

## PÕLEVKIVI KOKSILISTE JÄÄKIDE PÕLETAMISEKS KASUTATAVATE KOLLETE ARVUTAMINE

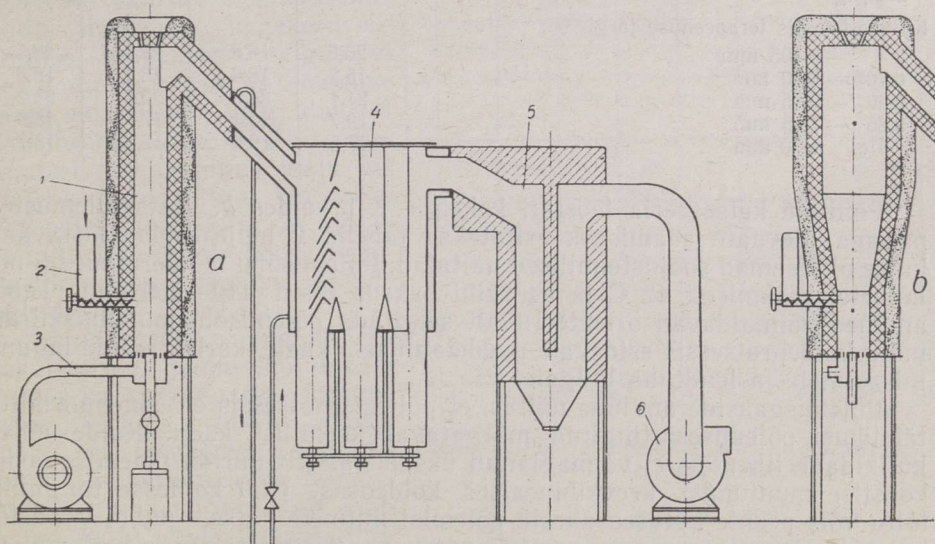
R. UUESOO

Eesti NSV põlevkivitööstuses on üheks seni lahendamata küsimuseks põlevkivi termilisel töötlemisel tekkivate koksiliste jääkide täielik ja ratsionaalne ärakasutamine. Sobivalt valitud põletamisrežiime rakendades on põlevkivi koksilistest jääkidest võimalik saada ehitussideainet ning tõsta vabaneva soojuse arvel põlevkivi töötlemisseadmete kasutegurit.

Käesolevas artiklis esitatakse keevkihiga kollete põhimõõtmete määramise ning otsustavate põletamisrežiimide valiku meetod, mille väljatöötamisel on kasutatud autori uurimistöö tulemusi koksiliste jääkide põletamise alal.

### Põletamiskatsed keevkihiga koldes

Katsed koksiliste jääkide põlemisprotsessi uurimiseks viidi läbi kahes erineva kujuga koldes (joon. 1). Esimene neist (*a*) on silindrilise kujuga, sisemine läbimõõt 200 mm ja kõrgus 1900 mm. Kütust anti koldesse tigu-  
toitjaga, mis resti pinnast asub 350 mm kõrgemal. Kolde all paikneb mal-



Joon. 1. Katseseadme skeem: 1 — kolle, 2 — kolde toitetigu, 3 — õhuventilaator, 4 — vesijahutusega lendtuhapüüdja, 5 — lendtuha sadestuskamber, 6 — tõmbeventilaator; *a* ja *b* — kollete püstlõiked.

mist rest, mille elavpinda muudeti 1—4% piirides<sup>[3]</sup>, mis aga ei avaldanud olulist mõju põlemisprotsessile. Restialust õhukarpi läbis 60-millimeetrise läbimõõduga toru jämedateralise tuha ärajuhtimiseks keevkihist. Põlemisgaasid juhiti ära kolde ülemisest osast. Teine katsete seeria viidi läbi koldes *b*, mille ülemise osa ristlõike pindala on alumisest neli korda suurem; nendevahelise koonilise osa kõrgus oli 600 mm.

Katsetamisel pöörati erilist tähelepanu koldest koos põlemisgaasidega lahkuva lendtuha kiirele jahutamisele ja täielikule kinnipüüdmisele, et täpselt määrata peente kütuseosakeste põlemisastet koldes. Sellele vastavalt oli koostatud katseseadme üldine skeem (joon. 1). Suhteliselt jämedamad lendtuhaosakesed eraldati põlemisgaasidest veega jahutatavas žalusiipüüdjas. Peenem lendtolm sadenes välja püüdeseadme teises astmes, sadestuskambris, mis hiljem ehitati ümber tsükloonpüüdjaks.

Andmed kütuseks kasutatud kamberahju koksi ja tunnelahju poolkoksi kohta on esitatud tabelis 1. Tegelikult ei olnud võimalik põletada poolkoksi Pk-2, sest liiga väikese põlevainesisalduse tõttu jäi temperatuur katsekoldes madalamaks, kui see oli vajalik kütuse pidevaks süttimiseks (vähemalt 720°C). See oli tingitud katsekolde suhteliselt suurest jahtumiskaost ning näitab, kui oluline tähtsus on koksiliste jääkide põletamisel saavutatava temperatuuri arvutuslikul määramisel<sup>[4]</sup>.

Tabel 1

	Koks		Poolkoks	
	K-1	K-2	Pk-1	Pk-2
Kuivaine koostis, %:				
karbonaatset CO <sub>2</sub>	21,6	20,6	22,3	25,6
mineraalset tuhka	64,2	65,0	64,5	65,7
orgaanilist ainet	14,2	14,4	13,2	8,7
sellest: süsinikku	12,61	12,74	10,63	7,07
vesinikku	0,44	0,62	0,71	0,47
Kuivaine kütteväärtus (arvestusega $x_{\text{CO}_2} = 0$ ), kcal/kg	1141	1198	1069	711
Kütuse koostis terapeenuse järgi, %:				
0 — 0,105 mm	26,5	16,8	28,9	26,5
0,105 — 0,30 mm	15,2	18,8	18,4	18,6
0,30 — 0,85 mm	21,1	24,8	22,4	23,2
0,85 — 1,70 mm	19,7	20,4	17,7	18,0
üle 1,70 mm	17,5	19,2	12,6	13,7

Põhiline katseseeria teostati koksiga K-1 koldes *a*. Katsetulemustest parema ülevaate saamiseks esitatakse tabelis 2 nelja iseloomustavama katse olulisemad soojustehnilised näitajad. Põlemisõhu temperatuur oli neil katsetel keskmiselt 42°C ja keevkihi paksus restil 410—450 mm. Tabeli andmed võimaldavad orienteeruvalt selgitada põlemisõhu puhumiskiiruse mõju koldeprotsessis esinevale mehhaanilisele kaole, karbonaatide lagunemisastmele ja lendtuha hulgale.

Põlemisgaaside analüüs näitas, et põlemisprotsessis ei esinenud mitte-täielikust põlemisest tingitud märgatavat keemilist kadu. Kolde mitte-küllaldane tihendus ei võimaldanud üksikasjaliselt uurida põlemisgaaside koostise muutumist keevkihipealses koldeosas. Õhu koldesse tungimise tõttu võis peente kütuseosakeste põlemist mitmete katsete puhul vaadelda kui põlemist peaaegu muutumatu hapnikukontsentratsiooniga keskkonnas. Samuti muutus temperatuur kolde selle osa ulatuses väga väikestes piirides ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ).



Tabel 2

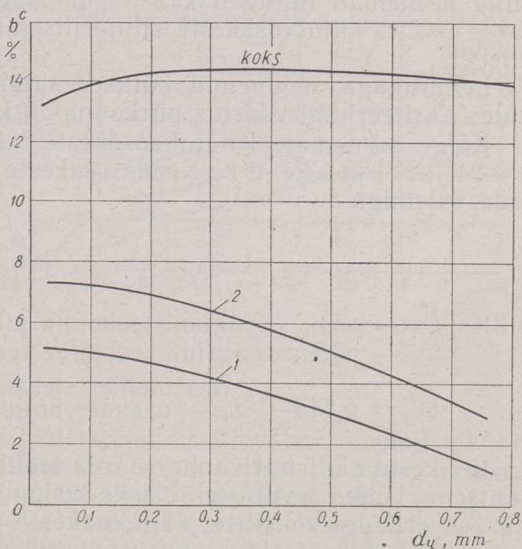
	Katse			
	nr. 1	nr. 2	nr. 3	nr. 4
Kütuse (K-1) niiskus, %	7,5	7,5	9,0	9,0
Põlemisõhu puhumiskiirus, $\text{nm}^3/\text{m}^2 \text{ sec}$	0,265	0,455	0,65	0,85
Kütuslik erikoormus, $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$	695	1210	1610	2595
Koldeprotsessi liigõhutegur	1,29	1,30	1,50	1,42
Niiskete põlemissaaduste koostis, $\text{nm}^3/\text{nm}^3$ :				
$r_{\text{O}_2}$	0,0395	0,0415	0,061	0,053
$r_{\text{CO}_2}$	0,1745	0,169	0,152	0,142
$r_{\text{H}_2\text{O}}$	0,1005	0,100	0,1035	0,119
Põlemissaaduste temperatuur, °C	800	845	840	860
Põlemisgaaside keskmine kiirus koldes, m/sec	1,18	2,125	3,03	4,11
Põlemisgaaside mahu suurenemise koefitsient $1 + \alpha$	1,15	1,145	1,155	1,16
Mehhaaniline kadu $q_4$ , %	12,3	14,6	20,8	32,0
Karbonaatide lagunemisaste $x_{\text{CO}_2}$	0,713	0,684	0,63	0,428
Lendtuha kaal üldisest tuha hulgast, %	64,8	78,5	82,0	88,6
Lendtuha kontsentratsioon põlemissaadustes, $\text{g}/\text{nm}^3$	276	348	339	473

Katsetulemustest selgus, et koldeprotsessis esinev mehhaaniline kadu on tingitud peente koksilise jäägi osakeste mittetäielikust põlemisest kolde keevkihipealses osas. Kolde alt eemalduvas jämedateralises tuhas ei esinenud ühelgi katsel põlevainet. See näitab, et keevkihis toimus täielik põlemine. Kõige rohkem põlevainet sisaldasid lendtuha kõige peenemad fraktsioonid, nagu näeme joonisel 2 esitatud diagrammist, kus kõver 1 on moodustatud katsel nr. 3 ja kõver 2 katsel nr. 4 kinnipüütud lendtuha analüüsi andmeil.

Katsetest ilmnes koldetemperatuuri tugev mõju mehhaanilise kao suurusele. Temperatuuri tõstmisel  $820^\circ\text{C}$ -lt kuni  $965^\circ\text{C}$ -le vähenes mehhaaniline kadu ligikaudu kahekordselt. Olulise tulemusena selgus, et see kadu on sõltuv ka koksilise jäägi omadustest. Võrreldavatel katsetel oli poolkoksi Pk-1 põletamisel mehhaaniline kadu üle kahe korra väiksem kui koksi K-2 põletamisel. Kõik see vihjab selgesti kineetiliste faktorite tugevale mõjule koksiliste jääkide põlemisel.

Samaaegselt põlevaine väijapõlemisega toimus kütuseosakeses ka karbonaatide lagunemine. Mõlema protsessi üldise loom oli võrdlemisi sarnane, kusjuures karbonaatide lagunemisele avaldas tunduvalt suuremat mõju kolde temperatuur.

Katsekoldes  $a$  tehtud katsetel omandas karbonaatide lagunemisaste kolde-temperatuuridel üle  $850^\circ\text{C}$  peaaegu konstantse väärtuse  $x_{\text{CO}_2} = 0,9$ .



Joon. 2. Põlevainesisaldus erineva suurusega koksi- ja lendtuhaosakeses.



Ehkki eesti põlevkivi koksilisi jääke võib põlemise seisukohalt lugeda püsivamahuliseks kütuseks, ilmnes keevkihiga koldeprotsessis kütuse- ja tuhaosakeste mõõtmete oluline vähenemine. Koldes *a* vähenesid kõigi osakeste mõõtmed näiliselt kolmekordselt ja koldes *b* viiekordselt. See nähtus on seletatav mehhaanilise peenendumisega, mis toimub keevkihis jämedamate tuhaosakeste vastastikusel hõõrdumisel. Peenendumisel tekkinud tolm koos pooleldi põlenud peente kütuseosakestega moodustas lendtuha. Tuhaosakeste mõõtmete vähenemine keevkihis kiirendas tunduvalt nende põlemist difusioonitakistuse vähenemise tõttu. Selgus, et peenendumise intensiivsus ei sõltunud niivõrd põlemisgaaside kiirusest koldes kui kolde kujust ja temperatuurist.

Keevkihiga kolde üheks iseloomustavamaks näitajaks on põlemisel tekkiva tuha jaotumine lendtuhaks ja jämedateraliseks, kolde alt eemalduvaks tuhaks. Nende tuhade jaotumise vahekord olenes peaasjalikult põlemisõhu puhumise kiirusest ja temperatuurist koldes. Kolde kuju avaldas seejuures suhteliselt tühist mõju. Ülespoole laieneva ristlõikega koldes esines lendtuhaosakeste pulsseeriv liikumine, mistõttu lendtuhk sisaldas suuremaid osakesi, kui oleks võinud eeldada põlemisgaaside reaalse kiiruse põhjal kolde ülemises ristlõikes.

Uurimistulemused näitavad, et põlevkivi koksiliste jääkide põletamisel keevkihiga koldes tuleb arvestada paljude iseärasustega. Ratsionaalse põlemisprotsessi organiseerimisel omab erilist tähtsust koldeprotsessis esineva mehhaanilise kao vähendamine, mis on olemas peente kütuseosakeste põlemise täielikkusest keevkihipealses koldeosas.

### Peente kütuseosakeste koldes viibimise aeg

Keevkihiga koldes toimub kütuseosakeste pneumaatiline separatsioon: jämedamad ja suurema näilise erikaaluga osakesed põlevad keevkihis, kuna peenemad liiguvad kaasa põlemisgaasidega. Alljärgnevalt käsitletakse peente kütuseosakeste silindrilises koldes (*a*) viibimise aja arvutamist<sup>[5]</sup>.

Lendtuhaga segunenud kütuseosakeste liikumist iseloomustab Reynolds'i kriteeriumi väärtus piirkonnas 0 kuni 25.

Kõige peenemate lendtuhaosakeste takistustegur on avaldatav kujul  $\xi = 24 \text{ Re}^{-1}$ , kui  $\text{Re} < 1$ . Nende osakeste koldes viibimise aja saab arvutada valemiga

$$\tau_{\text{v}} = \frac{L_{\text{v}}}{w_{\text{r}} - w_{\text{n}}} + \frac{w'_{\text{n}}}{g} \text{ sec}$$

milles  $L_{\text{v}}$  — osakese liikumisteekonna pikkus, m;

$w_{\text{r}}$  — põlemisgaaside keskmine reaalne kiirus, m/sec;

$w'_{\text{n}} = 0,545 \frac{\gamma_{\text{v}}}{\gamma_{\text{r}} \nu} d_{\text{v}}^2$  — osakese hõljumiskiirus, m/sec.

Osakeste näilist erikaalu  $\gamma_{\text{v}}$  võib teatud ligikaudsusega vaadelda konstantseks, võttes arutuste aluseks keskmise väärtuse. See on lubatav sellepärast, et kõigi koksilise jäägi osakeste näilised erikaalud ei ole võrdsed ja et suure tuhasisalduse tõttu muutub  $\gamma_{\text{v}}$  koldeprotsessis suhteliselt kitsastes piirides. Gaasi erikaalu  $\gamma_{\text{r}}$  ja kinemaatilise viskoossuse  $\nu$  korrutis on olemas põlemisgaaside koostisest ja temperatuurist.

Jämedamate lendtuhaosakeste koldes viibimise aja arvutamisel piirkonnas  $1 < \text{Re} < 25$  põhjustavad üldkasutatavad valemid küllaltki suure vea. Eksperimentaalsete uurimistulemuste läbitöötamisel selgus, et nende



osakeste takistustegurit võib avaldada kujul  $\zeta'' = 20 \cdot \text{Re}^{-2/3}$ , mis annab järgmise osakese hõljumiskiiruse valemi:

$$w''_n = 0,6775 \left( \frac{\gamma_q}{\gamma_r} \right)^{0,75} \frac{1}{\nu^{0,5}} d_u^{1,25} \text{ m/sec}$$

Osakese liikumise diferentsiaalvõrrandi integreerimine eespool esitatud  $\zeta''$  väärtuse arvestamisel võimaldab osakese liikumisaja määramiseks koostada suhteliselt lihtsad valemid. Osakese poolt läbitud teekonna pikkus  $L_q$  on määratav graafiliselt valemi  $L_q = w_r \cdot \tau - L'$  abil, milles

$$\tau = \frac{w''_n}{g} \left[ \arctg \omega_1^{1/3} - \arctg \omega_2^{1/3} - \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + \omega_1^{1/3})(1 - \omega_2^{1/3})}{(1 - \omega_1^{1/3})(1 + \omega_2^{1/3})} \right]$$

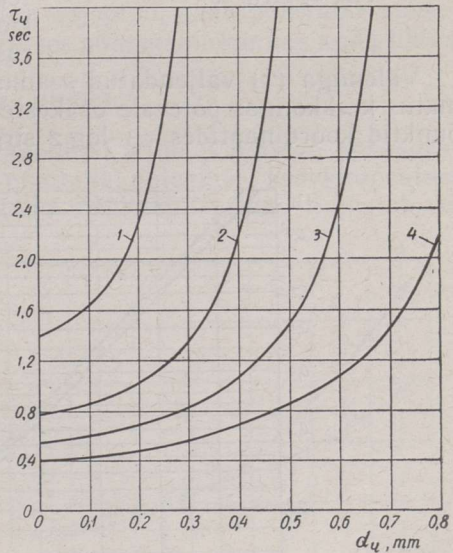
$$L' = \frac{(w''_n)^2}{g} \left[ \omega_1^{2/3} - \omega_2^{2/3} - \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + \omega_1^{2/3})(1 - \omega_2^{2/3})}{(1 - \omega_1^{2/3})(1 + \omega_2^{2/3})} \right]$$

kusjuures  $\omega_1$  tähistab suhet  $\frac{w_r}{w''_n}$  ja  $\omega_2 = \frac{w_{OTH}}{w''_n}$ ;

$w_{OTH}$  — osakese liikumise suhteline kiirus põlemisgaaside suhtes antud ajamomendil, m/sec.

Kasutades eespool käsitletud meetodit on tabelis 2 esitatud katseandmeil määratud erineva suurusega osakeste viibimise ajad koldes *a*. Joonisel 3 esitatud arvutustulemused näitavad, et suuremõõtmelised lendtuhaosakesed viibivad keevkihi-ga koldes märksa kauem kui peened osakesed.

Ülespoole laieneva ristlõikega kolde *b* puhul tuleb arvestada põlemisgaaside kiiruse pidevat muutumist koldes. Kuid tingituna seda tüüpi kolletes esinevatest pulsatsiooninähtustest ei anna need arvutused rahuldava täpsusega tulemusi.



Joon. 3. Kütuse- ja tuhaosakeste katsekoldes *a* viibimise aeg, olenevalt nende osakeste mõõtmetest.

### Peente osakeste põlemisest

Suure tuhasisaldusega kütuste põletamist käsitlevates uurimustes on põlemisprotsessi eranditult vaadeldud kulgevana sisemises difusioonilises põlemispiirkonnas. See seisukoht on täielikult õigustatud juhul, kui põlemisprotsess kulgeb küllalt kõrgetel temperatuuridel. Vastavalt sellele põhimõttele on Ä. Ots esitanud meetodi koksistunud tolmpõlevkivi põlemise teoreetiliseks arvutamiseks temperatuuridel üle 1000° C [6], mis andis katseliselt määratud andmetega hästi kokkulangevaid tulemusi.

Põlevaine väljapõlemist poorsetest materjalidest on teoreetiliselt ulatuslikumalt käsitletud I. Palejev jt. [7], kes annavad lahenduse nii sisemise kineetilise kui ka sisemise difusioonilise põlemise piirkonna kohta. Kasu-



tades ENSV TA Energeetika Instituudi uurimistööde materjale näitab L. Šilov [8], et I. Palejevi jt. poolt väljatöötatud skeem difusioonilise põlemise arvutamiseks võimaldab hea täpsusega määrata keevkihiga koldeprotsessis esinevat mehhaanilist kadu. Seejuures ei võta L. Šilov üldse arvesse kineetiliste faktorite mõju.

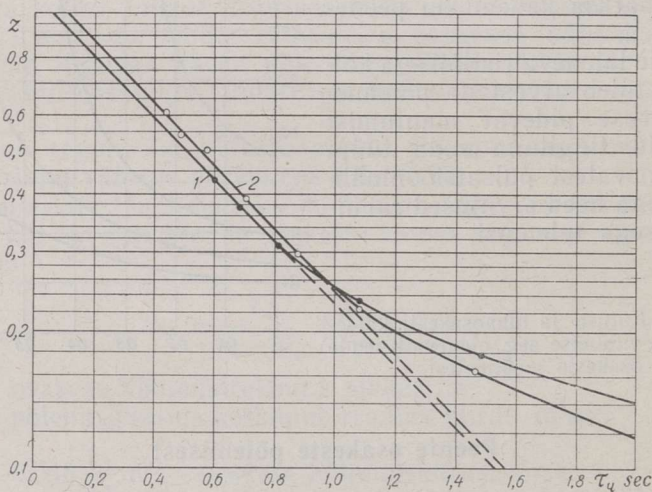
Käesolevas artiklis kirjeldatud katsetulemuste põhjal osutus aga vajalikuks üksikasjalisemalt analüüsida kineetiliste faktorite mõju põlevkivi koksilise jäägi peente osakeste põlemisele keevkihipealses koldeosas. Madalamatel koldetemperatuuridel (alla 900° C) määrab nende osakeste põlemisaste otseselt koldeprotsessis esineva mehhaanilise kao suuruse.

Vastavalt I. Palejevi jt. käsitlusele [7] avaldub sisemises kineetilises põlemispiirkonnas osaliselt põlenud kütuseosakestes sisalduva põlevaine suhteline jääk kujul

$$z = \exp(-AK\beta c\tau) \quad (1)$$

- milles  $\beta = \frac{12}{32} (1 + \xi)$  — stõhhiomeetriline koefitsient;
- $c = 1,429 \cdot 10^{-3} \frac{T_0}{T} \cdot r_{O_2}$  — hapniku kaaluline kontsentratsioon gaasilises keskkonnas, g/cm<sup>3</sup>;
- $AK = AK_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$  — tegur, mis iseloomustab tuharikaste kütuste sisemise kineetilise põlemise kiirust, cm<sup>3</sup>/g sec.

Valemiga (1) väljendatud seaduspärasuse kehtimisel langevad muutumatus keskkonnas põlevate osakeste suhtelisi põlevaine jääke väljendavad punktid koordinaatides  $\tau - \log z$  sirgetele, olenemata osakeste mõõtmeist.



Joon. 4. Põlevaine suhtelise jäägi olenevus osakeste koldes viibimise ajast.

Sellest lähtudes on joonisel 4 esitatud katsetel nr. 3 ja 4 (kõverad vastavalt 1 ja 2) määratud põlevaine suhtelised jäägid osaliselt põlenud koksilise jäägi erineva suurusega osakestes, olenevalt nende koldes viibimise ajast. Põlevaine suhtelise jäägi arvutamisel on tuha bilansi abil arvesse võetud ka peenendamisel tekkinud ning lendtuhka kandunud lendtolmu mõju.



Peenemate tuhaosakeste põlevaine suhtelist jääki märkivate punktide langemine sirgetele näitab, et nende osakeste põlemist võib vaadelda kulgevana sisemises kineetilises põlemispiirkonnas. Saadud sirgete kaldenurkade põhjal on võimalik orienteeruvalt määrata teguri  $AK_0$  näilist arvulist väärtust valemis (1). Eeldades, et koksiliste jääkide aktivisatsioonenergia väärtus  $E=26\,900$  kcal/mool<sup>[9]</sup> kehtib ka antud juhul, ning võttes  $\xi=0,33$ , saame  $AK'_0=2,82 \cdot 10^{10}$  cm<sup>3</sup>/g sec.

Saadud tulemus on 1,5 korda suurem L. Silovi poolt laboratoorselt määratud väärtusest  $AK_0=1,857 \cdot 10^{10}$  cm<sup>3</sup>/g sec. \* See erinevus on tingitud ühest küljest katsetel kasutatud põlevkivikoksides erinevatest omadustest, teisest küljest aga katsete tehnilisest täpsusest. Samuti ei ole antud juhul täiesti õige  $AK_0$  määramisel eeldada, et gaasilise keskkonna hapnikukontsentratsioon ja põlemistemperatuur on konstantsed. Praktiliselt annab sellest eeldusest lähtumine täpse tulemuse ka siis, kui kütuseosakeste põlemise vältel on keskkonna hapnikukontsentratsiooni ja põlemistemperatuuri vaheline seos

$$\Phi = r_{O_2} \frac{T_0}{T} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

ligikaudugi konstantse väärtusega.

Kasutades katsetulemuste põhjal määratud  $AK'_0$  väärtust kui koefitsienti, mis võtab arvesse kõik eespool märgitud asjaolud, saab põlevaine suhtelise jäägi arvutamiseks sisemises kineetilises põlemispiirkonnas anda lihtsa valemi

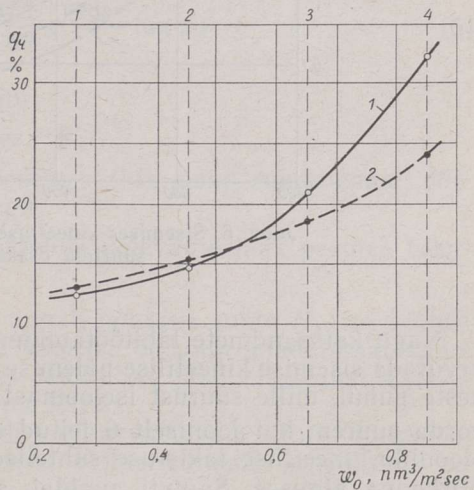
$$z = \exp(-20 \cdot 10^6 \Phi \tau) \quad (3)$$

Kuna koldeprotsessis esinevat mehhaanilist kadu põhjustab peaaesjalikult koksilise jäägi peente osakeste puudulik põlemine keevkihipealses koldeosas, siis saab valemis (3) kasutada mehhaanilise kao ligikaudseks

arvutamiseks. Tabelis 2 esitatud katseandmeil arvatud mehhaaniliste kadude võrdlemine katsetulemustega joonisel 5 näitab, et põlemisõhu puhumisel kiirustel alla  $0,6$  nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> sec on arvutuse tulemused sisemise kineetilise põlemise seaduspärasuste järgi rahuldava täpsusega. Suurematel puhumiskiirustel esinev kõrvalekaldu mine on tingitud põlemisgaasidega kaasaminevatest jämedamatest kütuseosakestest, mis põlevad ülekaalukalt sisemises difusioonilises põlemispiirkonnas.

Eesti põlevkivi koksiliste jääkide põlemisprotsessi arvutamist käsitlevates varemates töodes ei ole arvestatud kineetiliste faktore mõju. Sellepärast tuleb selle küsimuse juures peatuda põhjalikumalt.

Lähtudes I. Palejevi jt. poolt esitatud meetodikast<sup>[7]</sup> saab veel sise-



Joon. 5. Tegelik (kõver 1) ja arvatud (kõver 2) mehhaanilise kao võrdlus.

\* L. Silovi poolt avaldatud artiklites<sup>[8,9]</sup> on  $AK_0$  väärtus antud ekslikult valedes mõõtühikutes —  $AK_0=1,857 \cdot 10^{10}$  m<sup>3</sup>/kg sec.



mises kineetilises põlemispiirkonnas põlevate suurimate kerakujuliste tuharrikka kütuseosakeste läbimõõdu arvutamiseks tuletada valemi

$$d_{\max}^k = 2 \cdot b_k \sqrt{\frac{D_{10}}{AK_0} e^{\frac{E}{RT}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \frac{1}{\gamma_b^0}} \text{ cm} \quad (4)$$

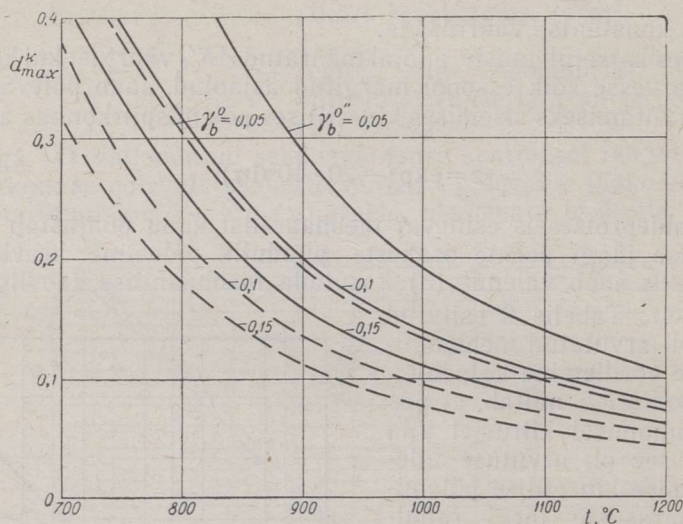
milles  $b_k = 1,5$  ja  $n = 1,75$ ;

$D_{10}$  — sisemise difusiooni koefitsient,  $\text{cm}^2/\text{sec}$ ;

$\gamma_b^0$  — põlevaine keskmine algkontsentratsioon kütuseosakeses,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Selle valemi kasutamisel tuleb paratamatult eeldada, et aktivisatsioonienergia väärtus  $E = 26\,900$  kcal/mool on vaadeldavate temperatuuride piirkonnas konstantne. Seda kinnitab joonise 4 järgi määratud  $AK_0'$  väärtuse küllalt hea vastavus laboratoorselt määratud  $AK_0$  väärtusele.

Kasutades eesti põlevkivi koksi kohta määratud  $AK_0$  ja  $D$  väärtusi [9, 10] esitatakse joonisel 6 valemiga (4) arvutatud  $d_{\max}^k$  olenevus põlemistemperatuurist ja põlevaine algkontsentratsioonist kütuseosakeses. Pidevad jooned väljendavad kustutamata koksi, kakendjooned kustutatud koksi kohta kehtivaid väärtusi.



Joon. 6. Sisemises kineetilises põlemispiirkonnas põleva suurima osakese läbimõõt.

Nagu katseandmete läbitöötamine näitas, võib põlevaine väljapõlemist arvutada sisemise kineetilise põlemise kohta kehtivate valemitega veel osakeste puhul, mille suurust iseloomustav sõela-ava mõõt on peaaegu kaks korda suurem kui jooniselt 6 leitud  $d_{\max}^k$ . See on tingitud põlemisreaktsioonide kineetilise takistuse suhteliselt suurest osatähtsusest ülemineku piirkonna alguses. Samuti avaldab siinjuures mõju kütuseosakeste ebaühtlane kuju, mistõttu ekvivalentsetes difusioonilises põlemise tingimustes põleva kerakujulise osakese läbimõõt tuleb võtta mõnevõrra väiksem osakese suurust iseloomustavast sõela-ava mõõdest.

Jämedamate, sisemises difusioonilises põlemispiirkonnas põlevate koksilise jäägi osakeste ärapõlemise täpne arvutamine keevkihiga koldes on raskendatud nende osakeste mõõtmete vähenemise tõttu, mida põhjustab koldeprotsessis toimuv mehhaaniline peenendumine.



### Kolde põhimõõtmete määramine

Eesti põlevkivi koksiliste jääkide põletamisel tuleb kollete põhimõõtmel ja põlemisrežiim valida nii, et nad tagaksid küllalt täieliku põlevaine välja-põlemise peentest kütuseosakestest. Oluline ei ole seejuures koldeprotsessis esineva mehhaanilise kao viimine miinimumini, vaid kinnipidamine lubatavast põlevainesisaldusest lendtuhas, et tuhk oleks veel kasutatav ehitusmaterjalide tootmiseks.

Sisemisel kineetilisel põlemisel on suhteline põlevaine jääk kõige suurem kütuseosakestes, mis viibivad koldes kõige lühemat aega. Sellest lähtudes võib kollete projekteerimisel aluseks võtta lubatava põlevainesisalduse kõige peenemate kütuseosakeste põlemisel tekkivas tuhas. Need osakesed viibivad koldes sama kaua kui põlemisgaasid.

Alljärgnevalt esitatakse kogu kõrguses muutumatuks jääva ristlõikega kolde põhimõõtmete määramise meetodi põhijooned. Põhiliseks konstruktiivseks parameetriks on valitud kolde kõrguse  $H_k$  ja põlemisõhu lubatava maksimaalse puhumiskiiruse  $\omega_0$  suhe.

Kineetilise põlemise kiirus onelab peale kütuse omaduste veel põlemistemperatuurist ja hapnikukontsentratsioonist põlemiskeskonnas. Viimati märgitud näitajad muutuvad üksiku kütuseosakese põlemise vältel. Nende muutumise seaduspärasust on praktiliselt peaaegu võimatu täpselt arvestada, kuna need muutused onelavad väga paljudest teguritest, nagu kolde jahtumiskao karakteristikast, kütuse tera peenusest, karbonaatide lagunemise iseärasustest jne. Üldiselt võib aga väita, et valemiga (2) avaldatud suurus  $\Phi$  ei muutu peente osakeste põlemise vältel kuigi laiades piirides. Seejuures on suurusel  $\Phi$  kõige väiksem väärtus osakese põlemise lõpul. Lähtudes eespool toodust on põhimõõtmete määramise valem (5) koostamisel arvestatud põlemissaaduste lõplikku koostist

$$\frac{H_k}{\omega_0} \geq 7700 \frac{\alpha(1+z)^2}{AK'_0 \beta (\alpha-1)} \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 e^{\frac{E}{RT}} (-\log z') \quad (5)$$

milles  $\alpha$  — koldeprotsessi liigõhutegur;

$T$  — põlemistemperatuur koldes, °K;

$1+z$  — tegur, mis väljendab põlemisgaaside mahu suurenemist, võrreldes kuiva põlemisõhuga;

$z'$  — lubatav maksimaalne suhteline põlevaine jääk peentes tuhasosakestes.

Valemiga (5) määratud tingimus annab nõutava suhte  $H_k$ :  $\omega_0$  küllalt suure tagavaraga, sest on arvestatud suuruse  $\Phi$  kõige madalamat väärtust. Tegelik põlevainesisaldus peenes lendtuhas jääb etteantust väiksemaks koldeprotsessis tekkiva lendtolmu tõttu.

Põlemisõhu puhumiskiirus  $\omega_0$  tuleb valida vastavalt kütuse fraktsioonilisele koostisele ning kolde kõrgusele. Kolde kütuslik erikoormus on arvatav valemiga

$$\frac{B}{F} = 36 \cdot 10^6 \frac{\omega_0}{\alpha \cdot b^p \cdot V^{0r} (100 - q_4)} \text{ kg/m}^2\text{h} \quad (6)$$

milles  $b^p$  — orgaanilise aine sisaldus tarbimiskütuses, %;

$V^{0r}$  — orgaanilise aine täielikuks põlemiseks teoreetiliselt vajalik põlemisõhu maht,  $\text{nm}^3/\text{kg}$ .



Lendtuhas sisalduvate suuremate tuhaosakeste mõõtmete määramiseks saab eespool esitatud osakeste liikumise valemite põhjal tuletada avaldise

$$d_{\max} = 0,308 \left( \omega_0 (1 + \kappa) \frac{T}{T_0} \right)^{4/5} \text{ mm} \quad (7)$$

Kõrgematel temperatuuridel koldes (üle 950° C) ja suurematel põlemisõhu puhumiskiirustel ( $\omega_0 > 0,6 \text{ nm}^3/\text{m}^2\text{sec}$ ) esineb maksimaalne põlevainesisaldus kõige jämedamates lendtuhaosakestes, millede põlemisele on avaldanud mõju sisemine difusioonitakistus. See nõuab kolde põhimõõtmete kontrollimist vastavalt difusioonilise põlemise seaduspärasustele. Tegelikult tekib aga põlevkivi koksiliste jääkide purustamisel ülekaalukalt peeneid fraktsioone, mis määravad ka terapeenuse jaotuse iseloomu. Seetõttu ei ole kolde põhimõõtmete kontroll alati vajalik.

Ülespoole laienevate kollete (b) dimensioneerimine on tunduvalt keerulisem, kuna koldes esineva osakeste pulseeriva liikumise täpne arvestamine ei ole võimalik. Üldjoontes on aga kasutatav eespool soovitatud meetod vastavate paranduskoefitsientidega.

Esitatud arvutusmeetodi praktilisel rakendamisel on otstarbekas kasutada selleks koostatud diagramme<sup>[5]</sup>, mis võimaldavad kiiresti orienteeruda kollete põhimõõtmete määramisel vastavalt ettenähtud põlemistemperatuurile ja liigõhutegurile. Seejuures omab erilist tähtsust koksiliste jääkide põletamisel saavutatavate temperatuuride arvutamine.

### Järeldused

Põlevkivi koksiliste jääkide põletamisel peeneteraliste kütuste põletamiseks kohandatud menetlustel toimub peente kütuseosakeste põlemine ülekaalukalt sisemises kineetilises põlemispiirkonnas.

Kineetilise põlemise faktorite tugeva mõju tõttu põlemise täielikkusele tuleb kollete arvutamisel arvestada koksiliste jääkide omadusi, põlemistemperatuuri ja kolde liigõhutegurit.

Kollete põhimõõtmel tuleb määrata vastavalt lubatavale põlevaine jäägile kõige peenemates lendtuhaosakestes, mis tagab tuha rahuldavad sideainelised omadused.

Kollete arvutamisel omab erilist tähtsust põlevkivi koksiliste jääkide põletamisel saavutatavate temperatuuride täpne arvutamine.

Koksiliste jääkide põlemiskineetiliste omaduste olenevus orgaanilise aine elementaarkoostisest teeb vajalikuks selle küsimuse edaspidise üksikasjalisema uurimise.

### KIRJANDUS

1. R. Uuesoo, Põlevkivi koksiliste jääkide põletamisest, «ENSV TA Toimetised — Tehn. ja Füüs.-Matem. Tead. Seeria», k. V, nr. 1, 1956.
2. R. Uuesoo, E. Jürisma, Keevkihiga kolde ratsionaalsete konstruktsioonide väljatöötamine põlevkivi koksiliste jääkide põletamiseks (aruanne), Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituut, Tallinn, 1955 ja 1956.
3. E. Jürisma, Keevkihiga kolde resti elavristolikest põlevkivikoksi põletamisel, «ENSV TA Toimetised — Tehn. ja Füüs.-Matem. Tead. Seeria», k. VII, nr. 3, 1958.
4. R. Uuesoo, Lihtsustatud meetodid põlemissaaduste temperatuuride määramiseks, «ENSV TA Toimetised — Tehn. ja Füüs.-Matem. Tead. Seeria», k. VII, nr. 1, 1958.
5. R. Uuesoo, Eesti põlevkivi koksiliste jääkide põletamine (aruanne), Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituut, Tallinn, 1958.
6. A. Ots, Põlevkivitolmu põlemine, Kandidaadidissertatsioon, Tallinna Polütehniline Instituut, Tallinn, 1958.



7. М. А. Гуревич, И. И. Палеев и Ю. А. Тимошин, Процесс выжигания горючих добавок из пористых материалов, ЖТФ, т. XXIV, вып. 4, 1954.
8. Л. А. Шилов, Горение кокса сланца-кукерсита в кипящем слое, «Газовая промышленность», № 6, 1958.
9. Л. А. Шилов, О диффузионных и кинетических свойствах кокса сланца-кукерсита, «Известия АН ЭССР. Серия технич. и физ.-мат. наук», т. VII, № 1, 1958.
10. Д. К. Коллеров, Е. С. Авдонина, Определение диффузионной характеристики и скоростей горения кусков сланцевого кокса, «Теплоэнергетика», № 8, 1958.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse  
2. II 1959

## К РАСЧЕТУ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СЖИГАНИЯ КОКСОВЫХ ОСТАТКОВ ЭСТОНСКОГО СЛАНЦА

Р. Н. Ууэсоо

Резюме

В статье приводятся основы расчета топочных устройств для сжигания коксовых остатков в кипящем слое. Опыты проводились в лабораторных топках двух конфигураций (рис. 1). Результаты экспериментальной работы показали, что механический недожог топочного процесса обусловлен неполным сгоранием мелких частиц в объеме топки над кипящим слоем. Максимальное количество горючего сохранялось в мельчайших частицах летучей золы (рис. 2). На величину механического недожога значительное влияние оказывали также температура горения и свойства топлива. Опыты показали, что в топочном процессе следует учитывать механическое размельчение частиц, разложение карбонатов в них и влияние их размеров на время пребывания частиц в топке (рис. 3).

Результаты обработки опытных данных показывают, что выгорание горючего из мелких частиц коксового остатка протекает преимущественно во внутренней кинетической области горения (рис. 4). Тот же результат дает и сравнение величины действительного механического недожога с результатами расчета по формулам внутрэнтокинетического горения (рис. 5). При более высоких температурах (выше 950°С) и увеличенных скоростях дутья ( $\omega_0 > 0,6 \text{ нм}^3/\text{м}^2 \text{ сек}$ ) увеличивается влияние сопротивления внутренней диффузии на горение более крупных частиц летучей золы.

Для определения основных размеров топки предложена формула (5), в которой  $H_k$  обозначает высоту топки и  $\omega_0$  — максимально допустимую скорость дутья. При выполнении условия, заданного формулой (5), содержание горючего в летучей золе не превышает допустимого ( $z'$ ).

В статье показана возможность практического применения теоретической трактовки расчета выгорания горючего из частиц многозольного топлива, предложенной И. И. Палеевым и др. [7].

Институт энергетики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
2 II 1959

## BERECHNUNG VON FEUERUNGSANLAGEN ZUR VERBRENNUNG VON KOKSRÜCKSTÄNDEN DES ESTNISCHEN BRENNSCHIEFERS

R. Uuesoo

Zusammenfassung

Vorliegender Aufsatz befasst sich mit den Grundlagen der Berechnung von Feuerungsanlagen zur Verbrennung von Koksrückständen in der Wirbelschicht. Entsprechende Versuche wurden laboratorisch in zwei verschieden gestalteten Feuerungen (Abb. 1) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser experimentellen Arbeit bezeugen, dass die beim Feuerungsprozess eintretenden Verluste durch Unverbranntes auf die unvollkommene Verbrennung der kleinen Partikelchen im Feuerraum über der Wirbelschicht zurückzuführen sind. Der Flugkoksverlust liegt daher am höchsten in den feinsten Teilchen der Flugasche (Abb. 2). Die Grösse der Verluste durch Unverbranntes hing auch von der Verbrennungstemperatur und von den Eigenschaften des Brennstoffs ab. Es zeigte sich,



dass im Feuerungsprozess die mechanische Zerkleinerung der Teilchen, die Dissoziation des darin enthaltenen Kalziumkarbonats und der Einfluss der Teilchengrößen auf die Dauer ihres Aufenthalts in der Feuerung zu berücksichtigen sind.

Die Durcharbeitung der Versuchsmaterialien ergibt, dass die Ausbrennung der brennbaren Substanz aus den kleinen Partikelchen des Koksrückstandes vornehmlich vom chemischen Reaktionswiderstand der «inneren Verbrennung» abhängt (Abb. 4). Das gleiche Resultat ergibt sich auch beim Vergleich der Grösse der faktischen Verluste durch Unverbranntes mit der nach den Formeln der Reaktionsgeschwindigkeit der inneren Verbrennung berechneten (Abb. 5). Bei höheren Temperaturen (über 950° C) und grösseren Luftgeschwindigkeiten ( $\omega_0 > 0,6 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \text{ sek}$ ) wächst die Einwirkung des physikalischen Reaktionswiderstandes der inneren Diffusion auf die Ausbrennung der Brennstoffsubstanz aus den grösseren Teilchen der Flugasche.

Zur Bestimmung der grundlegenden Ausmasse der Feuerung wird die Formel (5) vorgeschlagen, wo  $H_k$  die Höhe der Feuerung und  $\omega_0$  die maximale zulässige Luftgeschwindigkeit ist. Bei Einhaltung der Bedingungen der Formel (5) übersteigt der Inhalt der brennbaren Substanz in der Flugasche nicht das zulässige Mass ( $z'$ ).

Es wird im Aufsatz die Möglichkeit angedeutet, die von I. I. Palejew [7] vorgeschlagene theoretische Berechnung der Ausbrennung der brennbaren Substanz aschreicher Brennstoffe praktisch anzuwenden.

*Institut für Energetik der Akademie  
der Wissenschaften der Estnischen SSR*

Eingegangen  
am 2. Febr. 1959