



A. Ots

*Katelseadme
soojus-
tehniline
arvutus*

Tallinn • 1966

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
Soojusenergeetika kateeder

A. O t s

KATELSEADME SOOJUSTEHNILINE
ARVUTUS

Metoodiline juhend

Tallinn
1966

5288

A n n o t a t s i o o n

Käesolevas metoodilises juhendis esitatakse katelseadme soojustehnilise arvutuse metoodika mahus, mis on vajalik katelseadme projekti koostamiseks üliõpilastele, kellele katelseadmete kursus ei ole põhiõppeaineks.

S i s u k o r d

	Lk.
1. Sissejuhatus	3
2. Kütuse põlemiseks vajalik õhukogus	5
3. Põlemisgaaside kogused ja kolmeaatomiliste gaaside partsiaalrõhud	5
4. Õhu ja põlemisgaaside entalpia	7
5. Katelseadme soojusbilanss, kasutegur ja kütusekulu	8
6. Kolde arvutus	12
7. Konvektiivküttepindade arvutus	20
8. Üksikute konvektiivküttepindade arvutamise metoo- dika	32
9. Katelseadme küttepindade arvutamise näide	38
Tabelid ja joonised	
Tabel 1a. Tahke- ja vedelkütuste omadused	55, 56
" 1b. Gaaskütuste omadused	57
" 2. Gaaside keskmised isobaarsed mahterisoojused	58
" 3. Õhu ja põlemisgaaside füüsikalised konstan- did	59
" 4. Veeauru füüsikalised konstandid	60
Joonised 1 - 9	61-67
Kirjandus	68

Vastutav toimetaja E. Ratnik

ТАЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра теплоэнергетики

А. Отс

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Методическое руководство

На эстонском языке

Trükkimisele antud 12.III 66. Paber 60x84, 1/16
Trükipg. 4,25 + 2 lisa. Tingpg. 4,4. Tiraaž 600
TPI rotaprint, 1966. Tell.nr. 168
Tasuta

2

Riikliku Ülikooli
amatukogu
8823

ARHIIVKOGU

1. Sissejuhatus

Katelseadme soojustehniline arvutus jaguneb konstruktor- ja kontrollarvutuseks.

Konstruktorarvutus tehakse katelseadme projekteerimisel. Selle ülesandeks on katelseadme kolde- ja küttepindade mõõtmete määramine katla nominaalkoormusest lähtudes. Konstruktorarvutusel peab olema teada: katelseadme aurutoodang, auru parameetrid, toitevee temperatuur ja põletatava kütuse omadused. Olenevalt katelseadme võimsusest, auruparameetritest ja põletatava kütuse omadustest valitakse kütuse põletamise moodus, kolde tüüp, katelseadme üldine kompositsioon, katelseadmest väljuvate gaaside temperatuur ja õhu eelsoojendustemperatuur.

Kontrollarvutus tehakse olemasolevale katelseadmele. Tema ülesandeks on auruparameetrite, õhu eelsoojendustemperatuuri, katlast väljuvate gaaside temperatuuri jt. suuruste määramine katelseadme rekonstrueerimisel, üleviimisel teisele kütusele, töötamisel nominaalsest koormusest erinevatel koormustel jt. juhtudel.

Katelseadme arvutust (nii konstruktorarvutust kui ka kontrollarvutust) alustatakse kütuse põlemisel tekkivate gaaside koguste ja entalpiate määramisest. Seejärel koostatakse katelseadme soojusbilanss, arvutatakse katelseadme kasutegur ja kütusekulu ning sõltuvana arvutuse iseloomust küttepinna suurus, küttepinna soojusvastuvõtt, küttepinnaast väljuvate gaaside temperatuur jne.

Katelseadme konstruktorarvutusest. Lähtudes koldest väljuvate gaaside temperatuurist, arvutatakse ülekantav soojushulk koldes ning selle alusel vajalik küttepinna. Kolde järel paikneva aurutusküttepinna suuruse määramisel võetakse aluseks gaaside temperatuur pärast aurutusküttepinna (enne auru-

ülekuumendit). Festooni (mis on kolde tagaakraani jätkuks) soojusvastuvõtt ning gaaside temperatuur tema järel määratakse kontrollarvutusega. Lähtesuursteks seejuures on festooni küttepinna suurus ja koldest väljuvate gaaside temperatuur. Auruülekuumendi küttepinna arvutamise aluseks on tema soojusvastuvõtt, mis määratakse auru entalpia vahetuse kaudu küttepinnast väljumisel ja küttepinda sisenemisel. Ökonomaiseril projektarvutusel lähtutakse samuti soojusvastuvõttust. Ökonomaiseril soojusvastuvõtt arvutatakse kas vee või gaaside entalpia vahetuse alusel enne ja pärast küttepinda. Seejuures gaaside entalpia ökonomaiserist väljumisel (soojusvastuvõtu määramisel gaasidepoolse soojusbilansi kaudu) saadakse õhuelsoojendi soojusbilansist lähtudes. Õhuelsoojendi küttepinda arvutatakse ülekantud soojushulga järgi, mis määratakse kas õhu- või gaasidepoolse soojusbilansi alusel.

Katelseadme kontrollarvutusest. Katelseadme soojustehnilise kontrollarvutuse meetodika erineb oluliselt konstruktorarvutuse meetodikast.

Enne eeldatakse katelseadme väljuvate gaaside ja kuuma õhu temperatuur. Katelseadme väljuvate gaaside eeldatud temperatuuri järgi arvutatakse soojuskadu katelseadme väljuvate gaasidega ning, arvestades teisi soojuskadusid, katelseadme kasutegur ja viimase kaudu kütusekulu.

Seejärel arvutatakse koldest väljuvate gaaside temperatuur, gaaside temperatuur festooni, aurutusküttepindade, ülekuumendi ja ökonomaiseril järel. Lõpuks määratakse arvutuslik lahkuvate gaaside ja kuuma õhu temperatuur. Kui arvutuse tulemusena saadud katelseadme väljuvate gaaside temperatuur erineb vähem kui ± 10 deg ja kuuma õhu temperatuur vähem kui ± 40 deg võrra oletatud temperatuuridest, loetakse arvutus lõpetatuks. Vastasel korral tuleb arvutust korrata.

2. Kütuse põlemiseks vajalik õhukogus

Kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajalikuks õhukoguseks nimetatakse õhu kogust, mis on vajalik kas 1 kg (tahke ja vedelkütus) või 1 m³ (gaaskütus) täielikuks põlemiseks vastavalt põlemisreaktsioonide stöhiomeetrilistele vahekordadele.

Tahkete ja vedelkütuste põletamisel kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajalik õhukogus

$$V^0 = 0,0889(C^t + 0,375 S_{o+p}^t) + 0,265 H^t - 0,0333 O^t \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1)$$

ning gaaskütuse põletamisel

$$V^0 = 0,0476 [0,5 CO + 0,5 H_2 + 2,0 CH_4 + 1,5 H_2S + \\ + \sum (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2] \text{ m}^3/\text{m}^3, \quad (2)$$

kus C^t , S_{o+p}^t , H^t , O^t - vastavalt süsiniku, orgaanilise ja püriitse väevli, vesiniku ning hapniku sisaldus kütuse tarbimisaines %, CO , H_2 , CH_4 ... - üksikute gaasikomponentide sisaldus põletatavas gaasis %.

Kütuse põlemiseks tegelikult vajalik õhukogus

$$V^k = \alpha V^0 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ või } \text{m}^3/\text{m}^3. \quad (3)$$

3. Põlemisgaaside kogused ja kolmeatomiliste gaaside partsiaalrõhud

Kütuste põletamisel tekkivate gaaside hulgad (normaal-kuupmeetrites) arvutatakse tahkete ja vedelkütuste põletamisel 1 kg kütuse ning gaaskütuste põletamisel 1 m³ gaasi kohta normaaltingimustel.

Kuivade kolmeatomiliste gaaside kogus põlemisgaasides tahkete ja vedelkütuste põletamisel arvutatakse valemiga

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 0,01866(C^t + 0,375 S_{o+p}) + 0,00509 k_{CO_2} (CO_2)_k^t \text{ m}^3/\text{kg} \quad (4)$$

ning gaaskütuse põletamisel -

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n) \text{ m}^3/\text{m}^3, \quad (5)$$

kus k_{CO_2} - karbonaatide lagunemisaste,

$(CO_2)_k^t$ - karbonaatse süsihappegaasi sisaldus kütuse tarbimises %.

Põlevkivi kamberpõletamisel $k_{CO_2} = 0,95$, kihtpõletamisel aga $k_{CO_2} = 0,70$. Kõigi ülejäänud² kütuste põletamisel, sõltumata põletusviisist, $k_{CO_2} = 0$.

Teoreetiline veeauru kogus põlemisgaasides tahkete ja vedelkütuste põletamisel avaldub valemiga

$$V_{H_2O}^o = 0,111 H^t + 0,0124 W^t + 0,0161 V^o \text{ m}^3/\text{kg} \quad (6)$$

ning gaaskütuse põletamisel -

$$V_{H_2O}^o = 0,01(H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124 d_g + 0,0161 V^o) \text{ m}^3/\text{m}^3, \quad (7)$$

kus W^t - tahke või vedelkütuse niiskus %, d_g - gaaskütuse niiskus g/m^3 .

Tegelik veeauru kogus põlemisgaasides

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 (\alpha - 1)V^o \text{ m}^3/\text{kg} \text{ või } \text{m}^3/\text{m}^3. \quad (8)$$

Teoreetiline lämmastikukogus põlemisgaasides tahkete ja vedelkütuste ning gaaskütuse põletamisel on arvatavastavalt valemitega

$$V_{N_2}^o = 0,79 V^o + 0,008 N^t \text{ m}^3/\text{kg}, \quad (9)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 V^o + 0,01 N_2^k m^3/m^3, \quad (10)$$

kus N_2^t - lämmastikusisaldus kütuse tarbimisesaines %,
 N_2^k - lämmastikusisaldus gaaskütuses %.

Tegelik lämmastikukogus põlemisgaasides

$$V_{N_2}^o = V_{N_2}^o + 0,79 (\alpha - 1) V^o m^3/kg \text{ või } m^3/m^3. \quad (11)$$

Põlemisgaaside teoreetiline kogus

$$V_g^o = V_{RO_2}^o + V_{H_2O}^o + V_{N_2}^o m^3/kg \text{ või } m^3/m^3. \quad (12)$$

Põlemisgaaside tegelik kogus

$$V_g = V_g^o + (\alpha - 1) V^o m^3/kg \text{ või } m^3/m^3. \quad (13)$$

Kuivade kolmeatomiliste gaaside partsiaalrõhk

$$p_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} p \text{ baari} \quad (14)$$

ning veeauru partsiaalrõhk

$$p_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g} p \text{ baari}, \quad (15)$$

kus p - rõhk katlakäikudes baari.

4. Õhu ja põlemisgaaside entalpia

Nii õhu kui ka põlemisgaaside entalpia arvutatakse 1 kg tahke ja vedelkütuse või 1 m³ gaaskütuse kohta.

Õhu entalpia

$$I_{\delta} = \alpha I_{\delta}^o = \alpha V^o c_{\delta} t \text{ kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (16)$$

kus I_{δ}^o - kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajaliku õhukoguse entalpia, kJ/kg või kJ/m³,

t - õhu temperatuur $^{\circ}\text{C}$,

c_0^i - õhu keskmine isobaarne mahterisoojus temperatuurivahemikus $0 - t$, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{deg})$.

Põlemisgaaside entalpia võrdub üksikute gaasikomponentide entalpiate ja lendtuha entalpia summaga

$$I_G = [V_{\text{RO}_2} c_{\text{RO}_2}^i + V_{\text{N}_2}^0 c_{\text{N}_2}^i + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}}^i + 0,01 a_{1.t.} A^t c_t + (\alpha - 1) V^0 c_0^i] \psi \text{ kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (17)$$

kus $c_{\text{RO}_2}^i$, $c_{\text{N}_2}^i$, $c_{\text{H}_2\text{O}}^i$ - vastavalt kuivade kolmeatomiliste gaaside, lämmastiku ja veeauru keskmine isobaarne mahterisoojus temperatuurivahemikus $0 - \psi$ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{deg})$,

$a_{1.t.}$ - gaasidega kaasakanduva tuha (lendtuha) suhteline kogus,

c_t - tuha erisoojus $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg})$,

ψ - gaaside temperatuur $^{\circ}\text{C}$.

Õhu ja põlemisgaaside entalpia arvutamiseks vajalikud gaaside erisoojused on toodud tabelis 2. Tuha erisoojus sõltuvana temperatuurist valitakse järgnevalt: $100^{\circ}\text{C} - 0,808$, $300^{\circ}\text{C} - 0,879$, $600^{\circ}\text{C} - 0,934$, $900^{\circ}\text{C} - 0,971$, $1200^{\circ}\text{C} - 1,00$, $1400^{\circ}\text{C} - 1,13$, $1700^{\circ}\text{C} - 1,21$ ja $2000^{\circ}\text{C} - 1,26$ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg})$. Gaasidega kaasakanduva lendtuha suhteline kogus võrdub: tolmküttekolded - $0,9$, šahtveskitega tolmküttekolded - $0,85$, põlevkivi tolmküttekolded - $0,70$, restkolded - $0,25$.

Katelseadme soojustehnilise arvutuse lihtsustamiseks on soovitatav koostada põlemisgaaside $I - \psi$ diagramm, kuhu kantakse sõltuvus põlemisgaaside entalpia ja temperatuuri vahel mitmesugustel liigõhuteguritel.

5. Katelseadme soojusbilanss, kasutegur ja kütusekulu

Katelseadme soojusbilanss näitab, kuidas jaguneb katlasse sisenev soojus. Katelseadme soojusbilansi alusel mää-

ratakse katelseadme kasutegur ja ajaühikus põletatav kütusekogus (kütusekulu).

Soojusbilanss koostatakse 1 kg põletatava tahke ja vedelkütuse või 1 m³ gaaskütuse kohta.

Kütuse massi- või mahuühikuga koldesse antavat soojushulka nimetatakse kasutatavaks soojuseks ja tähistatakse Q_k^t .

Tahkete ja vedelkütuste põletamisel

$$Q_k^t = Q_a^t + Q_{v.õ.} + Q_{k.f.} + Q_p \quad \text{kJ/kg} \quad (18)$$

ja gaaskütuse põletamisel

$$Q_k^t = Q_a^k + Q_{v.õ.} + Q_{k.f.} \quad \text{kJ/m}^3. \quad (19)$$

Valemites (18) ja (19) esinevatel suurustel on järgmised tähendused:

- Q_a^t - kütuse tarbimisaine alumine kütteväärtus kJ/kg,
- $Q_{v.õ.}$ - õhuga katelseadmesse sisenev soojus, mida on kuumutatud väljaspool katelt (näiteks õhu kuumutamine turbiini vaheltauruga õhuselsoojendi ees paiknevas kalorifeeris) kJ/kg või kJ/m³,
- $Q_{k.f.}$ - kütuse füüsikaline soojus kJ/kg või kJ/m³,
- Q_p - vedelkütuse pihustamiseks kasutatava või resti alla antava auru soojus kJ/kg,
- Q_a^k - gaaskütuse alumine kütteväärtus kJ/m³.

Põlevkivide põletamisel kütuse kasutatav soojus arvutatakse valemiga

$$Q_k^t = Q_a^t + Q_{v.õ.} + Q_{k.f.} + \Delta Q_{ka} \quad \text{kJ/kg.} \quad (20)$$

Siinjuures ΔQ_{ka} tähistab karbonaatide mittetäielikust lagunemisest põhjustatud endotermilise efekti soojust ja ta arvutatakse seosega

$$\Delta Q_{ka} = 40,6(1 - k_{CO_2})(CO_2)_k^t \quad \text{kJ/kg.} \quad (21)$$

Kütuse füüsikalise soojuse määramisel lähtutakse järgmistest kütuse erisoojuste väärtustest [kJ/(kg·deg)]: antrat-

siidid ja lahjad kivisööed - 0,92; kivisööed, pruunsööed ja turvas - 1,10; põlevkivid - 0,88. Masuutide erisoojus $c_M = 1,73 + 0,0025 t$ kJ/(kg.deg), kus t on masuudi temperatuur.

Katelseadme kasutegur

$$\eta_k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \%, \quad (22)$$

- kus q_2 - soojuskadu katelseadme väljuvate gaasidega %,
 q_3 - soojuskadu keemiliselt mittetäielikust põlemisest %,
 q_4 - soojuskadu kütuse mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest %,
 q_5 - soojuskadu katelseadme välisjahtumisest %,
 q_6 - soojuskadu katelseadme eemaldatava šlakiga %.

Soojuskadu katelseadme väljuvate gaasidega arvutatakse valemiga

$$q_2 = \frac{I_{v.g.} - \alpha_{v.g.} I_{\delta}^0}{Q_k} (100 - q_4) \%, \quad (23)$$

kus $I_{v.g.}$ - katelseadme väljuvate gaaside entalpia kJ/kg või kJ/m³,

I_{δ}^0 - kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajaliku õhukoguse entalpia katlasse siseneva õhu temperatuuril kJ/kg või kJ/m³,

$\alpha_{v.g.}$ - liigõhutegur katelseadme järel.

Liigõhutegur katelseadme järel $\alpha_{v.g.}$ sõltub liigõhutegurist kolde lõpus (α_k'') ning väärdõhuteguritest ($\Delta\alpha$) üksikutes katelseadme osades. Liigõhutegur kolde lõpus valitakse alljärgnevalt: tolmküttekolded - 1,25, gaasi- ja masuudikolded - 1,15, liikuva kütusekihiga kolded - 1,30, liikumatu kütusekihiga kolded - 1,40. Väärdõhutegurid üksikutele katlakäikudele: tolmküttekolded - 0,1, gaasi- ja masuudikolded - 0,05, festoon - 0, aurutusküttepindade torukimbud - 0,05, auruülekuumendid - 0,05, suure ja keskmise

võimsusega katelde ökonomaiserid - 0,03, väikekatelde teras-
toru ökonomaiserid - 0,08, malmtoruökonomaiserid - 0,1, õhu-
eelsoojendid - 0,05.

Soojuskadu keemiliselt mittetäielikust põlemisest vali-
takse järgmiselt. Kamberkolded: antratsiidi ja lahjade ki-
visüite põletamisel ($V^1 < 25\%$) - 0%, lendosaderikkad kivisöed
($V^1 > 25\%$), pruunsöed ja põlevkivid - 0,5%, freestur-
vas - 1,0%, masuut ja gaas - 1,5%. Liikuva kütusekihiga kol-
ded: antratsiidid - 0%, pruun- ja kivisöed - 1%, põlevkivid
ja turvas - 2,0%. Liikumatu kütusekihiga kolded: antratsii-
did ja pruunsöed - 2,0%, lahjad kivisöed - 3%, lendosaderik-
kad kivisöed - 5,0%.

Soojuskadu mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest va-
litakse järgmiselt. Kamberkolded: antratsiidid - 5,0%, kivi-
söed - 2,5%, pruunsöed ja turvas - 2,0%, põlevkivid - 1,0%.
Liikuva kütusekihiga kolded: antratsiidid - 10%, kivi- ja
pruunsöed - 5%, põlevkivid - 3%, turvas - 2%. Liikumatu kü-
tusekihiga kolded: antratsiit - 10%, kivisöed - 6%, pruun-
söed - 8%.

Soojuskadu katelseadme välisjahtumisest määratakse sõl-
tuvana katelseadme aurutootlikkusest joonisel 1 toodud dia-
grammilt.

Soojuskadu šlaki füüsikalise soojusega arvutatakse va-
leml järgi

$$q_G = \frac{a_g A^t c_g t_g}{Q_k} 100\%, \quad (24)$$

kus peale varem märgitud suuruste:

a_g - koldesse sadenev šlaki suhteline kogus,

c_g - šlaki erisoojus, võetakse võrdseks tuha erisoojuse-
ga kJ/(kg·deg),

t_g - šlaki temperatuur °C.

Šlaki suhteline kogus määratakse lendtuha suhtelise ko-
guse kaudu vahest $a_g = 1 - a_{1.t.}$. Põlevkivide põletamisel A^t
asemel kasutatakse tuha ja lagunemata karbonaatide summat

$A^t + (1 - k_{CO_2})(CO_2)_k^t$ %. Šlaki temperatuur valitakse kõigil juhtudel $600^\circ C$.

Katelseadmes ajaühikus põletatav kütusekogus arvutatakse valemiga

$$B = \frac{Q_{kas}}{\eta_k Q_k^t} 100 \text{ kg/s.} \quad (25)$$

Seejuures katelseadmes ajaühikus saadav kasulik soojushulk

$$Q_{kas} = D_I(i_{ü.a.} - i_{t.v.}) + D_{II}(i_{ü.a.}'' - i_{ü.a.}') + D_{l.p.}(i' - i_{t.v.}) \text{ kJ/s,} \quad (26)$$

- kus D_I - katelseadmes ajaühikus toodetava auru kogus kg/s,
 $i_{ü.a.}$ - katelseadmest väljuva põhiauru entalpia kJ/kg,
 $i_{t.v.}$ - toitevee entalpia kJ/kg;
 D_{II} - vaheülekuumendit ajaühikus läbiva auru kogus kg/s,
 $i_{ü.a.}''$ - vaheülekuumendist väljuva auru entalpia kJ/kg,
 $i_{ü.a.}'$ - vaheülekuumendisse siseneva auru entalpia kJ/kg,
 $D_{l.p.}$ - katelseadme läbipuhumisvee kogus kg/s,
 i' - katlavee entalpia kJ/kg.

Auru ja vee entalpiad leitakse veeaurutabelitest vastavalt auru ja vett iseloomustavate olekuparameetrite kaudu.

6. Kolde arvutus

Soojusülekanne leegilt koldeküttepindadele (ekraanpindadele) toimub peamiselt kiirgusega. Konvektsiooni osatähtsus gaaside väikse kiiruse tõttu on tühine ning seda ei arvestata. Kiirgavateks komponentideks kollet täitvas leegis on hõõguvad kütuse-, tahma- ja tuhaosakesed (hele kiirgus) ning kolmeatomilised gaasid CO_2 , H_2O ja SO_2 (tume kiirgus).

1 kg või 1 m³ kütuse põlemisel koldes kasulikult eralduv soojushulk

$$Q_k = \left(1 - \frac{q_3 + q_6}{100}\right) Q_k^t + Q_6 - Q_{v.6}. \text{ kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (27)$$

kus Q_k^t - kütuse kasutatav soojus kJ/kg või kJ/m³,

q_3 - soojuskadu kütuse keemiliselt mittetäielikust põlemisest %,

q_6 - soojuskadu katelseadmest eemaldatava šlakiga %,

Q_6 - õhuga koldesse antav soojus kJ/kg või kJ/m³,

$Q_{v.6}$ - väljaspool katelt kuumutatud õhuga koldesse antav soojushulk kJ/kg või kJ/m³.

Soojushulk Q_6 arvutatakse valemiga

$$Q_6 = (\alpha_k'' - \Delta\alpha_k)(I_{6.e.}^0)'' + \Delta\alpha_k I_{k.6.}^0. \text{ kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (28)$$

kus α_k'' - liigõhutegur kolde lõpus,

$\Delta\alpha_k$ - väärõhutegur koldes,

$(I_{6.e.}^0)''$ - kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajaliku õhuhulga entalpia õhu eelsoojendist väljumisel kJ/kg või kJ/m³,

$I_{k.6.}^0$ - kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajaliku õhuhulga entalpia külma õhu temperatuuril (õhu temperatuur katelseadmesse sisenemisel) kJ/kg või kJ/m³.

Koldes eralduv soojushulk läheb koldegaaside entalpia suurendamiseks. Soojushulga Q_k alusel arvutatakse nn. kütuse adiabaatiline ehk teoreetiline põlemistemperatuur

$$t_a = \frac{Q_k}{\sum Vc'} \quad ^\circ\text{C}, \quad (29)$$

kus $\sum Vc' = V_{RO_2} c'_{RO_2} + V_{N_2} c'_{N_2} + \dots$ kJ/(kg.deg) või kJ/(m³.deg) (vt. punkt 4).

Adiabaatiline põlemistemperatuur on leitav ka otseselt I- ψ -diagrammilt soojushulga $Q_k = I_g$ järgi.

Kütuse adiabaatiline põlemistemperatuur on temperatuur, mis oleks koldegaasidel kütuse isobaarsel põlemisel soojuslikult isoleeritud tingimustes.

Tegelikult põleb kütus kolletes soojusvahetuse tingimustes, mistõttu maksimaalne leegi temperatuur on kütuse adiabaatilise põlemistemperatuurist madalam.

Adiabaatiline põlemistemperatuur sõltub kütuse omadustest, liigõhutegurist ja koldesse antava õhu temperatuurist. Kütuse kütteväärtuse ja õhu temperatuuri suurenemisel ning liigõhuteguri vähenemisel (kuni $\alpha_k'' = 1$) adiabaatiline põlemistemperatuur suureneb.

Koldes ülekantav soojushulk

$$Q_T = Q_K - I_K'' \text{ kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (30)$$

kus I_K'' - gaaside entalpia koldest väljumisel kJ/kg või kJ/m³

Kolde soojustehniline arvutus põhineb kolde soojusbilansi ja kiirguse võrranditel. Nendest võrranditest järel-dub soojusülekannet määrav kriteerium - Boltzmanni arv

$$Bo = \frac{1000 \varphi B_a Vc'}{b_o \zeta H_r T_a^3}, \quad (31)$$

kus $B_a = (1 - \frac{q_4}{100})B$ - arvutuslik kütusekulu kg/s või m³/s,
 q_4 - soojuskadu mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest %,

$\varphi = 1 - \frac{q_5}{100}$ - katelseadme välisjahtumistegur,

q_5 - soojuskadu katelseadme välisjahtumisest %,

$Vc' = \frac{Q_r}{T_a - T_k''}$ - koldegaaside keskmine erisoojus kJ/(kg·deg) või kJ/(m³·deg),

T_k'' - koldest väljuvate gaaside temperatuur °K,

b_o - absoluutselt musta keha kiirgustegur W/(m²·deg⁴),

H_r - kolde kiirgustvastuvõttev pind m²,

ζ - kolde tinglik saastumistegur.

Kolde kiirgustvastuvõttev pind

$$H_r = \sum (F_x) m^2, \quad (32)$$

kus F - ekraanidega kaetud kolde pind m^2 ,

x - ekraanpinna nurktegur.

Ekraanidega kaetud kolde pinnad F arvutatakse ekraanpindade laiuse (b) ja pikkuse (l) korrutisena, s.o. $F = bl$. Suuruse l määramiseks kasutatakse joonisel 2 toodud skeeme. Ekraanpinna nurktegur x väljendab ekraanide poolt vastuvõetud soojushulga suhet soojushulgasse, mida võtaks vastu ekraanpind suhtelise sammuga $s/d = 1$ (ekraantorud asetseksid tihedalt üksteise kõrval). Nurktegur x sõltub ekraantorude suhtelisest sammust s/d ja torude kaugusest müüritisest e . Ta leitakse selleks koostatud diagrammilt (joonis 3). Kolde kiirgustvastuvõtva pinna määramisel festooni pind arvutatakse tema laiuse ja kõrguse korrutisena.

Kolde ekraanpindade iseloomustamiseks kasutatakse kolde ekraaneerimisastme mõistet. Kamberkollete ekraaneerimisaste

$$\psi = \frac{H_r}{F_p} \quad (33)$$

ja restkollete ekraaneerimisaste

$$\psi' = \frac{H_r}{F_p - R}, \quad (34)$$

kus F_p - koldeseinte summaarne pind m^2 ,

R - resti peegelpind m^2 .

Kolde kogupinna määramisel võetakse aluseks kolde aktiivset mahtu piiravad pinnad. Kolde aktiivse mahu määramise aluseks võetakse skeemid, mis on toodud joonisel 2. Kollete ekraaneerimisaste sõltub ekraantorude telgedevahelisest kaugusest, s.o. ekraantorude sammust. Kes- ja suurevõimsuseliste katelseadmete kollete ekraaneerimisaste asub piirides $\psi = 0,85 - 0,97$.

Kolde ekraantorud katelseadmete ekspluateerimisel katuvad kütuse põlemisel moodustuva lendtuha ja tahma kihiga. Koldeekraanide kattumist lendtuha ja tahma kihiga nimetatakse kolde saastumiseks. Koldeekraanidele koguneva saasta-

kihi termilise takistuse tõttu küttepinna soojusvastuvõtt väheneb, mida tuleb arvestada kolde soojustehnilisel arvutamisel. Kolde ekraantorude saastumine on keerukas füüsikalise-keemiline protsess, sõltudes tervest reast suurustest, mis omakorda avaldavad määravat mõju moodustuva saastakihi termilisele takistusele. Kõige tähtsamateks suurusteks, millest sõltub kolde ekraanpindade saastumine on: põletatava kütuse liik, kolde konstruktsioon, kolde mahuline soojuslik erikoormus ja ekraantorude temperatuur. Kütuste puhul, mille mineraalosa koldeprotsessis muundub sellises suunas, et ta on võimeline ühinema keemiliselt küttepinna metalliga, tekib ekraanpindadele tavaliselt tugev, väga raskesti eraldatav saasta kiht. Sellise tugeva saastakihi kattuvad näiteks põlevkivikütetel töötavate katelseadmete ekraantorud. Kui kütuse mineraalosas koldeprotsessis märgatavaid muutusi ei toimu, moodustub küttepinna peale aga kergesti kõrvaldatav sade. Üheks raskemaks juhuks on olukord, kui küttepinna peale kanduvad tuhaosakesed vedelas olekus, mille tulemusena võib moodustuda torudele sulanud tuha, nn. vedelšlaki kiht.

Koldeekraanide saastumise vähendamiseks seadistatakse kolded vastavate puhuritega. Saastakihtide eemaldamiseks koldepindadelt on praktikas kõige enam kasutatud leidnud veeauru ja õhuga töötavad puhurid.

Koldeekraanide saastumisest tingitud soojusvastuvõtu vähenemist arvestab valemis (31) esinev tinglik saastumistegur γ , mis väljendab saastunud koldeekraanide poolt vastuvõetud soojushulga suhet soojushulgasse, mida nad võtaksid vastu saastumata olukorras. Kollete soojustehnilisel arvutamisel lähtutakse järgmistest γ väärtustest: gaasküttekolded - 0,8, vedelküttekolded - 0,6, pruunsöe, kivisöe ja freesturba kamberkolded - 0,45, põlevkivi, lahja söe ja antratsiidi kamberkolded - 0,45, kihtkolded - 0,7.

Koldest väljuvate gaaside dimensioonita temperatuur Boltzmanni arvu kaudu avaldub

$$Q_k^n = \frac{\pi_k^n}{\pi_a^n} = \frac{Bo^{0,6}}{Ma_k^{0,6} + Bo^{0,6}} \quad (35)$$

Võrrandis (35) olevat suurust a_k nimetatakse kolde mustvärvusastmeks. Ta iseloomustab leegi kiirgusintensiivsust kolde küttepinnale. Kolde mustvärvusaste avaldub

a) kamberkolletele

$$a_k = \frac{a_l}{a_l + (1 - a_l)\psi\varphi}, \quad (36)$$

b) restkolletele

$$a_k = \frac{a_l + (1 - a_l)\varphi\psi'}{1 - (1 - \psi'\varphi)(1 - \varphi\psi')(1 - a_l)}, \quad (37)$$

kus $\varphi = R/H_T$ (resti peegelpinna suhe kolde kiirgustvastuvõtvasse pinnasse) ja

a_l - leegi mustvärvusaste.

Leegi mustvärvusaste a_l sõltub põletatava kütuse liigist, temperatuurist koldes, kolde geomeetrilistest mõõtmetest, kolmeatomiliste gaaside partsiaalrõhust jne. Leegi mustvärvusaste tema heleda (a_l) ja tumeda (a_g) osa mustvärvusastmete kaudu avaldub järgmiselt:

$$a_l = ma_l + (1 - m)a_g. \quad (38)$$

Teguri m väärtus sõltub kütuse liigist ja põletamise moodusest. Tumeda gaasileegi, lahjade süte ja antratsiidi leegi korral kihtkolletes $m = 0$, heleda gaasileegi puhul $m = 0,2$, masuudileegi ning lendosaderikaste kütuste leegi puhul kihtkolletes $m = 0,6$ ja tolmustatud kütuste leegi korral $m = 1,0$.

Mustvärvusastmed a_l ja a_g arvutatakse üldise valemiga

$$a = 1 - e^{-ks}, \quad (39)$$

kus k - kiirenõrgenemistegur $1/m$,

s - kiirgava kihi paksus m ,

Kiirgava kihi paksus

$$s = 3,6 \frac{V_k}{F_p} \text{ m.} \quad (40)$$

Siinjuures V_k tähistab kolde aktiivset mahtu (m^3) ja F_p kolde-
deseinte summaarset pinda (m^2). Kolde aktiivse mahu määra-
mine toimub joonisel 2 toodud skeemide järgi.

Kiirenõrgenemistegur leegi heledale osale

$$k_1 = 1,6 \cdot 10^{-3} T_k'' - 0,5 \text{ 1/m.} \quad (41)$$

Kiirenõrgenemistegur leegi tumedale osale

$$k_g = (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} T_k'') (0,81 + 1,62 P_{\text{H}_2\text{O}}) \sqrt{\frac{P_{\text{PRO}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}}{s}} \text{ 1/m,} \quad (42)$$

kus T_k'' - koldest väljuvate gaaside temperatuur $^{\circ}\text{K}$,
 P_{PRO_2} , $P_{\text{H}_2\text{O}}$ - kuivade kolmeaatomiliste gaaside ja veeau-
ru partsiaalrõhk kolde baari,
 s - kiirgava kihi paksus kolde (arvutatakse valemiga
(40)) m.

Kuivade kolmeaatomiliste gaaside ja veeauru partsiaal-
rõhud kolde arvutatakse valemitega (14) ja (15), kusjuures
 V_g arvutatakse liigõhuteguri järgi kolde lõpus.

Kui $s \geq 2,5$ m, siis masuudi põletamisel ja lendosade-
rikaste kütuste kihtpõletamisel $a_1 = 0,9$ ning kütuste tol-
mpõletamisel $a_1 = 0,8$.

Võrrandis (35) esinev tegur M sõltub leegi asendist
kolde ning ta arvutatakse valemiga

$$M = A - BX, \quad (43)$$

kus $A = 0,52$, $B = 0,3$ - gaas- ja vedelküttekolletele,

$A = 0,59$, $B = 0,5$ - tolmpüttekolletele,

$X = h/l_0$ (h - põletite kaugus kolde põhjast või kül-
leetri poolelt kõrguselt, l_0 - kaugus kolde põh-
jast või külleetri poolelt kõrguselt kuni ga-
side väljumisava keskjoonele).

Kihtkolletele $M = 0,445$.

Võrrandist (35) järelduvad järgmised valemid kolde kiirgustvastuvõtva pinna ja koldest väljuvate gaaside temperatuuri arvutamiseks ($b_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}^4)$):

$$H_r = 1,76 \cdot 10^{10} \frac{B_a Q_r}{M \psi a_k T_k^n T_a^3} \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \left(\frac{T_a}{T_k} - 1\right)^2} \text{ m}^2, \quad (44)$$

$$T_k^n = \frac{T_a}{M \left(\frac{5,67 \cdot 10^{-5} \psi H_r a_k T_a^3}{\psi B_a V c'} \right)^{0,6} + 1} \text{ } ^\circ\text{K}. \quad (45)$$

Kolde konstruktorarvutus. Kolde konstruktorarvutusele eelneb kolde konstruktsiooni valik.

Arvutus algab kütuse adiabaatilise põlemistemperatuuri määramisest. Seejärel, olenevalt kütuse omadustest, valitakse koldest väljuvate gaaside temperatuur, kusjuures võetakse orienteeruvalt aluseks järgmised maksimaalsed arvud: antratsiit - 1150°C , kivi- ja pruunsöed - 1100°C , turvas ja põlevkivid - 1000°C . Vedel- ja gaasküttekolletest väljuvate gaaside temperatuur valitakse piirides $1000 - 1200^\circ\text{C}$. Üldiselt tuleb silmas pidada, et koldest väljuvate gaaside temperatuur ei ületaks tuha deformatsiooni alguse temperatuuri t_1 . Koldest väljuvate gaaside temperatuuri järgi määratakse gaaside entalpia koldest väljumisel I_k^n ning viimase kaudu kolde ülekantav soojushulk Q_T . Lähtudes kolde mahulisest soojuslikust erikoormusest q_v , arvutatakse orienteeruvalt kolde maht V_k ja vajalik seinte pind F_p valemitega

$$V_k = \frac{B Q_k^t}{q_v} \text{ m}^3, \quad (46)$$

$$F_p = 5,5 V_k^{\frac{2}{3}} \text{ m}^2, \quad (47)$$

Kolde mahulised soojuslikud erikoormused valitakse järgmistes piirides: liikumatu kütusekihiga kolded $300-350 \text{ kW/m}^3$, liikuva kütusekihiga kolded $230 - 300 \text{ kW/m}^3$, tolmküttekolded $100 - 200 \text{ kW/m}^3$, vedel- ja gaasküttekolded $230 - 300 \text{ kW/m}^3$.

V_k ja F_p kaudu määratakse kiirgava kihi paksus s (valem (40)), mis on leegi mustvärvusastme arvutamise aluseks. Küttepinna torude mõõtmete ja paigutuse järgi hinnatakse enne kolde ekraneerimisaste. Selliselt saadud kolde ekraneerimisastme Ψ ja leegi mustvärvusastme kaudu määratakse kolde mustvärvusaste ja kiirgustvastuvõttev pind H_r . Arvutusega saadud kolde kiirgustvastuvõtva pinna järgi kujundatakse lõplikult kolde. Kui tegelik ekraneerimisaste erineb orienteeruvalt määratud ekraneerimisastmest enam kui 5%, tuleb arvutust korrata kolde kontrollarvutuse skeemi kohaselt.

Kollete restipinna määramisel lähtutakse resti soojuslikust erikoormusest

$$q_R = \frac{B_a Q_k^t}{R} \quad \text{kW/m}^2,$$

kus R tähistab kolderesti efektiivset pinda. Resti soojuslikud erikoormused valitakse alljärgnevalt: liikumatu kütusekihiga kolded $900 - 1000 \text{ kW/m}^2$, liikuva kütusekihiga kolded $900 - 1100 \text{ kW/m}^2$.

Kolde kontrollarvutus. Kolde kontrollarvutusel on teada kõik kolde konstruktiivsed mõõtmed ja kiirgust vastuvõttev pind. Arvutuse ülesandeks on koldest väljuvate gaaside temperatuuri ja kolde soojusvastuvõtu Q_r määramine.

Kontrollarvutust, nagu konstruktorarvutustki, alustatakse kütuse adiabaatilise põlemistemperatuuri määramisest. Selleks tuleb ennekoike valida õhu eelsoojendustemperatuur. Järgnevalt oletatakse koldest väljuvate gaaside temperatuur, mille kaudu arvutatakse kolde mustvärvusaste ja koldegaaside keskmine erisoojus ning nende kaudu koldest väljuvate gaaside temperatuur valemiga (45). Kui viimane erineb oletatud väärtusest rohkem kui ± 100 deg võrra, tuleb arvutust korrata. Kui õhueelsoojendi arvutusest selgub, et ole-

tatud õhutemperatuur erineb arvutusega saadust enam kui ±40 deg, tuleb ka kolde arvutust korrata.

7. Konvektiivküttepindade arvutus

Alljärgnevalt käsitletakse kolde järel paiknevate küttepindade (konvektiivküttepindade) soojustehnilist arvutust.

Kolde järel paiknevates küttepindades soojus kantakse gaasidelt kuumutatavale keskkonnale (veele, aurule, õhule) nii konvektsiooni kui ka kiirguse teel, s.t. esineb liitsoojusülekanne. Konvektsiooni ja kiirgusega ülekantavate soojushulkade vahekorral sõltub peamiselt gaaside kiirusest, temperatuurist, kolmeaatomiliste gaaside partsiaalrõhust ja küttepinna geomeetristest parameetritest. Kolde järel paiknevates küttepindades (toru kimpudes) konvektiivse soojusülekanne intensiivsus on suurem kiirgusülekanne intensiivsusest, mistõttu neid küttepindu nimetataksegi konvektiivküttepindadeks.

Konvektiivküttepindade arvutus põhineb järgmistel võrranditel:

a) soojusülekanne võrrand

$$Q = \frac{Hk \Delta t}{1000B_a} \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (48)$$

b) soojusbilansi võrrand

$$Q = \varphi (I_g' - I_g'' + \Delta \mathcal{L} I_{k.\delta}^0) \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (49)$$

$$Q = (i'' - i') \frac{D}{B_a} \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3. \quad (50)$$

Seejuures H - küttepind m^2 ,

k - soojuslähikandegur $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg})$,

Δt - keskmine temperatuuride vahe küttepinnas deg,

I_g' ja I_g'' - gaaside entalpia küttepinda sisenemisel ja sellest väljumisel kJ/kg või kJ/m^3 ,

$\Delta \mathcal{L}$ - väärorõhutegur vastavas küttepinnas,

$I_{k.\delta}^0$ - külmõhu entalpia kJ/kg või kJ/m^3 ,

D - küttepinda läbiva kuumutatava keskkonna kogus
kg/s,

B_a - arvutuslik kütusekulu kg/s,

i' ja i'' - kuumutatava keskkonna entalpia küttepinda sisenemisel ja küttepinnast väljumisel kJ/kg.

Konvektiivküttepindade konstruktorarvutusel on valemist (48) avaldatav otsitav suurus - küttepind H. Tema määramiseks peame teadma küttepinnas ülekantavat soojushulka Q , mis on arvutatav kas küttepinna gaasidepoolse (49) või kuumutatava keskkonna poolse soojusbilansi (50) võrrandiga. Keskmise temperatuuride vahe Δt ja soojuslähikandetegur k määratakse keskkondade temperatuuride järgi küttepinda sisenemisel ja sellest väljumisel.

Konvektiivküttepindade kontrollarvutusel on teada küttepinna suurus ja selle geomeetrilised parameetrid, küttepinda sisenevate gaaside ja kuumutatava keskkonna temperatuur. Kontrollarvutuse ülesandeks on küttepinna soojusvastuvõtu ning gaaside temperatuuri määramine küttepinnast väljumisel. Selleks oletatakse küttepinnast väljuvate gaaside temperatuur ϑ''_I , mille kaudu määratakse gaaside entalpia küttepinna järel, küttepinna soojusvastuvõtt soojusbilansi võrrandi järgi $Q_{s,b.I}$ ning viimase kaudu küttepinnast väljuva kuumutatava keskkonna temperatuur (auruülekuumendi, mittekeev ökonomaiser, õhuelesojendi). Saadud suuruste järgi arvutatakse keskmine temperatuuride vahe küttepinnas ja soojuslähikandetegur, mis on küttepinna soojusvastuvõtu $Q_{s,ü.I}$ arvutamise aluseks soojusülekande võrrandi kaudu. Kui soojusülekande võrrandiga arvutatud küttepinna soojusvastuvõtt erineb soojusbilansi võrrandiga arvutatud soojushulgast enam kui $\pm 2\%$ (festooni arvutamisel $\pm 5\%$), tuleb arvutust korrata. Kui seejuures arvutusega saadud küttepinnast väljuvate gaaside temperatuur (määratakse küttepinna soojusbilansi võrrandi abil arvutusega saadud soojusvastuvõtu kaudu) erineb oletatud temperatuurist vähem kui ± 50 deg, siis arvutuse kordamisel soojuslähikandetegurit ümber ei arvutata. Kui ka teistkordsel arvutamisel soojusbilansi võrrandi kaudu saa-

dud soojusvastuvõtt $Q_{S.b.II}$ erineb soojusülekande võrrandi-
ga arvutatud soojusvastuvõttust $Q_{S.ü.II}$ rohkem lubatust, võib
küttepinna väljuvate gaaside temperatuuri määramiseks ka-
sutada järgmist lineaarset interpolaatsioonivalemit:

$$v'' = v''_I + (v''_{II} - v''_I) \frac{(Q_{S.b.} - Q_{S.ü.})_I}{(Q_{S.b.} - Q_{S.ü.})_I - (Q_{S.b.} - Q_{S.ü.})_{II}} \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (51)$$

Keskmise temperatuuride vahe määramine. Keskmine tempe-
raatuuride vahe küttepinna Δt sõltub kuumutatava ja kuumu-
tava keskkonna temperatuuridest küttepinna sisenemisel ja
sealt väljumisel ning keskkondade omavahelistest liikumis-
suundadest.

Keskmine temperatuuride vahe päri- ja vastuvoolu skee-
mile arvutatakse valemiga

$$\Delta t = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \text{ deg,} \quad (52)$$

kus $\Delta t'$ ja $\Delta t''$ tähistavad vastavalt suurimat ja väiksei-
mat temperatuuride vahet kuumutatava ja kuumutava keskkonna
vahel küttepinna äärel.

Kui $\frac{\Delta t'}{\Delta t''} \leq 1,5$, võib keskmise temperatuuride vahe
küllaldase täpsusega arvutada järgmise valemi abil:

$$\Delta t = \frac{\Delta t' + \Delta t''}{2} \text{ deg.} \quad (53)$$

Küttepinna skeemidele, mis erinevad päri- ja vastuvoolu
skeemidest, arvutatakse keskmine temperatuuride vahe valemi
järgi

$$\Delta t = \psi \Delta t_{v.v.} \text{ deg,} \quad (54)$$

kus $\Delta t_{v.v.}$ - keskmine temperatuuride vahe juhul, kui kütte-
pinna vaadelda töötavana vastuvooluskeemi jär-
gi,

Ψ - parandustegur, mis leitakse olenevalt küttepinnaskeemist ja temperatuuridest küttepinnas joonisel 4, 5 ja 6 toodud nomogrammide alusel.

Joonisel 4 toodud nomogrammi kasutamisel leitakse parandustegur järgmiste abisuuruste kaudu:

$$A = \frac{H_{pv}}{H}, \quad p = \frac{\tau_2}{\vartheta' - t}, \quad \text{ja} \quad R = \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

Seejuures I ja II skeemi puhul $\tau_1 = \vartheta' - \vartheta''$, $\tau_2 = t'' - t'$, III skeemi puhul aga $\tau_1 = t'' - t'$, $\tau_2 = \vartheta' - \vartheta''$. H_{pv} - pärioolu skeemil töötav küttepind, H - kogu küttepind.

Joonisel 5 ja 6 toodud nomogrammide kasutamisel parandustegur Ψ leitakse abisuuruste $p = \frac{\tau_M}{\vartheta' - t'}$ ja $R = \frac{\tau_\delta}{\tau_M}$ kaudu. Abisuuruste p ja R määramiseks arvutatakse temperatuuride vahed $\vartheta' - \vartheta''$ ja $t'' - t'$. Nendest temperatuuri vahedest suurem tähistatakse τ_δ ja väiksem τ_M .

Siinjuures ϑ' ja t' tähistab vastavalt gaasi- ja kuumutatava keskkonna temperatuuri küttepinda sisenemisel ning ϑ'' ja t'' samu suurusi küttepinnast väljumisel.

Soojuslähikandeteguri määramine. Soojuslähikandeteguri k arvutamisel lähtutakse alljärgnevast:

1. Et katelseadme küttepindade torude välis- ja siselähimõõtude suhe on väiksem 1,5-st (pinna kõveruse mõju on väga väike), arvutatakse soojuslähikandetegur tasapinnalise seina valemi järgi.

2. Katelseadme küttepindade toruseinte väikese paksuse ja terase hea soojusjuhtivuse ($\lambda = 35 - 45 \text{ W/(m.deg)}$) tõttu osutub nende termiline takistus tühiselt väikeseks ning teda ei ole vaja arvestada.

3. Eeldatakse, et katelseadme küttepinnad töötavad katlakivivabal režiimil.

4. Katelseadme küttepindade mittetäielikku kokkupuudet teda uhtuvate gaasidega võetakse arvesse uhtumisteguriga $\omega \leq 1$, millega korrutatakse konvektiivsoojusülekan-

gurit α_k . Teguri ω väärtus leitakse joonisel 7 toodud küttepindade skeemide järgi. Kaasaja katelseadmete küttepinnad püütakse kujundada selliselt, et $\omega = 1$.

5. Katelseadme ekspluatatsioonil konvektiivküttepinnad, nagu kolde küttepinnadki, saastuvad lendtuha ja tahmaga. Küttepindade saastumise tagajärjel nende soojusvastuvõtt väheneb. Küttepindade saastumist soojuslähikandeteguri arvutamisel võetakse arvesse saasta termilise takistuse ε kaudu (ε nimetatakse küttepinna saastumisteguriks) aurutus-, ökonomaiseri ja ülekuumendi küttepinna arvutamisel ning kasutusteguriga ξ õhuelsoojendite arvutamisel.

Põhinedes öeldule, avaldatakse soojuslähikandegur katelseadme soojustehnilisel arvutamisel valemiga

$$k = \frac{1}{\omega \alpha_k + \alpha_r + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}} \quad W/(m^2 \cdot \text{deg}), \quad (55)$$

kus α_k - konvektiivsoojusülekanndegur gaasidelt küttepinnale $W/(m^2 \cdot \text{deg})$,

α_r - kiirgussoojusülekanndegur $W/(m^2 \cdot \text{deg})$,

α_2 - konvektiivsoojusülekanndegur küttepinnalt kuumutatavale keskkonnale $W/(m^2 \cdot \text{deg})$,

ε - küttepinna saastumistegur $(m^2 \cdot \text{deg})/W$.

Aurutus- ja ökonomaiseri küttepindade soojustehnilisel arvutamisel valemis (55) esinevat liiget $1/\alpha_2$ ei arvestata, sest ta osutub murru nimetajas olevate ülejäänud liikmetega võrreldes väikeseks.

Et õhuelsoojendid paiknevad madalate gaasitemperatuuride piirkonnas ning kiirgava gaasikihi paksus on väga väike, siis $\alpha_r \approx 0$. Seega, soojuslähikandegur õhuelsoojenditele ($\omega = 1$)

$$k = \frac{\xi}{\alpha_k + \frac{1}{\alpha_2}} \quad W/(m^2 \cdot \text{deg}), \quad (56)$$

kus ξ - õhuelsoojendi küttepinna kasutustegur.

Ohueelsoojendi küttepinna kasutustegur valitakse põletatava kütuse liigist olenevalt: masuut - 0,65, gaas ja puit - 0,70, ülejäänute puhul - 0,75.

Konvektiivse soojusülekande teguri määramine. Konvektiivne soojusülekande tegur keskkonna voolamisel koridoorses ristvoolu küttepinnas

$$\alpha_k = 0,177 C_{z_1} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,64} W/(m^2 \cdot \text{deg}), \quad (57)$$

kus C_{z_1} - tegur, mis sõltub toruridade arvust z_1 , kui $z_1 = 2 - C_{z_1} = 0,88$; $z_1 = 5 - C_{z_1} = 0,95$; $z_1 = 8 - C_{z_1} = 0,98$; $z_1 \geq 15 - C_{z_1} = 1,0$,
 λ - voolava keskkonna soojusjuhtivustegur $W/(m \cdot \text{deg})$,
 d - küttepinna torude välisläbimõõt m,
 w - keskkonna voolamiskiirus m/s,
 ν - keskkonna kineetiline viskoossus m^2/s .

Konvektiivne soojusülekande tegur keskkonna voolamisel ristvoolu küttepinnas, kus torud paiknevad malekorras, arvutatakse valemiga

$$\alpha_k = 0,27 C_{z_1} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} W/(m^2 \cdot \text{deg}). \quad (58)$$

Teguri C_{z_1} väärtus valitakse alljärgnevalt: $z_1 = 2 - C_{z_1} = 0,77$; $z_1 = 5 - C_{z_1} = 0,90$; $z_1 = 8 - C_{z_1} = 0,96$; $z_1 = 15 - C_{z_1} = 0,99$; $z_1 \geq 20 - C_{z_1} = 1,0$.

Keskkonna voolamisel piki küttepinna (torude sees või väljaspool torusid)

$$\alpha_k = 0,023 C_t C_1 \frac{\lambda}{d_e} \left(\frac{wd_e}{\nu}\right)^{0,8} Pr^{0,4} W/(m^2 \cdot \text{deg}), \quad (59)$$

kus C_t - tegur, mis sõltub soojusvoo suunast; $C_t = 1,06$ gaaside jahtumisel, $C_t = 1,0$ auru ja õhu kuumutamisel,

C_1 - parandustegur küttepinna torude pikkusele, kui $l/d_e = 10 - C_1 = 1,14$; $l/d_e = 20 - C_1 = 1,07$;

$1/d_e = 30 - C_1 = 1,04$; $1/d_e \geq 50 - C_1 = 1,0$,
 Pr - voolava keskkonna Prandtl'i arv (õhu korral Pr = 0,71),
 d_e - ekvivalentne diameeter m.

Voolamisel torude sees võrdub d_e torude läbimõõduga. Keskkonna (gaaside) voolamisel väljaspool torusid, ekvivalentne diameeter arvutatakse valemiga

$$d_e = \frac{4F}{z\pi d} - d \text{ m}, \quad (60)$$

kus F - gaasikäigu ristlõike pind m^2 ,
 z - torude arv küttepinnas,
 d - küttepinna torude välisläbimõõt m.

Valemities (57) - (59) olevad füüsikalised konstandid (λ , ν ja Pr) ja kiirus (w) määratakse voolava keskkonna keskmise aritmeetilise temperatuuri järgi küttepinnas. Näiteks keskmine gaaside temperatuur küttepinnas $\bar{t} = (\bar{t}' + \bar{t}'')/2$, kus \bar{t}' ja \bar{t}'' tähistavad vastavalt gaaside temperatuuri küttepinna ees ja küttepinna järel. Konstantide λ , ν ja Pr väärtused on toodud tabelites 3 ja 4.

Küttepindades, kus osa torusid paikneb koridoorselt, osa malekorras, arvutatakse konvektiivne soojusülekande tegur eraldi nii koridoorsele kui ka malekorras osale ning nende kaudu keskmine soojusülekande tegur kogu küttepinnale valemiga

$$\alpha_{k.kesk.} = \frac{\alpha_{k.k.} H_k + \alpha_{k.m.} H_m}{H_k + H_m} W/(m^2 \cdot \text{deg}), \quad (61)$$

kus $\alpha_{k.k.}$, $\alpha_{k.m.}$ - konvektiivne soojusülekande tegur vastavalt küttepinna koridoorsele ja malekorras osale $W/(m^2 \cdot \text{deg})$,

H_k , H_m - küttepinna osa suurused, kus torud paiknevad koridoorselt ja malekorras m^2 .

Keskmine konvektiivne soojusülekande tegur küttepinda-dele, mis koosnevad nii piki- kui ka ristvoolu osast, arvutatakse valemiga

$$\alpha_{k.kesk.} = \frac{\alpha_{k.p.} H_p + \alpha_{k.r.} H_r}{H_p + H_r} \cdot W / (m^2 \cdot \text{deg}), \quad (62)$$

kus $\alpha_{k.p.}$, $\alpha_{k.r.}$ - konvektiivne soojusülekande tegur küttepinna piki- ja ristvoolu osas $W/(m^2 \cdot \text{deg})$,

H_p , H_r - küttepinna piki- ja ristvoolu osa suurused m^2 .

Joonisel 7 toodud skeemidelt selgub kasutatavama kujuga küttepindade jaotamine piki- ja ristvoolu osadeks.

Keskmine keskkonna kiirus küttepinnas arvutatakse valemitega:

a) gaaside kiirus

$$w = \frac{B_a V_g (\vartheta + 273)}{273 F_o} \text{ m/s}, \quad (63)$$

b) õhu kiirus

$$w = \frac{B_a (\alpha_k'' - \Delta \alpha_k + \frac{\Delta \alpha_{\delta.e.}}{2}) V^o (t_{\delta.e.} + 273)}{273 F_o} \text{ m/s}, \quad (64)$$

c) auru kiirus

$$w = \frac{D V}{F_o} \text{ m/s}. \quad (65)$$

Valemities (63) - (65) esinevatel suurustel on peale eespoolmainitute järgmised tähendused:

B_a - arvutuslik kütusekulu kg/s ,

V_g - küttepinna läbivate gaaside kogus keskmise liig-
õhuteguri korral m^3/kg või m^3/m^3 ,

ϑ - keskmine gaaside temperatuur küttepinnas $^{\circ}C$,

V^o - kütuse põlemiseks vajalik teoreetiline õhuhulk
 m^3/kg või m^3/m^3 ,

α_k'' - liigõhutegur kolde lõpus,

$\Delta \alpha_k$ ja $\Delta \alpha_{\delta.e.}$ - vääroõhutegur vastavalt koldes ja õhu-
eelsoojendis,

$t_{\delta.e.}$ - õhu eelsoojendit läbiva õhu keskmine temperatuur
 $^{\circ}C$,

D - küttepinda läbiv auru kogus kg/s,
 v - auru keskmine erimaht m^3/kg ,
 F_0 - ristlõike elavpind m^2 .

Ristlõike elavpind arvutatakse valemitega:

a) ristvoolu küttepindadele:

$$F_0 = F - z_1 l d m^2, \quad (66)$$

b) keskkonna voolamisel torude vahel (pikivoolu küttepind):

$$F_0 = F - z \frac{\pi d^2}{4} m^2, \quad (67)$$

c) keskkonna voolamisel torudes

$$F_0 = z \frac{\pi d_s^2}{4} m^2. \quad (68)$$

Siinjuures: F - gaasikäigu ristlõikepind m^2 ,

z_1 - torude arv ühes reas,

l - torude pikkus m,

d - torude välisläbimõõt m,

z - torude arv küttepinnas,

d_s - torude siseläbimõõt m.

Kui küttepind koosneb kas ainult piki- või ristvoolu osast ning eri osadel küttepinna ulatuses on erinev ristlõike elavpind, on arvutamisel aluseks keskmine ristlõike elavpind, mis määratakse valemiga

$$F_0 \text{ keskm.} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + \dots}{\frac{H_1}{F_{01}} + \frac{H_2}{F_{02}} + \frac{H_3}{F_{03}} + \dots} m^2. \quad (69)$$

Kiirgussoojusülekande teguri arvutamine. Kiirgussoojusülekande tegur arvutatakse valemiga

$$\alpha_r = 0,91 b_0 a (\vartheta + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{t_s + 273}{\vartheta + 273}\right)^n}{1 - \frac{t_s + 273}{\vartheta + 273}} W / (m^2 \cdot \text{deg}), \quad (70)$$

kus a - kiirgava keskkonna mustvärvusaste,

ϑ - kiirgava keskkonna (gaaside) keskmine temperatuur $^{\circ}\text{C}$,

t_g - kiirgust vastuvõtva pinna temperatuur $^{\circ}\text{C}$.

Tolmustatud keskkonna kiirgamisel $n = 4$, kolmeatomi-
liste gaaside kiirgamisel (vedel- ja gaaskütuste põletami-
sel) aga $n = 3,6$.

Kiirgava keskkonna mustvärvusaste arvutatakse valemiga
(39), kusjuures kiirenõrgenemise teguri määramiseks kasu-
tatakse seost

$$k = k_g + k_t \quad 1/\text{m}. \quad (71)$$

Kolmeatomiliste gaaside kiirenõrgenemise tegur k_g
määratakse valemiga (42) gaaside keskmise temperatuuri ja
keskmise liigõhuteguri juures (liigõhutegurite poolsumma en-
ne ja pärast küttepinda). Tuhaosakeste kiirenõrgenemise te-
gur k_t aga määratakse järgmise seosega, kusjuures ka siin
võetakse aluseks gaaside keskmine temperatuur

$$k_t = 7,0 \mu \sqrt[3]{\frac{1}{d_t^2 (\vartheta + 273)^2}} \quad 1/\text{m}, \quad (72)$$

kus d_t - tolmuosakeste efektiivne läbimõõt μm ,

ϑ - kiirgava keskkonna keskmine temperatuur $^{\circ}\text{C}$,

μ - tuhaosakeste kontsentratsioon g/m^3 .

Tolmuosakeste efektiivne läbimõõt valitakse järgmiselt:
kivisööd $16 \mu\text{m}$, põlevkivi ja pruunsööd $20 \mu\text{m}$, turvas
 $30 \mu\text{m}$.

Tolmuosakeste kontsentratsioon arvutatakse valemiga

$$\mu = \frac{10 A^t a_{1.t.}}{V_g} \quad \text{g}/\text{m}^3, \quad (73)$$

kus A^t - tuhasisaldus kütuse tarbimisaines %,

$a_{1.t.}$ - gaasidega kaasakanduv tuha suhteline kogus,

V_g - küttepinda läbiv põlemisgaaside kogus (keskmine)
 m^3/kg või m^3/m^3 .

Kiirgava kihi paksuse s arvutamiseks kasutatakse valem

meid:
 kui $\frac{s_1 + s_2}{d} \leq 7$, siis $s = (1,87 \frac{s_1 + s_2}{d} - 4,1)d$ m, (74)

kui $7 < \frac{s_1 + s_2}{d} < 13$, siis $s = (2,82 \frac{s_1 + s_2}{d} - 10,6)d$ m, (75)

siinjuures s_1 ja s_2 tähistavad vastavalt torude rist- ja pikisammu ning d torude välisläbimõõtu.

Kui torude samm küttepinna ulatuses muutub, kasutatakse arvutustes keskmist sammu, mis määratakse valemiga

$$s_{\text{keskm.}} = \frac{s^I H^I + s^{II} H^{II} + s^{III} H^{III} + \dots}{H^I + H^{II} + H^{III} + \dots} \text{ m.} \quad (76)$$

Kiirgust vastuvõtva pinna temperatuur arvutatakse valemiga

$$t_g = t + (\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}) \frac{1000 \text{ BaQ}}{H} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (77)$$

kus peale eespool mainitute tähistab t soojust vastuvõtva keskkonna keskmist temperatuuri $^\circ\text{C}$.

Temperatuuri t_g määramiseks küttepindade konstruktor-arvutusel oletatakse ette küttepinna soojuskoormuse $\frac{1000 \text{ BaQ}}{H}$ väärtus. Kui oletatud soojuskoormus ülekuumendile ei ületa $\pm 15\%$ ja aurutusküttepinnale $\pm 30\%$ arvutatud väärtusest, siis arvutust ei korrata. Küttepinna soojuskoormuse valikul orienteerutakse järgmistele arvudele: aurutusküttepinnad - 15 - 35 kW/m^2 , auruülekuumendid - 20 - 30 kW/m^2 .

Ökonomaiseri soojustehnilisel arvutusel kiirgust vastuvõtva pinna temperatuur määratakse alljärgnevalt: kui $\psi'_{\text{ök.}} \leq 400$, $t_g = t + 25^\circ\text{C}$; kui $\psi'_{\text{ök.}} > 400^\circ\text{C}$, $t_g = t + 100^\circ\text{C}$ kütuste kamberpõletamisel ja $t_g = t + 25^\circ\text{C}$ kütuste kihtpõletamisel.

Valemis esinev temperatuur t arvutatakse aritmeetilise keskmisena küttepinda siseneva ja küttepinnast väljuva soojust vastuvõtva keskkonna temperatuuridest. Aurutusküttepindadele võrdub t vee keemistemperatuuriga katlas.

Saastumisteguri arvutamine. Küttepindade saastumistegur ε sõltub gaaside kiirusest, torude paigutusest küttepinnas, torude sammudest ja diameetrist. Kõige suuremat mõju saastumisteguri väärtusele avaldab gaaside kiirus. Olevalt sellest, kas katelseadme küttepinnad kattuvad puistete- või liitunud sadestistega, on gaaside kiiruse mõju erinev. Puistesadestistega kaetud küttepinna saastumistegur väheneb gaaside kiiruse suurenemisel, liitunud sadestiste puhul aga suureneb.

Küttepindade saastumistegur küttepindade kattumisel puistesadestistega arvutatakse valemi järgi

$$\varepsilon = C_d C_x \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \text{ (m}^2 \cdot \text{deg)}/W, \quad (78)$$

kus ε_0 - lähtesaastumistegur $\text{(m}^2 \cdot \text{deg)}/W$,

C_d - tegur, mis sõltub küttepinna torude läbimõõdust,

C_x - tegur, mis sõltub lendtuha fraktsioonilisest koostisest,

$\Delta\varepsilon$ - liige, mis sõltub küttepinna tüübist ja põletatava kütuse omadustest $\text{(m}^2 \cdot \text{deg)}/W$.

Lähtesaastumistegur ε_0 ja tegur C_d leitakse joonisel 8 toodud diagrammidelt, välja arvatud tuharikaste masuutide ($A^t \geq 0,15\%$) põletamisel, kus kõikide küttepindade $\varepsilon = 0,00335 \text{ (m}^2 \cdot \text{deg)}/W$. Tegur $C_x = 0,7$ turbaküttel töötavate katelseadmete küttepindade korral; ülejäänud juhtudel $C_x = 1,0$. Valemis (78) esinev liige $\Delta\varepsilon$ valitakse alljärgnevalt: aurutusküttepinnad - 0, aurülekuumendid - 0 (turba põletamisel - 0,00072), ökonomaiserid, kui $\psi'_{ök.} \leq 400$ - 0 või kui $\psi'_{ök.} > 400$ - 0,0048 (põlevkivide puhul 0,00072).

Samaaegselt nii koridoorselt kui ka malekorras paigutatud torudega küttepindade saastumistegurid arvutatakse mõlemate küttepinna osade kohta eraldi (gaaside keskmise ki-

ruse järgi küttepinnas) ning nende kaudu küttepinna keskmise saastumistegur valemi järgi

$$\varepsilon_{\text{kesk.}} = \frac{\frac{H_k}{\varepsilon_k} + \frac{H_m}{\varepsilon_m}}{\frac{H_k}{\varepsilon_k} + \frac{H_m}{\varepsilon_m}} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{deg})/W, \quad (79)$$

kus $\varepsilon_k, \varepsilon_m$ - küttepinna koridoorse ja malekorras osa saastumistegurid $(\text{m}^2 \cdot \text{deg})/W$,

H_k, H_m - koridoorselt ja malekorras paiknevate torudega küttepinna osa suurus m^2 .

8. Üksikute konvektiivküttepindade arutamise meetodika

Festoon. Toruridu on festoonis 1 - 4. Torud paiknevad malekorras sammudega $s_1/d \geq 4,5$ ja $s_2/d \geq 3,5$. Festooni kujundamisel lähtutakse sellest, et gaaside kiirus oleks pii-rides 6 - 8 m/s.

Festoonile tehakse kontrollarvutus, kuna tema soojusvahetuspinna suurus kujuneb välja kolde konstruktiivsel kujundamisel. Arvutuse ülesandeks on festooni soojusvastuvõtu ja temast väljuvate gaaside temperatuuri määramine (gaaside temperatuur festooni ees on võrdne koldest väljuvate gaaside temperatuuriga). Festoon arvutatakse nn. festooni arvutuslikul soojusvahetuspinna suurusel (eeldusel, et küttepinna osa, mis saab kiirgussoojust koldest, ei võta osa konvektiivsest ja torudevahelisest kiirgussoojusvahetusest)

$$H_f^a = H_f - x_f H_f^r \quad \text{m}^2, \quad (80)$$

kus H_f - festooni kogupind (arvutatuna torude välisläbimõõdu kaudu) m^2 ,

x_f - festooni nurktegur,

H_f^r - festooni kiirgusvastuvõttee pind, kui $x_f = 1$ (arvutatakse festooni laiuse ja kõrguse korrutisena) m^2 .

Nurktegur x_f määratakse joonisel 3 toodud diagrammilt (kui $z_1 = 1$ - joon 5, $z_1 = 2$ - joon 2). Üle kahe reaaliste festoonide korral $x_f = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_n)$, kus x_1, x_2, \dots on üksikute toruridade nurktegurid.

Festooni arvutamisel oletatakse ette festoonist väljuvate gaaside temperatuur, mille kaudu määratakse gaaside entalpia pärast küttepinda ja soojusvastuvõtt (ligikaudne)

$$Q_f = \psi (I_k'' - I_f'') \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3. \quad (81)$$

Gaaside keskmise temperatuuri kaudu määratakse gaaside kiirus, konvektiiv- ja kiirgussoojusülekande tegur ning saastumistegur, arvutades varem leitud Q_f järgi kiirgust vastuvõtva pinna temperatuuri t_g . Nende suuruste kaudu määratakse soojuslähikandetegur k . Võttes aluseks koldest väljuvate gaaside temperatuuri ja oletatud temperatuuri pärast festooni, arvutatakse keskmine temperatuuride vahe Δt . Seejärel leitakse festooni soojusvastuvõtt soojusülekandevõrrandist (48). Kui soojusülekandevõrrandi põhjal arvutatud soojusvastuvõtt erineb enam kui $\pm 5\%$ oletatud temperatuuri järgi arvutatud soojusvastuvõtust, tuleb arvutust kirjeldatud skeemi kohaselt korrata leitud soojusülekande teguri k väärtusel. Kui viga on mainitud väiksem, määratakse soojusülekandevõrrandiga arvutatud festooni soojusvastuvõtu kaudu gaaside entalpia pärast festooni

$$I_f'' = I_k'' - \frac{Q_f}{\psi} \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3 \quad (82)$$

ning tema kaudu festoonist väljuvate gaaside temperatuur.

Aurutuspind. Torukimpudest moodustatud aurutusküttepindu kasutatakse madal- ja keskrõhukateliseadmetes. Torud paiknevad aurutusküttepinnas malekorras suhteliste sammudega $\frac{s_1}{d} = 2,0 - 3,0$ ja $\frac{s_2}{d} = 1,0 - 1,5$. Gaaside kiirus aurutusküttepinnas valitakse mitte alla 6 - 8 m/s.

Aurutusküttepinna konstruktorarvutuse lähtesuuruseks on gaaside temperatuur pärast küttepinda, mille kaudu mää-

ratakse gaaside entalpia I_a'' . Aurutusküttepinna soojusvastuvõtt

$$Q_a = \psi (I_k'' - I_a'' + \Delta\alpha_a I_{k.\delta.}^0) \text{ kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (83)$$

kus I_a'' - gaaside entalpia pärast aurutusküttepinda kJ/kg või kJ/m³,

$\Delta\alpha_a$ - väärdutegur aurutusküttepinnas.

Seejärel arvutatakse eeltoodu kohaselt soojuslähikandetegur k ja keskmine temperatuuride vahe ning soojusülekandevõrrandist (48) arvutuslik küttepind H_a^a (vt. valem (80)). Aurutusküttepinna täispind

$$H = H_a^a + x_a H_a^r \text{ m}^2, \quad (84)$$

kus H_a^r - aurutusküttepinna kiirgustvastuvõttev pind, kui $x_a = 1$, m²,

x_a - aurutusküttepinna nurktegur.

Nurktegur x_a määratakse nagu festoonigi puhul. Kui toruridade arv $z_1 \geq 5$, siis $x_a = 1$.

Aurutusküttepinna kontrollarvutusel oletatakse enne küttepinnast väljuvate gaaside temperatuur, mille kaudu määratakse gaaside entalpia pärast küttepinda I_a'' ning viimase kaudu valemi (83) järgi aurutusküttepinna soojusvastuvõtt. Siis arvutatakse soojuse lähikandetegur ja keskmine temperatuuride vahe küttepinnas ning nende baasil soojusülekandevõrrandi (48) järgi küttepinna soojusvastuvõtt (kasutades arvutuslikku küttepinda H_a^a). Kui valemiga (48) määratud soojusvastuvõtt ületab valemiga (83) arvutatud soojusvastuvõtu enam kui $\pm 2\%$, tuleb arvutust eelkirjeldatud skeemi järgi korrata (vt. samuti punkt 7). Lõplik gaaside temperatuur aurutusküttepinna väljumisel määratakse gaaside entalpia järgi, mis avaldub valemiga

$$I_a'' = I_k'' - \frac{Q_a}{\psi} + \Delta\alpha_a I_{k.\delta.}^0 \text{ kJ/kg või kJ/m}^3. \quad (85)$$

Siinjuures Q_a tähistab aurutusküttepinna lõplikku soojusvastuvõttu arvatatuna soojusülekanne võrrandi järgi.

Auruülekuumendi. Konvektiivauruülekuumendid kujundatakse tavaliselt kaheastmelistena. Madalatemperatuuriline osa valmistatakse vastuvoolu-, kõrgetemperatuuriline aga päri- vooluskeemina. Auruülekuumendi projekteerimisel arvutatakse auruülekuumendi mõlemad astmed kas koos või eraldi. Esimesel juhul tuleb ette anda ülekuumendi päri- ja vastuvoolu osade küttepindade suhe. Torude paigutus küttepinnas võib olla nii koridoorne kui ka malekorras. Torude sammud asetsevad piirides: $s_1/d = 2 - 5$ ja $s_2/d = 1,5 - 4$. Gaaside kiirus auruülekuumendis on $8 - 15$ m/s, auru kiirus aga $10 - 25$ m/s.

Konvektiivauruülekuumendi küttepinna arvutamisel (konstruktorarvutus) lähtutakse küttepinna soojusvastuvõtust

$$Q_{ü.k.} = \frac{D}{B_a} (i_{ü.k.}'' - i_{ü.k.}' + \Delta i_{reg.}) - Q_r' \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (86)$$

kus D - auruülekuumendit läbiv aurukogus kg/s,

B_a - arvutuslik kütusekulu kg/s,

$i_{ü.k.}''$ - auruülekuumendist väljuva auru entalpia kJ/kg,

$i_{ü.k.}'$ - auruülekuumendisse siseneva auru entalpia kJ/kg,

$i_{reg.}$ - soojusvastuvõtt aurutemperatuuri regulaatoris (valitakse piires $40 - 80$ kJ/kg) kJ/kg,

Q_r' - soojus, mille saab auruülekuumendi kiirgusega koldest kJ/kg või kJ/m³.

Soojushulk Q_r' arvutatakse valemiga

$$Q_r' = 0,75 \rho Q_r \frac{H_f^r}{H_r} (1 - x_f) \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3, \quad (87)$$

kus Q_r tähistab kolde soojusvastuvõttu kJ/kg või kJ/m³.

Kui auru temperatuuri reguleeritakse vee sissepitsimisega, siis auruülekuumendi arvutamisel peetagu silmas, et ülekuumendi erinevaid osi läbivad erinevad aurukogused.

Auruülekuumendis ülekantud soojushulga $Q_{ü.k.}$ kaudu arvutatakse gaaside entalpia pärast küttepinda

$$I''_{\text{ü.k.}} = I'_{\text{ü.k.}} - \frac{Q_{\text{ü.k.}}}{\varphi} + \Delta\alpha_{\text{ü.k.}} I_{\text{k.}\delta}^{\text{O}} \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3 \quad (88)$$

$I''_{\text{ü.k.}}$ järgi leitakse gaaside temperatuur ülekuumendist väljumisel.

Järgnev arvutus on analoogiline aurutusküttepinna konstruktorarvutusega.

Auruülekuumendi kontrollarvutusel oletatakse eelnevalt temperatuur pärast küttepinda, mis on aluseks küttepinna soojusvastuvõtu määramisel (valem (86)). Saadud soojusvastuvõtu kaudu määratakse ülekuumendist (või ülekuumendi osast) väljuva auru temperatuur. Seejärel arvutatakse soojusülekandevõrrandi abil küttepinna soojusvastuvõtt. Kui tähendatud suurus ei ületa lubatud kõikumise piire, loetakse arvutuse täpsus küllaldaseks.

Ökonomaiser. Ökonomaiseris paiknevad torud tavaliselt malekorras sammudega $s_1/d = 2,0 - 5,0$ ja $s_2/d = 1,0 - 2,0$. Ökonomaiser kujundatakse vastuvooluskeemina. Gaaside kiirus olenevalt põletatava kütuse omadustest valitakse piires 6 - 12 m/s.

Ökonomaiseris küttepinna määramisel lähtutakse tema soojusvastuvõtust, mis arvutatakse valemiga

$$Q_{\text{ök.}} = Q_{\text{k}} \left(k \frac{100}{100 - q_4} - Q_{\text{r}} - Q_{\text{f}} - Q_{\text{ü.k.}} \right) \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3 \quad (89)$$

Kui festooni asemel on aurutusküttepind, siis Q_{f} asemel tuleb kasutada Q_{a} .

Ökonomaiseris ülekantud soojushulga $Q_{\text{ök.}}$ kaudu arvutatakse gaaside entalpia küttepinnast väljumisel

$$I''_{\text{ök.}} = I''_{\text{ü.k.}} - \frac{Q_{\text{ök.}}}{\varphi} + \Delta\alpha_{\text{ök.}} I_{\text{k.}\delta}^{\text{O}} \quad \text{kJ/kg või kJ/m}^3 \quad (90)$$

Viimase kaudu on määratav gaaside temperatuur ökonomaiserist väljumisel.

Pindaaurujahutajate kasutamisel ökonomaiserisse siseneva ja ökonomaiserist väljuva vee entalpiad arvutatakse vastavalt valemitega

$$i'_{\text{ök.}} = i_{\text{t.v.}} + \frac{\Delta i_{\text{reg.}}^D}{D_{\text{ök.}}} \quad \text{kJ/kg}, \quad (91)$$

$$i''_{\text{ök.}} = i'_{\text{ök.}} + \frac{B Q_{\text{ök.}}}{D_{\text{ök.}}} \quad \text{kJ/kg}, \quad (92)$$

- kus $i_{\text{t.v.}}$ - toitevee entalpia kJ/kg,
 D - katelseadme aurutoodang kg/s,
 $D_{\text{ök.}}$ - ökonomaiserit läbiv toitevee kogus kg/s,
 $i_{\text{reg.}}$ - vee entalpia juurdekasv aurutemperatuuri regulaa-
toris, kJ/kg.

Kui $i''_{\text{ök.}}$ on väiksem keemistemperatuuril oleva vee entalpiast, kujuneb ökonomaiser mittekeevaks. Kui aga $i''_{\text{ök.}} > i'$, siis ökonomaiserist väljuv vesi keeb. Viimasel juhul aurusi-
saldus vees

$$x = \frac{i''_{\text{ök.}} - i'}{r}, \quad (93)$$

kus r - aurustumissoojus kJ/kg.

Arvutatud $i'_{\text{ök.}}$ ja $i''_{\text{ök.}}$ kaudu leitakse vee temperatuur ökonomaiserisse sisenemisel ja ökonomaiserist väljumisel.

Need temperatuurid on keskmise temperatuuride vahe arvutamise aluseks.

Ökonomaiserit kontrollarvutusel on teada ökonomaiserisse sisenevate gaaside ja vee temperatuur. Kasutades eespool kirjeldatud meetodikat, määratakse ökonomaiserist väljuvate gaaside temperatuur ja vee entalpia (temperatuur).

Õhuelsoojendi. Terastoru õhuelsoojendi küttepind gaasidepoolses osas töötab pikivoolus, õhupoolses osas aga ristivoolus. Torud paiknevad malekorras suhteliste sammudega $s_1/d = 1,2 - 1,6$ ja $s_2/d = 1,0 - 1,2$. Gaaside kiirus õhuelsoojendis on piirides 8 - 16 m/s. Gaaside- ja õhukiiruse suhe õhuelsoojenditele valitakse $w_g/w_{\delta} \approx 2$.

$$Q_{\delta.e.} = \psi (I_{\ddot{o}.k.}'' - I_{v.g.} + \Delta \alpha_{\delta.e.} I_{\delta}^{\circ}) \text{ kJ/kg või kJ/m}^3. \quad (94)$$

Õhuelesoojendi konstruktorarvutusel on teada nii õhu kui ka gaaside temperatuurid õhuelesoojendisse sisenemisel ning sellest väljumisel.

Küttepinna suurus, katelseadme lahkuvate gaaside ja kuuma õhu temperatuur arvutatakse analoogiliselt eespool toodud juhtudega. Õhuelesoojendi küttepinna kujundatakse to-
rude keskmise läbimõõdu (sise- ja välisläbimõõdu poolsumma) järgi. Kui kontrollarvutusel saadud katelseadme lahkuvate gaaside temperatuur erineb enam kui ± 10 deg ja õhuelesoojendustemperatuur enam kui ± 40 deg oletatud väärtus-
test, tuleb arvutust korrata.

x

Katelseadme soojustehnilisel kontrollarvutusel koldes, festoonis, aurülekuumendis ja ökonomaiseris ülekantud soojushulkade summa ei tohi ületada katelseadme kasuteguri ja kasutatava soojuse kaudu määratud kogu katelseadmes üle-
kantud soojushulka (veele ja aurule) mitte enam kui 0,5% kasutatavast soojusest, s.o.

$$\left| \frac{Q_k^t}{Q_k^t} \left(Q_f + Q_a + Q_{\ddot{u}.k.} + Q_{\ddot{o}.k.} \right) \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \right| \leq 0,005 Q_k^t. \quad (95)$$

9. Katelseadme küttepinna arvutamise näide

Arvutada katelseadme küttepinna, lähtudes järgmistest andmetest: katelseadme aurutoodang $D = 9,7$ kg/s, aururõhk trumlis $p_t = 41,2$ baari, ülekuumendatud auru rõhk $p = 39,2$ baari, auru temperatuur $t = 450^{\circ}\text{C}$, toitevee temperatuur $t_{t.v.} = 150^{\circ}\text{C}$, katlast väljuvate gaaside temperatuur $t_{v.g.} =$

= 160°C, õhu eelsoojendustemperatuur $t_{k.õ.}'' = 250^\circ\text{C}$, külma õhu temperatuur $t_{k.õ.} = 20^\circ\text{C}$. Kütus: masuut ($W^t = 3,0\%$, $A^k = 0,3\%$, $S_{o+p}^t = 0,5\%$, $C^t = 85,3\%$, $H^t = 10,2\%$, $O^t = 0,7\%$, $Q_k^t = 38980 \text{ kJ/kg}$).

Katelseadme skeem on toodud joonisel 9.

Kütuse arvutus. Kütuse põlemiseks teoreetiliselt vajalik õhuhulk

$$V^o = 0,0889(C^t + 0,375 S_{o+p}^t) + 0,265 H^t - 0,0333 O^t =$$

$$= 0,0889(85,3 + 0,375 \cdot 0,5) + 0,265 \cdot 10,2 - 0,0333 \cdot 0,7 = 10,28 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Kuivade kolmeaatomiliste gaaside hulk

$$V_{RO_2}^o = 0,01866 (C^t + 0,375 S_{o+p}^t) =$$

$$= 0,01866(85,3 + 0,375 \cdot 0,5) = 1,60 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Teoreetiline veeaurude hulk

$$V_{H_2O}^o = 0,111 H^t + 0,0124 W^t + 0,0161 V^o =$$

$$= 0,111 \cdot 10,2 + 0,0124 \cdot 3,0 + 0,0161 \cdot 10,28 = 1,34 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Teoreetiline lämmastiku hulk

$$V_{N_2}^o = 0,79 V^o = 0,79 \cdot 10,28 = 8,12 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Teoreetiline põlemisgaaside hulk

$$V_g^o = V_{RO_2}^o + V_{H_2O}^o + V_{N_2}^o = 1,60 + 1,34 + 8,12 = 11,06 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Põlemisgaaside tegelikud hulgad on toodud järgnevas tabelis

Põlemisgaaside hulgad ja kolmeatomiliste gaaside
partsiaalarhüd

Nimetus	Gaasikäik				
	Ühik	Kolle	Auru- ülekuu- mendi	Ökono- mai- ser	Ohueel- soo- jendi
Väärõhutegur	-	0,05	0,05	0,03	0,05
Liigõhutegur küttepinnas λ'	-	1,10	1,15	1,20	1,23
Liigõhutegur küttepinnas järel λ''	-	1,15	1,20	1,23	1,28
Keskmine liigõhutegur küttepinnas $\lambda = \frac{\lambda' + \lambda''}{2}$	-	1,15	1,175	1,215	1,255
Tegelik veeaurude hulk $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\lambda - 1)V^0$	m^3/kg	1,362	1,369	1,376	1,382
Põlemisgaaside hulk $V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\lambda - 1)V^0$	m^3/kg	12,62	12,80	13,30	13,72
RO_2 partsiaalarhök					
$p_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} \cdot 1$	baari	0,127	0,124	0,120	0,116
Veeaurude partsiaalarhök					
$p_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g} \cdot 1$	baari	0,108	0,106	0,103	0,101
Summaarne kolmeatomiliste gaaside partsiaalarhök $p_{RO_2} + p_{H_2O}$	baari	0,235	0,230	0,223	0,217

Põlemisgaaside entalpia väärtused sõltuvana temperatuurist ja liigõhutegurist vastavas gaasikäigus on toodud tabelis.

Põlemisgaaside entalpia väärtused kJ/kg

Gaaside temperatuur °C	Liigõhutegur			
	$\lambda = 1,15$	$\lambda = 1,20$	$\lambda = 1,23$	$\lambda = 1,28$
100				1909
200				3857
300			5646	
400			7628	
500		9450	9661	
600		11490	11746	
700		13579		
800		15711		
900	17221			
1000	19348			
1100	21509			
2000	41817			
2100	44134			
2200	46459			

Katelseadme soojusbilanss ja kütusekulu

Väljaspool katelt kuumutatud õhuga (kalorifeeris kuumutatud õhk) katlasse antav soojushulk

$$Q_{v.õ.} = (\alpha_k'' - \Delta\alpha_k + \Delta\alpha_{õ.e.}) [(I_{õ.e.}^0)' - I_{k.õ.}^0] =$$

$$= (1,15 - 0,05 + 0,05) 10,28 (1,322 \cdot 60 - 1,320 \cdot 20) = 625 \text{ kJ/kg.}$$

Seejuures õhu temperatuuriks õhueleesoojendisse sisene-
misel on validud 60°C .

Kütuse füüsikaline soojus (masuudi eelsoojendustempe-
ratuur $t_k = 80^{\circ}\text{C}$)

$$Q_{k.f.} = c_M t_k = 1,938 \cdot 80 = 155 \text{ kJ/kg.}$$

Kütuse kasutatav soojus

$$Q_k^t = Q_a^t + Q_{v.\delta.} + Q_{k.f.} = 38980 + 625 + 155 = 39760 \text{ kJ/kg.}$$

Soojuskadu katelseadmest väljuvate gaasidega

$$q_2 = \frac{I_{v.g.} - \alpha_{v.g.} I_{k.\delta.}^0}{Q_k^t} 100 = \frac{3080 - 10,28 \cdot 1,28 \cdot 1,320 \cdot 20}{39760} 100 = 6,7\%$$

Ülejäänud soojuskaod $q_3 = 1,5\%$, $q_4 = 0$ ja $q_5 = 1,1\%$.

Katelseadme kasutegur

$$\eta_k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 = 100 - 6,7 - 1,5 - 1,1 = 90,7\%$$

Kütusekulu

$$B = \frac{D(i_{\ddot{u}.a.} - i_{t.v.})}{\eta_k Q_k^t} 100 = \frac{97(3332 - 636)}{90,7 \cdot 39760} 100 = 0,727 \text{ kg/s.}$$

Kuna $q_4 = 0$, siis $B_a = B$.

Kolde küttepinna arvutus

Valime kolde ekraantorude läbimõõduks $60 \times 3 \text{ mm}$ ja sam-
muks $\frac{s}{d} = 1,33$.

Koldes kasulikult eralduv soojushulk

$$Q_k = Q_k^t \frac{100 - q_3}{100} + (\alpha_k'' - \Delta \alpha_k) I_{\delta.e.}^0 + \Delta \alpha_k I_{k.\delta.}^0 - Q_{v.\delta.} =$$

$$= 39760 \frac{100 - 1,5}{100} + 10,28(1,15 - 0,05)1,337 \cdot 250 - 0,05 \cdot 1,320 \cdot 20 -$$

$$- 625 = 42333 \text{ kJ/kg.}$$

Adiabaatiline põlemistemperatuur $T_a = \vartheta_a + 273 = 2022 + 273 = 2295$ °K. Valime koldest väljuvate gaaside temperatuuriks $\vartheta_k'' = 1050$ °C ehk $T_k'' = 1050 + 273 = 1323$ °K.

Kolde ülekantav soojushulk

$$Q_R = Q_k - I_k'' = 42333 - 20429 = 21904 \text{ kJ/kg.}$$

Kolde mustvärvusaste

$$a_k = \frac{a_1}{a_1 + (1 - a_1)\psi\varphi} = \frac{0,9}{0,9 + (1 - 0,9)0,96 \cdot 0,6} = 0,94.$$

Siinjuures on eeldatud, et kolde ekraneerimisaste $\psi = 0,96$ ja kiirgava kihi paksus $s > 2,5$ m, mille puhul $a_1 = 0,9$ (vt. lk. 18).

Paigutame masuudipihustid kolde põrandalt loetuna suhtelisele kõrgusele $x = 0,28$, siis tegur

$$M = A - BX = 0,52 - 0,3 \cdot 0,28 = 0,44.$$

Välisjahtumiskao tegur $\varphi = 1 - \frac{q_5}{100} = 1 - \frac{1,1}{100} = 0,989$.

Kolde kiirgustvastuvõttev pind

$$H_R = 1,76 \cdot 10^{10} \frac{\varphi B Q_R}{M \zeta a_k T_k'' T_a} \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \left(\frac{T_a}{T_k''} - 1 \right)^2} =$$

$$= 1,76 \cdot 10^{10} \frac{0,989 \cdot 0,727 \cdot 21904}{0,44 \cdot 0,6 \cdot 0,94 \cdot 1323 \cdot 2295} \sqrt[3]{\frac{1}{0,44^2} \left(\frac{2295}{1323} - 1 \right)^2} =$$

$$= 98 \text{ m}^2$$

Festoonist väljuvate gaaside temperatuuri arvutus

Kujundame festooni kolmerealisena torudevaheliste samudega $s_1 = 220$ mm ja $s_2 = 240$ mm. Torud paiknevad malekorras. Festooniava pind $F = 3,8 \cdot 2,45 = 9,3 \text{ m}^2$. Festooni täispind $H_F = n\pi dl = 45 \cdot \pi \cdot 0,060 \cdot 2,45 = 20,8 \text{ m}^2$.

Festooni nurktegur

$$x_f = 1 - (1 - x)^3 = 1 - (1 - 0,34)^3 = 0,71.$$

Festooni arvutuslik soojusvahetuspind

$$H_f^a = H_f - x_f H_f^r = 20,8 - 0,71 \cdot 9,3 = 14,2 \text{ m}^2.$$

Oletame festoonist väljuvate gaaside temperatuuriks

$$v_f'' = 1020^\circ\text{C}, \text{ millele vastab gaaside entalpia } I_f'' = 19780 \text{ kJ/kg.}$$

Keskmine gaaside temperatuur

$$v_f = \frac{v_k'' + v_f''}{2} = \frac{1050 + 1020}{2} = 1035^\circ\text{C}.$$

Gaaside kiirus festoonis

$$w = \frac{BV_g (v_f + 273)}{273 F_o} = \frac{0,727 \cdot 12,62 (1035 + 273)}{273 \cdot 6,85} = 6,4 \text{ m/s.}$$

KonvektiivsoojusülekanDETegur gaasidelt küttepinnale

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,27 C_{z1} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v}\right)^{0,6} = 0,27 \cdot 0,84 \frac{11,20 \cdot 10^{-2}}{0,06} \left(\frac{6,4 \cdot 0,06}{182 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,6} \\ &= 43,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{deg)}. \end{aligned}$$

KonvektiivsoojusülekanDETeguri α_k arvutamisel λ ja v väärtused on leitud gaaside keskmise temperatuuri järgi.

Kiirgava gaasikihi paksus

$$s = \left(2,82 \frac{s_1 + s_2}{d} - 10,6\right) d = \left(2,82 \frac{220 + 240}{60} - 10,6\right) 0,06 = 0,66 \text{ m,}$$

$$\text{kuna } \frac{s_1 + s_2}{d} = \frac{220 + 240}{60} = 7,67 > 7.$$

Kiirenõrgenemise tegur

$$\begin{aligned} k_g &= [1 - 0,38 \cdot 10^{-3} (v_f + 273)] (0,81 + 1,62 p_{H_2O}) \sqrt{\frac{p_{\text{PRO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}}}{s}} = \\ &= [1 - 0,38 \cdot 10^{-3} (1020 + 273)] (0,81 + 1,62 \cdot 0,108) \sqrt{\frac{0,235}{0,66}} = 0,296 \text{ 1/m.} \end{aligned}$$

Kiirgava gaasi mustvärvusaste

$$a = 1 - e^{-k_g s} = 1 - e^{-0,296 \cdot 0,66} = 0,178.$$

Kiirgust vastuvõtva pinna temperatuur

$$t_s = t + \varepsilon \frac{1000 B_0}{H_f^3} = 252 + 0,00335 \frac{0,727 \cdot 1000 (20429 - 19780)}{14,2} = 363^\circ \text{C}.$$

Kiirgussoojusülekande tegur

$$\alpha_r = 0,916 \cdot a \cdot (\vartheta_f + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{t_s + 273}{\vartheta_f + 273}\right)^{3,6}}{1 - \frac{t_s + 273}{\vartheta_f + 273}} =$$

$$= 0,91 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,178 (1035 + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{363 - 273}{1035 + 273}\right)^{3,6}}{1 - \frac{363 + 273}{1035 + 273}} =$$

$$= 37,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}).$$

Soojuslähikandetegur

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\omega k + \alpha_r} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{1,0 \cdot 43,0 + 37,0} + 0,00335} = 63,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}).$$

Keskmine temperatuuride vahe

$$\Delta t = \vartheta_f - t = 1035 - 352 = 783 \text{ deg}.$$

Festoonis ülekantud soojushulk

$$Q_f = \frac{k H_f \Delta t}{1000 B} = \frac{63,2 \cdot 14,2 \cdot 783}{0,727 \cdot 1000} = 966 \text{ kJ/kg}.$$

Kuna $\frac{976 - 0,989(20429 - 19780)}{966} \cdot 100 = 33\% > 5\%$, siis järelilikult tuleb arvutust korrata saadud soojuslähikandeteguri väärtusel. Oletame uueks temperatuuriks $\vartheta_f'' = 1005^\circ \text{C}$, millele vastab $I_f'' = 19456 \text{ kJ/kg}$.

Keskmine gaaside temperatuur

$$\vartheta_f = \frac{\vartheta_k'' + \vartheta_f''}{2} = \frac{1050 + 1005}{2} = 1027,5^\circ \text{C}.$$

Keskmine temperatuuride vahe

$$\Delta t = \vartheta_f - t = 1027 - 252 = 775 \text{ deg.}$$

Festoonis ülekantud soojushulk

$$Q_f = \frac{kH_f^a \Delta t}{1000 B} = \frac{63,2 \cdot 14,2 \cdot 775}{0,727 \cdot 1000} = 958 \text{ kJ/kg.}$$

Arvutatud soojusvastuvõtt erineb oletatust vähem kui 5%.
Gaaside entalpia festoonist väljumisel

$$I_f'' = I_k'' - \frac{Q_f}{\varphi} = 20429 - \frac{958}{0,989} = 19460 \text{ kJ/kg,}$$

millele vastab festoonist väljuvate gaaside temperatuur 1005°C .

Ülekuumendi küttepinna arvutus

Valime auruülekuumendi torude läbimõõduks $38 \times 3,5$ mm, mis paiknevad koridorselt sammudega $s_1 = 110$ mm ja $s_2 = 86$ mm. Auruülekuumendi - 30% kogu küttepinnast (kõrgem temperatuuriline osa) - töötab päriveroolu skeemil. Gaaside kiiruseks valime 12 m/s.

Auruülekuumendi aurupoolne ristlõikepind

$$F_o = z \frac{\pi d_B^2}{4} = 36 \frac{\pi 0,031^2}{4} = 0,027 \text{ m}^2.$$

Keskmine auru erimaht

$$v_{\text{ü.k.}} = \frac{v_{\text{ü.k.}}^I + v_{\text{ü.k.}}^{II}}{2} = \frac{0,0438 + 0,0816}{2} = 0,0649 \text{ m}^3/\text{kg.}$$

Auru kiirus

$$w = \frac{Dv}{F_o} = \frac{2,7 \cdot 0,0649}{0,027} = 23 \text{ m/s.}$$

Konvektiivsoojusülekande tegur küttepinnalt aurule

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,023 C_t C_1 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,8} Pr^{0,4} = \\ &= 0,023 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \frac{5,44 \cdot 10^{-2}}{0,031} \left(\frac{23 \cdot 0,031}{1,53 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} 1,02^{0,4} = \\ &= 1370 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}). \end{aligned}$$

Seejuures λ , ν ja Pr on määratud auru keskmisel temperatuuril 351°C .

Auruülekuumendis ülekantud soojushulk

$$\begin{aligned} Q_{\text{ü.k.}} &= (i_{\text{ü.a.}}' - i_{\text{ü.a.}} + \Delta i_{\text{reg}}) \frac{D}{B} - Q_R' = \\ &= (3332 - 2800 + 60) \frac{9,7}{0,727} - 446 = 7438 \text{ kJ/kg}, \end{aligned}$$

kus

$$\begin{aligned} Q_R' &= 0,75 \psi Q_R (1-x_F) \frac{H_F^R}{H_F} = 0,75 \cdot 0,989 \cdot 21904 (1-0,71) \frac{9,3}{98} = \\ &= 446 \text{ kJ/kg}. \end{aligned}$$

Gaaside entalpia aurüülekuumendist väljumisel

$$\begin{aligned} I_{\text{ü.k.}}'' &= I_F'' - \frac{Q_{\text{ü.k.}}}{\psi} + \Delta i_{\text{ü.k.}} I_{\text{k.}\delta.}^0 = \\ &= 19460 - \frac{7438}{0,989} + 0,05 \cdot 10,28 \cdot 1,320 \cdot 20 = 11954 \text{ kJ/kg}, \end{aligned}$$

millele vastab gaaside temperatuur $\vartheta_{\text{ü.k.}}'' = 622^\circ\text{C}$.

Keskmine gaaside temperatuur aurüülekuumendis

$$\vartheta_{\text{ü.k.}} = \frac{\vartheta_{\text{ü.k.}}' + \vartheta_{\text{ü.k.}}''}{2} = \frac{1005 + 622}{2} = 813^\circ\text{C}.$$

Konvektiivsoojusülekangetegur gaasidelt küttepinnale

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,177 C_{z1} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,64} = \\ &= 0,177 \cdot 1,0 \frac{9,26 \cdot 10^{-2}}{0,038} \left(\frac{12 \cdot 0,038}{135 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,64} = \\ &= 78,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}). \end{aligned}$$

Kiirgava gaasikihi paksus

$$s = (1,87 \frac{s_1 + s_2}{d} - 4,1)d = (1,87 \frac{110+86}{38} - 4,1) 0,038 = 0,21 \text{ m.}$$

$$\text{Kuna } \frac{s_1 + s_2}{d} = \frac{110 + 86}{38} = 5,16 < 7.$$

Kiirenõrgenemise tegur

$$\begin{aligned} k_g &= [1 - 0,38 \cdot 10^{-3} (\varphi_{\text{ü.k.}} + 273)] (0,81 + 1,62 p_{\text{H}_2\text{O}}) \sqrt{\frac{p_{\text{RO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}}}{s}} = \\ &= [1 - 0,38 \cdot 10^{-3} (813 + 273)] (0,81 + 1,62 \cdot 0,106) \sqrt{\frac{0,230}{0,21}} = \\ &= 0,64 \text{ 1/m.} \end{aligned}$$

Kiirgava gaasi mustvärvusaste

$$a = 1 - e^{-k_g s} = 1 - e^{-0,64 \cdot 0,21} = 0,125.$$

Oletame aurülekuumendi soojuskoormuseks 30 kW/m².

Kiirgust vastuvõtva pinna temperatuur

$$\begin{aligned} t_s &= t + (\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}) \frac{BQ_{\text{ü.k.}}}{H} = 351 + (0,00335 + \frac{1}{1370}) 30 \cdot 10^3 = \\ &= 473^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Kiirgussoojusülekangetegur

$$\alpha_r = 0,91 b_o a (\varphi_{\text{ü.k.}} + 273)^3 \frac{1 - (\frac{t_s + 273}{\varphi_{\text{ü.k.}} + 273})^{3,6}}{1 - \frac{t_s + 273}{\varphi_{\text{ü.k.}} + 273}} =$$

$$= 0,91 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,125 (813 + 273)^3 \frac{1 - (\frac{473+273}{813+273})^{3,6}}{1 - \frac{473+273}{813+273}} =$$

$$= 19,6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{deg).}$$

Soojuslähikandetegur

$$k = \frac{1}{\omega \alpha_k + \alpha_r} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{1,0 \cdot 78,2 + 19,6} + 0,00335 + \frac{1}{1370} =$$

$$= 70,6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{deg).}$$

Keskmine temperatuuride vahe vastuvooluskeemile

$$t_{v.v.} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{(1005 - 450) - (622 - 252)}{\ln \frac{1005 - 450}{622 - 252}} = 457 \text{ deg.}$$

$$\text{Abisuurused } P = \frac{t_{\text{ü.k.}}'' - t_{\text{ü.k.}}'}{t_{\text{ü.k.}}'' - t_{\text{ü.k.}}'} = \frac{450 - 252}{1005 - 252} = 0,264 \text{ ja}$$

$$R = \frac{t_{\text{ü.k.}}'' - t_{\text{ü.k.}}'}{t_{\text{ü.k.}}'' - t_{\text{ü.k.}}'} = \frac{450 - 252}{1005 - 622} = 0,304. \text{ Parandustegur } \psi = 1.$$

Auruülekuumendi küttepind

$$H_{\text{ü.k.}} = \frac{1000 BQ_{\text{ü.k.}}}{k \Delta t} = \frac{0,727 \cdot 1000 \cdot 7438}{70,6 \cdot 457} = 168 \text{ m}^2.$$

Küttepinna soojuskoormus

$$\frac{BQ_{\text{ü.k.}}}{H} = \frac{0,727 \cdot 7438}{168} = 32,2 \text{ kW/m}^2$$

erineb oletatust vähem kui 15%.

Ökonomaiseri küttepinna arvutus

Valime ökonomaiseri torude läbimõduks 32 x 3 mm, mis paiknevad malekorras sammudega $s_1 = 56 \text{ mm}$ ja $s_2 = 60 \text{ mm}$. Gaaside kiiruseks ökonomaiseris valime $w = 9,0 \text{ m/s}$.

Ökonomaiseris ülekantav soojushulk

$$Q_{\text{ök.}} = 0,01 Q_k^t \eta_k - Q_r - Q_f - Q_{\text{ü.k.}} =$$

$$= 0,01 \cdot 39760 \cdot 90,7 - 21904 - 958 - 7438 = 5762 \text{ kJ/kg.}$$

Gaaside entalpia ökonomaiserist väljumisel

$$I_{\text{ök.}}'' = I_{\text{ü.k.}}'' - \frac{Q_{\text{ök.}}}{\phi} + \Delta \alpha_{\text{ök.k.}} I_{\text{k.}}^0 =$$

$$= 11954 - \frac{5762}{0,989} + 0,03 \cdot 10,28 \cdot 1,320 \cdot 20 = 6136 \text{ kJ/kg.}$$

millele vastab ökonomaiserist väljuvate gaaside temperatuur
 $\vartheta''_{\text{ök.}} = 325^{\circ}\text{C}.$

Keskmine gaaside temperatuur ökonomaiseris

$$\vartheta''_{\text{ök.}} = \frac{\vartheta'_{\text{ök.}} + \vartheta''_{\text{ök.}}}{2} = \frac{622 + 325}{2} = 473^{\circ}\text{C}.$$

Konvektiivsoojusülekande tegur

$$\alpha_k = 0,27 c_{z1} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} =$$

$$= 0,27 \cdot 1,0 \frac{6,34 \cdot 10^{-2}}{0,032} \left(\frac{9,0 \cdot 0,032}{72,0 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,6} = 75,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{deg}.$$

Kiirgava gaasikihi paksus

$$s = (1,87 \frac{s_1 + s_2}{d} - 4,1)d = (1,87 \frac{56+60}{32} - 4,1)0,032 = 0,085 \text{ m}.$$

Kiirenõrgenemise tegur

$$k_g = [1 - 0,38 \cdot 10^{-3} (\vartheta''_{\text{ök.}} + 273)] (0,81 + 1,62 P_{\text{H}_2\text{O}}) \sqrt{\frac{P_{\text{RO}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}}{s}} =$$

$$= [1 - 0,38 \cdot 10^{-3} (473 + 273)] (0,81 + 1,62 \cdot 0,103) \sqrt{\frac{0,223}{0,085}} = 1,144/\text{m}.$$

Kiirgava gaasi mustvärvusaste

$$a = 1 - e^{-k_g s} = 1 - e^{-1,14 \cdot 0,085} = 0,097.$$

Vee entalpia ökonomaiserisse sisenemisel

$$i'_{\text{ök.}} = i_{\text{t.v.}} + \Delta i_{\text{reg}} = 636 + 60 = 696 \text{ kJ/kg},$$

millele vastab vee temperatuur $168^{\circ}\text{C}.$

Vee entalpia ökonomaiserist väljumisel

$$i''_{\text{ök.}} = i'_{\text{ök.}} + \frac{BQ_{\text{ök.}}}{D} = 696 \frac{0,727 \cdot 5762}{9,7} = 1127 \text{ kJ/kg}.$$

Kuna $i''_{\text{ök.}} > i'$, siis järelikult ökonomaiserist väljuv vesi sisaldab auru.

Keskmine vee temperatuur ökonomaiseris

$$t_{\text{ök.}} = \frac{t_{\text{ök.}}'' + t_{\text{ök.}}'}{2} = \frac{252 + 168}{2} = 210^{\circ}\text{C}.$$

Kiirgust vastuvõtva pinna temperatuur

$$t_s = t_{\text{ök.}} + 100 = 210 + 100 = 310^{\circ}\text{C}.$$

Kiirgussoojusülekanalitegur

$$\begin{aligned} \alpha_r &= 0,91 \cdot 0,097 \cdot (t_{\text{ök.}} + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{t_s + 273}{t_{\text{ök.}} + 273}\right)^{3,6}}{1 - \frac{t_s + 273}{t_{\text{ök.}} + 273}} = \\ &= 0,91 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,097 (473 + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{310 + 273}{473 + 273}\right)^{3,6}}{1 - \frac{310 + 273}{473 + 273}} = \\ &= 5,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}). \end{aligned}$$

Soojuslähikandetegur

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\omega \alpha_k + \alpha_r} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{1,0 \cdot 75,4 + 5,6} + 0,00335} = 63,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}).$$

Keskmine temperatuuride vahe

$$\Delta t = \frac{(t_{\text{ök.}}' - t_{\text{ök.}}'') - (t_{\text{ök.}}'' - t_{\text{ök.}}'')}{\ln \frac{t_{\text{ök.}}' - t_{\text{ök.}}''}{t_{\text{ök.}}'' - t_{\text{ök.}}''}} = \frac{(622 - 252) - (325 - 168)}{\ln \frac{622 - 252}{325 - 168}} = 250 \text{ deg}.$$

Ökonomaiseris küttepind

$$H_{\text{ök.}} = \frac{1000 \text{ BQ}_{\text{ök.}}}{k \Delta t} = \frac{0,727 \cdot 1000 \cdot 5762}{63,7 \cdot 250} = 264 \text{ m}^2.$$

Ohueelsoojendi küttepinna arvutus

Valime õhueelsoojendi torude läbimõõduks 40 x 1,5 mm, mis paiknevad küttepinnas malekorras vastavalt sammudega $s_1 = 56$ mm ja $s_2 = 44$ mm. Gaaside kiirus $w_g = 12$ m/s. Ohueelsoojendil on kaks käiku.

Ohueelsoojendis ülekantav soojushulk

$$Q_{\delta.e.} = \varphi (I_{\delta.k.}'' - I_{v.g.} + \Delta \alpha_{\delta.e.} I_{k.\delta.}^0) =$$
$$= 0,989(6136 - 3080 + 0,05 \cdot 10,28 \cdot 1,320 \cdot 20) = 3036 \text{ kJ/kg.}$$

Konvektiivsoojusülekandetegur gaasidelt küttepinnale

$$\alpha_k = 0,023 C_t C_1 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,8} Pr^{0,4} =$$
$$= 0,023 \cdot 1,06 \cdot 1,0 \frac{4,36 \cdot 10^{-2}}{0,037} \left(\frac{12 \cdot 0,037}{38,3 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} 0,66^{0,4} = 44,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{deg).}$$

Soojusülekandetegur α_k on arvatatud keskmise gaaside temperatuuri $\vartheta_{\delta.e.} = \frac{\vartheta_{\delta.e.}' + \vartheta_{v.g.}}{2} = \frac{325 + 160}{2} = 242^\circ\text{C}$ järgi.

Keskmine õhutemperatuur

$$t_{\delta.e.} = \frac{t_{\delta.e.}'' + t_{\delta.e.}'}{2} = \frac{250 + 60}{2} = 155^\circ\text{C.}$$

Konvektiivsoojusülekandetegur küttepinnaalt õhule

$$\alpha_2 = 0,27 C_{z1} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} =$$
$$= 0,27 \cdot 1,0 \frac{3,61 \cdot 10^{-2}}{0,04} \left(\frac{6 \cdot 0,04}{29,5 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,6} = 53,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{deg).}$$

seejuures kiiruste suhteks w_g/w_δ on valitud 2.

Soojuslähikandetegur

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{0,65}{\frac{1}{44,4} + \frac{1}{53,8}} = 15,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{deg).}$$

Keskmine temperatuuride vahe vastuvooluskeemile

$$\Delta t_{v.v.} = \frac{(\vartheta'_{v.g.} - t'_{\delta.e.}) - (\vartheta''_{\delta.e.} - t''_{\delta.e.})}{\ln \frac{\vartheta'_{v.g.} - t'_{\delta.e.}}{\vartheta''_{\delta.e.} - t''_{\delta.e.}}} =$$

$$= \frac{(160 - 60) - (325 - 250)}{\ln \frac{160 - 60}{325 - 250}} = 88 \text{ deg.}$$

Abisuurused

$$P = \frac{\vartheta''_{\delta.e.} - \vartheta'_{v.g.}}{\vartheta'_{\delta.e.} - t'_{\delta.e.}} = \frac{325 - 160}{325 - 60} = \frac{165}{265} = 0,623$$

ja

$$R = \frac{t''_{\delta.e.} - t'_{\delta.e.}}{\vartheta''_{\delta.e.} - \vartheta'_{v.g.}} = \frac{250 - 60}{325 - 160} = \frac{190}{165} = 1,15.$$

Parandustegur $\psi = 0,91$. Keskmine temperatuuride vahe ristvooluskeemile

$$\Delta t = \psi \Delta t_{v.v.} = 0,91 \cdot 88 = 80 \text{ deg.}$$

Ohueelsoojendi küttepind

$$H_{\delta.e.} = \frac{1000 BQ_{\delta.e.}}{k \Delta t} = \frac{0,727 \cdot 1000 \cdot 3036}{15,8 \cdot 80} = 1750 \text{ m}^2.$$

Tabelite ja vedelkütuste omadused

Jrk. nr.	Vedelikohi	Kütuse sort	Tarbimissine koostis %										Alumise küttevaartus C_{ca} kJ/kg	Lendosadusialvus V_l %	Tübe sulamistemperatuurid $^{\circ}C$		
			W^t	A^t	S_p^t	S_o^t	C^t	H^t	N^t	O^t	t_1	t_2			t_3		
1		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
1.	Donetsi bassein	A	13,0	19,6	2,4	1,6	50,6	3,7	1,1	8,0	20260	43,0	1050	1150	1200		
2.	"	I	7,0	15,8	1,9	1,4	62,1	4,2	1,2	6,4	24700	39,0	1050	1150	1220		
3.	"	III	6,0	18,8	3,6		62,4	3,8	1,1	4,3	25040	32,0	1100	1120	1200		
4.	"	T	5,0	15,2	1,8	0,9	70,6	3,4	1,2	1,9	27420	13,0	1060	1230	1260		
5.	"	IIA	5,5	15,1	1,3	0,7	72,3	2,8	1,0	1,3	27090	8,0	1060	1240	1290		
6.	"	AM	5,0	13,3	1,0	0,2	76,4	1,5	0,8	1,3	27210	4,0	1060	1170	1200		
7.	"	AM	7,0	16,7	1,1	0,6	70,5	1,4	0,8	1,9	25160	4,0	1070	1200	1250		
8.	Kurnetski bassein	IC	6,5	12,2	0,6		74,0	3,5	1,5	1,7	28220	15,0	1150	1340	1440		
9.	"	K-IC-CC	9,0	15,5	0,5		64,9	3,8	1,5	4,8	25080	29,0	1090	1200	1240		
10.	"	IC-T	8,0	14,7	0,5		70,0	3,3	1,5	2,0	26630	16,0	1100	1240	1300		
11.	"	A	10,0	5,0	0,4		67,2	4,7	2,0	10,2	26380	40,0	1130	1200	1260		
12.	"	I	9,0	10,0	0,6		66,1	4,6	2,2	6,6	26130	39,0	1100	1200	1250		
13.	"	OCX-18-15	6,0	10,3	0,4		73,2	3,9	1,8	4,4	28340	22,0	1100	1240	1280		
14.	"	T	7,0	16,7	0,6		68,3	3,1	1,5	2,8	25660	11,0	1200	1360	1485		
15.	"	IIIIC	4,0	25,0	0,5		60,4	3,6	1,8	4,7	23700	28,0	1090	1300	1350		
16.	Karaganda bassein	III-IC	7,5	25,0	0,8		57,0	3,4	0,9	5,4	22270	28,0	1150	1400	1450		
17.	"	E	26,0	17,0	0,6		41,9	2,7	0,5	11,3	15160	40,0	1100	1200	1225		
18.	Moekva-lõhine bassein	E	33,0	23,5	1,7	1,2	29,1	2,2	0,6	8,7	10510	45,0	1350	1500	1500		
19.	Lõhne-Ukraina bassein	E	37,0	18,9	1,2	2,4	28,2	2,3	0,4	9,6	10130	57,0	1050	1120	1150		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
20.	Ureali bassein	Г	5,5	29,3	3,2	1,9	50,9	3,7	0,8	4,7	20810	44,0	1150	1470	1450
21.	"	И	5,5	26,5	4,6	51,7	3,8	0,9	7,0	20940	20940	45,0	1130	1470	1440
22.	"	IIIIM	11,0	35,6	8,0	1,5	37,9	2,9	0,2	2,2	16160	44,0	1000	1140	1170
23.	"	Б	28,0	21,6	0,3	34,3	2,4	0,6	12,8	11890	11890	48,0	1150	1350	1400
24.	"	Г	10,0	18,0	0,5	0,6	58,0	4,0	1,1	7,8	22860	40,0	1200	1275	1300
25.	"	А	5,0	20,9	0,4	66,7	2,7	1,0	3,3	24620	24620	9,0	1500	1500	1500
26.	Primorski bassein	III	6,0	21,6	0,4	61,9	3,6	1,0	5,5	23950	23950	29,0	1130	1300	1350
27.	"	Т	6,0	23,5	0,4	62,5	2,8	0,7	3,1	23950	11,0	11,0	1100	1250	1280
28.	"	Б	28,0	21,6	0,3	35,5	2,9	0,8	10,9	13060	49,0	49,0	1125	1240	1280
29.	"	Т	5,0	38,0	0,3	49,9	2,6	0,6	3,6	18920	17,0	17,0	1260	1400	1430
30.	Krasnojarski bassein	Б	40,0	7,2	0,6	37,2	2,6	0,4	12,0	12810	48,0	48,0	1250	1350	1360
31.	Eesti NSV	põlevk.	15,0	37,4+ +13,8	1,1	0,4	25,0	3,2	0,1	4,0	11390	90,0	1050	1100	1200
32.	Leningradi oblast	"	15,0	43,8+ +14,9	1,0	0,3	19,3	2,5	0,1	3,1	8710	90,0	1050	1100	1200
33.	free- turvas		50,0	5,5	0,1	25,7	2,7	1,1	14,9	8500	7,0	7,0	1050	1100	1200
34.	puut		40,0	0,6	-	30,3	3,6	0,4	25,1	10210	85,0	85,0	-	-	-
35.	väävli- vaene maeut		3,0	0,3	0,5	85,3	10,2	0,7	36980	-	-	-	-	-	-
36.	väävli- rikes maeut		3,0	0,3	2,9	83,4	10,0	0,4	36390	-	-	-	-	-	-

Tabel 1b

Gaaskütuste omadused

Jrk. nr.	Gaasi nimetus	Gaasi koostis										Alumiin kütteväärtus Q_{ga} kJ/m ³	
		H ₂ S	CO ₂	Küttestanata süsiainetüki	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀		N ₂
1.	Uhtinski looduslik gaas	-	0,3	-	-	-	-	88,0	1,9	0,2	0,3	9,3	33270
2.	Melitopoli looduslik gaas	-	0,2	-	-	-	-	97,9	-	0,1	-	1,8	35130
3.	Starropoli looduslik gaas	-	0,1	-	-	-	-	98,0	0,4	0,2	-	1,3	35550
4.	VesiGaas	0,3	6,5	-	0,2	37,0	50,0	0,5	-	-	-	5,5	10320
5.	Turbogeneraatorgaas	0,1	8,0	0,4	0,2	28,0	15,0	3,0	-	-	-	45,3	6480
6.	Puidu generaatorgaas	-	6,5	0,4	0,2	29,0	14,0	3,0	-	-	-	46,9	6480
7.	Põlevkivi kamberahjugaas	16,5		0,7	0,7	12,0	30,0	14,9	2,3	0,3	0,1	18,4	13000

$C_2H_4=3,7$
 $C_2H_6=1,0$
 $C_4H_{10}=0,1$
 } 4,8

Tabel 2

Gaaside keskmised isobaarsed mahterisoojused
(kJ/(m³.deg))

°C	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	Ohk
0	1,306	1,295	1,600	1,494	1,319
100	1,318	1,296	1,700	1,500	1,324
200	1,335	1,300	1,787	1,522	1,332
300	1,356	1,307	1,863	1,542	1,342
400	1,378	1,316	1,930	1,565	1,354
500	1,398	1,328	1,989	1,590	1,368
600	1,417	1,340	2,041	1,615	1,383
700	1,434	1,354	2,088	1,641	1,398
800	1,450	1,367	2,131	1,668	1,411
900	1,465	1,380	2,169	1,696	1,425
1000	1,478	1,392	2,204	1,723	1,437
1100	1,489	1,403	2,235	1,750	1,450
1200	1,501	1,414	2,264	1,777	1,461
1300	1,511	1,425	2,290	1,803	1,495
1400	1,520	1,435	2,314	1,828	1,483
1500	1,529	1,444	2,335	1,853	1,493
1600	1,538	1,453	2,355	1,876	1,502
1700	1,546	1,461	2,374	1,900	1,501
1800	1,554	1,469	2,392	1,921	1,518
1900	1,562	1,476	2,407	1,942	1,526
2000	1,569	1,483	2,422	1,963	1,533
2100	1,576	1,489	2,436	1,982	1,540
2200	1,583	1,495	2,448	2,001	1,546

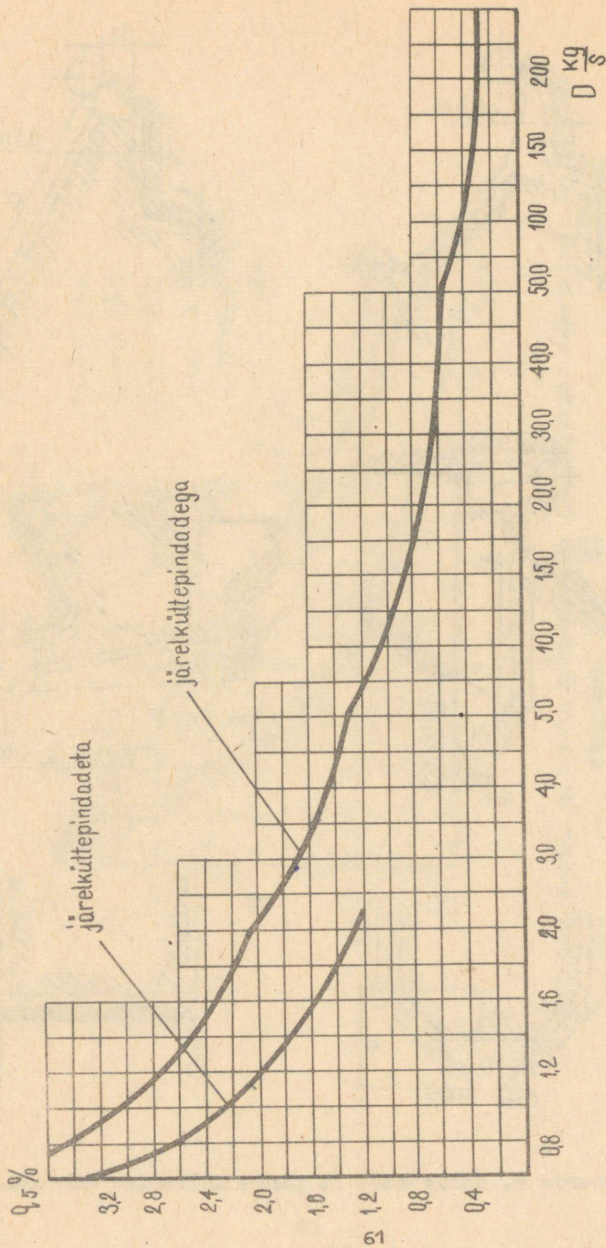
Õhu ja põlemisgaaside füüsikalised
konstandid

t °C	Õhk		Põlemisgaasid		Pr
	$\lambda \cdot 10^2$ W/(m.deg)	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	$\lambda \cdot 10^2$ W/(m.deg)	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	
0	2,44	13,3	2,28	12,2	0,72
100	3,21	23,0	3,13	21,5	0,69
200	3,93	34,8	4,01	32,8	0,67
300	4,61	48,2	4,84	45,8	0,65
400	5,21	63,0	5,70	60,4	0,64
500	5,75	79,3	6,56	76,3	0,63
600	6,23	96,3	7,42	93,6	0,62
700	6,71	115	8,27	112	0,61
800	7,18	135	9,15	132	0,60
900	7,63	155	10,01	152	0,59
1000	8,07	178	10,90	174	0,58
1100	8,50	199	11,75	197	0,57
1200	8,92	223	12,56	221	0,56
1300	-	-	13,49	245	0,55

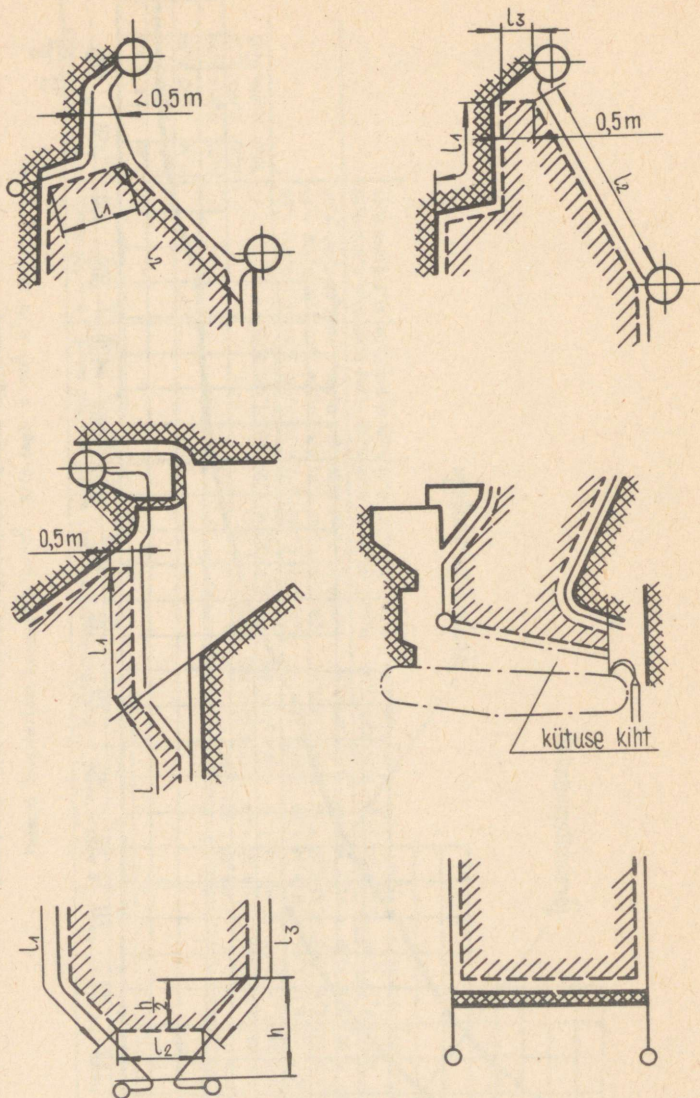
Tabel 4

Veeauru füüsikalised konstandid $\lambda \cdot 10^2$ W/(m·deg), $\nu \cdot 10^6$ m²/s ja Pr

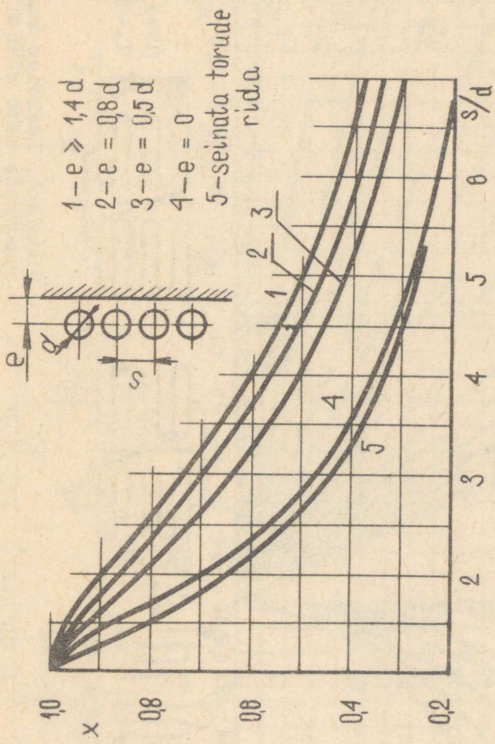
t °C	p = 0,981 baari		p = 19,6 baari		p = 39,2 baari		p = 58,9 baari		p = 98,1 baari		p = 147 baari		p = 196 baari		Kuiv küllestunud sur							
	λ	Pr	λ	Pr	λ	Pr	λ	Pr	λ	Pr	λ	Pr	λ	Pr	λ	Pr						
100	2,37	20,7	1,06												2,37	20,6	1,08					
150	2,84	27,5	0,97												2,88	5,47	1,15					
200	3,35	35,2	0,94												3,54	2,03	1,34					
250	3,87	44,0	0,92		4,50	0,930	1,62								4,51	0,913	1,61					
300	4,42	53,8	0,91		4,92	1,22	1,14	5,98	0,765	1,39					6,27	0,461	2,13					
350	5,00	64,4	0,90		5,43	1,52	1,02	6,20	0,976	1,10	6,71	0,536	1,36	8,89	0,300	2,48						
400	5,59	76,6	0,90		5,75	3,75	0,93	5,98	1,84	0,97	6,26	1,19	1,01	6,99	0,683	1,11	8,28	0,422	1,32	10,3	0,289	1,66
450	6,20	90,0	0,90		6,35	4,42	0,92	6,56	1,98	0,94	6,84	1,43	0,96	7,42	0,828	1,01	8,41	0,528	1,08	9,92	0,372	1,19
500	6,84	104	0,90		6,98	5,15	0,91	7,16	2,54	0,92	7,39	1,67	0,94	7,92	0,983	0,96	8,75	0,636	1,00	9,99	0,466	1,04
550	7,49	120	0,89		7,61	5,93	0,91	7,78	2,93	0,92	8,00	1,94	0,92	8,47	1,15	0,94	9,19	0,749	0,95	10,0	0,552	0,97
600	8,18	137	0,89		8,29	6,79	0,91	8,44	3,37	0,91	8,63	2,23	0,91	9,06	1,32	0,92	9,70	0,867	0,92	10,5	0,644	0,95



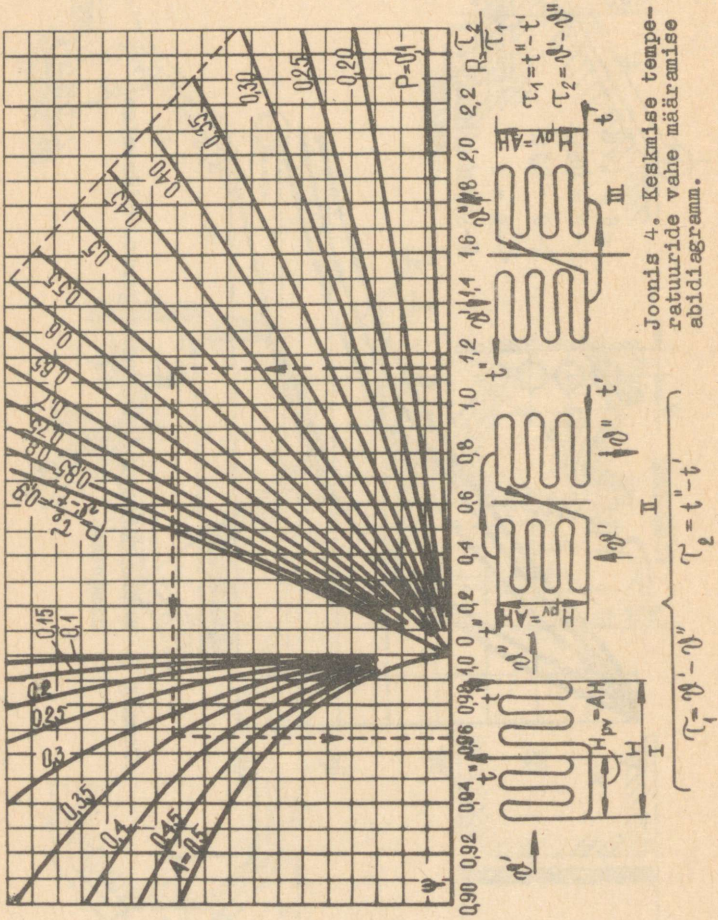
Joonis 1. Katelagregaadi välisjahutamiskao sõltuvus katelagregaadi tootangust.



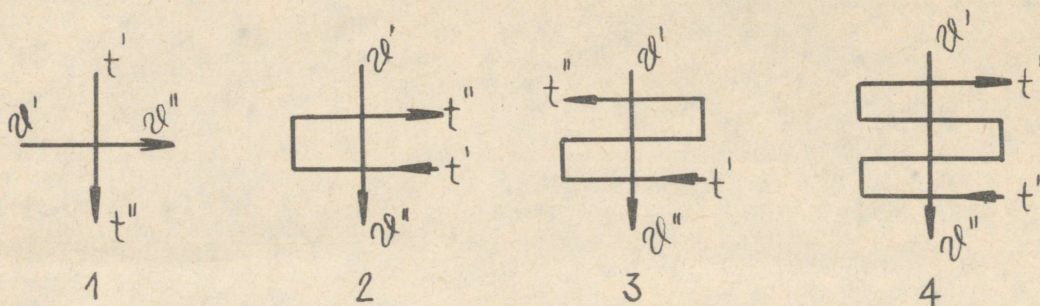
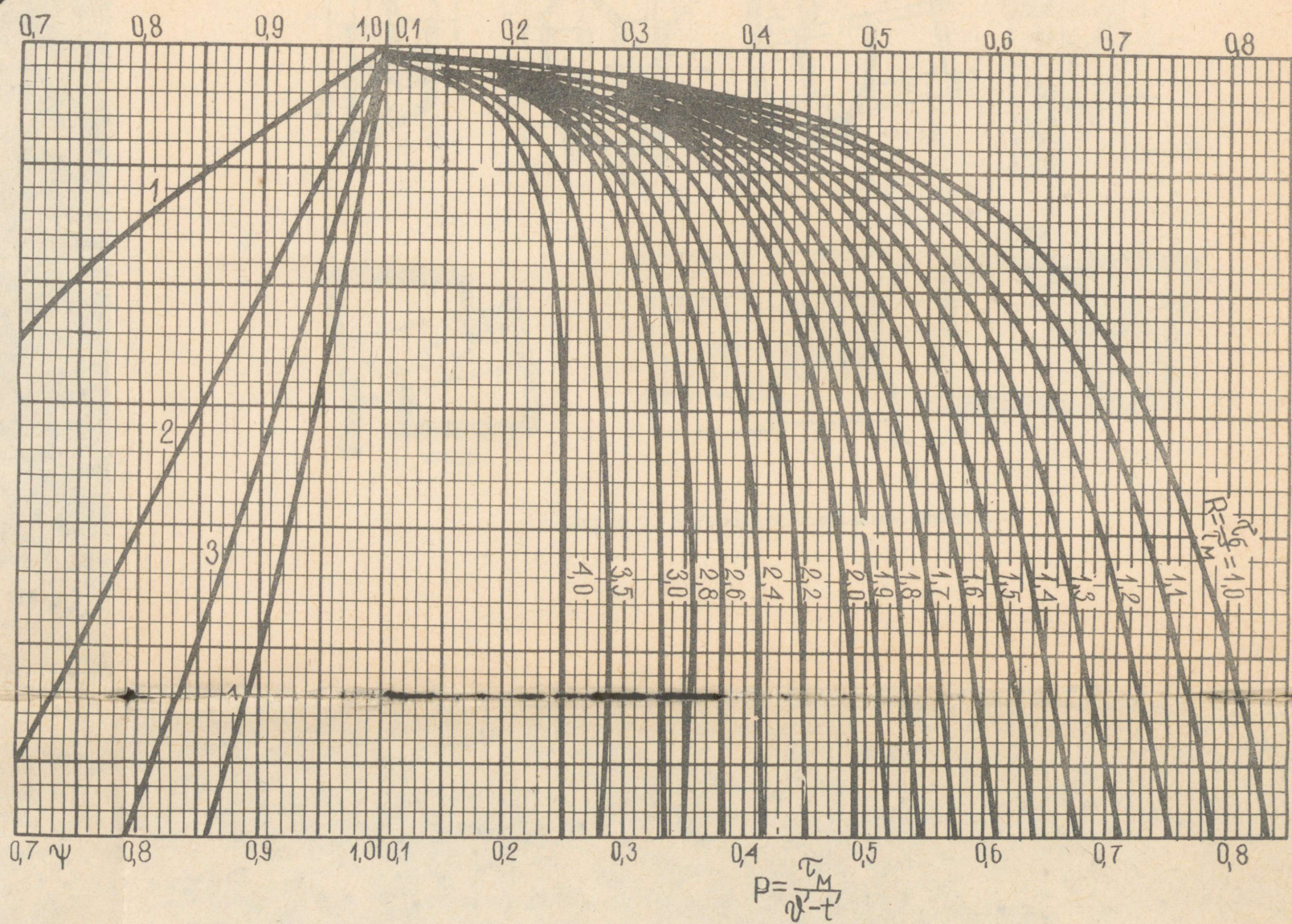
Joonis 2. Kolde mahu ja pinna määramise skeemid.



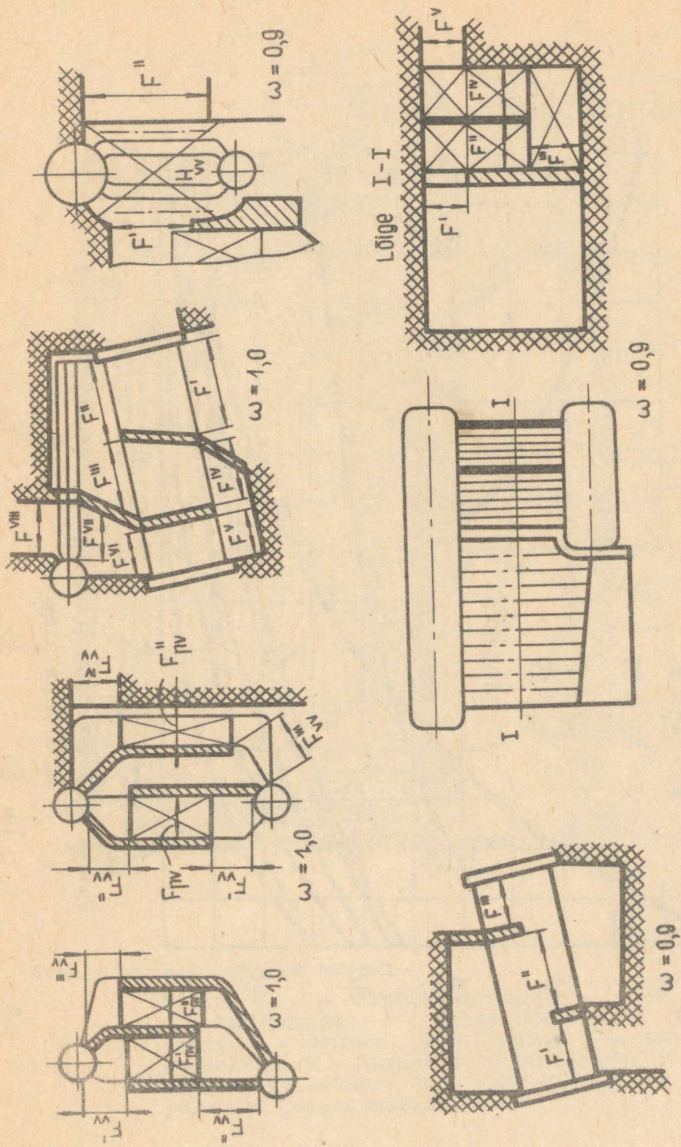
Joonis 3. Katla küttepindade nurktegurite määramise diagramm.



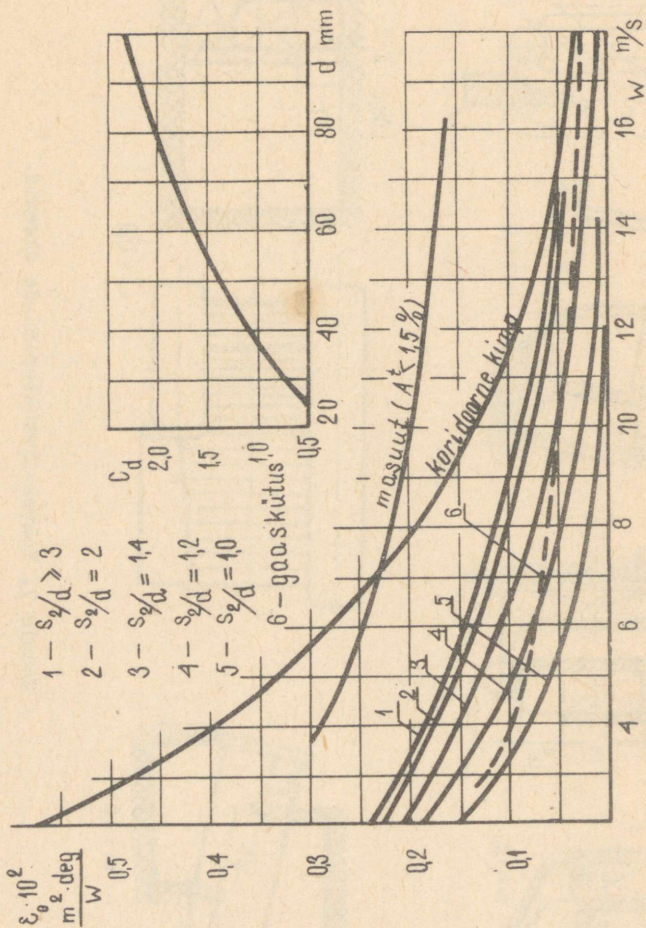
Joonis 4. Keskmise temperatuuri vahetuse määramise abidiagramm.



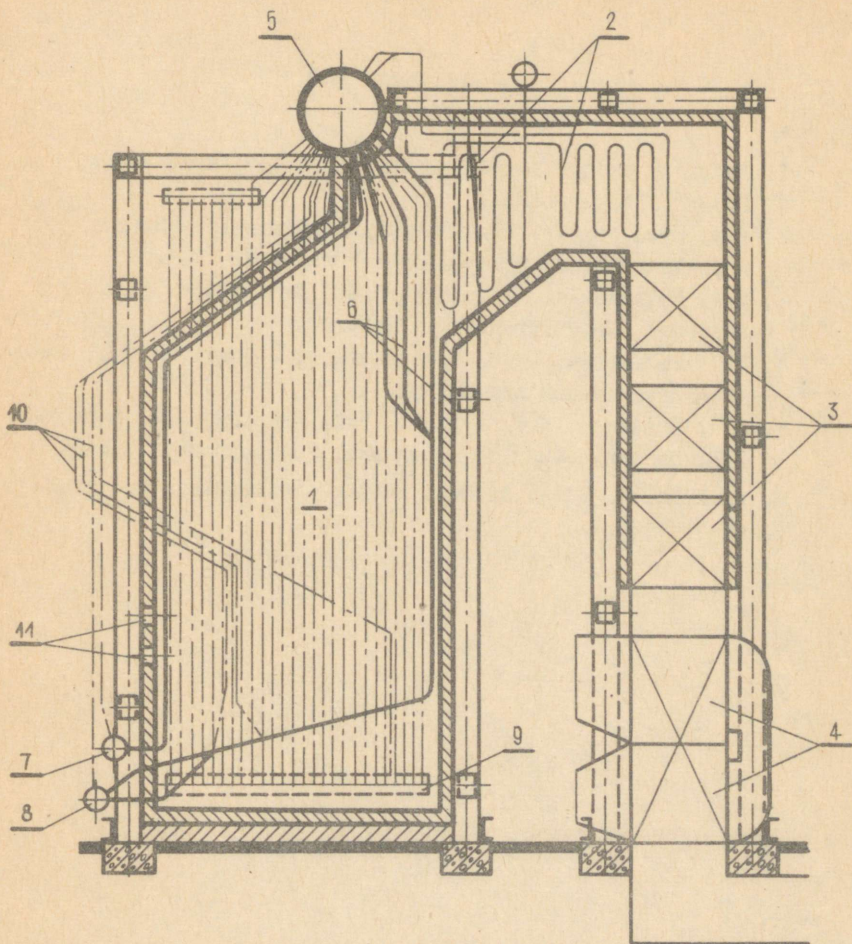
Joonis 6. Keskmise temperatuuride vahe määramise abidiagramm.



Joonis 7. Konvektiivküttepingade skeemid.



Joonis 8. Konvektiivküttepinde saastumistegurite
 määramise diagramm.



Joonis 9. Katelseadme skeem:

1- kolle, 2 - aurülekumendi,
 3 - ökonomaiser, 4 - õhuelest-
 jendi, 5 - trummel, 6 - festoon, 7 - esiekraani
 kollektor, 8 - tagaekraani kollektor, 9 - külge-
 kraani kollektor, 10 - laskuvtorud, 11 - avad
 põletite paigutamiseks.

K i r j a n d u s

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Госэнергоиздат, 1957.
2. М.П. Вукалович. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. Издательство "Энергия", 1965.
3. М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов. Котельные агрегаты. Госэнергоиздат, 1959.
4. О.М. Рабинович. Котельные агрегаты. Госнаучтехиздат машиностроительной литературы, 1963.
5. А.П. Баскаков, М.И. Гуревич, Н.И. Решетин, И.Ф. Рысаков, Н.Б. Шалаев. Общая теплотехника. Госэнергоиздат, 1963.
6. A. Kull, I. Mikk, A. Ots. Soojustehnika. Kirjastus "Valgus", 1966.

Tasuta

A 71

28093

68823

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 0041125 0