

## KOKSISTUNUD TOLMPÕLEVKIVI PÕLEMISEST\*

A. OTS

Vaatamata sellele, et põlevkivi on tuntud lendosaderikka kütusena, on tema põlemisel, nagu kivisüite ja mõnede teistegi kütuste puhul, suur osatähtsus koksilisel jäägil, mille põlemiseks kulub tunduvalt rohkem aega kui lendosade põlemiseks. Käesolevas artiklis analüüsitakse koksistunud tolm põlevkivi põlemist määravaid fakteoreid ning antakse arvutusvalemid üksiku osakese ja osakeste süsteemi põlemisaegade määramiseks. Esitatud teoreetilised seisukohad on kontrollitud katsetulemustega.

### Koksistunud tolm põlevkivi osakese põlemispiirkond ja põlemiskeem

Koksistunud tolm põlevkivi põlemisprotsessi uurimisel võtame aluseks põlevkiviosakese püsivamahulise põlemise printsiibi, mille kohaselt osakese põlemisel ja termilisel lagunemisel ei muutu tema välised geomeetrilised dimensioonid [6,7]. Põlevkiviosakese mahu säilivus põlemisprotsessis on seletatav tema struktuurilise ehitusega [2,6].

Koksistunud tolm põlevkivi osakese põlemispiirkonna selgitamiseks analüüsime kineetiliste ja difusiooniliste faktorite mõju suurust osakese põlemisprotsessile.

Sfäärilise kujuga süsinikuosakese välispinnalist põlemiserikiirust võime vaadelda ligikaudu proportsionaalsena suurusele

$$\frac{1}{\text{Nu}D} + \frac{1}{\psi}, \quad (1)$$

kus  $\Delta$  — osakese läbimõõt;

$D$  — välise difusiooni tegur;

$\text{Nu} = \frac{\alpha_d \Delta}{D}$  — Nusselti massiülekande kriteerium;

$\alpha_d$  — massiülekande tegur;

$\psi$  — reageeriva gaasi ülekande tegur.

Avaldises (1) olev suurus  $\frac{\Delta}{\text{Nu}D}$  väljendab süsinikuosakese põlemise füüsikalist külge, määrates kindlaks hapniku difusiooni osakese välispinnale. Suurus  $\frac{1}{\psi}$  määrab põlemise keemilise ehk nn. kineetilise ja osakesesise difusiooni, mis sõltub keemilise reaktsiooni intensiivsusest ja osa-

\* Käesolev on järg autori artiklile [1], milles käsitleti tolm põlevkivi termilisel lagunemisel eralduvate lendosade põlemist ja esitati katseseadme kirjeldus ning uurimismetoodika.

kesesisesest difusioonist. L. Hitrini järgi [8] võib reageeriva gaasi ülekande teguri põlemise primaarreaktsioonide puhul ligikaudu väljendada seosega

$$\psi = \sqrt{k_i D_i} \left( \operatorname{cth} \frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{k_i}{D_i}} - \frac{1}{\frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{k_i}{D_i}}} \right) + k, \quad (2)$$

kus  $k_i = S_i k$  — süsinikusiseste primaarreaktsioonide kiiruskonstant;  
 $D_i$  — süsinikusisese difusiooni tegur;  
 $S_i$  — süsinikusiseste pooride pind mahuühikus.

Kui parameeter  $\frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{k_i}{D_i}} \leq 0,55$ , siis ei avalda osakesesisesed difusioonitingimused põlemisele märgatavat mõju ning suurust  $\psi$  võime vaadelda kui kineetilist suurust, mistõttu hapniku kontsentratsioon osakese sisemuse ükskõik millises punktis võrdub hapniku kontsentratsiooniga osakest ümbritsevas gaasilises keskkonnas.

Koksistunud tolmpõlevikivi põlemispiirkond selgub tabelist 1, mille koostamisel on kasutatud järgmisi tähistusi ja arvvaartusi:

$$D_i = 0,052 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \frac{\text{cm}^2}{\text{sek}}; \quad (3)$$

$$k_i = 1,857 \cdot 10^{10} e^{-\frac{26900}{RT}} \frac{\text{cm}^3}{\text{g sek}}, \quad (4)$$

kus  $T$  — osakese absoluutne temperatuur;  
 $R$  — universaalne gaasikonstant;  
 $T_0 = 273^\circ \text{K}$ .

Tabel 1

Osakese absoluutne temperatuur $T^\circ \text{K}$	Osakese läbimõõt $\Delta$ mm	Sisemiste reaktsioonide kiiruskonstant $k_i \frac{1}{\text{sek}}$	Sisemise difusiooni tegur $D_i \frac{\text{cm}^2}{\text{sek}}$	Parameeter $\frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{k_i}{D_i}}$
1200	0,010	$1,39 \cdot 10^4$	0,69	0,071
	0,050	$1,39 \cdot 10^4$	0,69	0,355
	0,100	$1,39 \cdot 10^4$	0,69	0,710
	0,200	$1,39 \cdot 10^4$	0,69	1,412
	0,300	$1,39 \cdot 10^4$	0,69	2,132
1400	0,010	$7,07 \cdot 10^4$	0,93	0,138
	0,050	$7,07 \cdot 10^4$	0,93	0,689
	0,100	$7,07 \cdot 10^4$	0,93	1,378
	0,200	$7,07 \cdot 10^4$	0,93	2,757
	0,300	$7,07 \cdot 10^4$	0,93	4,135
1600	0,010	$23,40 \cdot 10^4$	1,14	0,226
	0,050	$23,40 \cdot 10^4$	1,14	1,132
	0,100	$23,40 \cdot 10^4$	1,14	2,264
	0,200	$23,40 \cdot 10^4$	1,14	4,528
	0,300	$23,40 \cdot 10^4$	1,14	6,792



Tabelist 1 selgub, et sisemised kineetilised faktorid ei avalda põlemisprotsessile praktiliselt mõju. Temperatuuri ja osakese läbimõõdu suurenemisega suureneb parameeter  $\frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{k_i}{D_i}}$  ja põlemisprotsess eemaldub veelgi sellest põlemispiirkonnast, kus on määravaks ainult kineetilised tingimused.

Võttes arvesse tolmu polüdisperssust, kus süsteemi põlemiskiiruse ja põlemisaja määrab jämedamate fraktsioonide põlemise iseloom, tuleme tabeli põhjal järeldusele, et koksistunud tolmpõlevkivi põlemine toimub põhiliselt difusioonilises põlemispiirkonnas.

Tuginedes püsivamahulise põlemise printsiibile ja võttes arvesse lihtsustust, mille kohaselt me koksistunud tolmpõlevkivi põlemist käsitame difusioonilise põlemisena, võime anda osakese põlemisele järgmise skeemi: Põlemise algmomendil määravad osakese põlemise ainult välised difusioonitingimused (siinjuures vaatleme tolmpõlevkivi osakese põlemist järjestikulise skeemi alusel). Põlemise edasisel kulgemisel kandub reaktsioon üle osakese sisse, kus tuhakoorig eraldab ta välisest gaasilisest keskkonnast ja osakese sisse moodustub südamik, mille sees ei toimu põlemisreaktsioone; need toimuvad ainult südamikku ja tuhakoorigut ühendaval pinnal.

### Koksistunud tolmpõlevkivi osakese põlemine

Koksistunud tolmpõlevkivi osakese põlemise uurimisel eeldame, et osakesesise difusioonitakistuse määrab tuhakoorigu paksus<sup>[3]</sup>, kusjuures hapniku kulu ärapõlenud süsiniku kohta väljendub stöhhiomeetriselises vahekorras  $\frac{12}{32} (1 + \xi)$ . Tegur  $(1 + \xi)$  arvestab süsiniku pinnal üheaegselt moodustuvat süsinikdi- ja -monooksüüdi vahet, võrdudes arvuliselt ühe mooli hapnikuga reageerivale süsiniku moolide arvule. Kui põlemine toimub ainult CO<sub>2</sub>-ks, siis  $\xi = 0$ , kui ainult CO-ks, siis  $\xi = 1$ ; CO<sub>2</sub> ja CO üheaegse moodustumise korral võib  $\xi$  vahemikus  $1 < \xi < 0$  omada mitmesuguseid väärtusi. Kui aga  $\frac{CO_2}{CO} = 1$ , siis  $\xi = 0,33$ . Kuna tolmuosakeste läbimõõt on väike, siis jätame arvestamata sekundaarreaktsioonide ja CO homogeense põlemise mõju põlemiskiirusele<sup>[5]</sup>. Tuginedes öeldule ja oletades, et osake on hapniku juurdepääsu suhtes quasistatsionaarses olukorras, võime sfäärilise kujuga koksistunud tolmpõlevkivi osakese põlemiskiiruse isotermilises keskkonnas põlemisel avaldada kujul:

$$K_s = \frac{12}{32} (1 + \xi) \frac{c}{\frac{\Delta}{NuD} + \frac{\Delta}{2D_i} \left( \frac{\Delta}{\delta} - 1 \right)}, \quad (5)$$

kus  $c$  — hapniku kaaluline kontsentratsioon osakest ümbritsevas gaasilises keskkonnas;

$\delta$  — osakese põlemata südamiku läbimõõt.

Põlemiskiiruse võime avaldada ka järgmisel kujul:

$$K_s = -\frac{1}{2} \gamma_k \left( \frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{d\delta}{d\tau}, \quad (6)$$

kus  $\gamma_k = \sigma(1 - \beta) \gamma_c \frac{\Gamma^p}{100}$  — koksistunud osakeses oleva põlevaine (süsiniku) näiv erikaal;



$\sigma = \left(\frac{\Delta_c}{\Delta}\right)^3$  — osakese koksistumise protsessis tema läbimõõdu muutust arvestav tegur;

$\Delta$  — koksistunud osakese läbimõõt;

$\Delta_0$  — põlevkiviosakese läbimõõt;

$\beta$  — põlevkivi suhteline lendosadesisaldus;

$\gamma_c$  — põlevkivi näiv erikaal;

$\Gamma^p$  — põlevaine sisaldus põlevkivi tarbimisesaines;

$\tau$  — aeg.

Avaldame põlemiskiiruse avaldises (5) oleva hapnikukontsentratsiooni korrutisena  $c = c_0 \cdot f(\alpha; \eta)$ , milles  $c_0$  — hapniku algkontsentratsioon hapendajas ja  $f(\alpha; \eta)$  — suurus, mis sõltub liigõhutegurist ja põlemisprotsessi iseloomust. Seda võtet kasutades võime pärast seoste (5) ja (6) võrdsustamist ning integreerimist kirjutada:

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{\gamma_k \Delta^2}{(1+\xi)c_0 D} \int_0^1 \frac{\frac{6}{Nu} \rho^2 + \frac{3}{m} (\rho - \rho^2)}{f(\alpha; \eta)} d\rho, \quad (7)$$

$$\text{kus } \rho = \frac{\delta}{\Delta}, \quad m = \frac{D_i}{D}.$$

Avaldises (7) näeme, et integraali märgi ees olev suurus ei sõltu põlemise iseloomust (põlemine konstantse või muutuva hapnikukontsentratsiooni tingimustes), vaid osakese läbimõõdust ja temperatuurist. Integraali märgi järel olev avaldis aga sõltub põlemise iseloomust ja on määratud liigõhuteguri ja põlemisastme või põlemata südamikü läbimõõduga. Tähistame need suurused vastavalt  $q(\Delta; T)$  ja  $\Phi(\alpha; \eta)$ . Seega:

$$\tau = q(\Delta; T) \cdot \Phi(\alpha; \eta). \quad (8)$$

Arvestades hapniku kaalulise ja mahulise kontsentratsiooni vahetõrka seosega:

$$c = c_0 \gamma_{O_2}^0 \frac{T_0}{T}$$

ja gaaside mahu muutust põlemisel teguriga  $\kappa$  [1], võime kirjutada:

$$q(\Delta; T) = \frac{2}{9} \frac{\gamma_k (1+\kappa) \Delta^2}{(1+\xi)c_0 \gamma_{O_2}^0 \frac{T_0}{T} D_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,75}}, \quad (9)$$

kus  $c_0$  — hapniku mahuline kontsentratsioon.

$\gamma_{O_2}^0$  — hapniku erikaal normaalingimustes.

Kui  $\gamma_k = 0,056 \text{ g/cm}^3$ ;  $\kappa = 0,09$ ;  $\xi = 0,33$ ;  $c_0' = 0,21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;

$\gamma_{O_2}^0 = 1,429 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ;  $D_0 = 0,18 \text{ cm}^2/\text{sek.}$ , saame:

$$q(\Delta; T) = 203 \cdot 200 \Delta^2 T^{-0,75}. \quad (10)$$

$q(\Delta; T)$  väärtused, olenevalt tolmuosakese läbimõõdust ja temperatuurist, on esitatud joonisel 1.

Osakese põlemise üheks lihtsamaks erijuhuks on põlemine konstantse hapnikukontsentratsiooniga keskkonnas. Vastavalt sellele  $f(\alpha; \eta) = 1$ , s. t. hapniku kontsentratsioon ei ole sõltuv põlemisastmest ning seose (7) põhjal võime kirjutada:

$$\Phi(\alpha; \eta_k) = \frac{2}{Nu} (1 - \rho^3) + \frac{1}{m} \left( \frac{1}{2} - \frac{3}{2} \rho^2 + \rho^3 \right). \quad (11)$$

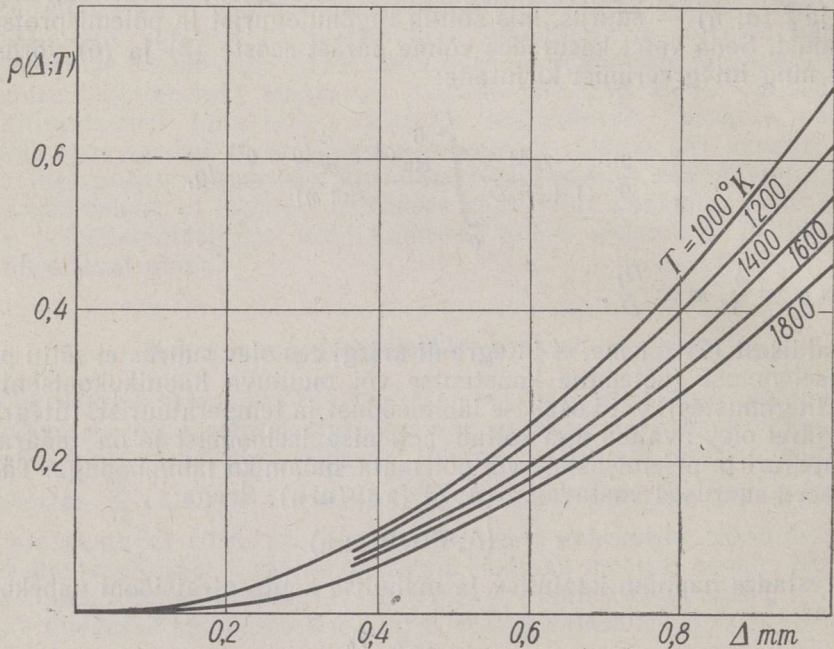


Kuna  $\rho = \sqrt[3]{1 - \eta_k}$ , saame selle seose avaldada ka osakese põlemisastme  $\eta_k$  kaudu:

$$\Phi(\alpha; \eta_k) = \frac{2}{Nu} \eta_k + \frac{1}{m} \left[ \frac{3}{2} - \eta_k - \frac{3}{2} (\sqrt[3]{1 - \eta_k})^2 \right]. \quad (12)$$

Osakese põlemise aja aga leiame tingimusest  $\eta_k = 1$ . Vastavalt sellele

$$\Phi_0(\alpha; \eta_k) = \frac{2}{Nu} + \frac{1}{2m}. \quad (13)$$



Joon. 1.  $\rho(\Delta; T)$  olenevus osakese läbimõõdest ja temperatuurist.

Sellest seosest selgub, et põlemise lõppmomendil, kui  $m = 0,29$  ja  $Nu = 2,0$ , ületab sisemine difusiooniline takistus ligikaudu 1,72-kordselt välise difusioonilise takistuse.

Osakese põlemisel muutuva hapnikukontsentratsiooniga keskkonnas võime hapniku kontsentratsiooni ja põlemisastme koki põlemistsoonis seostada omavahel alljärgnevalt:

$$c = c_{0k} \left( 1 - \frac{\eta_k}{\alpha_k} \right), \quad (14)$$

mis vastab ühtlasi ka monofraktsioonilise koosseisuga tolmu põlemisele.

Sealjuures  $c_{0k}$  — hapniku kontsentratsioon koki põlemistsooni alguses;

$\alpha_k$  — liigõhutegur, mis määrab kindlaks koki põlemistsoonis oleva ja teoreetiliselt vajaliku hapniku koguse;  $\alpha_k = 1,0$  korral vastab segu stöhhiomeetrilisele vahekorrale.

Tolmu põlemisel toimub koksistunud osakeste põlemine hapniku kontsentratsioonil, mille määravad protsessi üldine liigõhutegur  $\alpha$  ja suhteline



lendosadesisaldus  $\beta$ . Tähistades 1 kg põlevaine põlemiseks vajaliku õhu koguse  $\alpha = 1$  juures  $V^\circ$  ja põlevaine ühes kilogrammis oleva lendosade põlemiseks vajaliku koguse  $V_a^\circ$ -ga, võime 1 kg põlevaine kohta järele jääva õhu koguse arvutada vahena:

$$\Delta V^\circ = \alpha V^\circ - V_a^\circ. \quad (15)$$

Küllaldase täpsusega võime kirjutada, et  $V_a^\circ = \beta V^\circ$ ; sel puhul avaldub hapniku kontsentratsioon koksi põlemistsooni alguses:

$$c_{ok} = \frac{c_0' V^\circ}{V_2} (\alpha - \beta), \quad (16)$$

küs  $c_0' = 0,21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  — hapniku mahuline algkontsentratsioon õhus (hapendajas);  
 $V_2$  — põlemisel tekkiv gaaside maht.

Kuna  $V_2 = \alpha(1 + \varkappa)V^\circ$ , võime arvutada  $c_{ok}$  seosega:

$$c_{ok} = \frac{c_0'}{1 + \varkappa} \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}\right) = \frac{c_0'}{1 + \varkappa} \left[1 - \frac{\beta}{\alpha_k(1 - \beta) + \beta}\right], \quad (17)$$

sest  $\alpha_k = \frac{\alpha - \beta}{1 - \beta}$ .

Asetades seose (17) seosesse (14) ja viimase avaldisse (7) võime  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  avaldada kujul:

$$\Phi(\alpha_k; \eta_k) = 6\left(\alpha_k + \frac{\beta}{1 - \beta}\right) \left\{ \int_0^1 \frac{\varrho^2}{\text{Nu} \left[1 - (1 - \varrho^3) \frac{1}{\alpha_k}\right]} d\varrho - \int_0^1 \frac{\varrho(\varrho - 1)}{2m \left[1 - (1 - \varrho^3) \frac{1}{\alpha_k}\right]} d\varrho \right\} \quad (18)$$

ja peale integreerimist:

$$\begin{aligned} \Phi(\alpha_k; \eta_k) = & \left(\alpha_k + \frac{\beta}{1 - \beta}\right) \left\{ \left(\frac{2}{\text{Nu}} + \frac{1}{m}\right) \ln \frac{\alpha_k}{\alpha_k - \eta_k} - \right. \\ & - \frac{1}{2m} \left[ \ln \frac{\left[\left(\sqrt[3]{\alpha_k - 1}\right)^2 - \sqrt[3]{\alpha_k - 1} + 1\right] \left(\sqrt[3]{\alpha_k - 1} + \sqrt[3]{1 - \eta_k}\right)^2}{\left[\left(\sqrt[3]{\alpha_k - 1}\right)^2 + 1\right] \left[\left(\sqrt[3]{\alpha_k - 1}\right)^2 - \sqrt[3]{\alpha_k - 1} \sqrt[3]{1 - \eta_k} + \left(\sqrt[3]{1 - \eta_k}\right)^2\right]} \right. \\ & \left. \left. + \frac{3}{\sqrt[3]{3} \sqrt[3]{\alpha_k - 1}} \left( \arctg \frac{2 - \sqrt[3]{\alpha_k - 1}}{\sqrt[3]{3} \sqrt[3]{\alpha_k - 1}} - \arctg \frac{2\sqrt[3]{1 - \eta_k} - \sqrt[3]{\alpha_k - 1}}{\sqrt[3]{3} \sqrt[3]{\alpha_k - 1}} \right) \right] \right\}. \quad (19) \end{aligned}$$

Valemite (19) ja (8) abil võime arvutada koksistunud tolmpõlevkivi osakese põlemisastme olenevuse ajast;  $q(\Delta; T)$  väärtused on sel puhul, nagu osakese põlemisel konstantse hapnikukontsentratsiooni tingimusteski, arvutatavad seosega (9) või leitavad jooniselt 1, kui lähteandmed vastavad diagrammi koostamise tingimustele. Osakese põlemise aeg on aga leitav tingimusest  $\eta_k = 1$ .



### Polüdispersse tolmusüsteemi põlemine

Vaatleme tolmusüsteemi, mille osakeste läbimõõdud on vahemikus  $0 - \Delta_{\max}$ , kusjuures  $\Delta_{\max}$  — polüdispersses süsteemis leiduva kõige jämedama osakese leppeline läbimõõt. Arvutuste lihtsustamise eesmärgil käsitlevad V. Pomerantsev ja S. Sagalova [4] süsteemi põlemist olenevalt süsteemis leiduva kõige jämedama osakese põlemisest. Mainitud meetodiga ei ole antud juhul võimalik anda täpset analüütilist lahendust, kuna tegemist on keeruliste kuupvõrranditega.

Kasutame järgmisi tähistusi:

$$\rho_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{\Delta_{\max}} \quad \text{— kõige jämedama koksistunud osakese läbipõlemata südami suhteline läbimõõt;}$$

$$\Delta_0 = \frac{\Delta}{\Delta_{\max}} \quad \text{— osakese suhteline läbimõõt;}$$

$$\rho = \frac{\delta}{\Delta_{\max}} \quad \text{— osakese läbipõlemata südami suhteline läbimõõt.}$$

Oletame, et vaadeldaval ajamomendil põlevad polüdispersse osakeste-süsteemi kõik osakesed võrdsetes hapnikukontsentratsiooni ja temperatuuri tingimustes. Sellisel juhul võime üheaegselt rakendada süsteemi kõige jämedama läbimõõduga ning meelevaldse läbimõõduga osakesele seoseid (5) ja (6), mille tulemusena saame kirjutada võrrandi:

$$\int_1^{\rho_{\max}} \left[ \frac{1}{Nu} \rho^2_{\max} + \frac{1}{2m} \rho_{\max} (1 - \rho_{\max}) \right] d\rho_{\max} = \int_{\Delta_0}^{\rho} \left[ \frac{\Delta_0}{Nu} \rho^2 + \frac{\Delta_0}{2m} \rho (1 - \rho) \right] d\rho \quad (20)$$

ja peale integreerimist:

$$\left( \frac{2}{3} \frac{1}{Nu} - \frac{1}{3m} \right) (\rho^3_{\max} - 1) + \frac{1}{2m} (\rho^2_{\max} - 1) = \Delta_0 \left( \frac{2}{3} \frac{1}{Nu} - \frac{1}{3m} \right) (\rho^3 - \Delta_0^3) + \frac{\Delta_0}{2m} (\rho^2 - \Delta_0^2). \quad (21)$$

Saadud võrrand (21) seob süsteemis leiduva meelevaldse läbimõõduga osakese põlemise süsteemis leiduva kõige jämedama osakese põlemisega. See võimaldab meil uurida põlemisprotsessi olenevalt kõige jämedama osakese põlemisest, mistõttu süsteemi põlemise uurimine taandub süsteemis leiduva kõige jämedama osakese põlemisprotsessi uurimiseks.

Võrrand (20) on kuupvõrrand, millel on keeruline analüütiline lahend. Võrrandi lahendamiseks kasutati graafo-analüütilist meetodit, mille tulemusena ehitati diagramm (joon. 2). Diagrammi ehitamisel asendati osakese läbipõlemata südami suhteline läbimõõt osakese põlemisastmega vahekorras  $\eta_k = 1 - \left( \frac{\rho}{\Delta_0} \right)^3$ , vaadeldes seejuures parameetrina süsteemi kõige jämedama osakese läbipõlemata südami suhtelist läbimõõtu  $\rho_{\max}$ . Diagramm võimaldab leida süsteemis oleva meelevaldse läbimõõduga osakese põlemisastme, kui meil on teada  $\rho_{\max}$ . Näiteks, kui  $\rho_{\max} = 0,850$ , siis on süsteemis olevatel suhtelise läbimõõduga  $\Delta_0 \leq 0,5$  osakestel põlemisaste  $\eta_k = 1,0$ , s. t., et nad on täielikult põlenud; suhtelise läbimõõduga  $\Delta_0 > 0,5$  osakesed aga on põlenud osaliselt ja nende põlemisaste  $\eta_k < 1$ . Süsteemi kõige jämedama läbimõõduga osakesel  $\Delta_0 = 1,0$  on aga põlemisaste  $\eta_k = 1 - 0,850^3 = 0,386$ .



Polüdispersse tolmusüsteemi põlemise aja määrab süsteemi kõige jämedama osakese põlemise aeg. Põlemise algmomendil  $\tau = 0$ , koksistunud tolmpõlevkivi polüdispersse süsteemi põlemisaste  $\eta_{k\phi} = 0$  ja süsteemi kõige jämedama osakese põlemisaste  $\eta'_{\max} = 0$ . Mingil ajamomendil  $\tau_1$ , mis olgu väiksem süsteemi põlemise koguajast, on suhtelise läbimõõduga  $\Delta_0 \leq \Delta_{01}$  osakeste põlemisaste  $\eta_k = 1$ ; suhtelise läbimõõduga  $\Delta_0 > \Delta_{01}$  osakeste põlemisaste  $\eta_k < 1$ , s. t., et nad on põlenud osaliselt.

Tolmpõlevkivi põlemisel ei muutu ajalisel tema sõelumise «mahuline» karakteristik. Tema põlevaine kaaluline sõelumiskarakteristika, väljendatuna põlevaine jäägina vastaval sõelal, on seejuures aga funktsioon ajast. Kui osakeste läbimõõdud on  $0 - \Delta_0$ , võrduv põlevaine sõelumiskarakteristika ajamomendil  $\tau_1$  väärtusele  $R'_{\Delta_0} = 1,0$ . Oletades, et polüdispersses osakesüsteemis on osakestel läbimõõduga  $\Delta_0 > \Delta_{01}$  põlemisaste  $\eta_k = 0$ , võime süsteemi põlemisastme olenevalt lähtetolmu sõelumiskarakteristikast avaldada kujul:

$$\eta_{k\phi} = \int_0^{\Delta_{01}} \frac{\partial}{\partial \Delta_0} (1 - R_{\Delta_0}) d\Delta_0 = 1 - R_{\Delta_{01}}.$$

Suhtelise läbimõõduga  $\Delta_0 > \Delta_{01}$  osakesed, mis on osaliselt põlenud, omavad tegelikult aga teatud põlemisastme väärtuse, nagu nähtub jooniselt 2.  $\Delta_{01}$  kuni  $\Delta_{01} + d\Delta_0$  läbimõõduliste osakeste üksikute tolmufraktsioonide läbipõlemise mõju avaldub süsteemi põlenud astmele kompleksina

$$\eta_k \frac{\partial}{\partial \Delta_0} (1 - R_{\Delta_0}) d\Delta_0,$$

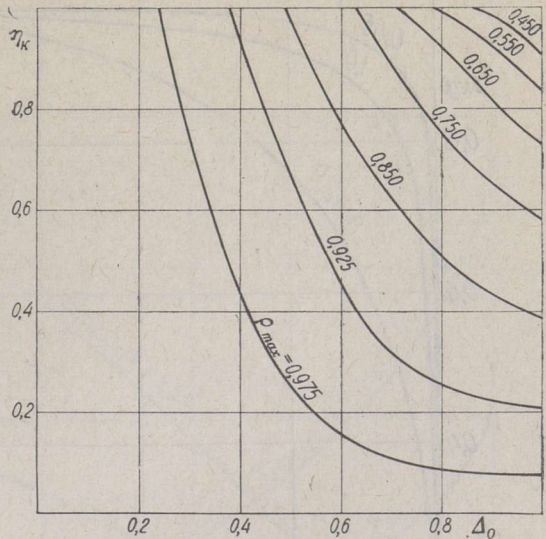
kusjuures valitud  $\Delta_{01} \geq \Delta_{01}$ . Summeerides üksikute fraktsioonide põlemisastme väärtused, võime püsivamahuliselt põlevate osakeste polüdispersse süsteemi põlemisastme anda kujus:

$$\eta_{k\phi} = 1 - R_{\Delta_0} - \int_{\Delta_0}^1 \eta_k \frac{\partial R_{\Delta_0}}{\partial \Delta_0} d\Delta_0. \quad (22)$$

Tolmpõlevkivi sõelumiskarakteristika allub küllaldase täpsusega alljärgnevale jaotusseadusele:

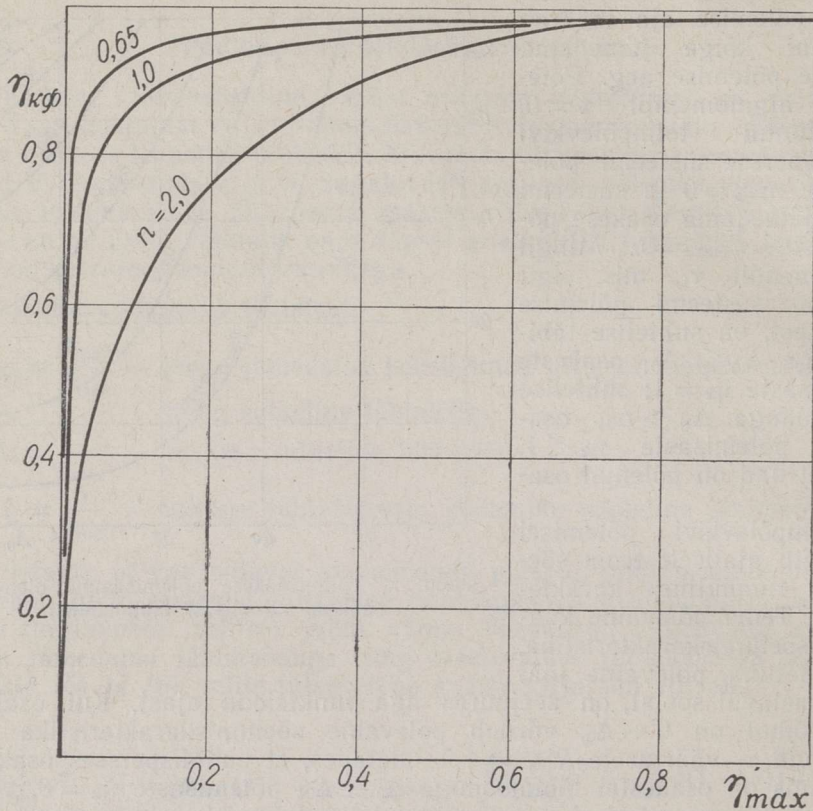
$$\ln(-\ln R_{\Delta}) = \ln b + n \ln \Delta, \quad (23)$$

kus  $n$  — tolmu polüdisperssuse aste;  
 $b$  — jahvatuskonstant.



Joon. 2. Tolmuosakese põlemisastme olenevus osakese suhtelisest läbimõõdust.





Joon. 3. Polüdispersse osakesüsteemi põlemisastme olenevus süsteemi kõige jämedama osakese põlemisastmest.

Arvutuste lihtsustamiseks arvutame süsteemi kõige jämedama osakese läbimõõdu tingimusest, et sõelal, mille ava mõõt on  $\Delta_{\max}$ , oleks põlevaine jääk  $R_{\Delta_{\max}} = 0,01$ . Vastavalt sellele leppelisele tingimusele avaldub tolmu sõelumiskarakteristika olenevalt osakeste suhtelisest läbimõõdust seosega:

$$R_{\Delta_0} = e^{-4,61 \Delta_0^n}, \quad (24)$$

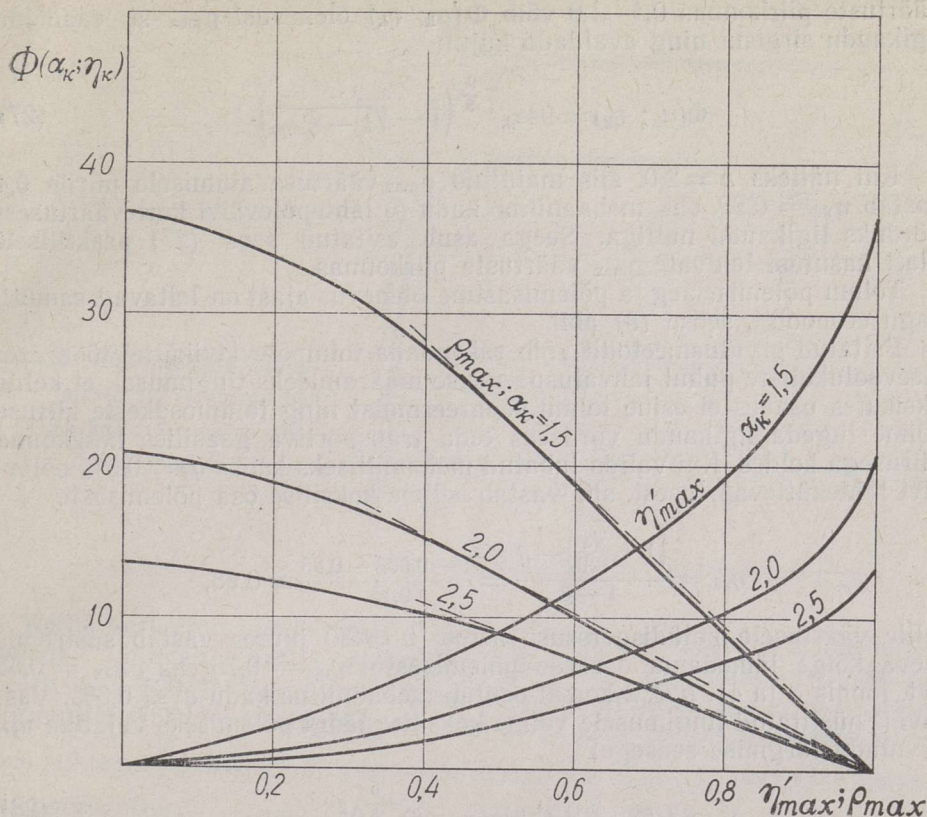
seejuures on süsteemi kõige jämedama osakese läbimõõt arvutatav seosega:

$$\Delta_{\max} = e^{\frac{1,53 - \ln b}{n}}. \quad (25)$$

Joonisel 3 on toodud võrrandi (22) integreerimise tulemused olenevalt süsteemi kõige jämedama osakese põlemisastmest  $\eta'_{\max}$  tingimisel, kui sõelumiskarakteristika avaldada seaduspärasusega (24). Integreerimine on teostatud kolme polüdisperssuse astme  $n = 0,65$ ;  $1,0$  ja  $2,0$  juures. Joonise 3 koostamisel kasutati  $\eta_k = f(\Delta_0)$  leidmiseks joonisel 2 toodud kõveraid.

Selleks, et leida tolmu põlemise aega ja tolmu põlemisastme olenevust ajast, peame teadma sõltuvust  $\eta'_{\max} = f(\tau)$ . Selle arvutamiseks esitame hapniku kontsentratsiooni olenevuse tolmu põlemisastmest analoogilisena





Joon. 4.  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  olenevus süsteemi kõige jämedama osakese läbipõlemata südamiku suhtelisest läbimõõdust.

seadusele (14), kusjuures  $\eta_k$  asemel kasutame  $\eta_{k\phi} - i$ . Põhinedes sellele

$$\Phi(\alpha_k; \eta_k) = 3 \left( \alpha_k + \frac{\beta}{1-\beta} \right) \int_{\varrho_{\max}}^1 \left[ \frac{2\varrho_{\max}^2}{Nu(\alpha_k - \eta_{k\phi})} + \frac{1}{m} \frac{\varrho_{\max}(1-\varrho_{\max})}{\alpha_k - \eta_{k\phi}} \right] d\varrho_{\max}. \quad (26)$$

Avaldise (26) väärtused kolme liigõhuteguri  $\alpha_k = 1,5; 2,0$  ja  $2,5$  juures olenevalt  $\eta'_{\max}$ -st ja  $\varrho_{\max}$ -st on toodud joonisel 4, mille koostamisel on  $\eta_{k\phi}$  väärtused saadud jooniselt 3.

Avaldise (26) analüüsist selgub, et  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  väärtuste olenevus  $\varrho_{\max}$ -st sõltub vähe tolmu polüdisperssuse astmest praktikas kasutatust leidvate polüdisperssuse astmete piirkonnas. See on seletatav asjaoluga, et hapniku kontsentratsioon põlemisprotsessi käigus on proportsionaalne suurusele  $1 - \eta_{k\phi}$ . Suuruse  $1 - \eta_{k\phi}$  vähenemine on aga seda intensiivsem, mida peenem on tolmu. Seega läbib jämedam osake peenema tolmu puhul suurema hapnikukontsentratsiooniga ala kiiremini, kui jämedama fraktsioonilise koosseisuga tolmu puhul.

Jooniselt 4 selgub ka liigõhuteguri suur mõju koksistunud tolmuosakeste põlemisele. Mida suurem on liigõhutegur, seda väiksemat mõju ta avaldab süsteemi kõige jämedama osakese põlemise intensiivsusele ning koos sellega ka tolmu põlemise kulule. Liigõhuteguri mõju põlemisajale on ligikaudu proportsionaalne  $\alpha_k^{-\frac{9}{5}}$ . Ühtlasi selgub jooniselt, et  $\varrho_{\max}$



väärtuste piirkonnas 0,4—1,0 võib  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  olenevust  $Q_{\max}$ -st vaadelda ligikaudu sirgena ning avaldada kujul:

$$\Phi(\alpha_k; \eta_k) = 94\alpha_k^{-\frac{9}{5}} \left(1 - \sqrt[3]{1 - \eta'_{\max}}\right). \quad (27)$$

Kui näiteks  $n = 2,0$ , siis mainitud  $Q_{\max}$  väärtuse alumisele piirile 0,4 vastab  $\eta_{k\Phi} \cong 0,99$ , ehk mehaaniline kadu  $q_4$  lähtepõlevkivi kütteväärtusest võrduks ligikaudu nulliga. Seega asub esitatud seos (27) praktiliselt alati kasutust leidvate  $Q_{\max}$  väärtuste piirkonnas.

Tolmu põlemise aeg ja põlemisastme olenevus ajast on leitavad samuti, nagu eespoolgi, seose (8) abil.

Esitatud arvutusmeetodit võib rakendada tolmpõlevkiviküttel töötavate otsevoolukollete puhul jahvatuspeensuse määramiseks tingimusel, et kolde üksikutes osades ei esine tolmu separeerumist ning tolmuosakeste kiiruse võime lugeda ligikaudu võrdseks teda transportiva gaasilise keskkonna kiirusega koldes. Kui valida lubatud mehaaniliseks kaoks  $q_4 = 0,3\%$  põlevkivi lähtekütteväärtusest, siis vastab sellele koksilise osa põlemisaste:

$$\eta_{k\Phi} = \frac{\left(1 - \frac{q_4}{100}\right) - \beta}{1 - \beta} = \frac{1 - 0,003 - 0,85}{0,15} \cong 0,98,$$

mille väärtusele polüdisperssuse astme  $n = 2,0$  juures vastab süsteemis oleva kõige jämedama osakese põlemisaste  $\eta'_{\max} \cong 0,75$  ehk  $Q_{\max} = 0,63$  (vt. joonis 3 ja 4).  $n < 2$  korral osutub mehaaniline kadu  $q_4 < 0,3\%$ . Vastavalt püstitatud tingimusele võime koksilise jäägi põlemiseks vajaliku aja arvutada järgmise seosega:

$$\tau_k = 1,53 \cdot 10^4 T^{-0,75} (\alpha - \beta)^{-\frac{9}{5}} \Delta_{\max}^2 \text{ sek.} \quad (28)$$

Kui aga koksilise osa koldes viibimise aeg on ette antud, on kõige jämedama osakese vajalik läbimõõt arvutatav valemist

$$\Delta_{\max} = 0,0808 T^{\frac{3}{8}} (\alpha - \beta)^{\frac{9}{10}} \sqrt{\tau_k} \text{ mm.} \quad (29)$$

Teades jahvatusseadmete jahvatuskarakteristikaid, on  $n$  ja  $p$  arvutatavad seose (25) põhjal.

### Katsetulemuste analüüs

Koksistunud tolmpõlevkivi põlemisaste arvutati üldpõlemisastme kaudu seosega

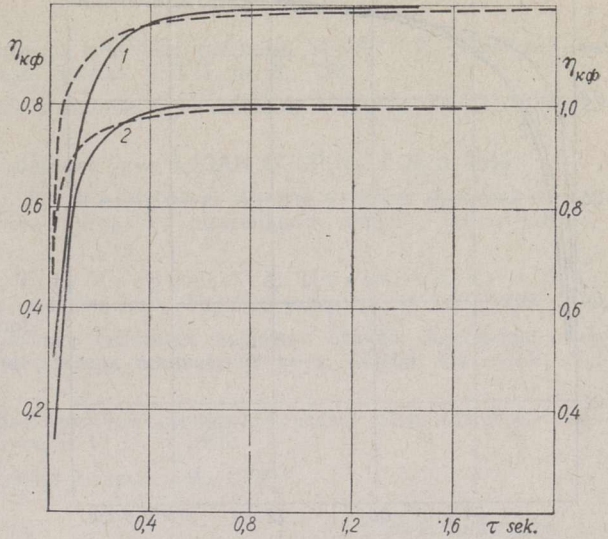
$$\eta_{k\Phi} = \frac{\eta - \beta}{1 - \beta}, \quad (30)$$

kusjuures katsetulemuste põhjal kasutati üldpõlemisastme kui ajafunktsiooni määramiseks meetodit, mis on esitatud autori varemilmunud artiklis [1]. Koksi põlemise osas kasutati katsetulemuste läbitöötamise aja arvutamiseks keskmist kolderistlõikelist temperatuuri

$$\bar{T} = \frac{F_0}{F_0} \int T dF_0,$$

kus  $F_0$  — kolde ristlõike pind.





Joon. 5. Põlemisastme olenevus ajast: 1 —  $\alpha = 1,10$ ,  $B = 19,5$  kg/h; 2 —  $\alpha = 1,18$ ,  $B = 20,5$  kg/h.

Kolde keskmine temperatuur  $\bar{T}$  ja temperatuur mõõdetuna kolde telgjoonelt omavad koksi põlemise tsoonis ligikaudu vahekorra  $\bar{T} = (0,94 - 0,96) T_c$ . Arvutuste lihtsustamiseks arvatati algul aeg kolde telgjoonelt mõõdetud koldetemperatuuri järgi ning hiljem parandati tulemusi suhtega  $\frac{\bar{T}}{T_c}$ . Koksi põlemise arvutamisel kasutati aga keskmist mahu- list temperatuuri

$$\bar{T} = \frac{\int_{X_{01}}^{X_{02}} \bar{T} dX_0}{X_{02} - X_{01}},$$

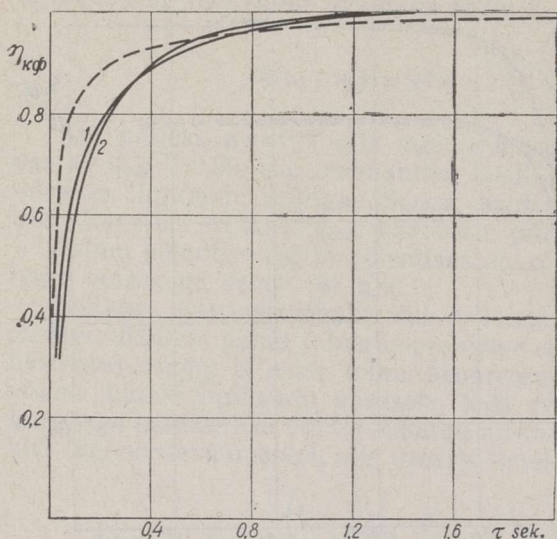
kus  $X_{01}$  — koksi põlemise tsooni alguse suhteline normaalkoordinaat;  $X_{02}$  — koksi põlemise lõpu suhteline normaalkoordinaat.

Nagu katsetulemustest selgub, ei avalda kolde kütuslik erikoormus koksistunud tolmpõlevkivi põlemisele märgatavat mõju. Küll aga avaldab suurt mõju põlemise intensiivsusele liigõhuteguriga väärtus. Mida suurem on liigõhutegur, seda intensiivsem on põlemine.

Joonisel 5 võrreldakse koksistunud tolmpõlevkivi põlemisastme ajast olenevuse kohta arvutuslikke ja eksperimentaalsel teel saadud tulemusi. Punktirjoonega on märgitud arvutuslikud, pideva joonega — katsetel saadud tulemused. Joon 1 vastab katse tulemusele liigõhuteguriga  $\alpha = 1,10$  ehk  $\alpha_k = 1,67$  ja kütuslikule koormusele  $B = 19,5$  kg/h; joon 2 aga — katsetulemustele  $\alpha = 1,18$  ehk  $\alpha_k = 2,10$  ja kütuslikule koormusele  $B = 20,5$  kg/h. Joonisel 6 esitatud kõverad vastavad katsetele liigõhuteguriga  $\alpha = 1,05$  ehk  $\alpha_k = 1,33$ , kusjuures joon 1 vastab kütuslikule koormusele  $B = 20,5$  kg/h ja joon 2 kütuslikule koormusele  $B = 12,1$  kg/h.

Jooniselt nähtub, et üldine kokkulangevus arvutuslike ja katseliste kõverate vahel on hea. Siinjuures annavad arvutuste tulemused koksilise osa põlemisprotsessi alguses järsuma tõusuga kõverad kui seda näitavad eksperimentaalselt saadud andmed. Seda erinevust arvutuslike ja katselisel teel saadud kõverate vahel võib seletada kahe asjaoluga:





Joon. 6. Põlemisastme olenevus  
ajast: 1 —  $\alpha = 1,05$ ,  $B = 20,5$  kg/h;  
2 —  $\alpha = 1,05$ ,  $B = 12,1$  kg/h.

1) Arvutused kehtivad järjestikulise põlemiskeemi kohta. Tegelikult võib arvata, et osa peenemaid fraktsioone põleb paralleelselt lendosadega.

2) Arvutustes ei arvestatud reaktsiooni kineetika mõju, mis kahtlemata teataval määral vähendab peenikeste tolmufraktsioonide põlemiskiirust.

Ühtlasi selgub tulemustest, et 95%-line koksilise osa läbipõlemine liigõhuteguri  $\alpha = 1,05$  juures toimub ligikaudu 0,7 sekundi jooksul, liigõhutegurite  $\alpha = 1,10$  ja  $1,18$  puhul aga vastavalt 0,4 ja 0,25 sekundi vältel. Seejuures on ülejäänud 5% koksilise osa põlemise aeg tunduvalt pikem. Selline põlemisaegade jaotus on tingitud asjaolust, et osakeste põlemise aeg on proportsionaalne osakeste läbimõõtude ruutudele; mida suurem on osakese läbimõõt, seda väiksemal hapnikukontsentratsioonil toimub tema põhilise massi põlemine.

### Järeldused

1) Koksistunud tolmpõlevkivi põlemist võib käsitada püsivamahulise põlemisena, kusjuures põlemist määravateks peamisteks faktoriteks on välised ja osakesesisesed difusioonilised tingimused.

2) Koksistunud tolmpõlevkivi osakese põlemise aeg on proportsionaalne osakese läbimõõdu ruudule ja  $T^{-0,75}$ -le.

3) Liigõhuteguri mõju koksistunud tolmpõlevkivi osakese põlemise intensiivsusele on seda suurem, mida väiksem on liigõhutegur [valem (19)].

4) Polüdispersse koksistunud tolmpõlevkivi põlemisele avaldab määravat mõju jämedamate tolmuosakeste põlemine, kusjuures põlemisaja määrab süsteemi kõige jämedamate osakeste põlemise aeg.

5) Katsetulemustest selgub, et polüdispersse tolmu-süsteemi põlemisele ei avalda märgatavat mõju kolde kütuslik koormus, kusjuures põlemise intensiivsuse määrab peamiselt liigõhutegur.

6) Käesoleva uurimuse tulemused on kasutatavad tolmpõlevkivi küttel töötavate kollete põlemisprotsessi uurimisel ning jahvatuspeensuste määramisel.



## KIRJANDUS

1. A. Ots, Tolmpõlevkivist eralduvate lendosade põlemine, «ENSV TA Toimetised — Tehn. ja Füüs.-Matem. Tead. Seeria», k. VII, nr. 3, 1958.
2. Н. Труу, Пõlevкivi күкерииди оlemusest ja omadustest, «ENSV TA Toimetised», k. III, nr. 3, 1954.
3. В. И. Блинов, О сгорании зольного угля, 1, ДАН СССР, т. II, № 6, 1946.
4. В. В. Померанцев и С. Л. Шагалова, Анализ рабочего процесса и составление методики расчета выгорания пылевидного топлива, Отчет ЦКТИ, 1957.
5. А. С. Предводителев, Л. Н. Хитрин, О. А. Цуханова, Х. И. Колодцев и М. К. Гродзовский, Горение углерода, М.—Л., 1949.
6. Х. К. Труу, Теория и практика сжигания горючего сланца, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, ЭНИН АН СССР, М., 1951.
7. А. С. Фомина, О некоторых свойствах сланца-кукерсита, «Изв. АН ЭССР. Серия техн. и физ.-мат. наук», т. V, № 1, 1956.
8. Л. Н. Хитрин, Физика горения и взрыва, М., 1957.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse  
22. V 1958

## ГОРЕНИЕ ОКОКСОВАВШЕЙСЯ СЛАНЦЕВОЙ ПЫЛИ

А. А. Отс

Резюме

В настоящей работе рассматриваются вопросы горения отдельных частичек и полидисперсной системы ококсавшейся сланцевой пыли. Ококсавшаяся сланцевая пыль характеризуется высоким содержанием золы и низкой теплотворностью. В связи с этим в основу исследования горения названного кокса был положен принцип горения при постоянном объеме частиц, т. е. допускалось, что частицы во время горения не изменяют своих внешних размеров. Можно предполагать, что скорость горения ококсавшейся частицы определяется с достаточной точностью условиями внешней и внутренней диффузии кислорода в зону горения кокса [формула (5)]. Влияние кинетики реакций горения невелико.

Время выгорания частицы и полидисперсной системы частиц в общем случае выражается формулой (8), где величина  $q(\Delta; T)$  определяется по формуле (9). При этом  $q(\Delta; T)$  зависит от диаметра частицы и температуры, но не зависит от закона изменения концентрации кислорода в зоне горения кокса. При расчете времени выгорания полидисперсной системы принимается  $\Delta = \Delta_{\max}$ . Зависимость величины  $q(\Delta; T)$  для ококсавшихся частиц сланцевой пыли от их диаметра и температуры приведена на рис. 1. Величина  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  в формуле (8) зависит от закона изменения концентрации кислорода, а также от начальной концентрации кислорода в зоне горения кокса, причем последняя, в свою очередь, зависит от коэффициента избытка воздуха в зоне горения кокса  $\alpha_k$  и от относительного содержания летучих в сланце  $\beta = V^r/100$ . Величина  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  определяется при горении в среде с постоянной концентрацией кислорода по формуле (11), при горении монофракционной пыли — по формуле (19), а при горении полидисперсной пыли — по формуле (26). Для полидисперсной ококсавшейся сланцевой пыли величина  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  в зависимости от степени выгорания самой крупной условной частицы в системе ( $\eta'_{\max}$ ) и от коэффициента избытка воздуха в зоне горения кокса при относительном содержании летучих  $\beta = 0,85$  приведена на рис. 4. При этом диаметр самой крупной частицы в системе ( $\Delta_{\max}$ ) определялся из условия, что остаток пыли на сите размером  $\Delta_{\max}$  составляет  $R_{\Delta_{\max}} = 0,01$ .

При исследовании горения ококсавшейся сланцевой пыли в зависимости от времени принималось, что ситовая характеристика пыли подчиняется закону, приведен-



ному в уравнении (23). Для сравнения расчетных и опытных данных приведены кривые на рис. 5 и 6. Сплошными линиями отмечены опытные данные.

Для расчета оптимальной тонины сланцевой пыли при условии, что механический недожог, рассчитанный по теплотворности исходного сланца, не превышает 0,3%, можно использовать формулу (29), где  $\tau_k$  обозначает время пребывания ооксовавшихся частиц пыли в процессе горения.

*Институт энергетики  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
22 V 1958

## THE BURNING OF CARBONISED PULVERISED OIL SHALE

A. Ots

### Summary

The present work deals with problems of combustion of separate particles and the polydisperse system of carbonised oil shale. Carbonised pulverised oil shale is characterised by a high ash content and a low calorific value. Consequently the principle of combustion under constant particle size has been adopted as basis for the study of the combustion of the above mentioned coke, i. e. it has been assumed that during combustion the particles do not alter their external dimensions. It is open to suppose, that the combustion velocity of a carbonised particle is with sufficient precision determined by conditions of external and internal oxygen diffusion into the combustion zone [Formula (5)]. The influence of combustion reaction kinetics is negligible.

In a general case the time of the burning out of the particle and the polydisperse system of particles is expressed by formula (7), where the value  $q(\Delta; T)$  is determined according to formula (9). Thereat  $q(\Delta; T)$  depends on the diameter of the particle and on temperature, but is independent of the law of the change of oxygen concentration in the coke combustion zone. In computing the time of the burning out of the polydispersed system  $\Delta = \Delta_{\max}$  has been adopted. The dependence of the value  $q(\Delta; T)$  for carbonised pulverised oil shale particles on their diameter and temperature is given on drawing 1. The value  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  in formula (7) depends on the law of the change of oxygen concentration as well as on the initial oxygen concentration in the coke combustion zone, while the latter in its turn, depends on the air surplus coefficient in the coke combustion zone  $\alpha_k$  and on the relative content of volatile matter in the shale  $\beta = \frac{V^a}{100}$ . Value  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$  is determined during combustion in a medium with a constant oxygen concentration according to formula (11), during combustion of monofractional dust — according to formula (19), whereas during combustion of polydispersed dust — according to formula (26). For polydispersed carbonised pulverised oil shale the value  $\Phi(\alpha_k; \eta_k)$ , depending on the degree of the burning out of the largest conventional particle in the system ( $\eta'_{\max}$ ) and on the air surplus coefficient in the coke combustion zone with a relative content of volatile matter  $\beta = 0,85$ , is given on drawing 4. Thereat the diameter of the largest particle in the system ( $\Delta_{\max}$ ) was determined by departing from the condition, that the dust residue on a  $\Delta_{\max}$ -mesh screen amounted to  $R_{\Delta_{\max}} = 0,01$ .

In investigating the combustion of carbonised pulverised oil shale in regard to its dependence on time it has been assumed, that the dust screen characteristics conform to the law given in equation (23). In order to compare computation and experimental data curves are drawn on drawing 5 and 6. Experimental data are marked by solid lines.

For the computation of the optimum fineness of pulverised oil shale, provided that the mechanical undercombustion, calculated according to the calorific value of initial oil shale does not exceed 0.3%, formula (28) can be used, where  $\tau_k$  stands for the time during which carbonised dust particles remain under the combustion process.

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

Received  
May 22, 1958