

## MÕNINGATEST PÕLEMISPROTSESSI STABILISEERIVATEST TEGURITEST KAMBERKOLLETES

A. OTS,  
tehnikakandidaat

Oheks teguriks, mis kamberkolletes stabiliseerib tahkete, vedelate ja gaasiliste kütuste põlemisprotsessi, on koldegaaside retsirkulatsioon. See seisneb teatud osa põlemissaaduste vastupidises liikumises gaaside põhivoolusega ja segunemises koldeesse antava põlevseguga. Koldegaaside retsirkulatsiooni intensiivsus ja ulatus sõltub suurel määral koldeprotsessi aerodünaamikast, mis on otseselt seotud põleti tüübi ja konstruktsiooniga. Koldegaaside retsirkulatsioon ja gaaside kiirustevälja ebaühtlus kolde ristlõikes tingib ka gaaside kontsentratsiooni- ja temperatuuriväljade ebaühtluse.

Käesoleva artikli ülesandeks on analüüsida koldegaaside retsirkulatsiooni mõju põlemisprotsessi karakteristikatele ja vaadelda tegureid, millest sõltub koldegaaside retsirkulatsiooni intensiivsus.

### Gaaside kontsentratsiooni- ja temperatuuriväli tolmpõlevkivi põletamisel

Autori uurimustest [1], milles käsitletakse tolmpõlevkivi põlemist, nähtub, et kuivades koldegaasides sisalduvate gaasiliste komponentide kontsentratsioon ja temperatuur ei ole vaadeldavas kolde ristlõikes konstantsed ning on sõltuvad ristkoordinaadist, mille alguspunkt on kolde teljel.

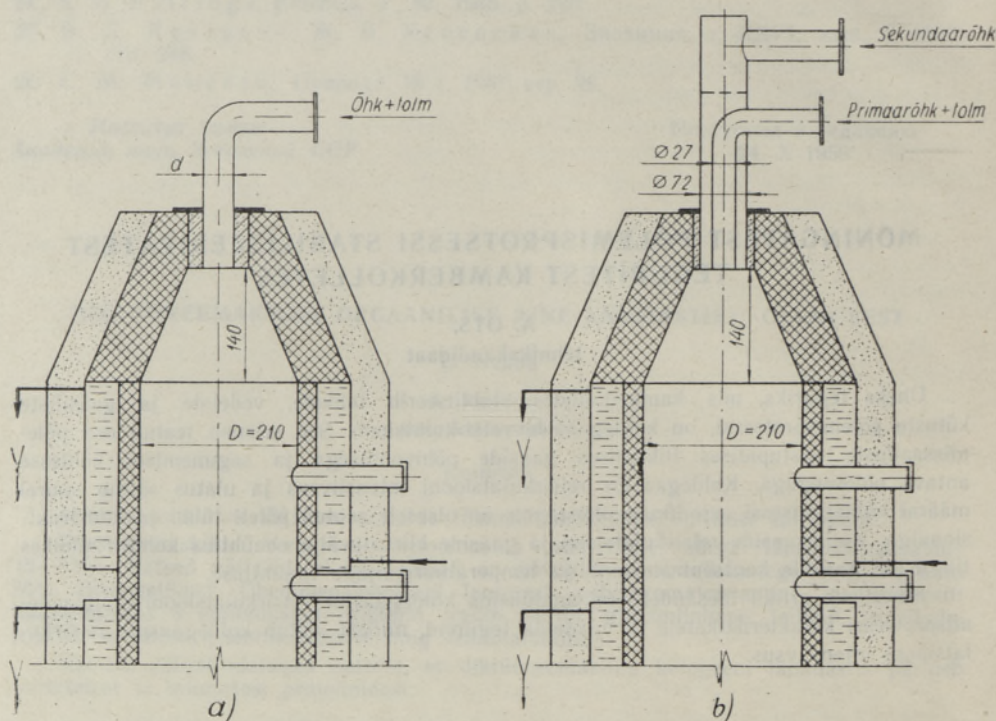
Tolmpõlevkivi põlemiskarakteristikate määramiseks kasutati vertikaalset jahutatavate seintega silindrilist katsekollet, milles gaaside voolus oli suunatud ülalt alla [2]. Kolde sisemine läbimõõt  $D = 210$  mm. Kolde ülalosas asetses avaus põletite paigutamiseks, millede kaudu juhiti koldeesse tolmpõlevkivi koos põlemiseks vajaliku õhuga.

Katseteks kasutati kahte tüüpi põleteid. Esimene neist kujutas endast ümarat toru, mille kaudu juhiti koldeesse tolmpõlevkivi koos põlemiseks vajaliku õhuga. Seda tüüpi põletite suhteline läbimõõt  $\varphi = \frac{d}{D} = 0,239$ , 0,190 ja 0,162, kusjuures  $d$  tähistab põleti sisemist läbimõõtu (vt. joon. 1, a). Teine tüüp koosnes kahest kontsentriselt teineteise sisse asetatud torust. Sisemise toru kaudu, mille sisemine läbimõõt oli 27 mm ja välimine 36 mm, juhiti koldeesse tolmpõlevkivi koos primaarõhuga, välimise toru kaudu, sisemine läbimõõt 72 mm, anti sekundaarõhk (vt. joon. 1, b).

Katsed tehti kolde mahuliste soojuslike erikoormuste  $\frac{BQ_H^p}{V_T} = 0,3 \cdot 10^5$  —  
—  $0,6 \cdot 10^6$  kcal/m<sup>3</sup>h ja liigõhutegurite  $\alpha = 1,05$  —  $1,27$  piirides. Kasutatud

tolmpõlevkivi kütteväärtus  $Q_H^p = 2879$  kcal/kg ja katsekolde maht  $V_T = 0,0982$  m<sup>3</sup>. Katsed toimusid eelsoojendamata õhuga.

Igal katsel fikseeriti koldes esinev hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni- ning temperatuuriväli.



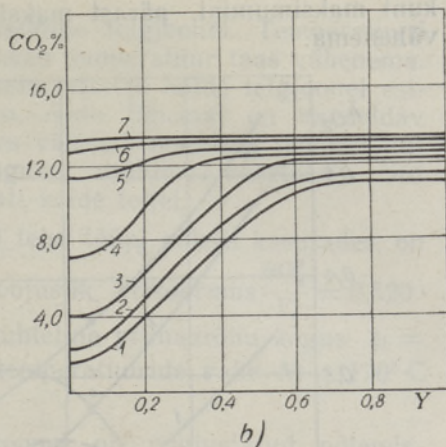
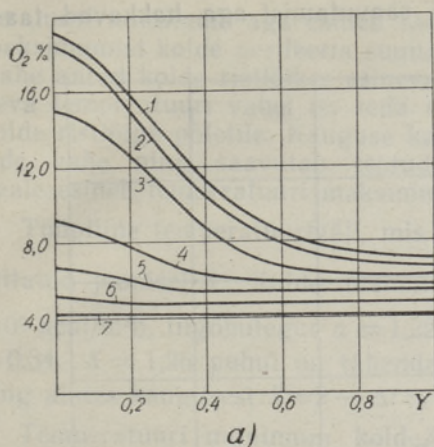
Joon. 1. Põleti tüübid.

Joonisel 2 on toodud vastavalt hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsioonikõverad vaadeldavas kolderistlõikes, kusjuures  $Y = \frac{2y}{D}$  tähistab joonistel suhtelist ristkoordinaati, mõõdetuna kolde telgjoonelt. Kõverad 1—7 joonistel vastavad erinevatele suhtelistele kaugustele põleti suudmest:  $X = \frac{x}{D}$ ;  $x$  tähistab seejuures pikkuskoordinaati, mille alguspunkt on põleti suudmes. Joonisel esitatud põlemiskarakteristikad on saadud põleti  $\varphi = 0,190$  kasutamisel. Kolde mahuline soojuslik erikoormus  $\frac{BQ_H^p}{V_T} = 0,446 \cdot 10^6$  kcal/m<sup>3</sup>h, liigõhutegur  $\alpha = 1,21$  ja õhu väljavoolu kiirus põletist  $w_b = 13,82$ .

Jooniselt 2 nähtub, et hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsioon kuivades koldegaasides ei ole kolde ristlõigetes kuni  $X \approx 4$  ühtlane. Vahe- mikus  $X = 0—4$  on hapniku kontsentratsioon kolde telgjoonel suurem kui kolde perifeerias. Vastupidi sellele on süsinikdioksüüdi kontsentratsioon kolde teljel väiksem kui perifeerias. Koldegaaside kontsentratsioonide ebaühtlus kolde ristlõigetes näitab põlemisfrondi levikut kolde perifeeriast tsentri suunas.

Vaadeldavas kolde ristlõikes esinevate hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsioonide ebaühtluse astme väljendamiseks kasutame vastavaid





Joon. 2. a — hapniku ja b — süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni olenevus koordinaatidest Y ja X, kusjuures X võrdub: 1 — 1,26; 2 — 1,43; 3 — 1,90; 4 — 2,38; 5 — 2,85; 6 — 3,82; 7 — 5,25.

ebaühtlusteguri mõisteid. Hapniku kontsentratsiooni ebaühtlusteguri vaadeldavas kolde ristlõikes väljendame

$$\lambda_{O_2} = \frac{O_2^I - O_2^{II}}{21 - O_2''}$$

Analoogiliselt eelmisele väljendame süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni ebaühtlusteguri kujus

$$\lambda_{CO_2} = \frac{CO_2^{II} - CO_2^I}{CO_2''}$$

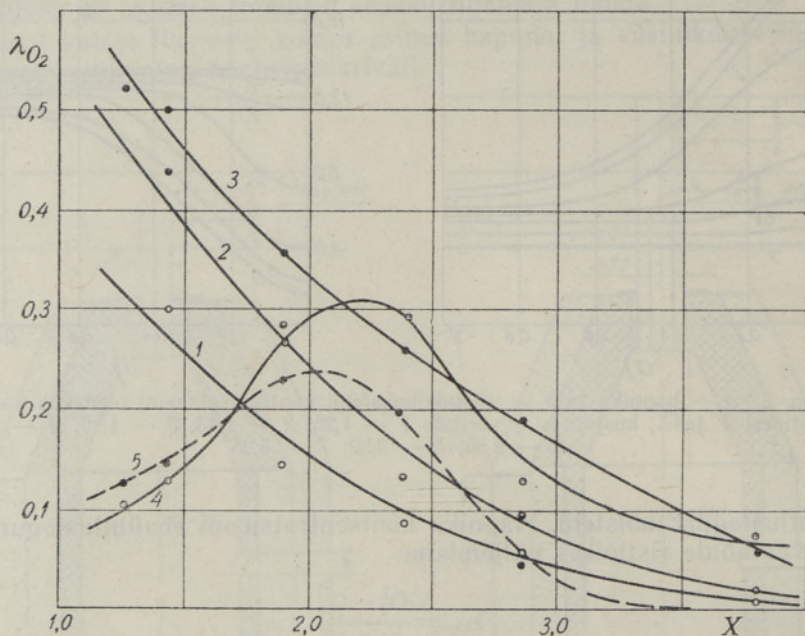
kusjuures  $O_2^I$  ja  $CO_2^I$  tähistavad vastavalt hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni vaadeldava kolde ristlõike tsentris ning  $O_2^{II}$  ja  $CO_2^{II}$  — samu suurusi sama ristlõike perifeerias.  $O_2''$  ja  $CO_2''$  tähistavad samu suurusi põlemisprotsessi lõpul.

Hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni ebaühtluse puudumisel  $\lambda_{O_2} = \lambda_{CO_2} = 0$ , s. t. üle kogu kolde ristlõike on koldegaaside nende komponentide kontsentratsioon ühesugune. Maksimaalne hapnikukontsentratsiooni ebaühtlus võib tekkida kolde ristlõikes, kui kolde tsentris esineb õhk, s. o.  $O_2^I = 21\%$ , ning kolde perifeerias paiknevates gaasides on minimaalselt võimalik hapnikukontsentratsioon —  $O_2^{II} = O_2''$ . Sellisel juhul on hapniku kontsentratsiooni ebaühtlusteguril maksimaalne väärtus — ta võrdub ühega. Maksimaalse süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni ebaühtluse korral on vastavalt sellele  $CO_2^I = 0$ ,  $CO_2^{II} = CO_2''$  ja  $\lambda_{CO_2} = 1$ . Tolmpõlevkivi põlemiskarakteristikate analüüs näitab, et hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsioonide ebaühtlustegurid ei saavuta mitte üheski kolde ristlõikes oma maksimaalseid väärtusi.

Kauguse suurenedes põleti suudmest vähenevad  $\lambda_{O_2}$  ja  $\lambda_{CO_2}$  esimest tüüpi põletite kasutamisel pidevalt. Nad on seejuures seda väiksemad ja nende vähenemise intensiivsus seda suurem, mida suurem on põleti läbimõõt.

Teist tüüpi põleti kasutamisel suurenevad alguses nii  $\lambda_{O_2}$  kui ka  $\lambda_{CO_2}$

kuni maksimumini, pärast maksimumi saavutamist aga hakkavad taas vähenema.



Joone 3. Hapniku kontsentratsiooni ebaühtlusteguri olenevus koordinaadist  $X$  ja põleti tüübist.

Joonisel 3 on esitatud hapniku kontsentratsiooni ebaühtlusteguri sõltuvus suhtelisest kaugusest põleti suudmest nii esimest kui ka teist tüüpi põleti kasutamisel. Andmed joonisel 3 esinevate kõverate kohta on toodud tabelis 1.

Tabel 1

Joone nr.	Põleti suhteline läbimõõt $\varphi$	Suhteline primaarõhu kogus $\xi_1$	Kolde mahuline soojuslik erikoormus $\frac{B Q_H^P}{V_T}$ kcal/m <sup>3</sup> h	Liigõhutegur $\alpha$	Õhu väljavoolu kiirus põletist $w_B$ m/sek
1	0,239	1,00	$0,600 \cdot 10^6$	1,15	11,17
2	0,190	1,00	$0,523 \cdot 10^6$	1,13	15,19
3	0,162	1,00	$0,600 \cdot 10^6$	1,17	21,90
4		0,34	$0,520 \cdot 10^6$	1,22	11,86/4,29
5		0,47	$0,638 \cdot 10^6$	1,09	16,22/3,40

Kasutatud põletite läbimõõtude puhul ei esinenud kolde mahulise soojusliku erikoormuse, samuti õhu väljavoolu kiiruse märgatavat mõju hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni ebaühtlusele. Mõningal määral võis täheldada nende kontsentratsioonide ebaühtluse suurenemist kolde soojusliku erikoormuse kasvades, mis on ilmselt tingitud temperatuuri tõusust koldes.

Ka kolde ristlõigetes esineb temperatuuri ebaühtlus. Temperatuuri maksimum tekib põletilähedases osas kolde ristlõike tsentrist eemal. Tem-



peratuuri miinimum aga esineb sama ristlõike telgjoonel. Temperatuuri maksimumist kolde perifeeria suunas hakkab temperatuur taas vähenema. Vahe antud kolde ristlõikes esineva maksimaalse ja kolde telgjoonel esineva temperatuuri vahel on seda suurem, mida lähemal on vaadeldav kolde ristlõige põletile. Kauguse kasvades väheneb mainitud temperatuuride vahe ning saavutab teatud kaugusel nullilise väärtuse. Siit peale esineb temperatuuri maksimum alati kolde teljel.

Tüüpiline temperatuuriväli, mis saadi teist tüüpi põletit kasutades, on esitatud joonisel 4. Kolde mahuline soojuslik erikoormus  $\frac{BQ_n^p}{V_r} = 0,520 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^3\text{h}$ , liigõhutegur  $\alpha = 1,22$  ja suhteline primaarõhu kogus  $\xi_1 = 0,34$ .  $X = 1,26$  puhul on tähendatud temperatuuride vahe  $\Delta t \approx 170^\circ \text{C}$  ning alates kaugusest  $X \approx 2 - \Delta t = 0$ .

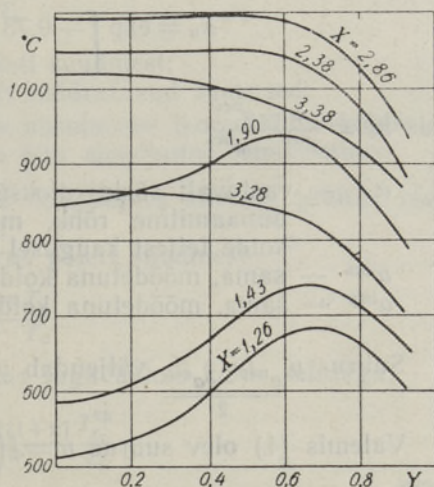
Temperatuuri miinimum kolde telgjoonel on põhjustatud põlemisprotsessi iseloomust, temperatuuri langus kolde seinte suunas aga soojuseülekandest tolmu leegilt kolde seintele.

Seega esineb kolde ülemises osas kahesuunaline soojusvoog. Üks neist toimub maksimaalse temperatuuriga alalt vaadeldava ristlõike tsentri suunas, soodustades põlemist ja temperatuuri tõusu tsentris, kus esineb hapnikurikas segu, ning stabiliseerides põlemist. Soojuse ülekandumine tsentri suunas võib toimuda kolmel viisil: kiirguse, soojusejuhtivuse ja konvektiooni teel. Kaks esimest moodust ei etenda väikese temperatuurivahe tõttu olulist osa. Kõige suurem osa aga on täita konveksioonil, mis seisneb koldesse juhitava põlevsegu segunemises koldegaasidega.

Teine soojusvoog liigub maksimaalse temperatuuriga alalt kolde seinte suunas. Viimaste kaudu kandub soojus jahutussärki läbivale veele.

Analoogilisi tulemusi on saanud ka teised tolmustatud kütuste põlemisprotsessi uurijad [3, 4, 5]. H. Schwidesen uuris püramiidikujulises 3400 mm pikkuses ja 1600 × 1600 mm ristlõikega horisontaalkoldes kulgevat põlemisprotsessi. Tolmu koldesse juhtimiseks kasutas ta eliptilist põletit, mille telgede mõõtmed olid 170 × 390 mm ja mis asetses kolde frondil väikese kallakuga alla. Oma uurimuses on ta ära toonud koldes esinevad süsinikdioksiidi kontsentratsiooni- ja temperatuuriväljad, mis kolde ristlõigetel osutuvad ebaühtlasteks.

Uurides jahutamata seintega vertikaalse 400 mm läbimõõduga silindrilise laboratoorse kolde aerodünaamikat Moskva-lähedase pruunsöe põletamisel tolmuna märkis A. G. Morozov [4], et leegi temperatuur on kolde teljel teatud kaugusel põleti suudmest madalam üldisest temperatuurinivoost kolde antud ristlõikes. Ta seletab temperatuuri ebaühtlust vaadeldavas kolde ristlõikes kiirgusenergia ebaühtlase jaotumisega, väites, et põlevatelt kütuseosakestelt saadavast kiirgusenergiast neeldub suurem



Joon. 4. Temperatuuri olenevus koordinaatidest  $X$  ja  $Y$ .



hulk leegi perifeerses osas, väiksem hulk aga kolde teljel. Temperatuuri-välja ebaühtluse füüsikalise olemuse põhjendus A. G. Morozovil aga puudub. Ta uuris küll tolmkütuse põlemisprotsessi aerodünaamikat (kiirusevälju koldes), kuid samal ajal ei analüüsinud aerodünaamiliste faktorite mõju temperatuurivälja kujunemisele. Sellest on arvatavasti ka tingitud tema ebausutav seletus kiirgusenergia jaotuse kohta koldes.

Samas uurimistöös [4], nagu käesoleva artikli autori poolt teostatud katsetelgi, ei märgatud kuigi suurt kolde mahulise soojusliku erikoormuse mõju temperatuuri ja gaasi kiiruseväljadele koldes.

Ulatuslikuma ja huvitavama uurimuse, milles käsitletakse koldes esinevaid süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni-, temperatuuri- ja dünaamilise rõhu välju tolmustatud kivisüte põletamisel, on avaldanud V. V. Tšukin [5]. Uurimistööks kasutas ta horisontaalset 5200 mm pikkusega ja  $600 \times 600$  mm ristlõikega jahutamata kollet, kuhu tolm juhiti koos põlemiseks vajaliku õhuga (kasutamata sekundaarõhku). V. V. Tšukin jõudis järeldusele, et vaadeldavas kolde ristlõikes esinevad süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni-, temperatuuri- ja dünaamilise rõhu väljad on omavahel sarnased ning alluvad seaduspärasusele

$$\pi_a = \exp \left[ -0,73 \left( \frac{y}{y_{a^{nep}} - a^{ocb}} \right)^n \right] \quad (1)$$

$$\text{kus } \pi_a = \frac{a - a^{ocb}}{a^{nep} - a^{ocb}};$$

$a$  — vastavalt süsinikdioksüüdi kontsentratsioon, temperatuur või dünaamiline rõhk, mõõdetud vaadeldavas kolde ristlõikes kolde teljest kaugusel  $y$ ;

$a^{ocb}$  — sama, mõõdetuna kolde teljel ( $y = 0$ );

$a^{nep}$  — sama, mõõdetuna kolde perifeerias.

Suurus  $y \frac{a^{nep} - a^{ocb}}{2}$  väljendab  $y$  väärtust kohas, kus  $a = \frac{a^{nep} - a^{ocb}}{2}$

Valemis (1) olev suurus  $n = f\left(\frac{x}{d}\right)$ , alates  $\frac{x}{d} \approx 5$  muutub  $n$  konstantseks.

### Katsetulemuste analüüs

Katsetega määratud tolmpõlevkivi niisugune põlemiskarakteristikate kuju on seletatav kiirustevälja ebaühtlusega kolde ristlõikes ja koldegaaside retsirkulatsiooni olemasoluga, mis seisneb teatud koguse koldegaaside tagasivoolus ning segunemises põletist väljuva õhu-tolmu seguga. Võib eristada kolmekujulisi retsirkulatsioonivooluseid, mida vastavalt nende iseloomule nimetame välimiseks, sisemiseks või segavooluseks. Välimise retsirkulatsiooni korral toimub gaaside tagasivool väljaspool koldesse voolavat juga, kusjuures segunemine teostub ainult joa välispinnal. Sisemise retsirkulatsiooni korral liigub retsirkuleerivate gaaside vool seespool koldesse saabuvat juga. Sellisel juhul moodustab joa välispind kolde seintega ühtse terviku. Kolmandal juhul võib segunemine toimuda nii joa sise- kui ka välispinnal.

Autori tehtud katsete puhul oli tegemist välimise retsirkulatsiooniga. Vooluse niisuguse kujuga on seletatavad ka katsetel saadud põlemiskarakteristikate kuju. Kuna hapniku kontsentratsioon kolde perifeerias oli väiksem kui kolde sama ristlõike tsentris, siis järelikult kolde perifee-



rias on tolmpõlevkivi põlemine toimunud täielikumalt. Vaadeldes hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni muutust koldegaasides piki kolde perifeeriat ( $x$ -telje suunas) selgub, et kauguse suurenemisega põletist väheneb hapniku ning suureneb süsinikdioksüüdi kontsentratsioon, mis vihjab sellele, et tagasivool saab alguse mitte joa teatud kohast, vaid üle kogu joa pinna. Nimetame gaaside retsirkulatsioonialaks ala põleti suudmest kuni kohani, kus gaaside voolus lõikub kolde seinaga. Tähistame selle kauguse põletist  $x_a$ -ga või suhtelise kauguse  $X_a = \frac{x_a}{D}$ .

Gaaside retsirkulatsiooni ulatus on sõltuv põleti ja kolde läbimõõdust, õhu väljavoolu kiirusest põletist ning kolde ja koldesse siseneva õhu temperatuurist. Oletame, et koldesse siseneva joa keskmine kiirus selle joa vaadeldavas ristlõikes on avaldatav seaduspärasusega, mis on analoogiline avatud joa kohta kehtiva seadusega [6]:

$$w = w_B \frac{b_1}{\frac{ax}{d\sqrt{\frac{T_r^{cp}}{T_B}}} + b_2} \quad (2)$$

kus  $w_B$  — õhu väljavoolu kiirus põleti suudmest;

$a$ ,  $b_1$  ja  $b_2$  — eksperimentaalselt määratavad suurused;

$T_r^{cp}$  — keskmine gaaside absoluutne temperatuur koldes;

$T_B$  — koldesse siseneva õhu absoluutne temperatuur.

Siiani puuduvad uurimused, mis käsitleksid kiiruste profiili jugade voolamisel seintega piiratud ruumis.

Teiselt poolt: õhu väljavoolu kiirus põleti suudmest

$$w_B = \frac{4\alpha BV^\circ T_B}{\pi d^2 T_o} \quad (3)$$

ja gaaside kiirus kolde ristlõikes, kus juga lõikub kolde seintega

$$w_a = \frac{4\alpha V^\circ B(1+\kappa) T_r^{cp}}{\pi D^2 T_o} \quad (4)$$

kus  $\alpha$  — põlemisprotsessi liigõhutegur;

$V^\circ$  — ühe kaaluühiku kütuse põlemiseks vajaliku õhu teoreetiline maht normaalingimustel;

$B$  — ajaühikus koldesse antava kütuse hulk;

$\kappa$  — gaaside mahumuutustegur [2];

$T_r^{cp}$  — koldegaaside keskmine temperatuur kohas, kus  $X = X_a$ ;

$T_o$  — 273° K.

Asendades kiirused avaldistest (3) ja (4) valemisse (2), saame retsirkulatsiooni ulatuse jaoks valemi

$$X_a = \left( \frac{1}{1+\kappa} \frac{b_1}{a} \frac{T_B}{T_r^{cp}} \sqrt{\frac{T_r^{cp}}{T_B}} \frac{1}{\varphi^2} - \frac{b_2}{a} \sqrt{\frac{T_r^{cp}}{T_B}} \right) \varphi \quad (5)$$

Tähistame

$$A_1 = \frac{1}{1+\kappa} \frac{b_1}{a} \frac{T_B}{T_r^{cp}} \sqrt{\frac{T_r^{cp}}{T_B}}, \quad A_2 = \frac{b_2}{a} \sqrt{\frac{T_r^{cp}}{T_B}}$$

Kolde statsionaarse töörežiimi puhul on suurused  $A_1$  ja  $A_2$  konstantsed.

## Järelikult

$$X_a = \frac{A_1}{\varphi} - A_2\varphi \quad (6)$$

Valemist (6) järgneb, et gaaside retsirkulatsiooni ulatus on sõltuv peamiselt põleti suhtelisest läbimõõdust, suurenedes viimase vähenemisega. Põleti läbimõõdu vähenemisel peab seega suurenema hapniku ja süsinikdioksüüdi kontsentratsiooni ebaühtlus. Sama järeldeb ka katsetulemustest (vt. joon. 3). Samast seosest järeldeb, et gaaside retsirkulatsiooni ulatus ei ole otseselt sõltuv kolde kütuslikust koormusest ja põlemisprotsessi liigõhutegurist. Kolde kütusliku koormuse (soojusliku erikoormuse) mõju  $A$ -le väljendub kaudselt õhu- ja gaaside temperatuuri suhte kaudu. Liigõhuteguri kaudne mõju avaldub mainitud temperatuuride suhte ja gaaside mahumuutusteguri kaudu. Nii kolde kütusliku erikoormuse kui ka liigõhuteguri mõju  $X_a$ -le aga on suhteliselt väike. Seetõttu ei võimaldanud katsetulemused seda mõju hinnata ei kvantitatiivselt ega kvalitatiivselt.

Saadud teoreetilised tulemused on ligikaudsed ja nende täpsus sõltub sellest, kuivõrd koldes esinev gaaside kiirusväli allub valemiga (2) avaldatud seaduspärasusele.

Teist tüüpi põleti kasutamisel saadud tulemused erinevad esimest tüüpi põleti kasutamisel saadud tulemustest (vt. joon. 3). See on eelkõige tingitud põleti konstruktsioonist, mis põhjustab koldeprotsessis teistsuguse aerodünaamika. Teise põletitüübi puhul on tegemist kahe paralleelse joa liitumisega, kusjuures sekundaarõhu juga ümbritseb primaarõhu juga, isoleerides viimast. Isoleeriva toime tõttu peavad retsirkuleerivad koldegaasid läbima sekundaarõhu kihi enne, kui nad jõuavad seguneda primaarõhu voolusega. Sellise isoleeriva toimega on selektatav ka hapniku kontsentratsiooni ebaühtlusteguri maksimumi esinemine teatud kaugusel põletist.

Nagu juba märkisime, ei toimu retsirkuleerivate gaaside tagasivool mitte ainult joa ühest kindlast kohast, vaid üle kogu ta pinna. Teist tüüpi põleti puhul retsirkuleerib seetõttu põleti suudme lähedal koldegaaside ja sekundaarõhu joa pinnalt lahtirebitud õhu segu. Põletist kaugenedes muutub isoleeriv sekundaarõhu kiht pidevalt õhemaks ning segu muutub «gaaside» poolest rikkamaks. Maksimum saavutatakse arvatavasti kohas, kus primaar- ja sekundaarõhu voolused muutuvad ühtseks tervikuks ning kaob sekundaarõhu joa isoleeriv toime. Hapniku kontsentratsiooni ebaühtluse edasise vähenemise põhjustab läbipõlenud gaaside retsirkulatsioon ja joa laienemine.

Koldegaaside retsirkulatsiooni kui stabiliseeriva teguri mõju põlemisprotsessile seisneb selles, et gaaside entalpia, mõõdetuna mingis kolde ristlõike keskpunktis, on segunemise tõttu suurem, kui põlemisel vabanenud ja gaasidelt koldes ülekantud soojushulkade algebraline summa. See on väljendatav võrratusega

$$Q_n^p \eta - \Delta Q' < I_r \quad (7)$$

kus

$Q_n^p$  — kütuse alumine kütteväärtus;

$\Delta Q'$  — koldes ülekantud soojushulk;

$I_r$  — gaaside entalpia;

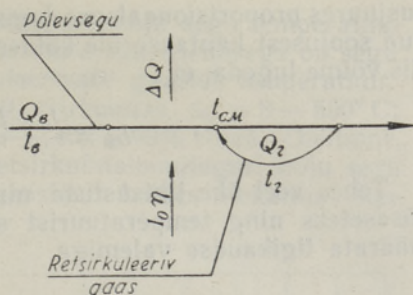
$\eta$  — põlemisaste.



Võrratuse parem pool väljendab gaaside entalpiat, arvutatuna ühe kaaluühiku kütuse kohta, vasak pool aga — põlemisel vabaneva ning koldes ülekantava soojushulga vahet.

Gaaside retsirkulatsiooni kui stabiliseeriva teguri mõju selgitamiseks koostame soojusbilansi võrrandi, võttes aluseks joonisel 5 toodud skeemi.

Soojusbilansi võrrand kolde teljel asetseva mingi meelevaldse punkti kohta omab järgmise kuju:



Joon. 5. Koldegaaside retsirkulatsiooniskeem.

$$Q_B(ct)_B|_{t_{CM}} + Q_R(ct)_R|_{t_{CM}} = Q_B(ct)_B|_{t_B} + Q_R(ct)_R|_{t_R} + Q_B \frac{Q_H^p}{\alpha V^0} \eta - B \Delta Q \quad (8)$$

ehk

$$(I_B)_{t_{CM}} + \varepsilon (I_R)_{t_{CM}} = (I_B)_{t_B} + \varepsilon (I_R)_{t_R} + I_0 \eta - \Delta Q \quad (9)$$

kus  $(I_B)_{t_B} = (ct)_B|_{t_B}$  — õhu entalpia koldesse siseneva õhu temperatuuril  $t_B$ , arvutatuna ühe mahuühiku õhu kohta;

$(I_B)_{t_{CM}} = (ct)_B|_{t_{CM}}$  — sama, segu temperatuuril;

$(I_R)_{t_R} = (ct)_R|_{t_R}$  — retsirkuleerivate gaaside entalpia gaaside temperatuuril  $t_R$ , arvutatuna ühe mahuühiku gaaside kohta;

$(I_{CM})_{t_{CM}} = (ct)_R|_{t_{CM}}$  — segunenud õhu ja gaaside entalpia temperatuuril  $t_{CM}$ , arvutatuna ühe mahuühiku segu kohta;

$Q_B$  — koldesse ajaühiku kestel siseneva õhu maht;

$Q_R$  — ajaühiku kestel retsirkuleerivate gaaside maht;

$I_0 = \frac{Q_H^p}{\alpha V^0}$  — teoreetiliselt võimalik entalpia, arvutatuna ühe mahuühiku õhu kohta;

$\varepsilon = \frac{Q_R}{Q_B}$  — koldegaaside retsirkulatsioonitegur.

Koldegaaside retsirkulatsioonitegur näitab, mitu mahuühikut retsirkuleerivaid gaase seguneb ühe mahuühiku koldesse antava õhuga. Retsirkulatsiooni puudumisel  $\varepsilon = 0$ .

Viimasest võrrandist avaldub segu entalpia kujul

$$I_{CM} = \frac{I_B + \varepsilon I_R + I_0 \eta - \Delta Q}{\varepsilon + \frac{1}{1+z}} \quad (10)$$

$$\text{sest } (I_B)_{t_{CM}} = \frac{(I_R)_{t_{CM}}}{1+z}.$$

Valemi (10) lihtsustamise eesmärgil loeme, et gaasidelt koldes ülekantud soojuse hulk on proportsionaalne gaaside entalpia juurdekasvuga põlemisprotsessis. Sellisel juhul

$$\Delta Q = \sigma I_0 \eta \quad (11)$$

kusjuures proportsionaalsuse tegur  $\sigma$  näitab, milline osa põlemisel vabane-  
nud soojusest kantakse üle koldes. Kuna  $\kappa$  arvust 1 ei moodusta üle 10%,  
siis võime lugeda, et

$$I_{\text{cm}} = \frac{I_{\text{B}} + I_{\text{o}}(1 - \sigma)\eta + \varepsilon I_{\text{T}}}{1 + \varepsilon} \quad (12)$$

Tehes veel ühe lihtsustuse ning lugedes gaaside ja õhu erisoojused  
võrdseteks ning temperatuurist sõltumatuteks, võime segu temperatuuri  
määrata ligikaudse valemiga

$$t_{\text{cm}} = \frac{t_{\text{B}} + bt_{\text{T}} + \varepsilon t_{\text{r}}}{1 + \varepsilon} \quad (13)$$

kus  $b = \eta(1 - \sigma)$ ;

$t_{\text{T}}$  — adiabaatiline põlemistemperatuur, arvatuna entalpia  $I_{\text{o}}$  järgi.

Avaldame valemiga (13) määratud temperatuuri summana

$$t_{\text{cm}} = t_{a_0} + \Delta t_{a_t} \quad (14)$$

$t_{a_0} = \frac{bt_{\text{T}} + \varepsilon t_{\text{r}}}{1 + \varepsilon}$  väljendab siin segu temperatuuri olenevust protsessi  
parameetritest juhul, kui koldesse antava õhu temperatuur oleks  $0^\circ$ .

Teine liige,  $\Delta t_{a_t} = \frac{t_{\text{B}}}{1 + \varepsilon}$ , määrab segu temperatuuri juurdekasvu olenevalt  
koldesse antava õhu temperatuurist.

Diferentseerides avaldist (13) gaaside retsirkulatsiooniteguri järgi,  
saame

$$\frac{dt_{\text{cm}}}{d\varepsilon} = \frac{t_{\text{r}} - t_{\text{B}} - bt_{\text{T}}}{(1 + \varepsilon)^2}$$

Tulemusest selgub, et olenevalt retsirkulatsioonitegurist on tempera-  
tuuri muutumise kiirus proportsionaalne suurusele  $(1 + \varepsilon)^{-2}$ , s. t. mõju  
segu temperatuurile on eriti suur retsirkulatsiooniteguri väikeste väärt-  
tuste puhul. Võrdsustades tuletise  $\frac{dt_{\text{cm}}}{d\varepsilon} = 0$  saame

$$t_{\text{r}} = t_{\text{B}} + bt_{\text{T}}$$

ehk maksimaalseks segu temperatuuriks võib olla  $t_{\text{cm}} = t_{\text{r}}$ , s. t. retsirkulee-  
rivate gaaside temperatuur. Lõpmata suure retsirkulatsiooniteguri puhul  
aga

$$t_{\text{cm}} = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{t_{\text{B}} + bt_{\text{T}} + \varepsilon t_{\text{r}}}{1 + \varepsilon} = t_{\text{r}}$$

mis on sama tulemus. Sellest järeldub, et lõpmata suure gaaside retsirku-  
latsiooniteguri puhul ei avalda koldesse antava õhu temperatuur segu tem-  
peratuurile mingit mõju, kui lugeda  $t_{\text{r}}$  sõltumatuks õhu temperatuurist.  
See on füüsikaliselt seletatav asjaoluga, et meelevaldse temperatuuriga  
õhu ühe mahuühiku mõju kindlat temperatuuri omavale lõpmata suurele  
gaaside kogusele võrdub praktiliselt nulliga.

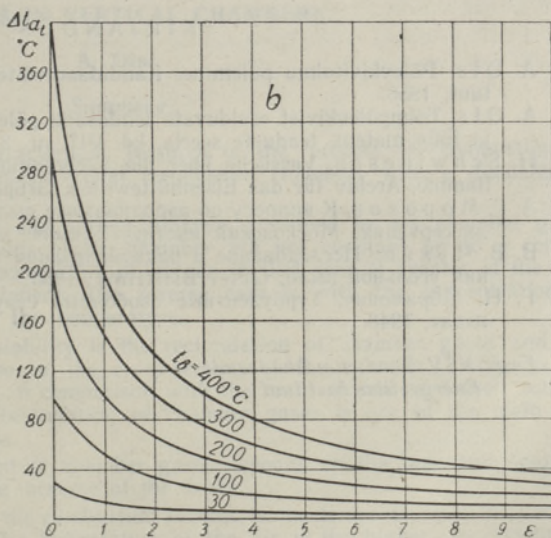
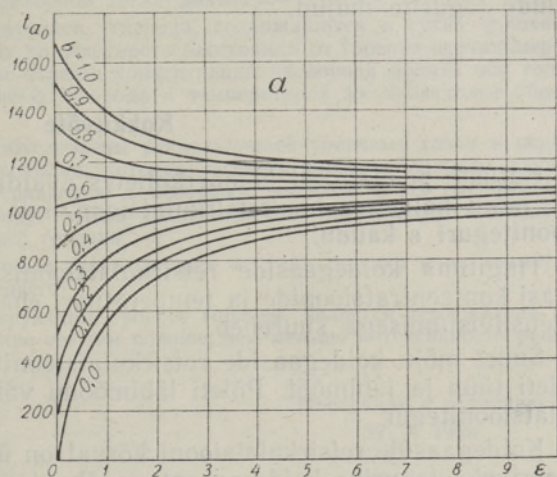
Saadud tulemuste illustreerimiseks on joonisel 6 esitatud temperatuu-  
ride  $t_{a_0}$  ning  $\Delta t_{a_t}$  sõltuvus gaaside retsirkulatsioonitegurist ja parameet-  
rist  $\varepsilon$ . Diagrammide koostamisel on põlevsegu adiabaatiliseks põlemis-  
temperatuuriks valitud  $t_{\text{T}} = 1700^\circ \text{C}$  ja retsirkuleerivate gaaside tempera-  
tuuriks  $t_{\text{r}} = 1100^\circ \text{C}$ .



Jooniselt 6, *a* selgub, et retsirkulatsiooniteguri mõju segu temperatuurile on seda suurem, mida väiksem see tegur on.  $\varepsilon$  suurenemisega on segu temperatuuril tendents saavutada retsirkuleerivate gaaside temperatuur. Näiteks  $b=0$  puhul muutub  $\varepsilon=0-1,0$  piirkonnas  $t_{a_0}=0-550^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon=2,0-3,0$  piirkonnas aga  $t_{a_0}=735-825^\circ\text{C}$ , s.o.  $\sim 90\%$  võrra. On ilmne, et  $b$  suurenemisega väheneb koldegaside retsirkulatsiooniteguri mõju segu temperatuurile. Alates  $b$  väärtusest, kus gaasidelt koldes ülekantud soojushulga ja põlemisel vabanevad soojushulga algebraline summa on võrdne retsirkuleerivate gaaside entalpiale ( $t_r=bt_r$ ), hakkab  $t_{a_0}$  gaaside retsirkulatsiooniteguri suurenedes vähenema. Sellisel juhul ei tõsta gaaside retsirkulatsioon enam segu temperatuuri.

Joonisest 6, *b* järeldub, et koldesse antava õhu temperatuuri mõju segu temperatuurile on seda suurem, mida väiksem on gaaside retsirkulatsioonitegur, kusjuures  $\varepsilon$  suurenedes  $\Delta t_{at}$  läheneb pidevalt nullile. Soovides näiteks õhu eelsoojenduse teel segu temperatuuri tõsta  $120^\circ\text{C}$  võrra, piisab selleks  $\varepsilon=1$  juures kui  $t_B=240^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon=2$  puhul aga peab eelsoojendatud õhu temperatuur olema  $t_B=360^\circ\text{C}$ .

Eksperimentaalsel teel saadud tolmpõlevkivi põlemise karakteristikate abil on võimalik valemi (13) põhjal ligikaudu hinnata põlemisprotsessis esineva koldegaside retsirkulatsiooniteguri väärtust. Arvutustes võeti  $\sigma=0$  ja gaaside retsirkulatsioonitegur määrati kolde ristlõikes, kus  $\eta=0,2$ . Nii moodi saadud gaaside retsirkulatsioonitegurid asusid esimest tüüpi põleti kasutamisel 2–4 piirides, kusjuures suurem arv vastab väiksemale põleti läbimõõdule. Teist tüüpi põleti kasutamisel asusid  $\varepsilon$  väärtused 1 piirides. See kinnitab teoreetilist tulemust, millele jõudsimme eespool, ja nimelt seda,



Joon. 6. *a* — temperatuuri  $t_{a_0}$  olenevus gaaside retsirkulatsioonitegurist, *b* — temperatuuri  $\Delta t_{at}$  olenevus gaaside retsirkulatsioonitegurist.

et gaaside retsirkulatsioon intensiivistub põleti läbimõõdu vähenemisega. Katsetulemuste võrdlemisi suure hajuvuse tõttu ei olnud võimalik hinnata kolde soojusliku erikoormuse mõju gaaside retsirkulatsiooniteguri väärtusele.

Ekspérimentaaltulemuste põhjal arvutatud gaaside retsirkulatsiooniteguri väärtused ei peegelda segunemisprotsessi kvantitatiivset külge täpselt, kuna koldetemperatuuri väärtuses peegeldub ka gaasidelt põlevsegule soojusejuhtivuse ja kiirguse teel ülekantud soojuse hulk. Peale mainitu võivad siin esineda veel seina ja põletipea temperatuuri ning muude tegurite mõjud.

### Kokkuvõte

Kütuste põletamisel kamberkolletes avaldab põlemisprotsessile tunduvat mõju koldegaaside retsirkulatsioon, mis on väljendatav retsirkulatsiooniteguri  $\epsilon$  kaudu.

Tingituna koldegaaside retsirkulatsioonist, esineb kolde ristlõigetes gaasi kontsentratsioonide ja temperatuuri ebaühtlus, mis retsirkulatsiooni intensiivistumisega suureneb.

Suurt mõju koldegaaside retsirkulatsioonitegurile avaldab kasutatava põleti tüüp ja läbimõõt. Põleti läbimõõdu vähenemisega suureneb retsirkulatsioonitegur.

Koldegaaside retsirkulatsiooni kõrval on üheks põlemisprotsessi stabiiliseerivaks teguriks koldesse antava õhu temperatuur. Tema mõju põlemisprotsessi stabiilsusele on seda suurem, mida väiksem on koldegaaside retsirkulatsioonitegur.

### KIRJANDUS

1. A. Ots, Põlevkivitolmu põlemine, Kandidaadiväitekiri, ENSV TA Energeetika Instituut, 1958.
2. A. Ots, Tolmpõlevkivist eralduvate lendosade põlemine, ENSV TA Toimetised. Tehn. ja füüs.-matem. teaduste seeria, kd. VII, nr. 3, 1958.
3. H. Schwidese n, Versuche über die Verbrennung-vorgänge in einer Kohlenstaub-flamme, Archiv für das Eisenhüttewesen, Gruppe D, Nr. 82, H. 6, 1931.
4. A. Г. М о р о з о в, К вопросу об аэродинамике пылеугольного факеля. Кандидатская диссертация, Московский институт химич. машиностр., 1953.
5. В. В. Ч у к и н, Исследование и рационализация горелочных устройств для сжигания угольной пыли, Отчет ВНИИМТ, 1955.
6. Г. Н. Абрамович, Турбулентные свободные струи жидкостей и газа, Госэнергоиздат, 1948.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse  
17. X 1959



## О НЕКОТОРЫХ ФАКТОРАХ, СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ В КАМЕРНЫХ ТОПКАХ

А. Отс,

кандидат технических наук

### Резюме

В статье рассматриваются характеристики процессов горения пылевидного сланца, полученные в вертикальной лабораторной топке диаметром 210 мм.

Концентрация кислорода и двуокиси углерода, содержащихся в сухих топочных газах, как и температура последних до некоторого расстояния от горелки неравномерны в данном сечении топки. На этом отрезке концентрация кислорода вблизи оси топки выше, чем в периферии. С двуокисью углерода и температурой же происходит обратное явление.

Указанные неравномерности обусловлены рециркуляцией топочных газов и неравномерностью скоростей в сечении топки, которая вызвана противоположным движением некоторой части газов по сравнению с основным течением и их смешением с горючей смесью, подаваемой в топку. Рециркуляция топочных газов является одним из факторов, стабилизирующих процесс горения.

Величина рециркуляции топочных газов зависит от типа горелки и ее диаметра, уменьшаясь с увеличением последнего.

Вторым фактором, стабилизирующим процесс горения, является температура подаваемого в топку воздуха. Влияние его тем больше, чем меньше интенсивность рециркуляции топочных газов.

Институт энергетики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
17. X 1959

## ON SOME STABILIZING FACTORS INFLUENCING THE COMBUSTION PROCESS IN VERTICAL CHAMBERS

A. Ots

### Summary

The author analyses the characteristic features of the process of combustion of pulverized oil shale in experimental vertical combustion chambers with a diameter of 210 mm.

The concentration of oxygen and carbon dioxide contained in dry chamber gases and the temperature in the sections of the chamber are not constant up to a certain distance from the burner. The concentration of oxygen in that zone is greater at the axis of the chamber than on its periphery. The reverse case is with the concentration of carbon dioxide as well as with the temperature.

The reason of the above instability is the recirculation of chamber gases and the inconstancy of the velocity plane in the cross-section of the chamber, owing to the reverse movement of some gases, in comparison with the main stream, and their mixing with the burning mixture. The recirculation of chamber gases is one of the main stabilizers of the combustion process.

The extent of the recirculation of chamber gases depends on the type and diameter of the burner, decreasing with the increase of the latter.

Another stabilizing factor at the combustion process is the temperature of the air that is being led into the chamber. The temperature of the air is the higher, the smaller is the intensity of the recirculation of chamber gases.

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

Received  
Oct. 17th, 1959