

PÕLEVKIVI RATSIONAALSE PÕLETAMISE PÕHIMÕTETEST

H. TRUU,

tehniliste teaduste doktor

Eesti NSV tähtsaim kütus — põlevkivi¹ — erineb teistest tahkekütustest sügava termolüüsi poolest põlemisele eelnevas kuumutusjärgus ja kütuse tahkeosa mahu säilimisega põlemisel. Nimetatud iseärasustele lisandub veel see, et põlevkivi anorgaaniline osa sisaldab rohkesti ehitussideaine komponente, mistõttu võime selle kütuse otstarbekal põletamisel saada kõrge temperatuuriga koldegaasi ja ehitussideaineliste omadustega tahkejääki — tuhka või kasutamiskõlblikku vedelräbu. Arvesse võttes seda, et mainitud oluliste iseärasuste tõttu ei kulge põlevkivi põlemine tavalistes küttekolletes rahuldavalt ning komplekselt ja kolded levitavad ümbruskonda palju suitsu, tuli välja töötada selle kütuse ratsionaalse põletamise põhimõtted ja põlevkivi iseärasustele vastav koldeprotsess.

Käesolevas artiklis esitatakse Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudis peamiselt 1950. ja 1951. aastal teostatud uurimiste tulemusi põlevkivi põletamise probleemi lahendamise alal².

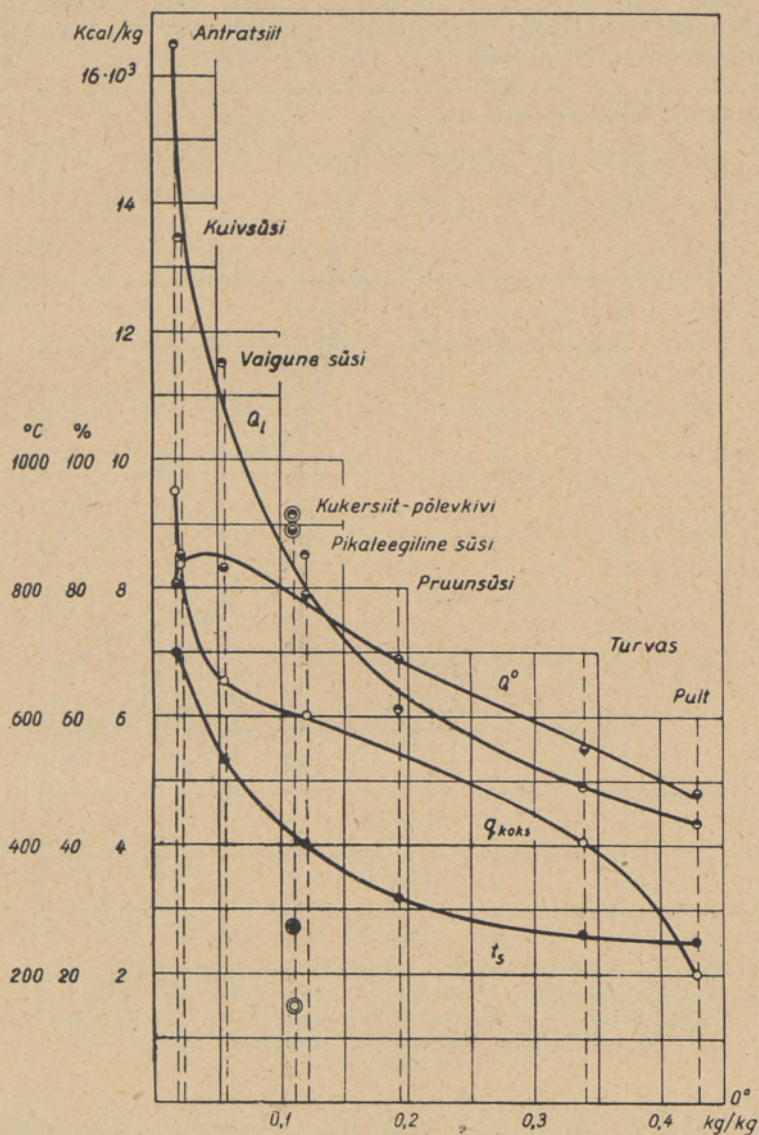
1. Põlevkivi spetsiifilistest iseärasustest ja tema ratsionaalsest põletamisest

Opetus põletamisest on teaduseharu, mille arengutase ei ole kaugeltki küllaldane praktiliste tuletehniliste probleemide lahendamiseks kõrgel teaduslik-tehnilisel tasemel kõikide kütuste kohta. See on tingitud tuleprobleemi mitmekülgisusest ja keerukusest. Tänapäeva teooria heterogeensest ja homogeensest põlemisest annab aluse koldeprotsessidesse puutuvate põhiküsimuste lahendamiseks tüüpiliste tahkekütuste — kivisüte — ja gaaskütuste puhul. Väga keerukas on ratsionaalse koldeprotsessi väljatöötamine tahkekütuste mitmesugustele eriliikidele, sest nimetatud kütused erinevad üksteisest tunduvalt struktuuri ja omaduste poolest, millest sõltub nii kütuse kasutamise suund kui ka põlemisprotsessi ilme. Joonisel 1 on esitatud koldeprotsessi suhtes olulise tähtsusega näitajad tüüpiliste tahkekütuste kohta: põlevosa ja lendainete põlemisväärtus, koksi suhteline kütteväärtus ja süttimistemperatuur. Nimetatud näitajad on toodud sõltuvalt hapnikusisaldusest kütuse orgaanilises osas, mis iseloomustab üht-

¹ Käesolevas artiklis käsitletakse Eesti NSV-s leiduvat põlevkivi, nn. kukersiiti.

² Töö teostati NSV Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeerivate liikmete M. A. Stõrikovitši ja L. N. Hitrini konsulteerimisel.

lasi põlevaine söestumisastet ja sellega ka kütuse vanust. Kõik neli näitajat on kõrge hapnikuvaese orgaanilise ainega kütustel — antratsiidil ja kivisütel — ning langevad pidevalt hapnikurohkete, tekkelt nooremate kütuste puhul. Hapnikuvaesed tahkekütused on kõrgeväärtuslikud ja hapni-

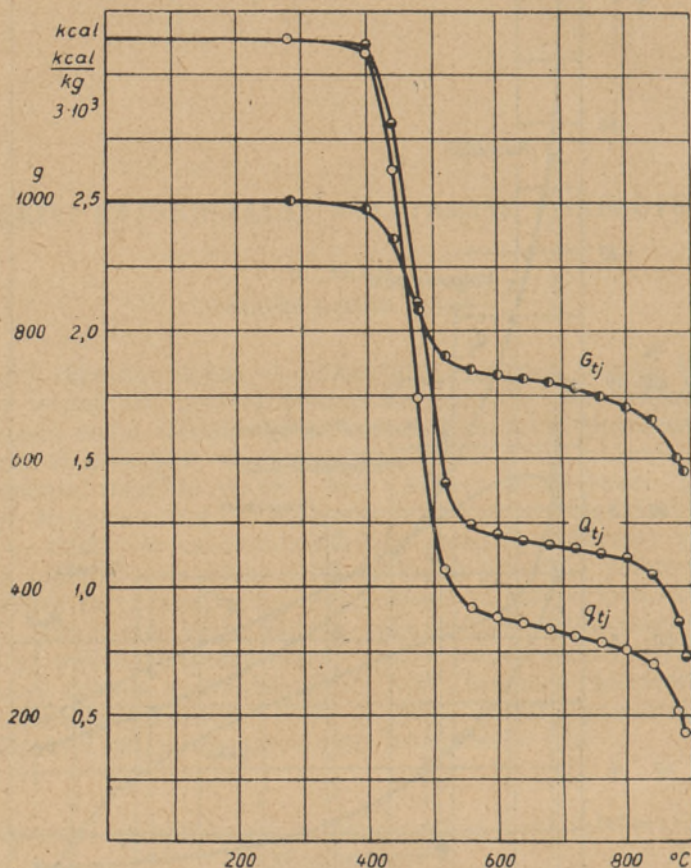


Joon. 1. Tahkekütuste orgaanilise aine ja lendainete põletamisväärtused Q^0 ja Q^1 , koksade suhtelised kütteväärtused q_{koks} , tarbimiskütuste süttimistemperatuurid t_s ja hapnikusisaldus O^0 kütuse orgaanilises aines.

kurikkad on madalaväärtuslikud kütused. Kuni Teise Maailmasõjani kasutati kõrgeväärtuslikke tahkekütuseid põhiliselt energeetilisteks otstarveteks, madalaväärtuslikke aga töötlemiseks ⁽⁸⁾.

Tahkekütuste energokeemilise komplekskasutamise võimalused tulenevad joonisel 1 kütuste kohta toodud põhilistest näitajatest. Määrava tähtsusega on siinjuures kütuse termilise muundamise saaduste omadused,

nende hulk ning muundumisprotsessi kineetilised näitajad. Oluline on see, kas kütuse termilisel muundamisel selle protsessi tahkejäägi (poolkoksi või koksi) kütteväärtus $Q_{tj} \approx Q^{\circ}$, $Q_{tj} > Q^{\circ}$ või $Q_{tj} < Q^{\circ}$, kusjuures Q_{tj} on tahkejäägi kütteväärtus ja Q° on kütuse orgaanilise aine kütteväärtus. Tuleb esile tõsta kõrgeväärtuslike kütuste seda omadust, et nende poolkoksisistamise tahkejäägi kütteväärtus on ligikaudu võrdne orgaanilise aine kütteväärtusega esialgses aines. Madalaväärtuslike kütuste energeeti-



Joon. 2. Põlevkivi termilise muundumise tahkejäägi kaal G_{tj} , kütteväärtus Q_{tj} ja suhteline kütteväärtus q_{tj} sõltuvalt muundumise temperatuurist (fraktsioon 1,4–2,1 mm, kuumen-
dus $4,7^{\circ}\text{C/min.}$, muundamine pöörlevas retordis
täitemahuga 0,4 kg).

lisel tahkejäägil on orgaanilisest osast tunduvalt kõrgem kütteväärtus, näiteks turba puhul 30–50% ja puidu puhul umbes 50% võrra. See omadus on lähtealuseks turba ja puidu kiirpõletamise põhimõtete rakendamisel just koksi põlemise järgus. Tahkekütuste praktilisel kasutamisel tuleb arvesse võtta ka kütuse ballastaineid — vett (niiskust) ja tuhka.

Põlevkivi orgaanilise aine omadused erinevad põhiliselt teiste tahkekütuste orgaanilise aine omadustest. Põlevkivi kuulub mõõduka hapniku-
sisaldusega kütuste liiki, tema orgaanilisel ainel on teiste tahkekütustega võrreldes madalaim koksi suhteline kütteväärtus (umbes 15%), madal süttimistemperatuur — ligikaudu 270° — ning vesiniku ja süsiniku suhte kõrge tase ($\frac{H^{\circ}-O^{\circ}/8}{C^{\circ}} = 10 \cdot 10^{-2}$), mis ületab kahekordselt kivisöe vastava

näitaja ning on oma väärtuselt lähedane masuudi omale (masuudil on vesiniku ja süsiniku suhe $13,35 \cdot 10^{-2}$).

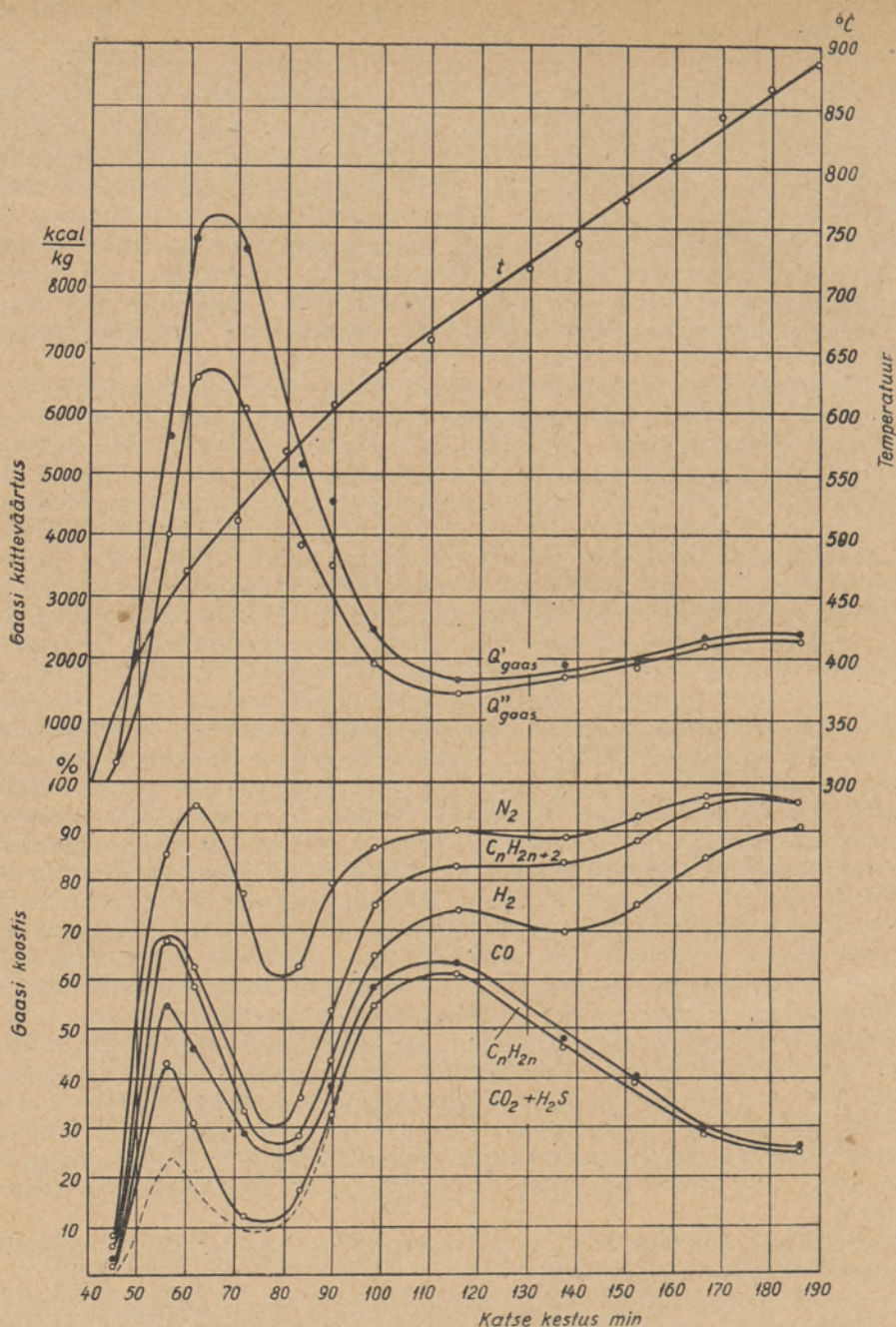
Põlevkivi energeetilist ja energokeemilist kasutamist mõjutab oluliselt selle kütuse suur tuhasisaldus, mille tõttu vaatamata orgaanilise aine kõrgele kütteväärtusele on tema tahkeaine kütteväärtus madal ($Q_k^t = 2600 - 3400$ kcal/kg). Selle tõttu on põlevkivil mõõdukas teoreetiline põlemistemperatuur ($t_a = 1 \approx 2000^\circ$), mille alandamine on vaevalt soovitatav soojusvahetuse nõutava intensiivsuse tõttu energeetelistes katelseadmetes. Et põlevkivi tahkejäägi kütteväärtus ning viimase põlemistemperatuur alanevad tunduvalt kütuse termilisel ettevalmistamisel ($Q_{ij} < Q_i$), siis kerkib esile põlevkivi rikastamise vajadus, kui tahame seda spetsiifiliste iseärasustega madalaväärtuslikku kütust kasutada kompleksel energokeemilisel viisil.

Tahkekütuse põlemisprotsessi struktuur sõltub põhiliselt tema põlevaine omadustest. Põlevkivi olulisemaks iseärasuseks on tema kütteväärtuse muutlikkus kuumenemisel ($Q_{ij} < Q_i$), kusjuures pärast lendainete lahustumist jääb järele suure poorsusega tahkejääk — koks, mille kütteväärtus on umbes $0,25 - 0,35 Q_i$ (joon. 2). Lendainete eraldumine kulgeb ülekaalukalt madalatel temperatuuridel — temperatuuril $300 - 500^\circ$ lahkeb ligikaudu 80% lendainete üldsisaldusest, mis moodustab umbes 70% selle kütuse üldisest orgaanilise aine sisaldusest. Umbes 80% lendainetest kondenseeruvad jahtumisel; lendainete eraldumise optimaalne temperatuur on ligikaudu 400° . Lendainete mittekontseeruva, gaasilise osa kütteväärtus ja koostis on toodud joonisel 3, millest näeme, et raskesüivesinike C_nH_{2n} ja C_nH_{2n+2} eraldumine kestab ligikaudu lendainete eraldumise ülemise piirini (temperatuurini 850°). Põlevkivi ratsionaalse põletamise põhimõtete kindlaksmääramisel tuleb arvestada lendainete rohkust selle kütuse põlevaines ja nende eraldumise kulgemist peaaesjalikult madala temperatuuri juures, võrdlemisi kitsas temperatuuride vahemikus; samuti tuleb arvestada osakeste suuremat muredust kütuse ladestumise suunas, mis kutsub esile lendainete väljavoolu osakeste sisemusest põhiliselt ainult külgpindade kaudu. Samuti on tähtis see, et temperatuuril kuni 500° peaaegu ei toimu põlemisõhu difundeerimist põlevkivitükikeste sisemusse ja protsess selles järgus seisab põhiliselt kütuse termilises ettevalmistamises. Lendainete eraldumine 500 kraadist kõrgemal temperatuuril toimub üheaegselt lendainete põlemisega poolkoksisunud põlevkiviosakese välispinnal ja sisemuses koos tahke süsiniku põlemisega. Seetõttu jaguneb põlevkivi põlemisprotsess kütuse termiliseks ettevalmistamiseks ja termilise muundumise saaduste järelpõlemiseks. Kujunemisel olev põlevkivi põlemise teooria käsitleb selle kütuse termilist muundumist ja muundumissaaduste põlemist määravaid füüsika ja keemia seadusi. Eespool nimetatule lisandub õpetus põlevkivi anorgaanilise osa termilisest muundamisest ehituslikuks sideaineks või vedelräbuks (^{6,7}).

Alljärgnevas analüüsimine põlevkivi energeetilise kasutamise põhimõtteid ja nende rakendamise võimalusi.

Põlevkivi on väärtusliku orgaanilise ja anorgaanilise koostisosaga maavara, mis kuulub kohalike kütuste hulka, kuid ratsionaalsel kompleksel kasutamisel muutub põlevkivi hinnaliseks kaugeveokütuseks. Näiteks juba anorgaanilise osa osalisel põletamisel (60%) romantsemendiks margiga kuni 300 kahekordistub põlevkivi väärtus võrreldes selle kütuse ühepoolse, s. o. ainult orgaanilise osa kasutamisega. Käesoleval ajal kasutatakse põlevkivi nii energeetilisteks kui tehnoloogilisteks otstarveteks, kusjuures tahke jääb leiab vahest rakendamist — koksi ei kasutata üldse ja poolkoksi kasutab Eesti NSV-s ainult üks põlevkivitöötlemise käitis.

Tahkekütuse ratsionaalse kasutamise meetodid sõltuvad nii rahvamajan-



Joon. 3. Põlevkivi lendainete gaasosa kütteväärtus ja koostis. Kõrgem kütteväärtuse näitaja on arvestatud kogemuslikult, madalam ЦКТИ valemiga.

duslikest vajadustest kui ka kütuse omadustest: kütteväärtusest, orgaanilise ja anorgaanilise osa koostisest, termilise muundumise iseloomust ja mineraloogilisest struktuurist. Põlevkivi on madala kütteväärtusega kütus ($Q'_k = 2600-3400$ kcal/kg), sisaldab palju vesinikku (9,2%) ja CaO-d (42,0%) ning on kõrge termilise muundumise astmega (85%); tema orgaa-

niline aine paikneb anorgaanilises keskkonnas hajutatult ⁽¹⁾. Põlevkivi oluliseks iseärasuseks võrreldes teiste tahkekütustega on tema suur tuhasisaldus, mille tõttu selle kütuse termilisel ettevalmistamisel saadud tahkejäägi põlemistemperatuur (ettesoojendamata õhu kasutamisel ligikaudu 900—1000°) on madal energeetiliste aurukatelde kütmiseks. Otstarbekohaseks osutub võtta uurimisele eelkõige põlevkivi kasutamise energeetiline variant, kusjuures kütuse kogu keemiline energia muudetakse põletamise teel soojuseks ja kütuse anorgaaniline osa muundatakse koldeprotsessis väärtuslikuks ehitussideaineks. Oluliseks eeltingimuseks siinjuures on ratsionaalne koldeprotsess, mille kohta püstitame alljärgnevad põhilised nõuded.

1. Kütuse orgaanilise ja anorgaanilise osa kompleksne kasutamine põlemisjärgude ratsionaalse järjestuse abil, mis kindlustab kütuse kiire läbi-kuumenemise, anorgaanilise osa küllalt kestva viibimise kõrgetel temperatuuridel ja tema kiire jahtumise ligikaudu 400°-se temperatuurini.

2. Kütuse ratsionaalne termiline ettevalmistamine ja ettevalmistuse saaduste täielik põletamine nii, et kindlustataks koldeprotsessi suur stabiilsus, intensiivsus, mehhaniseerimise kõrge aste ja automatiseerimise võimalus.

3. Koldeprotsessi termiline tase (ligikaudu 1050°) ja temperatuuri ühtlus (lubatav maksimaalne kõrvalekaldumine kuni 100°), millega välditakse anorgaaniliste osakeste paakumine ja saavutatakse nende ratsionaalne muundumine romantsemendi taoliseks ehituslikuks sideaineks.

4. Tuha maksimaalne sadestumine koldes ja kolde suure vastupidavusega konstruktsioon, mis kindlustab seadme pidevalt ühtlase töö ja normaalse tööoleku kestuse (vähemalt 2200 tundi).

5. Koldeprotsessi suur kasutegur, soojustehniline ja aerodünaamiline kokkusobivus soojust kasutava seadmega.

Põlevkivi orgaanilise ja anorgaanilise osa kompleksne kasutamine ja suure intensiivsusega koldeprotsessi väljaarendamine on võimalik tänu põlevkivi orgaanilise koostise tahkeosa kütteväärtuse muutumisele kiirpõlemise protsessi soodustavas suunas, mis ühtlasi vastab ka kütuse anorgaanilise osa muundamiseks vajaliku põlemistemperatuuri nõuetele ning kuumutamise kestusele. Koldeprotsessi on võimalik ratsionaalseks kujundada näiteks kütuse intensiivselt kulgeva termilise ettevalmistamisega 700—800°-lise või veelgi kõrgema temperatuurini ja sellele järgneva muundumissaaduste otstarbeka põletamisega. Nimetatud põhimõtte rakendamise eelduseks on kaheastmeline põletamismenetlus, mis omab suurt intensiivsust ja kõrget kasutegurit, kui on kindlustatud ratsionaalselt jaotatud põlemisõhu juurdevool minimaalses koguses ($\alpha = 1,2$). Põlemisprotsessi intensiivistamine peab aset leidma nii termilise ettevalmistamise järgus kui ka koksi põlemisjärgus. Temperatuuri piiramine tahkeräbu eraldamisega kolletes saavutatakse koldeseinte ulatusliku jahutamisega.

Lendtuha eraldumise efektiivsus küttekoldes on peeneteralise põlevkivi kasutamise puhul suurem kui põlevkivi tolmu põletamisel; lendtuha sadestumist mõjutab ka küttekolde kuju. Keeriskolletega võib saavutada küllaltki head lendtuha eraldumist (peeneteralise põlevkivi kasutamisel kuni 80%). Maksimaalset tuha eraldumist peaks võimaldama vedelräbu eraldamisega koldeprotsess, kuid sellä menetluse puhul vähenevad tuha ehitussideainelised omadused ja esineb suur soojuskadu, 5—6% või rohkemgi võrreldes põlevkivi põletamisega kuivtuha eraldamist võimaldavas koldes.

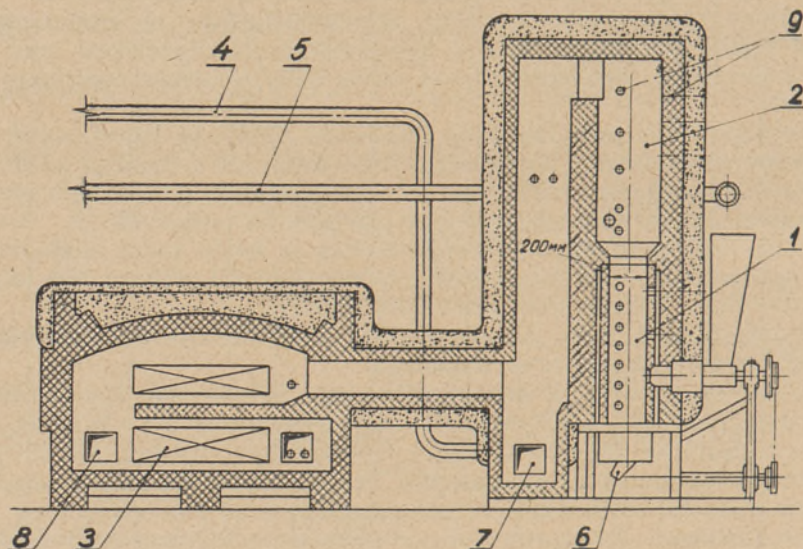
Põlevkivi põlemine tööstuslikes kolletes ei kulge rahuldavalt ei põlemise täiuslikkuse, kütuse anorgaanilise osa termilise muundumise ega seadmete jõudluse seisukohast. Kollete rekonstrueerimine kaheastmelisele põlemisprotsessile on põhiliseks lahenduseks vananenud ehitusviisiga küttekollete

töö parendamise alal ⁽⁶⁾. Kütuse termilise ettevalmistamise põhimõttele ja tolmu kontsentratsiooni ühtlustamisele põlemistsoonis tuleb rajada ka tolmpõlemise kollete töö ratsionaliseerimine.

Kolde vastupidavust ja tööea kestust on võimalik tõsta kolde kambrile voolujoonelise kuju andmisega ja seinte metalliga katmisega.

2. Põlevkivi põletamine keevkihiga katsekolde

Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudi poolt põlevkivi põletamise alal teostatud uurimistööde tulemuste põhjal tõestati põlevkivi termilise ettevalmistamise määrav tähtsus suure intensiivsusega koldeprotsessi kujundamisel tükkpõlevkivile vertikaalsete või kombineeritud tulejarkudega kaheastmelises generaatorkolde ⁽³⁾ ja peenpõlevkivile labora-



Joon. 4. Kevvkihiga laboratoorse katsekolde skeem: 1 — keevkihiga gaasigeneraator — kolde esimene aste; 2 — kamber gaasi ja lendkoksi põletamiseks — kolde teine aste; 3 — gaasijahuti-veesoojendaja; 4 — primaarõhu torustik; 5 — sekundaarõhu torustik; 6 — tuha väljavõtmise koht; 7 — lendtuhk I väljavõtmise koht; 8 — lendtuhk II väljavõtmise koht; 9 — mõõteavad.

toorses keevkihiga kaheastmelises kolde ⁽⁷⁾. Kaheastmelisi väikekoldeid on kasutamisel juba mitmes Eesti NSV käitises ja neis põletatakse ligikaudu 40 000 tonni tükkpõlevkivi aastas. Kaheastmeline keevkihiga katlakolle on juurutamiseks ettevalmistamisel. Et nimetatud tuleseade on üheks näiteks põlevkivi komplekssest energotehnoloogilisest kasutamisest (energeetiline variant põlevkivi anorgaanilise osa muundamisega ehituslikuks sideaineks) ja arvestades selle variandi tähtsust võimsate suurkollete ning ka väiksemate ratsionaalsete põlevkivikollete väljaarendamises, esitame uurimistöö olulisemaid tulemusi selle koldeprotsessi alalt.

Kaheastmeline keevkihiga küttekolle on suure põlemisintensiivsusega tuleseade, mille tööprotsess tuharikaste kütuste kasutamisel vastab nii põlevkivi kompleksse («jäägita») kasutamise kui ka katelseadme teenindamise nõuetele. Selles seadmes kasutatakse peeneteralist (läbimõõduga kuni 6 mm) naturaalkütust ja kolle omab suurt tuhaeraldamise võimet (kuni

80%). Protsess kolde esimeses astmes on hulgijärguline, kusjuures nii põlemisprotsess kui ka lendainete eraldumine toimuvad suure intensiivsusega reaktsioonitsoonis üheaegselt. Hästi on kujundatud anorgaanilise osa muundumine kõrgeväärtuslikuks ehitussideaineks kolde teises astmes toimuvast järelpõlemise protsessis. Ühtlasi on koldeprotsessi teist astet võimalik kujundada vedelräbu eraldamiseks.

Uurimistöö katselise osa teostamiseks kasutati katsekollet ligikaudse jõudlusega 125 000 kcal tunnis, mis koosnes kahest vertikaalselt paigutatud silindrilisest kambrist — kolde esimesest ja teisest astmest — ning abiseadmetest (joon. 4). Katseseadmel olid mõõteavad protsessi temperatuuri mõõtmiseks, tõmmete mõõtmiseks, gaasi ja tahke aine proovide võtmiseks ning vaateavad kolde töö jälgimiseks. Seadme konstruktiivsetest näitajatest tuleks nimetada seda, et resti elavpinna suurus oli umbes 1% resti peegelpinnast.

Kütusena kasutati põlevkivi, mille tera läbimõõt oli kuni 5 mm, kütteväärtus 2560—3100 kcal/kg, niiskus 4,8—16,4% ja kütuse osakeste eripind keskmiselt 30,5 m²/kg. Kasutati ka desintegraatoriga purustatud põlevkivi, mille osakeste eripind oli 46,9 m²/kg.

Sissekütmisel kuumutati kolde seinad puitklotside tulega 650—700°-ni kolde esimeses astmes ja 850—900°-ni kolde teises astmes. Keevkiht tõseti 30—40 minuti vältel tema normaalsele kõrgusele ($h_k = 400\text{—}500$ mm). Gaasistamisprotsess kolde esimeses astmes kulges rahuldavalt 500°-lisel ja kõrgemal temperatuuril. Katsetel oli liigõhutegur $\alpha_1 = 0,35\text{—}1,0$, filtratsiooni kiirus generaatori ristlõikes $w_0 = 0,25\text{—}0,85$ m/sek., gaaside kiirus küttekihis $w = 1,6\text{—}7,0$ m/sek. ja õhu kiirus resti elavpinnas 35—90 m/sek. piirides. Liigõhutegurit α_1 on soovitatav arvestada kahestmelise koldeprotsessi puhul valemi järgi $\alpha_1 = \frac{L_1}{L_0}$, kusjuures L_1 on kolde esimesse astmesse antav õhukogus ja L_0 — põlemiseks vajalik teoreetiline õhukogus.

Uurimistöö teostamisel ja tulemuste hindamisel arvestati keevkihiga koldeprotsessi samaväärsuse näitajaid α_1 , h_k , δ , Q'_k ja t_δ , kusjuures α_1 on kolde esimese astme liigõhutegur, h_k — keevkihi kõrgus mm, δ — kütuse tera läbimõõt mm, Q'_k — kütuse kütteväärtus kcal/kg ja t_δ — põlemisõhu temperatuur kraadides.

Uurimistöö teostamise meetodi kindlaksmääramiseks toimus keevkihiga koldeprotsessi orienteeruv analüüsimine põlevkiviküttel ja sõltuvuste leidmine protsessi parameetrite vahel. Käsitlemisele kuulusid järgmised suurusd (sulgudes parameetrid, milledest suurus sõltub):

kütuse gaasistamise temperatuur kolde esimeses astmes $t_I (\alpha_1, t_{\delta-I}, w_0, h_k)$; keevkihi hüdrauliline takistus $\Delta p (\gamma_n, h_k, s, \varphi)$; keevkihi kõrgus $h_k (\gamma_n, d, w_0, s, \varphi)$; kütuseosakeste ringimise kordsus keevkihis $n (\alpha_1, w, s, \varphi)$; gaasi kütteväärtus $Q_g (t_1)$; CaCO₃ lagunemise aste keevkihis $X'_{CO_2} (t_{\delta-I}, s, \varphi, \tau)$; kütuseosakeste keevkihis viibimise aeg $\tau (\alpha_1, w_0, d_{küt})$; lendkoksi hulk $G_{lk} (w_0, h_k, d_{küt}, s, \varphi, G_{küt})$ ja tulegaasi temperatuur kolde teises astmes $t_{II} (\alpha, Q_t, t_{\delta-I}, t_{\delta-II})$.

Siin kasutatud tähistel on järgmine tähendus:

$t_{\delta-I}$ — primaarõhu temperatuur °C,

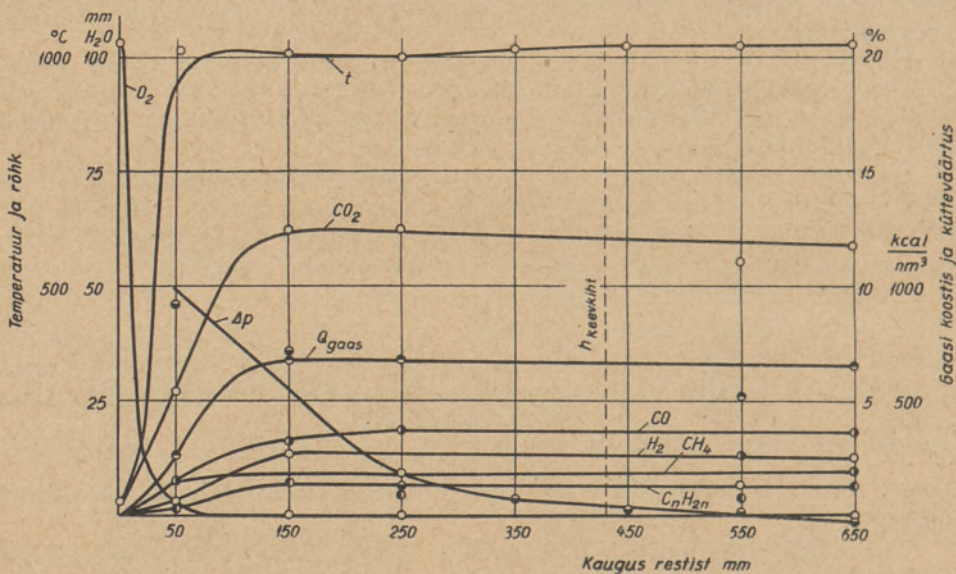
$t_{\delta-II}$ — sekundaarõhu temperatuur °C,

γ_n — keevkihi kütusesegu näiline erikaal kg/dm³,

s — kütuseosakese väline eripind m²/kg.

φ — kütuseosakese kujutegur,
 d — resti elavpinna ava läbimõõt m,
 w_0 — gaaside kiirus keevkihis m/sek.,
 $d_{küt}$ — kütuseosakese läbimõõt cm,
 $G_{küt}$ — koldeprotsessi kütuslik erikoormus kg/tunnis,
 α — koldeprotsessi liigõhutegur ja
 Q_t — tarbimiskütuse kütteväärtus kcal/kg.

Uurimistöö tulemused näitasid, et põlevkivi termilise ettevalmistamise protsess keevkihiga reaktoris teostub põhiliselt põlemistsoonis, kus kulgevad keemilised reaktsioonid, millega kaasub protsessi füüsikaliste parameetrite muutumine — põhiliselt temperatuuri tõus (joon. 5). Nimetatud



Joon. 5. Põlevkivi gaasistamise protsessi iseloomustusi keevkihiga laboratoorses katsekoldes.

reaktsioonitsoonile järgneva tsooni olulisem tähtsus seisab keevkihi aerodünaamilise toime reguleerimises. Protsessi termilist taset keevkihiga põlevkivigeneraatoris näeme joonisel 6. Keevkihi efektiivsus põlevkivi põletamisel tuleneb siinjuures tuleprotsessile määrava tähtsusega järkude — lendainete eraldamise ja kooksi põlemise — üheaegsest kulgemisest koldeprotsessi kõrge intensiivsusega põlemistsoonis. Protsessi temperatuuri t_1 võime ligikaudselt määrata põlemisel tekkiva soojuse hulga järgi, arvates maha soojuse kaod. Selle põhjal

$$t_1 = \frac{q_k + q_l + q_f - q_{kaod}}{c_p V_1 + c B_1} \text{ } ^\circ\text{C},$$

kusjuures:

q_k — kooksi põlemisest tekkiv soojus kcal/kg,

q_l — lendainete põlemisest tekkiv soojus kcal/kg,

q_f — põlemisõhu ja kütuse füüsikaline soojus kcal/kg,

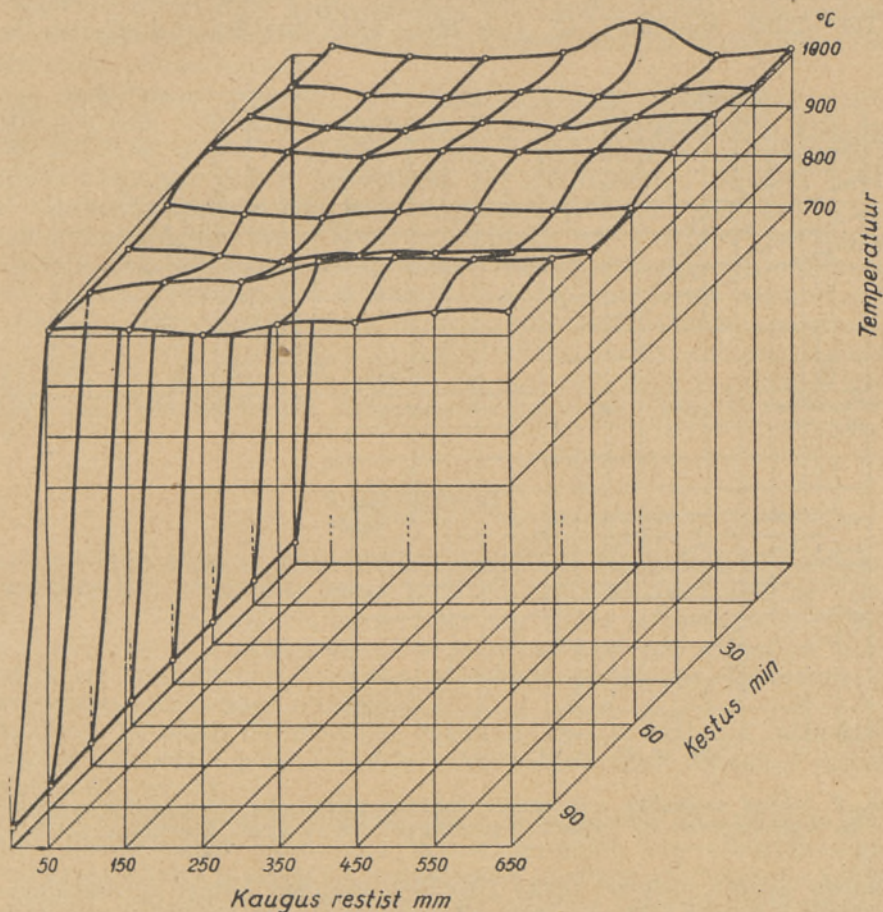
q_{kaod} — soojuskaod kcal/kg,

$c_p V_1$ — kolde esimeses astmes tekkivate gaassaaduste soojusesisaldus kcal/°C kg ja

cB_1 — kolde esimeses astmes tekkivate tahkesaaduste soojusesisaldus kcal/°C kg.

Põlemissoojuse arvutamisel lähtuti põlemisõhus olevast hapnikuhulgast ja süsiniku põlemist arvestati kui reaktsiooni $C + O_2 = CO_2$. Koksi põlemisõhu jääk läheb lendainete põlemiseks, mis toimub tõenäoliselt ebatäieliku põlemisena, ebatäielikkuse teguriga ligikaudselt 0,5.

Uurimistöö tulemusel selgus, et keevkihiga koldeprotsessi efektiivsus sõltub põhiliselt põlemisõhu filtratsioonikiirusest w_0 , kusjuures viimase alu-

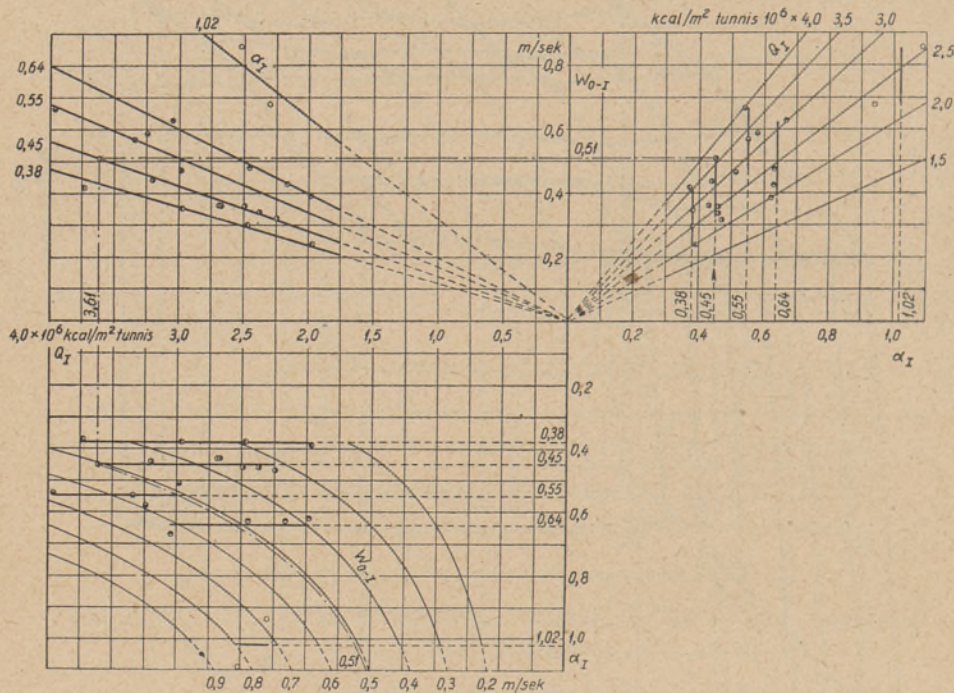


Joon. 6. Temperatuur põlevkivi gaasistamisel keevkihiga generaatoris.

mine ja ülemine piir on tingitud kihiprotsessi aerodünaamilistest teguritest — kihi üleminekust «keemisele» ja «keemise» üleminekust aerofontaneerimisele — ning kütuse granulomeetrilisest koostisest ja aine näilisest erikaalust. Proportsionaalselt filtratsioonikiiruse suurenemisega tõusis kolde efektiivsus (joon. 7). Oluline on siinjuures ka see, et keevkihi konstantsel filtratsioonikiirusel, kuid liigõhuteguriga α_1 langemisel tõuseb kaheastmelise koldeprotsessi jõudlus pöördvõrdeliselt liigõhuteguriga α , mis on kaheastmelise koldeprotsessi efektiivsuse oluliseks näitajaks. Uurimistöös teostatud katsetel oli α_1 madalaimaks väärtuseks 0,35 ja kõrgeimaks 1,0.

Võttes kokku käesoleva esimese, kaugeltki mitte kõiki näitajaid ammen-dava uurimistöö tulemusi peeneteralise põlevkivi põletamise alal labora-

toores katseseadmes, võib öelda, et keevkihiga koldeprotsess on suure põlemisintensiivsusega ja väikeste soojuskadudega. Põlevkivi põlemine oli täielik ning ümbruskonda saastva suitsuta. Katsetel saavutatud resti peegelpinna näiline erikoormus — $4,5 \cdot 10^6$ kcal/m² tunnis ei ole kaugeltki selle näitaja ülemine piir; resti peegelpinna minimaalne koormus oli 40% eespool nimetatud koormusest. Põlevkivi anorgaaniline osa muundus kirjeldatud koldeprotsessis kõrgeväärtuslikuks ehituslikuks sideaineks — roman-tsemendiks ⁽⁶⁾. Nimetatud tuleprotsessi varieeriti katsete teostamisel suurtes piirides, näiteks $\alpha_1 = 0,35-1,00$, $t_1 = 600-1000^\circ$, $Q_{gaas} = 700-2200$ kcal/nm³, $Q_{koks} = 600-1400$ kcal/kg, kusjuures kolde



Joon. 7. Näilise soojusliku erikoormuse sõltuvus põlemisõhu filtratsioonikiirusest w_0 ja liigõhutegurist α_1 põlevkivi põletamisel laboratoorses keevkihiga koldes.

esimeses astmes sadenes tuhka 25—75% ulatuses kütuse tuhasisaldusest. Soojuskaod koldes olid minimaalsed: keemilise ja mehaanilise kao summa $q_3 + q_4$ oli väiksem kui 1%. Karbonaatide lagunemiseks kulutati ligikaudu 3,5% põlevkivi kütteväärtusest.

Uurimistöö tulemusena mitte üksnes kujundati ratsionaalne meetod põlevkivi «jäägituks» põletamiseks, vaid anti ka määrava tähtsusega põhimõtted ja olulised parameetrid selle spetsiifiliste iseärasustega kohaliku kütuse põlemisprotsessi kohta üldse. Nii näiteks kütuse termilise ettevalmistuse järgu ja põlemistsooni otstarbeka liitmisega saavutati kütuse orgaanilise osa täielik põlemine, koldeprotsessi suur intensiivsus, kõrge kasutegur ning efektiivne tuha eraldamine koldes. Arvestades selle kaheastmelise koldeprotsessi efektiivsuse lihtsat sõltuvust liigõhutegurist α_1 ja küttekihi filtratsioonikiirusest w_0 ning koldeprotsessi termilise taseme hõlpsat reguleeritavust, lahendas Energeetika Instituudi aspirant E. K ü n n a p protsessi automaatse juhtimise küsimused ⁽⁴⁾.

Ülalnimetatud uurimistöö tulemused omavad suurt praktilist tähtsust, sest keevkihiga koldeprotsess on väga efektiivne ja ökonoomne ning kaheastmelisi keevkihiga põlevkivi-küttekoldeid võib rakendada mitmesuguse suurusega katelseadmetes. Ettevalmistamisel on ka katsekolde ehitamine aurukatlale jõudlusega 12 tonni auru tunnis. Selle töö tulemused peavad kujunema aluseks kaheastmeliste keevkihiga põlevkivikollete juurutamiseks rahvamajandusse. Katsekolde esimene aste kujutab keevkihiga gaasigeneraatorit ja teine aste eritüüpi keeriskollet. Katsetöodes kavatsetakse koos optimaalsete töörežiimide kindlaksmääramisega automatiseerida koldeprotsess. Põlevkivi põletamisel kaheastmelises keevkihiga koldes võib romantsemendi taolise ehitusliku sideaine (mark «250») toodang tõusta ligikaudu 25 protsendile kütuse kaalust.

Peab mainima, et põlevkivi põletamise probleemi lahendamisel ei ole võimalik piirduda selle kütuse põletamisega ainult energeetilistes seadmetes, vaid tuleb arvestada ka põlevkivi energotehnoloogiliste tahkejääkide ja põlevkivi rikastamise jääkide kasutamist. Sel alal teostatud esialgse uurimistöö tulemused näitasid küll, et koldegaasi temperatuur põlevkivi termilise töötlemise tahkejääkide — koksi ja poolkoksi — põletamisel on madal (kuni 1000°), mis ei rahulda suure intensiivsusega energeetiliste seadmete nõudeid (2), kuid eelnimetatud tahkejääkide põletamine omab siiski suurt teaduslikku ja rahvamajanduslikku tähtsust, sest tahkejääkide anorgaaniline osa muundatakse koldeprotsessi toimel väärtuslikuks ehitussideaineks (mark «300» ja veelgi rohkem). Heitsoojus aga võib leida kasutamist tehnoloogilisteks otstarveteks või jääksoojuse katelde kütmiseks.

3. Järeldused

Peab nentima seda, et geoloogiliselt vanima ja omadustelt tüüpilisema kukersiit-põlevkivi põletamise kohta kehtivad tingimused on olulises osas maksvad ka teiste põlevkivide suhtes. Arvesse võttes mitmesuguste põlevkivide orgaanilise ja anorgaanilise aine koostises esinevaid erinevusi, peavad siiski eri leiukohtades toodetud põlevkivide kütusena kasutamisele eelnema vastavad erialased uurimised.

Käesoleva ja teiste uurimistööde tulemusel välja töötatud põlevkivi ratsionaalse põletamise põhimõtteid ja nende rakendamise võimalusi võime kokku võtta järgmiselt.

1. Tükk- ja peeneteralise põlevkivi kihis põletamiseks on ratsionaalne kasutada kaheastmelist põletamist kütuse termilise ettevalmistamisega kolde esimeses astmes ja termilise muundamise saaduste põletamisega kolde teises astmes, kusjuures koldeprotsess peab kulgema pidevalt, mehhaniseeritult ja peab optimaalselt võimaldama kütuse anorgaanilise osa termilist muundumist ehitussideaineks ning lubiväetiseks.

2. Põlevkivi kihispõletamise kollete rekonstrueerimisi on ratsionaalne teostada koldeprotsessi kaheastmeliseks muutmisega, mis kindlustab kütuse täieliku läbipõlemise stabiilses, suure intensiivsusega ning hästi reguleeritavas koldeprotsessis. Sel viisil rekonstrueeritud kolded on vastupidavad ja ökonoomsed.

3. Edaspidiste uurimistega tuleb välja arendada põlevkivi põlemise teooria, kompleksed koldeprotsessid tuleseadmete kõikidele suurusjärkudele ja ratsionaalsed, ökonoomsed ning vastupidavad küttekollete konstruksioonid, pöörates erilist tähelepanu keevkihiga kaheastmelise ja teiste koldeprotsesside uurimisele tööstuslikel katseseadmetel.

1. H. Truu, Põlevkivi-kukersiidi olemusest ja omadustest, ENSV TA Toimetised, III kd., nr. 3, 1954.
2. H. Truu, H. Märtson, R. Uuesoo ja E. Jürisma, Põlevkivi-kukersiidi koksi ja poolkoksi põletamise uurimine laboratoorses keevkihiga koldes. ENSV TA Energeetika Instituudi aruanded 1953. ja 1954. aastast.
3. R. Uuesoo, Kihiprotsess tükkpõlevkivi kaheastmelisel põletamisel, ENSV TA Toimetised, III kd., nr. 3, 1954.
4. Э. Ю. Кюннп, Автоматическое регулирование горения сланца в топках паровых котлов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Таллин, Институт энергетики АН ЭССР, 1955.
5. А. С. Предводителей, К итогам научно-технической сессии по вопросам теории горения топлива, Известия АН СССР, ОТН, № 5, 1953, стр. 746.
6. Х. К. Труу, Неорганические отходы при сжигании сланца. В сборнике «Сланцевые материалы в строительстве» Института строительства и строительных материалов АН ЭССР, Таллин, 1955.
7. Х. К. Труу, Теория и практика сжигания горючего сланца. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва, ЭНИН АН СССР, 1951.
8. Н. В. Шишаков, Основы производства горючих газов, М.—Л., Госэнергоиздат, 1948, стр. 10.

О ПРИНЦИПАХ РАЦИОНАЛЬНОГО СЖИГАНИЯ СЛАНЦА

Х. К. ТРУУ,

доктор технических наук

Резюме

Автором на основе итогов работы Института энергетики, главным образом за 1950—1951 гг., рассматриваются основные свойства важнейшего энергетического и технологического топлива Эстонской ССР — сланца, особенности его комплексного энерготехнологического использования, принципы рационального сжигания, результаты опытов по сжиганию мелкозернистого сланца в лабораторной топке с кипящим слоем, а также основы новой техники сжигания сланца в промышленных установках, реконструкции существующих топок и представляются рекомендации по проведению дальнейших исследований в этой области науки и техники. В проведении указанной работы консультативную помощь оказали члены-корреспонденты АН СССР М. А. Стырикович и Л. Н. Хитрин.

Сопоставляя основные характеристики — теплотворность горючего вещества сланца, теплотворность летучих веществ и относительную теплотворность кокса органического вещества типовых твердых топлив: антрацита, каменных углей (тощего, битуминозного, длиннопламенного), бурых углей, торфа и древесины — в зависимости от содержания кислорода, мы наблюдаем убывание величины указанных показателей с повышением содержания кислорода в органическом веществе топлив (фиг. 1). Из результатов анализа приведенных выше характеристик вытекает, что теплотворность органического вещества у топлива с минимальным содержанием кислорода (у антрацита) приблизительно равна теплотворности коксового остатка ($Q^{\circ} = Q_{\text{кокс}}$ ккал/кг) и значительно повышается с увеличением O в органическом составе топлива. Например, для торфа $Q_{\text{кокс}} = 1,3—1,5 Q^{\circ}$ ккал/кг и для древесины $Q_{\text{кокс}} = 1,5 Q^{\circ}$ ккал/кг. Это имеет очень важное значение как с точки зрения выбора рациональной схемы использования данного вида топлива, так и с точки зрения разработки технологии процессов комплексного энерготехнологического использования или высокоинтенсивных способов сжигания твердых топлив.

По содержанию кислорода в органическом составе сланец может быть приравнен к длиннопламенным углям. Однако основные характеристики сланца резко отличаются не только от характеристик упомянутых углей, но и всех других видов твердого топлива. В особенности следует отметить крайне низкую относительную теплотворность кокса сланца (приблизительно 15%) и низкую теплотворность $Q_{\text{кокс}} = 0,25 Q^{\circ}$ ккал/кг. Эту особенность сланца следует учесть при разработке способов энергохимического использования его и сжигания, причем необходимо иметь в виду соблюдение оптимальных условий преобразования неорганической части сланца в строительное вяжущее, в сырье для производства шлаковой ваты и т. д.

Будущая теория горения сланца должна слагаться из основных положений учения о термическом преобразовании этого твердого топлива и тех физико-химических законов, которые определяют сжигание продуктов термического преобразования с учетом соблюдения оптимальных условий преобразования неорганической части топлива в строительное вяжущее или другие продукты. Основным в принципах рационального сжигания сланца является эффективное проведение термической подготовки топлива с последующим высокоинтенсивным дожиганием полученных продуктов при условии хорошо усредненного термического режима. Автор статьи доказал это на примере сжигания мелкозернистого сланца в двухступенчатой лабораторной опытной топке с кипящим слоем.

Эффективность двухступенчатой топки нашла практическое подтверждение в области слоевого сжигания кускового и мелкозернистого сланца. Этот принцип является основой для реконструкции значительного числа неудовлетворительно работающих топок на сланце и может быть положен в основу разработки рациональной горелки для сжигания сланцевой пыли.

В дальнейшем предстоит завершить разработку теории горения сланца, рациональной конструкции топочных устройств малой, средней и большой мощности, а также установок комплексного энерготехнологического использования сланца.

*Институт энергетики Академии
наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
22 VI 1955