

TOLMPÕLEVKIVIST ERALDUVATE LENDOSADE PÕLEMINE

A. OTS

Eesti NSV tähtsaima kohaliku tooraine — põlevkivi kasutamine nii energeetiliseks kui ka tehnoloogiliseks otstarbeks kasvab pidevalt. See tingib vajaduse põhjalikumalt tundma õppida põlevkivi põlemisprotsesse.

Tänapäeval on üheks peamiseks tahkekütuste kasutamiseviisiks nende põletamine tolmustatud kujul. Eesti põlevkivi kasutatakse tolmustatud kujul praegu ainult tahke šlaki eraldamisega kamberkolletes, mis on varustatud šahtveskitega. Tolmpõlevkivi põletamise tehnoloogia täiustamise, uute koldetüüpide loomise ja põlemisprotsesside arvutusalluste andmise küsimustega tegelebki praegu ENSV TA Energeetika Instituut. Käesolev artikkel on esimeseks neis küsimustes avaldamisele tulevast sarjast.

Tolmustatud kütuste põlemisprotsess jagatakse teatavasti kolmeks staadiumiks:

- 1) kütuseosakeste kuivamine ja kuumenemine süttimistemperatuurini,
- 2) kütuseosakestest termilisel lagunemisel eralduvate lendosade põlemine,
- 3) kütuseosakeste tahke jäägi — koksi põlemine.

Tolmustatud pruun-, kivisüte ja antratsiidide põlemisprotsesside uurimisel oletatakse, et nende termiline lagunemine ja selle tagajärjel eraldunud lendosade põlemine toimub osakeste väikeste dimensioonide tõttu silmapilkselt [1, 2, 5]. Selle lihtsustuse aluseks on tõsiasi, et mainitud kütuste lendosadesisaldus on väike ja et neil gaasi ning auru kujul esinevatel lendosadel on hapnikuga suur reageerimiskiirus ja lühike põlemisaeg. Uurimisobjektiks on sel puhul koksilise jäägi põlemine.

Eesti põlevkivi on tuntud suure lendosadesisaldusega (kuni 80—90% põlevkivi põlevainest) ning termiliselt raskesti laguneva kütusena. Seepärast ei saa tolmpõlevkivi põlemise uurimisel elimineerida lendosade põlemise mõju summaarsele põlemisprotsessile ja temperatuuriväljade kujunemisele koldes.

Niipalju kui autorile teada, ei ole tolmustatud kütuste lendosade põlemisprotsesside kohta ilmunud ühtegi eriuurimust. Üksikud uurimused [6, 9, 10] puudutavad seda küsimust riivamisi, seoses tahkete kütuste süttimistingimuste uurimisega.

Katseseade ja mõõtmiste meetodika

Katseseadmed tolmustatud kütuste põlemise uurimiseks on enamasti ehitatud kas isothermiliste või adiabaatiliste põlemiskambritega [3, 5, 8, 11], kus puuduvad soojust vastuvõtavad küttepinna. Tunduvalt vähem aga on ehitatud soojusvahetuspinadega katseseadmeid [4, 12].

Autor kasutas kõnesolevateks katseteks jahutatavate seintega kollet (joon. 1). Niisuguse koldetüübi eeliseks on see, et 1) kolde seinad ei kattu vedelšlakiga; 2) põlemisprotsessi on võimalik uurida soojusvahetustingimustes, tulemused on aga ülekantavad adiabaatilistesse j. t. tingimustesse; 3) on võimalus uurida soojusülekanne protsesse koldes eneses.

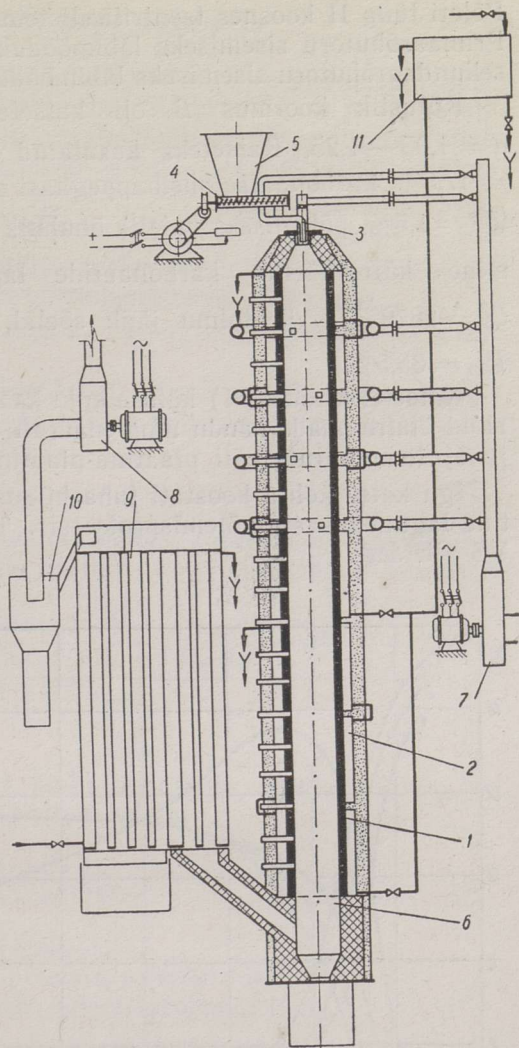
Katseseadme põhielemendiks on väljast jahutatav 3030 mm üldpikkusega vertikaalne silindriline šamott-toru, mille sise- läbimõõt on 210 mm ja seina paksus 20 mm. Kolde maht $V_T = 0,0982 \text{ m}^3$ ja soojusvahetuspind $H = 1,892 \text{ m}^2$. Šamott-toru ülaosa moodustab tüvikoonuse, mille tsentris on ava põletite paigutamiseks. Kolde alumisesse osasse on ehitatud kooniline punker tuha sadenemiseks. Tolmpõlevkivi transportitakse koldeesse koos primaarõhuga, millesse tolm söödetakse tigutransportööri abil.

Väljastpoolt ümbritsevad šamott-toru tihedalt 3 mm paksusest terasplekist valmistatud kaheksa silindrikujulist 350 mm välisläbimõõduga jahutusjärki, nn. kalorimeetrit, mis šamott-torule on paigutatud kahe sektsioonina. Ülemise sektsiooni moodustavad neli 250 mm kõrgust kalorimeetrit, mis üksteisest paiknevad 50 mm kaugusel, et võimaldada koldesse juhtida tangensiaalõhku. Alumine sektsioon koosneb neljast 400 mm kõrgusest kalorimeetrist, millede kaugus üksteisest on 30 mm ja mis üksteisest on eraldatud soojusisoleerimis kihiga. Kalorimeetreid toidetakse rõhu all oleva veega, mida juhitakse alumise sektsiooni alumisse ja ülemisse kalorimeetrisse, kust ta seejärel läbib järjestikku kõik nende kohal olevad kalorimeetrid.

Väljastpoolt on kolle kaetud 70 mm paksuse isoleerimis kihiga.

Koldegaasid väljuvad kolde alumise osa küljel paiknevast avast ja juhitakse telliskividest kanali kaudu veega jahutatavasse soojusvahetusseadmesse, kus nende temperatuur alandatakse ligikaudu 120°C -le. Jahutusseade on valmistatud vertikaalselt asetatud torudest ning kujutab enesest kolmekäigulist soojusvahetusseadet, mille alla on jäetud ruum tuha sadenemiseks. Jahutusseadmest juhitakse gaasid tsüklon-sadestuskambri ning seal edasi läbi tõmbeventilaatori korstnasse.

Katsetel kasutati kahte tüüpi põleteid. Põleti tüüp I oli ühetoruline; tema kaudu juhiti tolm koldeesse koos põlemiseks vajaliku õhuga (ilma sekundaarõhuta). Seda tüüpi põletid olid 27, 34, 40 ja 50 mm läbimõõduga.



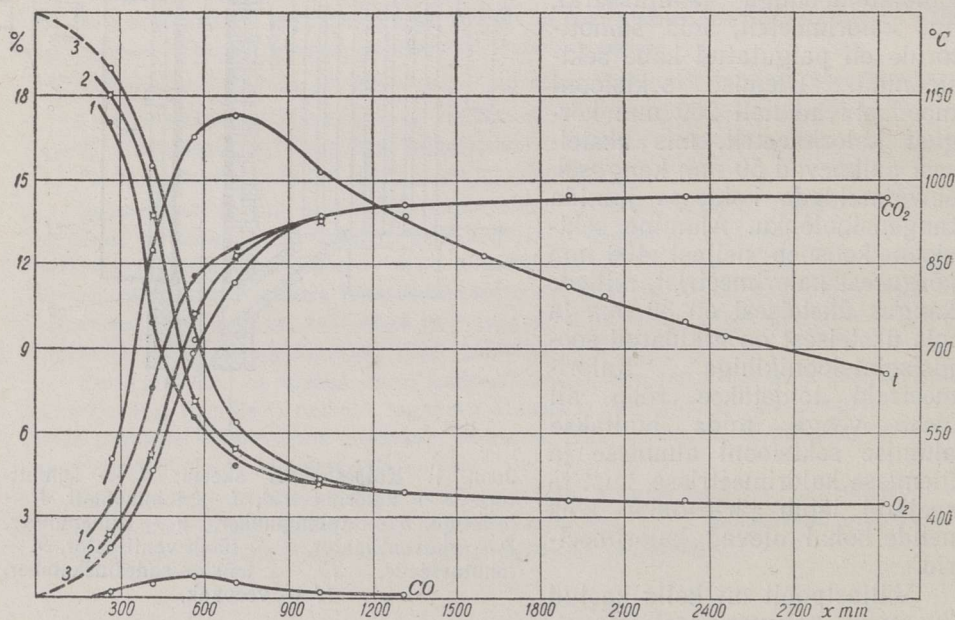
Joon. 1. Katseseadme skeem: 1 — šamott-toru, 2 — kalorimeetrid, 3 — tolmupõleti, 4 — toitetigu, 5 — tolmupunker, 6 — tuhapunker, 7 — õhuventilaator, 8 — tõmbeventilaator, 9 — jahutusseade, 10 — tsüklon-sadestuskamber, 11 — veepaak.

Põleti tüüp II koosnes tsentriliselt teineteise sisse asetatud kahest torust. Primaarõhutoru sisemiseks läbimõõduks oli 27 mm ja teda ümbritseva sekundaarõhutoru sisemiseks läbimõõduks 72 mm.

Kütuslik koormus B oli katsel 11–25 kg/h ja liigõhutegur $\alpha = 1,05 - 1,25$. Katseteks kasutatud tolmpõlevkivi tuhasisaldus $A^p = 47,5\%$, karbonaatse süsihappegaasi sisaldus $(CO_2^k)^p = 17,1\%$, niiskus $W^p = 1,5\%$, põlemiseks vajalik õhuhulk $\alpha = 1,0$ juures $V^0 = 3,06 \frac{nm^3}{kg}$, alumine kütteväärtus karbonaatide lagunemisastme $X_{CO_2} = 1,0$ juures $Q_{ii}^p = 2879 \frac{kcal}{kg}$ ja tolmu jääk sõelal, mille ava mõõt on 0,075 mm, $R_{75} = 35,5\%$.

Katsel mõõdeti: 1) kütuse kulu kaalumise teel ja 2) õhu hulgad tareeritud diafragma kaudu ning määrati: 3) gaaside kontsentratsiooniväljad ja 4) temperatuuriväli plaatina-plaatinaroodium termopaaridega.

Iga katse kohta koostati tuha bilanss, mille põhjal määrati karbonaatide lagunemisaste põlemisprotsessis. Tõmme kolde ülaosas hoiti 2 mm VS piirides.



Joon. 2 Põlemisprotsessi karakteristikad.

Joonisel 2 on esitatud ühel katsel saadud otseste mõõtmiste tulemused. Joonisele kantud suurused on mõõdetud alates põleti suudmest. Vaadeldaval katsel kasutati põleti tüüpi II, $B = 17,46$ kg/h, $\alpha = 1,22$, gaaside lõppkontsentratsioon $O_2'' = 3,5\%$ ja $CO_2'' = 14,4\%$. $X_{CO_2} = 0,86$. Gaaside kontsentratsioon kolde teljel on joonisel märgitud joontega 3, sama mõõdetuna 40 mm teljest — joontega 2 ja mõõdetuna 85 mm teljest — joontega 1. Gaaside temperatuurikõver (t) on kujundatud andmeil, mis on saadud mõõtes kolde tsentrist.

Katsematerjalide töötlemise meetodika

Põlemisprotsessi üheks tähtsamaks kineetiliseks näitajaks on põlemisaste η , mis iseloomustab protsessi kulgemise üksikuid faase ja mille all me mõistame vaadeldavaks ajamomendiks ära põlenud põlevaine kaalulise koguse suhet põlevaine kaalulise kogusega põlemisprotsessi algul. Seega:

$$\eta = 1 - \frac{G}{G_0}, \quad (1)$$

kus G — vaadeldavaks ajamomendiks põlemata põlevaine kogus ja G_0 — põlevaine kaaluline kogus põlemisprotsessi algul.

Põlemisprotsessi lõpul määrab suurus $1 - \eta$ ära põlemisel esinenud mehaanilise kao q_4 .

Tähistades põlemisprotsessis vaadeldaval ajamomendil esineva liigõhuteguri α' -ga ja protsessi lõpul α -ga, võime põlemisastme avaldada ka kujul:

$$\eta = \frac{\alpha}{\alpha'}. \quad (2)$$

Lähtudes koldegaaside ja põlevkivi elementaarkoostise kaalulisest bilansist, võime kuivade suitsugaaside analüüsi järgi arvutada α' seosega:

$$\alpha' = \frac{(26,63 + 4,67 X_{\text{CO}_2}) \frac{RO_2 + O_2 + 0,5 \text{ CO} - 0,5 \text{ H}_2 - \text{CH}_4 - 0,25 m \text{ C}_n \text{ H}_m}{RO_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + n \text{ C}_n \text{ H}_m} + 2,51}{29,14 + 4,67 X_{\text{CO}_2}} \quad (3)$$

Põlemisprotsessi lõpul $\alpha = \alpha'$.

Põlemisastme arvutamisel oletati, et karbonaatide lagunemisaste on proportsionaalne vahele $21 - O_2$. Vastavalt sellele

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{21 - O_2}{21 - O_2''} X_{\text{CO}_2}'', \quad (4)$$

kus O_2 — jooksev hapnikukontsentratsioon,

O_2'' — hapnikukontsentratsioon põlemisprotsessi lõpul,

X_{CO_2}'' — karbonaatide lagunemisaste põlemisprotsessi lõpul.

Katsetulemuste üldistamiseks ja põlemisprotsessi näitajate määramiseks kanti tulemused aegkoordinaadistikku. Pikkus- ja aegkoordinaadi vahelise seose määrab gaaside liikumiskiirus koldes, viimane omakorda aga on olemas gaaside tekke dünaamikast ja temperatuuri jaotusest koldeprotsessis. Seos põleti suudmest algava pikkuskoordinaadi (juhul kui gaasid omaksid koldes normaaltingimusi) x_0 ja antud kiiruste jaotusele piki kollet vastava koordinaadi x vahel avaldub kujus:

$$x_0 = \int_0^x \vartheta(x) dx \quad (5)$$

ehk suhteline normaalkoordinaat

$$X_0 = \frac{x_0}{D_0}, \quad (6)$$

kus $\vartheta = \frac{T_0}{T}$ kolde töötamisel normaalarõhuga,

T — koldegaaside temperatuur,

$T_0 = 273^\circ \text{ K}$,

D_0 — kolde siseläbimõõt ja

x_0 — normaalkoordinaat.

Koordinaatide X_0 ja x vaheline seos arvutati katsematerjalide läbitöötamise käigus lõplike vahede kaudu seosega

$$X_0 = \frac{1}{D_0} \sum_{i=0}^{i=n} 0,5(\vartheta_i + \vartheta_{i+1})(x_{i+1} - x_i). \quad (7)$$

Koldegaaside keskmise normaalkiiruse kolde vabaltvalitud ristlõikes võime avaldada kujus:

$$w_0 = \frac{dx_0}{d\tau} = \vartheta(x) \frac{dx}{d\tau} = \frac{\alpha BV^0}{F_0} [1 + \kappa(x)]; \quad (8)$$

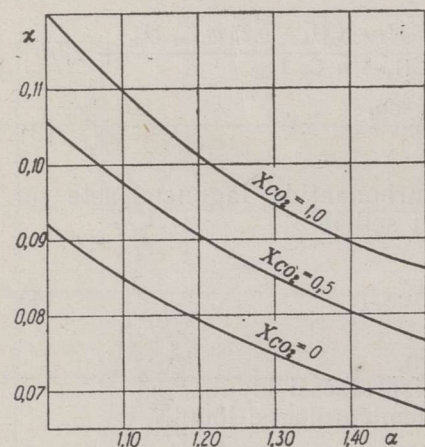
sellest võrdsusest leiame otsitava suuruse — aja:

$$\tau = \frac{F_0}{\alpha BV^0} \int_0^x \frac{\vartheta(x)}{1 + \kappa(x)} dx = \frac{F_0 D_0}{\alpha BV^0} \int_0^{X_0} \frac{dX_0}{1 + \kappa(X_0)}, \quad (9)$$

kus F_0 — kolde ristlõike pind,

V^0 — põlemiseks vajalik õhuhulk $\alpha = 1$ juures ja

κ — gaaside mahumuutumistegur.



Joon. 3. Gaaside mahumuutumise karakteristikad.

Gaaside mahumuutumistegur arvestab gaaside mahu suurenemist põlemise ja karbonaatide lagunemise tagajärjel ning avaldub:

$$\kappa = \frac{V_r}{\alpha V^0} - 1, \quad (10)$$

kusjuures gaaside summaarne maht

$$V_r = V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{CO} + V_{CH_4} + V_{H_2} + \dots + (\alpha - 1)V^0.$$

Täieliku põlemise korral on gaaside mahumuutumistegur liigõhuteguri ja karbonaatide lagunemistasme funktsioon.

Joonisel 3 on esitatud kasutatud tolmpõlvkivi täielikul põlemisel esinev gaaside mahumuutumistegur olenevalt liigõhutegurist ja karbonaatide lagunemistasimest. Nagu jooniselt nähtub, võib

põlvkivi põlemisel gaaside maht maksimaalselt suureneda ligikaudu 12%.

Avaldis (9) integreeriti katsematerjalide läbitöötamise käigus lõplike vahede kaudu:

$$\tau = \frac{F_0 D_0}{\alpha BV^0} \sum_{i=0}^{i=n} \frac{X_{0i+1} - X_{0i}}{1 + \kappa'' \frac{CO_{2i} + CO_{2i+1}}{2CO_2}}, \quad (11)$$

kus κ'' — gaaside mahumuutumistegur põlemisprotsessi lõpul ja

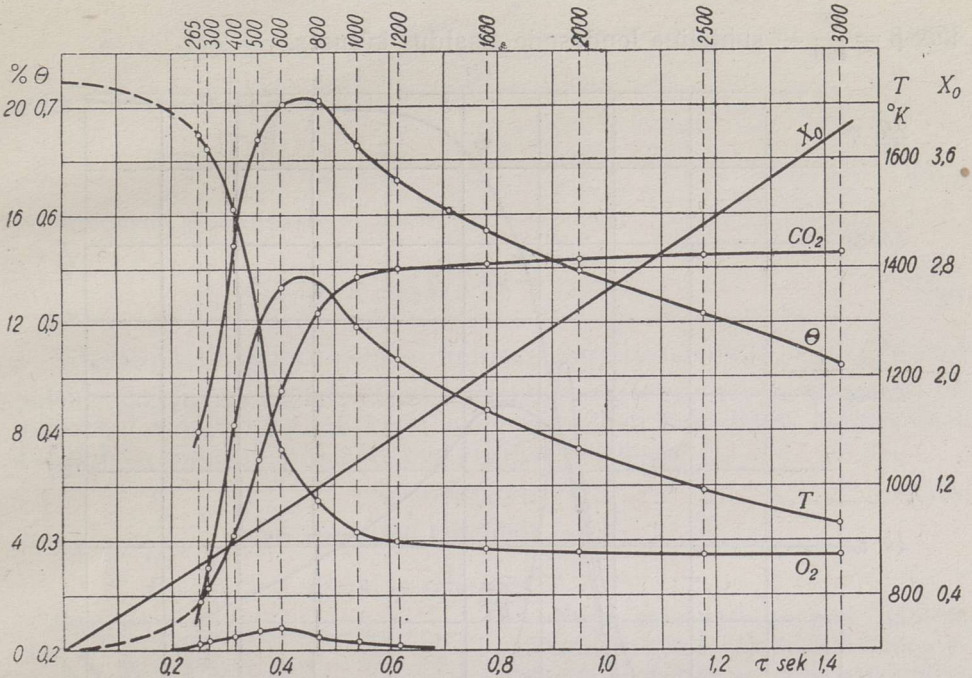
CO_2'' — süsinikdioksüüdi sisaldus põlemisprotsessi lõpul.

Siinjuures oletati, et gaaside mahumuutumistegur on proportsionaalne põlemisprotsessis tekkivale süsinikdioksüüdile.

Kui põlemisel ei esineks gaaside mahu muutumist, oleks aeg võrdeline suhtelisele normaalkoordinaadile.

Lendosade põlemisaste ja põlemisaeg

Joonisele 4 on kantud joonisel 2 esitatud katsetulemused aegdiagrammis, kusjuures kõik suurused vastavad kolde teljelt saadud andmetele.



Joon. 4. Põlemisprotsessi karakteristikad aegkoordinaadistikus.

Joonise ülääres olevad numbrid märgivad pikkuskoordinaati x , mis on saadud otsesel mõõtmisel. Joon X_0 esitab sõltuvust $X_0 = f(\tau)$, joon $\Theta = \frac{T}{T_{max}}$ suhtelist temperatuuri, kus T_{max} on adiabaatiline põlemistemperatuur liigõhuteguri α juures.

Joonisel 5 on esitatud põlemisastme ja tema tuletise olenevus ajast.

Jooniselt nähtub, et ajavahemikus 0,25 kuni 0,45 sekundini on põlemisprotsess väga intensiivne: 0,2 sekundi jooksul põleb ligikaudu 60% kogu põlevainest. Põlemisastme tuletis aja järgi on põlemiskiirust iseloomustavaks suuruseks. Tema kulg on peamiselt põlemisprotsessi temperatuuri ja hapnikukontsentratsiooni muutuse vahekorrast.

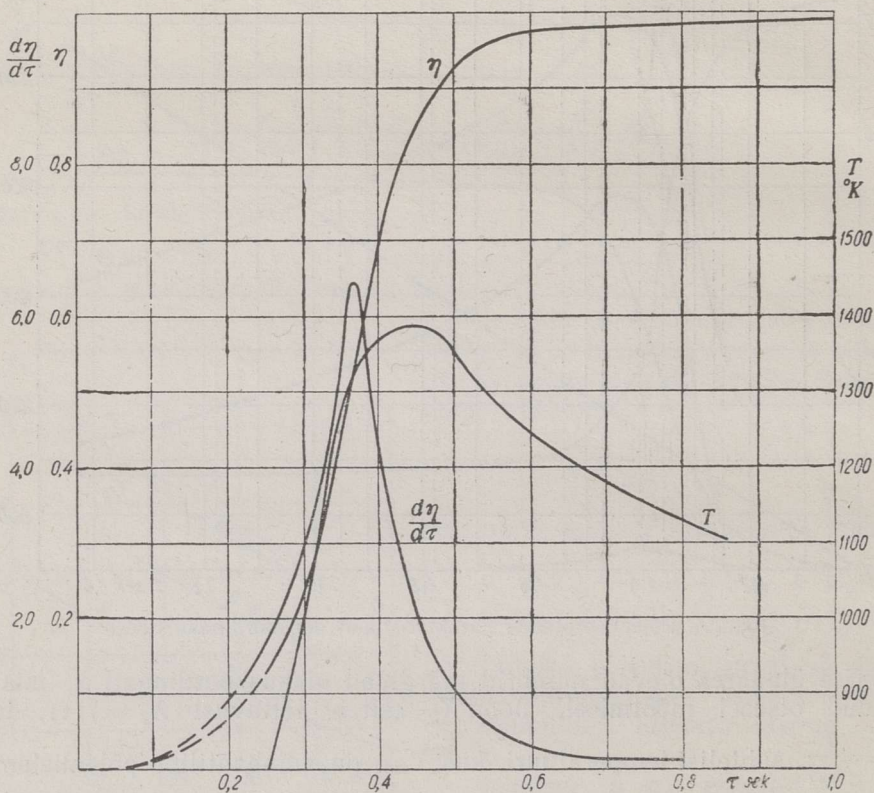
Poollogaritmilises koordinaadistikus $\ln \eta - \frac{1}{\tau}$ avaldub η kuni väärtuseni 0,80—0,85 sirgena. Joonisel 6 on poollogaritmilises koordinaadistikus toodud katsetulemused, mis on saadud 40 mm läbimõõduga põleti kasutamisel. Iga sirge vastab erisugusele kütuslikule koormusele, mis on omavahel paralleelsed.

Asjaolu, et põlemisaste sirgestub poollogaritmilises koordinaadistikus väärtusteni 0,80—0,85, võimaldab tolmpõlevkivi põlemisprotsessi käsitleda ligilähedaselt järjestikulise põlemiskeemi järgi. Vastavalt sellele oletame, et kuni põlemisastme väärtuseni 0,85 toimub ainult termilise lagunemise

tagajärjel eralduvate lendosade põlemine ning me võime tolmpõlevkivi põlemist analüüsida kahe iseseisva protsessina: 1) lendosade ja 2) koksi põlemisena. Kui tähistada lendosade põlemisaste η_{π} -ga ja koksi põlemisaste η_{κ} -ga, siis võime järjestikulise skeemi korral kirjutada, et

$$\eta = \beta \eta_{\pi} + (1 - \beta) \eta_{\kappa}, \quad (12)$$

kus $\beta = \frac{V^{\pi}}{100}$ — suhteline lendosade sisaldus kütuses.



Joon. 5. Põlemisastme ja tema tuletise olenevus ajast.

Joonisel 6 toodud sirgete lõikepunkt horisontaalsirgega $\eta = 1$ ehk $\ln \eta = 0$ määrab lendosade põlemisaja juhul, kui tolmpõlevkivi lendosade suhteline sisaldus oleks $\beta = 1$, lõikepunkt aga horisontaalsirgega $\ln \beta = \ln \eta$ — lendosade põlemisaja. Tähistame need suurused vastavalt $\tau_{\pi 0}$ ja τ_{π} -ga.

Poollogaritmilises koordinaadistikus esitatud sirget võib avaldada võrrandiga

$$\ln \eta = \ln a' - a \frac{1}{\tau}, \quad (13)$$

kus $\ln a'$ — sirge ordinaatlõik ja

a — sirge kaldenurga tangens.

Kui $\ln \eta = 0$, siis leiame, et

$$\ln a' = \frac{a}{\tau_{\pi 0}}. \quad (14)$$

Asendades suuruse $\ln a'$ võrrandisse (13), võime põlemisastme avaldada alljärgneval kujul:

$$\eta = e^{-a \frac{\tau_{n0} - \tau}{\tau_{n0} \tau}} \quad (15)$$

Lendosade põlemisajad τ_n ja τ_{n0} on omavahel seotud järgnevalt:

$$\tau_n = \frac{a}{\frac{a}{\tau_{n0}} - \ln \beta} \quad (16)$$

mille põhjal

$$\eta = e^{-a \frac{\tau_n - \tau}{\tau_n \tau}} - \ln \beta \quad (17)$$

ja lendosade põlemisaste:

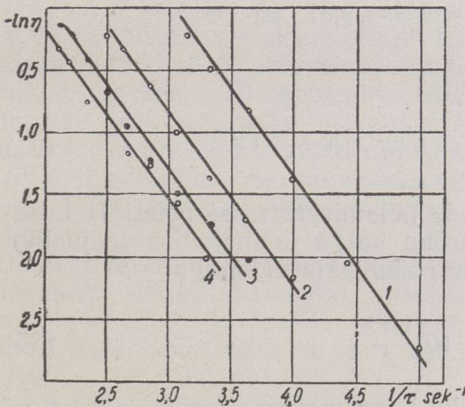
$$\eta_n = e^{-a \frac{\tau_n - \tau}{\tau_n \tau}} \quad (18)$$

Sirgete paralleelsus poollogaritmilises koordinaadistikus $\ln \eta - \frac{1}{\tau}$ antud põletitüübi juures näitab, et põlemisastme avaldises esinev suurus a on määratud ainult põleti tüübiga; olenevalt põleti suhtelisest läbimõõdust avaldub ta põleti tüübi I puhul empiirilise valemiga

$$a = 0,0987 \varphi^{-1,56}, \quad (19)$$

kus $\varphi = \frac{d}{D_0}$ — põleti suhteline läbimõõt ja

d — põleti sisemine läbimõõt.



Joon. 6. Põlemisastme logaritmi olenevus aja pöördväärtusest:

- 1 — $B = 18,00$ kg/h, $\alpha = 1,13$; 2 — $B = 15,37$ kg/h, $\alpha = 1,21$; 3 — $B = 12,12$ kg/h, $\alpha = 1,05$; 4 — $B = 11,82$ kg/h, $\alpha = 1,12$.

Nagu eelnevast seosest nähtub, väheneb a põleti läbimõõdu suurenemisega, mistõttu põlemisastmete kõverate tõus on järsum ning põlemiskiiruste maksimumide väärtused suuremad.

Valemities (17) ja (18) esineva teise suuruse, lendosade põlemisaja, määravad põlemisprotsessi temperatuuriline nivoo ning joa aerodünaamilised tingimused. Nagu nähtub jooniselt 6, vastab igale erinevale koormusele erinev sirge ning erinev lendosade põlemisaeg, kusjuures viimane väheneb koormuse ning põleti läbimõõdu suurenemisega. Põlemisprotsessi keskmise temperatuurilise nivoo ning joa aerodünaamiliste tingimuste iseloomustamiseks võib kasutada kolde mahulist soojuslikku erikoormust. Kolde mahulise soojusliku erikoormuse all mõistetakse praktikas tava-

liselt suurust $\frac{BQ_H^p}{V_\tau}$. Kuid suurus $\frac{BQ_H^p}{V_\tau}$ võib iseloomustada keskmist temperatuurilist nivood juhul, kui kolde töötaks konstantse liigõhuteguriga. Täp-

semaks koldeprotsessi iseloomustamiseks kasutame kolde mahulist soojuslikku erikoormust täiendatud kujul:

$$A = \frac{BI_0}{V_T} \frac{1 + \kappa_{\max}}{(1 + \kappa)\alpha} = \frac{BI_0}{V_T} \frac{T_{\max}}{T_{0\max}}, \quad (20)$$

kus $I_0 = Q_{II}^p + I_B$ — gaasidele maksimaalselt ülekanduv soojus,

V_T — kolde maht,

κ_{\max} — gaaside mahumuutumistegur $\alpha = 1,0$ juures,

T_{\max} — maksimaalne võimalik gaaside temperatuur α juures ja

$T_{0\max}$ — maksimaalne võimalik gaaside temperatuur $\alpha = 1,0$ juures.

Mahulist soojuslikku erikoormust on võimalik siduda aerodünaamiliste näitajatega, milledeks on õhu normaalkiirus arvutatuna kas kolde ristlõikele ω_{F_0} või põleti suudme ristlõikele ω_0 :

$$A = \frac{F_0 I_0}{\alpha V^0 V_T} \frac{1 + \kappa_{\max}}{(1 + \kappa)\alpha} \omega_{F_0} = \frac{F I_0}{\alpha V^0 V_T} \frac{1 + \kappa_{\max}}{(1 + \kappa)\alpha} \omega_0. \quad (21)$$

Tolmpõlevkivi lendosade põlemisaega olenevalt mahulisest soojuslikust erikoormusest ja põleti suhtelisest läbimõõdust on võimalik avaldada järgneva empiirilise valemiga:

$$\tau_n = 4,51 \cdot 10^4 \frac{\varphi^{-0,74}}{A}. \quad (22)$$

Arvestades viimati saadud seoseid, võime lendosade põlemisastme avaldada kujul:

$$\eta_n = \exp \left[2,19 \cdot 10^{-6} \frac{BI_0(1 + \kappa_{\max})}{\alpha V_T(1 + \kappa)} \varphi^{-0,82} - 9,87 \cdot 10^{-2} \varphi^{-1,56} \frac{1}{\tau} \right] \quad (23)$$

ja üldpõlemisaste

$$\eta = \exp \left[2,19 \cdot 10^{-6} \frac{BI_0(1 + \kappa_{\max})}{\alpha V_T(1 + \kappa)} \varphi^{-0,82} - 9,87 \cdot 10^{-2} \varphi^{-1,56} \frac{1}{\tau} - \ln \beta \right]. \quad (24)$$

Analoogiliselt analüüsides lendosade põlemisprotsessi põleti II kasutamise puhul, võime suhtelise primaarõhu hulga ja mahulise soojusliku erikoormuse kaudu arvutada lendosade põlemisaja valemiga:

$$\tau_n = 4,84 \cdot 10^5 \frac{\xi_1^{0,90}}{A}, \quad (25)$$

kus $\xi_1 = \frac{Q_I}{Q_I + Q_{II}}$ — suhteline primaarõhu kogus,

Q_I — primaarõhu kogus ja

Q_{II} — sekundaarõhu kogus.

Põletit II võib vaadelda kui põleti tüüpi I, kus igale kindlale õhuhulka vahekorrale vastab põleti tüübi I teatud läbimõõt. Tähistades selle läbimõõdu $\varphi_{\text{ЭК}}$ -ga, kujuneb seos $\varphi_{\text{ЭК}}$ ja ξ_1 vahel järgnevaks:

$$\varphi_{\text{ЭК}} = e^{-(3,22 + 1,22 \ln \xi_1)}. \quad (26)$$

Saadud tulemuste analüüsist selgub, et lendosade põlemisaeg suureneb primaarõhu koguse suurenemisega, millega kaasub $\varphi_{\text{ЭК}}$ vähenemine.

Katsetatud põletitüübile vastab poollogaritmilises koordinaadistikus sirge kaldenurga tangens $a = 2,32$. Selle põhjal võime lendosade põlemisastme avaldada ligikaudu kujul:

$$\eta_n = \exp \left[4,97 \cdot 10^6 \frac{BI_0(1 + \kappa_{\max})}{\alpha V_T(1 + \kappa)} \xi_1^{-0,90} - \frac{2,32}{\tau} \right] \quad (27)$$

ja üldine põlemisaste:

$$\eta = \exp \left[4,97 \cdot 10^6 \frac{BI_0(1 + \kappa_{\max})}{\alpha V_T(1 + \kappa)} \xi_1^{-0,90} - \frac{2,32}{\tau} - \ln \beta \right]. \quad (28)$$

Temperatuuri mõju lendosade põlemisele

Tahkete kütuste termilist lagunemisprotsessi võivad pidurdada kaks tegurit:

- 1) osakõste läbikuumenemisaeg ja
- 2) lagunemisaeg.

Tahkekütuste lagunemine ei alga vajaliku temperatuuri saavutamisel kohe, vaid teatud aeg pärast seda. Tükk-kütuste põlemisel pidurdab nende termilist lagunemist peamiselt esimene tegur, kuna kütusetükkide läbikuumenemiseks kulub aeg on tunduvalt pikem lagunemiseks vajalikust ajast. Tolmustatud kütuste, mille osakeste dimensioonid on aga väikesed (tavaliselt ei ületa 500μ), kasutamisel toimub osakeste läbikuumenemine peaaegu silmapilkselt, mistõttu termilist lagunemisprotsessi pidurdab peamiselt lagunemiseks vajalik aeg [7]. Asjaolu, et tolmpõlevkivi lagunemisprotsessi määrab termiliseks lagunemiseks kuluv aeg, kinnitavad ka katsetel saadud põlemiskarakteristikad. Neist näeme, et lendosade põlemisstaadiumis puuduvad sellised gaasilised komponendid nagu CH_4 , C_nH_m ja H_2 või esineb neid ainult väga väikestes kogustes ($0,1-0,3\%$). Samuti ei ületa ka CO-sisaldus maksimaalselt $1,5\%$, kõikides keskmiselt $0,5-0,8\%$ piirides. See näitab, et põlevkiviosakestest eralduvad lendosad reageerivad hapnikuga peaaegu silmapilkselt. Kui aga termiline lagunemine oleks pidurdatud osakeste läbikuumenemisajaga, siis peaksid koldegaasid lendosade põlemisstaadiumis sisaldama tunduval määral eespool mainitud gaasilisi komponente, mis on otseseks põlevkivi termilise lagunemise saaduseks, kuna lendosade põlemiskiirus on määratud peamiselt temperatuuriga.

Õeldust järeldub, et tolmu polüdisperssus ei avalda tema termilisele lagunemisele märgatavat mõju, mistõttu eespool toodud seosed põlevkivitolmust eralduvad lendosade põlemise kohta jäävad kehtima ka teistsuguste polüdisperssuste korral kui see, mida kasutati käesolevatel katsetel.

Lendosade põlemisprotsess on homogeenne, kusjuures põlemisreaktsioon toimub gaasiliste komponentide vahel. Selleks, et uurida temperatuuri mõju tolmpõlevkivist eralduvate lendosade põlemisele, kasutame üldtuntud reaktsiooni kiiruse võrrandit, avaldatuna hapnikukontsentratsiooni kaudu:

$$\frac{dc}{d\tau} = -k_0 e^{-\frac{E}{RT}} c, \quad (29)$$

kus c — hapnikukontsentratsioon,

k_0 — lendosade põlemiskiiruse konstant juhul, kui $T = \infty$,

E — aktivisatsioonienergia ja R — universaalne gaasikonstant,

τ — aeg.

Esitatud keemilise kineetika võrrand on kehtiv teatud lihtsustuste korral:

1) kui tolmpõlevkivist eralduvatel lendosadel on eraldumisprotsessi vältel ühtseid põlemiskineetilisi konstante ja

2) kui hapniku ning lendosade vaheline põlemisreaktsioon on esimest järku.

Põlemisaste ja hapnikukontsentratsioon, arvatuna koos mittetäielikuks põlemiseks vajaliku hapniku hulgaga, on omavahel seotud järgmiselt:

$$\frac{c}{c_0} + \frac{\eta}{\alpha} = 1, \quad (30)$$

millest leiame, et

$$c = \left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right) c_0 \text{ ja} \quad (31)$$

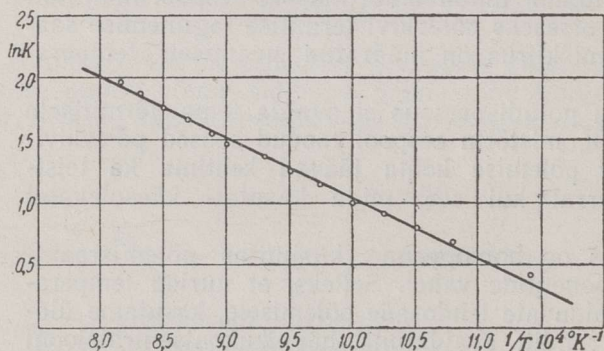
$$dc = -\frac{c_0}{\alpha} d\eta, \quad (32)$$

kus c_0 — hapniku algkontsentratsioon.

Pärast mõningaid teisendusi võime põlemisreaktsioonikiiruse võrrandi kirjutada:

$$\frac{1}{\alpha - \eta} \frac{d\eta}{d\tau} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (33)$$

Võrrandist (33) ja jooniselt 5 selgub, et põlemisprotsessi alguses suureneb lendosade põlemiskiirus kuni teatud temperatuurini. Alates teatud ajamomendist hakkab põlemiskiirus vähenema, vaatamata temperatuuri tõusule. Põlemise alguses, kui $\frac{d^2\eta}{d\tau^2} > 0$, on põlemiskiiruse suurenemine tingitud temperatuuri tõusust. Edasisele protsessi käigule hakkab avaldama mõju hapniku suhtelise kontsentratsiooni $1 - \frac{\eta}{\alpha}$ langus, mistõttu reaktsioonikiirus väheneb ja $\frac{d^2\eta}{d\tau^2} < 0$.



Joon. 7. Kiiruskonstandi logaritmi olenevus temperatuuri pöördväärtusest.

Kandes katse tulemused poollogaritmilisse koordinaadistikku

$$\ln\left(\frac{1}{\alpha - \eta} \frac{d\eta}{d\tau}\right) - \frac{1}{T}$$

näeme, et sõltuvus osutub sirgeks (joon. 7). Jooniselt võime leida lendosade põlemise kineetiliste konstantide väärtused:

$$E = 9450 \frac{\text{kcal}}{\text{kmool}} \text{ ja } k_0 = 303,0 \frac{1}{\text{sek.}}$$

Teades konstantide E ja k_0 väärtusi, võime mõningatel lihtsamatel juhtudel arvutada lendosade põlemisprotsessi.

Isotermiline põlemine. Lähtudes võrrandist (33) võime pärast muutujate eraldamist kirjutada:

$$\int_0^{\eta_n} \frac{d\eta_n}{\frac{\alpha}{\beta} - \eta_n} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \int_0^{\tau} d\tau. \quad (34)$$

Pärast integreerimist leiame lendosade põlemisastme olenevalt ajast:

$$\eta_n = \frac{\alpha}{\beta} \left[1 - \exp\left(-k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \tau\right) \right]. \quad (35)$$

Võrdsustades $\eta_n = 1,0$ ja avaldades τ , saame lendosade põlemisaja arvutamiseks järgmise seose:

$$\tau_n = \frac{e}{k_0} \ln \frac{\alpha}{\alpha - \beta}. \quad (36)$$

Adiabaatiline põlemine. Lähtume võrrandisüsteemist:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\frac{\alpha}{\beta} - \eta_n} \frac{d\eta_n}{d\tau} &= k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \\ CV' \frac{dT}{d\tau} &= I_0' \frac{d\eta_n}{d\tau} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

kus C — gaaside erisoojus,

V' — lendosade põlemisel tekkiv gaaside maht,

$I_0' = \beta Q_H^p + I_B$ — lendosade põlemisel koldeprotsessi antav maksimaalne soojus ja

I_B — õhu entalpia.

Kui oletada, et $V' = \beta V_r$ ja $I_0' = \beta I_0$, siis võime viimase võrrandi kirjutada kujus:

$$CV_r \frac{dT}{d\tau} = I_0 \frac{d\eta_n}{d\tau}, \quad (38)$$

mis võimaldab kasutada põlevkivi kohta koostatud $I - t$ -diagrammi, kusjuures arvutustes tuleb α asemel kasutada suurust $\frac{\alpha}{\beta}$.

Võrrandi (38) integreerimisel saame:

$$T = T_B + T_r \eta_n, \quad (39)$$

kus T_B — õhu temperatuur;

T_r — adiabaatiline põlemistemperatuur liigõhuteguri $\frac{\alpha}{\beta}$ juures.

Tegelikes kolletes (vt. joonis 2) esineb koldegaaside retsirkulatsioon, mille tagajärjel segunevad koldesse antav primaarsegu ja koldegaasid. Koldegaaside retsirkulatsioonitegur ε näitab, mitu kaaluühikut koldegaase seguneb koldesse antava õhu ühe kaaluühikuga. Koldegaaside retsirkulatsioonitegur on määratav alljärgnevast soojusbilansi võrrandist, kui oletada, et seguneval gaasil on adiabaatiline põlemistemperatuur:

$$(1 + \varepsilon)T = T_B + \varepsilon T_r + T_r \eta_n, \quad (40)$$

ning õhu ja gaaside erisoojused on võrdsed ega sõltu temperatuurist.

Avaldades viimasest võrrandist temperatuuri T ja asendades ta võrrandisüsteemi (37) esimesse võrrandisse, avaldub aeg olenevalt põlemisastmest järgnevalt:

$$\tau = \int_0^{\eta_n} \frac{\exp \left[\frac{E}{R \left(\frac{T_B + \varepsilon T_T}{1 + \varepsilon} + \frac{T_T}{1 + \varepsilon} \eta_n \right)} \right]}{k_0 \left(\frac{\alpha}{\beta} - \eta_n \right)} d\eta_n. \quad (41)$$

Avaldise (41) integreerimiseks kasutati funktsionaalridu, mille tulemuseks on:

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{1}{k_0} \ln \frac{\alpha}{\alpha - \beta \eta_n} + \frac{(1 + \varepsilon)E}{RT_T k_0} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(-\frac{(1 + \varepsilon)E}{RT_T} \right)^n}{(n + 1)! \left(\frac{\alpha}{\beta} + \varepsilon + \frac{T_B}{T_T} \right)^{n+1}} \times \right. \\ & \times \ln \left(1 + \frac{T_T}{T_B + \varepsilon T_T} \eta_n \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\left(\frac{(1 + \varepsilon)E}{R(T_B + \varepsilon T_T)} \right)^k - \left(\frac{(1 + \varepsilon)E}{R(T_B + \varepsilon T_T + T_T \eta_n)} \right)^k \right] \times \\ & \left. \times \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(-\frac{(1 + \varepsilon)E}{RT_T} \right)^n}{k(n + k + 1)! \left(\frac{\alpha}{\beta} + \varepsilon + \frac{T_B}{T_T} \right)^{n+1}} \right\}. \quad (42) \end{aligned}$$

Lendosade põlemisaeg adiabaatilises keskkonnas on leitav tingimusest $\eta_n = 1$.

Analoogiliselt eelnevale on aeg ja põlemisprotsessi temperatuur seotud järgnevalt:

$$\tau = \frac{1}{k_0} \int_{\frac{T_B + \varepsilon T_T}{1 + \varepsilon}}^T \frac{e^{\frac{E}{RT}}}{\frac{\alpha}{\beta} \frac{T_T}{1 + \varepsilon} + \frac{T_B + \varepsilon T_T}{1 + \varepsilon} - T} dT, \quad (43)$$

ja pärast integreerimist:

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{1}{k_0} \ln \frac{\frac{\alpha}{\beta} \frac{T_T}{1 + \varepsilon}}{\frac{\alpha}{\beta} \frac{T_T}{1 + \varepsilon} + \frac{T_B + \varepsilon T_T}{1 + \varepsilon} - T} + \frac{E}{R \cdot k_0} \left\{ \ln \frac{\frac{\alpha}{\beta} \frac{T_T}{T_B + \varepsilon T_T}}{\frac{\alpha}{\beta} \frac{T_T}{1 + \varepsilon} + \frac{T_B + \varepsilon T_T}{1 + \varepsilon} \frac{1}{T} - 1} \times \right. \\ & \times \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(-\frac{E}{R} \right)^n}{(n + 1)! \left(\frac{\alpha}{\beta} \frac{T_T}{1 + \varepsilon} + \frac{T_B + \varepsilon T_T}{1 + \varepsilon} \right)^{n+1}} + \\ & \left. + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\left(\frac{(1 + \varepsilon)E}{R(T_B + \varepsilon T_T)} \right)^k - \left(\frac{E}{RT} \right)^k \right] \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(-\frac{(1 + \varepsilon)E}{RT_T} \right)^n}{k(n + k + 1)! \left(\frac{\alpha}{\beta} + \varepsilon + \frac{T_B}{T_T} \right)^{n+1}} \right\}. \quad (44) \end{aligned}$$

Valemi (41) ja (42) analüüsist selgub, et põlemine on seda intensiivsem, mida suurem on koldegaaside retsirkulatsioonitegur. Teguri ε mõju põlemise intensiivsusele on seda suurem, mida väiksem ta on.

Katsete tulemustest selgub, et koldegaaside retsirkulatsioonitegur on seda suurem, mida väiksem on kasutatava põleti läbimõõt. Põleti tüübi I puhul katsetel kasutatud põletite läbimõõtude intervallis $\varepsilon = 2 - 4$; põleti II kasutamisel kõikus $\varepsilon = 0,8 - 1$ piirides.

Kokkuvõte

Tolmpõlevkivi põlemisprotsessile avaldab tunduvat mõju lendosade põlemine, milleks kulub kuni 30% põlemise üldajast ning mis on määrav temperatuurivälja kujunemisele koldes.

Töös antakse mitteisotermiliste põlemisprotsesside karakteristikate aegkoordinaadistikku kandmise ja uurimise meetoodika.

Lendosade põlemisajale avaldab mõju kasutatava põleti tüüp ning kolde soojuslik erikoormus.

Lendosade põlemisprotsessi olenevus temperatuurist on väljendatav esimest järku keemilise kineetika võrrandiga, mille põhjal määrati lendosade põlemise aktivisatsioonenergia $E = 9450 \frac{\text{kcal}}{\text{kmool}}$ ja eksponentsiaalkordaja

$$k_0 = 303,0 \frac{1}{\text{sek.}}$$

KIRJANDUS

1. А. П. Баскаков, Воспламенение и горение пылеугольного топлива и аэродинамика топки с щелевыми горелками, Диссертация, МЭИ, 1953.
2. Б. В. Канторович, К расчету процесса горения потока топлива, Изв. АН СССР. ОТН, № 12, 1952.
3. Б. Д. Кацнельсон, Горение угольной пыли под давлением, Топочные устройства, Труды ЦКТИ, 1954.
4. Г. Ф. Кнорре, Исследование процессов горения натурального топлива, Госэнергоиздат, 1948.
5. А. Б. Резняков, Горение пылеугольного факела, Диссертация, ЭНИН АН СССР, 1955.
6. В. М. Третьяков, Лабораторные исследования динамики воспламенения и выгорания пылеугольной аэровзвеси, Изв. ВТИ, № 11, 1957.
7. Л. Н. Хитрин, Физика горения и взрыва, М., 1957.
8. В. В. Чукин, Исследование и рационализация горелочных устройств для сжигания угольной пыли, ВНИИТ, 1955.
9. С. Л. Шагалова, Анализ исследований по воспламенению топлив в замкнутых сосудах, Отчет ЦКТИ, 1953.
10. С. Л. Шагалова, Исследование взрываемости натуральных топлив, Отчет ЦКТИ, 1950.
11. A. A. Orning, Combustion of Pulverized Fuel, Trans. ASME, Vol. 46, No. 5, 1942.
12. H. R. Hazard and F. D. Buckley, Experimental Combustion of Pulverized Coal at Atmospheric and Elevated Pressures, Trans. ASME, Vol. 70, No. 6, 1948.

ГОРЕНИЕ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ СЛАНЦЕВОЙ ПЫЛИ

А. А. Отс

Резюме

В целях изучения процесса горения сланцевой пыли и совершенствования технологии ее сжигания в Институте энергетики АН ЭССР проводятся соответствующие исследования. В настоящей статье рассматриваются результаты исследований, которые проводились в вертикальной топочной камере сгорания диаметром 210 мм и высотой 3030 мм, изготовленной из шамотной трубы с охлаждаемыми стенками. Схема опытной установки приведена на рис. 1.

В статье дается метод для исследования неизотермических процессов горения. Результаты, полученные из опыта, проведенного по этому методу, описываются посредством формулы (9) временной диаграммы. Рассматривается также кинетика горения летучих веществ и показывается, что характеристика горения летучих зависит от используемого типа горелки, от удельной тепловой нагрузки топки и от соотношения вторичного и первичного воздуха [формулы (23) и (27)]. Кроме того определяется зависимость скорости горения летучих от температуры, а также значение энергии активации реакции горения летучих ($E = 9540$ ккал/кмоль) и предэкспоненциального множителя ($k_0 = 303,0$ 1/сек.). Даются формулы для расчета процесса горения в изотермических (35) и в адиабатических условиях (42).

Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
8 III 1958

ON THE COMBUSTION OF THE VOLATILE MATTER OF PULVERIZED OIL SHALE

A. Ots

Summary

In order to study the process of combustion of pulverized oil shale as well as to improve the technology of the combustion, corresponding tests are being carried out at the Institute of Energetics of the Academy of Sciences of the Estonian S.S.R. The present article discusses the results of these tests which have been carried out in a vertical combustion chamber with cooled walls made of a fire-clay tube with an internal diameter of 210 mm and a height of 3030 mm. The diagram of the testing installation is given on Drawing 1.

The article presents a method of studying the non-isothermal combustion processes. The results of the tests are expressed by means of a time diagram relation (9). Likewise, the article deals with the combustion-kinetics of volatile matter and shows that the combustion of the volatile matter depends on the type of the burner used, and the ratio of secondary to primary air [relations (23) and (27)].

The dependence of the rate of combustion of volatile matter on temperature is likewise being determined, as well as the values of combustion kinetical constants $E = 9540$ kcal/kmol and $k_0 = 303.0$ 1/sec. Equations are given for the computation of the combustion process in isothermal conditions by equation (35) and in adiabatic conditions by equation (42).

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

Received
March 8, 1958