

<https://doi.org/10.3176/tech.phys.math.1956.2.05>

PÕLEVKIVI KUUMGAASI OMADUSTEST JA PÕLETAMISE ALUSTEST

L. KÄARMA

Eesti NSV energeetikas ja küttemajanduses esmajärgulise tähtsusega kohaliku kütuse — põlevkivi — põletamise tehnika ei ole veel täiuslik. Põlevkivi kõrge tuha- ja lendainetesisaldus, intensiivne lendainete eraldumine kitsas temperatuuripiirkonnas ning tuha madal paatumistemperatuur raskendavad tema ratsionaalset põletamist küttekolletes.

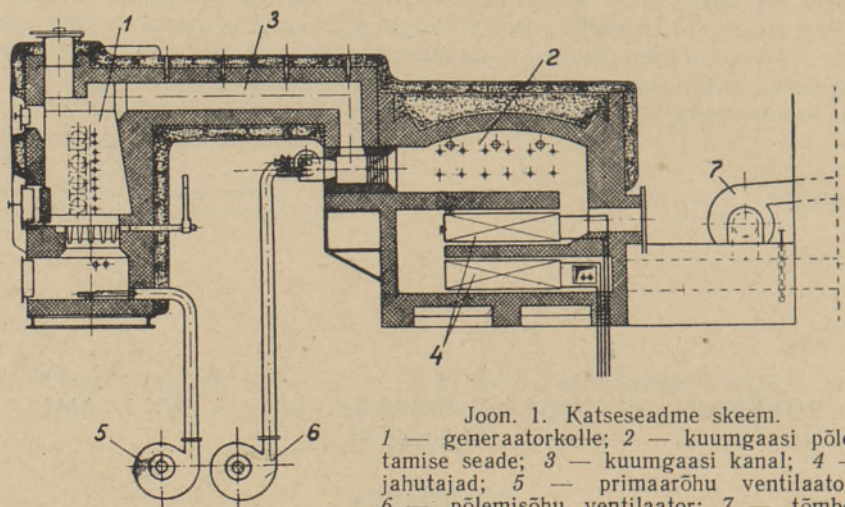
Tükkpõlevkivi põletamisel tööstuslikes ja kommunaalmajanduslikes väikekolletes, millede soojusootlikkus on kuni $2,5 \cdot 10^6$ kcal/tunnis, esinevad suured raskused, sest mittetäielikul põlemisel tekkiv tahm sadeneb küttepindadele, halvendades sellega tunduvalt soojuse ülekannet ja tõstes katlast väljuvate suitsugaaside temperatuuri. Selle tulemusena väheneb katelseadmete kasutegur ja soojusootlikkus. Küttepindadele sadenev tahm on kleepuv ning võtab lendtuhka kergesti külge. Tekkinud massi eraldamine küttepindadelt on raskesti teostatav, mistõttu katelseadmete normaalne teenindamine osutub äärmiselt raskendatuks. Sellele lisandub korstnast väljuvate tahmarikaste suitsugaaside ebahügieeniline mõju ümbruskonnale.

Kirjeldatud puudused on aga välditavad kaheastmelise põletamismenetluse rakendamisega. Kolde esimeses astmes — lihtsustatud generaatorprotsessiga töötavas koldes — saadud põlevkivi kuumgaasi põletamine kolde teises astmes tagab tahmavaba põlemise ja kollete ökonoomsuse.

Aastail 1951—1953 teostati Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudis H. Truu juhendamisel tükkpõlevkivi kaheastmelise põletamise süstemaatilist uurimist, mille kestel selgitati kolde esimeses astmes toimuva kihiprotsessiga seosesolevaid küsimusi (²), põlevkivi kuumgaasi kütuslike omadusi ja selle põletamist kolde teise astme mitmesugustes põletites.

Käesolevas artiklis esitatakse uurimistöö tulemused puhastamata kuumgaasi kütuslike omaduste kohta ja tema põletamise lähtealused. Põlevkivi kuumgaasi füüsikalises-keemiliste näitajate tundmine on tema põlemisprotsessi uurimise, põletamisseadmete konstrueerimise ja arvutamiste aluseks. Olgu märgitud, et kuni siiani puudusid andmed põlevkivi kuumgaasi koostise ja selle omaduste kohta.

Uurimistöö eksperimentaalne osa teostati katseseadmel, mis on toodud joonisel 1. Katseseadme valikul lähtuti sellest, et oleks võimalik otstarbekalt vahetada katsetatavaid põleteid, paigutada mooteriistu ning selgitada kuumgaasi transportitavuse küsimust. Neil kaalutlustel paigutati katse-



Joon. 1. Katseseadme skeem.
 1 — generaatorkolle; 2 — kuumgaasi põletamise seade; 3 — kuumgaasi kanal; 4 — jahutajad; 5 — primaarõhu ventilaator; 6 — põlemisõhu ventilaator; 7 — tõmbeventilaator.

seadmes kolde teine aste esimesest 1,5 m kaugusele ja ühendati omavahel kanaliga, mille ristlõige oli 130×200 mm. Kanalil olid puhastusluugid võimalike ummistuste kõrvaldamiseks. Põlevkivi kuumgaasi keskmiste proovide võtmine toimus kanali põletieelsest osast. Proovide võtmiseks kasutati 10-millimeetrilise siseläbimõõduga keraamilisi torusid, sest puhastamata kuumgaasi hapnikusisaldus on tähtsuselt väike ja ummistumisoht on proovi võtmisel väga suur. Põlevkivi puhastamata kuumgaasi koostise määramiseks kasutati *BTH* gaasianalüsaatorit.

Põlevkivi kuumgaasi füüsikalis-keemilisi omadusi

Põlevkivi kuumgaasi koostis. Põlevkivi kuumgaasi koostist määravaks peamiseks teguriks on põlevkivile iseloomulik lendosade intensiivne eraldumine suhteliselt madalatel temperatuuridel ($350\text{--}500^\circ\text{C}$), kusjuures eralduvad lendosad sisaldavad eriti rohkesti kõrge temperatuuri juures vähepüsivaid süsivesinikühendeid, millede lagunemisel tekib metaan, vesinik ja tahmana esinev vaba süsinik. Temperatuuri tõustes suureneb kihist eralduvates lendosades termiliselt püsivate komponentide — H_2 ja CO osatähtsus.

Põlevkivi kuumgaasi koostis muutub olenevalt õliaurude lagunemisest kihipealse ruumis ja kanalil. Termilise lagunemise intensiivsus sõltub seejuures peamiselt temperatuurist, kuumutamise kestusest ja katalüütiliselt mõjuvaist aineist. Katseseadme tingimustes oli kuumgaasi temperatuur $650\text{--}850^\circ\text{C}$ piirides. Kuumgaas oli selles temperatuuris 1,0—1,5 sekundit. Kanalil esines tahma tunduv eraldumine, mistõttu tuli kanalit iga 2—3 tunni järel puhastada. Täheledatai, et tahma eraldumise protsess ja kanali ummistumine arenesid kasvava intensiivsusega, mis on põlevkivist eralduvate lendainete intensiivse termilise lagunemise tunnuseks.

Tehtud tähelepanekutest võib järeldada, et generaatorkoldes kihist välja kuumgaasi tahmisisaldus on suhteliselt väike, kusjuures suurem osatähtsus on kuumgaasis õliaurudel. Vahetult kihi pealt gaasiproovi võtmisel täitus pipett kollakaspruuni uduga — õliaurudega, mis jahtudes kondenseerusid sulgvedeliku pinnale õlilaikudena. Tahmisisaldust ei olnud seejuures märgata. 400 mm kihist eemal gaasiproovi võttes täitus pipett värvuselt musta tahmarikka gaasiga, kusjuures tahm sadenes sulgvedelikule ja pipeti seintele. Oliaurude märgatavat kondenseerumist sel juhul ei esinenud. Ainult mõnedel katsetel, mis teostati eriti väikese primaarõhu hulgaga, esines kanalist võetud kuumgaasi proovides õliaurude kondenseerumist sulgvedeliku pinnale. Eeltoodust selgub, et põletisse sisenevas puhastamata kuumgaasis on tahma suurel määral.

Oliaurude ja niiskuse hulk puhastamata kuumgaasis määrati kolde esimese astme kohta tehtud bilansilise arvutuse teel. Selle arvutuse täpsus on küllaldane kuumgaasi põletamisega seosesolevate rakenduslike küsimuste lahendamiseks. Oliaurude ja veeauru hulga määramine kuumgaasis otsese mõõtmise abil ei olnud käesoleva katseseadme tingimustes läbiviidav.

Katsetel kasutati kütusena ühtlase kvaliteediga I sordi põlevkivi, mille kütteväärtus Q_i^k oli keskmiselt 3570 kcal/kg, niiskus $W_t = 7,0\%$, $A_t = 35,8\%$ ja $(CO_2)_t = 14,3\%$. Sobivamaks primaarõhu L^1 hulgakaks oli kolde esimeses astmes 1,35 nm³/kg. Seejuures ei esinenud kihi šlakkumist. See õhu hulk võeti aluseks kuumgaasi põletite katsetamisel ning kõik järgnevad andmed kehtivad selle primaarõhu hulga kohta. Kuumgaasi koostis oli katsetel erinevate õhu hulkadega ($L^1 = 1,2 - 1,7$ nm³/kg) võrdlemisi ühtlane. Kuumgaasi hulk kolde esimeses astmes määrati bilansilise arvutuse teel ja see oli keskmiselt 1,7 nm³/kg.

Põlevkivi kuiva kuumgaasi keskmine koostis oli 23 gaasianalüüsi andmete põhjal järgmine: CO — 9,5 (6,5 ÷ 10,2)%; H₂ — 2,7 (2,1 ÷ 4,5)%; C_nH_{2n+2} — 2,8 (2,0 ÷ 5,0)%; C_nH_m — 3,2 (2,5 ÷ 5,3)%; O₂ — 0,5 (0,1 ÷ 1,0)%; CO₂ — 13,6 (11,8 ÷ 14,9)%; N₂ — 67,7 (66,2 ÷ 70,1)%.

Eeltoodust nähtub, et mittepõlevate komponentide CO₂ ja N₂ sisaldus kuumgaasis on kõrge — keskmiselt 81,3 (78 ÷ 85)%.

Põlevkivi kuumgaasi keskmine niiskusesisaldus oli kolde esimese astme kohta tehtud materiaalse bilansi põhjal 90—130 g/nm³ (2). Niiske kuumgaasi keskmine koostis, kui võtta keskmiseks niiskusesisalduseks 100 g/nm³, on järgmine: CO — 8,5%, H₂ — 2,4%; C_nH_{2n+2} — 2,5%; C_nH_m — 2,8%, O₂ — 0,4%, CO₂ — 12,1%, N₂ — 60,2%, H₂O — 11,1%, millest põlevosa moodustab 16,2% ja ballastosa 83,8%.

Põlevkivi kuumgaasi õliaurude sisaldus vahetult kihi kohal oli kolde esimese astme kohta tehtud bilansilise arvutuse põhjal 40—75 g/nm³. (2) Oli elementaarkoostiseks võeti põlevkivi utmisel püstgeneraatorist saadava toorõli koostis: C — 83,0%, H — 9,7%, S — 0,9% ja O — 6,4%. (1)

Tükkpõlevkivi põletamisel kaheastmelistes kolletes saadud kuumgaasi lendtuhasisaldus on tunduvalt väiksem kui peenpõlevkivi kollete kuumgaasi oma. Lendtuhasisalduse määramiseks mõõtmisi ei tehtud, kuid käesoleva katseseadme tingimustes võib seda orienteeruvalt hinnata 5 g/nm³. Lendtuha sadenemine ei põhjustanud katseseadme juures ummistumist ega šlakkumist.

Põlevkivi kuumgaasi koostist võivad mõjutada ebaühtlused kihirežiimis, primaarõhu hulgas, kütuse kvaliteedis jne., mis raskendavad kuumgaasi keskmise koostise määramist.

Põlevkivi kuumgaasi koostise võrdlus teiste kütuste — Petšoori kivi-sõe (7) ja Tšeljabinski pruunsõe (3) gaasistamisel saadud kuumgaasi koostisega on toodud tabelis 1. Sellest nähtub, et põlevkivi kuumgaasile on ise-

loomulik suur lendosadesisaldus ja kõrge temperatuur kolde esimesest astmest väljumisel, mistõttu põlevkivi kuumgaas on omadustelt erinev teiste tahkete kütuste gaasistamise saadustest.

Tabel 1

Kuumgaaside koostisi

Kütuse liik	Gaasi koostis							Tõrvalnete sisaldus g/nm ³	Niiskusesisaldus g/nm ³	Temperatuur °C	Gaasilise osa kütteväärtus kcal/nm ³
	CO	H ₂	CH ₄	C _n H _m	O ₂	CO ₂	N ₂				
Petšoorakiivitsüsi	25,7	14,7	2,0	0,2	—	6,6	50,8	22,6	105	420	1360
Tšeljabinški pruunsüsi	26,2	17,3	2,1	0,3	—	3,9	49,9	22,6	71,5	320	1448
Eesti NSV põlevkivi	9,5	2,7	2,8	3,2	0,5	13,6	67,7	40—75	90—130	730	1040

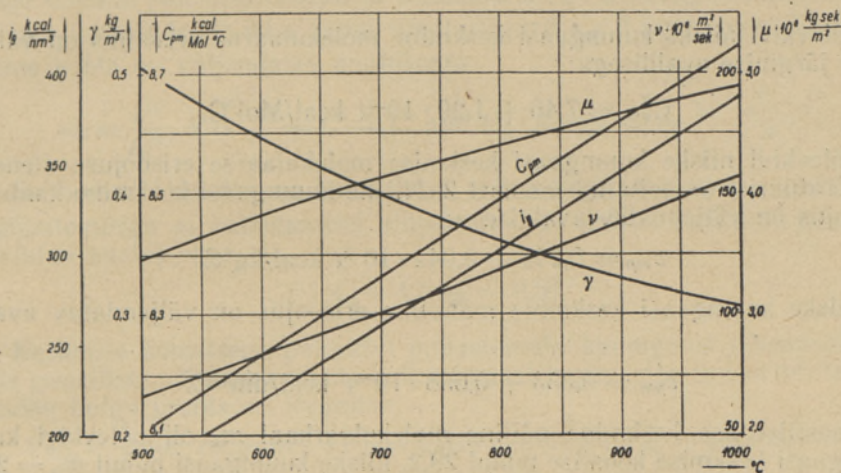
Põlevkivi kuumgaasi gaasilise osa koostis erineb ka põlevkivi utmisel püstgeneraatorist saadava gaasi koostisest — CO₂ + H₂S — 20,7%, CO — 3,8%; H₂ — 7,4%, CH₄ — 2,0%, C_nH_m — 1,7%, O₂ — 1,2% ja N₂ — 63,2% — peamiselt kõrgema CO ja madalama H₂ sisaldusega. Põlevkivi utmisel tunnelahjust saadava kõrgevärtusliku gaasi koostis — CO₂ — 18 ÷ 25%, H₂S — 7 ÷ 10%, CO — 5 ÷ 6%, H₂ — 4 ÷ 5%, C_nH_{2n+2} — 25 ÷ 30%, C_nH_m — 12 ÷ 20% ja N₂ — 20 ÷ 25% — on samuti suurel määral erinev põlevkivi kuumgaasi gaasilise osa koostisest. (5)

Kuumgaasi temperatuur, kütteväärtus ja soojusesisaldus. Põlevkivi kuumgaasi temperatuur küttekolde põletieelses osas oli 650—790° C piirides, keskmiselt 730° C. Põletieelses osas avaldavad kuumgaasi temperatuurile mõju termiliselt mittepüsivate komponentide lagunemise toime ja jahtumiskaod, mistõttu kuumgaasi temperatuur oli generaatorkoldes vahetult kihi kohal kõrgem ning kõikus 700—850° C piirides. Põlevkivi kuumgaasi kõrge temperatuur mõjub soodustavalt põlemisprotsessi stabiilsusele.

Põlevkivi kuumgaasi gaasilise osa kütteväärtus oli N₂ ja CO₂ suure sisalduse tõttu suhteliselt madal. Arvutuse teel määratud kuiva kuumgaasi gaasilise osa kütteväärtus kõikus 880—1260 kcal/nm³ piirides. Kuumgaasi gaasilise osa keskmisele koostisele vastav kütteväärtus oli 1040 kcal/nm³. Arvutamisel tehti lihtsustavaid oletusi. Nii näiteks loeti kõik gaasilised küllastatud süsivesinikühendid metaaniks ja küllastamata süsivesinikühendid etüleeniks. Arvesse võttes kuumgaasi kvaliteedile mõjuvaid mitmesuguseid muid tegureid, näiteks kihirežiimi ebahütlust kolde esimeses astmes, on selliste lihtsustuste tulemusena tekkinud viga suhteliselt väike ja jääb praktiliste arvutuste täpsuse piiridesse.

Puhastamata kuumgaasis leiduvad lisandid — tahm ja õliaurud — tõstavad gaasi üldist kütteväärtust. Põletisse antava kuumgaasi keskmise tahma- ja õliaurudesisaldusele — 50 g/nm³ — vastav kütteväärtus oli ligikaudu 430 kcal/nm³. Õliaurude kütteväärtuse arvutamisel võeti aluseks põlevkivi utmisel püstgeneraatorist saadava toorõli koostis, kusjuures eeldati, et teekonnal kihist kuni kuumgaasi põletini laguneb termiliselt teel umbes 50% õliaurudest. Puhastamata kuumgaasi keskmise koostise üldine kütteväärtus oli seega 1470 kcal/nm³. Kuumgaasi gaasilise osa kütteväärtus moodustas sellest ligikaudu 70% ning lendtahma ja õliaurude kütteväärtus 30%.

Kuiva kuumgaasi gaasilise osa soojusesisalduse olenevus temperatuurist on esitatud joonisel 2. Kuiva kuumgaasi gaasilise osa keskmise koostise soojusesisaldus i_g oli 730° C juures 272 kcal/nm³. Kuumgaasi keskmise



Joon. 2. Põlevkivi kuumgaasi füüsikalise-keemiliste näitajate olenevus temperatuurist.

niiskusesisalduse 100 g/nm³ puhul oli veeauru soojusesisaldus 35 kcal/nm³. Tabelis 2 on toodud kuumgaasiga põletisse antava soojushulga üldine bilanss 1 nm³ kuiva kuumgaasi kohta. Kuumgaasiga põletisse antavast üldisest soojushulgast moodustas keemiline soojus keskmiselt 81% ja füüsikaline soojus 19%.

Tabel 2

Kuumgaasi kütteväärtus ja soojusesisaldus

Koostisosad	kcal/nm ³	%
Gaasilise osa kütteväärtus	1040	57,6
Tahma ja õliaurude kütteväärtus	430	23,8
Gaasilise osa soojusesisaldus	272	15,1
Veeauru soojusesisaldus	35	1,9
Tahma ja õliaurude soojusesisaldus	20	1,1
Põlemisõhu soojusesisaldus	11	0,5
Kokku	1808	100,0

Kuumgaasi teisi füüsikalise-keemilisi näitajaid. Põlevkivi kuiva kuumgaasi gaasilise osa keskmisele koostisele vastav erikaal normaaltingimustes määrati arvutamise teel, mille järgi $\gamma_0^k = 1,45$ kg/nm³. Normaaltingimuste ja kuumgaasi keskmise niiskusesisalduse 100 g/nm³ juures on niiske kuumgaasi erikaal γ_0^n 1,38 kg/nm³. Niiske kuumgaasi keskmise lendtahma- ja õliaurudesisalduse 50 g/nm³ ja lendtuhasisalduse 5 g/nm³ juures $\gamma_0 = 1,43$ kg/nm³. Eeltoodust nähtub, et lisandite (veeaur, lendtolm) mõju põlevkivi kuiva kuumgaasi erikaalule on suhteliselt väike, s. o. $\gamma_0^k \approx \gamma_0$, sest lendtolmu ja veeauru mõjud erikaalule vastastikku peaaegu kompenseeruvad. Põlevkivi puhastamata kuumgaasi erikaalu olenevus temperatuurist on esitatud joonisel 2.

Põlevkivi kuiva kuumgaasi keskmine molekulaarne erisoojus, lähtudes gaasiliste komponentide erisoojustest, on väljendatav avaldisega:

$$C_{pm}^k = 7,41 + 1,3 \cdot 10^{-3}t \text{ kcal/Mol}^\circ\text{C}.$$

Põlevkivi niiske kuumgaasi keskmine molekulaarne erisoojus on väljendatav järgmise avaldisega:

$$C_{pm}^n = 7,46 + 1,29 \cdot 10^{-3}t \text{ kcal/Mol}^\circ\text{C}.$$

Põlevkivi niiske kuumgaasi keskmise molekulaarse erisoojuse olenevus temperatuurist on esitatud joonisel 2. Niiske kuumgaasi keskmine kaaluline erisoojus on väljendatav avaldisega:

$$c_{mp} = 0,242 + 0,042 \cdot 10^{-3}t \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}.$$

Niiske kuumgaasi keskmine mahuline erisoojus on väljendatav avaldisega:

$$c'_{pm} = 0,333 + 0,058 \cdot 10^{-3}t \text{ kcal/nm}^3^\circ\text{C}.$$

Gaasilise osa keskmine näiline molekulaarkaala m_k oli põlevkivi kuiva kuumgaasi keskmise koostise puhul 29,2, niiske kuumgaasi puhul $m_n = 27,9$. Põlevkivi kuiva kuumgaasi gaasilise osa gaasikonstant $R_k = 29,1 \text{ kgm/kg}^\circ\text{C}$, niiske kuumgaasi puhul $R_n = 30,4 \text{ kgm/kg}^\circ\text{C}$.

Põlevkivi kuiva kuumgaasi dünaamiline viskoossus normaaltingimustes μ_0^k on arvatud lähtudes segu moodustavate komponentide dünaamilistest viskoossustest. Põlevkivi kuiva kuumgaasi keskmisele koostisele vastav dünaamiline viskoossus normaaltingimustes $\mu_0^k = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ kgsek/m}^2$. Põlevkivi kuumgaasi keskmise niiskusesisalduse 100 g/nm^3 juures $\mu_0^n = 1,52 \cdot 10^{-6} \text{ kgsek/m}^2$. Niiske kuumgaasi dünaamilise viskoossuse olenevus temperatuurist on esitatud joonisel 2. Arvutuse teel leitud Sutherlandi koefitsiendid kuiva kuumgaasi puhul $C_k = 137$, kuumgaasi niiskusesisalduse 100 g/nm^3 juures $C_n = 199$.

Kuumgaasi kinemaatiline viskoossus ν on arvatud lähtudes dünaamilisest viskoossusest. Põlevkivi kuumgaasi kinemaatilise viskoossuse olenevus temperatuurist on esitatud joonisel 2.

Põlevkivi kuumgaasi põletamise alustest

Põlemisõhu hulk ja liigõhutegur. Teoreetilise põlemisõhu hulk 1 nm^3 kuiva, lisanditeta kuumgaasi põletamiseks kõikus keskmiselt $0,83$ — $1,20 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$ piirides. Kuumgaasi gaasilise osa keskmisele koostisele vastab teoreetiline põlemisõhu hulk $L_0^g = 0,99 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$. Tahma ja õliaurude põletamiseks vajalik teoreetiline õhuhulk, mis vastab kuumgaasi keskmisele koostisele, oli ligikaudu $0,47 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$. Seega oli kolde teise astmesse antav teoreetiline õhuhulk 1 nm^3 keskmise koostisega põlevkivi kuumgaasi põletamiseks $L_0^{II} = 1,46 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$ või 1 kg põlevkivi kohta $2,48 \text{ nm}^3/\text{kg}$. Teoreetiline õhuhulk 1 m^3 kuumgaasi kohta, mille keskmine temperatuur on 730°C , on väike — keskmiselt $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Võttes aluseks kolde esimesse astmesse juhitava õhuhulga $L^I = 1,35 \text{ nm}^3/\text{kg}$, on üldine kaheastmelisse põlemisprotsessi juhiv teoreetiline õhuhulk $L_0^{II} = 3,83 \text{ nm}^3/\text{kg}$. Katsetamisel aluseks võetud kaheastmelise kolde keskmise töörežiimi puhul antakse seega ligikaudu 35% üldisest teoreetilisest põlemisõhu hulgast kolde esimesse astmesse ja 65% teise astmesse.

Kaheastmelise kolde üldine liigõhutegur $\alpha_{ii} = \frac{L^i}{L_0^i}$, kus L^i on tegelikult kaheastmelisse põlemisprotsessi juhitud üldine õhuhulk. Põlevkivi kuumgaasi täieliku põlemisprotsessi ja seadmete kõrge kasuteguri kindlustamisel on suur tähtsus kolde teise astme liigõhuteguri α_{II} . Liigõhutegur kolde teise astme kohta on väljendatav avaldisega:

$$\alpha_{II} = \frac{L^{II}}{L_0^{II}}, \text{ kus } L^{II} = L^i - L^I \text{ nm}^3/\text{kg}. \text{ Seega } \alpha_{II} = \frac{\alpha_{ii} \cdot L_0^i - L^I}{L_0^{II}}.$$

Eeltoodust lähtudes on kolde teise astme liigõhuteguri α_{II} seos üldise liigõhuteguriga α_{ii} katsetamisel aluseks võetud kolde töörežiimi puhul väljendatav avaldisega:

$$\alpha_{II} = 1,54\alpha_{ii} - 0,54.$$

Keskmise koostisega põlevkivi puhastamata kuumgaasi põlemisel tekivate gaasiliste põlemissaaduste hulk normaaltingimustes ja teoreetilise põlemisõhu hulga juures on järgmine:

$$V_{RO_2} = 0,409 \text{ nm}^3/\text{nm}^3, V_{H_2O}^0 = 0,310 \text{ nm}^3/\text{nm}^3, V_{N_2}^0 = 1,83 \text{ nm}^3/\text{nm}^3.$$

Seega on niiskete põlemissaaduste hulk $V_0^n = 2,549 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$ ja kuivade põlemissaaduste hulk $V_0^k = 2,239 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$. Sellele vastavalt on $RO_2^{max} = 18,3\%$.

Liigõhuteguri α_{II} määramine kuumgaasi põletamisel gaasianalüüsi tulemuste põhjal on võimalik avaldisest (4)

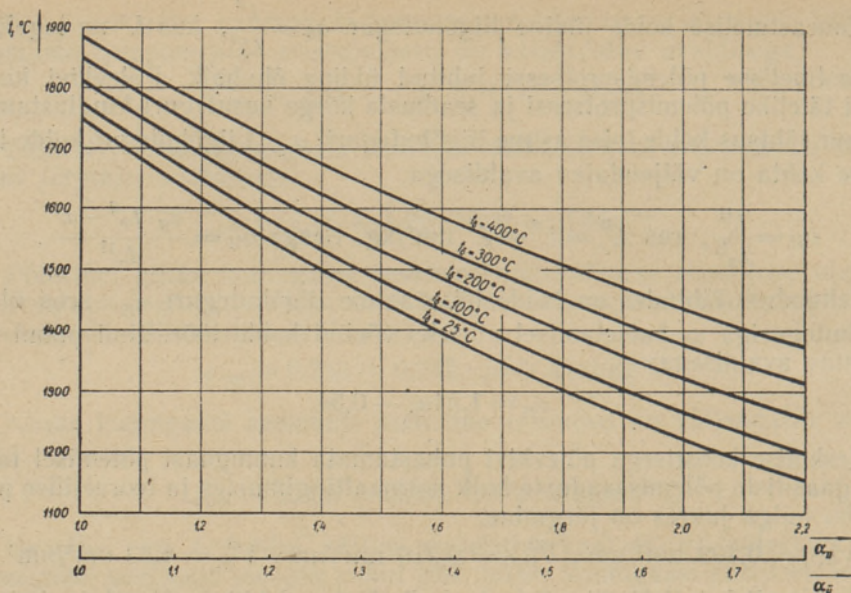
$$\alpha_{II} = \frac{RO_2^{max} \frac{V_0^k}{L_0^{II}}}{RO_2} + \left(1 - \frac{V_0^k}{L_0^{II}}\right).$$

Eeltoodust lähtudes saab põlevkivi kuumgaasi keskmise koostise puhul leida kolde teise astme liigõhuteguri α_{II} avaldisest

$$\alpha_{II} = \frac{28,1}{RO_2} - 0,53.$$

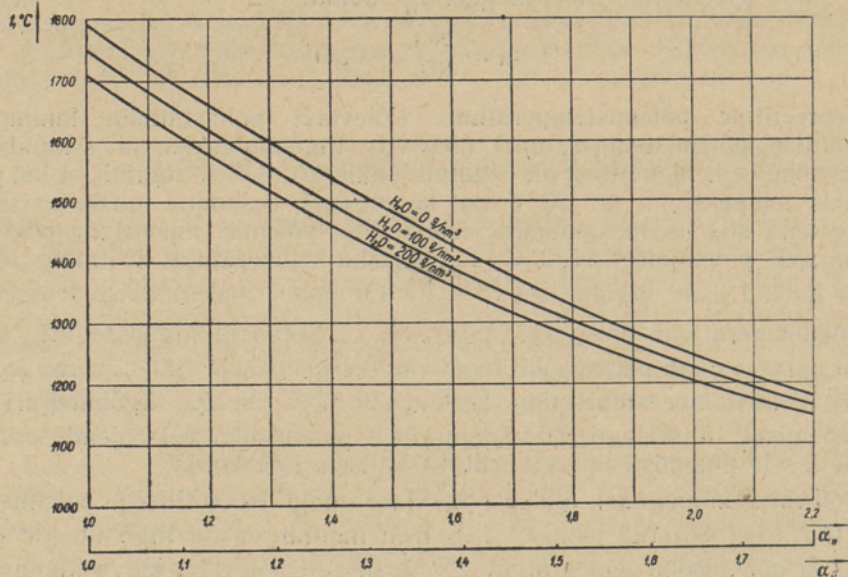
Teoreetiline põlemistemperatuur. Põlevkivi puhastamata kuumgaasi teoreetilise põlemistemperatuuri olenevus liigõhutegurist ja sekundaarse põlemisõhu eelsoojendusest on esitatud joonisel 3. Sellest nähtub, et kui põlemisõhu temperatuur on 25°C ja kuumgaasi keskmine niiskusesisaldus $100 \text{ g}/\text{nm}^3$, siis on maksimaalne teoreetiline põlemistemperatuur põlevkivi kuumgaasi põletamisel 1750°C . Põlemisõhu temperatuuri tõstmine 100°C võrra kutsub esile liigõhuteguri $\alpha_{II} = 1,0$ puhul maksimaalse teoreetilise põlemistemperatuuri tõusu keskmiselt 37°C . Seevastu liigõhuteguri $\alpha_{II} = 2,0$ puhul vastab põlemisõhu temperatuuri tõstmisele 100°C võrra teoreetilise põlemistemperatuuri tõus keskmiselt 57°C . Seega liigõhuteguri α_{II} suurenemisel 1,0-st kuni 2,0-ni, suureneb põlemisõhu eelsoojenduse mõju teoreetilisele põlemistemperatuurile keskmiselt 1,54 korda.

Põlevkivi kuumgaasi niiskusesisalduse mõju teoreetilisele põlemistemperatuurile on esitatud joonisel 4. Sellest nähtub, et kui liigõhutegur $\alpha_{II} = 1,0$ ja põlemisõhu temperatuur 25°C , siis on põlevkivi kuiva kuumgaasi maksimaalne teoreetiline põlemistemperatuur 1790°C . Liigõhuteguri $\alpha_{II} = 2,0$ juures on kuiva kuumgaasi teoreetiline põlemistemperatuur 1240°C .



Joon. 3. Teoreetilise põlemistemperatuuri olenevus sekundaarse põlemisõhu eelsoojendusest ja liigõhutegurist (põlemisõhu niiskusesisaldus 8 g/nm³).

Liigõhuteguri $\alpha_{II} = 1,0$ puhul vastab kuumgaasi iga 100 g/nm³ niiskusesisaldusele maksimaalse teoreetilise põlemistemperatuuri langus keskmiselt 40° C võrra. Liigõhuteguri $\alpha_{II} = 2,0$ juures on see langus vastavalt 20° C. Seega väheneb liigõhuteguri α_{II} suurenemisel 1,0-st kuni 2,0-ni kuumgaasi niiskusesisalduse mõju teoreetilisele põlemistemperatuurile keskmiselt 2 korda.



Joon. 4. Põlevkivi kuumgaasi niiskusesisalduse mõju teoreetilisele põlemistemperatuurile (põlemisõhu temperatuur 25° C).

Põlemissaaduste dissotsiatsiooni mõju teoreetilisele põlemistemperatuurile on kuni 1700° C juures praktiliselt tähtsusetu. Joonistel 3 ja 4 esitatud põlevkivi kuumgaasi teoreetilise põlemistemperatuuri kõveratest nähtub, et põlemissaaduste dissotsiatsioon võib kõne alla tulla vaid põlemisõhu 300—400° C eelsoojenduse juures kuni liigõhutegurini $\alpha_{11} = 1,25$. Et põletite praktiline töörežiim põlemisõhu 25° C temperatuuri juures vastab madalamatele teoreetilistele põlemistemperatuuridele kuni 1700° C, siis ei ole arvutuste teostamisel arvesse võetud põlemissaaduste dissotsiatsiooni mõju teoreetilisele põlemistemperatuurile.

Põlevkivi kuumgaasi süttimine. Gaasi süttimistemperatuur oleneb põlev- ja ballastaine sisaldusest segus, rõhust, turbulentsusest, induktiooniperioodist ja soojuse ülekande tingimustest. Võrreldes lihtgaasidega on põlevgaaside segu süttimistemperatuur raskesti määratav. Käesoleval ajal ei tunta meetodit põlevgaaside segu süttimistemperatuuri arvutamiseks koostise põhjal. Sageli määratakse põlevgaaside segu süttimistemperatuur madalaimat süttimistemperatuuri omava komponendi järgi. Eeldades, et põlevkivi kuumgaas sisaldab vähe kõrgemaid küllastatud ja küllastamata süsivesinikühendeid ning jättes arvesse võtmata ballastainete (CO_2 , N_2 , H_2O) mõju süttimistemperatuurile, peaks põlevkivi kuumgaasi minimaalne süttimistemperatuur õhus H_2 või C_2H_4 minimaalsete süttimistemperatuuride järgi olema 530—540° C.

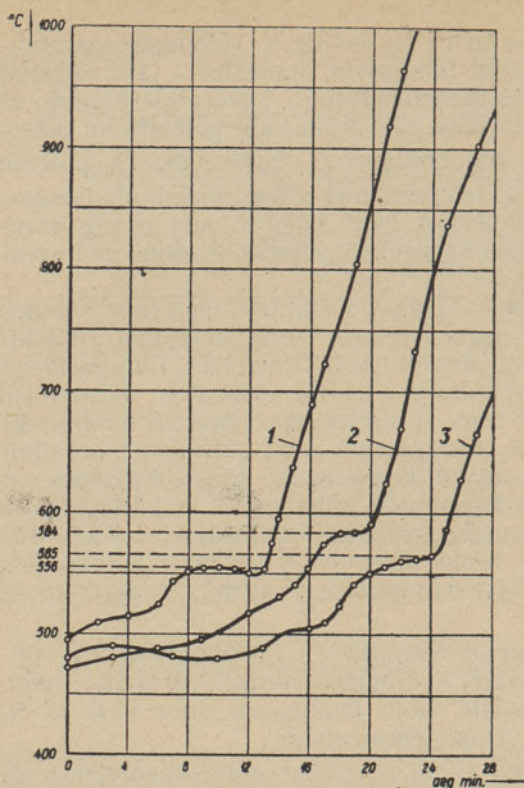
Puhastamata kuumgaasis leiduvad lisandid — hõõguv lendtolm, õliaurud ja veeaur — avaldavad põlevkivi kuumgaasi süttimisele olulist mõju. Samuti avaldab süttimistemperatuurile mõju kuumgaasi suur CO_2 ja N_2 sisaldus, mis üldiselt kõrgendab süttimistemperatuuri.

Põlevkivi kuumgaasi isesüttimine (ilma kunstlike süütevahenditeta) oli katseseadme tingimustes sel juhul võimalik, kui põletis enne süttimist moodustuva segu temperatuur ületas süttimistemperatuuri. Juurdeantav külm põlemisõhk ja põleti seinad avaldasid seejuures jahutavat toimet.

Põlevkivi kuumgaasi temperatuur kanali põletieelses osas oli 650—790° C, seega kõrgem tema üksikkomponentide minimaalseist süttimistemperatuuridest õhus ja ületas keskmiselt 120—260° C võrra kuumgaasi süttimistemperatuuri, mis on võetud H_2 minimaalse süttimistemperatuuri järgi.

Et kuumgaasi temperatuur oli kõrgem tema süttimistemperatuurist õhus, siis tõstis kuumgaas põletist läbivoolamisel katseseadme sissekütmissperioodil šamotist seinte ja põletis moodustuva segu temperatuuri sel määral, et toimus segu isesüttimine. Seejuures oli juurdeantava põlemisõhu hulk jahutamise vältimiseks minimaalne. Eeldades põletis ühtlast kuumgaasi ja põlemisõhu segunemist, on võimalik, juhul kui põleti seinad kuumenevad süttimistemperatuurini, 1 nm^3 keskmise koostisega niiske kuumgaasi kohta juurde anda põlemisõhku (25° C) maksimaalselt kuni 0,21 nm^3/nm^3 .

Põlevkivi kuumgaasi süttimistingimuste ligikaudseks määramiseks teostati katseseadme sissekütmise ajal mõõtmisi. Pidevalt mõõdeti põletisse antava kuumgaasi temperatuuri kanali põletieelses osas ning põletis enne süttimist, leegi tekkimisel ja pärast süttimist. Samuti võeti vahetult enne leegi tekkimise momenti kuumgaasi kanalist ja põletist gaasiproove. Põleti kaela vaba ristlõige oli teostatud katsetel 175 × 240 mm ning segu keskmine voolamiskiirus selles oli 1,5 m/sek. Temperatuuri ajaline muutumine põletis sissekütmise perioodil on toodud joonisel 5, kus on kujutatud temperatuuri muutumise kõverad kolme katse kohta. Sellele vastavalt olid kuumgaasi süttimistemperatuurid $t_{s_1} = 556^\circ \text{C}$, $t_{s_2} = 584^\circ \text{C}$ ja $t_{s_3} = 565^\circ \text{C}$. Keskmine süttimistemperatuur oli seega 570° C, mis on keskmiselt 40° C võrra kõrgem kui vesiniku minimaalne süttimistemperatuur õhus. Erinevuse põhjuseks on tõenäoliselt kuumgaasi suur ballastainete sisaldus ning suh-



teliselt madal vesiniku kontsentratsioon. Kuumgaasi temperatuur kanali põletieelses osas oli kolmel teostatud mõõtmisel vastavalt $t_1 = 790^\circ\text{C}$, $t_2 = 770^\circ\text{C}$ ja $t_3 = 746^\circ\text{C}$. Põlemisõhu temperatuur oli 25°C . Gaasianalüüside tulemuste põhjal olid kuumgaasi kontsentratsioonid enne süttimist 80,2-, 83,7- ja 84,1-protsendilised.

Joon. 5.
Temperatuuri muutumise iseloom põlevkivi kuumgaasi süttimisperioodil.

Süttimise piirkontsentratsioonide arvutamisel lähtuti põlevkivi kuumgaasi põlevosa keskmisest koostisest: $\text{CO} - 52,5\%$, $\text{H}_2 - 14,8\%$, $\text{CH}_4 - 15,4\%$, $\text{C}_2\text{H}_4 - 17,3\%$. Kuumgaasi põlevosa süttimise piirkontsentratsioonid leiti Le-Chatelier valemil abil

$$L_p = \frac{100}{\frac{a}{l_a} + \frac{b}{l_b} + \frac{c}{l_c} + \dots + \frac{m}{l_m}} \%,$$

kus L_p on gaasi põlevaine piirkontsentratsioon protsentides (ülemine või alumine);

a, b, c, \dots, m — põlevosas leiduvate gaaside hulk protsentides;

$l_a, l_b, l_c, \dots, l_m$ — vastavate gaaside süttimise piirkontsentratsioonid protsentides (alumine või ülemine).

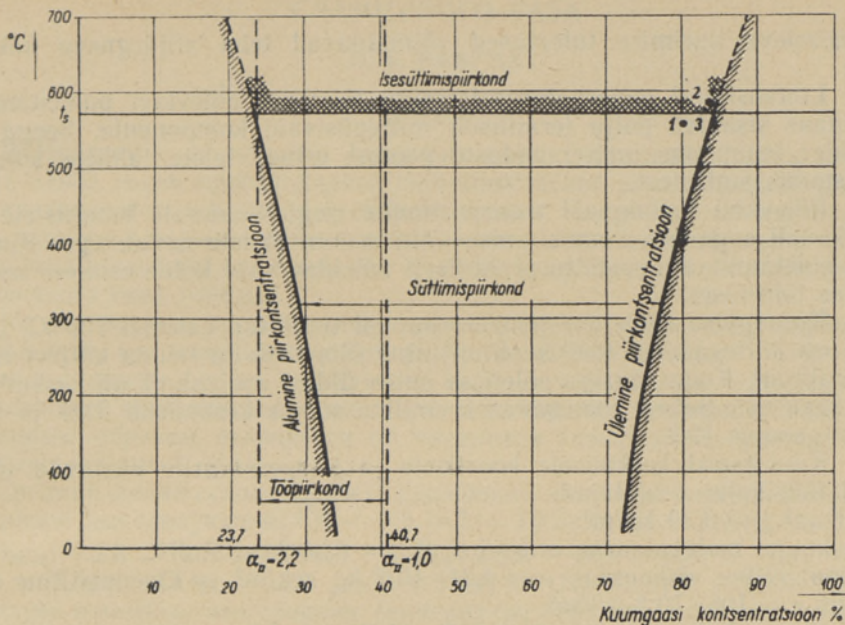
Ballastainete mõju süttimise piirkontsentratsioonidele arvutati välja valemil (6)

$$L = L_p \frac{\left(1 + \frac{b}{1-b}\right) 100}{100 + L_p \frac{b}{1-b}} \%$$

abil, kus L_p on gaasi põlevaine piirkontsentratsioon (alumine või ülemine) ja $b = 0,01 (\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O})$ — gaasi ballastainetesisaldus.

Põlevkivi kuumgaasi kesmise koostise puhul $b = 0,838$.

Gaasi ja põlemisõhu segu algtemperatuuri tõstmine laiendab süttimispiirkonda. Kui segu temperatuur on üle 800°C , siis toimub süttimine praktiliselt ükskõik missuguse põlemisõhu ja gaasi vahekorra juures. Arvutuste tegemisel võeti aluseks andmed kuumgaasi koostises leiduvate põlevgaaside ülemise ja alumise piirkontsentratsiooni olenevuse kohta segu algtemperatuurist. (7)



Joon. 6. Põlevkivi kuumgaasi süttimise põhinäitajaid.

Joonisel 6 on kujutatud põlevkivi kuumgaasi süttimise piirkonsentratsioonide olenevus segu algtemperatuurist. Temperatuuril 17°C on alumine piirkonsentratsioon 34,3% ja ülemine piirkonsentratsioon 72,0%. Süttimistemperatuuril $t_s = 568^{\circ}\text{C}$ on orienteeruvad piirkonsentratsioonid vastavalt 23,5% ja 84,5%.

Süttimistemperatuuri määramiseks teostatud kolmele katsele (joon. 5) vastavad punktid on antud joonisel 6, kus nad on tähistatud arvudega 1, 2 ja 3. Need punktid näitavad tegelike mõõtmistulemuste ligikaudset vastavust eespool kirjeldatud arvutuste tulemustele.

Normaalsele tööpiirkonnale $\alpha_{II} = 1,0 \div 2,2$ vastavad kuumgaasi kontsentratsioonid on suhteliselt madalad — $40,7 \div 23,7\%$; see on osaliselt madalam isegi alumisest piirkonsentratsioonist (joon. 6).

Sel asjaolul pole siiski praktilist tähtsust, sest põlevkivi kuumgaasi kõrge temperatuuri tõttu ei ole praktiliselt võimalik läbi viia kuumgaasi ja põlemisõhu eelsegunemist, mistõttu kuumgaasi põletamine on teostatav ainult difusioonpõlemise põhimõttel.

Enamasti toimus kuumgaasi isesüttimine ilma märgatava plahvatuseta. Leegi tekkimise perioodil esinesid plahvatused külmade seintega põlemiskambri vaid väikese ristlõikega põletite ja sellega võrreldes suhteliselt suure põlemiskambri puhul. Sel juhul toimus sageli 3—4 üksteisele perioodiliselt järgnevat plahvatust. Põlemiskambri mahu vähendamisel ja keraamiliste segamiskehade kasutamisel plahvatusi ei esinenud. Samuti ei esinenud plahvatusi hõõguvate seintega põlemiskambri.

Kokkuvõte

Käesoleva uurimise tulemused võimaldavad teha alljärgneva kokkuvõtte:

1. Lihtsustatud generaatorprotsessiga toodetud põlevkivi puhastamata kuumgaas sisaldab palju termiliselt mittepüsivaid komponente. Seega on põlevkivi kuumgaas oma omaduste poolest erinev teiste tahkete kütuste gaasistamissaadustest.

2. Põlevkivi kuumgaasi transportimine isegi väikestele kaugustele on gaasikanali sagedase ummistumise tõttu seotud tõsiste raskustega. Kuumgaasi põletamine on seetõttu praktiliselt mõeldav vaid kolde esimese astme vahetus läheduses.

3. Kuumgaasi keskmine temperatuur oli teostatud katsetel 730°C , gaasilise osa kütteväärtus 1040 kcal/nm^3 ning õliaurude ja tahma kütteväärtus 430 kcal/nm^3 . Kuumgaasiga põletisse antav üldine soojushulk oli keskmiselt 1800 kcal/nm^3 . Sellest moodustas keemiline soojus keskmiselt 81% ja füüsikaline soojus 19%.

4. Kuumgaasi keskmisele koostisele ja temperatuurile vastavad järgmised füüsikalised näitajad:

erikaal $\gamma = 0,39\text{ kg/m}^3$;

keskmine molekulaarne erisoojus $C_{pm} = 8,36\text{ kcal/Mol}^{\circ}\text{C}$;

dünaamiline viskoossus $\mu = 4,21 \cdot 10^{-6}\text{ kg sek/m}^2$ ja kinemaatiline viskoossus $\nu = 106 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{sek}$.

5. Suure ballastainete (N_2 , CO_2 , H_2O) sisalduse tõttu on põlevkivi kuumgaasi teoreetiline põlemistemperatuur suhteliselt madal. Teoreetiliselt vajaliku põlemisõhu hulga juures on kuumgaasi teoreetiline põlemistemperatuur põlemisõhu temperatuuri $25\text{--}400^{\circ}\text{C}$ ja kuumgaasi niiskusesisalduse $0\text{--}200\text{ g/nm}^3$ puhul $1750\text{--}1880^{\circ}\text{C}$ piirides.

6. Põlevkivi kuumgaasi keskmine süttimistemperatuur oli teostatud mõõtmiste järgi 570°C . Arvutuslikult leitud süttimise alumine piirkontsentratsioon oli keskmiselt 23,5% ja ülemine 84,5%, mis ülemise piirkontsentratsiooni osas vastab ligikaudselt tegelikele mõõtmistulemustele.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
21. XI 1955

KIRJANDUS

1. Н. Трун, Eesti NSV kohalikud kütused ja nende energeetiline kasutamine, RK „Teaduslik Kirjandus”, Tartu, 1947.
2. R. Uuesoo, Kihiprotsess tükkpõlevkivi kaheastmelisel põletamisel, „Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised” III kd., nr. 3, 1954.
3. М. Б. Готлиб, Пути увеличения производительности газогенераторов, работающих на челябинском угле, «За экономию топлива», № 4, 1951.
4. Г. Ф. Кнорре, Топочные процессы, Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1951.
5. А. Т. Кыль и И. И. Степанов, О составе газа промышленного полукоксования сланца-кукерита, «Известия АН ЭССР», Том III, № 3, 1954.
6. В. П. Линчевский, Топливо и его сжигание, Metallurgizdat, 1947.
7. К. Б. Маликов и Г. Н. Сунцов, Топливо для газогенераторов северо-западных районов СССР, «За экономию топлива», № 9, 1951.
8. Б. Г. Тидеман и Д. Б. Сциборский, Химия горения, изд. Наркомхоза РСФСР, 1940.

О СВОЙСТВАХ И ОСНОВАХ СЖИГАНИЯ ГОРЯЧЕГО СЛАНЦЕВОГО ГАЗА

Л. К. КЯЯРМА

Резюме

В Институте энергетики Академии наук Эстонской ССР в течении 1951—1953 годов производились систематические исследования процесса двухступенчатого сжигания кускового сланца. Подробно был изучен слобовой процесс в первой ступени топки, а также свойства горячего сланцевого газа и способы его сжигания во второй ступени топки с применением различного типа горелок.

Из результатов исследования свойств и физико-химических характеристик видно, что полученному при упрощенном генераторном процессе горячему сланцевому газу свойственно высокое содержание термически неустойчивых компонентов, вследствие чего горячий сланцевый газ существенным образом отличается от продуктов газификации других видов твердых топлив.

Средний состав сухого горячего сланцевого газа на основании 23 газовых анализов был следующий: $\text{CO} - 9,5 (6,5 \div 10,2) \%$; $\text{H}_2 - 2,7 (2,1 \div 4,5) \%$; $\text{C}_n\text{H}_{2n+2} - 2,8 (2,0 \div 5,0) \%$; $\text{C}_n\text{H}_m - 3,2 (2,5 \div 5,3) \%$; $\text{O}_2 - 0,5 (0,1 \div 1,0) \%$; $\text{CO}_2 - 13,6 (11,8 \div 14,9) \%$; $\text{N}_2 - 67,7 (66,2 \div 70,1) \%$. Следует отметить, что средняя температура горячего газа при проведенных опытах была 730° , теплотворность газовой части 1040 ккал/нм^3 и теплотворность смоляных паров и сажи 430 ккал/нм^3 . Общая теплота данной смеси равнялась в среднем 1800 ккал/нм^3 , в том числе ее теплотворность составляла в среднем 81% и физическое тепло 19% .

Физические характеристики среднего состава горячего сланцевого газа при вышеназванной температуре были следующие: удельный вес $\gamma = 0,39 \text{ кг/м}^3$, средняя молекулярная теплоемкость $C_{pm} = 8,36 \text{ ккал/моль}^\circ\text{C}$, динамическая вязкость $\mu = 4,21 \cdot 10^{-6} \text{ кг сек/м}^2$ и кинематическая вязкость $\nu = 106 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$.

Транспортирование горячего сланцевого газа даже на близкое расстояние связано с серьезными трудностями вследствие засорения газовых каналов. Сжигание горячего сланцевого газа практически может быть осуществлено только в непосредственной близости от первой ступени топки.

Теоретическая температура горения горячего сланцевого газа низка из-за высокого содержания балласта (N_2 , CO_2 и H_2O). При теоретически необходимом количестве воздуха теоретическая температура горения в зависимости от температуры воздуха от 25 до 400° и влагосодержания горячего газа от 0 до 200 г/нм^3 , равняется 1750 — 1880° .

Средняя температура воспламенения горячего сланцевого газа была на основании проведенных опытов 570° . Нижний предел воспламенения горячего газа, определенный расчетным путем, был в условиях самовоспламенения в среднем $23,5\%$ и верхний предел $84,5\%$, что приблизительно соответствует результатам опытов в части верхнего предела.

Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
21 XI 1955

ON THE PROPERTIES AND FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF THE COMBUSTION OF HOT SHALE GAS

L. KÄARMA

Summary

A systematic investigation of the process of a two-stage combustion of lump shale has been carried out at the Institute of Energetics of the Academy of Sciences of the Estonian SSR. The layer process of the first stage of combustion as well as the properties of hot shale gas and the methods of its combustion in the second stage of firing when using different types of burners were examined in a detailed way. The present article gives the results of the investigation of properties and initial data of hot unpurified shale gas combustion.

From the results of investigation, as well as from the physico-chemical characteristics, it follows, that hot shale gas, obtained through a simplified generator process, is characterised by high contents of thermically unstable components, which results in an essential difference between hot shale gas and the gasification products of other kinds of solid fuel.

The average composition of dry hot shale gas was — on ground of 23 gas analyses — the following: CO — 9.5(6.5 ÷ 10.2)%; H₂ — 2.7(2.1 ÷ 4.5)%; C_nH_{2n+2} — 2.8(2.0 ÷ 5.0)%; C_nH_m — 3.2(2.5 ÷ 5.3)%; O₂ — 0.5(0.1 ÷ 1.0)%; CO₂ — 13.6(11.8 ÷ 14.9)%; N₂ — 67.7(66.2 ÷ 70.1)%.

It is necessary to point out, that the average temperature of hot gas at these tests was 730°, the calorific power of gas constituent — 1040 Cal/nm³ and the calorific power of pitch gases and carbon black — 430 Cal/nm³. The general heat of the given mixture was in average equal to 1800 Cal/nm³ out of which its calorific power formed approximately 81% and its sensible heat — 19%.

The physical characteristics of average composition of hot shale gas at the above mentioned temperature were as follows: specific gravity $\gamma = 0.39$ kg/m³, average molecular capacity of heat $C_{pm} = 8.36$ Cal/Mol°C, dynamic viscosity $\mu = 4.21 \cdot 10^{-6}$ kg sec/m² and kinematic viscosity $\nu = 106 \cdot 10^{-6}$ m²/sec.

The transportation of hot shale gas even on short distances meets serious difficulties because of the choking of gas channels. The combustion of hot shale gas can be practically carried out only in direct vicinity of the first stage firing.

The theoretical burning temperature of hot shale gas is low, owing to high contents of ballast (N₂, CO₂ and H₂O). At the theoretically required quantity of air, the theoretical temperature of combustion, — being dependent on air temperature of 25 to 400° and on moisture contents of the hot gas of 0 to 200 g/nm³, — is equal to 1750—1880°.

The average temperature of inflammability of hot shale gas was — on ground of the carried out tests — 570°. The lower limit of inflammability of hot gas, determined by way of calculations, was in conditions of self inflammability in average 23.5% and the upper limit was 84.5%, which approximately corresponds with the results of the tests in the zone of the upper limit.

Academy of Sciences of the Estonian SSR,
Institute of Energetics

Received
Nov. 21, 1955