureneb absoluutne niiskus niiskes õhus kuni niiske õhu kriitilise temperatuurini. Alates sellelt temperatuurilt muutub absoluutne niiskus konstantseks, sest selles piirkonnas $e_{max} = konst$, mistõttu relatiivne niiskus saab jääda konstantseks vaid siis, kui absoluutne niiskus jääb konstantseks. Maksimaalse väärtuse saavutab absoluutne niiskus antud temperatuuril $\varphi = 100\%$ juures.

---

[29] Olekutes joonel AD on ülekuumendatud auru kilomaht ja erikaal kindlalt määratud rõhuga $B = konst$ ja temperatuuriga, mistõttu mahuühik ei saa kaaluliselt sisaldada rohkem ega vähem veeauru, kui seda määravad parameetrid B ja t. Järelikult on siis relatiivse niiskuse mõiste põhjal $\varphi = 100\%$.

Võrrandi

$$e = \varphi e_o = \varphi e_{max}$$

temperatuuride jaoks, mis on kõrgemad niiske õhu kriitilisest temperatuurist, võime kirjutada kujul

$$e_{max} = \varphi B = konst, \tag{b}$$

sest sel puhul $e = B$. Sellest võrrandist järgneb, et antud $\varphi = konst$ puhul ei sõltu veeauru partsiaalrõhk enam niiske õhu temperatuurist, vaid ainult niiske õhu baromeetrilisest rõhust B, s. o. niiske õhu üldrõhust. Tegelikult ei jää e temperatuuri tõustes konstantseks, vaid hakkab vähenema, kuigi õige vähe. Näiteks $\varphi = 60\%$ puhul ja temperatuuri tõusul 100° C kuni 200° C väheneb e 26 kg/m² kohta ehk 1,9 mm Hg.

46. TEHNILINE NIISKUS d.

Ainete kuivamisprotsessis tavaliselt ei muutu niiskes õhus sisalduva kuiva õhu osakaal, muutub vaid veeauru osakaal. Seda aluseks võttes mõõdetakse tehnikas õhu niiskust niiskes õhus ühe kilogrammi kuiva õhu osakaalu kohta tuleva veeauru kaalulise kogusega kas kilogrammides või grammides.

Tähistades selle nn. tehnilise niiskuse kilogrammides tähisega d' ja grammides tähisega d, võime nad avaldada seostega

$$d' = \frac{\gamma_a}{\gamma_{\bar{o}}} \frac{kg}{kg} \tag{304}$$

ja grammides

$$d = 1000 \frac{\gamma_a}{\gamma_{\bar{o}}} \frac{g}{kg}, \tag{305}$$

kus $\gamma_{\bar{o}}$ on kuiva õhu osakaal niiskes õhus või kuiva õhu erikaal kg/m³ vastavalt kuiva õhu partsiaalrõhule ja temperatuurile niiskes õhus.

Märkides niiskes õhus kuiva õhu partsiaalrõhku mm Hg tähisega b, kirjutame gaasi karaktervõrrandi põhjal seosed:

$$\gamma_a = \frac{e}{R'_a T}, \quad \gamma_{\bar{o}} = \frac{b}{R'_{\bar{o}} T},$$

kus $R'_{\bar{o}}$ on kuiva õhu gaasikonstant, mille arvväärtus rõhu mõõtmisel mm Hg on:

$$R'_{\bar{o}} = \frac{848}{28{,}96} \cdot \frac{735{,}56}{10000} = 2{,}153.$$

Asendades võrrandis (304) γ_a ja γ_{δ} saadud avaldistega ja eeldades, et temperatuurid on võrdsed, saame

$$d' = \frac{\gamma_a}{\gamma_{\delta}} = \frac{R'_{\delta}}{R'_a} \cdot \frac{e}{b} = \frac{2{,}153}{3{,}461} \cdot \frac{e}{b},$$

$$d' = 0{,}622 \frac{e}{b} \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \tag{306}$$

ja grammides

$$d = 622 \frac{e}{b} \frac{\text{g}}{\text{kg}}. \tag{307}$$

Asendades kuiva õhu partsiaalrõhu niiske õhu üldrõhu B ja veeauru partsiaalrõhu e kaudu, saame võrrandi (307) kujul

$$d = 622 \frac{e}{B - e} \frac{\text{g}}{\text{kg}}. \tag{308}$$

Relatiivse niiskuse φ ja küllastusrõhu e_o kaudu avaldub võrrand (308)

$$d = 622 \frac{\varphi e_o}{B - \varphi e_o} \frac{\text{g}}{\text{kg}}. \tag{309}$$

Anname avaldise absoluutse niiskuse jaoks. Absoluutne niiskus D avaldub niiske õhu veeauru osakaalu ehk erikaalu $\gamma_a \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ kaudu

$$D = 1000 \cdot \gamma_a \frac{\text{g}}{\text{m}^3}.$$

Gaaside karaktervõrrandi põhjal

$$\gamma_a = \frac{e}{R'_a T} = \frac{e}{3{,}461\ T} = 0{,}289 \frac{e}{T}.$$

Tehes selle asenduse, saame võrrandi lõplikult kujul

$$D = 289 \frac{e}{T} = 289 \frac{\varphi e_o}{T} \frac{\text{g}}{\text{m}^3}. \tag{310}$$

Absoluutse niiskuse D ja tehnilise niiskuse d vahelise seose saame järgnevalt võrrandi (307) järgi

$$e = d \frac{b}{622}.$$

Tehes selle, asenduse võrrandis (310), saame ta kujul

$$D = 0{,}465 \frac{b}{T} d$$

ehk

$$D = 0{,}465 \frac{B - e}{T} d = 0{,}465 \frac{B - \varphi e_o}{T} d \frac{\text{g}}{\text{m}^3}. \tag{311}$$

Teades d väärtust, on võimalik arvutada veeauru kogust ühe kilogrammi niiske õhu kohta. Nimelt $1 + \frac{d}{1000}$ kilogrammis niiskes õhus on veeauru d grammi. Seega ühes kilogrammis niiskes õhus on veeaurusisaldus

$$d'' = \frac{1000 \cdot d}{1000 + d} \frac{\text{g}}{\text{kg}}, \tag{312}$$

kus d'' on ühes kilogrammis niiskes õhus leiduva veeauru kogus grammides.

Absoluutse küllastusniiskuse D_o ja absoluutse niiskuse vahet $(D_o - D)$ nimetatakse niiskuse defitsiidiks ehk niiskuse vajakuks.

Niiskuse vajakusest sõltub vee aurustumiskiirus kehade pindadelt. Mida suurem on niiskuse vajak, seda kiiremini toimub vee aurustumine. Peale selle on vee aurustumiskiirus veel pöördvõrdeline õhu baromeetrilise rõhuga.

Niiske õhu tehnoloogias käsitletakse vahel nn. niiske õhu küllastusastet, mis märgitakse tähisega ψ. Ta avaldub seosega

$$\psi = \frac{d}{d_o}, \tag{313}$$

kus d_o on niiske õhu temperatuurile vastav tehniline niiskus küllastunud niiskes õhus. Võrrandi (308) põhjal võime võrrandi (313) esitada kujul

$$\psi = \frac{e}{e_o} \cdot \frac{B - e_o}{B - e} = \varphi \cdot \frac{B - e_o}{B - e} \tag{314}$$

ehk

$$\psi = \varphi \cdot \frac{B - e_o}{B - \varphi e_o}. \tag{315}$$

d_o väärtused on antud raamatu lõpus toodud tabelis.

47. NIISKE ÕHU ERIKAAL $\gamma_{n\bar{o}}$.

Niiske õhu erikaal, mille märgime tähisega $\gamma_{n\bar{o}}$, on võrdne ühes kuupmeetris õhus oleva kuiva õhu ja veeauru kaalude summaga, s. o.

$$\gamma_{n\bar{o}} = \gamma_{\bar{o}} + \gamma_a,$$

kus $\gamma_{\bar{o}}$ ja γ_a on kuiva õhu ja veeauru erikaalud vastavalt niiske õhu temperatuurile ja nende partsiaalrõhkudele.

Gaasi karaktervõrrandi põhjal

$$\gamma_{\bar{o}} = \frac{b}{R'_{\bar{o}} T} = \frac{b}{2{,}153\ T} = 0{,}465\ \frac{b}{T}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \tag{316}$$

ehk

$$\gamma_{\bar{o}} = 0{,}465 \frac{B - e}{T} = 0{,}465 \frac{B - \varphi e_o}{T}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \tag{317}$$

Samuti leiame veeauru jaoks, et

$$\gamma_a = \frac{e}{R'_a T} = \frac{e}{3{,}461 \cdot T} = 0{,}289 \frac{e}{T} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \tag{318}$$

Järelikult

$$\gamma_{n\tilde{o}} = \frac{1}{T}(0{,}465\, b + 0{,}289\, e) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \tag{319}$$

Asendades võrrandi (296) põhjal $b = B - e$, saame:

$$\gamma_{n\tilde{o}} = \frac{1}{T}(0{,}465\, B - 0{,}465\, e + 0{,}289\, e) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$\gamma_{n\tilde{o}} = \frac{1}{T}(0{,}465\, B - 0{,}176\, e) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \tag{320}$$

ehk

$$\gamma_{n\tilde{o}} = \frac{1}{T}(0{,}465\, B - 0{,}176\, \varphi e_o) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \tag{321}$$

Avades sulud ja silmas pidades, et

$$\gamma_{k\tilde{o}} = 0{,}465 \frac{B}{T} \tag{322}$$

on kuiva õhu erikaal vastavalt niiske õhu baromeetrilisele rõhule ja temperatuurile, saame võrrandi niiske õhu erikaalu arvutamiseks kirjutada ka kujul:

$$\gamma_{n\tilde{o}} = \gamma_{k\tilde{o}} - 0{,}176 \frac{\varphi e_o}{T} \tag{323}$$

ehk

$$\gamma_{n\tilde{o}} = \gamma_{k\tilde{o}} - 0{,}176 \frac{e}{T}. \tag{324}$$

Võrranditest (323) ja (324) nähtub, et niiske õhk on kergem kui kuiv õhk samal temperatuuril ja rõhul.

48. NIISKES ÕHUS OLEVA KUIVA ÕHU JA VEEAURU SUHTELISED OSAKAALUD.

Tähistades kuiva õhu suhtelist osakaalu $g_{\tilde{o}}$ ja veeauru suhtelist osakaalu g_a, võime need võrrandite (317) ja (319) põhjal avaldada kujul:

$$g_{\tilde{o}} = \frac{\gamma_{\tilde{o}}}{\gamma_{n\tilde{o}}} = \frac{0{,}465\,(B - e)}{0{,}465\, B - 0{,}176\, e}, \tag{325}$$

$$g_a = \frac{\gamma_a}{\gamma_{n\tilde{o}}} = \frac{0{,}289\, e}{0{,}465\, B - 0{,}176\, e}. \tag{326}$$

Suhtelised osakaalud on avaldatavad tehnilise niiskuse kaudu kujul

$$g_{\bar{o}} = \frac{1000}{1000 + d} \tag{327}$$

ja

$$g_a = \frac{d}{1000 + d}, \tag{328}$$

sest $1000 + d$ grammis niiskes õhus on d grammi niiskust.

49. NIISKE ÕHU GAASIKONSTANT.

Märkides niiske õhu gaasikonstandi tähisega R', võime ta gaasi karaktervõrrandi ja võrrandi (321) põhjal avaldada kujul

$$R' = \frac{p}{\gamma_{n\bar{o}} \cdot T} = \frac{p}{T \cdot \frac{1}{T}(0{,}465\,B - 0{,}176\,\varphi e_o)}.$$

Asendades rõhu p [kg/m^3] õhkkonna baromeetrilise rõhu kaudu

$$p = \frac{10^4}{735{,}56} B$$

ja korrutades võrrandi lugejat ning nimetajat arvu 0,465 pöördväärtusega 2,153, saame ta kujul

$$R' = \frac{29{,}27\,B}{B - 0{,}378\,\varphi e_o} \tag{329}$$

ehk

$$R' = \frac{29{,}27}{1 - 0{,}378 \frac{\varphi e_o}{B}}. \tag{330}$$

50. NIISKE ÕHU MAHT ÜHE KILOGRAMMI KUIVA ÕHU KOHTA.

Niiske õhu kilomaht $v_{n\bar{o}}$ on niiske õhu erikaalu pöördväärtus, s. o.

$$v_{n\bar{o}} = \frac{1}{\gamma_{n\bar{o}}}.$$

Ühe kilogrammi kuiva õhu kohta tulev niiske õhu kaaluline kogus on $(1 + d')$ kilogrammi. Järelikult on niiske õhu maht ühe kilogrammi kuiva õhu kohta, mille märgime tähisega $V_{n\bar{o}}$, avaldatav seosega

$$V_{n\bar{o}} = v_{n\bar{o}}\,(1 + d') = \frac{1 + d'}{\gamma_{n\bar{o}}} \text{ m}^3 \tag{331}$$

ehk, asendades $\gamma_{n\tilde{o}}$, tema avaldisega võrrandist (321),

$$V_{n\tilde{o}} = \frac{(1 + d')\,T}{0{,}465\,B - 0{,}176\,\varphi e_o}\ \text{m}^3. \qquad (332)$$

Võrrandites (331) ja (332) on d' niiskuse kogus kilogrammides ühe kilogrammmi kuiva õhu kohta.

Alljärgnevas tabelis A [30] on antud niiske õhu maht m^3/kg ühe kilogrammi kuiva õhu kohta vastavalt baromeetrilisele rõhule 745 mm Hg ja relatiivsele niiskusele.

Tabel A.

°C	Relatiivne niiskus					
	100	80	60	40	20	0
0	0,7941	0,7932	0,7922	0,7912	0,7902	0,7893
20	0,8675	0,8633	0,8592	0,8551	0,8511	0,8471
40	0,9775	0,9620	0,9471	0,9326	0,9189	0,9049
60	1,204	1,147	1,095	1,047	1,003	0,9627
80	1,9500	1,651	1,431	1,263	1,129	1,021
99,4	∞	5,450	2,717	1,806	1,348	1,077
100	∞	5,455	2,720	1,808	1,352	1,078
120	∞	5,734	2,860	1,902	1,423	1,136
140	∞	6,014	3,002	1,997	1,495	1,194
160	∞	6,296	3,143	2,092	1,567	1,252
180	∞	6,580	3,286	2,188	1,639	1,310
200	∞	6,864	3,429	2,283	1,711	1,367

51. NIISKE ÕHU ENTALPIA.

Niiske õhu entalpia arvutatakse niiske õhu koguse jaoks, milles kuiva õhu osakaal on üks kilogramm, s. o.

$$J = i_{k\tilde{o}} + J_a,$$

kus $i_{k\tilde{o}}$ on ühe kilogrammi kuiva õhu entalpia vastavalt niiske õhu temperatuurile ja J_a ühe kilogrammi kuiva õhu kohta tuleva veeauru koguse entalpia.

[30] Tabel on võetud raamatust А. М. Литвин, „Техническая термодинамика", Госиздат 1947.

Ühe kilogrammi kuiva õhu entalpia kuni temperatuurini ~ 100° C on avaldatav võrrandiga

$$i_{kõ} = 0{,}24\,t \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ühe kilogrammi veeauru entalpia avaldub

$$i_a = 597 + 0{,}46\,t \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{333}$$

kus 597 on kuiva küllastunud auru entalpia (täpsemalt 597,2) temperatuuril 0° C ja 0,46 veeauru kaaluline erisoojus.

d grammi veeauru entalpia on

$$J_a = i_a \cdot \frac{d}{1000} = (597 + 0{,}46\,t)\,\frac{d}{1000}.$$

Järelikult avaldub niiske õhu entalpia

$$J = 0{,}24\,t + (597 + 0{,}46\,t)\,\frac{d}{1000} \tag{334}$$

ehk

$$J = 0{,}597\,d + 0{,}24\,t + 0{,}46\,t\,\frac{d}{1000}. \tag{335}$$

52. J-d-DIAGRAMM.

Diagramm esitati 1918. a. L. K. Ramsini poolt ja on tehnikas kõikjal kasutamisele võetud.

J-d-diagrammil on entalpiateljeks ordinaattelg ja niiskuseteljeks abstsisstelg, mis moodustab entalpiateljega 135°-se nurga. Niiskusetelje säärase asendi puhul muutub isotermide ja relatiivse niiskuse kõverate võrk käsitlemiseks märksa otstarbekamaks kui täisnurkses koordinaatide süsteemis, milles isotermid ja relatiivse niiskuse kõverad on surutud kokku entalpiatelje piirkonda.

J-d-diagrammile kantakse isoentalpia ja konstantse niiskuse joonte võrk. Isoentalpia jooned on d-teljega rööpsed sirged ja konstantse niiskuse jooned J-teljega rööpsed sirged. Selle võrgu järgi ehitatakse diagrammile isotermid ja konstantse relatiivse niiskuse kõverad ($\varphi = konst$) ning veeauru partsiaalrõhu kõver funktsioonina niiskusest d.

Isotermide ehitamine toimub võrrandiga (335), s. o.

$$J = 0{,}597\,d + 0{,}24\,t + 0{,}46\,t\,\frac{d}{1000}.$$

Esiteks ehitatakse null-isoterm. Selle isotermi võrrandi kuju on:

$$J = 0{,}597\, d. \qquad \text{(a)}$$

Valitud koordinaatide süsteemis kujutab võrrand (a) koordinaatide algust läbivat sirget OA, mille saame ehitada ordinaadi $AK = J_1$ abil, andes d-le väärtuse OK (joon. 143).

Isotermi t_1 jaoks avaldub võrrand (335)

$$J = 0{,}597\, d + 0{,}24\, t_1 + 0{,}46\, t_1 \frac{d}{1000}.$$

See võrrand kujutab valitud koordinaatide süsteemis sirget Bn, mis lõikab entalpiatelge kõrgusel $0{,}24\ t_1$ ja mingisugust valitud $d = konst$ joont kõrgusel Kn, sest andes d-le väärtuse d_1, avaldub võrrand (335) kujul:

$$J_1 = 0{,}597\, d_1 + 0{,}24\, t_1 + 0{,}46\, t_1 \frac{d_1}{1000}, \qquad \text{(b)}$$

kusjuures liikmete väärtused võrrandis on

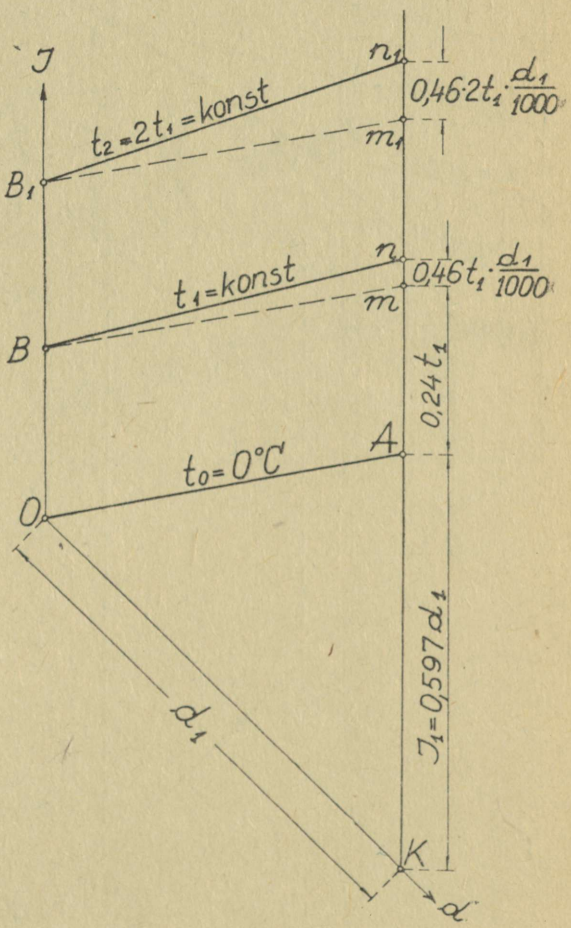
$$0{,}597\, d_1 = KA,$$

$$0{,}24\, t_1 = Am = OB,$$

$$0{,}46\, t_1 \frac{d_1}{1000} = mn,$$

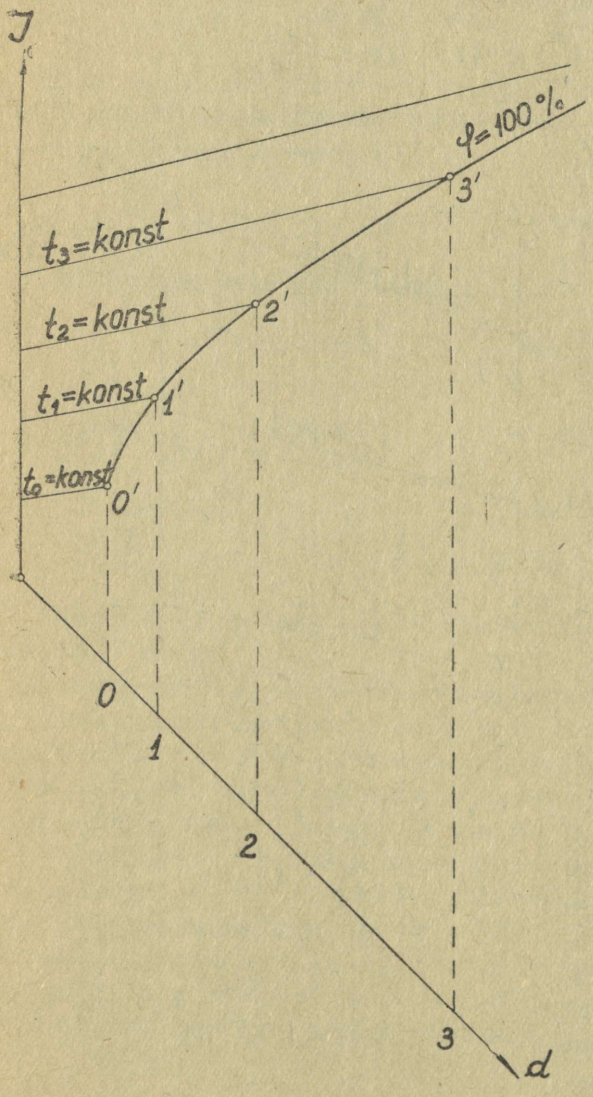
$$J_1 = KA + Am + mn = Kn.$$

Toodu põhjal määrame isotermide ehitamiseks J-teljel soovitavate isotermide, nagu 0° C, 5° C, 10° C, 15° C jne. lõikepunktid J-teljega, kasutades selleks võrrandit $J = 0{,}24\, t$, ja seejärel samade isotermide lõikepunktid mingisuguse sobiva $d = konst$ joonega.



Joon. 143.

Võrrandist (b) nähtub veel, et isotermid ei ole rööpsirged, vaid nende tõus suureneb ühes temperatuuriga. Näiteks, andes temperatuurile väärtuse $t_2 = 2t_1$, on joonlõik m_1n_1 kaks korda suurem joonlõigust mn, sest esimesel juhul liige $0{,}46\, t \frac{d}{1000} = 0{,}46\, t_1 \frac{d_1}{1000}$ ja teisel juhul $0{,}46\, t \frac{d}{1000} = 0{,}46 \cdot 2\, t_1 \frac{d_1}{1000}$.



Joon. 144.

Relatiivse niiskuse konstantjooned kanname diagrammile võrrandiga (309)

$$d = 622 \frac{\varphi e_0}{B - \varphi e_0}.$$

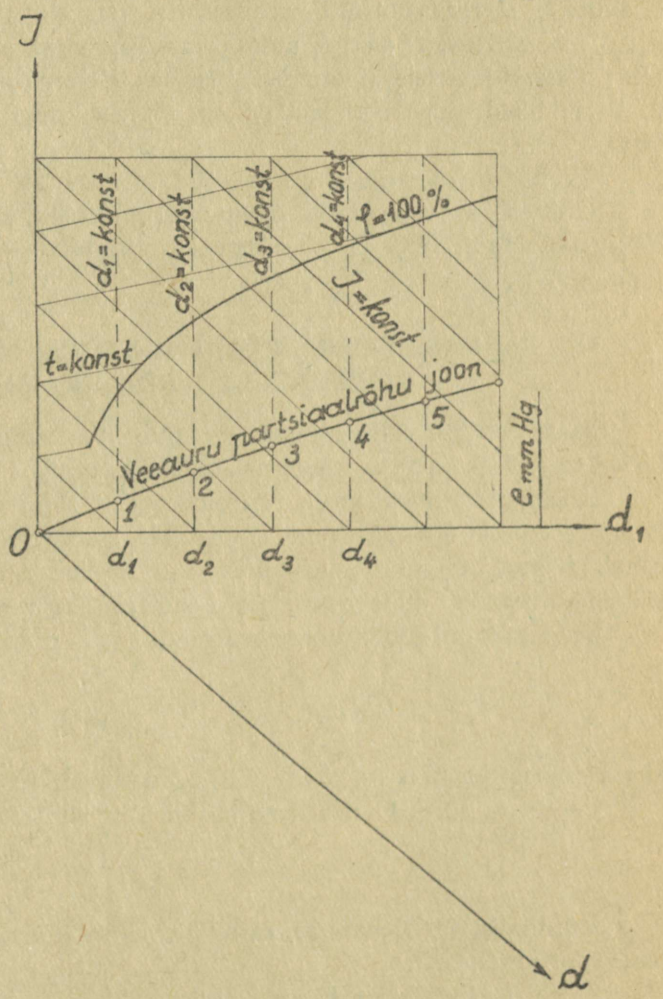
Esiteks ehitame küllastuskõvera, s. o. $\varphi = 100\%$. Selleks anname võrrandis (309) küllastusrõhule e_0 väärtused vastavalt temperatuuridele t_0, t_1, t_2, t_3 jne., saades d jaoks väärtused d_0, d_1, d_2, d_3 jne. (vt. joon. 144).

Nende d väärtuste abil määrame d-teljel punktid 0, 1, 2, 3 jne. Punktidest 0, 1, 2, 3 ... tõmbame *d-konst*-sirged kuni lõikumiseni vastavate isotermidega punktides 0', 1', 2', 3' ... Ühendades punktid 0', 1', 2', 3' ... sileda kõveraga, saamegi $\varphi = 100\%$ konstantkõvera. Analoogiliselt toimub ka teiste $\varphi =$ *konst*-kõverate ehitamine. Näiteks $\varphi = 50\%$ ehitamiseks võtame võrrandis $\varphi = 0{,}5$ ja anname küllastusrõhule e_0 samuti väärtused vastavalt temperatuuridele t_0, t_1, t_2, ... jne. ning arvutame suurused d'_1,

d'_2, d'_3 ..., millede abil määrame $\varphi = 50\%$-kõvera lõikepunktid isotermidega t_0, t_1, t_2, t_3 ... jne. Madalate temperatuuride piirkonna jaoks võime võrrandi (309) suuremat viga tegemata kirjutada kujul

$$d = 622 \frac{\varphi e_0}{B - \varphi e_0} \approx 622 \frac{\varphi e_0}{B}. \qquad (336)$$

Sellest võrrandist nähtub, et d on võrdeline φ-ga, s. o. vähendades näiteks φ kaks korda, väheneb ka d kahekordselt. Järelikult on madala temperatuuri piirkonna jaoks vajalik diagrammile võrrandi (336) järgi kanda ainult $\varphi = 100\%$ kõver; teiste $\varphi = konst$-kõverate ehitamiseks jagame J-telje ja $\varphi = 100\%$-kõvera vahelised isotermide lõigud näiteks kümneks võrdseks osaks ja ühendades nii saadud vastavad punktid siledate kõveratega, saamegi $\varphi = 10\%$, $\varphi = 20\%$, ... $\varphi = 100\%$ relatiivse niiskuse kõverad. Punktides, kus $\varphi = konst$-jooned lõikuvad niiske õhu kriitilise isotermiga, murduvad $\varphi = konst$-jooned ja kulgevad rööpselt J-teljega (vt. joon. 146), sest temperatuuri piirkonnas üle kriitilise, nagu selgus § 45, esindab $\varphi = konst$-joon ühtlasi $D = konst$-joont, järelikult ka $d = konst$ - joont.



Joon. 145.

Veeauru partsiaalrõhu kõvera kandmiseks J-d-diagrammile kasutame võrrandit (308), s. o.

$$d = 622 \frac{e}{B - e}.$$

Ilmutades võrrandi veeauru partsiaalrõhu e suhtes, saame

$$e = \frac{dB}{622 + d} \text{ mm Hg.} \tag{337}$$

Veeauru partsiaalrõhu kõvera ehitamiseks anname võrrandis (337) niiskusesisaldusele d rea sobivaid väärtusi d_1, d_2, d_3 ... ja kanname saadud e_1, e_2, e_3 väärtused valitud mõõtkavas diagrammi alusjoonelt Od_1 vastavatele *d-konst*-joontele (joon. 145), saades *d-konst*-joontel rea punkte 1, 2, 3, 4... Neid punkte ühendav sile kõver ongi veeauru partsiaalrõhu kõver.

Täielik J-d-diagramm on esitatud joonisel 146.

Üldiselt, et vähendada diagrammi mõõteid, jäetakse diagrammil ära d-telg (vt. joon. 145) ja d väärtused kirjutatakse J-teljele risti ehitatud joonele Od_1.

53. BAROMEETRILISE RÕHU MUUTUSE MÕJU φ = KONST. KÕVERATELE J-d-DIAGRAMMIL.

Baromeetrilise rõhu muutus mõjutab J-d-diagrammil ainult φ = *konst*-kõverate asetust ja veeauru partsiaalrõhu kõverat.

Selgitame, kuidas mõjub baromeetrilise rõhu vähenemine φ = *konst*-joonte asetusele J-d-diagrammil. Oletame, et baromeetriline rõhk väheneb rõhult B kuni rõhuni B', kusjuures õhu niiskusesisaldus d ja temperatuur jääb muutmatuks, mille tõttu jääb endiseks ka veeauru küllastusrõhk e_0.

Selle juhtumi jaoks võime võrrandi (309) põhjal kirjutada võrduse:

$$d = 622 \frac{\varphi e_0}{B - \varphi e_0} = 622 \frac{\varphi' e_0}{B' - \varphi' e_0} = konst,$$

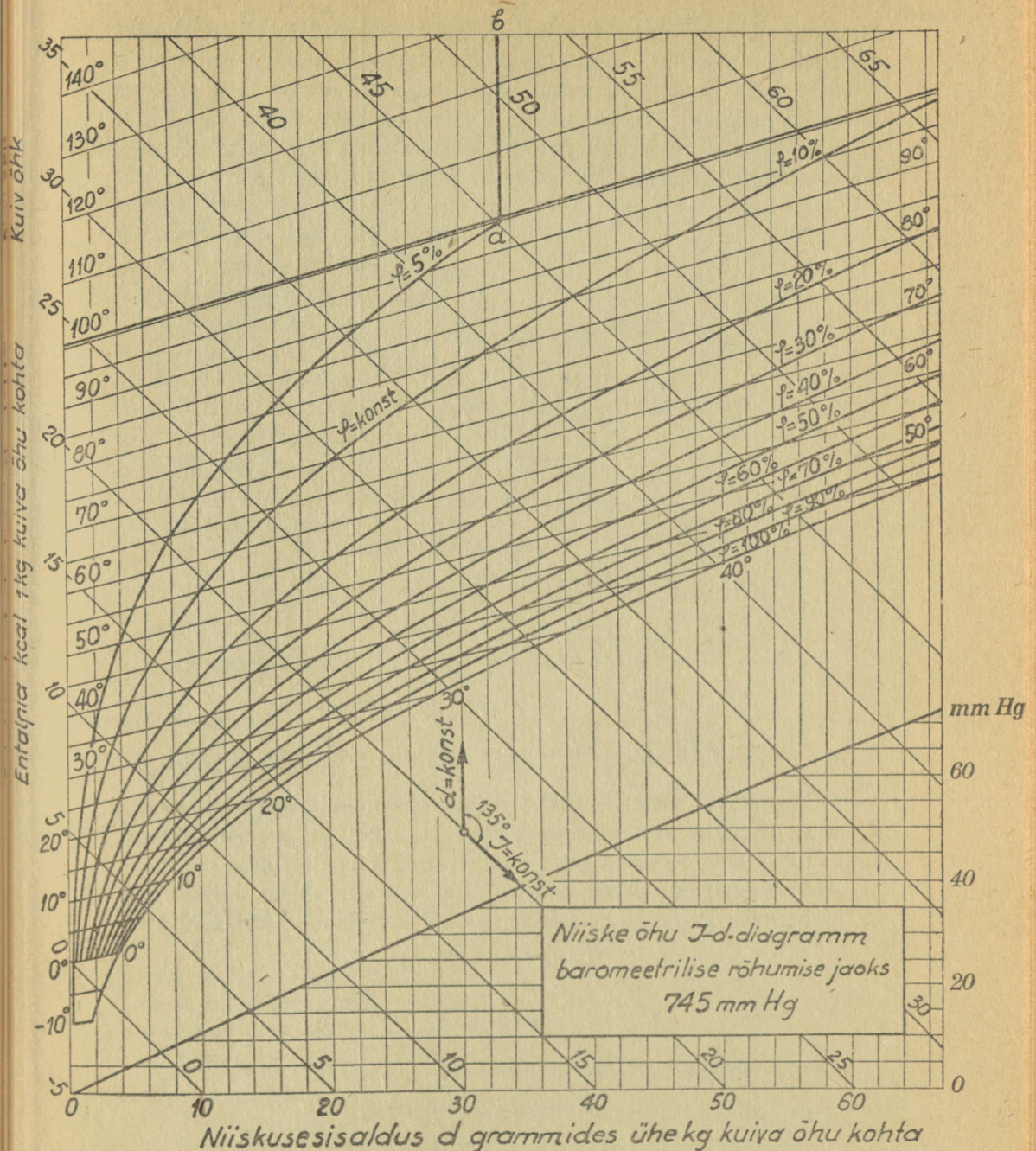
kus φ' on niiske õhu relatiivne niiskus vastavalt baromeetrilisele rõhule B'.

Ilmutame võrduse relatiivse niiskuse φ' suhtes:

$$\varphi' = \varphi \frac{B'}{B}. \tag{338}$$

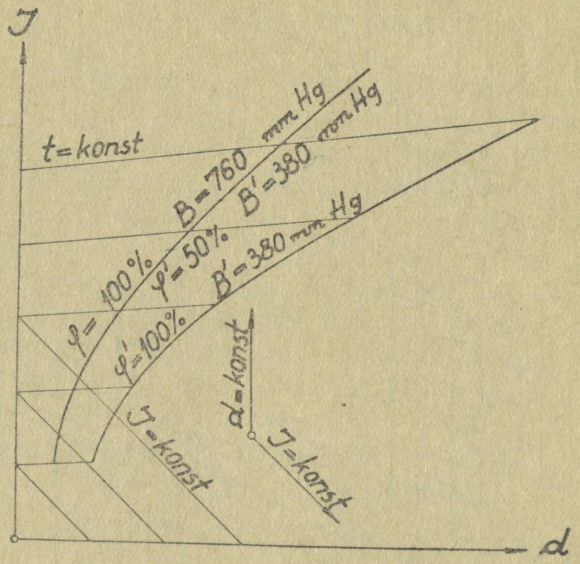
Võrrandist (338) nähtub, et relatiivne niiskus väheneb võrdeliselt baromeetrilise rõhuga B'.

Näiteks vähendades baromeetrilist rõhku $B = 760$ mm Hg kuni rõhuni $B' = 380$ mm Hg, väheneb relatiivne niiskus kahekordselt (vt. joon. 147).


Niiske õhu J-d-diagramm
baromeetrilise rõhumise jaoks
745 mm Hg
Niiskusesisaldus d grammides ühe kg kuiva õhu kohta
Entalpia kcal 1 kg kuiva õhu kohta
Kuiv õhk
mm Hg
d=konst
J=konst
135°
φ=konst
φ=5%
φ=10%
φ=20%
φ=30%
φ=40%
φ=50%
φ=60%
φ=70%
φ=80%
φ=90%
φ=100%

Joon. 146.

Järelikult on baromeetrilisele rõhumisele $B' = 380$ mm Hg vastavad $\varphi = konst$-kõverad baromeetrilise rõhu $\varphi = konst$-kõveratest mööda isoterme, arvates J-teljest, kaks korda kaugemale nihutatud ehk, mis on sama, 760 mm Hg rõhumise relatiivse niiskuse kõverad vastavad kaks korda väiksemale relatiivsele niiskusele, kui rõhumine on $B = 380$ mm Hg. Tavaliselt ehitatakse J-d-diagramm baromeetrilise rõhumise jaoks 745 mm Hg.



Joon. 147.

54. SEGU PARAMEETRITE MÄÄRAMINE J-d-DIAGRAMMI ABIL.

Oletame, et segatakse kaks niisket õhku, millede parameetrid on J_1, d_1 ja J_2, d_2, kusjuures esimese komponendi ühe kilogrammi kuiva õhuosa kohta tuleb n kilogrammi teise komponendi kuiva õhuosa.

Märgime segu parameetrid J_s ja d_s, siis võime soojusbilansi segu kogusele, mille kuiva õhu kaal on $(1 + n)$ kilogrammi, kirjutada kujul:

$$J_1 + nJ_2 = (1 + n)J_s, \tag{a}$$

$$J_s = \frac{J_1 + nJ_2}{1 + n}. \tag{339}$$

Segu sama koguse niiskusbilanss on:

$$d_1 + nd_2 = (1 + n)d_s, \tag{b}$$

$$d_s = \frac{d_1 + nd_2}{1 + n}. \tag{340}$$

Ilmutades võrrandid (a) ja (b) n suhtes, saame moodustada võrduse:

$$n = \frac{J_1 - J_s}{J_s - J_2} = \frac{d_1 - d_s}{d_s - d_2}. \qquad (c)$$

Vaadeldes J_s ja d_s kui jooksvaid koordinaate, järeldame, et võrrand (c) kujutab J-d-diagrammil kolme punkti läbivat sirget, mille koordinaadid on J_1, d_1, J_2, d_2 ja J_s, d_s.

Järelikult asub segu parameetreid J_s ja d_s määrav punkt sirgel AB, mis ühendab J-d-diagrammil segu komponentide parameetrite J_1, d_1 ja J_2, d_2 poolt tähistatud punkte A ja B (vt. joon. 148). Oletades, et segu parameetreid J_s ja d_s määrab punkt C, järgneb sarnastest kolmnurkadest ACK ja CBE võrdus:

$$\frac{AK}{CE} = \frac{CK}{BE} = \frac{AC}{CB} \quad \text{ehk}$$

$$\frac{J_1 - J_s}{J_s - J_2} = \frac{d_1 - d_s}{d_s - d_2} = n,$$

millest järeldame, et

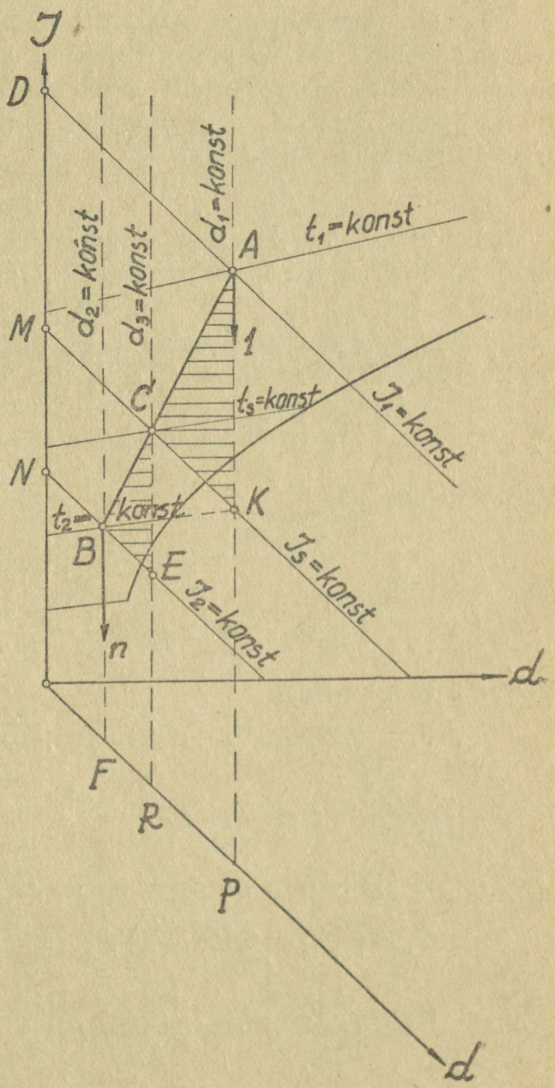
$$\frac{AB}{BC} = n + 1 \quad \text{ehk}$$

$$BC = \frac{AB}{n+1}. \qquad (d)$$

Võrdusest (d) järgneb, et punkti C leidmiseks jagame AB sirge $n + 1$ võrdseks osaks; siis asub punkt C punktist B ühe jaotuse ja punktist A n jaotuse kaugusel.

Suuruse n saab määrata ka järgmise võrrandiga

$$n = \frac{G_{\delta_2}}{G_{\delta_1}} = \frac{\gamma_{\delta_2} V_2}{\gamma_{\delta_1} V_1},$$



Joon. 148.

kus γ_{δ_2} ja V_2 on segu moodustava teise komponendi kuiva õhu erikaal ja maht [m³] ning γ_{δ_1} ja V_1 esimese komponendi kuiva õhu erikaal ja tema maht [m³]. Asendades seoses γ_{δ_2} ja γ_{δ_1} nende avaldistega võrrandist (317), saame

$$n = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{B_2 - \varphi_2 e_{0_2}}{B_1 - \varphi_1 e_{0_1}}. \tag{341}$$

Toodust järeldame, et punkti C sirgel AB saab leida veel graafiliselt nöörpolügooniga kui rööpselt mõjuvate jõudude resultantjõu rakenduspunkti. Selleks paneme punkti A mööda $d_1 = konst$-joont mõjuma ühikjõu ja punkti B mööda $d_2 = konst$-joont jõu, mis sisaldab n jõuühikut, nagu on näidatud joonisel 148.

Näide. Segatakse kaks kogust niisket õhku, $V_1 = 15000$ m³ ja $V_3 = 40000$ m³. Määrata segu parameetrid, kui komponentide parameetrid on $t_1 = 10°$ C, $\varphi_1 = 80\%$ ja $t_2 = 35°$ C, $\varphi_2 = 50\%$ ning baromeetriline rõhk $B = 740$ mm Hg.

Lahendame ülesande analüütiliselt. Määrame küllastunud veeauru tabeli järgi veeauru küllastusrõhud e_{01} ja e_{02}:

$$e_{01} = 9{,}14 \text{ mm Hg}, \quad e_{02} = 41{,}78 \text{ mm Hg}.$$

Võrrandi (309) järgi

$$d_1 = 622 \frac{0{,}8 \cdot 9{,}14}{740 - 0{,}8 \cdot 9{,}14} = 6{,}21 \frac{\text{g}}{\text{kg}},$$

$$d_2 = 622 \frac{0{,}5 \cdot 41{,}78}{740 - 0{,}5 \cdot 41{,}78} = 18{,}07 \frac{\text{g}}{\text{kg}}.$$

Võrrandi (335) põhjal

$$J_1 = 0{,}597 \cdot 6{,}21 + 0{,}24 \cdot 10 + 0{,}46 \cdot 10 \frac{6{,}21}{1000} = 6{,}13,$$

$$J_2 = 0{,}597 \cdot 18{,}07 + 0{,}24 \cdot 35 + 0{,}46 \cdot 35 \frac{18{,}07}{1000} = 19{,}48.$$

Antud niiske õhu kogustes on kuiva õhu kaalulised kogused:

$$G_1 = \gamma_{\delta_1} V_1 = 0{,}465 \frac{740 - 0{,}8 \cdot 9{,}14}{273{,}2 + 10} 15000 = 18045{,}6 \text{ kg},$$

$$G_2 = \gamma_{\delta_2} V_2 = 0{,}465 \frac{740 - 0{,}5 \cdot 41{,}78}{273{,}2 + 35} 40000 = 43398{,}6 \text{ kg}.$$

$$n = \frac{43398{,}6}{18045{,}6} = 2{,}40.$$

Segu parameetrid J_s ja d_s leiame võrranditega (339) ning (340), s. o.

$$J_s = \frac{J_1 + nJ_2}{1+n} = \frac{6{,}13 + 2{,}4 \cdot 19{,}48}{3{,}40} = 15{,}55,$$

$$d_s = \frac{d_1 + nd_2}{1+n} = \frac{6{,}21 + 2{,}4 \cdot 18{,}07}{3{,}40} = 14{,}58 \ \frac{g}{kg}.$$

Segu temperatuuri määrame võrrandiga (335), ilmutades viimase t suhtes, s. o.

$$t = \frac{J_s - 0{,}597\, d_s}{0{,}24 + 0{,}46\, \frac{d_s}{1000}} = \frac{15{,}55 - 0{,}597 \cdot 14{,}58}{0{,}24 + 0{,}46\, \frac{14{,}58}{1000}} = 27{,}8^\circ \text{ C}.$$

Temperatuurile 27,8° C vastab küllastusrõhk $e_{os} = 27{,}74$ mm Hg.

Segu relatiivse niiskuse leiame võrrandiga (336), ilmutades viimase φ suhtes, s. o.

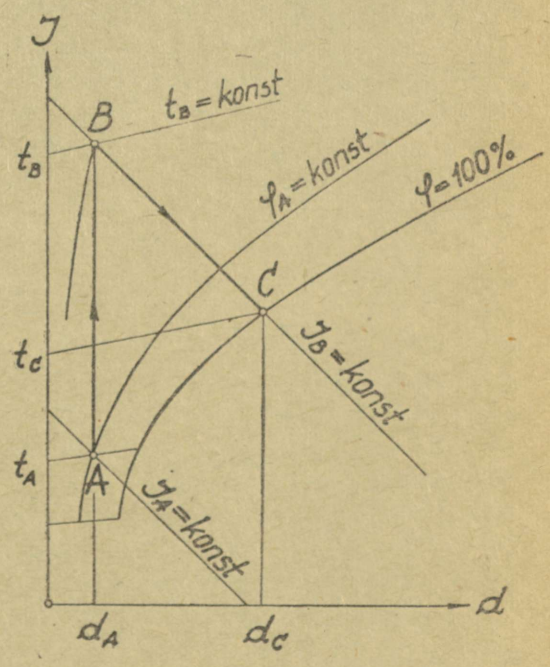
$$\varphi = \frac{Bd}{(622 + d)\, e_{os}} = \frac{740 \cdot 14{,}58}{(622 + 14{,}58)\, 27{,}74} = 0{,}61,$$

$$\varphi = 61\ \%.$$

55. J-d-DIAGRAMMI RAKENDAMISEST KUIVATUSSEADMETELE.

Aine kuivatamine kuivatusseadmetes toimub väga mitmekesistel menetlustel, sõltuvalt nii aine füüsikalistest omadustest kui ka vajalikust kuivatusrežiimist. Selle küsimuse käsitlemine kuulub eridistsipliinide valdkonda. Käesolevas anname kujutluse aine kuivatamise käigust kõige lihtsama skeemi kohaselt.

Lihtsas kuivatusseadmes jaguneb protsess õhuga kahte ossa. Esiteks juhitakse õhk, mille relatiivne niiskus on φ_A ja temperatuur t_A, õhu soojendajasse ehk nn. kalorifeeri. Kalorifeeri läbides tõuseb õhu temperatuur temperatuurilt t_A kuni temperatuurini t_B ja relatiivne niiskus väheneb väärtuselt φ_A kuni väärtuseni φ_B. See protsess toimub õhu jääval niiskusesisaldusel, s. o. protsessil $d = konst$. J-d-diagrammil ku-



Joon. 149.

jutab seda protsessi J-teljega rööpne sirge AB (vt. joon. 149). Selleks õhu kuumendamiseks tarbitud soojushulk ühe kilogrammi kuiva õhu ehk $(1 + \frac{d}{1000})$ kg niiske õhu kohta on

$$Q = J_B - J_A \text{ kcal.}$$

Kalorifeerist juhitakse soe õhk kuivatusseadmesse, kus õhu soojuse arvel toimub kuivatatavas aines oleva niiskuse (vee) aurustumine, mille tagajärjel suureneb õhu niiskus d ja langeb temperatuur.

See protsess õhuga esindab isoentalpilist protsessi, sest samal määral, kui õhk annab ära osa oma soojusest temperatuuri langusega, saab ta sama soojushulga tagasi kuivatatavas aines aurustunud vee aurustumissoojusena. J-d-diagrammil kujutab seda protsessi $J = konst$-joontega rööpne sirge BC. Antud juhul on kuivatisest lahkuva õhu relatiivne niiskus $\varphi_C = 1{,}0$ ehk 100% ja temperatuur t_C, kusjuures kuivatisest õhuga äraviidav niiskus ühe kilogrammi kuiva õhu kohta on

$$\Delta d = d_C - d_A \text{ grammi.}$$

VIII peatükk.

GAASITURBIINID.

56. GAASITURBIINIDE EELISED JA LIIGITUS.

Gaasiturbiinide ehitamise idee ulatub kaugele möödunud sajanditesse, kuid alles käesoleval ajal on nad laboratoorsete katsete perioodist välja jõudnud ja on mõnedes selleks kohastes tööstusettevõtetes iseseisvate jõuallikatena kasutamisele võetud. Nad arendavad üksikagregaadi kohta võimsust kuni 5000 kW ja rohkem. Gaasiturbiin-jõuseadmetel on suur tulevik. NSV Liidus teostatakse katseid gaasiturbiinidega paljudes vastavates uurimisinstituutides.

Abiagregaatidena sisepõlemismootorite juures on juba varem tarvitusele võetud gaasiturbiinid ja nad töötavad mootori heitgaasidega. Nendes jõuseadmetes on nad määratud mootori silindrite läbipuhumise ning silindrite ülelaadimise ventilaatorite või kompressorite jõuallikateks.

Praegusajal kasutatakse gaasiturbiini ka jõuallikana reaktiivlennukites.

Võrreldes aurujõuseadmega on gaasiturbiini eelisteks statsionaarse jõuallikana alljärgnevad tähtsamad asjaolud.

1. Kütuse soojus antakse edasi töötavale kehale samal printsiibil nagu sisepõlemismootoriski, s. o. ilma vahepealse soojusvahetusagregaadita — katlata (lahtise ringprotsessiga gaasiturbiinseade).

2. Jõuseadme väiksemad gabariitmõõtmed ja väiksem kaal ühe võimsusühiku kohta (~ 8 kg/HJ, ilma elektrigeneraatorita).

3. Aluseks võttes gaasiturbiinseadme ringprotsessi termodünaamilisi omadusi on eeldusi selleks, et gaasiturbiinide edasisel arengul on võimalik jõuseadme kasutegurit viia piirini, mis märksa ületab aurujõuseadme kasuteguri ning millega on võimalik vedelkütuse kulu ühe hobujõud-tunni kohta vähendada kuni 0,18 kilogrammini või ehk veelgi enam. Senised katsed näitavad, et gaasiturbiine on võimalik ehitada tahke kütusetolmuga küttele, mis veelgi suurendaks gaasiturbiinide eeliseid.

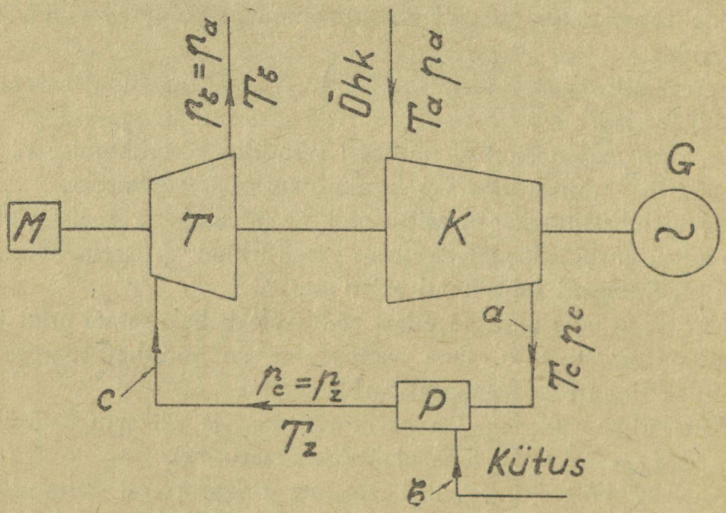
Gaasiturbiinseadme ringprotsessid esinevad kahes variandis, nimelt lahtised ja suletud ringprotsessid. Lahtiseks nimetatakse ringprotsessi, milles töötav keha (õhk) pidevalt vahetub, nagu see esineb sisepõlemismootoriteski. Põlemisprotsessi järgi jagunevad need ringprotsessid

ringprotsessideks põlemisega konstantsel mahul *(v = konst)* ja põlemisega konstantsel rõhul *(p = konst)*. Praegustes konstruktsioonides kasutatakse peamiselt protsesse põlemisega konstantsel rõhul.

Kinniseks nimetatakse gaasiturbiini ringprotsessi, milles töötavat keha ei vahetata. Selles ringprotsessis kütuse soojus kantakse üle töötavale kehale soojusvahetusaparaadi kaudu. Töötava kehana on eelistatavad üheaatomilised gaasid, nagu argon, krüpton, ksenon või ka nende gaaside segud CO_2-ga jne.

57. IDEAALSE GAASITURBIINSEADME LAHTINE RINGPROTSESS EHK LAHTINE TAGASTATAV PÕHI-RINGPROTSESS.

Lihtsa gaasiturbiinseadme skeem on näidatud joonisel 150. Jõuseade koosneb ühele ja samale võllile monteeritud õhukompressorist *K*, gaasiturbiinist *T*, elektrigeneraatorist *G* ja käivitusmootorist *M*. Ringprotsess toimub



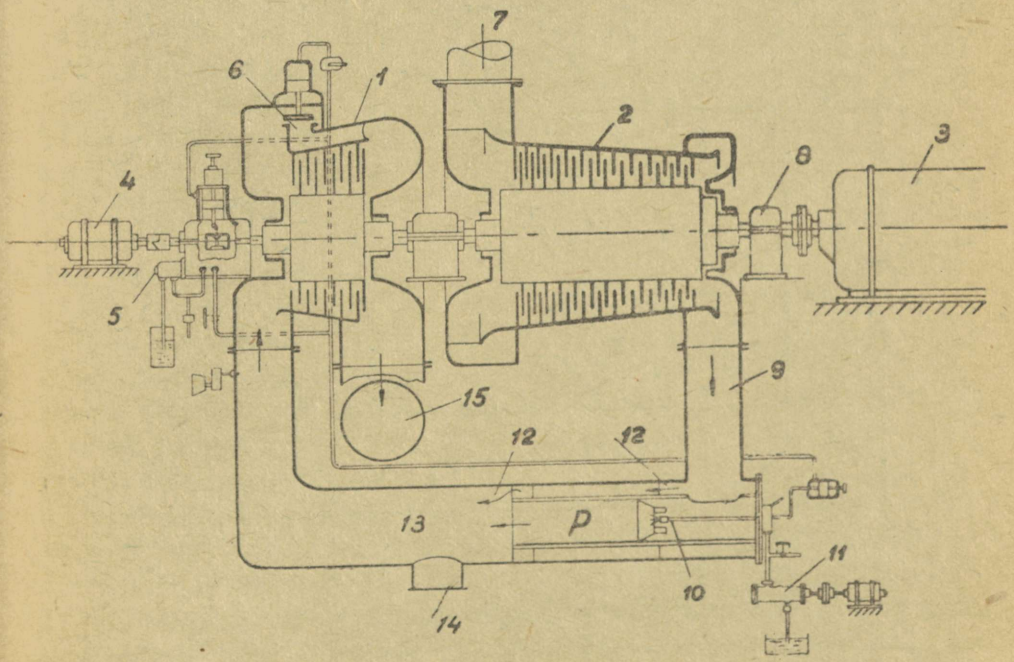
Joon. 150.

järgmiselt: välisõhk imetakse aksiaalvoolu kompressorisse *K*, kus ta komprimeeritakse (2 – 7 ata). Kompressorist voolab õhk suruõhu juhet *a* kaudu põlemiskambrisse *P*, kuhu vastava pumbaga juhitakse juhtme *b* kaudu vedelkütus. Põlemiskambris *P* toimub moodustuva küttesegu isobaariline põlemine. Põlemiskambrist voolavad kõrgetemperatuurilised (600 — 870° C) gaasid edasi (juhe *c*) gaasiturbiini *T*, läbivad turbiini staatori ja rootori labad ning väljuvad atmosfääri, millega ringprotsess on teostatud. Turbiini

staatori ja rootori labasid läbides paisuvad gaasid adiabaatiliselt kuni atmosfääri rõhuni, millega ühes gaasidesse (töötav keha) kompressoris K ja põlemiskambris P akumuleerunud potentsiaalne energia muundub kineetiliseks energiaks, mis tiiruva rootori labadel omakorda muundub rootori mehhaaniliseks tööks. Osa sellest mehhaanilisest tööst tarbitakse mehhanismides esinevate takistuste ületamiseks ja kompressoris K õhu adiabaatiliseks komprimeerimiseks. Jääk mehhaanilisest tööst muundub elektrigeneraatori G kaudu elektrienergiaks, mis esindabki turbiinseadme kasulikku ehk efektiivset tööd. Skeemil 150 esitatud turbiinseadme käivitamiseks on vajalik käivitusmootor M, millega pannakse turbiinseadme rootorid pöörlema, et teostada kompressoris K õhu esialgset komprimeerimist.

Turbiinseadme täpsem skeem on esitatud joonisel 151. Numbritega on märgitud:

1 — gaasiturbiin, *2* — aksiaalvoolu õhukompressor, *3* — elektrigeneraator, *4* — käivitusmootor, *5* — turbiinseadme õlituspump, *6* — kaitseventiil, *7* — õhutoru atmosfäärist kompressorisse, *8* — reduktor, *9* — suruõhu toru kompressorist põlemiskambrisse, *10* — kütuse pihusti, *11* — kütuse pump, *12* — sekundaarõhk, millega jahutatakse põlemiskambri P kesta ja reguleeritakse

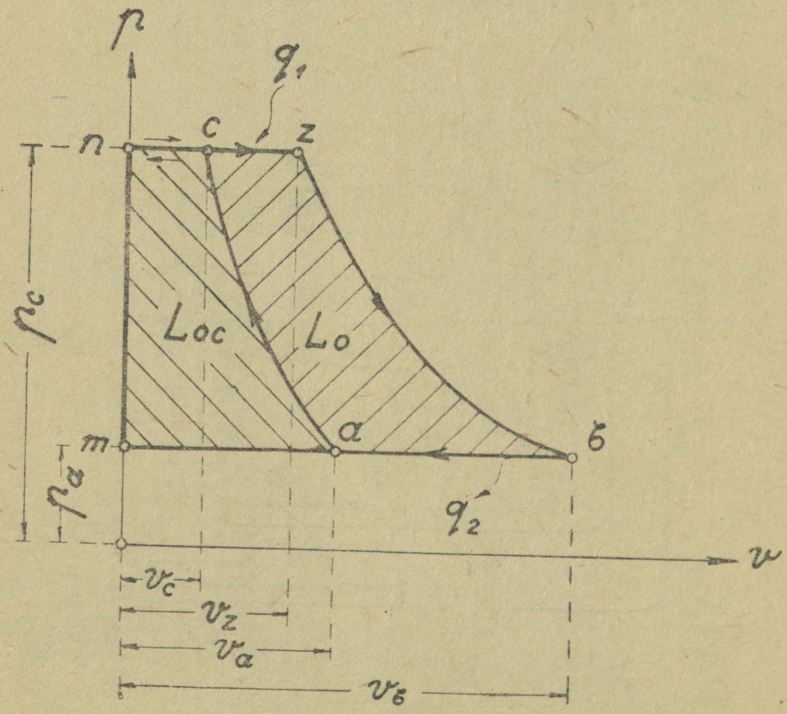


Joon. 151.

turbiini voolava gaasi temperatuuri, *13* — gaasitoru põlemiskambrist gaasiturbiini, *14* — gaasi harutoru äärik gaasi võtmiseks tehnoloogilisteks otstarveteks jne., *15* — heitgaaside toru turbiinist atmosfääri. Skeemil 151 esitatud turbiinseadme efektiivne võimsus on 4000 kW. Komprimeeritud õhu rõhk on 4,2 ata ja gaaside temperatuur enne turbiini 540° C.

Eespooltoodust selgub, et selles turbiinseadmes töötav keha ei teosta kinnist ringprotsessi, vaid uuendub pidevalt atmosfäärist võetava värske õhu arvel, sest põlemiskambrit läbides õhu hapnik tarbitakse ära kütuse põletamiseks, mistõttu ta pole enam kõlblik protsessi kordamiseks. Järelikult turbiinseadmes toimuv ringprotsess on tagastatamatu töötava keha molekulaarse muutuse tõttu põlemiskambris.

Edaspidises käsitluses, termodünaamika seisukohast lähtudes, oletame siiski, et ringprotsess on ideaalne, s. o. tagastatav, ja et töötav keha ei vahetu, vaid turbiinseadmes teostub kinnine ringprotsess. Vastavalt sellele oletusele on turbiinseadmes toimuv tagastatav ringprotsess näidatud joonisel 152 esitatud *p*-*v*-diagrammil ühe kilogrammi töötava keha jaoks. Ringprotsess algab punktist *a* parameetritel p_a ja v_a oleva õhu adiabaatilise komprimee-



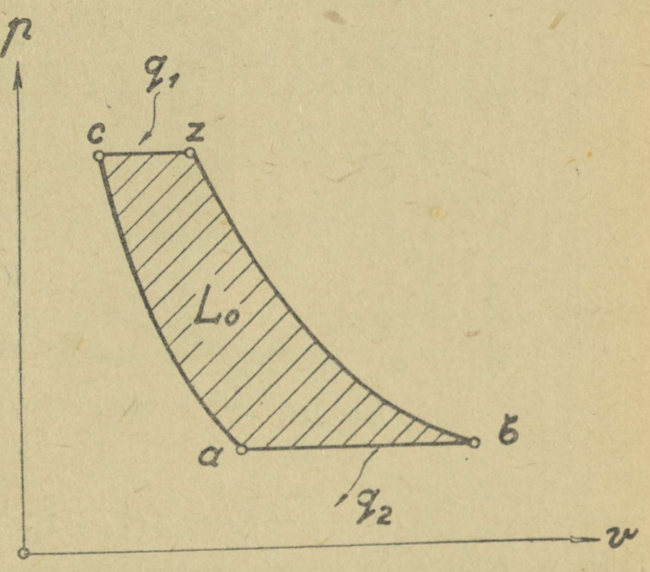
Joon. 152.

rimisega õhukompressoris kuni parameetriteni p_c ja v_c, mida tähistab adiabaat *ac*. Kompressorist, millele vastab punkt *c*, surutakse õhk parameetritel p_c ja v_c põlemiskambrisse. Seda protsessi tähistab joon *cn*.

Selles komprimeerimisprotsessis tarbitud tööd avaldab pindala *acnma*.

Kompressorist põlemiskambrisse voolanud õhule (joon *cnc*) juhitakse põlemiskambris jääval rõhul $p_c = konst$ juurde kütuse põlemisel soojushulk q_1, mille tagajärjel õhk isobaariliselt paisub kuni mahuni v_z. Seda paisumisprotsessi tähistab joon *cz*. Põlemiskambrist juhitakse gaas parameetritel p_c ja v_z gaasiturbiini, kus ta adiabaatiliselt paisub (joon *zb*) kuni parameetriteni $p_b = p_a$ ja v_b, millele diagrammil vastab punkt *b*. Adiabaatilise paisumise lõpp-punktist *b* teostatakse gaasi isobaariline komprimeerimine, s. o. õhu isobaariline jahutamine kuni punktini *a*, milleks protsessist juhitakse eemale soojushulk q_2. Punktis *a* on õhk saavutanud omad algparameetrid p_a ja v_a ning ringprotsess algab uuesti.

Turbiinis gaasi adiabaatilisel paisumisel sooritatud töö avaldub *p-v*-diagrammil tehnilise töö pindalaga *nzbm* (vt. § 31). Järelikult avaldub gaasiturbiinseadme kasulik töö turbiini poolt sooritatud töö ja kompressori poolt tarbitud töö vahega, mida *p-v*-diagrammil tähistab pindala *aczb*. Selle mehhaanilise töö märgime edaspidi tagastatavas protsessis tähisega L_o. Järelikult, kui vaadelda turbiinagregaadi kasulikku tööd omaette, siis saame ta *p-v*-diagrammil esitatud ringprotsessist (vt. joon. 153), mis ühtib „Tehniline termodünaamika I" § 100 kirjeldatud ringprotsessiga.



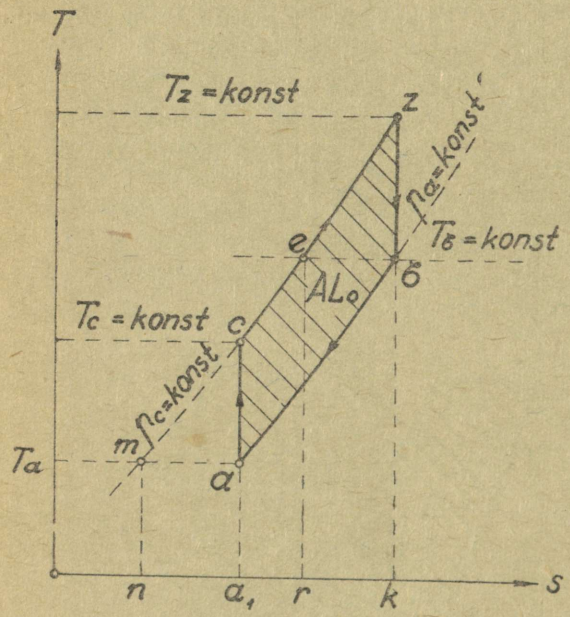
Joon. 153.

T-s-diagrammil on turbiinagregaadi ringprotsess näidatud joonisel 154. Ringprotsess algab punktist *a* õhu adiabaatilise komprimeerimisega kuni isobaari $p_c = konst$ lõikepunktini *c*. Punktist *c* alates juhitakse protsessi

isobaariliselt soojushulk q_1, mida tähistab isobaari lõik cz. Sellele järgneb gaasi adiabaatiline paisumine punktist z kuni isobaari $p_a = konst$ lõike-punktini b ja selle järel gaasi isobaariline jahutamine kuni protsessi alg-punktini a, millega juhitakse protsessist eemale soojushulk q_2.

Jooniselt nähtub, et protsessi juhitud soojushulk q_1 avaldub pindalaga a_1czk, mis on võrdne entalpia muutusega $i_z - i_c$, s. o.

$$q_1 = i_z - i_c = c_{pm}(T_z - T_c)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{342}$$



Joon. 154.

kus i_z on õhu entalpia punktis z, i_c — entalpia punktis c ja c_{pm} — temperatuuri intervalli $T_z - T_c$ keskmine kaaluline erisoojus. Nii antud juhul kui ka edaspidises käsitluses oletame, et põlemisprotsessis, tingituna kütusest, ei esine töötava keha molekulaarset ja moolkoguse muutust. Reaalses ringprotsessis tuleb arvestada mõlemaid tegureid.

Ringprotsessist eemalejuhitud soojushulk on võrdne pindalaga a_1abk, mis absoluutse väärtuse järgi on võrdne entalpia muutusega $i_b - i_a$, s. o.

$$q_2 = i_b - i_a = c_{pm}(T_b - T_a)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{343}$$

Selles võrrandis i_b on entalpia punktis b ja i_a — entalpia punktis a, s. o. kompressorisse voolava õhu entalpia.

Ringprotsessis sooritatud mehhaaniline töö AL_o avaldub pindalaga $aczb$, s. o.

$$AL_o = q_1 - q_2 = (i_z - i_c) - (i_b - i_a) = c_{pm}(T_z - T_c) - c_{pm}(T_b - T_a)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{344}$$

ehk

$$AL_o = (i_z - i_b) - (i_c - i_a) = c_{pm}(T_z - T_b) - c_{pm}(T_c - T_a)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{345}$$

Ringprotsessis õhu komprimeerimiseks tarbitud mehhaaniline töö, mille absoluutse väärtuse tagastatavas protsessis märgime AL_{oc}, avaldub isobaarilõigu *mc* all oleva pindalaga $nmca_1$, s. o.

$$AL_{oc} = i_c - i_m = i_c - i_a,$$

$$AL_{oc} = i_c - i_a = c_{pm}(T_c - T_a) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{346}$$

Gaasiturbiini sooritatud mehhaaniline töö, mille märgime tähisega AL_{ot}, on võrdne isobaarilõigu *ez* all oleva pindalaga *rezk*, s. o.

$$AL_{ot} = i_z - i_e = i_z - i_b,$$

$$AL_{ot} = i_z - i_b = c_{pm}(T_z - T_b) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{347}$$

Turbiinseadme kasuliku töö AL_o suhet turbiini tööga AL_{ot} nimetame turbiinseadme energia tooteteguriks ja märgime tähisega α, s. o.

$$\alpha = \frac{AL_o}{AL_{ot}} = \frac{(i_z - i_b) - (i_c - i_a)}{i_z - i_b},$$

$$\alpha = 1 - \frac{i_c - i_a}{i_z - i_b} = 1 - \frac{c_{pm}(T_c - T_a)}{c_{pm}(T_z - T_b)}. \tag{348}$$

Näiteks kui $\alpha = 0{,}4$, tähendab see, et gaasiturbiini iga tegeliku 100 hobujõu kohta arendab turbiinseade võimsust 40 hobujõudu.

Ringprotsessi termiline kasutegur η_t avaldub

$$\eta_t = \frac{AL_o}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_{pm}(T_b - T_a)}{c_{pm}(T_z - T_c)}, \tag{349}$$

või oletades, et temperatuuri-intervallide $T_b - T_a$ ja $T_z - T_c$ erisoojused on võrdsed, saame

$$\eta_t = 1 - \frac{T_b - T_a}{T_z - T_c}. \tag{350}$$

Õhu kulu *d* ühe hobujõud-tunni kohta on arvutatav võrrandiga

$$d = \frac{632{,}3}{AL_o} = \frac{632{,}3}{(i_z - i_b) - (i_c - i_a)} \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}} \tag{351}$$

ehk

$$d = \frac{632{,}3}{c_{pm}(T_z - T_b) - c_{pm}(T_c - T_a)} \frac{\text{kg}}{\text{HJh}}. \tag{352}$$

Soojuse kulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$W = d \cdot q_1 = \frac{632{,}3}{\eta_t} \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}. \tag{353}$$

Termiliste parameetrite kaudu ringprotsessi termiline kasutegur avaldub (vt. „Tehniline termodünaamika I" § 100)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\psi^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}, \tag{354}$$

kus ψ on rõhutõus ja ε komprimeerimisaste, s. o.

$$\psi = \frac{p_c}{p_a} \quad \text{ja} \quad \varepsilon = \frac{v_a}{v_c}.$$

Tehes kasutegurivõrrandis asenduse $\psi = \frac{p_c}{p_a}$, saame ta kujul

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \tag{355}$$

Arvesse võttes, et adiabaatilises protsessis

$$\varepsilon^{k-1} = \left(\frac{v_a}{v_c}\right)^{k-1} = \frac{T_c}{T_a},$$

avaldub turbiinseadme ringprotsessi termiline kasutegur ka kujul

$$\eta_t = 1 - \frac{T_a}{T_c}. \tag{356}$$

Kasutegurivõrrandeist nähtub, et η_t suureneb komprimeerimisprotsessi rõhu tõusuga $\frac{p_c}{p_a}$ ja temperatuuri tõusuga, s. o. koos suhtega $\frac{T_c}{T_a}$; või kompressiooni astmega ε ja töötava keha erisoojuste c_p ja c_v suhtarvuga k.

Kompressoris õhu komprimeerimiseks tarbitav töö avaldub absoluutse väärtuse järgi termiliste parameetrite kaudu adiabaatilise protsessi töövõrrandiga

$$L_{oc} = \frac{k}{k-1} p_a v_a \left[\left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{357}$$

Turbiinis sooritatud töö L_{ot} avaldub võrrandiga

$$L_{ot} = \frac{k}{k-1} p_a v_b \left[\left(\frac{p_c}{p_a} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \qquad (358)$$

Järelikult ideaalse turbiinagregaadi ehk turbiinseadme kasulik töö L_o on

$$L_o = L_{ot} - L_{oc} = \frac{k}{k-1} p_a (v_b - v_a) \left[\left(\frac{p_c}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{\text{kgm}}{\text{kg}} \qquad (359)$$

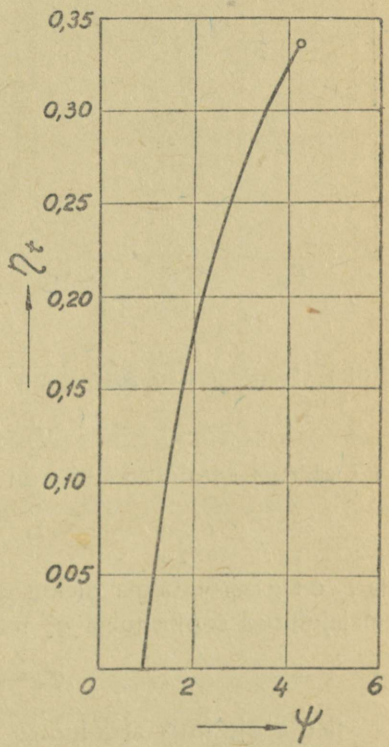
ehk

$$L_o = \frac{k}{k-1} R (T_b - T_a) \left[\left(\frac{p_c}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}, \qquad (360)$$

sest gaasi karaktervõrrandi järgi

$$p_a (v_b - v_a) = R (T_b - T_a).$$

Ideaalse gaasiturbiinseadme termilise kasuteguri muutus vastavalt rõhu tõusule ψ on näidatud joonisel 155. Jooniselt nähtub, et termiline kasutegur suureneb kiiresti suhtarvuga ψ.



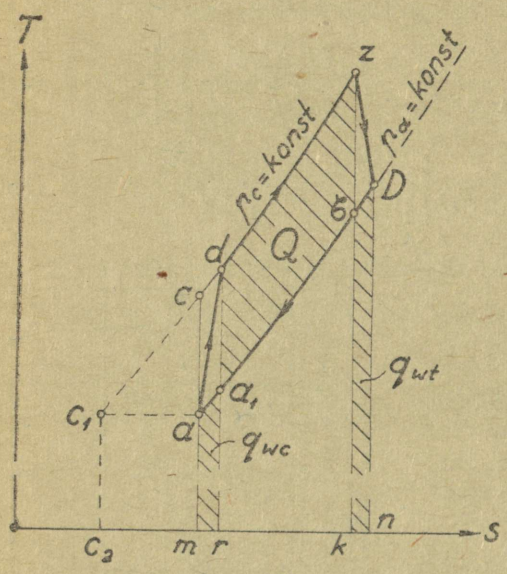
Joon. 155.

58. GAASITURBIINSEADME TAGASTATAMATU PÕHI-RINGPROTSESS.

Kõigis tegelikes gaasiturbiinseadmetes, nagu teisteski soojusjõuseadmetes, esinevad paratamatult mitmesugused kaod. Üldiselt võime jagada need kaod kahte liiki. Esimesse liiki kuuluvad kaod, mis on tingitud jõuseadmest enesest, nagu hõõrdumisest laagrites, materjalide soojusejuhtivusest ja kiirgusest, abimehhanismide tegevuseks tarbitav töö jne. Teise liiki võime arvata töötava keha füüsikalistest omadustest tingitud kaod, mida põhjustavad termodünaamilise ringprotsessi elementide hälbed ideaalsetest protsessidest.

Tähtsamaks teguriks, mis põhjustab reaalse gaasiga toimuva termodünaamilise protsessi hälvet ideaalsest protsessist, on gaasi sisehõõrdumine

eriti voolamisnähtuste puhul, nagu see toimub gaasiturbiinides, turbokompressorites jne. Käesolevas vaatlemegi ainult gaasiturbiinseadmes gaasi sisehõõrdumisest tingitud kadusid kui tehnilise termodünaamika valdkonda kuuluvat küsimust. Kogu küsimustekompleksi lahendamist käsitab eridistsipliin, mis ei mahu käesoleva raamatu raamidesse.



Joon. 156.

Nii õhukompressoris kui ka gaasiturbiinis gaasi sisehõõrdumise tõttu kalduvad adiabaatiliste protsesside jooned T-s-diagrammil ideaalsete adiabaatiliste protsesside joontest, s. o. vertikaalidest, hõõrdumissoojusele vastava entalpia juurdekasvu võrra paremale, nagu on näidatud joonisel 156. Nimelt õhu tagastatamatut komprimeerimist tähistab protsessi joon *ad* ja tagastatamatut paisumist turbiinis protsessi joon *zD*. Seega märgib tagastatamatut ringprotsessi kontuur *adzDa* ja tagastatavat ringprotsessi kontuur *aczba*. Tagastatamatusse ringprotsessi juhitud välissoojust q_1' avaldab antud juhul isobaari $p_c = konst$ lõigu dz all olev pindala, s. o.

$$q_1' = \text{pindala } dzkr,$$

mille väärtus entalpia kaudu on

$$q_1' = i_z - i_d \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{361}$$

kus i_z on gaasi entalpia olekus z ja i_d — entalpia olekus d. Ringprotsessist eemalejuhitud soojushulga q_2' määrab pindala

$$q_2' = \text{pindala } Damn.$$

See soojushulk absoluutse väärtuse järgi on gaasiolekute D ja a entalpiate vahe

$$q_2' = i_D - i_a. \tag{362}$$

Selgitame, missuguse pindalaga avaldub tagastatamatus ringprotsessis gaasiturbiinseadme kasulik töö. Märkides gaasiturbiinseadme ehk turbiinagre-

gaadi kasuliku töö tagastatamatus ringprotsessis AL, avaldub ta soojushulkade q_1' ja q_2' kaudu kujul

$$AL = q_1' - q_2' = \text{pindala } dzkrd - \text{pindala } aDnma.$$

Arvesse võttes, et

$$\text{pindala } dzkrd = \text{pindala } dzba_1d + \text{pindala } a_1bkra_1 = Q + \text{pindala } a_1bkra_1$$

ja

$$\text{pindala } aDnma = \text{pindala } a_1bkra_1 + \text{pindala } aa_1rma + \text{pindala } bDnkb = \text{pindala } a_1bkra_1 + q_{wc} + q_{wt},$$

võime AL avaldada kujul:

$$AL = Q + \text{pindala } a_1bkra_1 - \text{pindala } a_1bkra_1 - q_{wc} - q_{wt},$$

$$AL = Q - q_{wc} - q_{wt}. \tag{363}$$

Selles seoses

$$Q = \text{pindala } a_1dzba_1,$$

$$q_{wc} = \text{pindala } aa_1rm,$$

$$q_{wt} = \text{pindala } bDnk.$$

Entalpia kaudu AL avaldub

$$AL = q_1' - q_2' = (i_z - i_d) - (i_D - i_a) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \tag{364}$$

ehk

$$AL = c_{pm}(T_z - T_d) - c_{pm}(T_D - T_a) \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{365}$$

Turbiinseadme täiuslikkust soojuse transformeerimisel kasulikuks tööks hinnatakse turbiinseadme absoluutse sisemise kasuteguriga η_i, mis on tegelikus tagastatamatus ringprotsessis sooritatud kasuliku töö AL suhe samasse ringprotsessi juhitud välise soojusega q_1', s. o.

$$\eta_i = \frac{AL}{q_1'} = \frac{AL}{c_{pm}(T_z - T_d)}. \tag{366}$$

Turbiinseadme tagastatamatu ringprotsessi täiuslikkust tagastatava ringprotsessi suhtes hinnatakse, nagu auruturbiinigi puhul, turbiinseadme suhtelise sisemise kasuteguriga η_{oi}, mis on tagastatamatus ringprotsessis sooritatud kasuliku töö AL suhe tagastatavas ringprotsessis sooritatava kasuliku tööga AL_o, s. o.

$$\eta_{oi} = \frac{AL}{AL_o}. \tag{367}$$

Kasutegurite η_i ja η_{oi} vahelise seose leiame järgnevalt. Ringprotsessi termilise kasuteguri, s. o. tagastatamatule ringprotsessile vastava tagastatava ringprotsessi termilise kasuteguri avaldis on

$$\eta_t = \frac{AL_o}{q_1} = \frac{AL_o}{c_{pm}(T_z - T_c)}.$$

Korrutades selle seose võrdseid võrrandi (367) võrdsetega, saame

$$\eta_{oi} \cdot \eta_t = \frac{AL}{AL_o} \cdot \frac{AL_o}{c_{pm}(T_z - T_c)}.$$

Võrrandi (366) järgi on

$$AL = c_{pm}(T_z - T_d) \cdot \eta_i.$$

Tehes selle asenduse leiame, et

$$\eta_{oi} \cdot \eta_t = \eta_i \cdot \frac{c_{pm}(T_z - T_d)}{c_{pm}(T_z - T_c)} \approx \eta_i \cdot \frac{T_z - T_d}{T_z - T_c},$$

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \frac{T_z - T_c}{T_z - T_d}. \tag{368}$$

Märkides temperatuuri vahede $T_z - T_c$ ja $T_z - T_d$ suhte tähisega Θ, saame võrrandi kujul

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \Theta, \tag{369}$$

kus Θ, nagu tähendatud, avaldub

$$\Theta = \frac{T_z - T_c}{T_z - T_d}. \tag{369-a}$$

Koefitsient Θ hindab gaasi komprimeerimisel sisehõõrdumisest tingitud temperatuuritõusu.

Võrrandis (369-a) esinev temperatuur T_d on arvutatav gaasi komprimeerimise protsessist järgnevalt.

Märkides kompressori tarbitud töö tagastatamatus komprimeerimisprotsessis *ad* (joon. 156) tähisega AL_c, millele T-s-diagrammil vastab pindala dc_1c_2rd, ja tagastatavas komprimeerimisprotsessis tähisega AL_{oc}, kirjutame suhte

$$\eta_{ad} = \frac{AL_{oc}}{AL_c} = \frac{c_{pm}(T_c - T_a)}{c_{pm}(T_d - T_a)} \approx \frac{T_c - T_a}{T_d - T_a}. \tag{370}$$

Suhet η_{ad} nimetatakse kompressori suhteliseks sisemiseks kasuteguriks ehk adiabaatiliseks kasuteguriks ja ta määratakse katseliselt. Võrrandist leiame, et

$$T_d = \frac{T_c - T_a(1-\eta_{ad})}{\eta_{ad}} \tag{371}$$

ehk

$$t_d = \frac{t_c - t_a(1-\eta_{ad})}{\eta_{ad}} . \tag{372}$$

Turbiinseadme sisemise kasuteguri saab avaldada ka teisiti:

$$\eta_i = \frac{AL_t - AL_c}{q_1'} = \frac{AL_t - AL_c}{i_z - i_d} .$$

Märkides gaasiturbiini (mitte turbiinseadme) sisemise suhtelise kasuteguri η_{oit}, s. o.

$$\eta_{oit} = \frac{c_{pm}(T_z - T_D)}{c_{pm}(T_z - T_b)} = \frac{i_z - i_D}{i_z - i_b} = \frac{AL_t}{AL_{ot}} ,^{31} \tag{372-a}$$

leiame, et

$$AL_t = \eta_{oit} \cdot AL_{ot} .$$

Võrrandi (370) järgi on

$$AL_c = \frac{AL_{oc}}{\eta_{ad}} .$$

Nende asendustega η_i avaldub kujul

$$\eta_i = \frac{\eta_{oit} \cdot AL_{ot} - \frac{AL_{oc}}{\eta_{ad}}}{i_z - i_d} . \tag{374}$$

Joonisel 156 esitatud T-s-diagrammilt nähtub, et

$$AL_{ot} = i_z - i_b = c_{pm}(T_z - T_b) ,$$

$$AL_{oc} = i_c - i_a = c_{pm}(T_c - T_a) .$$

Peale selle on võrrandi (371) põhjal

$$i_z - i_d = c_{pm}(T_z - T_d) = c_{pm}\left[T_z - \frac{T_c - T_a(1-\eta_{ad})}{\eta_{ad}}\right] .$$

---

[31] Temperatuuri T_D leiame võrrandiga

$$T_D = T_z - \eta_{oit}(T_z - T_b)$$

ehk

$$t_D = t_z - \eta_{oit}(t_z - t_b) . \tag{373}$$

Tehes need asendused võrrandis (374) ja oletades, et keskmised erisoojused kõigi temperatuuri-intervallide jaoks on võrdsed suurused, saame võrrandi kujul

$$\eta_i = \frac{\eta_{oit} \cdot \eta_{ad}(T_z - T_b) - (T_c - T_a)}{\eta_{ad} \cdot T_z - T_c + T_a(1 - \eta_{ad})}. \qquad (375)$$

Jagades võrrandi parempoole murru lugejat ja nimetajat temperatuuriga T_a ja märkides

$$\frac{T_z}{T_a} = \tau,$$

$$\frac{T_c}{T_a} = \left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \psi^{\frac{k-1}{k}},$$

leiame, et

$$\eta_i = \frac{\eta_{oit} \cdot \eta_{ad}\left(\tau - \frac{T_b}{T_a}\right) - (\psi^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{\eta_{ad} \cdot \tau - \psi^{\frac{k-1}{k}} + 1 - \eta_{ad}}. \qquad (a)$$

Elimineerime selles võrrandis suhte T_b/T_a.

Isobaarilise protsessi cz ja ab (joon. 156) põhjal võime kirjutada võrdused

$$\frac{T_c}{T_z} = \frac{v_c}{v_z},$$

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{v_b}{v_a}.$$

Korrutades nende võrduste võrdseid, saame

$$\frac{T_b}{T_a} \cdot \frac{T_c}{T_z} = \frac{v_c}{v_a} \cdot \frac{v_b}{v_z}.$$

Adiabaatiliste protsesside ac ja zb põhjal

$$\frac{v_c}{v_a} = \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{\frac{1}{k}}$$

ja

$$\frac{v_b}{v_z} = \left(\frac{p_z}{p_b}\right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\frac{1}{k}},$$

sest $p_z = p_c$ ja $p_b = p_a$.

Järelikult

$$\frac{T_b}{T_a} \cdot \frac{T_c}{T_z} = \frac{v_c}{v_a} \cdot \frac{v_b}{v_z} = \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\frac{1}{k}} = 1.$$

Saadud seose põhjal

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{T_z}{T_c} \tag{376}$$

ehk

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{T_z}{T_c} = \frac{\frac{T_z}{T_a}}{\frac{T_c}{T_a}} = \frac{\tau}{\psi^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Selle asendusega saab kasutegurivõrrand lõplikult kuju

$$\eta_i = \frac{\eta_{oit} \cdot \eta_{ad} \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{1}{\psi^{\frac{k-1}{k}}}\right) - \left(\psi^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{\eta_{ad}(\tau - 1) - \psi^{\frac{k-1}{k}} + 1}$$

ehk

$$\eta_i = \frac{\left(\eta_{oit} \cdot \eta_{ad} \cdot \tau - \psi^{\frac{k-1}{k}}\right)\left(\psi^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{\left[\eta_{ad}(\tau - 1) - \psi^{\frac{k-1}{k}} + 1\right]\psi^{\frac{k-1}{k}}}. \tag{377}$$

Võrrandis esinevat suhet

$$\tau = \frac{T_z}{T_a}$$

nimetatakse ringprotsessi temperatuuri tõusuks ja suhet

$$\psi = \frac{p_c}{p_a}$$

rõhutõusuks.

Võrrandist nähtub, et η_i on funktsioon ψ-st ja τ-st, s. o.

$$\eta_i = f(\psi, \tau).$$

Edasi selgub η_i-võrrandist (377), et $\tau = konst$ puhul η_i omab nullväärtust, kui

$$\psi^{\frac{k-1}{k}} = 1,$$

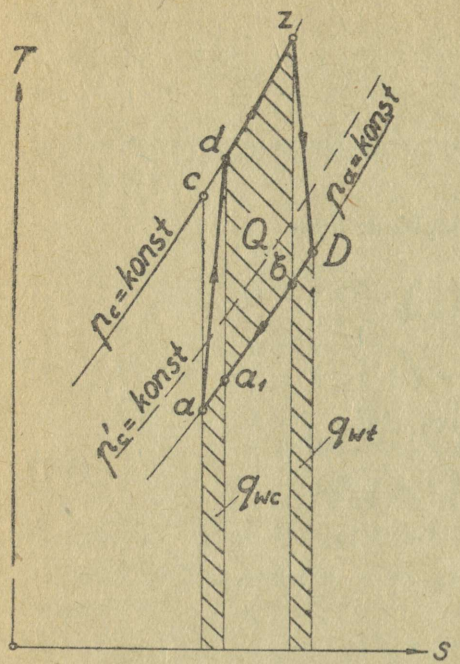
s. o. kui

$$\psi = \frac{p_c}{p_a} = 1, \; p_c = p_a$$

ja kui

$$\psi^{\frac{k-1}{k}} = \eta_{oit} \cdot \eta_{ad} \cdot \tau. \tag{378}$$

Rõhutõusu ψ nende väärtuste vahelises osas η_i omab maksimumi. Kasuteguri η_i mõlemate nullväärtuste ja maksimumi olemasolu nähtub T-s-diagrammilt, mis on esitatud joonisel 157. Esimest nullväärtust omab η_i, kui rõhutõus on võrdne ühega ($\psi = 1$), s. o. kui isobaar $p_c = konst$ langeb ühte isobaariga $p_a = konst$. Kasuteguri η_i teine nullväärtus esineb, kui rõhutõus ψ omab säärast väärtust, mille puhul pindala $a_1 dzb = Q$ on võrdne kompressori ja turbiini tagastatamatute protsesside kadutööde q_{wc} ja q_{wt} summaga, s. o.



Joon. 157.

$$Q = q_{wc} + q_{wt},$$

sest sel puhul on turbiinseadme ringprotsessi kasulik töö võrdne nulliga. Toodust on selge, et isobaaride $p_c = konst$ ja $p_a = konst$ vahelises osas asub mingi isobaar $p'_c = konst$, mille puhul suhe

$$\frac{Q - (q_{wc} + q_{wt})}{q'_1} = \eta_i$$

omab maksimumi.

Joonisel 158 on näidatud funktsiooni

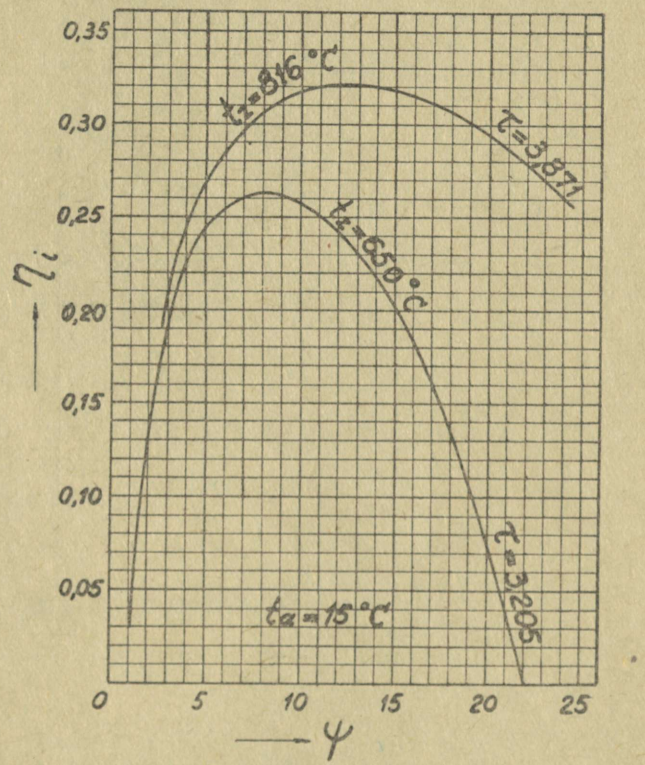
$$\eta_i = f(\psi, \tau)_\tau$$

väärtused kahe erineva $\tau = konst$ jaoks. Diagrammilt 158 järgneb, et jääval algtemperatuuril t_a gaasiturbiini voolava gaasi temperatuuri t_z suurendamisega, s. o. suhte τ suurendamisega, suureneb turbiinseadme kasutegur.

Praegusaegsetes gaasiturbiinides sõltuvalt turbiini materjalide tulekindlusest on turbiini voolava gaasi temperatuur t_z piirides 540 kuni 890° C.

Eespooltoodust järgneb, et vastandina temperatuuri tõusule omab turbiinseade antud $\tau = konst$ korral optimaalse rõhutõusu, millest alates rõhu edasisel tõusul esineb turbiinseadme kasuteguri η_i langus. Kasuteguri säärane langus rõhutõusuga on tingitud temperatuuri suurest tõusust kompressori viimastes astmetes, milleks tarbitakse suhteliselt palju tööd. Samuti arendavad sel puhul temperatuuri suure languse tõttu turbiini viimased astmed suhteliselt vähe võimsust.

Joonisel 158-a on esitatud $\eta_i = konst$ joonte võrk koordineerituna gaasiturbiini ja kompressori suhteliste kasutegurite η_{oit} ja η_{ad} järgi vastavalt optimaalsele rõhkude suhtele. Diagrammil turbiinseadme kasuteguri kõver $\eta_i = 0$ jagab diagrammi pindala kaheks osaks. Paremal pool $\eta_i = 0$-joont asub pindala, mis määrab kompressori ja gaasiturbiini suhteliste kasutegurite väärtused, millede puhul on turbiinseadme kasutegur positiivne, s. o. turbiinseade on võimeline arendama kasulikku tööd. Vasakul $\eta_i = 0$-joont asub väli, kus η_i omab negatiivse väärtuse.



Joon. 158.

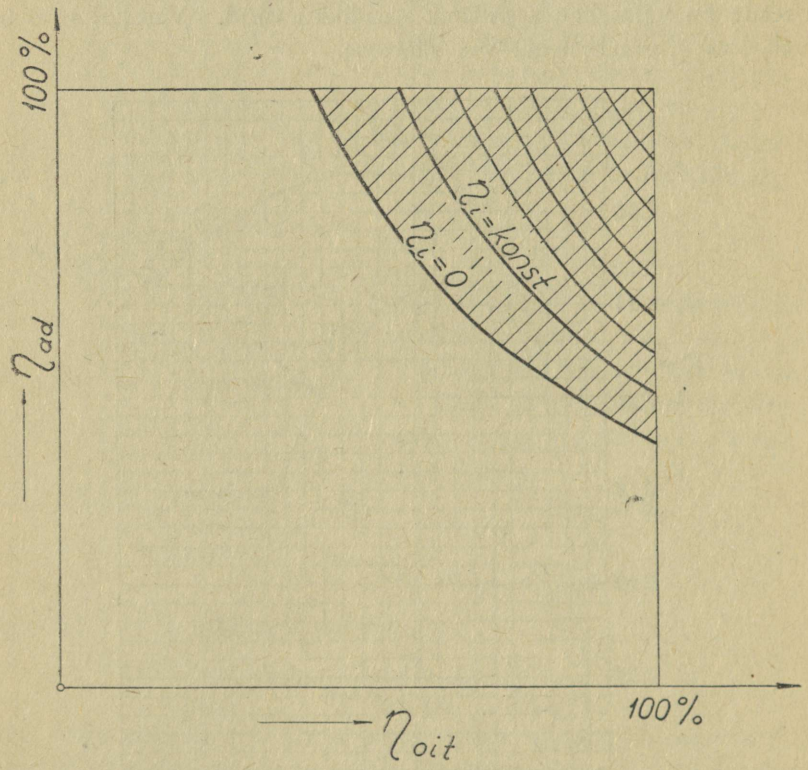
Diagrammilt nähtub, et turbiinseadme kasutegur on märksa rohkem mõjutatud gaasiturbiini kasutegurist η_{oit} kui kompressori omast.

Eespoolesitatud kasutegurivõrrandites ei ole arvestatud kompressori, gaasitorustiku ja gaasiturbiini mehhaanilist ning põlemiskambri kasutegurit. Nende kasutegurite suhtes võib oletada, et nende suurimad väärtused on: turbiini ja kompressori mehhaaniline kasutegur

$$\eta_{mc} = \eta_{mt} = \sim 0{,}98,$$

põlemiskambri-kasutegur iga üksiku kambri kohta 0,98 ja rõhulangus torustikus 7%.

Näide. Arvutada ideaalse gaasiturbiinseadme termiline kasutegur, õhu ja soojuse erikulu, kui välisõhu parameetrid on $p_a = 1$ ata, $t_a = 15°$ C ja komprimeeritud õhu rõhk $p_c = 4$ ata ning gaasi temperatuur peale põlemiskambrit $t_z = 650°$ C.



Joon. 158-a.

Lahendus. Esiteks määrame õhu temperatuuri t_c kompressorist väljumisel, kasutades selleks adiabaadivõrrandit

$$\frac{T_c}{T_a} = \left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

$$T_c = T_a\left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \cdot 4^{0{,}286} = 288 \cdot 1{,}4866 = 428° \text{ K},$$

$$t_c = 155° \text{ C}.$$

Ideaalse kompressori tarbitud töö on

$$AL_{oc} = i_c - i_a = \frac{1}{\mu} C_{pm}(t_c - t_a) =$$

$$= \frac{1}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{15+155}{1000}\right)(155-15) =$$

$$= \frac{980{,}39}{28{,}96} = 33{,}9\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$ [32]

Turbiini sooritatud töö leidmiseks määrame õhu temperatuuri T_b adiabaatilise paisumise lõppolekus. Võrrandi (376) järgi

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{T_z}{T_c'}$$

$$T_b = T_a \cdot \frac{T_z}{T_c} = 288 \cdot \frac{923}{428} = 621^\circ\ \text{K},\ t_b = 348^\circ\ \text{C}.$$

Järelikult

$$AL_{ot} = i_z - i_b = \frac{1}{\mu} C_{pm}(t_z - t_b) =$$

$$= \frac{1}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{650+348}{1000}\right)(650-348) = 78{,}6\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Turbiinseadme kasulik töö on

$$AL_o = AL_{ot} - AL_{oc} = 78{,}6 - 33{,}9 = 44{,}7\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

ja energiatootetegur

$$\alpha = \frac{AL_o}{AL_{ot}} = \frac{44{,}7}{78{,}6} = 0{,}569.$$

Ringprotsessi juhitud soojushulk q_1 on

$$q_1 = i_z - i_c = \frac{1}{\mu} C_{pm}(t_z - t_c) =$$

$$= \frac{1}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{650+155}{1000}\right)(650-155) =$$

$$= \frac{3667{,}55}{28{,}96} = 126{,}4\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Seega ringprotsessi termiline kasutegur on

$$\eta_t = \frac{AL_o}{q_1} = \frac{44{,}7}{126{,}4} = 0{,}354.$$

---

[32] Õhu erisoojus on võetud „Tehniline termodünaamika I", lk. 88.

Õhu kulu ühe hobujõud-tunni kohta leiame võrrandiga (351), s. o.

$$d = \frac{632{,}3}{AL_o} = \frac{632{,}3}{44{,}7} = 14{,}14 \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$

ja soojuse kulu

$$W = \frac{632{,}3}{\eta_t} = \frac{632{,}3}{0{,}354} = 1786 \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}.$$

Näide. Arvutada eelmine näide, kui kompressori $\eta_{ad} = 0{,}84$ ja turbiini suhteline sisemine kasutegur $\eta_{oit} = 0{,}9$.

Lahendus. Sel puhul kompressori tarbitud töö on

$$AL_c = \frac{AL_{oc}}{\eta_{ad}} = \frac{33{,}9}{0{,}84} = 40{,}3 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

ja turbiini sooritatud töö

$$AL_t = AL_{ot} \cdot \eta_{oit} = 78{,}6 \cdot 0{,}9 = 70{,}7 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Järelikult turbiinseadme kasulik töö on

$$AL = AL_t - AL_c = 70{,}7 - 40{,}3 = 30{,}4 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

ja energiatootetegur

$$\alpha = \frac{30{,}4}{70{,}7} = 0{,}43.$$

Õhu kulu ühe hobujõud-tunni kohta avaldub

$$d = \frac{632{,}3}{AL} = \frac{632{,}3}{30{,}4} = 20{,}8 \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}}.$$

Õhu temperatuuri kompressorist väljumisel arvutame võrrandiga (372):

$$t_d = \frac{t_c - t_a(1 - \eta_{ad})}{\eta_{ad}} = \frac{155 - 15\,(1 - 0{,}84)}{0{,}84} = 182^\circ\,\text{C}.$$

Teades temperatuuri t_d, on arvutatav protsessi juhitud soojushulk q_1', s. o.

$$q_1' = \frac{1}{\mu} C_{pm}(t_z - t_d) =$$

$$= \frac{1}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{650 + 182}{1000}\right) \cdot (650 - 182) =$$

$$= \frac{3475{,}59}{28{,}96} = 120 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Järelikult turbiinseadme sisemine kasutegur on

$$\eta_i = \frac{AL}{q_1'} = \frac{30{,}4}{120} = 0{,}25.$$

Turbiinseadme sisemine suhteline kasutegur η_{oi} on

$$\eta_{oi} = \frac{AL}{AL_o} = \frac{30{,}4}{44{,}7} = 0{,}680$$

ja kompressoris õhu sisehõõrdumisest tingitud temperatuuritegur

$$\Theta = \frac{T_z - T_c}{T_z - T_d} = \frac{t_z - t_c}{t_z - t_d} = \frac{650 - 155}{650 - 182} = 1{,}058.$$

Võrrandi (369) järgi turbiinseadme sisemine kasutegur on

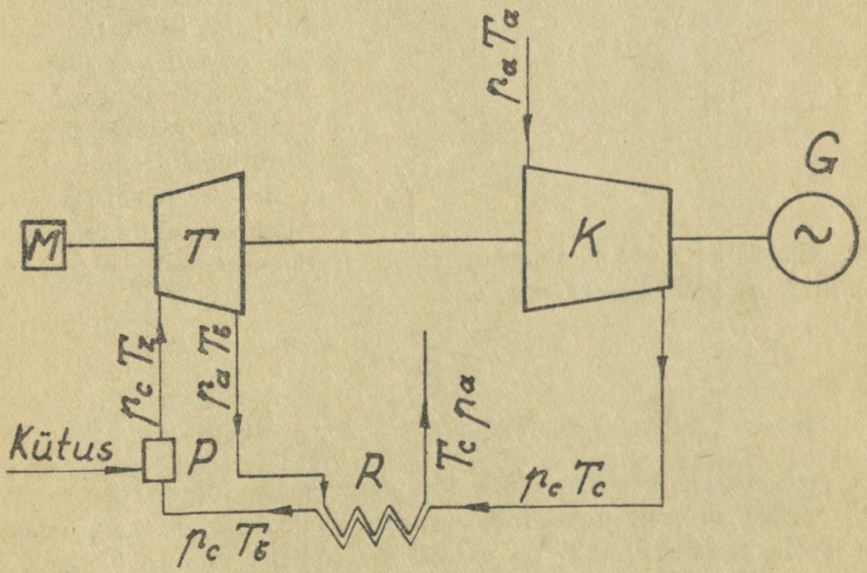
$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \Theta = 0{,}354 \cdot 0{,}68 \cdot 1{,}058 = 0{,}25.$$

Soojusekulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$W = \frac{632{,}3}{0{,}25} = 2500 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

59. REGENERATIIVNE RINGPROTSESS.

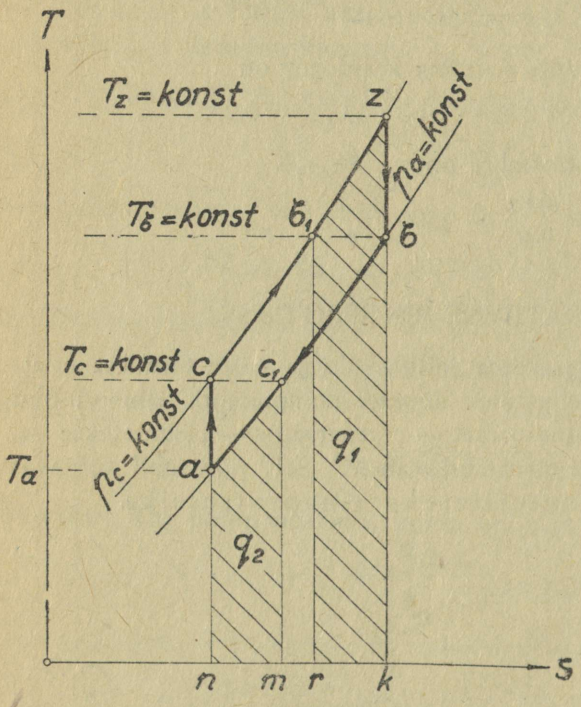
Et vähendada gaasiturbiinseadme kütusekulu ja tõsta termilist kasutegurit, kasutatakse turbiini heitgaaside soojust kompressorit läbinud õhu eelsoojendamiseks. Soojusvahetusaparaat — regeneraator — paigutatakse sel puhul õhukompressori ja põlemiskambri vahele. Sel printsiibil töötavat ringprotsessi nimetatakse regeneratiivseks ringprotsessiks.



Joon. 159.

Regeneratiivse turbiinseadme skeem on esitatud joonisel 159. Joonisel on märgitud: K — aksiaalvoolu kompressor, R — vastuvoolu regeneraator, P — põlemiskamber, T — gaasiturbiin, M — käivitusmootor, G — elektrigeneraator.

Joonisel 160 on esitatud T-s-diagrammil vastav tagastatav ringprotsess. Ringprotsessi tähistab kontuur *aczb*. Kasutades vastuvoolu regeneraatorit, on teoreetiliselt võimalik turbiini heitgaaside üldisest soojusest, mida tähistab pindala *nabk*, üle kanda kompressorit läbinud õhule pindalaga c_1bkm määratud soojushulka. Selles isobaarilises kadudeta soojuse ülekande protsessis tõuseb komprimeeritud õhu temperatuur temperatuurilt T_c kuni turbiinist väljuvate heitgaaside temperatuurini T_b, mis vastab komprimeeritud õhu isobaarilisele kuumendamisprotsessile cb_1, sest pindala c_1bkm, isobaaride cz ja ab ekvidistantsuse tõttu, on võrdne pindalaga cb_1rn. Järelikult regeneratiivse ringprotsessi puhul väheneb protsessi juhitav ja protsessist eemalejuhitav soojushulk. Nimelt q_1 avaldub pindalaga b_1zkr ja ringprotsessist eemalejuhitud soojushulk q_2 pindalaga ac_1mn, s. o.



Joon. 160.

$$q_1 = c_{pm}(T_z - T_b)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{379}$$

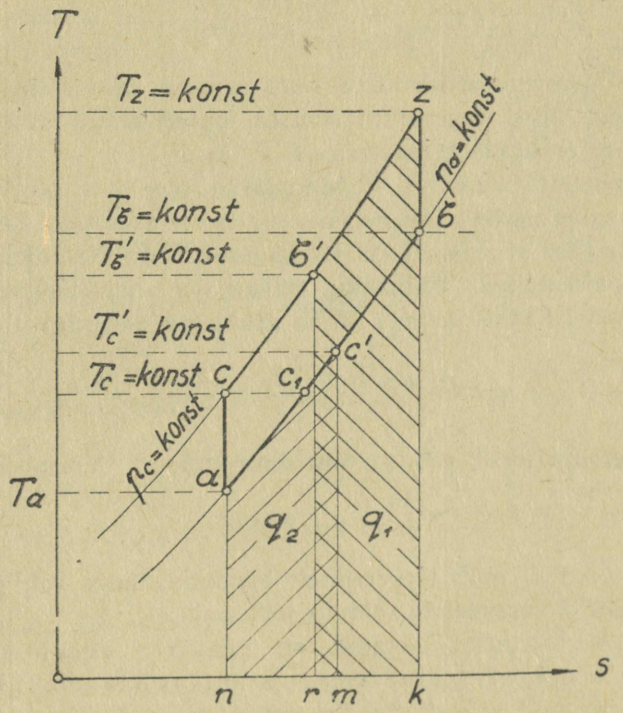
$$q_2 = c_{pm}(T_c - T_a)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{380}$$

Kui regeneraatoris kantakse õhule üle teoreetiliselt võimalikust soojushulgast (pindala c_1bkm, joon. 160) väiksem soojushulk, siis regeneraatorist väljuva õhu temperatuur T_b' on madalam turbiinist väljuva heitgaasi temperatuurist T_b. Samuti väljuvad sel puhul regeneraatorist heitgaasid tem-

peratuuril T_c', mis on kõrgem kompressorist väljuva õhu temperatuurist T_c (vt. joon. 161). Sel juhul ringprotsessi juhitud ja ringprotsessist eemalejuhitud soojushulgad, nagu nähtub jooniselt 161, avalduvad

$$q_1 = \text{pindala } b'zkr = c_{pm}(T_z - T_b'), \tag{380}$$

$$q_2 = \text{pindala } ac'mn = c_{pm}(T_c' - T_a). \tag{381}$$



Joon. 161.

Regeneraatoris heitgaasidelt õhule ülekandunud soojushulk q_R on

$$q_R = c_{pm}(T_b - T_c') = c_{pm}(T_b' - T_c)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{382}$$

Regeneratiivne ringprotsess on iseloomustatav nn. regeneratiivsusastmega. Regeneratiivsusastmeks nimetame regeneraatoris komprimeeritud õhule ülekantud soojushulga suhet turbiinist väljuvate heitgaaside üldise soojusesisaldusega. Märkides regeneratiivsusastme tähisega η_R', võime ta avaldada kujul

$$\eta_R' = \frac{c_{pm}(T_b' - T_c)}{c_{pm}(T_b - T_a)} \approx \frac{T_b' - T_c}{T_b - T_a} \tag{383}$$

või

$$\eta_R' = \frac{c_{pm}(T_b - T_c')}{c_{pm}(T_b - T_a)} \approx \frac{T_b - T_c'}{T_b - T_a}, \tag{383-a}$$

kus T_c' on regeneraatorist väljuva heitgaasi temperatuur. Maksimaalset väärtust omab η_R' siis, kui T_c' on võrdne kompressorist väljuva õhu temperatuuriga T_c, s. o.

$$(\eta_R')_{max} = \frac{c_{pm}(T_b - T_c)}{c_{pm}(T_b - T_a)}. \tag{383-b}$$

Mida suurem on regeneratiivsusaste, seda suurem on ka ringprotsessi termiline kasutegur. Kui regeneratiivsusaste η_R' on antud, saab võrranditega (383) ja (383-a) arvutada temperatuure T_c' ja T_b'.

Peale regeneratiivsusastme η_R' hinnatakse tegelikus olukorras komprimeeritud õhu regenereerimist nn. r e g e n e r a t i i v s u s e f e k t i g a. Regeneratiivsusefektiks nimetatakse regeneraatoris komprimeeritud õhule ülekantud soojushulga suhet teoreetiliselt võimaliku ülekantava soojushulgaga. Märkides regeneratiivsusefekti tähisega η_R, on ta avaldatav valemiga

$$\eta_R = \frac{c_{pm}(T_b' - T_c)}{c_{pm}(T_b - T_c)} \approx \frac{T_b' - T_c}{T_b - T_c}, \tag{384}$$

kus T_b' on regeneraatorist väljuva õhu temperatuur. Võrrandist nähtub, et kui $T_b' = T_b$, siis

$$\eta_R = 1 = 100\%.$$

Regeneratiivsusaste η_R' saab teoreetiliselt võrduda ühega vaid juhul, kui õhu komprimeerimine kompressoris toimub isotermiliselt.

Edaspidises käsitluses oletame, et r i n g p r o t s e s s i t e o s t a t a k s e t e o r e e t i l i s e l t m a k s i m a a l s e r e g e n e r a t i i v s u s a s t m e g a, s. o. r e g e n e r a t i i v s u s e f e k t i l $\eta_R = 100\%$. Sel puhul, nagu nähtub soojushulkade q_1 ja q_2 avaldistest, q_1 on võrdne turbiini sooritatud tööga ja q_2 on võrdne kompressori tarbitud tööga, s. o.

$$q_1 = c_{pm}(T_z - T_b) = AL_{ot}, \tag{385}$$

$$q_2 = c_{pm}(T_c - T_a) = AL_{oc}. \tag{386}$$

Sama on kehtiv ka tagastatamatus ringprotsessis.

Ringprotsessi termiline kasutegur avaldub seosega

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_{pm}(T_c - T_a)}{c_{pm}(T_z - T_b)} \tag{387}$$

või

$$\eta_t = \frac{AL_o}{AL_{ot}} = \frac{AL_{ot} - AL_{oc}}{AL_{ot}} = 1 - \frac{AL_{oc}}{AL_{ot}}. \tag{388}$$

Võrrandid (385) kuni (388) on kehtivad vaid $(\eta_R')_{max}$ puhul soojuskadudeta ringprotsessiks.

Tagastatamatu ringprotsessi puhul jäävad kehtima eelmises paragrahvis esitatud alused. Tagastatamatu regeneratiivne ringprotsess on esitatud joonisel 162 antud T-s-diagrammil. Diagrammilt nähtub, et ringprotsessi juhitud soojushulk on

$$q_1' = c_{pm}(T_z - T_D) \qquad (389)$$

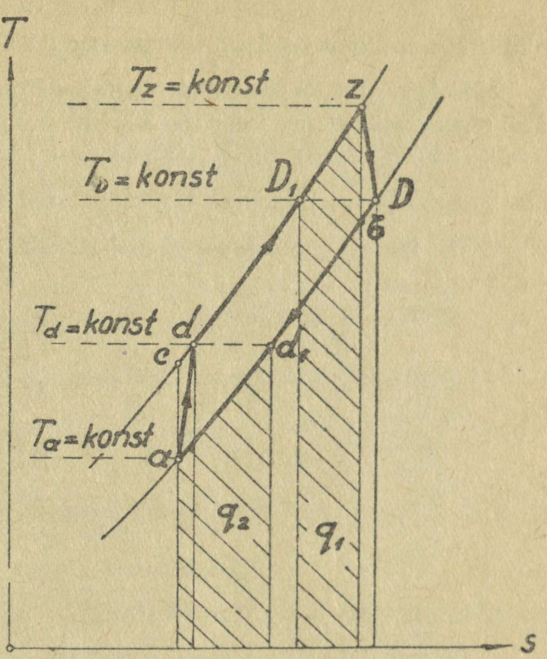
ja ringprotsessist eemalejuhitud soojushulk

$$q_2' = c_{pm}(T_d - T_a) . \qquad (390)$$

Temperatuurid T_D ja T_d on arvutatavad võrranditega (373) ja (371), s. o.

$$T_D = T_z - \eta_{oit}(T_z - T_b) ,$$

$$T_d = \frac{T_c - T_a(1 - \eta_{ad})}{\eta_{ad}} .$$



Joon. 162.

Turbiini sooritatud töö AL_t on

$$AL_t = \eta_{oit} \cdot AL_{ot} = c_{pm}(T_z - T_D) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \qquad (391)$$

ning kompressori tarbitud töö absoluutne väärtus

$$AL_c = \frac{AL_{oc}}{\eta_{ad}} = c_{pm}(T_d - T_a) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} . \qquad (392)$$

Turbiinseadme kasulik töö AL avaldub seosega

$$AL = AL_t - AL_c = q_1' - q_2' = c_{pm}(T_z - T_D) - c_{pm}(T_d - T_a)$$

ja turbiinseadme sisemine kasutegur seosega

$$\eta_i = \frac{q_1' - q_2'}{q_1'} = \frac{AL}{q_1'} = \frac{AL}{c_{pm}(T_z - T_D)} .$$

Arvesse võttes, et võrrandi (372-a) põhjal on

$$c_{pm}(T_z - T_D) = c_{pm}(T_z - T_b) \cdot \eta_{oit} ,$$

saame kasuteguri avaldada kujul

$$\eta_i = \frac{AL}{c_{pm}(T_z - T_b) \cdot \eta_{oit}}. \qquad (393)$$

Erikulu-võrrandid jäävad samasteks nagu eelmisel juhulgi.

Näide. Arvutada ringprotsessi näitarvud tagastatava ja tagastatamatu regeneratiivse protsessi jaoks, kui $p_a = 1$ ata, $t_a = 15°$ C, $p_c = 4$ ata, $t_b = 348°$ C, $t_z = 650°$ C, $\eta_{ad} = 0{,}84$ ja $\eta_{oit} = 0{,}9$.

Lahendus. Ülesanne on sama, mis § 58 esitatud ülesanne, seega

$t_c = 155°$ C, $AL_{ot} = 78{,}6 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$,

$t_d = 182°$ C, $AL_t = 70{,}7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$,

$\Theta = 1{,}058$, $AL_{oc} = 33{,}9 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$,

$\eta_{oi} = 0{,}68$, $AL_c = 40{,}3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$,

$AL = 30{,}4$.

Tagastatav ringprotsess.

Ringprotsessi juhitud soojushulk q_1 on

$$q_1 = \frac{1}{\mu} C_{pm}(t_z - t_b) =$$

$$= \frac{1}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{650+348}{1000}\right) \cdot (650 - 348) = 78{,}6 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Termiline kasutegur on

$$\eta_t = \frac{AL_{ot} - AL_{oc}}{q_1} = \frac{78{,}6 - 33{,}9}{78{,}6} = 0{,}569.$$

Regeneratiivsusaste võrrandi (383-b) järgi on

$$\eta'_R = \frac{c_{pm}(t_b - t_c)}{c_{pm}(t_b - t_a)} \approx \frac{t_b - t_c}{t_b - t_a} = \frac{348 - 155}{348 - 15} = 0{,}58.$$

Õhu erikulu ning energiatootetegur jäävad samasteks, nagu § 58 antud ülesandeski, s. o.

$$d = 14{,}14 \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$

$$\alpha = 0{,}569.$$

Soojuse esikulu on:

$$W = \frac{632{,}3}{0{,}569} = 1111{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}},$$

Tagastatamatu ringprotsess.

Turbiinseadme sisemine kasutegur on võrrandi (369) järgi

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \Theta = 0{,}569 \cdot 0{,}680 \cdot 1{,}058 = 0{,}41 .$$

Kontrolliks arvutame turbiinseadme sisemise kasuteguri võrrandiga (393), s. o.

$$\eta_i = \frac{AL}{\frac{1}{\mu} C_{pm}(T_z - T_b) \cdot \eta_{oit}} = \frac{30{,}4 \cdot 28{,}96}{\left(6{,}894 + 0{,}64 \frac{650 + 348}{1000}\right)(650 - 348) \cdot 0{,}9} = 0{,}43 .$$

Temperatuur t_D tagastatamatu adiabaatilise protsessi lõpul, s. o. gaasi temperatuur turbiinist väljumisel, on

$$t_D = t_z - \eta_{oit}(t_z - t_b) = 650 - 0{,}9 \cdot (650 - 348) = 378^\circ \text{ C}.$$

Teades temperatuuri t_D, on arvutatav ka regeneratiivsusaste, s. o.

$$\eta_R' = \frac{c_{pm}(t_D - t_d)}{c_{pm}(t_D - t_a)} \approx \frac{t_D - t_d}{t_D - t_a} = \frac{378 - 182}{378 - 15} = \frac{196}{363} = 0{,}54 .$$

Õhu erikulu on turbiinseadme sisemise hobujõud-tunni kohta sama kui § 58 esitatud teises ülesandes, s. o.

$$d = \frac{632{,}3}{AL} = \frac{632{,}3}{30{,}4} = 20{,}8 \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}} .$$

Soojusekulu turbiinseadme ühe sisemise hobujõud-tunni kohta on aga märksa väiksem, s. o.

$$W = \frac{632{,}3}{\eta_i} = \frac{632{,}3}{0{,}41} = 1542 \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}} .$$

Kui tarbitava vedelkütuse tehniline soojusväärtus on 10 000 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, siis oleks kütusekulu 154,2 grammi turbiinseadme sisemise hobujõud-tunni kohta.

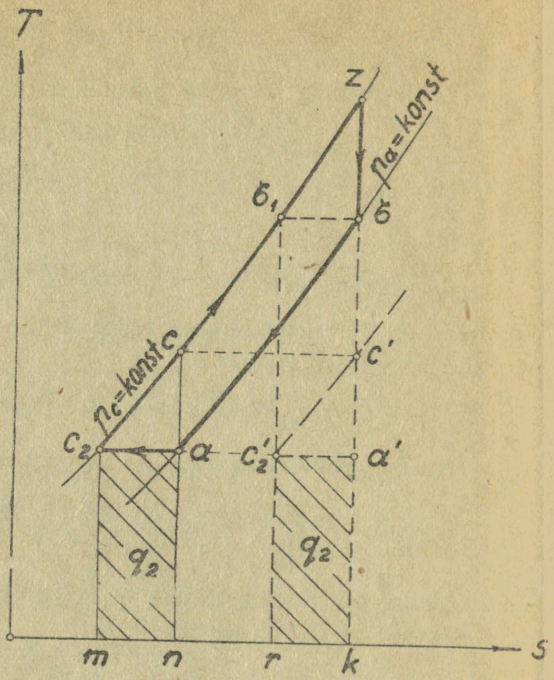
Toodust järgneb, et regeneratiivse menetlusega suureneb turbiinseadme sisemine kasutegur

$$\frac{0{,}41 - 0{,}25}{0{,}25} \cdot 100 = 64\,\% .$$

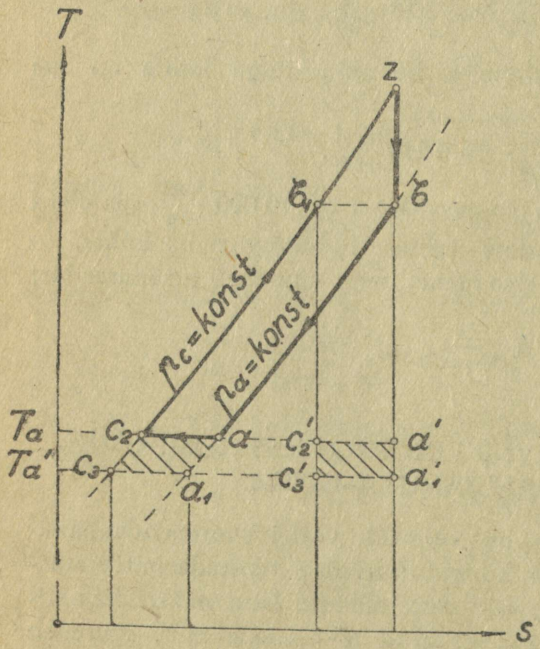
60. IDEAALNE REGENERATIIVNE RINGPROTSESS KOMPRIMEERITAVA ÕHU VAHEJAHUTAMISEGA.

Peale regeneratiivse menetluse on võimalik veelgi suurendada gaasiturbiinseadme kasutegurit, kui õhu komprimeerimine teostada mitte adiabaatiliselt, nagu eelmistel juhtudel, vaid isotermiliselt. Isotermilisel komprimeerimisel, nagu nähtub joonisel 163 esitatud *T-s*-diagrammilt, suureneb ringprotsessi kasulik pindala *aczb* kompressori poolt tarbitava töö arvel

pindala ac_2c võrra. Peale selle on võimalik ringprotsessi regeneratiivsusastet suurendada kuni 100%-ni, s. o. osutub teoreetiliselt võimalikuks kogu heitgaaside soojust (pindala *abkn*) üle kanda komprimeeritud õhule. Ringprotsessi termilise kasuteguri suurenemist saab näidata piltlikult, kui tegelik ringprotsess, mis on kujutatud kontuuriga ac_2zb, asendada temale ekvivalentse ringprotsessiga $a'c_2'b_1za'$, sest rööpküliku ac_2b_1b pindala on võrdne ristküliku $a'c_2'b_1b$ pindalaga. Selles fiktiivses ringprotsessis avaldub adiabaatilise komprimeerimise korral turbiinseadme kasulik töö pindalaga $c_2'b_1zc'c_2'$ ja isotermilise komprimeerimise korral pindalaga $a'c_2'b_1za'$.



Joon. 163.



Joon. 164.

Edasi selgub diagrammilt (joon. 164), et ühe ja sama rõhutõusu puhul välisõhu temperatuuri langemisel suureneb ringprotsessi kasulik pindala. Näiteks välisõhu temperatuuri langemisel temperatuurilt T_a kuni temperatuurini T_a' suureneb sama q_1 ja ψ puhul ringprotsessi kasulik pindala q_2 arvel pindala $ac_2c_3a_1$ võrra, millele fiktiivsel ringprotsessil vastab pindala $a'c_2'c_3'a_1'$. See asjaolu on tähtis lennuki gaasiturbiinseadmetele, sest kõrgusega esinev temperatuuri langus kom-

penseerib kõrgusega esinevat õhurõhu langusest tingitud turbiinseadme võimsuse vähenemist.

Ringprotsessi juhitud soojushulk q_1 regeneratiivsusastmel $\eta'_R = 1$ avaldub pindalaga rb_1zk (joon. 163), s. o.

$$q_1 = i_z - i_b = c_{pm}(T_z - T_b)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ringprotsessist eemalejuhitud soojus q_2 avaldub pindalaga c_2anm = pindala $c_2a'kr$ ja on võrdne kompressoris tarbitud tööga, mille absoluutne väärtus on

$$q_2 = ART_a \ln \frac{p_c}{p_a} = AL_{oc}\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \tag{394}$$

Gaasiturbiini sooritatud töö AL_{ot} ja turbiinseadme kasulik töö AL_o on

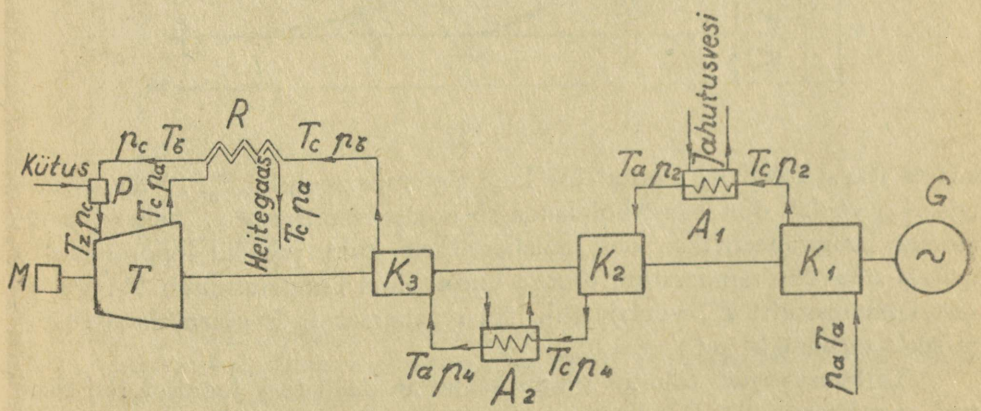
$$AL_{ot} = q_1 = c_{pm}(T_z - T_b)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}},$$

$$AL_o = q_1 - q_2 = AL_{ot} - AL_{oc} = c_{pm}(T_z - T_b) - ART_a \ln \frac{p_c}{p_a}.$$

Ringprotsessi termiline kasutegur avaldub

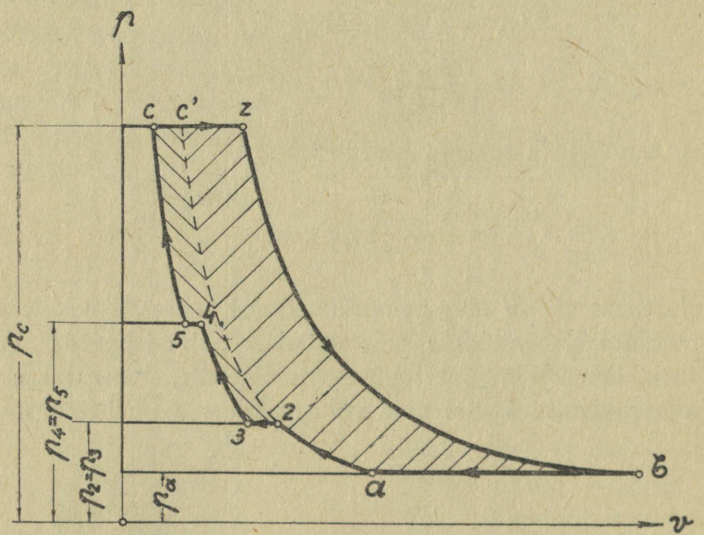
$$\eta_t = \frac{AL_o}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{ART_a \ln \frac{p_c}{p_a}}{c_{pm}(T_z - T_b)}. \tag{395}$$

Tegelikus olukorras ei saa õhu komprimeerimist teostada isotermiliselt, sest eriti aksiaalvooluga kompressoris pole võimalik õhku jahutada. Et komprimeerimist siiski lähendada isotermilisele protsessile, kasutatakse tegelikus olukorras komprimeeritava õhu ühe- või mitmekordset vahejahutust. Selleks



Joon. 165.

teostatakse õhu komprimeerimist astmeliselt kahes või mitmes kompressoris, kusjuures igast kompressorist, peale viimase, väljuv komprimeeritud õhk jahutatakse isobaariliselt kuni algtemperatuurini T_a. Joonisel 165 on esitatud komprimeeritava õhu kaheastmeline vahejahutamine. Selleks on turbiinseade varustatud turbiiniga koos samale võllile monteeritud kolme õhukompressoriga, mis skeemil on märgitud tähistega K_1, K_2 ja K_3. Välisõhk imetakse esimesse kompressorisse K_1, kus ta adiabaatiliselt komprimeeritakse kuni rõhuni p_2. Kompressorist voolab komprimeeritud õhk edasi veega töötavasse jahutajasse A_1, kus õhk jääval rõhul p_2 jahutatakse temperatuurilt T_c kuni temperatuurini T_a. Jahutajast A_1 juhitakse õhk teise kompressorisse K_2. Kompressoris K_2 komprimeeritakse õhk adiabaatiliselt rõhult p_2 kuni rõhuni p_4, millega õhk saavutab uuesti temperatuuri T_c (vt. joon. 167). Neil parameetritel voolab õhk edasi teise jahutajasse A_2,



Joon. 166.

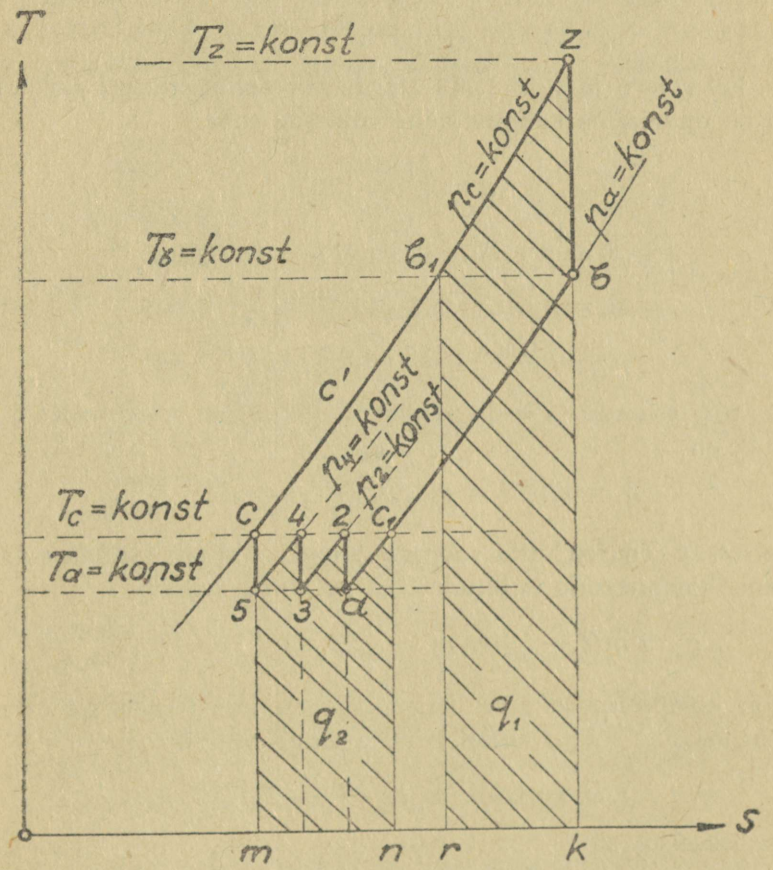
kus ta jääval rõhul p_4 jahutatakse kuni algtemperatuurini T_a. Läbinud jahutaja A_2, voolab õhk edasi kolmandasse kompressorisse K_3. Selles kompressoris komprimeeritakse õhk adiabaatiliselt kuni vajaliku lõpprõhuni p_c, millega ühes õhu temperatuur tõuseb uuesti kuni temperatuurini T_c. Viimasest kompressorist K_3 voolab õhk läbi regeneraatori R põlemiskambrisse P ja sealt turbiini T jne.

Turbiinseadmes toimuv ringprotsess on näidatud joonisel 166 esitatud p-v-diagrammil. Sama ringprotsess T-s-diagrammi kaudu on antud joonisel 167. Joonistel tähistab isobaarilõik *2 3* esimesest kompressorist

väljuva õhu jahutamist temperatuurilt T_c kuni algtemperatuurini T_a, s. o. välisõhu temperatuurini. Isobaarilõik *45* vastab teisest kompressorist väljuva õhu jahutamisele temperatuurilt T_c kuni algtemperatuurini T_a.

Rõhkude optimaalsed suhted üksikutes kompressorites määratakse tingimusest, et kompressorites tarbitav töö ja ühes sellega temperatuuritõus oleksid võrdsed. Need tingimused täituvad, kui rõhkude suhe on

$$x = \sqrt[m]{\frac{p_c}{p_a}} = \sqrt[m]{\psi}\,, \qquad (396)^{33}$$



Joon. 167.

[33] Vt. J. Ivand, „Tehniline termodünaamika I", § 101.
Seos (396) on ka tuletatav vahetult kompressori minimaalse töö või turbiini maksimaalse töö tingimusest, s. o. seosest

$$-\frac{\partial L_{oc}}{\partial p_x} = 0 \quad \text{või} \quad \frac{\partial L_{ot}}{\partial p_x} = 0.$$

kus m on kompressori surveastmete või antud juhul kompressorite arv, p_c — komprimeeritud õhu rõhk õhu väljumisel viimasest kompressorist ja p_a — välisõhu rõhk. Selle seose põhjal

$$p_2 = p_a x,$$
$$p_4 = p_a x^2,$$
$$p_6 = p_a x^3,$$
$$\ldots\ldots$$
$$p_c = p_a x^m.$$

Näiteks, kui $\psi = 6$ ja $p_a = 1{,}033$ ata, siis komprimeerimisel kolmes kompressoris on optimaalne kompressorite rõhkude suhe

$$x = \sqrt[3]{6} = 1{,}817.$$

Järelikult

$$p_2 = p_a x = 1{,}033 \cdot 1{,}817 = 1{,}877 \text{ ata},$$
$$p_4 = p_a x^2 = 1{,}033 \cdot 1{,}817^2 = 3{,}411 \text{ ata},$$
$$p_c = p_a x^3 = 1{,}033 \cdot 1{,}817^3 = 6{,}198 \text{ ata}.$$

Joonisel 167 esitatud T-s-diagrammilt nähtub, et ringprotsessi juhitud soojushulk on

$$q_1 = i_z - i_b = c_{pm}(T_z - T_b) = AL_{ot} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ringprotsessist eemalejuhitud soojus q_2, mida tähistab pindala $m5432ac_1n$, on üksikus kompressoris tarbitud tööst m korda suurem, s. o.

$$q_2 = m(i_c - i_a) = m \cdot c_{pm}(T_c - T_a) = AL_{oc} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \qquad (397)$$

kus m on kompressorite arv. Regeneraatoris komprimeeritud õhule ülekantud heitgaaside soojus antud juhul avaldub võrrandiga

$$q_R = i_b - i_c = c_{pm}(T_b - T_c) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

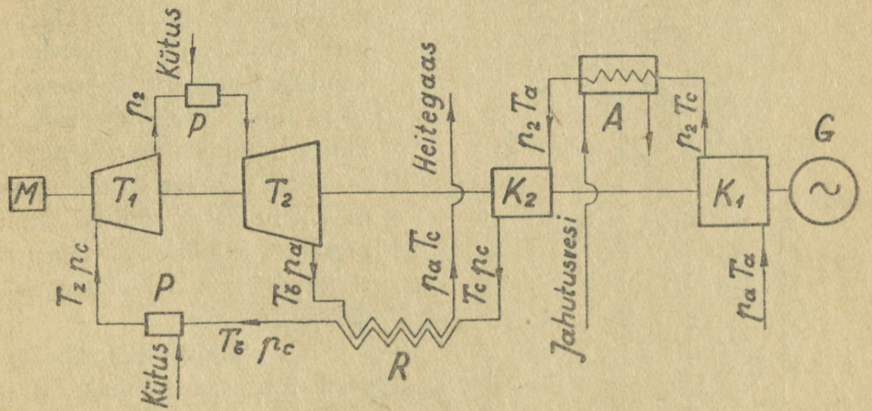
Regeneratiivsusaste on

$$\eta_R = \frac{i_b - i_c}{i_b - i_a} = \frac{c_{pm}(T_b - T_c)}{c_{pm}(T_b - T_a)}.$$

Toodust on selge, et kompressorite arvu suurendamisega on võimalik protsessi lähendada isotermilisele komprimeerimisele, kuid puht-tehnilistest ja majanduslikest põhjustest tingituna pole see õigustatud.

61. IDEAALNE REGENERATIIVNE RINGPROTSESS ÕHU ASTMELISE VAHEJAHUTAMISEGA JA SOOJUSE ASTMELISE PROTSESSI JUHTIMISEGA.

Peale õhu astmelise vahejahutuse on võimalik tõsta turbiinseadme termilist kasutegurit, juhtides soojust protsessi astmeliselt, s. o. andes gaasile isobaarilisi vahekuumendusi. Sel puhul on turbiinide arv võrdne soojuse protsessi juhtimise astmete arvuga. Soojuse protsessi juhtimine toimub vastavas põlemiskambris enne iga turbiini eelmisest turbiinist väljuva paisunud gaasi rõhul. Joonisel 168 on näidatud turbiinseade komprimeeritava õhu ühe vahejahutusega ja soojuse kaheastmelise protsessi juhtimisega.

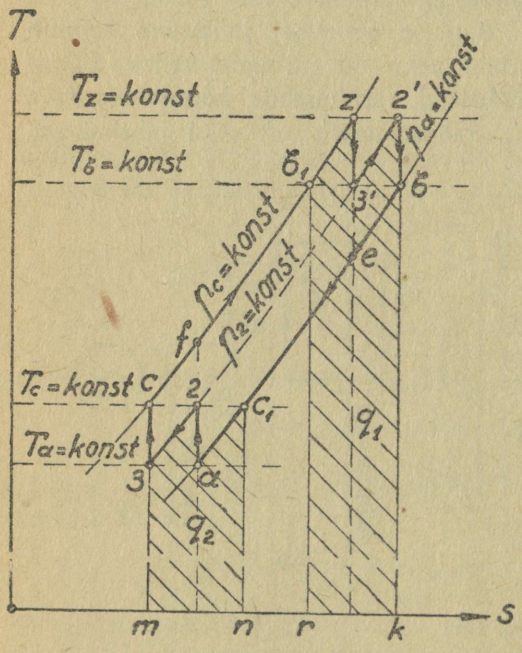


Joon. 168.

Kompressorist K_2 väljuv komprimeeritud õhk, läbides regeneraatori R, voolab esimesse põlemiskambrisse P ja sealt esimesse turbiini T_1. Turbiinist T_1 väljuv paisunud gaas juhitakse teise põlemiskambrisse P, kus teostub teine täiendav isobaariline põlemine esimeses põlemiskambris põlemata jäänud hapniku arvel. Sellest põlemiskambrist voolab gaas edasi teise madalrõhuturbiini ja sealt pärast adiabaatilist paisumist läbi regeneraatori R atmosfääri.

Soojuse astmelise protsessi juhtimisega peale termilise kasuteguri suurenemise väheneb õhu erikulu turbiinseadme võimsuse ühikule, millega vähenevad ka turbiinseadme gabariitmõõtmed. Soojuse astmeline protsessi juhtimine on tähtis veel selle poolest, et üksikutes turbiinides on gaasi temperatuuri langused väiksemad, mis on eriti oluline turbiinide konstruktsiooni seisukohast.

Ringprotsess T-s-diagrammil on näidatud joonisel 169 ja p-v-diagrammil joonisel 170. Soojuse protsessi juhtimist esimeses põlemiskambris tähistab isobaarilõik b_1z. Punktist z kuni punktini $3'$ toimub gaasi adiabaatiline paisumine esimeses turbiinis T_1. Sellele järgneb turbiinist väljunud gaaside isobaariline paisumine, s. o. soojuse protsessi juhtimine teises põlemiskambris, mida tähistab isobaarilõik $3'2'$. Selles protsessis tõuseb gaasi temperatuur uuesti temperatuurilt T_b kuni temperatuurini T_z. Punktist $2'$ kuni punktini b toimub gaasi adiabaatiline paisumine teises turbiinis, s. o. madalrõhuturbiinis T_2. Sellest turbiinist väljuvad heitgaasid juhitakse läbi regeneraatori atmosfääri. Regeneraatoris kandub heitgaasidelt komprimeeritud õhule üle soojushulk, mida tähistab pindala bc_1nk (joon. 169).



Joon. 169.

Nii T-s- kui ka p-v-diagrammilt nähtub, et soojuse astmelise protsessi juhtimisega ringprotsessi kasulik pindala suureneb pindala $3'2'be$ võrra.

Et soojuse astmeline protsessi juhtimine annaks suurima efekti, valitakse adiabaatilise paisumise lõpprõhud turbiinides sääraselt, et turbiinides sooritatav töö oleks võrdne. Samuti peab olema võrdne kõikidesse turbiinidesse juhitava gaasi temperatuur. Sel puhul on võrdsed ka turbiinidest väljuva paisunud gaasi temperatuurid.

Eespooltoodud tingimused täituvad, kui turbiinides gaasi paisumisaste x valida, nagu komprimeerimise puhulgi, võrrandiga

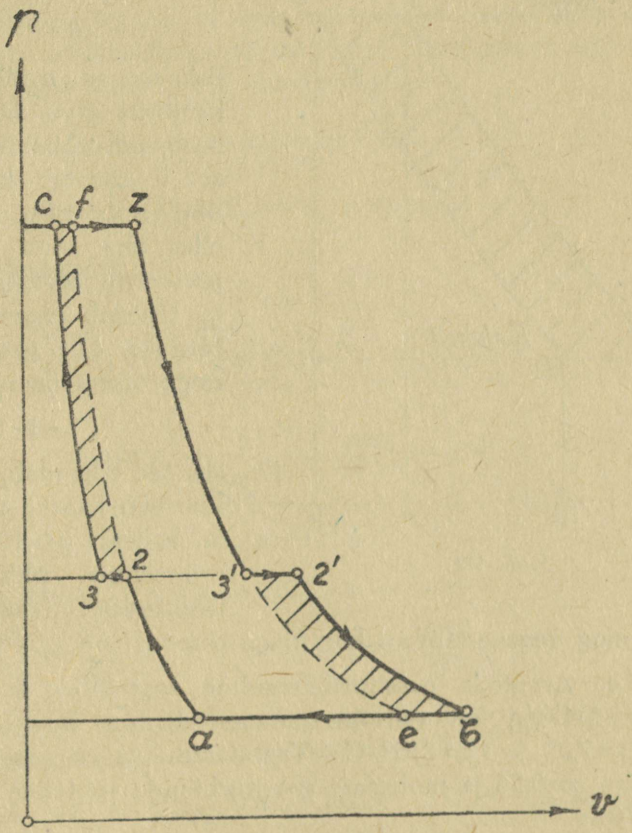
$$x = \sqrt[m]{\frac{p_c}{p_a}},$$

kus m on turbiinide arv, p_c — komprimeeritud gaasi rõhk, s. o. gaasi rõhk enne esimest turbiini, ja p_a esimesse kompressorisse voolava õhu rõhk. Toodust järgneb, et soojuse protsessi juhtimise isobaarid on samad komprimeeritava õhu jahutamise isobaaridega, kui jahutusastmete arv on võrdne soojuse protsessi juhtimise astmete arvuga.

T-s-diagrammilt (joon. 169) nähtub, et ringprotsessi juhitud soojushulk q_1 on võrdne turbiinide sooritatud summaarse tööga, s. o.

$$q_1 = AL_{ot} = m \cdot c_{pm}(T_z - T_b) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}. \qquad (398)$$

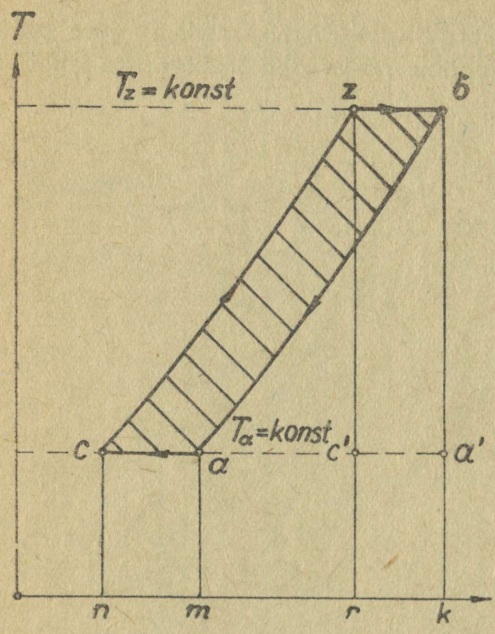
Samuti selgub jooniselt 169, et regeneratiivses ringprotsessis soojuse protsessi juhtimise astmete arvu ja komprimeeritava õhu isobaariliste jahutus-



Joon. 170.

astmete arvu suurendamisega ringprotsessi termiline kasutegur läheneb Carnot' ringprotsessi kasutegurile. Kui aga eespooltähendatud astmete arvu suurendada lõpmatuseni, muutub ringprotsessi termiline kasutegur võrdseks Carnot' ringprotsessi kasuteguriga, nagu nähtub joonisel 171 esitatud T-s-diagrammist. Nimelt, soojuse protsessi juhtimise astmete arvu ja komprimeeritava õhu jahutusastmete arvu lõpmatul suurendamisel muutub soojuse protsessi juhtimise joon zb isotermiks $T_z = T_b = konst$ ja õhu kompri-

meerimisprotsessi joon *ac* isotermiks $T_a = T_c = konst.$ Sel puhul ringprotsessi pindala *aczb* on võrdne temale ekvivalentse Carnot' ringprotsessi pindalaga *a'c'zb*.



Joon. 171.

Et lihtsustada gaasiturbiinseadme ringprotsessi iseloomustust, märgitakse see kujul

$$a - b - \eta_R .$$

Esimene arv *a* tähistab põlemiskambrite arvu, mis on alati võrdne gaasiturbiinide arvuga, teine arv *b* tähistab komprimeeritava õhu isobaarilisi jahutusastmeid, olles ühe võrra väiksem kompressorite arvust, ja kolmas arv η_R tähistab regeneratiivsusefekti. Näiteks, kui gaasiturbiinseadme ringprotsess on märgitud

$$2 - 1 - 0{,}75,$$

siis see tähendab, et turbiinseade koosneb kahest põlemiskambrist, ja kahest gaasiturbiinist, komprimeeritav õhk omab ühte jahutusastet (kaks komprimeerimisastet) ning regeneratiivsusefekt ringprotsessis on $\eta_R = 0{,}75$.

Näide. Arvutada gaasiturbiinseadme tagastatav ja tagastatamatu ringprotsess $2\text{-}1\text{-}\eta_R'$, kui välisõhu parameetrid on $p_a = 1$ ata, $t_a = 15°$ C, rõhutõus $\psi = 7{,}02$ ja $t_z = 816°$ C. Tagastatamatus protsessis võtta üksiku kompressori $\eta_{ad} = 0{,}86$ ja mõlemate gaasiturbiinide suhteline sisemine kasutegur $\eta_{oit} = 0{,}89$.

Lahendus. Tagastatava ringprotsessi skeem ühtib joonistel 169 ja 170 esitatuga. Antud juhul optimaalse kompressorite rõhkude suhte arvutame võrrandiga

$$x = \sqrt{\frac{p_c}{p_a}} = \sqrt{\frac{7}{1}} = 2{,}65 \text{ ata.}$$

Järelikult

$$p_2 = 1 \cdot 2{,}65 = 2{,}65 \text{ ata,}$$

$$p_c = 1 \cdot x^2 = 2{,}65^2 = 7{,}02 \text{ ata.}$$

Õhu temperatuur ($T_c = T_2$) kompressorist väljumisel on

$$T_c = T_a \left(\frac{p_2}{p_a}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 288 \cdot (2,65)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 288 \cdot 1,3214 = 381^\circ \text{ K}$$

ehk

$$t_c = t_2 = 108^\circ \text{ C}.$$

Eespooltoodust järgneb, et esimeses turbiinis tuleb lasta gaasi rõhult $p_c = p_z = 7,02$ ata adiabaatiliselt paisuda kuni kompressori esimeses astmes komprimeeritud õhu rõhuni, s. o. kuni rõhuni

$$p_2 = p_{3'} = 2,65 \text{ ata}.$$

Temperatuuri

$$T_b = T_{3'} = T_{b_1} = konst$$

leiame adiabaadivõrrandiga

$$T_b = T_z \left(\frac{p_2}{p_c}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_z \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_c}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}} =$$

$$= 1089 \cdot \frac{1}{(2,65)^{0,286}} = \frac{1089}{1,3214} = 824^\circ \text{ K}$$

ehk

$$t_b = 551^\circ \text{ C}.$$

Sama tulemuse annab ka võrrand (376), s. o.

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{T_z}{T_c}; \quad T_b = T_a \cdot \frac{T_z}{T_c} = 288 \cdot \frac{1089}{381} = 824^\circ \text{ K}.$$

Ringprotsessi juhitud soojushulk, mis antud juhul on võrdne gaasiturbiinide sooritatud tööga, avaldub absoluutse väärtuse järgi:

$$q_1 = 2 \cdot AL_{ot} = 2 \cdot c_{pm}(t_z - t_b) = 2 \cdot \frac{1}{\mu} \cdot C_{pm}(t_z - t_b) =$$

$$= \frac{2}{28,96}\left(6,894 + 0,64\,\frac{816+551}{1000}\right)(816 - 551) = 142\,\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ringprotsessist eemalejuhitud soojushulk, mis antud juhul on võrdne kompressorite tarbitud tööga, avaldub

$$q_2 = 2AL_{oc} = 2 \cdot c_{pm}(t_c - t_a) = \frac{2}{\mu} C_{pm}(t_c - t_a) =$$

$$= \frac{2}{28,96}\left(6,894 + 0,64\,\frac{108+15}{1000}\right)(108 - 15) = 45\,\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Turbiinseadme kasulik töö on

$$AL_o = q_1 - q_2 = 2\,(AL_{ot} - AL_{oc}) = 142 - 45 = 97 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Järelikult ringprotsessi termiline kasutegur on

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{2\,(AL_{ot} - AL_{oc})}{2\,AL_{ot}} = \frac{97}{142} = 0{,}683.$$

Õhu ja soojuse erikulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$d = \frac{632{,}3}{AL_o} = \frac{632{,}3}{97} = 6{,}5 \ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$

$$W = \frac{632{,}3}{\eta_t} = \frac{632{,}3}{0{,}687} = 926 \ \frac{\text{kcal}}{\text{HJh}}.$$

Tagastatamatu ringprotsess.

Tagastatamatu ringprotsess on antud joonisel 172 esitatud T-s-diagrammil. Esiteks määrame komprimeeritud õhu temperatuuri T_d ja turbiinidest väljuva gaasi temperatuuri T_D. Võrrandi (372) ja (373) järgi

$$t_d = \frac{t_c - t_a\,(1 - \eta_{ad})}{\eta_{ad}} = \frac{108 - 15\ (1 - 0{,}86)}{0{,}86} = 128^\circ\ \text{C},$$

$$T_d = 401^\circ\ \text{K},$$

$$t_D = t_z - \eta_{oit}\,(t_z - t_b) = 816 - 0{,}89\ (816 - 551) = 580^\circ\ \text{C},$$

$$T_D = 853^\circ\ \text{K}.$$

Ringprotsessi juhitud soojushulk on võrdne turbiinide sooritatud summaarse tööga, s. o.

$$q_1 = 2 \cdot AL_t = 2\,\frac{1}{\mu}\,C_{pm}\,(t_z - t_D) =$$

$$= \frac{2}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{816 + 580}{1000}\right)(816 - 580) = 127 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Ringprotsessist eemalejuhitud soojushulk on antud juhul võrdne kompressoriastmetes tarbitud summaarse tööga, s. o.

$$q_2 = 2 \cdot AL_c = 2\,\frac{1}{\mu}\,C_{pm}\,(t_d - t_a) =$$

$$= \frac{2}{28{,}96}\left(6{,}894 + 0{,}64\,\frac{128 + 15}{1000}\right)(128 - 15) = 54{,}5 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Turbiinseadme sooritatud sisemine kasulik töö on

$$AL = q_1 - q_2 = 2\ (AL_t - AL_c) = 127 - 54{,}5 = 72{,}5$$

ja sisemine kasutegur

$$\eta_i = \frac{AL}{q_1} = \frac{72{,}5}{127} = 0{,}57.$$

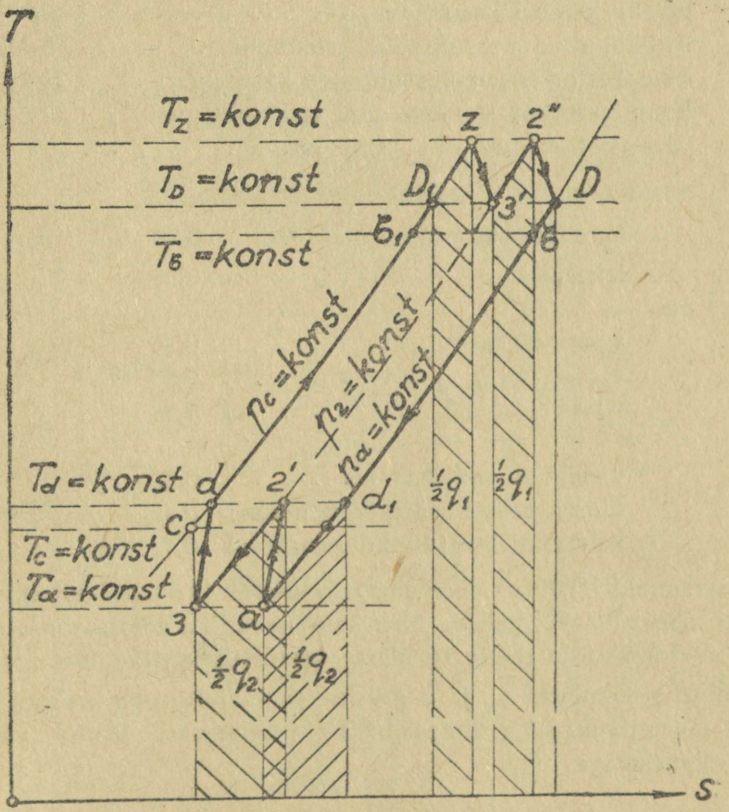
Sisemine suhteline kasutegur on

$$\eta_{oi} = \frac{AL}{AL_0} = \frac{72{,}5}{97} = 0{,}75.$$

Õhu ja soojuse erikulu ühe hobujõud-tunni kohta on

$$d = \frac{632{,}3}{AL} = \frac{632{,}3}{72{,}5} = 8{,}72\ \frac{\text{kg}}{\text{HJh}},$$

$$W = \frac{632{,}3}{\eta_i} = \frac{632{,}3}{0{,}57} = 1109\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$



Joon. 172.

Ringprotsessi regeneratiivsusaste on

$$\eta'_R = \frac{c_{pm}(t_D - t_d)}{c_{pm}(t_D - t_a)} \approx \frac{t_D - t_d}{t_D - t_a} = \frac{580 - 128}{580 - 15} = \frac{452}{565} = 0{,}80.$$

Tegelikult nii ringprotsessi regeneratiivsusaste η'_R kui ka turbiinseadme sisemine kasutegur η_i on märksa väiksemad, sest arvutustes pole arvestatud kadudega jahutajas, regeneraatoris, põlemiskambrites ja torustikus.

Alljärgnevatel diagrammidel 173 ja 174 on esitatud gaasiturbiinseadme $2 - 1 - \eta_R$ efektiivse kasuteguri η_e, õhukulu d ja energiatooteteguri α muutused vastavalt rõhutõusule $\psi = \frac{p_c}{p_a}$ ja gaasi temperatuurile t_z turbiini eel[34].

Arvutustes on võetud:

turbiini ja kompressori mehhaaniline kasutegur .	0,98,
põlemiskambri kasutegur	0,98,
turbiini sisemine suhteline kasutegur	0,908,
kompressori sisemine suhteline kasutegur . . .	0,847,
kompressorisse voolava õhu temperatuur . .	21° C,
jahutajast väljuva õhu temperatuur	32° C.

Kiirgus ja aerodünaamilised takistuskaod kcal/kg:

igas üksikus põlemiskambris .	0,30	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$,
jahutajas	0,204	„
regeneraatoris:		
$\eta_R = 0{,}50$ puhul	0,305	„
$\eta_R = 0{,}75$ „	0,61	„
$\eta_R = 0{,}90$ „	1,53	„
torustikus:		
vahekuumenduseta	0,33	„
üheastmelisel vahekuumendusel	0,44	„
kaheastmelisel vahekuumendusel	0,555	„

Diagrammidelt nähtub, et regeneratiivsusefekti suurendamisega optimaalne rõhkude suhe väheneb, millega ühes suurenevad ka energiatootetegur ja õhu erikulu, mis omakorda tingib turbiinagregaadi dimensioonide suurenemise.

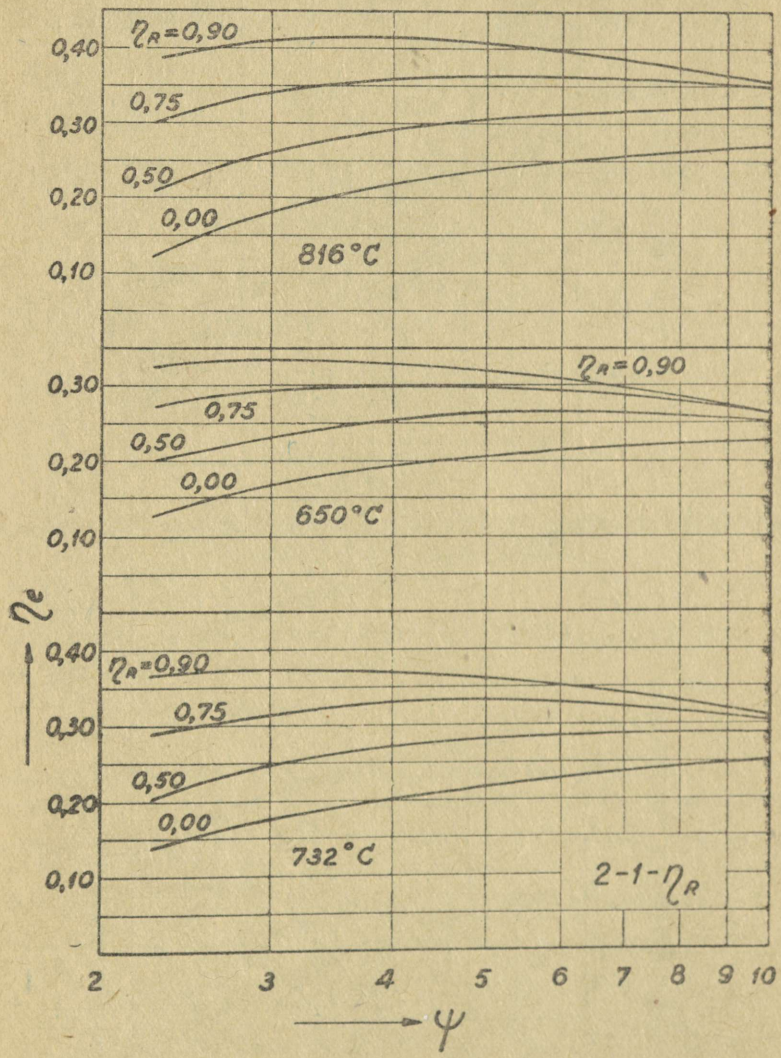
Samuti suurenevad η_R ja α gaaside temperatuuriga turbiini ees, millega väheneb õhu erikulu ning ühtlasi ka turbiinagregaat. Samuti väheneb õhu erikulu rõhutõusuga.

---

[34] Väljavõte raamatust: Г. Сойер, «Газовые турбины», Машгиз 1947.

Diagrammil 175 on esitatud gaasiturbiinseadme kasuteguri sõltuvus ringprotsessist vastavalt rõhutõusule gaasi kahel turbiinieelsel temperatuuril $t_z = 650°$ C ja $t_z = 816°$ C.

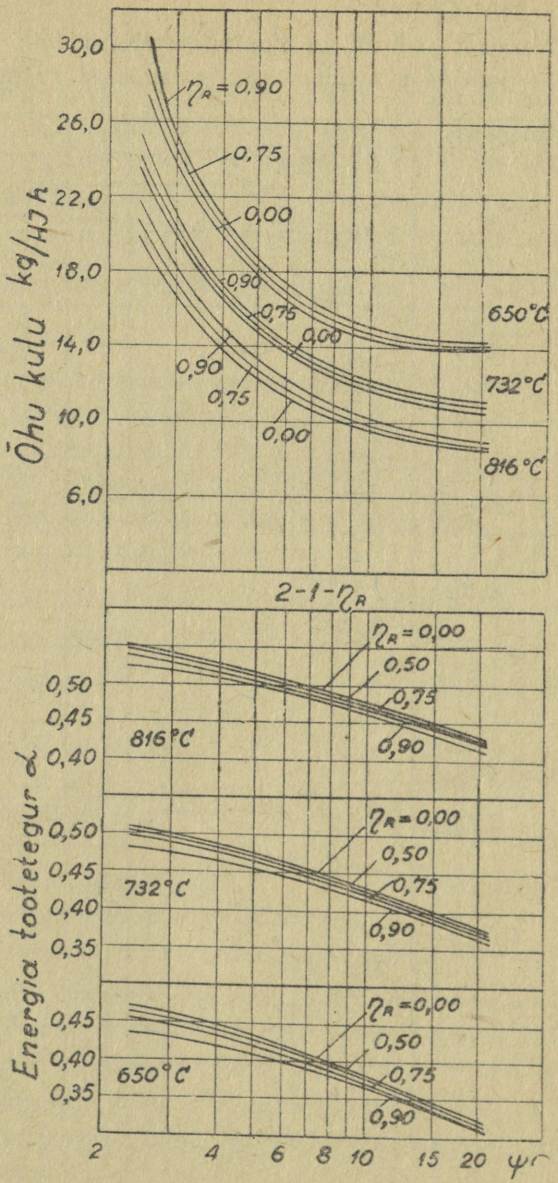
Nendest kõveratest nähtub, et komprimeeritava õhu jahutusastmete ja soojuse protsessi juhtimise astmete suurendamisega kasutegur suureneb.



Joon. 173.

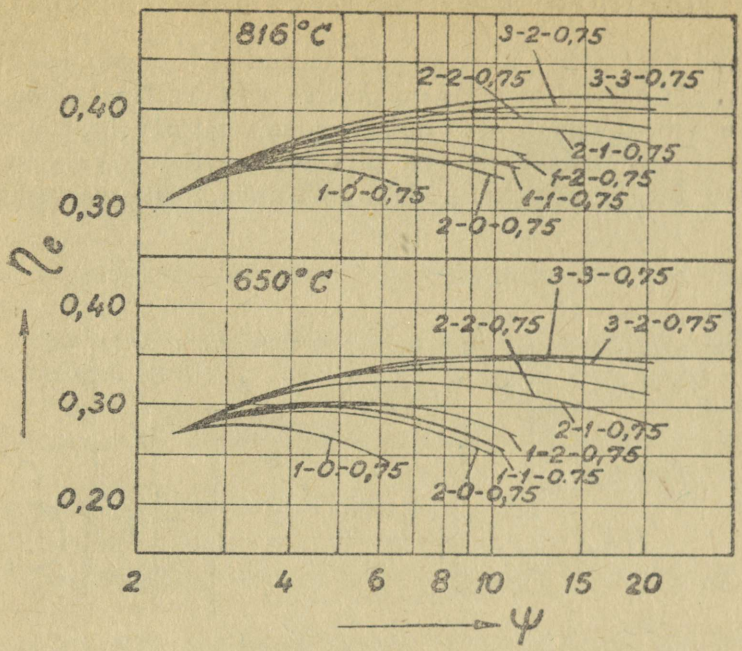
Turbiinseadme 2 - 1 - η_R efektiivse kasuteguri sõltuvus rõhutõusust, regeneratiivsusefektist ja gaasi temperatuurist t_z enne turbiini.

Tegelikus olukorras mõlemate vaheastmete optimaalse arvu määrab turbiinseadme võimsus.



Joon. 174.

Turbiinseadme 2-1-η_R energiatooteteguri α ja õhu erikulu sõltuvus survetõusust, regeneratiivsusefektist ja gaasi temperatuurist t_z enne turbiini.



Joon. 175.

Turbiinseadmete efektiivse kasuteguri sõltuvus rõhutõusust, ringprotsessi karakterist ja gaasi temperatuurist t_z enne turbiini.

Alljärgnevas tabelis on näidatud turbiinseadme kasuteguri sõltuvus kompressorisse imetava õhu temperatuurist (t_a).

Tabel.

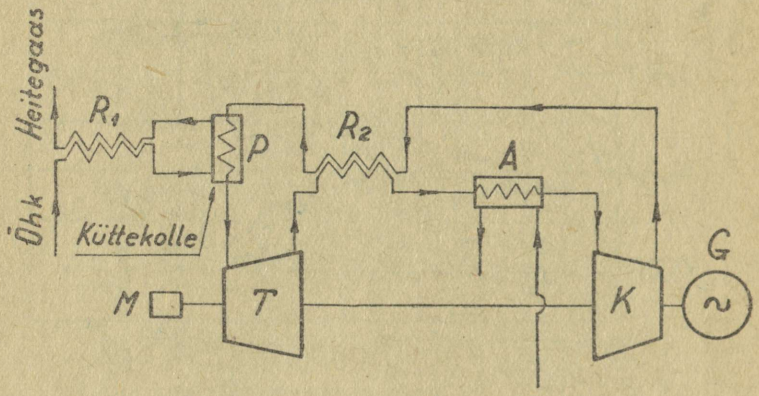
Välisõhu temperatuuri mõju turbiinseadme kasutegurile $\psi = 6$ puhul.

Gaasi temperatuur turbiini eel t_z °C	Kompressorisse imetava õhu temperatuur t_a °C	Turbiinseadme ringprotsess kasuteguri %			
		1—0—0	1—0—0,75	2—0—0,75	2—1—0,75
650	37,5	20,3	22,1	26,6	30,5
	21,0	21,9	25,2	29,1	32,6
	4,4	23,4	28,2	31,6	34,6
816	37,5	24,3	31,1	33,8	36,5
	21,0	25,2	33,4	35,7	38,1
	4,4	26,1	35,6	37,5	39,7

62. SULETUD RINGPROTSESSIGA GAASITURBIINSEADE.

Suletud ringprotsess, nagu eespool tähendatud, erineb lahtisest ringprotsessist selle poolest, et selles ringprotsessis ka tegelikus olukorras töötav keha ei vahetu, vaid teostab turbiinseadmes pidevat ringliikumist.

Suletud ringprotsessiga töötava gaasiturbiinseadme skeem on esitatud joonisel 176. Seadme põhielementideks on ühisele võllile monteeritud kom-



Joon. 176.

pressor K ja gaasiturbiin T. Edasi on skeemil märgitud: P — küttekolle, milles toimub tahke, vedela või gaasilise kütuse põletamine. Põlemisel eralduv kütuse soojus kandub kuumadelt suitsugaasidelt vastava soojusvahetusseadme kaudu, nagu katlaski, üle töötavale kehale. Kütuse põlemiseks vajalik õhk voolab koldesse heitgaasidega töötava eelsoojendaja — regeneraatori R_1 kaudu, millega osa heitgaaside soojust tarbitakse kasulikult. Peale eespool-loetletud seadmete on skeemil veel näha regeneraator R_2 ja töötanud gaasi ahutusseade A, mis jahutab regeneraatorit R_2 läbinud töötanud gaasi kuni ettenähtud algtemperatuurini ning töötab statsionaarses seadmes tavaliselt veega.

Ringprotsess turbiinseadmes toimub järgnevalt.

Turbiinis töötanud gaas voolab parameetritel p_a ja T_a jahutajast A kompressorisse K, kus ta komprimeeritakse kuni ettenähtud rõhuni p_c ning temperatuurini T_c ja juhitakse regeneraatorisse R_2. Regeneraatoris R_2, mis töötab turbiinist väljunud gaaside soojusega, antakse komprimeeritud gaasile (töötav keha) vastav isobaariline eelsoojendus ja juhitakse ta edasi koldes asuvasse soojusvahetusseadmesse. Selles soojusvahetusseadmes võtab gaas suitsugaasidelt isobaariliselt vastu (p_c = *konst*) ringprotsessi juhitava välise

soojushulga q_1 ja voolab gaasiturbiini T, kus ta tööd sooritades adiabaatiliselt paisub kuni algrõhuni p_a. Gaasiturbiinist väljunud töötanud gaas juhitakse läbi regeneraatori R_2 jahutajasse A. Jahutajas annab gaas ära ringprotsessist eemalejuhitava soojushulga q_2 ja jahtub ise isobaariliselt ($p_b = p_a = konst$) kuni ettenähtud algtemperatuurini T_a. Jahutajast voolab töötanud gaas edasi kompressorisse K, kust ringprotsess algab uuesti jne.

Suletud ringprotsessi termodünaamiline arvutus on analoogiline lahtise ringprotsessiga.

Selle ringprotsessi põhilisteks varjukülgedeks võrreldes lahtise ringprotsessiga on:

1. Kogu turbiinseadme tihendamise vajadus, et vältida töötava keha kadu ebatiheduste kaudu.

2. Soojuse ringprotsessi juhtimine mitte otse, vaid küttekoldes asuva soojusvahetusaparaadi kaudu, millega väheneb turbiinseadme üldine kasutegur.

3. Lisa-energiakulu tõmbeventilaatoris, s. o. ekshaustoris tõmbe tekitamiseks läbi kolde.

Kõik need loetletud puudused, nagu teame, esinevad ka igas aurujõuseadmes.

Vaatamata neile puudustele omab suletud ringprotsess teisest küljest ka teatavaid eeliseid, milledest tähtsamad on:

1. Ringprotsessis on võimalik kasutada inertseid üheaatomilisi gaase, mis ei dissotsieeru kõrges temperatuuris ja ei mõju oksüdeerivalt turbiini ning kompressori labadele eriti kõrgel temperatuuril, nagu see esineb turbiinis.

2. Arvestades ringprotsessi kasutegurit, on ringprotsessiks sobivad üheaatomilised gaasid nagu argon, krüpton ja ksenon, millede erisoojuste c_p ja c_v suhtarv k on suur, sest, nagu nähtub ringprotsessi kasuteguri võrrandist (354), s. o.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\psi^{\frac{k-1}{k}}},$$

suureneb kasutegur suhtarvu k suurenemisel. Näiteks argonil on $k = 1{,}67$, õhul aga $k = 1{,}40$, mistõttu ühe ja sama rõhutõusu puhul argoniga töötava ringprotsessi kasutegur on suurem õhuga töötava ringprotsessi omast[35].

Järelikult kahes suletud ringprotsessis, mis töötavad erinevate gaasidega ja omavad võrdseid termilisi kasutegureid, on suuremat suhtarvu k omava gaasiga ringprotsessis vajalik rõhutõus väiksem kui väiksemat suht-

[35] Näiteks kui $\psi = 4$, siis õhu puhul $\eta_t = 0{,}33$ ja argoni puhul $\eta_t = 0{,}42$.

arvu omava gaasiga ringprotsessis. See asjaolu võimaldab ringprotsessiks valitud minimaalse ja maksimaalse temperatuuri intervallis saavutada optimaalset kasutegurit väiksema rõhutõusuga, s. o. väiksema astmelise kompressoriga.

Lähtudes antud võimsust omava turbiini ja kompressori konstruktiivsetest mõõtmetest on väiksemate mõõtmete saamiseks vajalik, et peale suure suhtarvu k gaas omaks võimalikult väikese gaasikonstandi R või suure molekulaarkaalu, sest mida väiksem on R, seda tihedam on gaas õhu suhtes, s. o. seda suurem on gaasi erikaal võrdsetes termilistes tingimustes [36]. Säärase gaasi adiabaatilisel paisumisel või komprimeerimisel ette kindlaks määratud temperatuuri-intervallis esineb õhuga võrreldes seda väiksem entalpia muutus, mida suurem on suhtarv k ja väiksem gaasikonstant, s. o. mida suurem on gaasi erikaal [37]. Esimene neist tegureist, väiksem entalpia langus, võimaldab vähendada nii kompressori kui ka turbiini astmete arvu ja gaasi tiheduse suurenemine omakorda võimaldab vähendada gaasijuhtmete ristlõike pindala jne.

Mõlematele esitatud tingimustele vastavad, nagu juba mainitud, argon ($R = 21{,}6$), krüpton ($R = 10{,}1$) ja ksenon ($R = 6{,}5$). Argoni suhteline tihedus õhuga võrreldes on 1,38, krüptonil 2,87 ja ksenonil 4,53. Seega need üheaatomilised gaasid on igati kohased töötavaks kehaks suletud ringprotsessiga gaasiturbiinidele.

3. Suletud ringprotsessi puhul on võimalik, peale eespooltoodu, tunduvalt vähendada nii turbiini kui ka kompressori mõõtmeid, tõstes gaasi

---

[36] See tuleneb asjaolust, et erikaalud on pöördvõrdelised gaasikonstantidega (vt. „Tehniline termodünaamika I", § 21), s. o.

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{R_1}{R_2},\quad \gamma_2 = \gamma_1 \frac{R_1}{R_2}.$$

Sellest seosest nähtub, et mida väiksem on R_2, seda suurem on erikaal γ_2.

[37] Entalpia muutuse sõltuvus suhtarvust k ja gaasikonstandist ilmneb võrrandist

$$i_1 - i_2 = c_p(T_1 - T_2) = AR\,\frac{k}{k-1}\,(T_1 - T_2),$$

sest

$$c_p = AR\,\frac{k}{k-1}\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

Mida väiksem on R ja mida suurem k, seda väiksem on c_p. Näiteks õhu puhul

$$c_p = AR\,\frac{k}{k-1} = \frac{29{,}27}{427}\cdot\frac{1{,}4}{1{,}4-1} = 0{,}240\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}$$

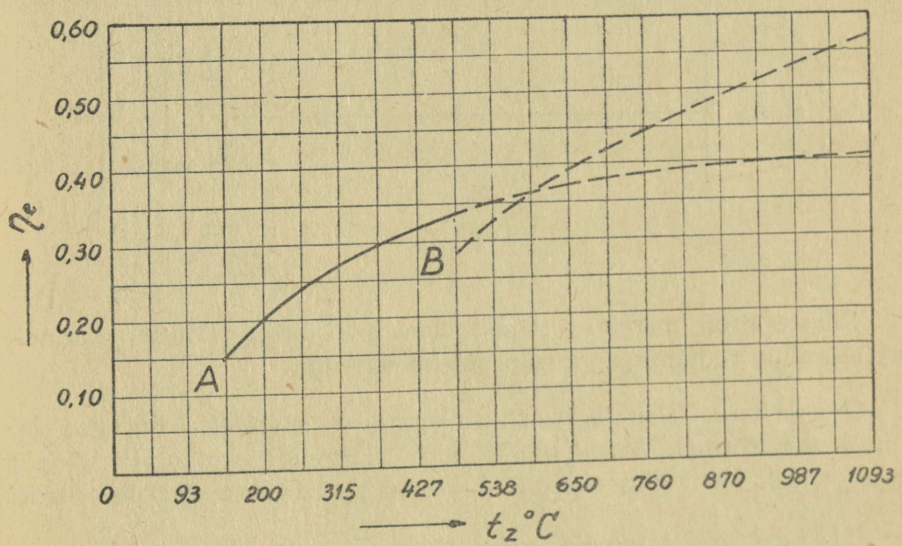
ja argoni puhul

$$c_p = AR\,\frac{k}{k-1} = \frac{21{,}2}{427}\cdot\frac{1{,}67}{1{,}67-1} = 0{,}124\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}.$$

tihedust algrõhu (p_a) suurendamisega. Peale selle osutub suure algrõhuga töötava ringprotsessi puhul võimalikuks reguleerida töötava turbiinseadme termodünaamilist karakteristikut laiades piirides.

Suletud ringprotsessiga gaasiturbiinseadme eeliseks on veel asjaolu, et tema kasutegur, alates võimsusest 2000 HJ, sõltub õige väikesel määral turbiinseadme võimsusest, kuna lahtise ringprotsessiga turbiinseadme kasutegur kuni võimsuseni 50000 HJ sõltub märksa suuremal määral turbiinseadme võimsusest. Üldiselt võib arvata, et suurte agregaatvõimsuste puhul nii turbiinseadme võimsuse, erikaalu kui ka gabariitmõõtmete seisukohast on eelistatavad suletud ringprotsessiga töötavad gaasiturbiinseadmed.

Teoreetilised arvutused näitavad, et termodünaamilisest seisukohast lähtudes on võimalik nii lahtise kui ka suletud ringprotsessiga töötava gaasiturbiinseadme kasutegurit tõsta märksa suuremaks auruturbiinseadme kasutegurist. Piltlikult illustreerib seda joonisel 177 esitatud diagramm, kus

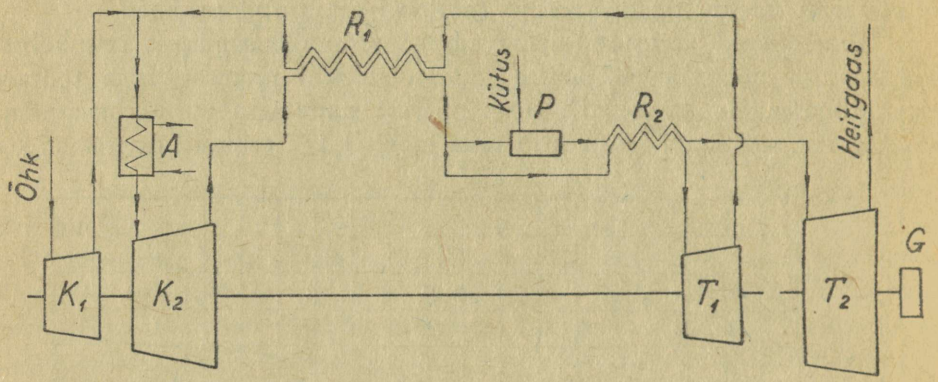


Joon. 177.

on antud auruturbiin- ja gaasiturbiinseadme kasutegurite muutus vastavalt ringprotsessi maksimaalsele temperatuurile. Diagrammil täisjoon *A* tähistab praegusaegsete võimsate auruturbiinseadmete kasuteguri muutust ja sama joone kriipsosa auruturbiinseadme kasuteguri ekstrapolatsiooni kuni temperatuurini 1100° C. Võimsa gaasiturbiinseadme kasuteguri arvatavat muutust tähistab punktiirjoon *B*. Diagrammilt nähtub, et alates temperatuurilt 550° C gaasiturbiinseadme kasutegur kasvab ringprotsessi maksimaalse tem-

peratuuri tõusuga märksa kiiremini kui auruturbiinseadme kasutegur. Praegusaegsete statsionaarsete gaasiturbiinseadmete keskmiste kasutegurite väärtused on piirides 0,18 ... 0,25. Eespooltoodut aluseks võttes võib gaasiturbiin-jõuseadmeile ennustada suurt tulevikku nii statsionaarsete kui ka transport- ja vedur-jõuseadmetena, kuna nad konkureerivad mitte üksnes auru-, vaid ka diisel-jõuseadmetega.

Joonisel 177-a on esitatud poolsuletud ringprotsessiga gaasiturbiinseadme skeem.



Joon. 177-a.

Tähistega on märgitud samad elemendid nagu eelmistel skeemidelgi. Turbiinseadme töötamise printsiip selgub skeemilt.

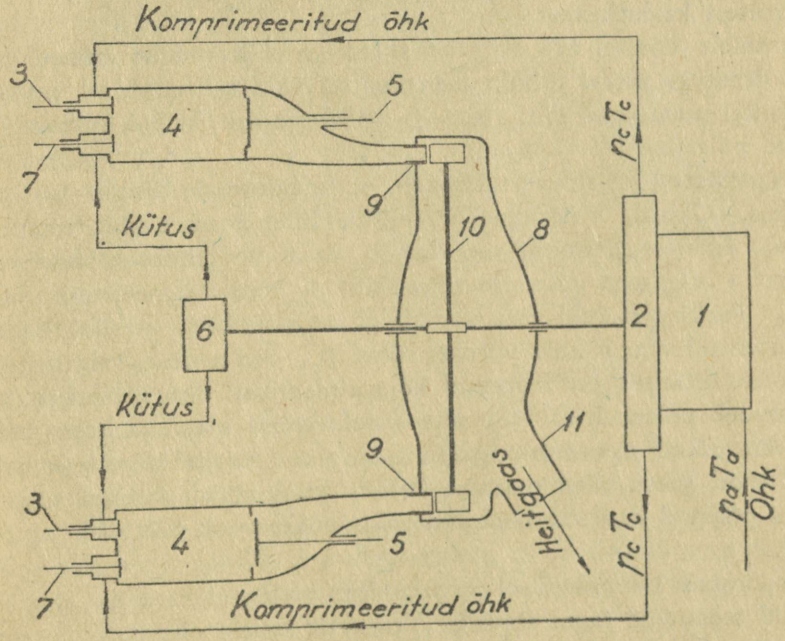
Ülesanne. Ehitada gaasiturbiinseadme sisemise kasuteguri kõver sõltuvalt rõhutõusust, kui $t_z = 870$, $t_a = 28$, kompressori $\eta_{ad} = 0{,}8$ ja turbiini $\eta_{oit} = 0{,}8$. Kasutades ehitatud η_i-kõverat, määrata optimaalne rõhutõus.

Ülesanne. Arvutada gaasiturbiinseadmed 1 - 0 - 0, 1 - 1 - 0, 1 - 1 - η_R', 2 - 1 - η_R', kui rõhutõus $\psi = \frac{p_c}{p_a} = 10$ ($p_a = 1$ ata, $p_c = 10$ ata), gaasi temperatuur enne turbiini $t_z = 880°$ C, välisõhu temperatuur $t_a = 28°$ C ja gaasiturbiini ning kompressori suhteline sisemine kasutegur $\eta_{ad} = \eta_{ott} = 0{,}8$. Regeneratiivsusaste η_R' valida maksimaalne, mida ringprotsess võimaldab.

63. GAASITURBIINSEADE PÕLEMISEGA JÄÄVAL MAHUL (*v=konst*).

Turbiinseadme skeem on esitatud joonisel 178, kus numbritega on märgitud: *1* — õhukompressor, *2* — komprimeeritud õhu resiiver, *3* — õhu põlemiskambrisse sisselaskmise klapp, *4* — põlemiskamber, *5* — gaaside põlemiskambrist väljalaskmise klapp, *6* — kütusepump, *7* — kütuseklapp põlemiskambrisse, *8* — gaasiturbiin, *9* — Laval'i düüs, *10* — gaasiturbiini rootor (ketas), *11* — heitgaasi turbiinist väljavoolamise toru.

Turbiinseadme tööprotsess on järgmine. Välisõhk parameetritel p_a ja T_a imetakse kompressorisse *(1)*, kus ta adiabaatiliselt komprimeeritakse kuni ettenähtud rõhuni p_c ja T_c. Kompressorist juhitakse komprimeeritud õhk resiivrisse *(2)*, mille ülesandeks on turbiini töötamisel hoida õhurõhk konstantsena, sest õhu voolamine turbiini toimub pulseeruvalt. Resiivrist voolab õhk parameetritel p_c ja T_c avatud sisselaskeklapi kaudu *(3)* põlemiskambrisse *(4)* ja tõrjub sealt jääval rõhul eelmisest ringprotsessist sinna



Joon. 178.

jäänud põlemissaadused avatud väljalaskeklapi *(5)* kaudu gaasiturbiini. Põlemiskambrisse õhu sisselaskmise klapi avamine toimub hetkel, mil põlemiskambris gaasi rõhk eelnenud protsessist on langenud õhu rõhuni resiivris.

Samaaegselt õhu voolamisega resiivrist põlemiskambrisse saadab kütusepump *(6)* kütuseklapi *(7)* kaudu põlemiskambrisse vastava koguse kütust, mis õhuga segunedes moodustab küttesegu [38]. Kui põlemiskamber on küttesegu täitunud, sulguvad sisse- ja väljalaskeklapid *(3)* ja *(5)* ja küttesegu süüdatakse elektriliselt, millele järgneb segu isohooriline põlemine. Selles protsessis gaasi rõhk tõuseb isohooriliselt komprimeeritud õhu rõhult p_c kuni põlemise lõpprõhuni p_z. Põlemisprotsessi lõpul avaneb väljalaskeklapp *(5)* ja gaasid voolavad turbiini. Läbides turbiinis Laval'i düüsi *(9)* muundub gaaside potentsiaalne energia kineetiliseks energiaks, mis pöörleva rootori labadel omakorda muundub mehhaaniliseks tööks.

Turbiinis esinevas voolamisprotsessis gaasid paisuvad adiabaatiliselt kuni parameetriteni p_b, T_b ja lahkuvad turbiinist heitgaasidena väljaviseketoru *(11)* kaudu.

Kirjeldatud ringprotsess toimub ka skeemil näidatud teises põlemiskambris. Põlemiskambrite arv üldiselt sõltub turbiini võimsusest ja konstruktiivsetest kaalutlustest.

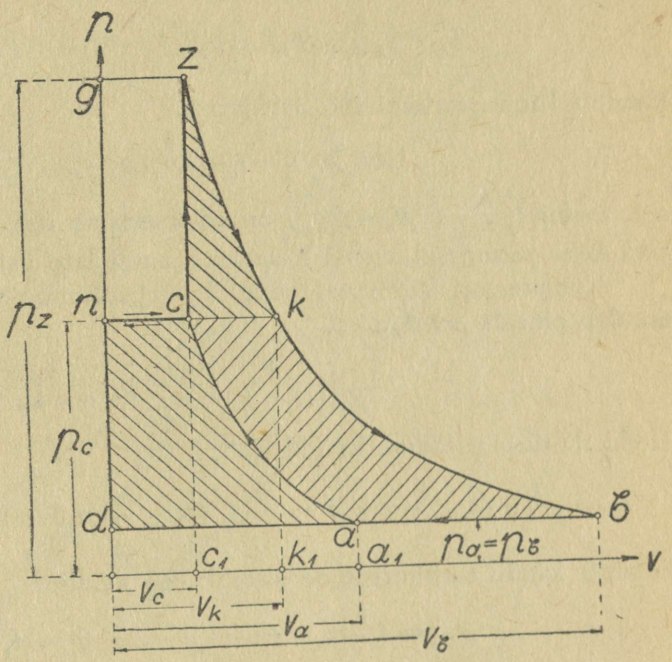
Sarnaselt joonisel 178 esitatud skeemiga töötavad ka mõned gaasiturbiinid põlemisega jääval rõhul. Erinevus on vaid selles, et sel puhul põlemiskambritel puuduvad õhu sisse- ja väljalaskmise klapid, millega on võimaldatud põlemine jääval rõhul.

Ringprotsessi kirjeldusest järgneb, et turbiinseade töötab lahtise ringprotsessiga. Gaaside voolamine põlemiskambrist gaasiturbiini toimub kahes perioodis. Esimese perioodi moodustab gaasi voolamine põlemiskambrist pideva rõhu langusega põlemise tipprõhult p_z kuni komprimeeritud õhu rõhuni p_c. Teisel perioodil gaas voolab põlemiskambrist turbiini konstantsel komprimeeritud õhu rõhule võrdsel rõhul p_c. See periood algab, kui gaasi rõhk põlemiskambris on langenud komprimeeritud õhu rõhuni p_c, sest sel hetkel avaneb põlemiskambrisse õhu sisselaskmise klapp ja komprimeeritud õhk voolab rõhul $p_c = konst$ põlemiskambrisse, tõrjudes sealt samal rõhul välja põlenud gaasi. See periood kestab kuni väljalaskeklapi sulgumiseni, s. o. kuni põlenud gaas on komprimeeritud õhu poolt põlemiskambrist välja tõrjutud.

Ringprotsessi teoreetilisel arvutamisel oletame, et kõik ringprotsessi elemendid teostuvad tagastatavalt. Vastavalt sellele oletusele on ringprotsess p-v-tasapinnal esitatud joonisel 179. Ringprotsess algab punktist *a* õhu adiabaatilise komprimeerimisega kuni punktini *c*. Selles protsessis õhu parameetrid muutuvad väärtustest p_a, T_a, v_a kuni väärtusteni p_c, T_c ja

[38] Küttesegu moodustamise viise võib olla mitmesuguseid, mis sõltub osalt ka kütuse liigist.

v_c. Joon cn vastab õhu voolamisele kompressorist resiivrisse ja joon nc õhu voolamisele resiivrist põlemiskambrisse. Punktist c kuni punktini z toimub põlemiskambris välise soojuse q_1 isohooriline ($v_c = konst$) protsessi juhtimine, s. o. põlemisprotsess, millega õhu parameetrid muutuvad väärtustest p_c, T_c, v_c kuni väärtusteni p_z, T_z, $v_z = v_c$. Punktist z kuni punktini b esineb õhu või gaasi adiabaatiline paisumine gaasiturbiinis. Selles protsessis õhu temperatuur langeb kuni temperatuurini T_b ja rõhk kuni komprimeeritava õhu algrõhuni $p_b = p_a$. Punktist b kuni punktini a esineb õhu isobaariline jahtumine rõhul $p_a = konst$, millega õhk saavutab oma algtemperatuuri T_a ja ühtlasi ka algoleku. Isobaarilises jahtumisprotsessis ba juhitakse ringprotsessist eemale soojushulk q_2.



Joon. 179.

Selles ringprotsessis gaasiturbiini sooritatud töö avaldub p-v-diagrammil pindala czk ja pindala $kbdnk$ summana. Pindala czk avaldab õhu adiabaatilist paisumistööd turbiinis esimesel perioodil, s. o. kui õhk voolab põlemiskambrist turbiini rõhu langusel rõhult p_z kuni p_c.

See töö, nagu nähtub p-v-diagrammilt, on avaldatav seosega

$$\text{pindala } czk = \text{pindala } zkng - \text{pindala } zcng$$

ehk

$$\text{pindala } czk = \frac{k}{k-1}(p_z v_c - p_c v_k) - v_c(p_z - p_c).$$

Pindala $kbdn$ avaldab õhu adiabaatilist tööd turbiinis teisel voolamisperioodil, s. o. kui õhu voolamine põlemiskambrist turbiini toimub jääval rõhul $p_c = konst$. See töö, nagu teada, avaldub võrrandiga

$$\text{pindala } kbdn = \frac{k}{k-1}(p_c v_k - p_a v_b).$$

Järelikult ringprotsessis turbiini sooritatud töö, mille märgime tähisega L_{ot}, on

$$L_{ot} = \frac{k}{k-1}(p_z v_c - p_c v_k) + \frac{k}{k-1}(p_c v_k - p_a v_b) - v_c(p_z - p_c),$$

mis peale koondamist lõplikult avaldub kujul

$$L_{ot} = \frac{k}{k-1}(p_z v_c - p_a v_b) - v_c(p_z - p_c)\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{399}$$

Entalpia kaudu turbiini töö avaldub

$$AL_{ot} = i_z - i_b - Av_c(p_z - p_c)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \tag{400}$$

sest avaldis $\frac{k}{k-1}(p_z v_c - p_a v_b)$ on adiabaatiline töö, mis on avaldatav töötava keha paisumisel alg- ja lõppoleku entalpiate vahega.

Kompressori tarbitavat tööd L_{oc} (absoluutne väärtus) p-v-diagrammil esindab pindala *acnd*, s. o.

$$L_{oc} = \frac{k}{k-1}(p_c v_c - p_a v_a)\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{401}$$

Järelikult turbiinseadme kasulik töö L_o on

$$L_o = \frac{k}{k-1}(p_z v_c - p_a v_b) - \frac{k}{k-1}(p_c v_c - p_a v_a) - v_c(p_z - p_c)\ \frac{\text{kgm}}{\text{kg}}. \tag{402}$$

Entalpia kaudu turbiinseadme kasulik töö avaldub

$$AL_o = i_z - i_b - (i_c - i_a) - Av_c(p_z - p_c)\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

p-v-diagrammil (joon. 179) esindab turbiinseadme kasulikku tööd AL_o pindala *aczb*. Ringprotsessi termiline kasutegur, eeldades, et õhu erisoojused on jäävad suurused, on

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_b - T_a)}{c_v(T_z - T_c)}.$$

Vastavate tehetega, mis on toodud „Tehniline termodünaamika I", § 100, saame kasuteguri lõplikult avaldada kujul

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{k\,(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1)}{\lambda - 1}, \tag{403}$$

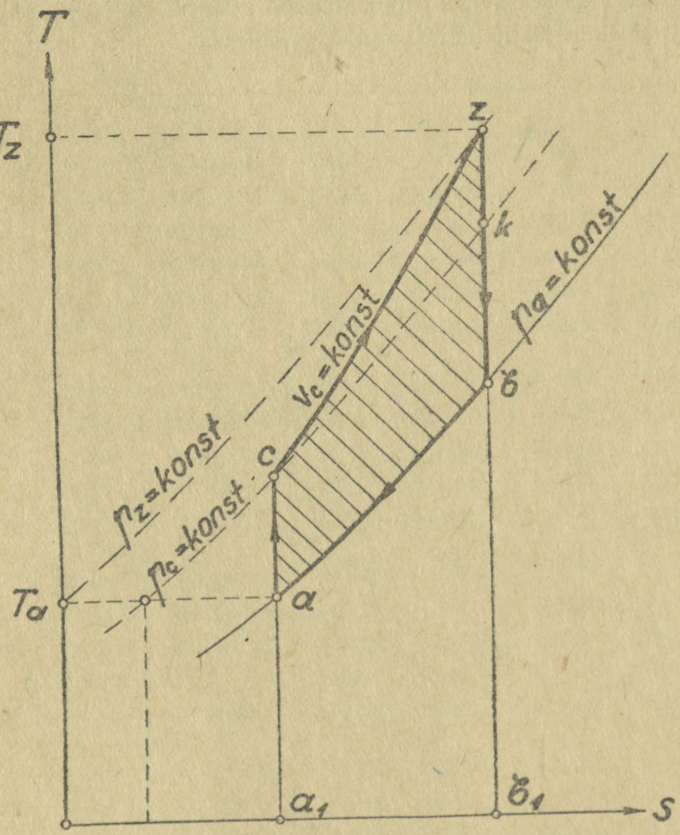
kus ε on kompressori kompressiooniaste, s. o.

$$\varepsilon = \frac{v_a}{v_c}$$

ja λ isohooriline rõhutõus põlemiskambris, mis avaldub seosega

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c} = \frac{T_z}{T_c}. \tag{404}$$

Turbiinseadme ringprotsess T-s-diagrammil on antud joonisel 180. Ringprotsessi tähistab kontuur *aczb* ja turbiinseadme kasulikku tööd pindala



Joon. 180.

aczb. Ringprotsessi juhitud väline soojus q_1 on võrdne pindalaga czb_1a_1 ja ringprotsessist eemale juhitud soojushulk q_2 pindalaga abb_1a_1. Diagrammilt nähtub, et võrdsel rõhutõusul kompressoris ja võrdse ringprotsessist eemale juhitud soojushulga q_2 puhul on ringprotsessis põlemisega jääval mahul *(v = konst)* kasulik pindala suurem ringprotsessi pindalast põlemisega jääval rõhul pindala *czk* võrra.

See asjaolu näitab, et ringprotsessil põlemisega jääval mahul *(v = konst)* on termiline kasutegur suurem kui ringprotsessil põlemisega jääval rõhul *(p = konst)*. Vaatamata sellele termodünaamilisele eelisele kasutatakse ringprotsessi põlemisega $v = konst$ seni vähe ja sedagi vaid erijuhtudel. Põhjuseks nähtavasti on turbiinseadme konstruktiivsed iseärasused ja asjaolu, et pole võimalik lisaseadmetega sel määral tõsta termilist kasutegurit, nagu see osutub teostatavaks ringprotsessis põlemisega jääval rõhul. Kuivõrd see olukord püsima jääb, näitab muidugi tulevik.

Tabel I.

Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt rõhust).

Absoluutne rõhk	Temperatuur		Vedeliku kilomaht	Auru kilomaht	Auru erikaal	Vedeliku entroopia	Auru entroopia	$s'' - s'$
kg/cm²	°C	°K	m³/kg	m³/kg	kg/m³	kcal/kg°C	kcal/kg °C	kcal/kg °C
p	t	T	v'	v''	γ''	s'	s''	r/T
0,01	6,70	279,86	0,0010001	131,7	0,007595	0,0243	2,1447	2,1204
0,015	12,74	285,90	0,0010007	89,64	0,01116	0,0457	2,1096	2,0639
0,02	17,20	290,36	0,0010013	68,27	0,01465	0,0612	2,0847	2,0235
0,025	20,78	293,94	0,0010020	55,28	0,01809	0,0735	2,0655	1,9920
0,03	23,77	296,93	0,0010027	46,53	0,02149	0,0836	2,0499	1,9663
0,04	28,64	301,80	0,0010041	35,46	0,02820	0,0998	2,0253	1,9255
0,05	32,55	305,71	0,0010053	28,73	0,03481	0,1126	2,0064	1,8938
0,06	35,82	308,98	0,0010064	24,19	0,04134	0,1232	1,9908	1,8676
0,08	41,16	314,32	0,0010084	18,45	0,05421	0,1402	1,9664	1,8262
0,10	45,45	318,61	0,0010101	14,95	0,06688	0,1538	1,9478	1,7940
0,12	49,06	322,22	0,0010116	12,60	0,07938	0,1650	1,9326	1,7676
0,15	53,60	326,76	0,0010137	10,21	0,09791	0,1790	1,9140	1,7350
0,20	59,67	332,83	0,0010170	7,795	0,1283	0,1974	1,8903	1,6929
0,25	64,56	337,72	0,0010196	6,322	0,1582	0,2120	1,8718	1,6598
0,30	68,68	341,84	0,0010221	5,328	0,1877	0,2241	1,8567	1,6326
0,35	72,24	345,40		4,614	0,2169	0,2345	1,8436	1,6090
0,40	75,42	348,58	0,0010261	4,069	0,2458	0,2437	1,8334	1,5897
0,50	80,86	354,02	0,0010296	3,301	0,3029	0,2592	1,8150	1,5558
0,60	85,45	358,61	0,0010326	2,783	0,3594	0,2721	1,8001	1,5280
0,70	89,45	362,61	0,0010355	2,409	0,4152	0,2832	1,7874	1,5042
0,80	92,99	366,15	0,0010381	2,125	0,4705	0,2930	1,7767	1,4837
0,90	96,18	369,34	0,0010405	1,904	0,5253	0,3018	1,7673	1,4655
1,0	99,09	372,15	0,0010428	1,725	0,5797	0,3096	1,7587	1,4491
1,1	101,76	374,92	0,0010449	1,578	0,6337	0,3168	1,7510	1,4342
1,2	104,25	377,41	0,0010468	1,455	0,6875	0,3235	1,7440	1,4205
1,3	106,56	379,72	0,0010487	1,350	0,7410	0,3297	1,7375	1,4078
1,4	108,74	381,90	0,0010504	1,259	0,7942	0,3354	1,7315	1,3961

Absoluutne rõhk kg/cm^2 p	Vedeliku entalpia kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sisseenergia kcal/kg u'	Auru sisseenergia kcal/kg u''	$u'' - u'$ kcal/kg ϱ	$AP \cdot (v'' - v')$ kcal/kg ψ
0,01	6,73	600,1	593,4	6,73	569,3	562,6	30,8
0,015	12,78	602,8	590,0	12,78	571,3	558,5	31,5
0,02	17,24	604,8	587,4	17,24	572,6	555,4	32,0
0,025	20,80	606,4	585,6	20,80	574,0	553,2	32,4
0,03	23,79	607,7	583,9	23,79	575,0	551,2	32,7
0,04	28,65	609,8	581,1	28,65	576,6	547,9	33,2
0,05	32,55	611,5	578,9	32,55	577,9	545,3	33,6
0,06	35,81	612,9	577,1	35,81	578,9	543,1	34,0
0,08	41,14	615,2	574,1	41,14	580,6	539,5	34,6
0,10	45,41	617,0	571,6	45,41	582,0	536,6	35,0
0,12	49,01	618,5	569,5	49,01	583,1	534,1	35,4
0,15	53,54	620,5	567,0	53,54	584,6	531,1	35,9
0,20	59,61	623,1	563,5	59,61	586,6	527,0	36,5
0,25	64,49	625,1	560,6	64,48	587,5	523,0	37,0
0,30	68,61	626,8	558,2	68,60	589,4	520,8	37,4
0,35	72,17	628,2	556,0	72,16	590,3	518,2	37,8
0,40	75,36	629,5	554,1	75,35	591,4	516,0	38,1
0,50	80,81	631,6	550,8	80,80	593,0	512,2	38,6
0,60	85,41	633,4	548,0	85,40	594,3	508,9	39,1
0,70	89,43	634,9	545,5	89,41	595,4	506,0	39,5
0,80	92,99	636,2	543,2	92,97	596,4	503,4	39,8
0,90	96,19	637,4	541,2	96 17	597,3	501,1	40,1
1,0	99,12	638,5	539,4	99,10	598,1	499,0	40,4
1,1	101,81	639,4	537 6	101,78	598,8	497,0	40,6
1,2	104,32	640,3	536,0	104,29	599,4	495,1	40,9
1,3	106,66	641,2	534,5	106,63	600,0	493,4	41,1
1,4	108,85	642,0	533,1	108,82	600,7	491,9	41,2

Absoluutne rõhk	Temperatuur		Vedeliku kilomaht	Auru kilomaht	Auru erikaal	Vedeliku entroopia	Auru entroopia	$s'' - s'$
						kcal	kcal	kcal
kg/cm²	°C	°K	m³/kg	m³/kg	kg/m³	kg °C	kg °C	kg °C
p	t	T	v'	v''	γ''	s'	s''	r/T
1,5	110,79	384,95	0,0010521	1,180	0,8472	0,3408	1,7260	1,3852
1,6	112,73	385,89	0,0010537	1,111	0,8999	0,3459	1,7209	1,3750
1,8	116,33	389,49	0,0010569	0,9952	1,005	0,3554	1,7115	1,3561
2,0	119,62	392,78	0,0010599	0,9016	1,109	0,3638	1,7029	1,3391
2,2	122,65	395,81	0,0010628	0,8246	1,213	0,3715	1,6952	1,3237
2,4	125,46	398,62	0,0010654	0,7601	1,316	0,3786	1,6884	1,3098
2,6	128,08	401,24	0,0010678	0,7052	1,418	0,3853	1,6819	1,2966
2,8	130,55	403,71	0,0010701	0,6578	1,520	0,3914	1,6759	1,2845
3,0	132,88	406,04	0,0010725	0,6166	1,622	0,3973	1,6703	1,2730
3,2	135,08	408,24	0,0010747	0,5804	1,723	0,4028	1,6650	1,2622
3,4	137,18	410,34	0,0010769	0,5483	1,824	0,4081	1,6601	1,2520
3,6	139,18	412,34	0,0010790	0,5196	1,925	0,4130	1,6557	1,2427
3,8	141,09	414,25	0,0010809	0,4939	2,025	0,4176	1,6514	1,2338
4,0	142,92	416,08	0,0010828	0,4706	2,125	0,4221	1,6474	1,2253
4,5	147,20	420,36	0,0010875	0,4213	2,374	0,4326	1,6380	1,2054
5,0	151,11	424,27	0,0010918	0,3816	2,621	0,4422	1,6297	1,1875
5,5	154,71	427,87		0,3489	2,817	0,4510	1,6195	1,1685
6,0	158,08	431,24	0,0010999	0,3213	3,112	0,4591	1,6151	1,1560
6,5	161,15	434,31		0,2980	3,356	0,4666	1,6088	1,1422
7,0	164,17	437,33	0,0011072	0,2778	3,600	0,4737	1,6029	1,1392
7,5	166,96	440,12		0,2602	3,842	0,4803	1,5974	1,1171
8,0	169,61	442,77	0,0011140	0,2448	4,085	0,4865	1,5922	1,1057
8,5	172,11	445,27		0,2311	4,327	0,4923	1,5874	1,0951
9,0	174,53	447,69	0,0011203	0,2189	4,568	0,4980	1,5827	1,0847
9,5	176,82	450,98		0,2080	4,809	0,5033	1,5782	1,0749
10	179,04	452,20	0,0011262	0,1981	5,049	0,5085	1,5740	1,0665
11	183,20	456,36	0,0011318	0,1808	5,530	0,5180	1,5661	1,0481
12	187,08	460,29	0,0011373	0,1664	6,010	0,5279	1,5592	1,0333
13	190,71	463,87	0,0011425	0,1541	6,488	0,5352	1,5526	1,0174
14	194,13	467,29	0,0011476	0,1435	6,967	0,5430	1,5464	1,0034

Absoluutne rõhk kg/cm² p	Vedeliku entalpia kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sise-energia kcal/kg u'	Auru sise-energia kcal/kg u''	$u'' - u'$ kcal/kg ϱ	$AP.(v''-v')$ kcal/kg ψ
1,5	110,92	642,8	531,9	110,88	601,4	490,5	41,4
1,6	112,89	643,5	530,6	112,85	601,9	489,0	41,6
1,8	116,54	644,7	528,2	116,50	602,8	486,3	41,9
2,0	119,87	645,8	525,9	119,82	603,5	483,7	42,2
2,2	122,9	646,8	523,9	122,8	604,3	481,5	42,4
2,4	125,8	647,8	522,0	125,7	605,0	479,3	42,7
2,6	128,5	648,7	520,2	128,4	605,7	477,3	42,9
2,8	131,0	649,5	518,5	130,9	606,3	475,4	43,1
3,0	133,4	650,3	516,9	133,3	607,0	473,7	43,2
3,2	135,6	650,9	515,3	135,5	607,4	471,9	43,4
3,4	137,8	651,6	513,8	137,7	607,9	470,2	43,6
3,6	139,8	652,2	512,4	139,7	608,4	468,7	43,7
3,8	141,8	652,8	511,0	141,7	608,8	467,1	43,9
4,0	143,6	653,4	509,8	143,5	609,3	465,8	44,0
4,5	148,0	654,7	506,7	147,9	610,3	462,4	44,3
5,0	152,1	655,8	503,7	152,0	611,1	459,1	44,6
5,5	155,8	656,9	501,1	155,7	612,0	456,3	44,8
6,0	159,3	657,8	498,5	159,1	612,6	453,5	45,0
6,5	162,6	658,7	496,2	162,4	613,4	451,0	45,2
7,0	165,6	659,4	493,8	165,4	613,8	448,4	45,4
7,5	168,5	660,2	491,7	168,3	614,5	446,2	45,5
8,0	171,3	660,8	489,5	171,1	614,9	443,8	45,7
8,5	173,9	661,4	487,5	173,7	615,4	441,7	45,8
9,0	176,4	662,0	485,6	176,2	615,9	439,7	45,9
9,5	178,9	662,5	483,6	178,6	616,2	437,6	46,0
10	181,2	663,0	481,8	180,9	616,6	435,7	46,1
11	185,6	663,9	478,3	185,3	617,3	432,0	46,3
12	189,7	664,7	475,0	189,4	618,0	428,6	46,4
13	193,5	665,4	471,9	193,2	618,5	425,3	46,6
14	197,1	666,0	468,9	196,7	618,9	422,2	46,7

Absoluutne rõhk	Temperatuur		Vedeliku kilomaht	Auru kilomaht	Auru erikaal	Vedeliku entroopia	Auru entroopia	$s'' - s'$
kg/cm²	°C	°K	m³/kg	m³/kg	kg/m³	kcal/kg °C	kcal/kg °C	kcal/kg °C
p	t	T	v'	v''	γ''	s'	s''	r/T
15	197,36	470,52	0,0011524	0,1343	7,446	0,5503	1,5406	0,9903
16	200,43	473,59	0,0011571	0,1262	7,925	0,5572	1,5351	0,9779
17	203,35	476,51	0,0011619	0,1190	8,405	0,5638	1,5300	0,9662
18	206,14	479,30	0,0011663	0,1126	8,886	0,5701	1,5251	0,9550
19	208,81	482,97	0,0011707	0,1068	9,366	0,5761	1,5205	0,9444
20	211,38	484,54	0,0011751	0,1016	9,846	0,5820	1,5160	0,9340
22	216,23	489,39	0,0011834	0,09251	10,81	0,5928	1,5078	0,9150
24	220,75	493,91	0,0011914	0,08492	11,78	0,6026	1,5060	0,8974
26	224,99	498,15	0,0011991	0,07846	12,75	0,6120	1,4926	0,8806
28	228,98	502,14	0,0012068	0,07288	13,72	0,6206	1,4857	0,8651
30	232,76	505,92	0,0012142	0,06802	14,70	0,6290	1,4793	0,8503
32	236,35	509,51	0,0012214	0,06375	15,69	0,6368	1,4732	0,8364
34	239,77	512,93	0,0012285	0,05995	16,68	0,6443	1,4673	0,8230
36	243,04	516,20	0,0012355	0,05658	17,68	0,6515	1,4617	0,8102
38	246,17	519,33	0,0012424	0,05353	18,68	0,6584	1,4564	0,7980
40	249,18	522,34	0,0012493	0,05078	19,69	0,6649	1,4513	0,7864
42	252,07	525,23	0,0012561	0,04828	20,71	0,6712	1,4463	0,7751
44	254,87	528,03	0,0012627	0,04601	21,73	0,6773	1,4415	0,7642
46	257,56	530,72	0,0012695	0,04393	22,76	0,6832	1,4369	0,7537
48	260,17	533,33	0,0012762	0,04201	23,80	0,6889	1,4324	0,7435
50	262,70	535,86	0,0012828	0,04024	24,85	0,6944	1,4280	0,7336
55	268,69	541,85	0,0012989	0,03636	27,50	0,7075	1,4176	0,7101
60	274,29	547,45	0,0013150	0,03310	30,21	0,7196	1,4078	0,6882
65	279,54	552,70	0,0013307	0,03033	32,97	0,7311	1,3986	0,6675
70	284,48	557,64	0,0013467	0,02795	35,78	0,7420	1,3897	0,6477
75	289,17	562,33	0,0013625	0,02587	38,66	0,7524	1,3813	0,6289
80	293,62	566,78	0,0013786	0,02404	41,60	0,7623	1,3731	0,6108
85	297,86	571,02	0,0013951	0,02241	44,62	0,7718	1,3654	0,5936
90	301,92	575,08	0,001412	0,02096	47,71	0,7810	1,3576	0,5766
95	305,80	579,96	0,001428	0,01964	50,91	0,7898	1,3500	0,5602

Absoluutne rõhk kg/cm² p	Vedeliku entalpia kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sisenergia kcal/kg u'	Auru sisenergia kcal/kg u''	$u''-u'$ kcal/kg ϱ	$AP.(v''-v')$ kcal/kg ψ
15	200,6	666,6	466,0	200,2	619,4	419,2	46,8
16	203,9	667,1	463,2	203,5	619,8	416,3	46,9
17	207,1	667,5	460,4	206,6	620,1	413,5	46,9
18	210,1	667,9	457,8	209,6	620,4	410,8	47,0
19	213,0	668,2	455,2	212,5	620,7	408,2	47,0
20	215,8	668,5	452,7	215,2	620,9	405,7	47,0
22	221,2	668,9	447,7	220,6	621,2	400,6	47,1
24	226,1	669,3	443,2	225,4	621,5	396,1	47,1
26	230,8	669,5	438,7	230,1	621,8	391,7	47,0
28	235,2	669,6	434,4	234,4	621,8	387,4	47,0
30	239,5	669,7	430,2	238,6	621,9	383,3	46,9
32	243,6	669,7	426,1	242,7	621,9	379,2	46,9
34	247,5	669,6	422,1	246,5	621,8	375,3	46,8
36	251,2	669,5	418,3	250,2	621,8	371,6	46,7
38	254,8	669,3	414,5	253,7	621,7	368,0	46,5
40	258,2	669,0	410,8	257,0	621,4	364,4	46,4
42	261,6	668,8	407,2	260,4	621,3	360,9	46,3
44	264,9	668,4	403,5	263,6	621,0	357,4	46,1
46	268,0	668,0	400,0	266,6	620,6	354,0	46,0
48	271,2	667,7	396,5	269,8	620,5	350,7	45,8
50	274,2	667,3	393,1	272,7	620,2	347,5	45,6
55	281,4	666,2	384,8	279,7	619,3	339,6	45,2
60	288,4	665,0	376,6	286,6	618,5	331,9	44,7
65	294,8	663,6	368,8	292,8	617,5	324,7	44,1
70	300,9	662,1	361,2	298,7	616,3	317,6	43,6
75	307,0	660,5	353,5	304,6	615,1	310,5	43,0
80	312,6	658,9	346,3	310,0	613,8	303,8	42,5
85	318,2	657,0	338,8	315,4	612,4	297,0	41,8
90	323,6	655,1	331,5	320,6	610,9	290,3	41,2
95	328,8	653,2	324,4	325,6	609,5	283,9	40,5

Absoluutne rõhk	Temperatuur		Vedeliku kilomaht	Auru kilomaht	Auru erikaal	Vedeliku entroopia	Auru entroopia	$s'' - s'$
kg/cm²	°C	°K	m³/kg	m³/kg	kg/m³	kcal/kg °C	kcal/kg °C	kcal/kg °C
p	t	T	v'	v''	γ''	s'	s''	r/T
100	309,53	582,69	0,001445	0,01845	54,21	0,7983	1,3424	0,5441
110	316,58	589,74	0,001480	0,01637	61,08	0,8147	1,3279	0,5132
120	323,15	596,31	0,001518	0,01462	68,42	0,8306	1,3138	0,4832
130	329,30	602,46	0,001558	0,01312	76,23	0,8458	1,2998	0,4540
140	335,09	608,25	0,001599	0,01181	84,68	0,8606	1,2858	0,4252
150	340,56	613,72	0,001646	0,01065	93,90	0,8749	1,2713	0,3964
160	345,74	618,90	0,001699	0,009616	104,0	0,8892	1,2564	0,367
180	355,35	628,51	0,001821	0,007809	128,0	0,9186	1,2251	0,3065
200	364,08	637,24	0,00201	0,00620	161,2	0,9514	1,1883	0,2369
225	373,6	646,76		0,00394	254	1,022	1,10	0,078
225,6	374,2	647,4		0,00304	329	1,06		0

Absoluutne rõhk kg/cm² p	Vedeliku entalpia kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sisenergia kcal/kg u'	Auru sisenergia kcal/kg u''	$u'' - u'$ kcal/kg ϱ	$AP \cdot (v''-v')$ kcal/kg ψ
100	334,0	651,1	317,1	330,6	607,9	277,3	39,8
110	344,0	646,7	302,7	340,2	604,5	264,3	38,4
120	353,9	641,9	288,0	349,6	600,8	251,2	36,8
130	363,0	636,6	273,6	358,3	596,7	238,4	35,2
140	372,4	631,0	258,6	367,2	592,3	225,1	33,5
150	381,7	624,9	243,2	375,9	587,5	211,6	31,6
160	390,8	618,3	227,5	384,4	582,2	197,8	29,7
180	410,2	602,5	192,3	402,5	569,6	167,1	25,2
200	431,5	582,3	150,8	422,1	553,3	131,2	19,6
225	478	532	54	464	511	47	7
225,6	505		0	488		0	0

Tabel II.

Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt temperatuurist)

Temperatuur °C t	Absoluutne rõhk kg/cm² p	Vedeliku kilomaht dm³/kg v'	Auru kilomaht m³/kg v''	Auru erikaal kg/m³ γ''	Vedeliku entroopia kcal/kg °C s'	Auru entroopia kcal/kg °C s''	$s'' - s'$ kcal/kg °C r/T
0	0,006228	1,0002	206,3	0,004846	0	2,1863	2,1863
5	0,008890	1,0000	147,2	0,006795	0,0182	2,1551	2,1369
10	0,012513	1,0004	106,4	0,009396	0,0361	2,1253	2,0892
15	0,017376	1,0010	77,99	0,01282	0,0536	2,0970	2,0434
20	0,02383	1,0018	57,84	0,01729	0,0708	2,0697	1,9989
25	0,03229	1,0030	43,41	0,02304	0,0876	2,0436	1,9560
30	0,04325	1,0044	32,93	0,03036	0,1042	2,0187	1,9145
35	0,05733	1,0061	25,25	0,03960	0,1205	1,9947	1,8742
40	0,07520	1,0079	19,55	0,05114	0,1366	1,9718	1,8352
45	0,09771	1,0099	15,28	0,06544	0,1524	1,9498	1,7974
50	0,12578	1,0121	12,05	0,08298	0,1679	1,9287	1,7606
55	0,16051	1,0145	9,584	0,1043	0,1833	1,9085	1,7252
60	0,2031	1,0171	7,682	0,1302	0,1984	1,8891	1,6907
65	0,2555	1,0199	6,206	0,1611	0,2133	1,8702	1,6569
70	0,3177	1,0228	5,049	0,1981	0,2280	1,8522	1,6242
75	0,3931	1,0258	4,136	0,2418	0,2425	1,8349	1,5924
80	0,4829	1,0290	3,410	0,2933	0,2567	1,8178	1,5611
85	0,5894	1,0323	2,830	0,3534	0,2708	1,8015	1,5307
90	0,7149	1,0359	2,361	0,4235	0,2848	1,7858	1,5010
95	0,8619	1,0396	1,981	0,5045	0,2985	1,7708	1,4723
100	1,03323	1,0435	1,673	0,5977	0,3121	1,7561	1,4440
105	1,2318	1,0474	1,419	0,7045	0,3255	1,7419	1,4164
110	1,4609	1,0515	1,210	0,8265	0,3387	1,7282	1,3905
115	1,7239	1,0558	1,036	0,9650	0,3519	1,7150	1,3631
120	2,0245	1,0603	0,8914	1,122	0,3647	1,7018	1,3371
125	2,3666	1,0650	0,7701	1,299	0,3775	1,6895	1,3120
130	2,7544	1,0697	0,6680	1,496	0,3901	1,6772	1,2871
135	3,192	1,0746	0,5817	1,719	0,4026	1,6652	1,2626
140	3,685	1,0798	0,5084	1,967	0,4150	1,6539	1,2389
145	4,237	1,0850	0,4459	2,243	0,4272	1,6428	1,2156

Temperatuur °C t	Vedeliku entapi a kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sise-energia kcal/kg u'	Auru sise-energia kcal/kg u''	$u'' - u'$ kcal/kg ϱ	$AP \cdot (v'' - v')$ kcal/kg $\psi = r - \varrho$
0	0	597,2	597,2	0	567,1	567,1	30,1
5	5,03	599,4	594,4	5,03	568,8	563,8	30,6
10	10,04	601,6	591,6	10,04	570,4	560,4	31,2
15	15,04	603,8	588,8	15,04	572,1	557,1	31,7
20	20,03	606,0	586,0	20,03	573,7	553,7	32,3
25	25,02	608,2	583,2	25,02	575,4	550,4	32,8
30	30,00	610,4	580,4	30,00	577,0	547,0	33,4
35	34,99	612,5	577,5	34,99	578,6	543,6	33,9
40	39,98	614,7	574,7	39,98	580,3	540,3	34,4
45	44,96	616,8	571,8	44,96	581,8	536,8	35,0
50	49,95	619,0	569,0	49,95	583,5	533,5	35,5
55	54,94	621,0	566,1	54,94	585,0	530,1	36,0
60	59,94	623,2	563,3	59,94	586,7	526,8	36,5
65	64,93	625,2	560,3	64,93	588,1	523,2	37,1
70	69,93	627,3	557,4	69,92	589,7	519,8	37,6
75	74,94	629,3	554,4	74,93	591,2	516,3	38,1
80	79,95	631,3	551,3	79,94	592,6	512,7	38,6
85	84,96	633,2	548,2	84,95	594,1	509,1	39,1
90	89,98	635,1	545,1	89,96	595,6	505,6	39,5
95	95,01	637,0	542,0	94,99	597,0	502,0	40,0
100	100,04	638,9	538,9	100,02	598,4	498,4	40,5
105	105,08	640,7	535,6	105,05	599,8	494,7	40,9
110	110,12	642,5	532,4	110,08	601,1	491,0	41,4
115	115,18	644,3	529,1	115,14	602,4	487,3	41,8
120	120,3	646,0	525,7	120,2	603,7	483,5	42,2
125	125,3	647,7	522,4	125,2	605,0	479,8	42,6
130	130,4	649,3	518,9	130,3	606,2	475,9	43,0
135	135,5	650,8	515,3	135,4	607,3	471,9	43,4
140	140,6	652,5	511,9	140,5	608,6	468,1	43,8
145	145,8	654,0	508,2	145,7	609,8	464,1	44,1

Temperatuur °C t	Absoluutne rõhk kg/cm² p	Vedeliku kilomaht dm³/kg v'	Auru kilomaht m³/kg v''	Auru erikaal kg/m³ γ''	Vedeliku entroopia kcal/kg °C s'	Auru entroopia kcal/kg °C s''	$s'' - s'$ kcal/kg °C r/T
150	4,854	1,0906	0,3924	2,548	0,4395	1,6320	1,1920
155	5,540	1,0963	0,3464	2,887	0,4516	1,6214	1,1698
160	6,302	1,1021	0,3068	3,260	0,4637	1,6112	1,1475
165	7,146	1,1082	0,2724	3,671	0,4756	1,6012	1,1256
170	8,076	1,1144	0,2426	4,122	0,4874	1,5914	1,1040
175	9,101	1,1210	0,2166	4,617	0,4991	1,5818	1,0827
180	10,225	1,1275	0,1939	5,157	0,5107	1,5721	1,0614
185	11,456	1,1345	0,1739	5,749	0,5222	1,5629	1,0407
190	12,800	1,1415	0,1564	6,392	0,5336	1,5538	1,0202
195	14,265	1,1490	0,1410	7,094	0,5449	1,5448	1,0099
200	15,857	1,1565	0,1273	7,857	0,5562	1,5358	0,9796
205	17,585	1,1645	0,1151	8,687	0,5675	1,5270	0,9595
210	19,456	1,1726	0,1043	9,585	0,5788	1,5184	0,9396
215	21,477	1,1812	0,09472	10,56	0,5899	1,5099	0,9200
220	23,659	1,1900	0,08614	11,61	0,6010	1,5012	0,9002
225	26,007	1,1991	0,07845	12,75	0,6120	1,4926	0,8806
230	28,531	1,2088	0,07153	13,98	0,6229	1,4840	0,8611
235	31,239	1,2186	0,06530	15,31	0,6339	1,4755	0,8416
240	34,140	1,2291	0,05970	16,75	0,6448	1,4669	0,8221
245	37,244	1,2400	0,05465	18,30	0,6558	1,4584	0,8026
250	40,56	1,2512	0,05006	19,98	0,6667	1,4499	0,7832
255	44,10	1,2629	0,04591	21,78	0,6776	1,4413	0,7637
260	47,87	1,2755	0,04213	23,74	0,6886	1,4327	0,7441
265	51,88	1,2888	0,03870	25,84	0,6994	1,4240	0,7246
270	56,14	1,3023	0,03557	28,11	0,7103	1,4153	0,7050
275	60,66	1,3169	0,03272	30,57	0,7212	1,4066	0,6854
280	65,46	1,3321	0,03010	33,22	0,7321	1,3978	0,6657
285	70,54	1,3484	0,02771	36,09	0,7431	1,3888	0,6457
290	75,92	1,3655	0,02552	39,18	0,7542	1,3797	0,6255
295	81,60	1,3837	0,02350	42,56	0,7653	1,3706	0,6053

Temperatuur °C t	Vedeliku entalpia kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sisenergia kcal/kg u'	Ausisenergia kcal/kg u''	$u''-u'$ kcal/kg ϱ	$AP \cdot (v''-v')$ kcal/kg $\psi = r-\varrho$
150	150,9	655,5	504,6	150,8	610,9	460,1	44,5
155	156,1	656,9	500,8	156,0	612,0	456,0	44,8
160	161,3	658,3	497,0	161,1	613,0	451,9	45,1
165	166,5	659,6	493,1	166,3	614,0	447,7	45,4
170	171,7	660,9	489,2	171,5	615,0	443,5	45,7
175	176,9	662,1	485,2	176,7	615,9	439,2	46,0
180	182,2	663,2	481,0	181,9	616,7	434,8	46,2
185	187,5	664,3	476,8	187,2	617,6	430,4	46,4
190	192,8	665,3	472,5	192,3	618,3	426,0	46,5
195	198,1	666,2	468,1	197,7	619,1	421,4	46,7
200	203,5	667,0	463,5	203,1	619,8	416,7	46,8
205	208,9	667,7	458,8	208,4	620,3	411,9	46,9
210	214,3	668,3	454,0	213,8	620,7	407,0	47,0
215	219,8	668,8	449,0	219,2	621,2	402,0	47,0
220	225,3	669,3	443,9	224,7	621,5	396,8	47,1
225	230,8	669,5	438,7	230,1	621,7	391,6	47,1
230	236,4	669,7	433,3	235,6	621,9	386,3	47,0
235	242,1	669,7	427,6	241,2	621,9	380,7	46,9
240	247,7	669,6	421,9	246,7	621,9	375,2	46,7
245	253,5	669,4	415,9	252,4	621,7	369,3	46,6
250	259,2	669,0	409,8	258,0	621,6	363,6	46,2
255	265,0	668,4	403,4	263,7	621,0	357,3	46,1
260	271,0	667,8	396,8	269,6	620,6	351,0	45,8
265	277,0	666,9	389,9	275,4	619,8	344,4	45,5
270	283,0	665,9	382,9	281,3	619,1	337,8	45,1
275	289,2	664,8	375,6	287,3	618,3	331,0	44,6
280	295,3	663,5	368,2	293,3	617,4	324,1	44,1
285	301,6	661,9	360,3	299,4	616,2	316,8	43,5
290	308,0	660,2	352,2	305,6	614,9	309,3	42,9
295	314,4	658,3	343,9	311,8	613,4	301,6	42,3

Temperatuur °C t	Absoluutne rõhk kg/cm² p	Vedeliku kilomaht dm³/kg v'	Auru kilomaht m³/kg v''	Auru erikaal kg/m³ γ''	Vedeliku entroopia kcal/kg °C s'	Auru entroopia kcal/kg °C s''	$s''-s'$ kcal/kg °C r/T
300	87,61	1,4036	0,02163	46,24	0,7767	1,3613	0,5846
305	93,95	1,425	0,01991	50,22	0,7880	1,3516	0,6536
310	100,64	1,448	0,01830	54,64	0,7994	1,3415	0,5421
315	107,69	1,472	0,01682	59,46	0,8110	1,3312	0,5202
320	115,13	1,499	0,01544	64,79	0,8229	1,3206	0,4987
325	122,95	1,529	0,01415	70,68	0,8351	1,3097	0,4746
330	131,18	1,562	0,01295	77,20	0,8476	1,2982	0,4506
335	139,85	1,598	0,01183	84,55	0,8604	1,2860	0,4256
340	148,96	1,641	0,01076	92,90	0,8734	1,2728	0,3994
345	158,54	1,692	0,009759	102,4	0,8871	1,2586	0,3715
350	168,63	1,747	0,008803	113,6	0,9015	1,2433	0,3418
355	179,24	1,814	0,007875	127,0	0,9173	1,2263	0,3090
360	190,42	1,907	0,006963	143,6	0,9353	1,2072	0,2719
365	202,21	2,03	0,00606	165,0	0,9553	1,1833	0,2280
370	214,68	2,23	0,00500	200	0,9842	1,1506	0,1664
371	217,3	2,30	0,00476	210	0,992	1,142	0,150
372	219,9	2,38	0,00450	222	1,002	1,132	0,130
373	222,5	2,50	0,00418	239	1,011	1,116	0,105
374	225,2	2,79	0,00365	274	1,04	1,09	0,05
374,2	225,6	3,04	0,00304	329	1,06		0

Temperatuur °C t	Vedeliku entalpia kcal/kg i'	Auru entalpia kcal/kg i''	Aurustumissoojus kcal/kg r	Vedeliku sisseenergia kcal/kg u'	Aurusisseenergia kcal/kg u''	$u''-u'$ kcal/kg ϱ	$AP\cdot(v''-v')$ kcal/kg $\psi=r-\varrho$
300	321,0	656,1	335,1	318,1	611,7	293,6	41,5
305	327,7	653,6	325,9	324,6	609,8	285,2	40,7
310	334,6	650,8	316,2	331,2	607,7	276,5	39,7
315	341,7	647,8	306,1	338,0	605,4	267,4	38,7
320	349,0	644,2	295,2	345,0	602,6	257,6	37,6
325	356,5	640,4	283,9	352,1	599,7	247,6	36,3
330	364,2	636,0	271,8	359,4	596,2	236,8	35,0
335	372,3	631,1	258,8	367,1	592,4	225,3	33,5
340	380,7	625,6	244,9	375,0	588,1	213,1	31,8
345	389,6	619,3	229,7	383,3	583,0	199,7	30,0
350	398,9	611,9	213,0	392,0	577,1	185,1	27,9
355	409,5	603,2	193,7	401,9	570,2	168,3	25,4
360	420,9	592,8	171,9	412,4	561,8	149,4	22,5
365	434,2	579,6	145,4	424,6	550,9	126,3	19,1
370	452,3	559,3	107,0	441,1	534,2	93,1	13,9
371	457	554	97	445	529	84	13
372	463	547	84	451	524	73	11
373	471	539	68	458	517	59	9
374	488	523	35	473	503	30	5
374,2	505		0	488		0	0

Tabel I-a[39].

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

[39] 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-a [40].

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

[40] 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	1,3203
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 III.

Ülekuumendatud veeauru tõelised erisoojused c_p kcal/kg °C.

Rõhk	Temperatuur °C																
$\frac{kg}{cm^2}$	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
10	0,606	0,563	0,540	0,528	0,521	0,516	0,504	0,512	0,511	0,511	0,511	0,512	0,513	0,515	0,516	0,518	0,520
20			0,699	0,629	0,591	0,570	0,556	0,548	0,542	0,538	0,535	0,533	0,532	0,532	0,531	0,532	0,533
30				0,813	0,703	0,644	0,610	0,589	0,575	0,566	0,559	0,555	0,551	0,547	0,547	0,546	0,545
40					0,878	0,751	0,681	0,640	0,614	0,597	0,586	0,577	0,571	0,566	0,563	0,560	0,558
50						0,901	0,774	0,703	0,660	0,632	0,614	0,601	0,591	0,584	0,579	0,574	0,571
60						1,115	0,897	0,781	0,713	0,672	0,645	0,626	0,613	0,603	0,595	0,589	0,584
70							1,060	0,878	0,777	0,717	0,679	0,653	0,635	0,622	0,611	0,604	0,597
80							1,294	1,000	0,854	0,769	0,717	0,683	0,659	0,642	0,629	0,619	0,611
90							1,686	1,161	0,955	0,829	0,759	0,714	0,684	0,662	0,646	0,634	0,624
100								1,396	1,058	0,898	0,806	0,749	0,711	0,684	0,664	0,650	0,638
110								1,791	1,205	0,979	0,859	0,787	0,739	0,707	0,683	0,666	0,652
120									1,416	1,077	1,919	0,828	0,770	0,731	0,703	0,682	0,667

Tabel IV.

Ülekuumendatud veeauru keskmised erisoojused c_{pm} kcal/kg °C, arvates kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni antud ülekuumendustemperatuurini t.

Rõhk $\frac{kg}{cm^2}$	Temperatuur °C																
	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
10	0,617	0,583	0,567	0,556	0,548	0,542	0,538	0,534	0,531	0,529	0,527	0,526	0,525	0,524	0,523	0,543	0,523
20			0,722	0,676	0,650	0,629	0,614	0,603	0,594	0,586	0,580	0,575	0,571	0,568	0,565	0,562	0,560
30				0,833	0,774	0,733	0,700	0,677	0,660	0,645	0,634	0,625	0,617	0,611	0,605	0,600	0,596
40					0,918	0,856	0,796	0,757	0,728	0,706	0,689	0,674	0,663	0,653	0,644	0,637	0,631
50						0,977	0,905	0,846	0,802	0,771	0,745	0,725	0,709	0,695	0,683	0,674	0,665
60						1,161	1,031	0,944	0,883	0,839	0,805	0,777	0,756	0,738	0,723	0,710	0,699
70							1,173	1,056	0,972	0,912	0,867	0,833	0,804	0,782	0,763	0,747	0,733
80							1,377	1,188	1,069	0,994	0,935	0,890	0,855	0,827	0,834	0,785	0,768
90								1,349	1,187	1,082	1,008	0,952	0,909	0,875	0,847	0,824	0,804
100								1,568	1,317	1,190	1,092	1,021	0,968	0,926	0,893	0,865	0,842
110								1,901	1,510	1,311	1,186	1,098	1,034	0,983	0,943	0,910	0,883
120									1,754	1,465	1,302	1,187	1,106	1,045	0,997	0,958	0,926

Tabel IV-a.

Ülekuumendatud veeauru keskmised erisoojused c_{pm} kcal/kg °C, arvates kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni antud ülekuumendustemperatuurini t.

$p =$	0,5	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$t_s =$	80,9	99,1	119,6	142,9	158,1	169,6	179,1	187,1	194,1	200,4	206,1	211,4	216,2	220,8	225,0	220,0	232,8
120	0,473	0,481	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
140	0,471	0,478	0,494	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
160	0,469	0,476	0,490	0,517	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
180	0,468	0,474	0,487	0,512	0,538	0,569	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	0,467	0,473	0,485	0,507	0,530	0,556	0,584	0,615	0,653	—	—	—	—	—	—	—	—
220	0,467	0,473	0,483	0,503	0,524	0,546	0,570	0,556	0,625	0,657	0,692	0,733	0,779	—	—	—	—
240	0,467	0,472	0,482	0,500	0,519	0,539	0,559	0,581	0,605	0,631	0,659	0,689	0,722	0,758	0,799	0,844	0,893
260	0,467	0,472	0,481	0,497	0,515	0,533	0,551	0,570	0,590	0,611	0,635	0,658	0,684	0,712	0,742	0,772	0,806
280	0,468	0,472	0,480	0,496	0,512	0,527	0,544	0,562	0,579	0,597	0,617	0,636	0,658	0,680	0,703	0,727	0,751
300	0,460	0,473	0,480	0,495	0,510	0,524	0,539	0,555	0,570	0,585	0,603	0,619	0,638	0,656	0,675	0,695	0,714
320	0,470	0,473	0,480	0,494	0,508	0,521	0,535	0,548	0,563	0,575	0,592	0,607	0,622	0,638	0,654	0,670	0,686
340	0,470	0,474	0,481	0,493	0,507	0,518	0,532	0,545	0,557	0,570	0,583	0,597	0,610	0,623	0,637	0,651	0,665
360	0,471	0,474	0,481	0,494	0,506	0,516	0,529	0,540	0,552	0,565	0,576	0,588	0,600	0,612	0,624	0,635	0,648
380	0,472	0,475	0,482	0,494	0,505	0,515	0,527	0,538	0,548	0,560	0,570	0,581	—	—	—	—	—
400	—	—	0,483	0,494	0,505	0,514	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
450	—	—	0,485	0,495	0,505	0,513	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	—	—	0,487	0,497	0,505	0,513	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
550	—	—	0,490	0,499	0,506	0,513	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabel V[41].

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	2,13 27
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

[41] 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	1,9421
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	792,2	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	ε	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	656,7	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	0,1363
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

$t°$ C \ p_{ata}	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	0,1975	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

t° C \ p_{ata}	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	0,7295	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

Tabel VI.

Elavhõbeda kuiva küllastunud auru tabel.

Temperatuur	Rõhk	Entalpia kcal/kg		Aurustumissoojus	Entroopia kcal/kg °C		Kilomaht m³/kg	
		Vedelik	Aur		Vedelik	Aur	Vedelik	Aur
t °C	ata	$q \approx i'$	i''	r	s'	s''	v'	v''
118,5	0,0010	3,96	76,22	72,26	0,0119	0,1959	0,0000752	165,9
128,4	0,0016	4,23	76,44	72,21	0,0126	0,1920	753	113,0
134,6	0,002	4,45	76,61	72,16	0,0132	0,1902	754	86,16
144,1	0,003	4,76	76,86	72,10	0,0139	0,1867	755	58,78
151,2	0,004	4,98	77,03	72,05	0,0145	0,1843	756	44,84
161,5	0,005	5,31	77,32	71,98	0,0152	0,1808	758	30,62
168,9	0,008	5,58	77,62	71,94	0,0158	0,1785	759	23,35
175,0	0,010	5,79	77,69	71,90	0,0162	0,1767	0,0000760	18,94
186,6	0,015	6,16	77,98	71,82	0,0171	0,1733	761	12,95
195,0	0,02	6,44	78,20	71,76	0,0178	0,1711	762	9,893
207,6	0,03	6,85	78,53	71,68	0,0186	0,1677	764	6,772
216,9	0,04	7,16	78,78	71,62	0,0193	0,1654	765	5,178
221,5	0,05	7,41	78,98	71,57	0,0198	0,1636	766	4,206
230,9	0,06	7,63	79,16	71,53	0,0202	0,1621	767	3,550
241,0	0,08	7,98	79,44	71,46	0,0208	0,1598	769	2,716
249,6	0,10	8,25	79,66	71,41	0,0213	0,1580	0,0000770	2,209
256,7	0,12	8,48	79,84	71,36	0,0218	0,1565	771	1,866
262,7	0,14	8,68	80,00	71,32	0,0222	0,1553	772	1,618
268,0	0,16	8,86	80,14	71,28	0,0225	0,1542	772	1,430
272,9	0,18	9,02	80,27	71,25	0,0228	0,1533	773	1,282
277,3	0,20	9,16	80,38	71,22	0,0231	0,1525	0,0000774	1,1630
286,7	0,25	9,46	80,62	71,16	0,0236	0,1507	775	0,9464
294,4	0,30	9,73	80,84	71,11	0,0241	0,1494	776	0,7995
301,7	0,35	9,96	81,02	71,06	0,0245	0,1481	777	0,6941
308,0	0,40	10,18	81,19	71,01	0,0249	0,1471	779	0,6140
318,8	0,5	10,55	81,49	70,94	0,0255	0,1458	0,0000780	0,5003
328,0	0,6	10,86	81,74	70,88	0,0260	0,1439	781	0,4234
335,9	0,7	11,12	81,94	70,82	0,0265	0,1428	783	0,3677
340,7	0,8	11,34	82,01	70,77	0,0269	0,1418	0,0000783	0.3253
349,2	0,9	11,56	82,29	70,73	0,0272	0,1408	784	0,2922
355,9	1,0	11,76	82,45	70,68	0,0275	0,1400	0,0000785	0,2655

Temperatuur	Rõhk	Entalpia kcal/kg		Aurustumissoojus	Entroopia kcal/kg °C		Kilomaht m³/kg	
		Vedelik	Aur		Vedelik	Aur	Vedelik	Aur
$t°$ C	ata	$q \approx i'$	i''	r	s'	s''	v'	v''
365,8	1,2	12,11	82,66	70,62	0,0280	0,1386	0,0000787	0,2240
374,0	1,4	12,58	82,94	70,56	0,0285	0,1375	788	0,1953
381,9	1,6	12,64	83,14	70,50	0,0290	0,1366	789	0,1730
389,3	1,8	12,90	83,35	70,45	0,0294	0,1357	790	0,1555
395,8	2,0	13,11	83,51	70,40	0,0297	0,1349	0,0000794	0,1414
401,7	2,2	13,32	83,68	70,36	0,0300	0,1342	792	0,1296
407,4	2,4	13,54	83,86	70,32	0,0303	0,1335	793	0,1198
412,4	2,6	13,70	83,98	70,28	0,0305	0,1329	794	0,1114
417,0	2,8	13,87	84,11	70,24	0,0307	0,1324	794	0,1043
422,4	3,0	14,04	84,25	70,21	0,0309	0,1320	0,0000795	0,09798
432,8	3,5	14,40	84,58	70,13	0,0315	0,1308	797	0,08524
442,4	4,0	14,74	84,80	70,06	0,0319	0,1298	798	0,07558
451,0	4,5	15,03	85,02	69,99	0,0323	0,1289	799	0,06801
458,0	5,0	15,30	85,28	69,93	0,0327	0,1282	0,0000801	0,06487
466,8	5,5	15,56	85,48	69,87	0,0331	0,1276	802	0,05682
472,8	6,0	15,78	85,59	69,84	0,0334	0,1270	803	0,05254
479,1	6,5	15,99	85,75	69,76	0,0337	0,1264	804	0,04891
485,1	7,0	16,20	85,91	69,74	0,0339	0,1258	805	0,04578
496,3	8,0	16,59	86,20	69,64	0,0344	0,1249	806	0,04065
506,3	9,0	16,94	86,47	69,53	0,0349	0,1241	808	0,03660
515,5	10,0	17,25	86,70	69,45	0,0356	0,1234	0,0000809	0,03383
532,3	12,0	17,85	87,15	69,30	0,0360	0,1220	812	0,02837
546,7	14,0	18,35	87,54	69,16	0,0366	0,1210	814	0,02476
559,8	16,0	18,84	87,84	69,03	0,0372	0,1201	816	0,02200
571,4	18,0	19,28	88,14	68,91	0,0377	0,1193	818	0,01933
582,4	20,0	19,62	88,42	68,80	0,0384	0,1185	0,0000819	0,01808
606,5	25,0	20,46	89,00	68,54	0,0391	0,1170	823	0,01487
627,1	30,0	21,18	89,48	68,30	0,0399	0,1158	827	0,01268
645,0	35,0	21,83	89,91	68,08	0,0406	0,1147	830	0,01109
661,8	40,0	22,41	90,28	67,87	0,0412	0,1138	832	0,009873
677,0	45,0	22,90	90,62	67,67	0,0418	0,1130	835	0,008923
690,9	50,0	23,44	90,91	67,47	0,0423	0,1123	837	0,008148

Tabel VII.

Niiske õhu psühromeetriline tabel [42] ühe kg kuiva õhu kohta.
$B = 760$ mm Hg, $\varphi = 100\%$.

t °C	Veeauru partsiaalrõhk mm Hg	Tehniline niiskus d_0 g	Maht m³		Niiske õhu erisoojus c_p kcal/kg °C	Entalpia kcal	
			Kuiv õhk	Niiske õhk		Kuiv õhk J_{δ}	Niiske õhk J
— 10,0	2,16	1,77	0,745	0,747	0,2408	— 2,40	— 1,35
— 9,0	2,34	1,92	0,748	0,750	0,2409	— 2,16	— 1,02
— 8,0	2,52	2,07	0,751	0,754	0,2409	— 1,92	— 0,69
— 7,0	2,73	2,24	0,754	0,757	0,2410	— 1,68	— 0,35
— 6,0	2,94	2,42	0,756	0,759	0,2411	— 1,44	0,00
— 5,0	3,17	2,61	0,759	0,762	0,2412	— 1,20	0,35
— 4,0	3,42	2,81	0,762	0,765	0,2413	— 0,96	0,71
— 3,0	3,68	3,03	0,765	0,769	0,2414	— 0,72	1,09
— 2,0	3,96	3,26	0,768	0,772	0,2415	— 0,48	1,46
— 1,0	4,26	3,51	0,771	0,775	0,2416	— 0,24	1,86
0	4,58	3,77	0,773	0,777	0,2417	0,00	2,25
1,0	4,93	4,06	0,776	0,781	0,2418	0,24	2,67
2,0	5,29	4,36	0,779	0,784	0,2420	0,48	3,09
3,0	5,68	4,68	0,782	0,788	0,2421	0,72	3,52
4,0	6,10	5,03	0,785	0,791	0,2423	0,96	3,97
5,0	6,54	5,40	0,788	0,795	0,2424	1,20	4,44
6,0	7,01	5,79	0,790	0,797	0,2426	1,44	4,91
7,0	7,51	6,21	0,793	0,801	0,2428	1,68	5,41
8,0	8,05	6,66	0,796	0,805	0,2430	1,92	5,92
9,0	8,61	7,13	0,799	0,808	0,2432	2,16	6,45
10,0	9,21	7,63	0,802	0,812	0,2434	2,40	6,99

[42] Väljavõte I. I. Levini poolt koostatud tabelist „Холодильные машины", Пищепромиздат, 1939.

t °C	Veeauru partsiaalrõhk mm Hg	Tehniline niiskus d_φ g	Maht m³		Niiske õhu erisoojus c_p kcal	Entalpia kcal	
			Kuiv õhk	Niiske õhk		Kuiv õhk J_δ	Niiske õhk J
11,0	9,84	8,16	0,805	0,816	0,2437	2,64	7,56
12,0	10,52	8,73	0,807	0,818	0,2439	2,88	8,14
13,0	11,23	9,33	0,810	0,822	0,2442	3,12	8,75
14,0	11,99	9,97	0,813	0,826	0,2445	3,36	9,38
15,0	12,79	10,6	0,816	0,830	0,2448	3,60	10,00
16,0	13,64	11,4	0,819	0,834	0,2451	3,84	10,73
17,0	14,53	12,1	0,822	0,838	0,2454	4,08	11,40
18,0	15,48	12,9	0,824	0,841	0,2458	4,32	12,13
19,0	16,48	13,8	0,827	0,845	0,2462	4,56	12,92
20,0	17,54	14,7	0,830	0,850	0,2466	4,80	13,71
21,0	18,66	15,7	0,833	0,854	0,2471	5,04	14,57
22,0	19,83	16,7	0,836	0,858	0,2475	5,28	15,42
23,0	21,07	17,7	0,839	0,863	0,2480	5,52	16,28
24,0	22,38	18,9	0,841	0,867	0,2485	5,76	17,25
25,0	23,76	20,1	0,844	0,871	0,2490	6,00	18,23
26,0	25,22	21,3	0,847	0,876	0,2496	6,24	19,21
27,0	26,75	22,7	0,850	0,881	0,2502	6,48	20,32
28,0	28,36	24,1	0,853	0,886	0,2508	6,72	21,4
29,0	30,05	25,6	0,856	0,891	0,2515	6,96	22,59
30,0	31,83	27,2	0,858	0,896	0,2522	7,20	23,82
31,0	33,71	28,9	0,861	0,901	0,2530	7,44	25,11
32,0	35,67	30,6	0,864	0,907	0,2538	7,68	26,40
33,0	37,74	32,5	0,867	0,912	0,2546	7,92	27,82
34,0	39,91	34,5	0,870	0,918	0,2555	8,16	29,30
35,0	42,19	36,6	0,873	0,924	0,2565	8,40	30,89
36,0	44,58	38,8	0,875	0,930	0,2575	8,64	32,45
37,0	47,08	41,1	0,878	0,936	0,2585	8,88	34,15
38,0	49,71	43,5	0,881	0,943	0,2596	9,12	35,85

t °C	Veeauru partsiaalrõhk mm Hg	Tehniline niiskus d_0 g	Maht m³		Niiske õhu erisoojus c_p kcal	Entalpia kcal	
			Kuiv õhk	Niiske õhk		Kuiv õhk J_{δ}	Niiske õhk J
39,0	52,46	46,1	0,884	0,950	0,2607	9,36	37,71
40,0	55,34	48,8	0,887	0,957	0,2620	9,60	39,63
41,0	58,36	51,7	0,890	0,964	0,2633	9,84	41,68
42,0	61,52	54,8	0,892	0,971	0,2647	10,08	43,85
43,0	64,82	58,0	0,895	0,979	0,2661	10,32	46,09
44,0	68,28	61,4	0,898	0,987	0,2669	10,56	48,46
45,0	71,90	65,0	0,901	0,995	0,2693	10,80	50,95
46,0	75,67	68,8	0,904	1,004	0,2710	11,04	53,54
47,0	79,62	72,8	0,907	1,013	0,2728	11,28	56,31
48,0	83,74	77,0	0,909	1,022	0,2747	11,52	59,18
49,0	88,05	81,5	0,912	1,032	0,2767	11,76	62,25
50,0	92,50	86,2	0,915	1,042	0,2788	12,00	65,44

KIRJANDUS.

А. М. Литвин, Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1947.

А. С. Ястржембский, Техническая термодинамика.

В. С. Жуковский, Техническая термодинамика, Госиздат, 1940.

В. В. Сушков, Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1946.

А. В. Раковский, Курс физической химии, Госхимиздат.

К. А. Раков, Пар высокого давления, НКЭП СССР, 1940.

А. Н. Лонскин, А. А. Канаев, Бинарные установки, Машгиз 1946.

М. П. Вукалович, Термодинамические свойства водяного пара, Госэнергоиздат, 1946.

MÄRKUS.

„Tehnilise termodünaamika" käesolevas köites ettenähtud peatükid reaktiivmootorite kohta on liidetud 1949. a. ilmuva sama autori teose „Plahvatusmootorid" juurde, kuhu nad sisuliselt rohkem kuuluvad.

J. Ivand.

SISUKORD.

Lk.

Eessõna 3

I peatükk.

Reaalsed gaasid.

1. Reaalsete gaaside omadused 5
2. Reaalseid gaase karakteriseerivad diagrammid 9
3. Van-der-Waals'i võrrand 16
4. M. P. Vukalovitš'i võrrand 29
5. Reaalsete gaaside ja aurude agregaatoleku muutus 32
6. Aine faasi muundumise soojus 37
7. Clapeyroni-Clausius'e võrrand 40
8. *T-s*-diagramm 43
9. *i-s*-diagramm 49

II peatükk.

Veeaur.

10. Vee kuumendamine ja kaloriliste parameetrite nullnivoo 55
11. Vee aurustumine 60
12. Auru kuivusastme määramine 64
13. Ülekuumendatud aur 64
14. Näited auru tabelite kasutamise kohta 72

III peatükk.

Termodünaamilised protsessid veeauruga.

15. Isohooriline protsess 79
16. Isobaariline protsess 84
17. Isotermiline protsess 90
18. Adiabaatiline protsess 95
19. Näiteid protsessideks veeauruga 105

IV peatükk.

Ringprotsessid veeauruga.

20. Carnot' ringprotsess 117
21. Rankine'i ringprotsess 121

Lk.
22. Rankine'i ringprotsess ülekuumendatud auruga 128
23. Rankine'i ringprotsessi termilise kasuteguri sõltuvus auru adiabaatilise paisumise lõpprõhust 132
24. Rankine'i ringprotsessi termilise kasuteguri sõltuvus auru algparameetritest. Kõrgrõhu aur 135
25. Ringprotsess auru vahepealse ülekuumendamisega 142
26. Mayeri ringprotsess 149
27. Regeneratiivne ringprotsess 152
28. Binaarne ringprotsess 164
29. Termokeemilised ringprotsessid 173

V peatükk.

Gaaside ja aurude kineetika.

30. Gaasi statsionaarse voolamise mõisted 184
31. Ideaalse gaasi voolamisvõrrandid 185
32. Gaasi kiirus statsionaarsel adiabaatilisel voolamisel 190
33. Gaasijoa pikiprofiil gaasi kiireneval liikumisel 195
34. Gaasi kulu võrrand statsionaarsel adiabaatilisel voolamisel 199
35. Gaasi voolamine helilevimiskiirusest suurema kiirusega vasturõhu keskkonda . . 215
36. Reaalse gaasi adiabaatiline voolamine läbi düüsi 216
37. Tagastatamatu voolamisprotsessi diferentsiaalvõrrandid 232
38. Gaaside ja aurude muljumine 235
39. Ideaalse gaasi muljumine 237
40. Reaalse gaasi muljumine 238
41. Veeauru muljumine 243

VI peatükk.

Aurujõuseadme soojusbilanss.

42. Aurujõumasinate ja jõuagregaadi kasutegurite mõisted 248
43. Aurujõuseadme karakteristika ja soojusbilanss 254
44. Soojuse kombineeritud kasutamine 260

VII peatükk.

Niiske õhk.

45. Veeauru partsiaalrõhk. Absoluutne ja relatiivne niiskus 268
46. Tehniline niiskus d 274
47. Niiske õhu erikaal $\gamma_{n\tilde{o}}$ 276
48. Niiskes õhus oleva kuiva õhu ja veeauru suhtelised osakaalud 277
49. Niiske õhu gaasikonstant 278
50. Niiske õhu maht ühe kilogrammi kuiva õhu kohta 278
51. Niiske õhu entalpia 279
52. J-d-diagramm 280
53. Baromeetrilise rõhu muutuse mõju $\varphi = konst$ kõveratele J-d-diagrammil . . . 284
54. Segu parameetrite määramine J-d-diagrammi abil 286
55. J-d-diagrammi rakendamisest kuivatusseadmetele 289

VIII Peatükk.

Gaasiturbiinid.

		Lk.
56.	Gaasiturbiinide eelised ja liigitus	291
57.	Ideaalse gaasiturbiinseadme lahtine ringprotsess ehk lahtine tagastatav põhi-ringprotsess	292
58.	Gaasiturbiinseadme tagastamatu põhi-ringprotsess	299
59.	Regeneratiivne ringprotsess	311
60.	Ideaalne regeneratiivne ringprotsess komprimeeritava õhu vahejahutamisega	317
61.	Ideaalne regeneratiivne ringprotsess õhu astmelise vahejahutamisega ja soojuse astmelise protsessi juhtimisega	323
62.	Suletud ringprotsessiga gaasiturbiinseade	334
63.	Gaasiturbiinseade põlemisega jääval mahul *($v = konst$)*	339

TABELITE LOETELU.

Tabel I	— Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt rõhust)	345
Tabel II	— Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt temperatuurist)	353
Tabel I-a	— Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt rõhust)	359
Tabel II-a	— Kuiva küllastunud veeauru tabel (olenevalt temperatuurist)	362
Tabel III	— Ülekuumendatud veeauru tõelised erisoojused c_p kcal/kg °C	365
Tabel IV	— Ülekuumendatud veeauru keskmised erisoojused c_{pm} kcal/kg °C, arvates kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni antud ülekuumendustemperatuurini t	366
Tabel IV-a	— Ülekuumendatud veeauru keskmised erisoojused c_{pm} kcal/kg °C, arvates kuiva küllastunud auru temperatuurist t_s kuni antud ülekuumendustemperatuurini t	367
Tabel V	— Ülekuumendatud veeauru tabel	368
Tabel VI	— Elavhõbeda kuiva küllastunud auru tabel	386
Tabel VII	— Niiske õhu psühromeetriline tabel ühe kg kuiva õhu kohta $B = 760$ mm Hg, $\varphi = 100\%$	388

DIAGRAMMIDE LOETELU.

		Joon.	Lk.
Õhu	isotermid *pv-p*-koordinaatide süsteemis	3	10
CO_2	" k_1-*p*- " "	4	12
Õhu	" k_2-*p*- " "	6	14
O_2	" k_2-*p*- " "	7	15
N_2	" k_2-*p*- " "	8	16
H_2	" " " "	9	17
NH_4	" " " "	10	18
CH_4	" " " "	11	19
Cl	" " " "	12	20
CO_2	" " " "	13	21
CO	" " " "	14	22
H_2O	" " " "	15	23

N. V. Gorbi nim. Tartu Linna Keskraamatukogu

	Joon.	Lk.
Veeauru *T-s*-diagramm	25	44
Veeauru *i-s*-diagramm	31 ja 31-a	52
Ülekuumendatud veeauru erisoojuse c_p kcal/kg diagramm	39, 39-a ja 39-b	67—69
Elavhõbeda-auru *i-s*-diagramm	99	166
Niiske õhu *J-d*-diagramm	146	285
Kirjandus		391

N. V. Gogoli nim. Tartu
Linna Keskraamatukogu
(Tehnika)

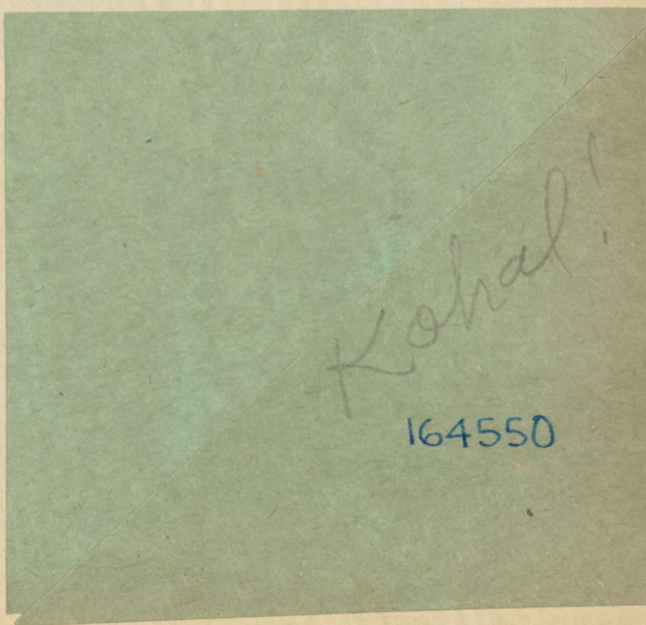
Vastutav toimetaja
A. Särev.

Tehniline toimetaja
H. Kohlap.

Ladumisele antud 10. V 1948. Trükkimisele antud 18. VIII 1948. Paberi kaust 67 × 95 1/16. Trükipoognaid 24 3/4. Autoripoognaid 22,69. Arvestuspoognaid 28,43. MB-01098. Laotihedus trpg. 51800. Tiraaž 3200. Trükikoja tellimise nr. 1630. Trükikoda „Kommunist", Tallinn Pikk 2.

Я. Иванд.
Техническая термодинамика II.
На эстонском языке.
Эгосиздат „Научная Литература", Тарту.

1.—



Rbl.
Uus hind
Rbl. 10 95

A
16670
1948
F

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 01040998 7

Rbl
Uus hind
Rbl 10 95

A
16670
1948
(F

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 01040998 7

J. IVAND

TEHNILINE TERMODÜNAAMIKA

II

J. IVAND

TEHNILINE TERMODÜNAAMIKA

II



J. IVAND

TEHNILINE TERMODÜNAAMIKA

II

RK

„TEADUSLIK KIRJANDUS“