

PÕLEVKIVI KOKSILISTE JÄÄKIDE PÕLETAMISEST

R. UUESOO

Põlevkivi termilisel töötlemisel õli- ja gaasitootmise seadmetes tekib hulgaliselt tuharikast jääki — koksi ja poolkoksi. Oma madala kütteväärtuse tõttu ei ole koksilised jäägid seni leidnud energeetilist kasutamist. Ehitusliku sideaine valmistamine põlevkivituhast on arenenud selleni, et ka põlevkivi koksilised jäägid on omandanud tehnoloogilise tooraine tähenduse. Uuritakse võimalusi, kuidas nendest jääkidest põletamise teel toota ehituslikku sideainet.

Selle küsimuse lahendamine omab suurt rahvamajanduslikku tähtsust, sest kiiresti arenevas põlevkivitööstuses tekib rohkesti koksilisi jääke. Põlevkivi koks ja poolkoks moodustavad kamberahjude ja utmisseedmete soojusbilansis olulise orgaanilise aine kao, keskmiselt 12 kuni 15% ⁽¹⁾. Põlevkiviõli tootmisel tunnelahjudes tekkiv poolkoks sisaldab kuni 10% põlevainet, mille tõttu poolkoksi kütteväärtus on kuni 900 kcal/kg. Põlevkivi gaasistamisel kamberahjudes tekkiv koks sisaldab põlevainet 13 kuni 18% ja selle kütteväärtus on keskmiselt 1000 kuni 1500 kcal/kg. Tehnoloogilise režiimi muutmisega põlevkivi töötlemise seadmetes on kohati suudetud vähendada põlevainesisaldust koksilistes jääkides, kuid selle küsimuse lahendus ei ole kaugelki täielik.

Põlevkivi termilise töötlemise koksiliste jääkide kasutamise küsimuse lahendamine on vajalik ka põlevkivi kompleksse energo-tehnoloogilise kasutamise meetodi väljatöötamise seisukohalt. Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudis teostatakse alates 1953. aastast tehniliste teaduste doktori H. Truu juhendamisel põlevkivi koksi ja poolkoksi põlemisprotsessi uurimist laboratoorses keevkiihikoldes. Käesolevas artiklis esitatakse põlevkivi kamberahju koksi põlemisprotsessi uurimise tulemusi, mis on saadud selle katseseadmega 1954. aastal.

Põlevkivi koksilised jäägid kütusena

Eesti põlevkivi kui termilise töötlemise lähteaine on madala kütteväärtusega (2600 kuni 3400 kcal/kg) ja tuharikas (49 kuni 62%) kohalik kütus. Tema termilise töötlemise koksiliste jääkide kütteväärtus on tunduvalt madalam ja tuhasisaldus kõrgem kui lähteainel. Olenevalt termilise töötlemise režiimist on põlevkivi koksi ja poolkoksi kuivaine kütteväärtus 800

kuni 1500 kcal/kg ja tuhasisaldus rohkem kui 80%. Viimastel aastatel on uuritud põlevkivi laboratoorsete koksides põlevaine elementaarkoostise olenevust termilise töötlemise režiimist (7). On selgunud, et koksistamise temperatuuri tõusuga väheneb koxis oluliselt vesinikusisaldus ning suureneb süsiniku osatähtsus. Kui põlevkivi enese orgaanilises aines on süsinikusisaldus 76,5 kuni 77,8% ja vesinikusisaldus 9,1 kuni 9,82%, siis sisaldab 900-kraadisel temperatuuril tekkiva koxi orgaaniline osa süsinikku 91,2 kuni 92,9% ja vesinikku 1,7 kuni 1,1%. See näitab vähest lendainetesialdust põlevkivi koxsilistes jääkides. Erilise omadusena tuleb märkida põlevkivi koxi ja poolkoxi väga kõrget karbonaatse CO₂ sisaldust, nimelt 14 kuni 24%, mis avaldab otsest mõju põlemisprotsessile, alandades põlemistemperatuuri ja suurendades süsihappegaasi-sisaldust põlemissaadustes. Nagu põlevkivi põletamisel, nii tuleb ka tema koxsiliste jääkide põletamisel arvestada tuha sulamist temperatuuridel ligikaudu 1150° C.

Põlevkivi koxsiliste jääkide võrdlemisel teiste tahkete kütuste koxistamise saadustega ilmneb suur erinevus. Puidu, turba, pruunsöe, lendainerikkama kivisöe ja mõnede teiste tahkete kütuste koxistamisel saadakse algkütusest kvaliteetsem tahke jääk, mistõttu koxistamine kujuneb nende kütuste „termiliseks vääristamiseks”. Mainitud kütuste koxide kütteväärtus on 6400 kuni 7300 kcal/kg piirides. Kivisöekoxi tuhasisaldus on keskmiselt 8 kuni 12%, turbakoxil 4 kuni 9% ja puidusöel 1 kuni 3%. Sellest nähtub, et põlevkivi termilisel töötlemisel saadud poolkox ja kox ei olegi „kox” tema tavalises mõttes, vaid need on ainult madalaväärtuselised koxsilised jäägid.

Põlevkivi koxsiliste jääkide võrdlus teiste madalaväärtuseliste ja tuharikaste kütustega, nagu Volga-äärsete, Djalinski jt. põlevkividega, mille keskmine kütteväärtus on madalam kui 1500 kcal/kg, näitab, et nimetatud sapropeelkütuste lendainesialdus on suur. Karbonaatidesialdus nende kütuste mineraalosas on tunduvalt väiksem kui Eesti NSV-s leiduva põlevkivi koxsilistes jääkides.

Eespool toodust nähtub, et eesti põlevkivi koxsilised jäägid on eriline, madala kütteväärtusega, lendainevaene, tuharikas kütuse liik, mille põhiliseks iseärasuseks on suur karbonaatidesialdus. Seda tuleb arvestada nii põletamise menetluse valikul kui ka põlemisprotsessi soojustehniliste arvutuste teostamisel.

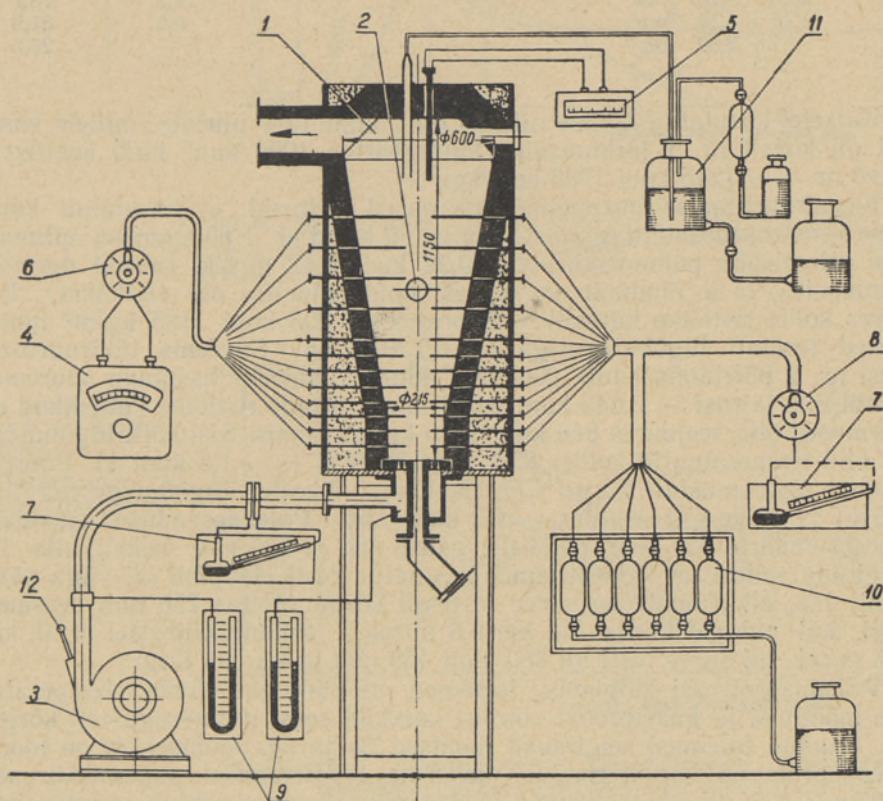
Põlevkivi koxsiliste jääkide põlemisprotsess keevkihikoldes

Madalaväärtuseliste tuharikaste kütuste põletamisel on end õigustanud nn. „keevkihiga” koldeprotsess. Selle koldeprotsessi eeliseks on intensiivne ja ühtlane põlemine, mis saavutatakse kütuse eelsoojendamise ja süttimistemperatuurini. See võimaldab kõrget kütuslikku erikoormust kolde ristlõike kohta. Kütuse kihi „keemine” restil saavutatakse õhu intensiivse puhumisega läbi peeneteralise (tükisuurusega keskmiselt kuni 8 mm) kütuse kihid: kütuse osakesed on pidevas liikumises ning nende kiht on tavalisest kütuse kihist poorem. Kuna gaaside kiirus kütuse kihis ületab gaaside kiiruse kolde kihipealses osas, siis langevad kütuse kihist eraldunud osakesed tagasi kihti; toimub kütuse osakeste tsirkuleerimine ning selle tulemusel põlemisprotsessi intensiivistumine.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudis uuris 1953. aastal H. Märtsen põlevkivi koxi ja poolkoxi põlemisprotsessi laboratoorses keevkihikoldes (5), tõestas selle põletamismenetluse ratsionaalsust ja andis alused edasiste üksikasjalisemate uurimiste teostamiseks. Alljärgnevalt antakse lühike kirjeldus uurimistöo jätkamisel 1954. aastal teostatud eksperimentaalsest tööst põlevkivi koxi põlemisprotsessi kohta (6).

Katsed teostati laboratoorses keevkihikoldes, mille põhiosa moodustas kooniline šaht üldkõrgusega 1150 mm (joon. 1). Kolde alumises, silindrilises osas, läbimõõduga 215 mm, paiknes 1%-lise elavpinnaga malmist rest. Restis oli 60 puhumisava läbimõõduga 2,5 mm, ja keskosas 60-millimeetrise läbimõõduga ava tuha väljalaskmiseks. Ülespoole laieneva kolde suurimaks läbimõõduks oli 600 mm, kusjuures läbimõõt suurenes 9°-se nurga all. Põlemissaadused juhiti koldest välja restist 800 mm kõrgusel asetseva ava kaudu, mille ristlõige oli 120 × 180 mm. Kütust andis koldesse 60-millimeetrise läbimõõduga tigutoitja, mis paiknes resti pinnast 600 mm kõrgusel.

Katsete teostamisel kasutati mitmesuguse tüksuurusega kütust, muudeti põlemisõhu puhumise kiirust ja koldeprotsessi liigõhutegurit. Põlemisõhu temperatuur oli kõikidel katsetel keskmiselt 45° C ja keevkihi kõrgus 250 kuni 280 mm piirides. Kütuseks oli kamberahju koks mitmesuguses jämeduses (purustatud ja sõelutud). Põhilised katsete seeriad teostati koksiga kahes erinevas tera jämeduses (tabel 1).



Joon. 1. Laboratoorse kolde ja mõõtetehnika skeem. 1 — kolle, 2 — kütuse toite-tigu, 3 — põlemisõhu ventilaator, 4 — potentsiomeeter П П, 5 — millivoltmeeter, 6 — ümberlülili, 7 — mikromanomeeter, 8 — pneumaatiline ümberlülili, 9 — U-toru manomeeter, 10 — gaasiproovide võtmise seade, 11 — keskmise gaasiproovi imemise seade, 12 — termomeeter.

Tabel 1

Nimetus	Ühik	Koks nr. 1	Koks nr. 2	
Kuivaine koostis:				
karbonaatne CO ₂	(CO ₂) _k ^k	%	17,7	20,4
mineraalne tuhk	A ^k	%	66,1	61,2
leppeline orgaaniline aine	b ^k	%	16,2	18,4
sellest: süsinik	C ^k	%	14,02	15,91
vesinik	H ^k	%	0,37	0,44
väävel	S ^k	%	0,83	1,10
Kuivaine kütteväärtus				
(arvestusega $x_{CO_2} = 0$) Q_k^k		kcal/kg	1238	1415
Teoreetiliselt vajalik põlemisõhu maht	V_0	nm ³ /kg	1,35	1,56
Koksi tükisuurus:				
0 — 0,105 mm		%	22,1	12,8
0,105 — 0,30 mm		%	21,6	7,0
0,30 — 0,85 mm		%	28,5	10,3
0,85 — 1,70 mm		%	21,2	13,2
1,70 — 3,30 mm		%	6,6	31,9
üle 3,30 mm		%	—	25,8

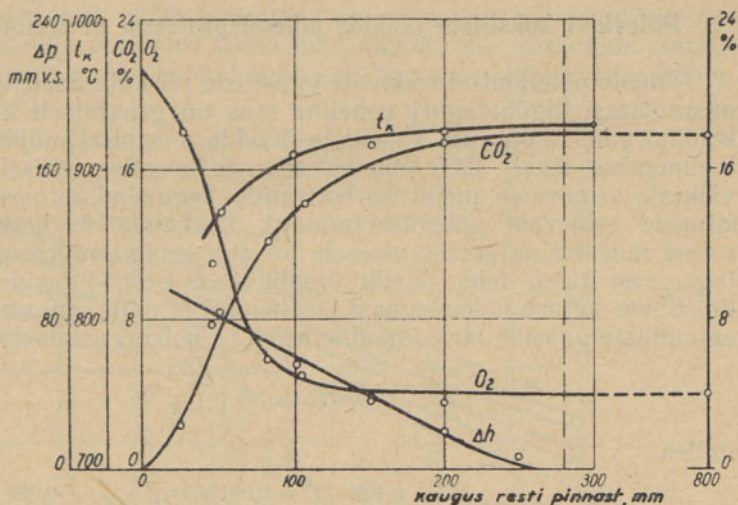
Katsetel kasutatud kütuse niiskus oli 7 kuni 12% piirides, millele vastavalt oli koksil nr. 1 tarbimisaine kütteväärtus 1060 kuni 1100 kcal/kg ja koksil nr. 2 — 1245 kuni 1285 kcal/kg.

Eksperimentaalse uurimistö tulemused näitasid, et kasutatud katsekolde konstruktiivsete tingimuste juures oli koksi nr. 1 põletamisel optimaalseks põlemisõhu puhumiskiiruseks 0,22 kuni 0,42 m/sek. (antud normaaltingimustes, s. o. õhuhulk nm³/m²sek. kolde alumise osa ristlõikes), kusjuures kolde ristlõike kütuslik erikoormus oli 825 kuni 1125 kg/m² tunnis. Katsed teostati liigõhuteguriga $\alpha = 0,7$ kuni 1,4. Suurema tükisuurusega koksi nr. 2 põletamisel tuli „keemise” kindlustamiseks kasutada suuremaid põlemisõhu kiirusi — 0,443 kuni 0,588 m/sek. Kolde ristlõike kütuslikud erikoormused olid seejuures 846 kuni 1470 kg/m² tunnis. Sõltuvalt liigõhutegurist olid temperatuurid koldes 850° kuni 1040° C ($\alpha = 1,5$ kuni 1). Põlemisaadusi iseloomustas kõrge CO₂-sisaldus (väikestel liigõhuteguritel kuni 23,5%) ja väike CO-sisaldus — 0,2 kuni 0,5%. Põlemisaadused sisaldasid vähesel määral ka teisi põlevaid gaase (H₂ ja CH₄) — kokku alla 1%. Tingituna sellest, et katseseadmes kasutatud resti elavpind oli väga väike, ainult 1%, oli põlemisõhu surve resti all kõrge (ületas 750 mm veesamba järgi, kui puhumiskiirus oli üle 0,5 m/sek.). Puhumiskiirustel 0,30 kuni 0,35 m/sek. oli surve resti all 380 kuni 450 mm veesamba järgi.

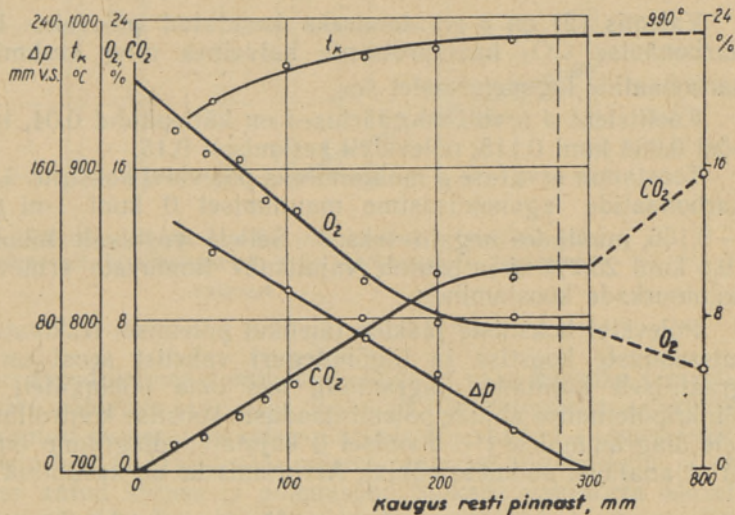
Põlemisprotsessi kulgemise iseloomu määramiseks teostati temperatuuride mõõtmisi ja gaasiproovi võtmisi keevkihi seest mitmesugustelt kõrgustelt. Saadud tulemusi selgitavad joonised 2a ja 2b. Joonisel 2a on toodud põlemisprotsessi karakteristikud koksi nr. 1 põletamisel puhumiskiirusega 0,397 m/sek. ja liigõhuteguriga 1,17. Hapniku kõverast nähtub, et intensiivne põlemine lõpeb umbes 100 mm kõrgusel restist. Seda keevkihi osa iseloomustab keskmise kihitemperatuuri kiire tõus (kõver t_k). Keevkihi kõrguse selgitamiseks on diagrammile kantud staatilise surve langus kihis (kõver Δp). Võrdluseks on esitatud joonisel 2b põlemisprotsessi karakteristikud koksi nr. 2 põletamisel sama liigõhuteguriga ($\alpha' = 1,17$), kuid puhumiskiirusega 0,557 m/sek. Diagrammist on näha, et intensiivse põlemise

tsooni kõrgus on suurenenud kütusekihi suurema poorsuse ja põlevaine väiksema kontsentratsiooni tõttu ligikaudu 200 mm-ni. Hapniku kontsentratsiooni vähenemine põlemisgaasides jätkub ka ülalpool keevkihi pinda. See näitab ka seda, et sellise puhumiskiiruse juures toimub peenemate koksiosa-keste põlemine katsekolde ülemises osas aerofontaansetes tingimustes, mis põhjustab mehaanilise kao suurenemist.

Joon. 2a.
Koksi nr. 1 põletamine.
Puhumiskiirus
 $w_0 = 0,397$ m/sek.



Joon. 2b.
Koksi nr. 2 põletamine.
Puhumiskiirus
 $w_0 = 0,557$ m/sek.



Põlevkivikoksi põlemisprotsessi karakteristikud laboratoorses keevkihiga kolde, liigõhuteguriga $\alpha' = 1,17$.

Katsekolde töötamisel saadud tuha analüüsimise tulemused näitasid, et kolde alt eemaldatud tuhas puudus praktiliselt põlevaine. Põlevainet leidis lendtuhas ja seda peamiselt lendtuha peenemates osakestes. Põlevainesisaldus lendtuhas oli kõrgem neil katsetel, mis teostati liigõhuteguriga $\alpha < 1,1$ ja suurematel puhumiskiirustel ($w_0 > 0,5$ m/sek.). Koldeprotsessi mehaani-

lise kao arvestamine lendtuhas leiduva põlevainesisalduse järgi andis tegelikust väiksemaid andmeid, sest katseseadme konstruktsioonist tingituna toimus lendtuha järelpõlemine katseseadme teistes osades, väljaspool kolde šahti. Samuti jätkus seal karbonaatide lagunemine lendtuhas.

Katsetamisel saadud tulemuste arvutuslikuks kontrollimiseks on otstarbekohane kasutada selleks kohandatud ja täiendatud arvutusmeetodit.

Põlevkivi koksiliste jääkide põlemisprotsessi arvutamise meetodist

Kütuste põletamisel tekkivate gaasiliste põlemissaaduste koostise ja põlemisprotsessi liigõhuteguri vaheline seos on graafiliselt kujutatav põlemiskolmnurgana. Põlevkivi koksiliste jääkide põlemisel mõjustab karbonaatide lagunemisel tekkiv CO_2 põlemissaaduste koostist sellisel määral, et juba väikeste erinevuste puhul karbonaatide lagunemistasmes tuleb kasutada mitmeid erinevaid põlemiskolmnurki. Karbonaatide keskmise lagunemistasme määramine koldeprotsessis on aga seotud suurte praktiliste raskustega, sest tuleb teha täielik tuhabilanss. Eespooltoodu selgituseks analüüsitakse kütuse põlemisgaasi koefitsienti β , mille abil on arvutatav kolmeatomiliste gaaside maksimaalne sisaldus põlemissaadustes:

$$(\text{RO}_2)_{\max} = \frac{21}{1 + \beta} \text{‰}, \quad (1)$$

milles:

$$\beta = 2,373 \frac{H^k - 0,125 \cdot O^k - 0,091 (\text{CO}_2)_k^k x_{\text{CO}_2} + 0,038 N^k}{C^k + 0,374 S^k + 0,273 (\text{CO}_2)_k^k x_{\text{CO}_2}} \text{‰}. \quad (2)$$

Valemis (2) on β arvutamiseks kasutatud põlevaine komponentide ja karbonaatse CO_2 kaaluprotsente kuivaines ning keskmist arvestuslikku karbonaatide lagunemistasmet x_{CO_2} .

Koefitsient β arvulised väärtused on küttepuidul 0,04, turbal 0,078, kivi-söel 0,088 kuni 0,115, põlevkivil keskmiselt 0,15.

Teostanud arvutuse β määramiseks põlevkivi koksi nr. 1 kohta, näeme, et karbonaatide lagunemistasme muutumisel 0 kuni 1-ni $\beta = +0,06$ kuni $-0,166$, muutudes negatiivseks. Sellele vastavalt muutub ka $(\text{RO}_2)_{\max}$ 19,8 kuni 25,2%-ni ja osutub vajalikuks tunduvate erinevustega põlemiskolmnurkade koostamine.

Põlevkivi koksiliste jääkide täielikul põlemisel tekkivate gaasiliste põlemissaaduste koostise ja liigõhuteguri vahelist seost on otstarbekohane graafiliselt kujutada diagrammil, mis oma põhimõttelt on analoogiline klinkripõletamise ahjude põlemissaaduste koostise kontrollimisel kasutatavatele diagrammidele (4). Joonisel 3 kujutatud diagramm on koostatud koksi nr. 1 analüüsi andmete põhjal. Arvutamiseks on kasutatud valemeid:

$$m_{\text{RO}_2} = \frac{1,866 (C^k + 0,375 S^k) + 0,51 (\text{CO}_2)_k^k x_{\text{CO}_2}}{1,866 (C^k + 0,375 S^k) + 0,51 (\text{CO}_2)_k^k x_{\text{CO}_2} + 0,8 N^k + 100 (\alpha - 0,21) V_0} \text{‰}, \quad (3)$$

$$m_{\text{O}_2} = \frac{21 (\alpha - 1) V_0}{1,866 (C^k + 0,375 S^k) + 0,51 (\text{CO}_2)_k^k x_{\text{CO}_2} + 0,8 N^k + 100 (\alpha - 0,21) V_0} \text{‰}, \quad (4)$$

milles: V_0 — kuivaine täielikuks põletamiseks teoreetiliselt vajalik põlemisõhu hulk nm^3/kg ;

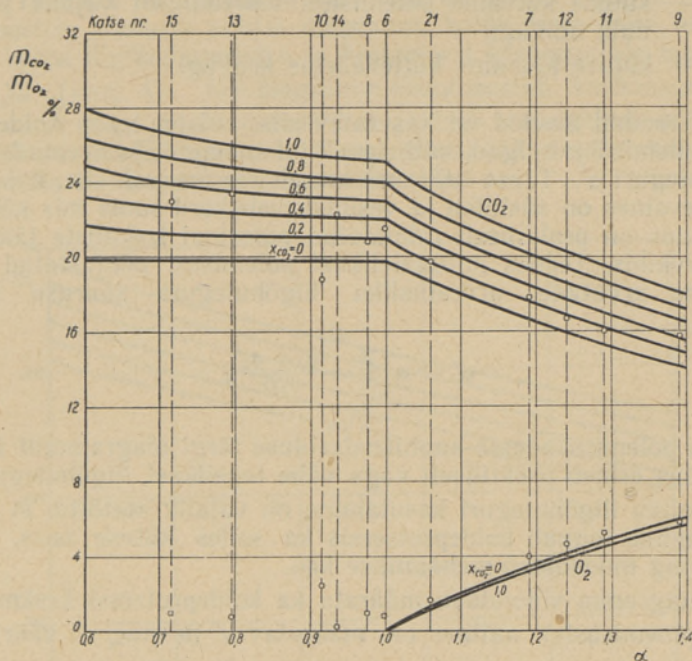
α — liigõhutegur.

Valemid (3) ja (4) on kasutatavad juhul, kui liigõhutegur α aga $\alpha < 1$, siis tuleb tarvitada järgmisi valemeid:

$$m_{RO_2} = \frac{1,866 (C^k + 0,375 S^k) \alpha + 0,51 (CO_2)_k^k x_{CO_2}}{1,866 (C^k + 0,375 S^k) \alpha + 0,51 (CO_2)_k^k x_{CO_2} + 0,8 N^k \alpha + 79 V_0 \alpha} \% \quad (3a)$$

$$m_{O_2} = 0. \quad (4a)$$

Seejuures on eeldatud, et õhupuuduse tõttu põlemata jäänud põlevaines on süsiniku ja vesiniku vahekorrd sama mis algkütuses. Keskmise karbonaatide lagunemisaste on aga võetud kogu koldesse antud kütuse tuha kohta.



Joon. 3. Põlemissaaduste koostis põlevkivikoksi täielikul põlemisel olenevalt liigõhutegurist α ja karbonaatide lagunemisastmest x_{CO_2} .

Diagrammil on antud kolmeatomiliste gaaside ja vaba hapniku teoreetiline sisaldus täieliku põlemise saadustes olenevalt liigõhutegurist α . Samale diagrammile on kantud eksperimentaalses uurimistöös saadud andmed keskmiste gaasikoostiste kohta. Arvestuslik põlemisprotsessi liigõhutegur α' on arvatud koldesse antud kütuse ja põlemisõhu hulcade vahekorra alusel. Seetõttu ei ole parandust mehaanilise kao arvel arvestatud ja nagu diagrammist on näha, jäävad katsetöös määratud hapnikukontsentratsioonid kõrgemale teoreetilisest kõverast. Selle, diagrammi järgi määratava hapniku ülejäägi põhjal saame arvutada gaasi analüüsi andmete abil mittetäieliku põlemise tõttu esineva kao suurust juhtude kohta, kui $\alpha > 1$.

$$q_3 + q_4 = 376 \frac{\alpha'}{m_{N_2}} (m_{O_2} - m'_{O_2}), \quad (5)$$

kus q_3 on keemiline kadu ja q_4 mehaaniline kadu, mõlemad protsentuaalselt.

Kui eraldi arvestada CO-sisaldusest tingitud keemilist kadu põlemissaadustes, siis omandab valem (5) kuju:

$$q_3 + q_4 = 376 \frac{a'}{m_{N_2}} (m_{O_2} - m'_{O_2} - 0,5 m_{CO}) + 3050 \cdot 0,79 a' \frac{V_0 m_{CO}}{Q_k^k m_{N_2}}, \quad (6)$$

milles:

m_{O_2} ; m_{CO} ; m_{N_2} — hapniku, süsinikoksüüdi ja lämmastiku protsentuaalne sisaldus põlemissaadustes;

m'_{O_2} — teoreetiline hapnikusisaldus põlemissaadustes, mis on leitav diagrammilt arvestusliku liigõhuteguri a' järgi;

V_0 — kütuse kuivaine põlemiseks teoreetiliselt vajalik põlemisõhu hulk nm^3/kg ;

Q_k^k — kütuse kuivaine kütteväärtus $kcal/kg$.

Eespool toodud meetod on kasutatav siis, kui on teada koldesse antud kütuse ja põlemisõhu hulgad, milliste põhjal saame välja arvutada arvestusliku liigõhuteguri a' . Täpse tulemuse annab see meetod siis, kui põlemata jäänud põlevaines on süsiniku ja vesiniku vahekord sama mis kütuses. See teine tingimus on praktiliselt rahuldatud põlevkivi koksiliste jääkide põletamisel keevkihis. Teades mittetäielikust põlemisest põhjustatud kao suurus, saame arvutada arvestusliku liigõhuteguri suuruse küllaldase täpsusega:

$$a' = a \left[1 - \frac{q_3 + q_4}{100} \right], \quad (7)$$

milles a on põlemissaaduste hapnikusisalduse järgi diagrammilt leitud liigõhutegur, mis erineb praktiliselt väga vähe tegelikust liigõhutegurist.

Arvestusliku liigõhuteguri kasutamine on vajalik seetõttu, et karbonaatide lagunemine toimub koldeprotsessis ka selles kütuse osas, mis jääb põlemata ning moodustab mehaanilise kao.

Sama diagramm võimaldab määrata ka koldeprotsessi keskmist karbonaatide lagunemisastet, milline on määratav a' ja m'_{RO_2} väärtuste abil. Seejuures on m'_{RO_2} kogu põlevaine täielikule põlemisele redutseeritud kolmeaatomiliste gaaside osamaht, mis avaldub lihtsustatud kujul järgmiselt:

$$m'_{RO_2} = m_{RO_2} + \frac{(RO_2)'_{\max}}{21,0} (m_{O_2} - m'_{O_2}) + \frac{m_{CO}}{2} o/o, \quad (8)$$

milles:

m_{RO_2} , m_{O_2} , m_{CO} — kolmeaatomiliste gaaside, hapniku ja süsinikoksüüdi mahuprotsendid põlemissaadustes ja

$(RO_2)'_{\max}$ — maksimaalne kolmeaatomiliste gaaside sisaldus protsentides, kui $a = 1$ ja $x_{CO_2} = 0$.

Kui põlemissaaduste koostises esineb suuremal määral süsinikoksüüdi ja teisi gaasilisi süsinikühendeid, siis valemi (8) kasutamine annab ebatäpse tulemuse. Käesolevas artiklis käsitletud põlemisprotsessi arvutustes on see viga ebaoluliselt väike.

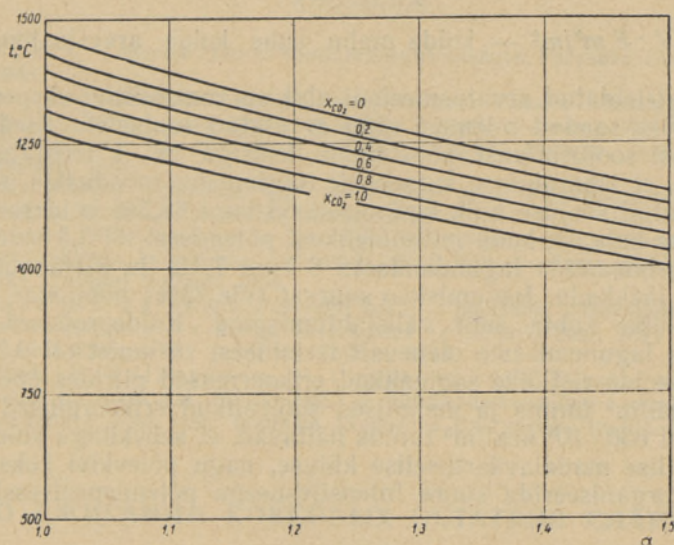
Juhul, kui kadu mittetäielikust põlemisest on väike, võime küllaldase täpsusega määrata karbonaatide keskmise lagunemisastme diagrammilt a ja m_{RO_2} põhjal.

Koldeprotsessi võimalike termiliste režiimide leidmiseks tuleb määrata põlemise teoreetilise temperatuuri sõltuvus liigõhutegurist ja karbonaatide lagunemisastmest.

Selleks saab kasutada diagramme ($i-t$), mis väljendavad põlemisgaaside soojusisaldust olenevalt temperatuurist. Nende diagrammide koostamisel tuleb arvestada, et keevkihiga kolde tingimustes lahkub suurem osa tuhka koldest põlemisgaaside temperatuuril. Soojuse hulk, mis kulub karbonaatide lagundamiseks, avaldub:

$$Q_{\text{karb.}} = 9,70 (x_{\text{CO}_2})_m (\text{CO}_2)_k^t \text{ kcal/kg.} \quad (9)$$

Sellest lähtudes on koostatud katsetöös kasutatud koksi nr. 1 keskmise tarbimiskoostise andmete põhjal diagramm kolde teoreetilise temperatuuri sõltuvuse kohta liigõhutegurist α ja keskmisest karbonaatide lagunemisastmest $(x_{\text{CO}_2})_m$ (joon. 4). See diagramm iseloomustab karbonaatide lagunemisastme suurt mõju põlevkivi koksiliste jääkide teoreetilisele põlemistemperatuurile. Olenevalt koldeprotsessi kasutegurist jääb tegelik kolde temperatuur teoreetilisest temperatuurist madalamaks.



Joon. 4. Põlevkivikoksi teoreetilise põlemistemperatuuri sõltuvus liigõhutegurist α ja karbonaatide lagunemisastmest x_{CO_2} .

Keevkihiga koldeprotsessi soojustehniliste arvutuste teostamisel on otstarbekohane teha mõningaid muudatusi võrreldes tavaliste (restil põletamisega) kollete arvutustega. Kui üldiselt arvutatakse resti pinna soojusliku erikoormuse näitajaid kütusliku koormuse ja kütuse kütteväärtuse järgi, viies sisse paranduse mehaanilise kao q_4 arvel, siis keevkihiga kollete juures on otstarbekohasem lähtuda aerodünaamilistest teguritest. Need tegurid on määravad „keemise” protsessis. Nii peab põlemisõhu puhumiskiirus vastama kasutatava kütuse tükisuurusele, tükide kujule ja näilisele erikaalule. Koldeprotsessi termilise režiimi reguleerimine toimub liigõhuteguri muutmise abil.

Seose kolde ristlõike soojusliku erikoormuse arvutamiseks põlemisõhu puhumiskiiruse ω_0 ja liigõhuteguri α abil on andnud H. Truu⁽³⁾ kujul:

$$Q_F = k \frac{w_0}{\alpha} \text{ kcal/m}^2 \text{ tunnis,} \quad (10)$$

milles $k = 3600 \frac{Q_k^k}{V_0}$. Koefitsient k iseloomustab kütust, sest suhe $Q_k^k : V_0$ esitab 1 nm³ põlemisõhu kohta eralduvat soojuse hulka kütuse täielikul põletamisel teoreetilise põlemisõhuhulgaga.

See koefitsient on analoogiline nn. põlemisõhu piirsoojustootlikkusele (²), mis avaldub kütuse kütteväärtuse ja teoreetilise põlemisõhu kaalu suhte kaudu.

Kolde soojusliku erikoormuse näitajad on arvutatavad hapniku kulu järgi, kui põlemissaaduste koostises ei esine olulisel määral süsinikoksiidi ja teisi põlevaid gaase.

$$Q_F = 3600 \left(1 - 3,76 \frac{m_{O_2}}{m_{N_2}} \right) \cdot w_0 \cdot \frac{Q_k^k}{V_0} \text{ kcal/m}^2 \text{ tunnis} \quad (11)$$

ja kolde tegelik mahuline soojuslik erikoormus avaldub:

$$Q_v = \frac{Q_F}{k_v} \cdot \text{kcal/m}^3 \text{ tunnis,} \quad (12)$$

milles $k_v = V : F \text{ m}^3/\text{m}^2$ — kolde mahu suhe kolde arvestusliku ristlõike pindalasse.

Eespool kirjeldatud arvutusmeetodi abil on kontrollitud eksperimentaalses uurimistöös saadud tulemusi ning arvutatud soojustehnilised näitajad. Koldeprotsessi soojusbilansi koostamine koksiga nr. 1 teostatud katsete kohta näitas, et laboratoorse katsekolde tingimustes moodustas põlemissaadustele üleantud soojuse hulk keskmiselt 65 kuni 67,5% koldesse kütusega antud soojuse hulgast, kadu mittetäielikust põlemisest oli 2,5 kuni 4%, soojuse kulu karbonaatide lagundamiseks 6 kuni 7,3% ja ülejäänud 25% oli jahtumis- ja jääkkadu. Jahtumiskao suurust (üle 23%) põhjustas katsekolde väikese ristlõike kohta suur välisjahtumispind. Koldeprotsessi keskmine karbonaatide lagunemisaste olenevalt termilisest režiimist oli 0,5 kuni 0,7. Saavutatud kolde ristlõike soojuslikud erikoormused piirides $800 \cdot 10^3$ kuni $1200 \cdot 10^3$ kcal/m² tunnis ja mahulised soojuslikud erikoormused vastavalt $420 \cdot 10^3$ kuni $630 \cdot 10^3$ kcal/m³ tunnis näitavad, et keevkihiga koldes on võimalik ka sellise madalaväärtuselise kütuse, nagu põlevkivi koksiline jääk, põletamisel organiseerida suure intensiivsusega põlemisprotsessi.

Järeldused

1. Põlevkivi koksiliste jääkide põlemisprotsessile avaldavad määravat mõju nende erilised kütuslikud omadused — madal kütteväärtus ($Q_k^k = 800$ kuni 1500 kcal/kg), suur tuhasisaldus ($(A + CO_2)^k > 80\%$), minimaalne lendainetesisaldus ja karbonaatide suur osatähtsus. Nende põletamisel tuleb rakendada madalaväärtuseliste tuharikaste kütuste juures kasutatavaid menetlusi.

2. Põlevkivi koksiliste jääkide põletamine on ratsionaalselt teostatav keevkihiga koldes, mille külladane kütuslik akumulatsioon ja head tingimused põlemisreaktsioonide kulgemiseks kindlustavad stabiilse ning kõrge intensiivsusega põlemisprotsessi (laboratoorses koldes saavutati ristlõike soojuslik erikoormus $800 \cdot 10^3$ kuni $1200 \cdot 10^3$ kcal/m² tunnis).

3. Soojustehniliste arvestuste teostamisel põlevkivi koksiliste jääkide põlemise kohta on vajalik eriliste arvutusmeetodite kasutamine, mis võtavad

arvesse suurest karbonaatidesisaldusest tingitud põlemisprotsessi iseärasusi nii põlemissaaduste koostise kui ka põlemistemperatuuri määramise osas.

4. Arvestades põlevkivi koksiliste jääkide kasutamise rahvamajanduslikku tähtsust, tuleb alustada nende jääkide kasutamist tehnoloogiliseks kütuseks, millega lahendatakse ehitusliku sideaine tootmise kõrval ka tekkiva soojuste energeetilise rakendamise küsimus.

5. Põlevkivituhast ehitusliku sideaine valmistamise alaste uurimistööde teostamisel tuleb edaspidi pöörata suuremat tähelepanu põlevkivi koksiliste jääkide põletamisel saadavate tuhade omaduste üksikasjalisele määramisele, viimistleda vastavalt koldeprotsessi režiim ning koostada arvutuste alused.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
31. XII 1955

KIRJANDUS

1. В. И. Жунко, Горючие газы из прибалтийских сланцев, Гостоптехиздат, Ленинград, 1948.
2. Г. Ф. Кнорре, Топочные процессы. Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1951, lk. 13.
3. Х. К. Труу, Теория и практика сжигания горючего сланца. АН СССР, ЭНИН. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва, 1951.
4. W. Gumz, Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1953.
5. H. Märtson, Põlevkivikoksi ja -poolkoksi põlemisprotsessi uurimine laboratoorses keeva kihiga katsekoldes (aruanne), Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituut, Tallinn, 1954.
6. R. Uuesoo ja E. Jürisma, Põlevkivi koksi ja poolkoksi põlemisprotsessi uurimine laboratoorses keeva kihiga katsekoldes (aruanne), Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituut, Tallinn, 1954.
7. R. Valdek, N. Polikarpov, N. Lutskovskaja, Põlevkivi-kukersiidi, tema koksi ja poolkoksi füüsikaliste ja füüsikalise-keemiliste omaduste uurimine (aruanne), Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituut, Tallinn, 1954.

О СЖИГАНИИ КОКСОВЫХ ОСТАТКОВ СЛАНЦА

Р. Н. УУЭСОО

Резюме

В промышленности Эстонской ССР при переработке горючих сланцев образуются значительные количества многозольных $[(A + CO_2)^c]$ больше 80%] коксовых остатков, имеющих низкую теплотворность ($Q_H^c = 800$ до 1500 ккал/кг). Эти коксовые остатки до настоящего времени оставались неиспользованными. В связи с разработкой комплексного метода энерготехнологического использования горючих сланцев и успехами в области использования сланцевой золы в качестве строительного вяжущего, в Институте энергетики Академии наук Эстонской ССР в 1954 году приступили к исследованию процесса сжигания сланцевых коксовых остатков в топке с кипящим слоем.

Полученные на лабораторной опытной установке (рис. 1) результаты показывают, что сжигание сланцевых коксовых остатков рационально

осуществлять в топке с кипящим слоем, имеющей достаточную топливную аккумуляцию и хорошие условия для протекания реакций горения, чем обеспечивается стабильность и высокая интенсивность процесса горения. Удельная тепловая нагрузка, достигнутая в лабораторной топке, составляла от 800 до 1200 ккал/м²час. В зависимости от величины кусков топлива (от 0 до 6 мм) оптимальная скорость воздушного дутья на свободное сечение топки составляла 0,2—0,6 м/сек. При больших скоростях дутья и сжигании более мелких фракций топлива топочный процесс становится частично аэрофонтанным, что видно из сравнения кривых на рис. 2а и 2б, характеризующих содержание кислорода по высоте топки. При больших скоростях дутья механические потери в топке возрастают.

Особенностью основного процесса горения сланцевых коксовых остатков является влияние высокого содержания карбонатов минеральной части этого топлива на состав продуктов горения и на температуру горения. Состав продуктов горения характеризуется чрезвычайно высоким содержанием СО₂, которое зависит от величины степени разложения карбонатов. Это обстоятельство требует особых методов расчета и контроля процесса горения. На рис. 3 представлена зависимость теоретического состава продуктов горения сланцевых коксовых остатков при полном их сгорании от коэффициента избытка воздуха и степени разложения карбонатов. При помощи такой диаграммы возможен качественный анализ действительного суммарного процесса горения. На рис. 4 приведены теоретические температуры горения тех же коксовых остатков в зависимости от коэффициента избытка воздуха и степени разложения карбонатов. Вследствие больших потерь тепла от охлаждения опытной установки, полученные в опыте температуры значительно ниже теоретических.

Принимая во внимание большое народнохозяйственное значение вопроса использования сланцевых коксовых остатков, следует приступить к их использованию в качестве технологического топлива, причем на базе производства строительного вяжущего могут быть разрешены также вопросы энергетического применения образующегося тепла.

*Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
31 XII 1955

ON THE COMBUSTION OF OIL SHALE RESIDUES

R. UUESOO

Summary

At the thermal treatment of oil shale in the oil shale industry of the Estonian SSR there remain unutilized great quantities of ash-rich (average content — 70—80%) oil shale coke and half-coke of a low calorific value (800—1500 kcal/kg).

An examination of the combustion of these coke-residues in boiling charge testing ovens has proved the possibility of utilizing these coke-residues for the production of thermal energy, while the ash produced in the boiling charge could be suitably used as raw material for the manufacture of binding matter for building purposes.

In the course of experimental researches a fundamental series of tests was carried out with oil shale chamber-oven coke, the size of each piece being 0—2 mm.

At a 10% moisture content the average calorific value of the coke was

1080 kcal/kg and the content of ash — 75%. The optimum blast velocity zone of the burning air proved to be 0.22 — 0.42 $\text{nm}^3/\text{m}^2\text{sec.}$, while the special heat loads of the cruciform cut of the oven shaft were of $800 \cdot 10^3$ to $1200 \cdot 10^3$ kcal/ m^2 per hour and the loss from incomplete combustion did not exceed 4%.

Conditioned by the fact, that in average a half of the oil shale coke residue ash constitutes CaCO_3 , a special method has been adopted for effecting the heat engineering control calculations of the combustion process, estimating the decomposition of carbonates in the oven.

The question of a full utilization of coke-residues originated by the thermal treatment of oil shale has a great national-economic importance for solving the problem of a complex utilization of the oil shale of the Estonian SSR.

*Academy of Sciences of the Estonian SSR,
Institute of Energetics*

Received
Dec. 31, 1955