

LIHTSUSTATUD MEETODID PÕLEMISAADUSTE TEMPERatuurIDE MÄÄRAMISEKS

R. UUESOO

Katelseadmete projekteerimisel ja dimensioneerimisel rakendatakse juba kindlalt väljakujunenud arvutusmeetodeid, millede abil määratakse ka kütuse põlemisel tekkivate põlemissaaduste temperatuurid. Seejuures kasutatakse temperatuuride määramiseks vajalike $i-t$ -diagrammide koostamisel üldise arvestusskeemi alusel arvutatud andmeid. Kütuste põletamisel saavutatavate temperatuuride küsimus tuleb aga paljudel juhtudel lahendada eraldi, kasutamata selleks eespool nimetatud arvustusskeemis leiduvaid andmeid. Seega osutub olemasoleva arvutusmeetodi kasutamine ebaotstarbekalt töömahuks.

Eriti tülikaks kujuneb soojuslike efektide võrdlemine erineva koostisega kütuste põletamisel; sel puhul tuleb seniseid meetodeid kasutades iga kütuse koostise kohta teha küllaltki ulatuslik arvutus. Sama olukord tekib ka siis, kui on tarvis välja selgitada tingimused mingi kindla, juba ette ära määratud temperatuuri saavutamiseks kütuse põletamisel tööstuslik-tehnoloogilises seadmes või kindla termilise režiimiga koldes.

Käesoleva artikli ülesandeks on näidata teid põlemissaaduste temperatuuride arvutamiseks vahetult kütuse koostise järgi ja esitada lihtsaid arvutusmeetodeid, millede abil on võimalik küllaldase täpsusega võrrelda erineva koostisega kütuste põlemisel saavutatavaid temperatuure.

Lihtsustatud meetod $i-t$ -diagrammi koostamiseks

Soojustehniline arvutusmeetod, mida tavaliselt kasutatakse $i-t$ -diagrammide koostamisel, nõuab eelnevaid arvutusi üksikute gaasiliste komponentide mahtude määramiseks põlemissaadustes^[1]. Seejuures eeldatakse, et põlevaine üksikute koostisosadest, hoolimata nende omavahelisest vahekorra kütuses, tekib kaaluühiku kohta alati ühesugusel hulgal põlemissaadusi. Sellest asjaolust lähtuski autor allpool esitatud lihtsustatud arvutusmeetodi väljatöötamisel. Selleks, et vahetult kütuse kaalulise koostise järgi välja arvutada põlemissaaduste summaarset soojusesisaldust, tuleb koostada tabel ühe kg süsiniku, vesiniku ja väävlil põlemisel tekkivate põlemissaaduste soojusesisalduse kohta, olenevalt temperatuurist. Kuna kütuse põlevaines sisalduv hapnik vähendab kütuse põletamiseks vajaliku põlemisõhu mahtu — sest osa põlevainet on juba hapendunud — siis tuleb järelikult arvestada põlemissaaduste mahu ja seega ka soojusemahtuvuse vähenemist. Arvutusmeetodi ühtlustamiseks on otstarbekas määrata ka kütuse teistest koostisosadest (nagu niiskus ja karbonaatne CO_2) põlemissaadustesse minevate ainete soojusesisaldused kaaluühiku kohta. Seega saame põlemissaaduste summaarse soojusesisalduse avaldada valemiga:

$$\begin{aligned} \Sigma g \cdot (ct)' &= g_C \cdot (ct)'_C + g_H \cdot (ct)'_H + g_N \cdot (ct)'_N - g_O \cdot (ct)'_O + \\ &+ g_w \cdot (ct)'_w + g_{CO_2} \cdot (ct)'_{CO_2} + k_A \cdot g_A \cdot (ct)'_A + \\ &+ (\alpha - 1) \cdot V^0 \cdot (ct)'_a \quad \text{kcal/kg,} \end{aligned} \quad (1)$$

milles: $g_C = 0,01 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_{op+k}^P)$ kg/kg — arvestuslik süsiniku kaaluline osa kütuses, kusjuures on arvesse võetud ka väevli-sisaldus.

g_H ; g_N ; g_O ; g_w ; g_{CO_2} ja g_A — vesiniku, lämmastiku, hapniku, niiskuse, karbonaatide lagunemisel tekkiva CO_2 ja mineraaltuha arvestuslikud kaalulised osad kütuses kg/kg;

k_A — tegur, mis näitab koldest põlemissaaduste temperatuuril lahkuva tuha arvestuslikku kaalulist osa;

α — koldeprotsessi liigõhutegur;

V^0 — põlemiseks teoreetiliselt vajalik põlemisõhu hulk nm^3/kg ;

$(ct)'$ — vastavatest kütuse koostisosadest tekkivate põlemissaaduste soojusesisaldused lähteaine kaaluühiku kohta kcal/kg.

Ühe kg süsiniku täielikul põlemisel tekkivate põlemissaaduste soojusesisaldus avaldub:

$$(ct)'_C = 1,866 \cdot (ct)_{CO_2} + 7,023 \cdot (ct)_{N_2} + 0,143 \cdot (ct)_{H_2O} \quad \text{kcal/kg.} \quad (2)$$

Ühe kg vesiniku täielikul põlemisel tekkivate põlemissaaduste soojusesisaldus:

$$(ct)'_H = 20,935 \cdot (ct)_{N_2} + 11,55 \cdot (ct)_{H_2O} \quad \text{kcal/kg.} \quad (3)$$

Ühe kg lämmastiku soojusesisaldus:

$$(ct)'_N = 0,8 \cdot (ct)_{N_2} \quad \text{kcal/kg.} \quad (4)$$

Kütuses sisalduva ühe kg hapniku tõttu väheneb summaarne põlemissaaduste soojusesisaldus põlemisõhuga põlemisprotsessi vähem antava lämmastiku ja veeauru soojusemahtuvuse arvel:

$$(ct)'_O = 2,631 \cdot (ct)_{N_2} + 0,0535 \cdot (ct)_{H_2O} \quad \text{kcal/kg.} \quad (5)$$

Kütuses sisalduva ühe kg niiskuse soojusesisaldus avaldub:

$$(ct)'_w = 1,243 \cdot (ct)_{H_2O} \quad \text{kcal/kg.} \quad (6)$$

Mineraaltuha soojusesisaldus $(ct)'_A$ on olemasolevates tabelites [1, 2] antud kaaluühiku kohta kcal/kg.

Põlemisgaasidesse mineva süsihappegaasi kaaluline soojusesisaldus avaldub mahulise soojusesisalduse kaudu:

$$(ct)'_{CO_2} = 0,51 \cdot (ct)_{CO_2} \quad \text{kcal/kg.} \quad (7)$$

Põlemisprotsessi kulgemisel liigõhuteguriga $\alpha > 1,0$ läheb osa põlemisõhust — $(\alpha - 1,0) \cdot V^0$ nm^3/kg — ilma põlemisreaktsioonidest osa võtmata põlemissaadustesse. Selle arvel toimuvat põlemissaaduste soojusemahtuvuse suurenemist arvestab valemis (1) viimane liidetav, kus $(ct)'_a$ väljendab ühe nm^3 niiske õhu soojusesisaldust.

Kõrge karbonaatidesisaldusega tuhade (nagu näiteks eesti põlevkivi tuhk) soojusesisalduste kohta puuduvad täpsustatud andmed ning seetõttu tuleb kasutada üldiselt tuhade kohta olemasolevaid andmeid. Karbonaatide lagunemisel tekkiva CO_2 ja mineraaltuha arvestuslikud kaalulised osad on määratud karbonaatide lagunemise astmega

Tabel 1

Põlemissaaduste soojusesisaldus lähteaine kaalutihiku kohta

t°C	Süsiniku põlemis-saadused (ct) _C	Vesiniku põlemis-saadused (ct) _H	Lämmas-tik (ct) _N	Parandus hapniku sisaldusel (ct) _O	Niiskuse (ct) _w	Karbonaatne CO ₂ (ct) _{CO₂}	Mineraal-tuhk (ct) _A	Niiske õhk (ct) _z	Eesti põlev- kivi põlevaine saadused (ct) _b	Turba põlev- aine saadused (ct) _b	Puidu põlev- aine saadused (ct) _b
	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/nm ³	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100	299	1062	25	82	44,8	20,7	19,3	31,6	320	210	183
200	607	2137	50	165	90,5	43,5	40,4	63,6	647	426	370
300	923	3228	75	248	137,5	68,1	63,0	96,2	983	647	563
400	1250	4352	101	333	186	94,0	86,0	129,4	1330	877	763
500	1585	5502	127	420	236	121,2	109,5	163,4	1685	1111	968
600	1929	6681	154	509	288	148,8	133,8	198,2	2049	1352	1177
700	2282	7893	181	600	341	177,9	158,2	234	2427	1600	1390
800	2640	9133	209	692	396	207,5	183,2	270	2805	1851	1613
900	3006	10400	238	786	453	238	209	306	3194	2109	1837
1000	3380	11700	266	881	512	268	235	343	3594	2373	2067
1100	3754	13000	295	978	572	299	262	381	3990	2635	2297
1200	4132	14350	324	1075	633	330	288	419	4396	2906	2538
1300	4514	15700	353	1173	696	362	325/315*	457	4808	3177	2770
1400	4903	17080	384	1273	760	394	378/342*	496	5224	3453	3009
1500	5291	18470	414	1373	826	426	420/369*	535	5637	3730	3250
1600	5682	19870	444	1473	892	459	448/398*	574	6059	4008	3494
1700	6076	21290	474	1574	959	491	493/425*	613	6488	4308	3733
1800	6470	22720	505	1675	1048	524	522/453*	652	6917	4572	3972
1900	6868	24170	536	1777	1096	558	570/481*	692	7347	4849	4219
2000	7266	25640	566	1879	1169	590	600/510*	732	7783	5143	4470

* Tuha soojusesisaldus, arvestamata tuha sulamissoojust. Arvutamiseks on kasutatud valemit $c = 0,1047 \cdot t^{0,117}$ kcal/kg°C.

$$g_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot x_{\text{CO}_2} \cdot (\text{CO}_2)_K^P \text{ kg/kg} \quad (8)$$

$$g_A = 0,01 \cdot [A^P + (1 - x_{\text{CO}_2}) \cdot (\text{CO}_2)_K^P] \text{ kg/kg.} \quad (9)$$

Eespool toodud valemite (2) kuni (7) põhjal arvatud põlemissaaduste soojusesisaldused (ct)' kütuse koostisosade kohta on esitatud tabelis 1.

Esitatud arvutusmeetodis on võimalik teha veel täiendavaid lihtsustusi. Arvestades paljude kütuste põlevaine koostise konstantsust, on otstarbekas koostada abitabelid vastavate kütuste põlevaine täielikul põlemisel tekkivate põlemissaaduste soojusesisalduste kohta, olenevalt temperatuurist. Tabelis 1 on näitena esitatud eesti põlevkivi põlevaine koostise (C = 76,6%; H = 9,2%; S_{op+k} = 2,0%; Cl = 0,6%; N = 0,4%; O = 11,2%) järgi arvatud põlemissaaduste soojusesisaldused. Samas tabelis on toodud ka põlemissaaduste soojusesisaldused turba põlevaine (C = 57,8%; H = 6,0%; S_{op+k} = 0,3%; N = 2,5%; O = 33,4%) ja küttepuude põlevaine (C = 51,0%; H = 6,1%; S_{op+k} = 0%; N = 0,6%; O = 42,3%) jaoks.

Sel juhul omandab valem (1) tunduvalt lühema kuju:

$$\begin{aligned} \Sigma g \cdot (ct)' &= g_b \cdot (ct)'_b + g_w \cdot (ct)'_w + g_{\text{CO}_2} \cdot (ct)'_{\text{CO}_2} + \\ &+ k_A \cdot g_A \cdot (ct)'_A + (\alpha - 1) \cdot V^0 \cdot (ct)_a \text{ kcal/kg,} \end{aligned} \quad (10)$$

milles: g_b — arvestuslik põlevainesisaldus kütuses kg/kg.

Valemite (1) ja (10) annab esimeste liidetavate summa põlemissaaduste soojusesisalduse liigõhuteguri väärtusel $\alpha = 1,0$ ja ainult viimane liidetav arvestab liigõhuteguri mõju; see lihtsustab tunduvalt arvutustabelite koostamist.

See meetod võimaldab ka kiiresti teha massilisi arvutusi ühtlase kuivaine koostisega kütuse mitmesuguste niiskuste puhul. Sel juhul tuleb arvutada kuivaine põlemissaaduste summaarne soojusesisaldus ($\Sigma g^c \cdot (ct)'$) ja seejärel niiskuse mõju, kasutades valemit:

$$\Sigma g^P \cdot (ct)' = (1 - g_w^P) \Sigma g^c \cdot (ct)' + g_w^P \cdot (ct)'_w \text{ kcal/kg,} \quad (11)$$

milles: g_w^P — tarbimiskütuse niiskusesisaldus kg/kg.

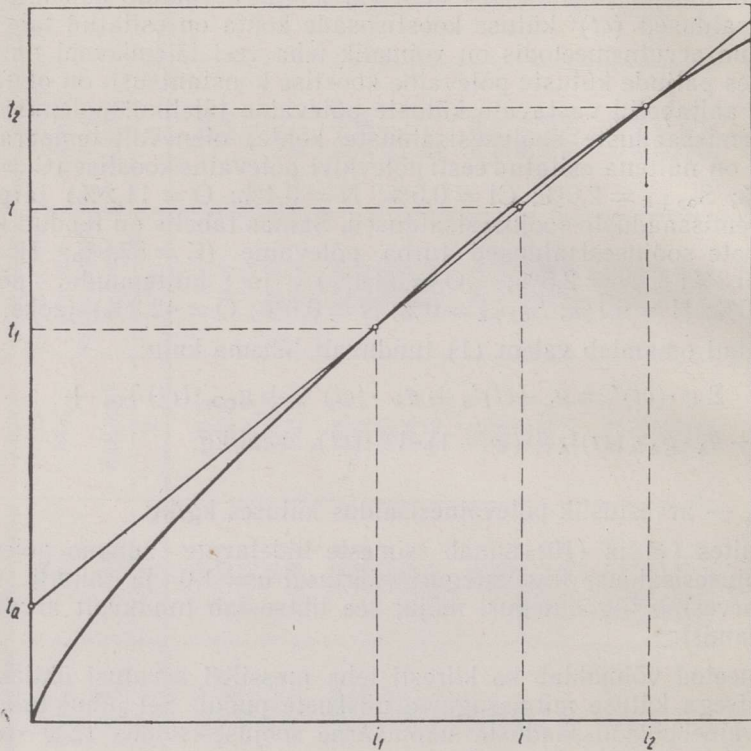
Kasutades tabelis 1 toodud põlemissaaduste summaarseid soojusesisaldusi, annab põlemissaaduste $i - t$ -diagrammide koostamine valemite (1) ja (10) alusel täiesti identsed tulemused üldiselt kehtivate soojustehniliste normide põhjal koostatud $i - t$ -diagrammidega, kusjuures väiksem arvutus-tehete arv vähendab vigade tekkimise võimalust.

Põlemissaaduste temperatuuri arvutamine

Põlemissaaduste soojusesisaldustele vastavad temperatuurid leitakse $i - t$ -diagrammilt, kasutades graafilist interpolatsiooni. Kuid arvestades asjaolu, et põlemissaaduste soojusesisalduse olenevus temperatuurist on temperatuuridel üle 900°C ligilähedaselt lineaarse iseloomuga, võime saavutada rahuldava täpsuse ka lineaarset interpolatsiooni kasutades. Võimalus põlemissaaduste soojusesisalduse vahetuks arvutamiseks kütuse koostise andmete järgi, kasutades selleks valemeid (1) või (10), loob soodsad tingimused temperatuuride analüütiliseks leidmiseks. Nagu jooniselt 1 nähtub, on selleks kasutatav sirgjoone võrrand:

$$t = t_a + k \cdot i, \quad (12)$$

milles $k = \frac{t_2 - t_1}{i_2 - i_1}$ ja $t_a = t_2 - k \cdot i_2$.



Joon. 1. Põlemissaaduste temperatuuri leidmine $t-i$ -diagrammilt valemi $t = t_a + k \cdot i$ abil.

Asetades valemis (12) i asemele ühest kg kütusest tekkivatele põlemissaadustele üleantud soojushulga Q väärtuse, saame arvutada vastava temperatuuri:

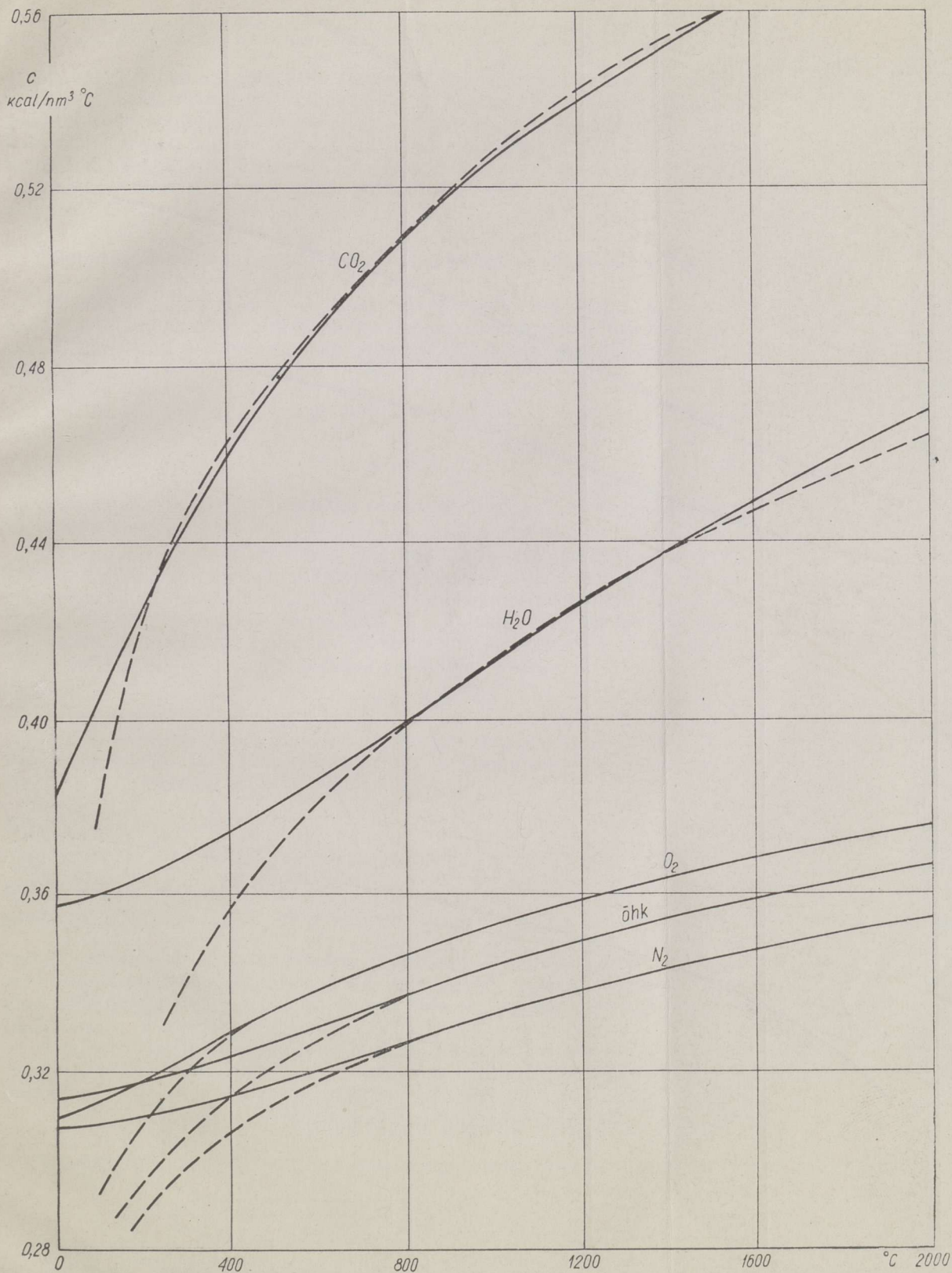
$$t = t_a + k \cdot Q. \quad (13)$$

Seejuures arvutatakse k ja t_a väärtused kahel vabalt valitud temperatuuril t_1 ja t_2 leitud põlemissaaduste soojusesisalduste järgi, sest:

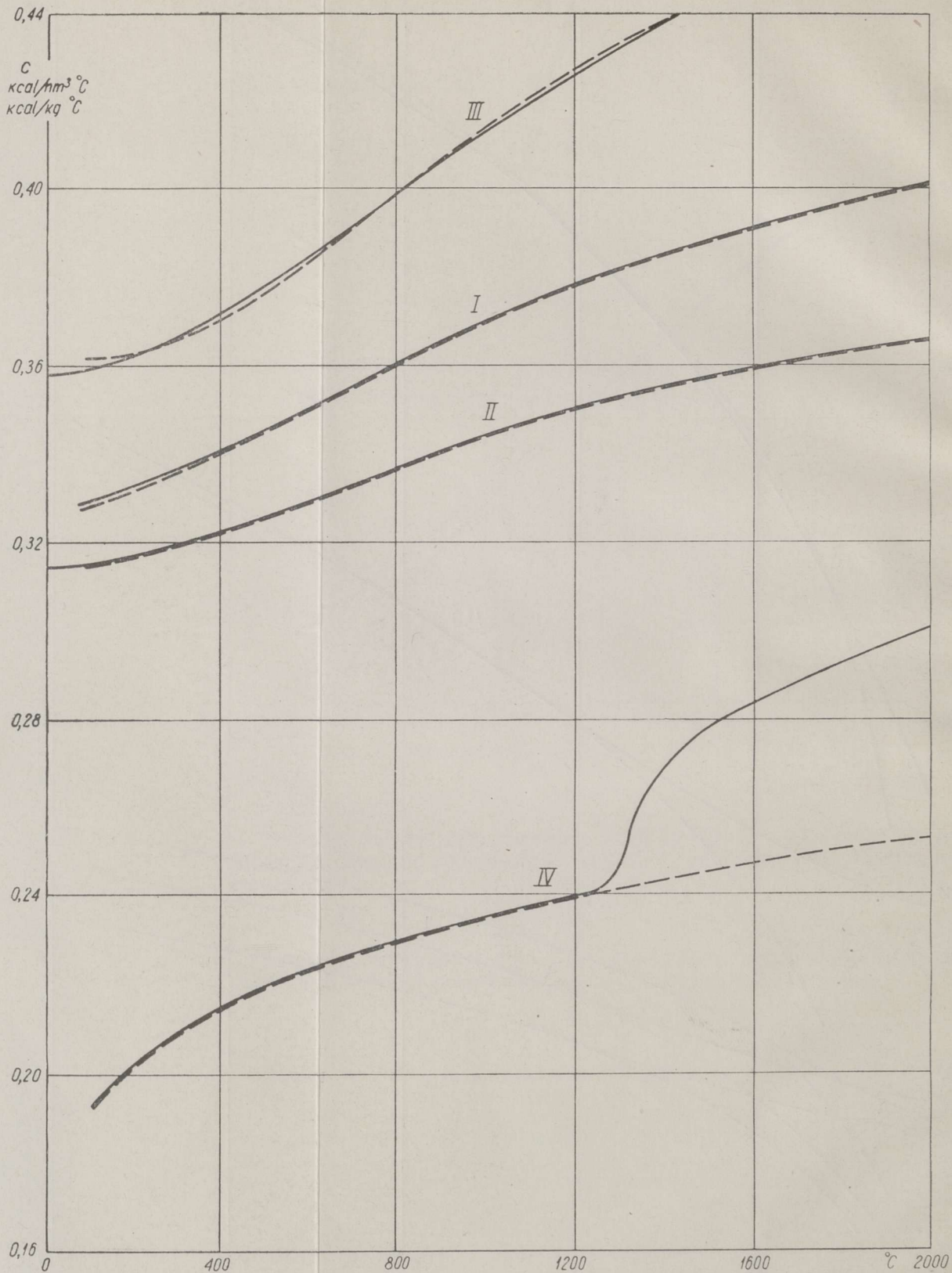
$$i_1 = \Sigma g \cdot (ct_1)' \quad \text{ja} \quad i_2 = \Sigma g \cdot (ct_2)'.$$

Temperatuurid t_1 ja t_2 tulevad valida piirkonnast, kuhu võib eeldada otsitava temperatuuri t sattumist, kusjuures ei ole sugugi vajalik, et $t_1 < t < t_2$. Üldiselt on soovitatav valida temperatuurid t_2 ja t_1 niisugused, et $t_2 - t_1 = 200^\circ \text{C}$. Sel puhul kehtib valem (13) ligikaudu 400°C piirkonnas, s. o. $(t_1 - 100)^\circ \text{C}$ kuni $(t_2 + 100)^\circ \text{C}$.

Seejuures tuleb aga arvestada, et uutes soojustehnilistes arvutusnormides^[1] on mineraalтуha soojusesisaldusele temperatuuridel üle 1200°C juurde arvatud tuha sulamissoojus. See moonutab suure tuhasisaldusega kütuste põlemissaaduste soojusesisalduse olenevust temperatuurist ning



Joon. 2. Põlemisgaasides sisalduvate gaaside ja veeauru keskmised mahulised erisoojused. Punktirjoontega on näidatud valemi $c = K \cdot t^N$ abil arvutatud erisoojused.



Joon. 3. Eesti põlevkivi põlemissaaduste (I), niiske õhu (II), veeauru (III) ja mineraaltuha (IV) keskmised erisoojusused. Punktiirjoontega on näidatud arvutusvalemi abil arvutatud erisoojusused, kasutades valemiga (19) antud parandust.

annab valed tulemused, kui tuha sulamistemperatuurid erinevad nendes tabelites aluseks võetud tuha omadest. Seetõttu on tabelis 1 lahtris 8 antud mineraaltuha soojusesisaldused tuha sulamissoojust arvestamata. Juhul kui arvutatud t on suurem antud tuha sulamistemperatuurist, tuleb põlemissaadustele üleantud soojusehulga Q väärtuses teha parandus, mis arvestab tuha sulamissoojust vastavalt põlemissaadustega kaasamineva tuha hulga.

Põlemissaaduste temperatuuri leidmine suhtelise soojusesisalduse abil

Põlemissaadustes sisalduvate gaaside keskmiste mahuliste erisoojuste valemi avaldamine astmefunktsioonina temperatuurist võimaldab teha täiendavaid lihtsustusi põlemissaaduste temperatuuri leidmiseks. Sel puhul tuleb tavaliselt polünoomi kujul antud valem

$$c = A + B \cdot t + C \cdot t^2 \quad (14)$$

asendada valemiga

$$c = K \cdot t^N. \quad (15)$$

Analoogilist erisoojuse astmelist olenevust temperatuurist on kasutatud soojusülekanke uurimisel [3].

On võimalik tõestada, et valem (15) kehtib põlemissaadustes sisalduvate gaaside keskmiste mahuliste erisoojuste jaoks rahuldava täpsusega temperatuuridel 700°C kuni 1600°C , kusjuures kaheaatomiliste gaaside jaoks suureneb tema kehtivuspiirkond kuni 2000°C . Valemis (15) on koefitsientidel $K = \text{konst}$ ja $N = \text{konst}$ iga gaasi puhul erinevad väärtused. Gaaside soojusesisaldused on sel puhul avaldatud valemiga

$$i = c \cdot t = K \cdot t^{N+1}. \quad (16)$$

Alljärgnevalt on antud valemid mitmesuguste gaaside keskmiste mahuliste erisoojuste ja soojusesisalduste arvutamiseks temperatuuridel $700^\circ\text{C} < t < 1600^\circ\text{C}$.

hapnik: $c = 0,2017 \cdot t^{0,081} \text{ kcal/nm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$; $i = 0,2017 \cdot t^{1,081} \text{ kcal/nm}^3$;
 lämmastik: $c = 0,1798 \cdot t^{0,089} \text{ kcal/nm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$; $i = 0,1798 \cdot t^{1,089} \text{ kcal/nm}^3$;
 niiske õhk: $c = 0,1806 \cdot t^{0,093} \text{ kcal/nm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$; $i = 0,1806 \cdot t^{1,093} \text{ kcal/nm}^3$ ja
 süsihappegaas: $c = 0,1972 \cdot t^{0,142} \text{ kcal/nm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$; $i = 0,1972 \cdot t^{1,142} \text{ kcal/nm}^3$.

Nende valemite kasutamisel saadud tulemuste võrdlemiseks on joonisel 2 esitatud pidevate joontega erisoojuste tabelites [1] toodud andmed, kuna punktiirjoontega on näidatud tulemused, mis on saadud arvutusvalemeid kasutades.

Sama seaduspärasus kehtib ka mineraaltuha erisoojuse jaoks temperatuuridel 700°C kuni 1200°C , s. o. kuni temperatuurini, millest algab tuha sulamine:

$$c = 0,1047 \cdot t^{0,117} \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}; i = 0,1047 \cdot t^{1,117} \text{ kcal/kg}.$$

Valemist (16) on võimalik avaldada temperatuuri arvulist väärtust:

$$t = \left(\frac{i}{K}\right)^{\frac{1}{N+1}} = \left(\frac{i}{K}\right)^n \text{ }^\circ\text{C}, \quad (17)$$

kui tähistada: $n = \frac{1}{N+1}$.

Valemi (17) praktilisel kasutamisel on otstarbekas konstandi K väärtus avaldada soojusesisaldusega i_0 mingil kindlal temperatuuril t_0 . Puht arvustehnilistel põhjustel on sobiv valida $t_0 = 1000^\circ\text{C}$. Sel puhul saame:

$$K = \frac{i_0}{t_0^n} = \frac{i_0}{1000^n}$$

Asetades selle väärtuse valemisse (17), avaldub põlemissaaduste temperatuur:

$$t = 1000 \left(\frac{i}{i_0}\right)^n \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (18)$$

milles: i — põlemissaaduste soojusesisaldus temperatuuril t ja
 i_0 — põlemissaaduste soojusesisaldus temperatuuril 1000°C .

Astmenäitaja $n = n_0$ on konstantne temperatuuridel 700°C kuni 1600°C , põlemisgaaside segu puhul aga, milles on ülekaalus kaheaatomilised gaasid, jääb ta konstantseks kuni 2000°C .

Valemi (18) kehtivuse piirkonna laiendamine temperatuuridele alla 700°C on võimalik, kui astmenäitaja n avaldada temperatuuridel 0 kuni 1000°C temperatuuri funktsioonina. Sobivalt valitud m väärtustel saame empiirilise valemi

$$n = n_0 + m \left(1 - \frac{i}{i_0}\right)^2 \quad (19)$$

abil leitud astmenäitajat kasutades arvutada eespool toodud valemite järgi erisoojused ja soojusesisaldused, mis hästi vastavad tegelikele.

Tabel 2

Astmenäitaja n_0 ja paranduskoefitsiendi m väärtused kütuse koostisosadest tekkivatele põlemissaadustele

	n_0	m
Süsiniku põlemissaadused	0,905	0,05
Vesiniku põlemissaadused	0,888	0,10
Hapnikusisaldusest tingitud parandus	0,915	0,06
Niiskus	0,86	0,12
Mineraaltuhk	0,895	0,03
Süsihappegaas	0,875	0,02
Niiske õhk	0,915	0,06
Eesti põlevkivi põlevaine	0,90	0,06
Turba põlevaine	0,897	0,06
Puidu põlevaine	0,897	0,06

Kütuse üksikutest koostisosadest tekkivate põlemissaaduste erisoojusi ja soojusesisaldusi iseloomustavad kõige paremini astmenäitaja n_0 ja paranduskoefitsient m , millede arvulised väärtused on esitatud tabelis 2. Selleks et näitlikult selgitada tegelike erisoojuste väärtustest esineva kõrvalekaldumise suurust, on joonisel 3 esitatud eesti põlevkivi põlemissaaduste (I), niiske õhu

(II), veeauru (III) ja mineraaltuha (IV) erisoojuste kõverad, millede koostamisel on arvestatud valemis (19) antud parandust. Nagu juba eespool märgitud, on mineraaltuha erisoojusekõvera kõrvalekaldumine üldisest seadusepärasusest temperatuuridel üle 1200°C tingitud asjaolust, et uutes soojustehniliste arvutuste normides^[1] on tuha soojusesisaldusele juurde arvatud tuha sulamissoojus.

Praktiliselt on kõigi tahkete kütuste põlemissaaduste soojusesisalduses suurim osatähtsus süsiniku põlemissaadustel ja liigõhuna lisanduval niiskel õhul. Seelõttu võib astmenäitaja n arvutamiseks temperatuuridel alla 1000°C anda üldiselt kehtiva kuju:

$$n_m = n_{om} + 0,06 \cdot \left(1 - \frac{i}{i_0}\right)^2, \quad (20)$$

milles n_{om} muutub piirides 0,89 kuni 0,91.

Keskmise astmenäitaja n_{om} väärtuse võib täiesti rahuldava täpsusega arvutada valemi

$$n_{om} = \frac{\sum i_0 \cdot n_0 \cdot g}{\sum i_0 \cdot g} \text{ abil.} \quad (21)$$

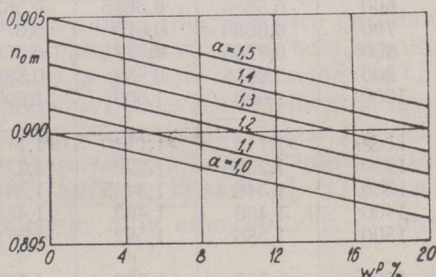
Asetades valemisse (21) arvulised väärtused saame:

$$n_{om} = \frac{3059 \cdot g_C + 10380 \cdot g_H - 809 \cdot g_O + 440 \cdot g_w + 234 \cdot g_{CO_2} + 3380 \cdot g_C + 11700 \cdot g_H - 881 \cdot g_O + 512 \cdot g_w + 268 \cdot g_{CO_2} + 210 \cdot g_A + 314 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0}{3380 \cdot g_C + 11700 \cdot g_H - 881 \cdot g_O + 512 \cdot g_w + 268 \cdot g_{CO_2} + 210 \cdot g_A + 314 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0} + \frac{235 \cdot g_A + 343 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0}{3380 \cdot g_C + 11700 \cdot g_H - 881 \cdot g_O + 512 \cdot g_w + 268 \cdot g_{CO_2} + 210 \cdot g_A + 314 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0}. \quad (22)$$

Uhtlase põlevainekoostisega kütuste puhul lihtsustub valem (22). Eesti põlevkivi puhul on keskmine astmenäitaja avaldatav arvestusliku põlevaine sisalduse g_b kaudu:

$$n_{om} = \frac{3234 \cdot g_b + 440 \cdot g_w + 234 \cdot g_{CO_2} + 210 \cdot g_A + 2805 \cdot (\alpha - 1) \cdot g_b}{3594 \cdot g_b + 512 \cdot g_w + 268 \cdot g_{CO_2} + 235 \cdot g_A + 3065 \cdot (\alpha - 1) \cdot g_b}. \quad (23)$$

Kütust iseloomustava kesknise astmenäitaja n_{om} väärtust võib samuti esitada ka olenevusena kütuste niiskusest ja liigõhutegurist. Joonisel 4 on esitatud diagramm n_{om} määramiseks eesti põlevkivi jaoks. Kuna esimene astmenäitaja valikul piirides $\pm 0,005$ mõjub praktiliselt arvutuse tulemusele vähe (näiteks temperatuuril 1500°C tekib kõrvalekaldumine alla $\pm 5^\circ\text{C}$), siis võib ilma suurema veata võtta põlevkivi põlemissaaduste temperatuuri arvutamisel keskmiseks astmenäitajaks $n_{om} = 0,900$.



Joon. 4. Astmenäitaja n_{om} olenevus eesti põlevkivi niiskusest w^p ja põlemisprotsessi liigõhutegurist α .

Käesoleva arvutusmeetodi kasutamisel on otstarbekas koostada valemi (22) põhjal diagrammid n_{om} leidmiseks ka teiste kütuste jaoks.

Valem põlemissaaduste temperatuuri arvutamiseks omandab lihtsa kuju:

$$t = 1000 \cdot \left(\frac{Q}{i_0}\right)^n \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (24)$$

milles: Q — põlemissaadustele üleantud soojuse hulk kcal/kg;

i_0 — valemi (1) või (10) abil arvutatud põlemissaaduste soojuse-sisaldus temperatuuril 1000°C kcal/kg ja

n — astmenäitaja, mille väärtus on

$$n_{om}, \text{ kui } \frac{Q}{i_0} > 0,8 \text{ ja}$$

$$n_{om} + 0,06 \left(1 - \frac{Q}{i_0}\right)^2, \text{ kui } \frac{Q}{i_0} < 0,8.$$

Teisendades valem (18) kujule

$$i = i_0 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{1}{n}} \text{ kcal/kg,} \quad (25)$$

saab antud temperatuuridel kergesti leida vastavad põlemissaaduste soojuseisaldused, kui on arvatud i_0 väärtus. See võimaldab tunduvalt lihtsustada

$i-t$ -diagrammide koostamist. Arvutuste kergendamiseks on teguri $\left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{1}{n}}$ väärtuste kohta koostatud tabel 3.

Tabel 3

Teguri $\left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{1}{n}}$ väärtused olenevalt temperatuurist ja astmenäitajast n_0

t °C	Astmenäitaja n_0						
	0,88	0,885	0,89	0,895	0,900	0,905	0,910
100	0,084	0,085	0,0865	0,0875	0,089	0,090	0,091
200	0,174	0,1755	0,177	0,179	0,181	0,1825	0,184
300	0,2665	0,2685	0,2705	0,272	0,274	0,276	0,278
400	0,3625	0,3645	0,3665	0,3685	0,3705	0,3725	0,3745
500	0,462	0,4635	0,4655	0,467	0,469	0,471	0,473
600	0,5635	0,5655	0,5675	0,569	0,571	0,5725	0,574
700	0,6685	0,670	0,6715	0,673	0,6745	0,6760	0,6775
800	0,7765	0,7775	0,7785	0,780	0,781	0,782	0,783
900	0,8875	0,888	0,8885	0,889	0,8895	0,890	0,8905
1000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1100	1,115	1,114	1,113	1,1125	1,112	1,111	1,110
1200	1,2305	1,229	1,2275	1,226	1,224	1,223	1,222
1300	1,346	1,3445	1,343	1,3405	1,338	1,336	1,334
1400	1,466	1,463	1,4595	1,456	1,453	1,4505	1,448
1500	1,586	1,582	1,578	1,5735	1,569	1,566	1,563
1600	1,707	1,702	1,6975	1,692	1,686	1,6815	1,677
1700	1,829	1,822	1,8155	1,809	1,803	1,7985	1,794
1800	1,9515	1,943	1,936	1,929	1,922	1,916	1,909
1900	2,076	2,067	2,058	2,049	2,040	2,032	2,024
2000	2,198	2,188	2,179	2,170	2,160	2,151	2,142

Siinjuures tuleb aga märkida, et temperatuuridel üle 1200° C on valem (25) abil leitud põlemissaaduste soojusesisaldus tuha sulamissoojuse võrra väiksem uute soojustehniliste arvutuste normide [1] järgi arvatud soojusesisaldusest. Sama arvulise väärtuse saamiseks tuleb valem (25) abil saadud tulemusele liita tuha sulamissoojust arvestav liige: $k_A \cdot g_A \cdot Q_A$, milles Q_A on tabelis 1 toodud mineraaltuha soojusesisalduste vahe temperatuuridel üle 1200° C.

Kuna käesolevas meetodis kasutatud astmelise olenevuse abil ei ole võimalik arvesse võtta tuha sulamissoojust põlemissaaduste soojusesisalduse osas, siis tuleb temperatuuride arvutamisel tuha sulamissoojus lahutada põlemissaadustele üleantavast soojusehulgast, nagu varasemates katelseadmete arvutamise normides [2].

Põlemissaaduste suhtelise soojusesisalduse mõiste sissetoomine võimaldab soojustehnilistes arvutustes veel teisigi lihtsustusi. Valem (17) põhjal

saame avaldada ühesuguse koostisega põlemissaaduste temperatuuride suhte piirkonnas, kus $n = n_0 = \text{konst}$

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{i_1}{i_2} \right)^n. \quad (26)$$

See võimaldab tuletada seose kolde kasuteguri η_k ja koldest lahkuvate põlemisgaaside tegeliku temperatuuri t_k vahel:

$$\eta_k = \left(\frac{t_k}{t_t} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (27)$$

milles t_t — teoreetiline põlemistemperatuur °C.

Valem (27) kehtib küllaldase täpsusega ka juhul, kui toimub mittetäielik põlemine $\alpha > 1,0$ juures, sest praktiliselt võib mittetäielikul põlemisel tekkivate põlemissaaduste soojusesisaldust lugeda võrdseks sama kütuse ja põlemisõhu vahekorra juures toimunud täieliku põlemise saaduste soojusesisaldusega. Seega tuleb kütuse teoreetiline põlemistemperatuur antud juhul arvutada sellise liigõhuteguri väärtuse alusel, mis arvestab ka parandust, mille võrra otseselt gaasianalüüsiga määratav liigõhutegur on suurem mittetäieliku põlemise tõttu.

Eesti põlevkivi soojustehniliste arvutuste lihtsustamine

Katelseadmete kohta tehtavate soojustehniliste arvutuste puhul tuleb leida ka põlemissaaduste mahud ja süsihappegaasi ning veeauru partsiaalrõhud. Ühtlase põlevainekoostisega kütuste puhul on võimalik neid arvutusi lihtsustada, võttes aluseks põlevaine, niiskuse ja gaasistuva karbonaatse CO_2 kaalulised kogused lähtekütuses. Eesti põlevkivi põlevaine elementaarkoostisena arvestatakse tavaliselt koostist, millist on kasutatud tabeli 1 koostamisel. Sel puhul avaldub põlevaine arvestuslik kaaluosa tarbimiskütuses süsinikusisalduse kaudu: $g_b^P = 0,01305 \cdot C^P$ kg/kg; niiskus $g_w^P = 0,01 \cdot w^P$; karbonaatide lagunemisel tekkiv süsihappegaas ning mineraaltuhk on arvutatav valemite (8) ja (9) abil.

Eesti põlevkivi põlemissaaduste mahtude arvutamiseks omandavad valemid kuju:

$$V_{\text{RO}_2} = 1,444 \cdot g_b^P + 0,510 \cdot g_{\text{CO}_2}^P \quad \text{nm}^3/\text{kg}; \quad (28)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,167 \cdot g_b^P + 1,243 \cdot g_w^P + 0,144 \cdot (\alpha - 1) g_b^P \quad \text{nm}^3/\text{kg}; \quad (29)$$

$$\Sigma V = 9,678 \cdot g_b^P + 0,510 \cdot g_{\text{CO}_2}^P + 1,243 \cdot g_w^P + 9,084(\alpha - 1) g_b^P \quad \text{nm}^3/\text{kg}. \quad (30)$$

Täielikuks põlemiseks teoreetiliselt vajalik põlemisõhu maht $V^0 = 8,94 \cdot g_b^P$ nm³/kg.

Kui pidada õigeks eesti põlevkivi kütteväärtuse arvutamist Mendelejevi valemiga, mis annab põlevosa kütteväärtuseks $Q_H = 8230$ kcal/kg, siis on kadudeta põletamisel põlemissaadustele üleantud soojuse hulk

$$Q = 8230 \cdot g_b^P - 600 \cdot g_w^P - 970 \cdot g_{\text{CO}_2}^P + 8,94 \cdot \alpha \cdot g_b^P (ct)_\alpha^0 \quad \text{kcal/kg}. \quad (31)$$

Ettesoojendatud kütuse kasutamisel lisandub $(ct)_k$.

Vedelslaki eraldamisega koldeprotsessi puhul tuleb lahutada põlemissaadustega kaasamineva tuha sulamiseks vajalik soojuse hulk.

Põlemissaaduste $i-t$ -diagrammide koostamisel saab soojusesisalduste arvutamiseks kasutada suhteliste soojusesisalduste ja temperatuuride vahelist astmelist seost. Arvutades põlemissaaduste soojusesisalduse temperatuuril 1000°C :

$$i_0 = 3594 \cdot g_b^P + 512 \cdot g_w^P + 268 \cdot g_{\text{CO}_2}^P + 235 \cdot k_A \cdot g_A^P + 3067 \cdot (\alpha - 1) \cdot g_b^P \text{ kcal/kg}, \quad (32)$$

on võimalik valemi (25) abil arvutada põlemissaaduste soojusesisaldused antud temperatuuridel. Valemi (24) järgi avaldub eesti põlevkivi teoreetiline põlemistemperatuur:

$$t_t = 1000 \cdot \left(\frac{Q}{i_0} \right)^n = 1000 \cdot \left(\frac{8230 \cdot g_b^P - 600 \cdot g_w^P - 970 \cdot g_{\text{CO}_2}^P + 3594 \cdot g_b^P + 512 \cdot g_w^P + 268 \cdot g_{\text{CO}_2}^P + 8,94 \cdot \alpha \cdot g_b^P \cdot (ct)_\alpha^{\bar{o}}}{+ 235 \cdot g_A^P + 3065 \cdot (\alpha - 1) \cdot g_b^P} \right)^{n_{om}} \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (33)$$

Astmenäitaja n_{om} arvulised väärtused on leitavad jooniselt 4, kuid täiesti rahuldav täpsus on saavutatav ka siis, kui võtame keskmiselt $n_{om} = 0,900$.

Kui põlevaine koostis on erinev eespool toodud valemite koostamisel kasutatust, siis tuleb põlevaine põlemisel $\alpha = 1,0$ juures tekkivate põlemissaaduste soojusesisaldus arvutada temperatuuril 1000°C :

$$|(ct)'_b|_{1000^{\circ}\text{C}} = 33,8 \cdot (C + 0,375 \cdot S_{op+k}) + 117 \cdot H + 2,66 \cdot N - 8,81 \cdot O \text{ kcal/kg} \quad (34)$$

ning saadud tulemusega asendada valemis (32) esimese liidetava arvordaja (3594). Samuti tuleb parandada viimase liidetava arvordajat vastavalt teoreetiliselt vajaliku põlemisõhu mahu muutumisele, kasutades selleks tegurit $V^0 : 8,94$.

Käesoleva, lihtsustatud arvutusmeetodi kasutatavuse kontrollimine eesti põlevkivi põlemissaaduste $i-t$ -diagrammi koostamisel näitas, et kõrvalekaldumine ei ületanud $0,5\%$.

Järeldused

1. Kütuse põlemisel tekkivate põlemissaaduste summaarse soojusesisalduse arvutamine vahetult kütuse koostise kaaluliste osade ja nendest tekkivate põlemissaaduste soojusesisalduste alusel võimaldab tunduvalt lihtsustada arvutusi põlemissaaduste $i-t$ -diagrammide koostamiseks, kusjuures saadud tulemused vastavad täielikult sellekohastes soojustehnilistes normides ettenähtud arvutusmeetodi tulemustele.

2. Lineaarse interpolatsiooni kasutamine põlemissaaduste temperatuuri arvutamisel võimaldab temperatuuridel üle 1000°C saavutada rahuldava täpsuse (keskmiselt $\pm 3^{\circ}\text{C}$). Tuleb märkida, et tavaliselt $i-t$ -diagrammide koostamisel kasutatav mastaap annab graafilisel interpolatsioonil samuti teatud määral ebatäpsed tulemused.

3. Temperatuuride arvutamisel ja $i-t$ -diagrammide koostamisel pakub põlemissaaduste suhtelise soojusesisalduse ja temperatuuri vahelise astmelise sõltuvuse kasutamine suuri võimalusi soojustehniliste arvutuste lihtsust-

tamiseks ja kiirendamiseks, kusjuures tekkiv viga jääb graafilise interpolatsiooni puhul tekkiva vea piiridesse.

4. Põlemissaaduste suhtelise soojusesisalduse mõiste sisseviimine soojustehnilistesse arvutustesse lihtsustab paljude tegeliku koldeprotsessiga seotud küsimuste lahendamist, nagu näiteks kolde kasuteguri ja tegeliku kolde temperatuuri vastastikuse sõltuvuse määramist jne.

5. Eespool esitatud arvutusmeetodite kasutamine loob võimalused erineva koostisega kütuste põletamisel saavutatavate soojuslike efektide süstemaatiliseks võrdlemiseks.

6. Käesolevas artiklis soovitatud lihtsustatud arvutusmeetodid on esitatud kujul kasutatavad temperatuuride piirkonnas, kus süsihappegaasi ja veeauru dissotsiatsioon praktiliselt põlemisprotsessi ei mõjusta, s. o. kuni 1500—1600°-ni C.

KIRJANDUS

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод), Госэнергоиздат, М—Л., 1957.
2. Нормы теплового расчета котельного агрегата, ЦКТИ, Машгиз, Москва—Свердловск, 1945.
3. B. Pinkel, A Summary of NACA Research on Heat Transfer and Friction for Air Flowing Through Tube with Large Temperature Difference, Transaction ASME, No. 4, 1954.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
19. IX 1957

УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Р. Н. Ууэсоо

Резюме

Применяемые обычно в теплотехнических расчетах методы определения температуры продуктов горения связаны с трудоемкими вычислениями. Особенно затруднено сравнение тепловых эффектов, получаемых при сжигании топлива различного состава. В этих случаях приходится для каждого топлива производить подробный подсчет объемов и теплосодержаний продуктов горения и составлять $i-t$ -диаграммы.

В настоящей статье приводятся методы расчета суммарных теплосодержаний продуктов горения непосредственно по относительному весу составных частей топлива: $i = \Sigma g \cdot (ct)'$ ккал/кг.

Для применения этой формулы в табл. 1 приведены теплосодержания продуктов горения $(ct)'$ в килокалориях на один килограмм исходного вещества составной части топлива. При изменении состава топлива учет теплосодержаний продуктов горения возможен при помощи несложных формул.

Из рис. 1 видно, что температура продуктов горения при $t > 900^\circ \text{C}$ может быть легко вычислена с достаточной точностью по линейному выражению $t = t_a + k \cdot Q$, если предварительно вычислены теплосодержания продуктов горения $i_1 = \Sigma g \cdot (ct_1)'$ и $i_2 = \Sigma g \cdot (ct_2)'$ при двух значениях температуры t_1 и t_2 .

Расчет температуры продуктов горения значительно упрощается, если средние объемные удельные теплоемкости газов и удельную теплоемкость золы выразить в степенной зависимости от температуры: $c = k \cdot t^N$. Такой вид формулы характеризует с достаточной точностью теплоемкости газов при температурах выше 700°C . Для подтверждения правильности данного положения на рис. 2 приводится сравнение действительной удельной теплоемкости газов с теплоемкостями, полученными путем расчета при помощи приведенной выше формулы.

На основе вышеизложенного температура продуктов горения вычисляется непосредственно по количеству тепла Q , переданного продуктам горения, и по суммарному теплосодержанию продуктов горения i_0 при температуре 1000°C : $t = 1000 \cdot \left(\frac{Q}{i_0}\right)^n$ °C.

Численное значение показателя степени $n = n_0 = \text{const}$ изменяется (при $t > 700^\circ\text{C}$) в пределах от 0,89 до 0,91 в соответствии с составом топлива и значением коэффициента избытка воздуха. Если же $t < 700^\circ\text{C}$, то значение показателя n зависит и от температуры.

Полную $i-t$ -диаграмму продуктов горения возможно составить по формуле $i = i_0 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{1}{n}}$ ккал/кг, причем значения $\left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{1}{n}}$ даются в табл. 3.

При помощи приведенного метода можно доказать, что теоретическая температура горения топлива t_t , фактическая температура процесса горения t_k и коэффициент по-

лезного действия связаны выражением $\eta_k = \left(\frac{t_k}{t_t}\right)^{\frac{1}{n}}$.

Для пояснения практической возможности применения предложенных в статье упрощенных методов теплотехнического расчета приведены формулы для расчета продуктов горения эстонского сланца.

Изложенные в настоящей статье упрощенные методы расчета температуры продуктов горения значительно облегчают проведение сравнительного анализа при выяснении влияния состава топлива на температуру горения в диапазоне, в котором отсутствует диссоциация CO_2 и водяного пара, причем значение относительной ошибки не превышает $\pm 0,5\%$.

Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
19 IX 1957

SIMPLIFIED METHODS OF DETERMINING THE TEMPERATURE OF COMBUSTION PRODUCTS

R. Uuesoo

Summary

The methods usually applied for technical heat calculations in determining the temperatures of the products of combustion involve an extensive computation. This makes the comparison of temperatures arising from the combustion of fuels of different composition especially complicated.

The present article deals with the possibility of computing the total heat content of combustion products directly on the basis of the fuel composition data: $i = \Sigma g \cdot (ct)'$ kg-cal/kg. For this purpose the heat contents $(ct)'$ of combustion products originated at a complete combustion of the separate fuel constituents are represented on table 1 in kg-cal per 1 kg of the starting material, depending on temperature. At a change in the fuel composition the difference of the heat content of combustion products is computable by means of simple formulae. Departing approximately from the linear dependence of the heat contained in the fuel combustion products on temperature (at temperatures exceeding 900°C) it is possible to compute the temperature of combustion products in this zone by means of an equation to a straight line $t = t_a + k \cdot Q^\circ\text{C}$. There at the linear equation is simply developed by means of the heat contents of combustion products computed at two given temperatures: $i_1 = \Sigma g \cdot (ct_1)'$ and $i_2 = \Sigma g \cdot (ct_2)'$.

The computation formula of the temperature of combustion products acquires a still simpler form when the mean specific heat of combustion gases and mineral ash are expressed in terms of temperature stage-functions: $c = k \cdot t^N$. Such a formula enables to determine the specific heat with correct precision at temperatures exceeding 700°C . To achieve this the mean specific heat volumes are on drawing 2 compared with the results obtained by means of the above mentioned computation formulae (dotted lines). The computation formula of the temperature of combustion products can be expressed in the following form:

$t = 1000 \cdot \left(\frac{Q}{i_0}\right)^n$ °C, where Q stands for the heat volume transferred to 1 kg of fuel combustion products and i_0 — for the heat content of combustion products derived from 1 kg of fuel at a temperature of 1000° C.

The quantitative value of the stage exponent $n = n_0 = \text{const.}$ changes in limits of 0.89 to 0.91 corresponding to the composition of the fuel and the air-excess factor, when $t > 700^\circ\text{C}$. When $t < 700^\circ\text{C}$, then n depends on the temperature according to the empirically expressed conformity to law. As the heat content of the products of combustion at a certain given temperature t is expressed by the simple product:

$i = i_0 \left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{1}{n}}$ kg-cal/kg, the drawing up of $i-t$ diagrams is considerably simplified.

On the basis of the presented simplified computation method it is possible to express the furnace efficiency factor η through the actual temperature of the furnace t_k and the

theoretical fuel combustion temperature t_t : $\eta = \left(\frac{t_k}{t_t}\right)^{\frac{1}{n}}$.

In order to elucidate the use in practice of the recommended methods the article encloses equations for the technical heat computation of combustion products of the Estonian combustible shale. The quoted methods — in the form they are presented — should be applied in such temperature zones, where the dissociation of carbonic acid gases and water steam does not actually influence the combustion process, i. e. up to 1500—1600° C; thereat the mean error does not exceed $\pm 0.5\%$.

Academy of Sciences of the Estonian S.S.R.,
Institute of Energetics

Received,
Sept. 19, 1957