

Tallinna Tehnikaülikool
Soojustehnika Instituut

**KATLA TGME-464 KOLDE
EKRAANKÜTTEPINNA SADESTISE
MUSTSUSASTE
JA
SOOJUSJUHTIVUSTEGUR**

Prof. T.Tiikma ja ins. A.Vaht

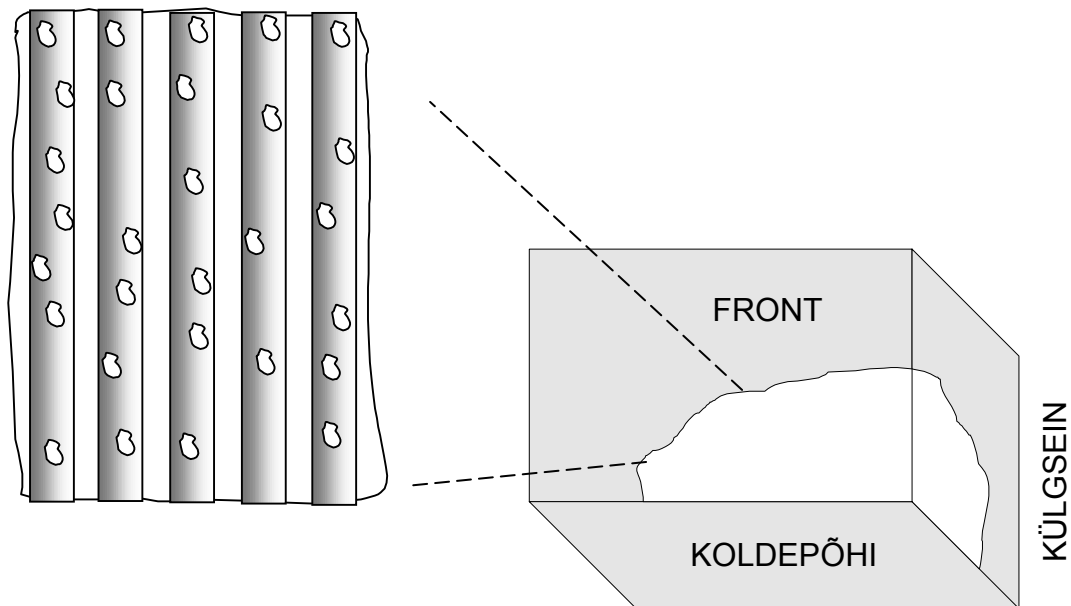
Tallinn 2001

Sissejuhatus

Iru Elektriijaama II energiaploki katel TGME-464 on loomuliku tsirkulatsiooniga, auru tootlikkusega 500 t/h ning on mõeldud nii masuudi kui ka gaaskütuse põletamiseks. Alates katla käikulaskmisest 1982. aastal kuni 1999. aastani on kütuseks kasutatud masuuti, mille keskmine väävlisisaldus on olnud 2-2,5 %. Gaaskütuse põletamise võimalus nimetatud katlas tekkis aga alles 1999. aastal, kui lõpetati kogu jaama gasifitseerimine ning alates sellest hetkest on soojuste ja elektrienergia tootmiseks kasutatud ainult gaasi.

Koos gaaskütuse kasutamisega tekkis katlas rida probleeme, milledest peamine oli auru temperatuuri hüppeline tõus ülekuumendis. Temperatuuri alandamiseks pidi suurendama sissepritse koguseid ülekuumendipakettide vahele.

Tekkis kahtlus, et kolde soojuslik efektiivsus on langenud ning ekraanküttepind (kolle) võtab vähem soojust vastu. Katla sisemisel ülevaatusel selgus, et kolde ekraan oli osaliselt kaetud valget värvi sadestisega ning võis arvata, et ekraanpinna mustsusaste on langenud. Võib-olla võiks mõelda nähtud pildi skemaatilisele ülesjoonistamisele?



Kolde soojuslik efektiivsus sõltub kolde mahu kiirgusvõime kõrval ka ekraanpinna sadestise termilisest takistusest ja mustsusastmest, millest omakorda sõltub kiirgussoojusülekanne suitsugaasidelt veele.

Käesolevas töös on uuritud eespool kirjeldatud katla ekraanpinnalt võetud sadestise mustsusastet ja soojusjuhtivustegurit.

Kolde soojuslik efektiivsus

Kolde soojuslik efektiivsus on oluline parameeter, mis iseloomustab kolde soojuslikku tööd. A.G.Blokh [3] defineeris kolde soojusliku efektiivsusteguri järgmiselt:

$$\psi = \frac{q_{\text{res}}}{q_i} = \varepsilon_f \cdot \varepsilon_w \frac{1 - \left(\frac{T_w}{T_f}\right)^4}{\varepsilon_f + \varepsilon_w \cdot (1 - \varepsilon_f) \cdot \left(\frac{T_w}{T_f}\right)^4}, \quad (1)$$

kus T_w – sadestise pinnatemperatuur, K;
 T_f – leegitemperatuur, K;
 ε_w – sadestise mustsusaste;
 ε_f – leegi mustsusaste;
 q_{res} – vastuvõetav soojusvoog, W/m²;
 q_i – langev soojusvoog, W/m².

Võrrandist (1) on näha, et kolde soojuslik efektiivsus sõltub leegi parameetritest ja ekraanpinna mustsusastmest. Samuti mõjutab efektiivsust ka ekraanpinna temperatuur, mis sõltub sadestise termilisest takistusest.

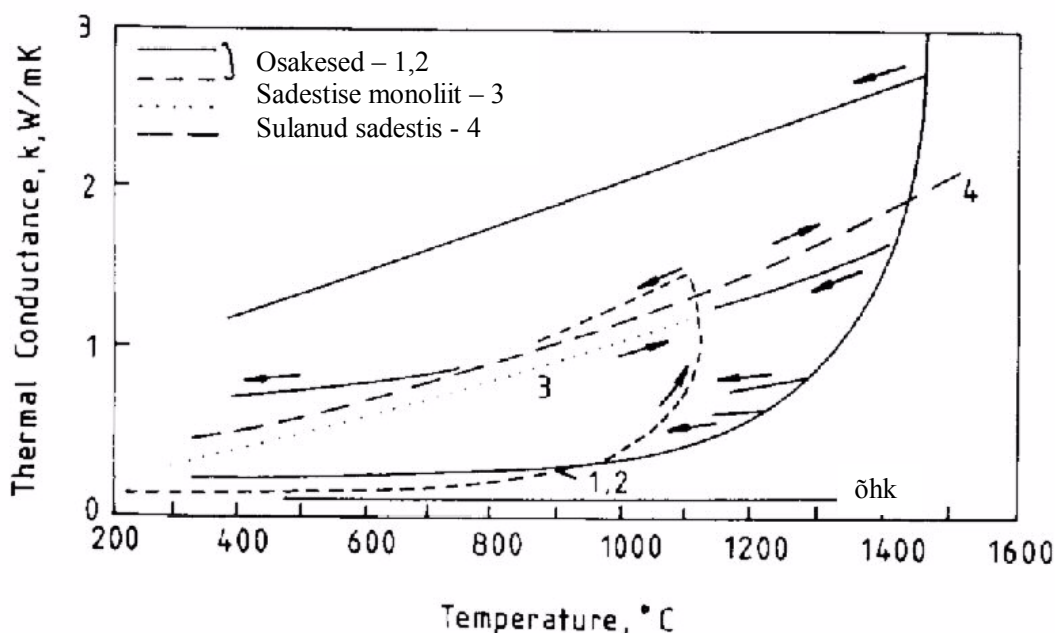
Üheks olulisemaks kolde soojuslikku tööd iseloomustavaks parameetrik on koldest lahkuvate gaaside temperatuur. Kui ekraanpind on kaetud õhukese sadestise kihiga, siis koldest lahkuvate gaaside temperatuur sõltub eelkõige sadestise kiiruslikest omadustest (mustsusastmest). Seda näitasid ka põlevkivituhasadestiste uurimise tulemused [1].

Sadestise soojusjuhtivustegur sõltub ümbritsevast keskkonnast, kus sadestis on moodustunud. E. Raaski järgi [5] tuhasadestiste soojusjuhtivustegurid võivad varieeruda järgmistes piirides:

- 1) väga väikese osakese läbimõõduga sadestised: $\lambda = 0,03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- 2) tihedalt pakitud osakestega sadestis: $\lambda = 0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- 3) paakunud sadestised koos osaliselt sulanud kihiga: $\lambda = 1,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- 4) rauaga segunenud või rikastunud šlakk: $\lambda = 3,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Ülevaate tuhasadestiste mitmesuguste olekute soojusjuhtivusteguri temperatuurisõltuvusest annab [*]s toodud graafik.

[*] – T.F. Wall *et al* The character of ash deposits and the thermal performance of furnaces. Fuel processing and technology 44 (1995) 143 – 153.



Teada on, et sadestise soojusjuhtivusteguri otsene mõõtmine on väga keeruline, kuid arvestades asjaoluga, et kolde ekraanpind oli kaetud tiheda ja väga õhukese sadestise kihiga, siis võib oletada, et sadestise termiline takistus võib olla tühine ning suurem mõju kolde soojuslikule efektiivsusele on sadestise mustsusastmel.

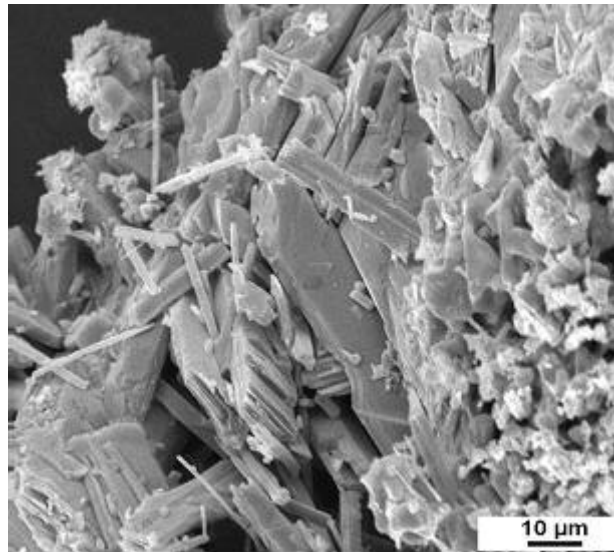
Pikka aega masuuti põletanud katla koldest võetud sadestise kvalitatiivne röntgenmikroanalüüs (SEM) nende valgele osale andis järgmise koostise:

Tabel 1

Keemiline ühend	Värvus	Sulamistemperatuur, °C	Sisaldus, %
Naatrium-metavanadaat, NaVO_3	kollakas	632	54,17
Naatriumsulfaat, Na_2SO_4	valge	1250	31,25
FeS	pruun/must	1193	8,68
Fe_2O_3			5,17
Naatrium-ortovanadaat, NaV_3O_8 ??	helepruun	1285	19,09

Tingituna naatriumiühendite kui sadestiste moodustumisel kristallunud ühendite (joonis 1) suurest sisaldusest võib eeldada, et koldest võetud sadestise valge osa mustsusaste on vahemikus 0,5 – 0,7 [1].

Käesolevas uurimistöös on teostatud laboratoorsed katsed sadestise mustsusastme ja soojusjuhtivusteguri määramiseks radiatsioon meetodiga.



Joonis 1. Ekraanpinnalt võetud sadestise heleda osa SEM pilt.

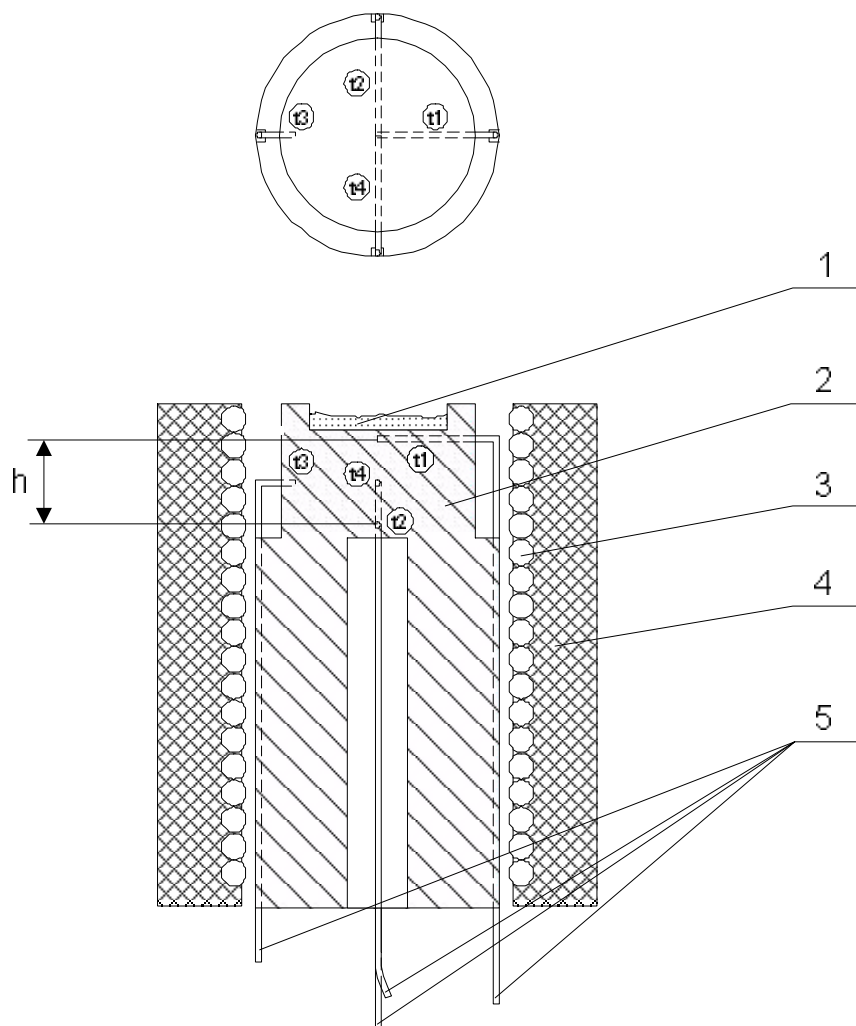
Sadestise mustsusastme ja soojusjuhtivusteguri üheaegne määramine

Sadestise mustsusastme ja soojusjuhtivusteguri üheaegsel määramisel kasutatakse kombineeritud radiatsioonmeetodit, mille põhimõtteline osa on kirjeldatud [2]s, kuid erinevalt seal toodust on käesolevas uurimuses realiseeritud meetodi statsionaarsete režiimide variant, kuna mõõtmised tuli teostada oluliselt madalamal temperatuuril kui seda on tehtud [2]s. Katseseadme põhimõtteline skeem nimetatud suuruste leidmiseks radiatsioonmeetodil on kujutatud joonisel 2.

Sadestise mustsusastme ja soojusjuhtivusteguri määramiseks asetatakse katseproov aluse (2) süvendisse, mille sügavus on 2 mm ja süvendi läbimõõt 29 mm. Alust, välisdiameetriga 35 mm, kuumutatakse elektrilise küttekehaga (3) väljastpoolt ning temperatuuride mõõtmiseks on alusesse paigaldatud neli termopaari (5). Kiirgusvoogude mõõtmiseks kasutatakse absoluutselt musta keha mudeli abil gradueeritud kogukiirguse radiatsioonpüromeetrit PPT-131.

Katsete käigus mõõdetakse soojusvoogusid ja temperatuure ning sadestise mustsusastme ja soojusjuhtivusteguri leidmiseks tuleb lahendada võrrandsüsteem (2) kasutades selleks vähimruutude- ja elimineerimismeetodit. Ülemääratud võrrandsüsteemi lahendamiseks on soojusvood ja temperatuurid mõõdetud statsionaarsetel režiimidel intervalliga 3-5 K. Seega tundmatute K ja $K/\sqrt[4]{\epsilon}$ suhtes on

tegemist lineaarse süsteemiga. Radiatsioonpüromeetri lugemite silumiseks on sobiv valida 3-5 võrrandit ühe süsteemi lahendamiseks, kusjuures on soovitatav kasutada režiimide ülekatet 2-3. Meetod põhineb eeldusel, et suhteliselt väikesel temperatuurivahemikul (viiel järjestikused režiimil kuni 25 K) võib lugeda mõõdetavad suurused K ja $K/\sqrt[4]{\varepsilon}$ temperatuurist mitte sõltuvateks.



Joonis 2. Katseseade sadestise mustsusastme ja soojusjuhtivusteguri üheaegseks määramiseks radiatsioonmeetodil. 1 – katsekeha (sadestis); 2 – katsekeha alus (roostevaba teras); 3 – elektriline küte; 4 – isolatsioon; 5 – termopaarid; $h = 22$ mm.

$$q_{si} = KT_{1,i} - \frac{K}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \sqrt[4]{\frac{q_i}{\sigma_0}} \quad (2)$$

$$q_{si+1} = KT_{1,i+1} - \frac{K}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \sqrt[4]{\frac{q_{i+1}}{\sigma_0}}$$

kus q_s – soojusvoog läbi katsekeha, W/m^2 ;
 q – kiirgusvoog katsekeha pinnalt W/m^2 ;

- K – sadestise kihi soojuslähikandegur, $K = \lambda / \delta$, $W/(m^2 \cdot K)$;
- λ – soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$;
- δ – sadestise paksus, m;
- T_1 – sadestise kihi alt mõõdetud temperatuur, K;
- ε – sadestise mustsusaste;
- σ_0 – Stefan-Boltzmann'i konstant, $W/(m^4 \cdot K)$;
- i – statsionaarse režiimi järjekorranumber.

Kasutades arvutiga ühendatavat andmehõivesüsteemi (nt. OMEGA WorkBench) on võimalik termopaaride ja soojusvooanduri näitude registreerimine intervalliga 5-10 sekundit. Sellise intervalliga lugemite registreerimine peab toimuma vähemalt 1 minuti vältel, et saada piisaval hulgal andmeid ühe statsionaarse režiimi jaoks. Võrrandsüsteemi 2 täpsete lahendite leidmine on tihedas sõltuvuses võrrandi tegurite ja vabaliikme väärtuste kõikumisega. Seepärast on vajalik eriti kiirgusanduri lugemite silumine enne võrrandsüsteemi lahendamist. Peale võrrandsüsteemi lahendite leidmist on võimalik arvutada sadestise soojusjuhtivustegurit, mustsusastet ja pinnatemperatuuri.

Joonisel 2 näidatud termopaaride montaaž võimaldab temperatuuride vahe kaudu hinnata täiendavalt soojusvoogusid katsekeha aluses.

$$q = \frac{k}{h} \cdot (t_1 - t_2) \quad W/m^2 \quad (3)$$

kus h – termopaaride 1 ja 2 vaheline kaugus, m;
 $k = 13 + 0,01089 t_{\text{kesk}}$ – roostevaba terase soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$.

Tulemused

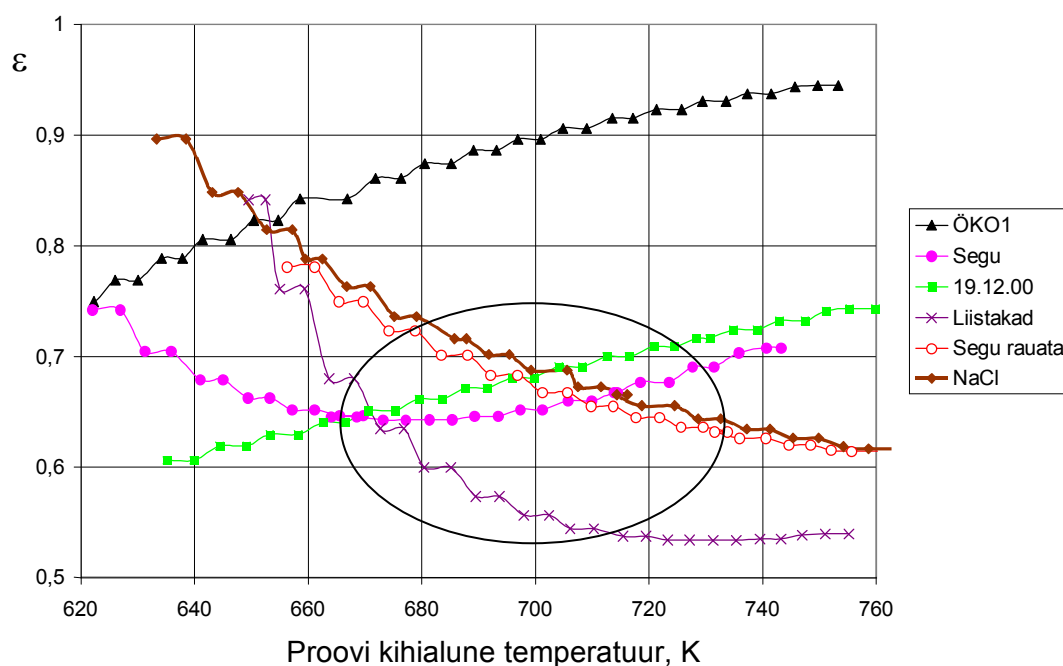
Käesolevas töös on määratud mustsusaste ja soojusjuhtivustegur ekraanpinnalt võetud sadestisele ning erineva keemilise koostisega segudele (vt. tabel 2), mis on kokku segatud lähtudes tabelis 1 esitatud sadestise kvalitatiivsest röntgen-mikroanalüüsist. Võttes arvesse Na suurt sisaldust nimetatud sadestises, on lisaks eelnevale määratud mustsusaste ja soojusjuhtivustegur ka soolale.

Joonisel 3 on näidatud erinevate proovide mustsusastme dünaamika kuumutamisel. NaCl mustsusastme sõltuvus temperatuurist on tugevas seoses varasemate uuringutega [2].

Lisaks katsetele NaCl-ga on püütud mustsusastet määrata ka suure süsiniku sisaldusega proovile, mis eeldatavasti oleks pidanud andma mustsusastme väärtuseks ~0,95. Võrdluseks võib kirjandusest [7] leida mustsusastme tahmale 0,95-0,97.

Joonisel 3 on näha proovi “ÖKO1” mustsusastme dünaamika kuumutamisel ning saadud tulemused ühtivad kirjeldatud andmetega. Proov “ÖKO1” on võetud sama katla ökonomaiseri pinnalt ning elementaaranalüüs näitas süsiniku sisalduseks 69 %.

Jooniselt 3 on näha ka ekraanpinnalt võetud sadestise ja sarnase keemilise koostisega segude mustsusastmete kokkulangevus, mistõttu võime väita, et ekraanpinnal oleva “valge” sadestise mustsusaste on vahemikus 0,53-0,68.



Joonis 3. Katseproovide mustsusastme dünaamika kuumutamisel (Ringiga tähistatud ala katab sadestiste ligikaudset töötemperatuuripiirkonda).

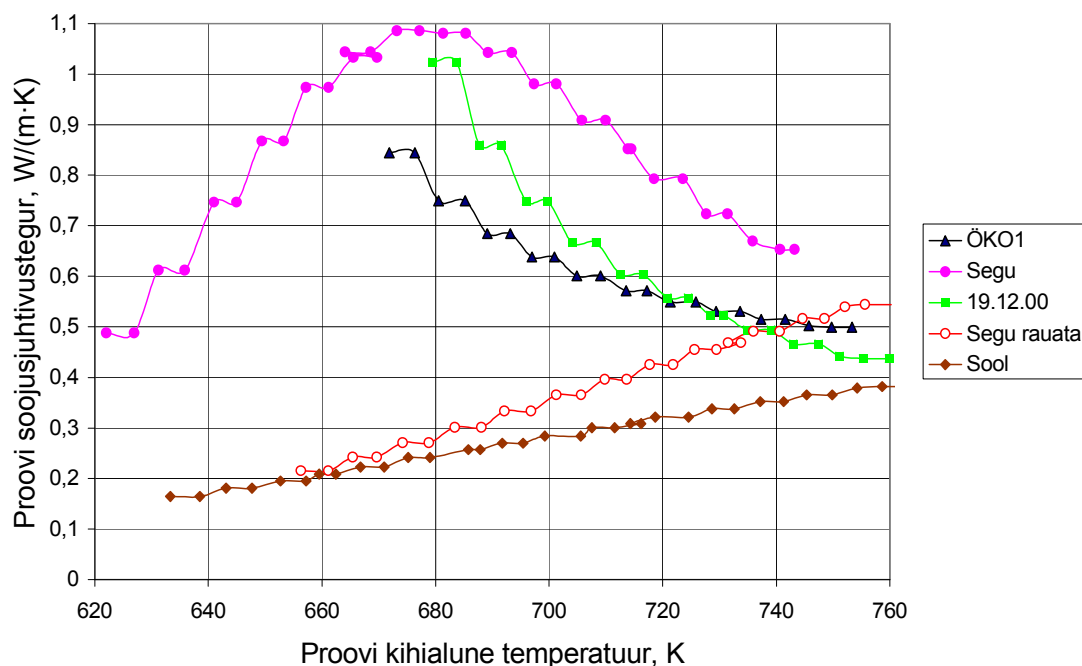
Joonisel 4 on esitatud ekraanpinnalt võetud sadestise ja mitme erineva segu soojusjuhtivusteguri dünaamika kuumutamisel. NaCl soojusjuhtivusteguri väärtus on vahemikus 0,2 - 0,4 W/(m·K) (termilinetakistus: $R = 0,005 - 0,012 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$), mis vastab ka varasematele uuringutele [2], kus NaCl termiliseks takistuseks saadi 0,007 (m²·K)/W. Sarnase paralleeli võime leida ka proovile “Segu rauata”. Nimetatud uuringutes saadi Na₂SO₄ soojusjuhtivusteguriks 0,4 W/(m·K).

Jooniselt 4 on näha, et proovi “Segu” soojusjuhtivustegur on 2 korda suurem proovi “Segu rauata” omast, mis on põhjendatav raua sisaldusega esimeses proovis (vt. proovide koostist, tabel 2).

Varasematest uuringutest, seadmega $-\lambda-400$, on teada proovi “ÖKO1” soojusjuhtivustegur väärtusel 0,088 W/(m·K) [6], mis on väiksem käesolevas töös

saadud tulemusest. Radiatsioonmeetodiga määratud soojusjuhtivusteguri suuremat väärtust proovile "ÖKO1" saab põhjendada järgmiselt:

1. Kihi paksus alusel oli 1 mm. Teadagi on väga raske tagada proovi ühtset paksust üle kogu aluse. Seega võis tekkida olukord, et radiatsioonpüromeeter nägi metalli pinda (st. õhuke kiht osutus poolläbipaistvaks).
2. Radiatsioonmeetodi puhul oli tegemist vabakonvektsiooniga poorse kihi sees, mis seadme $-\lambda-400$ puhul puudus.



Joonis 4. Katseproovide soojusjuhtivusteguri dünaamika kuumutamisel.

Tabel 2

Proovi nimi	Koostis	Mustsusaste	Soojusjuhtivustegur $W/(m \cdot K)$	Kihipaksus katseseadme alusel, mm
ÖKO1	69% C; 6,6% S; 1% N; 0,3% H *	0,8 - 0,95	0,5 - 0,7	1
Segu	15% Na_2SO_4 6% FeS 4% Fe_2O_3 75% NH_4VO_3	0,67	0,7 - 1,1	1,5
19.12.00	Koostis määramata!	0,7	0,5 - 0,7	1,5
Liistakad (19.12.00) **	54% $NaVO_3$ 31% Na_2SO_4 9% FeS 5% Fe_2O_3 19% NaV_3O_8	0,55	-	1
Segu rauata	25% Na_2SO_4 75% NH_4VO_3	0,67	0,2 - 0,5	1,5
Sool	NaCl	0,67	0,2 - 0,4	2

* Elementkoostis, määratud analüsaatoril *ELEMENTAR*

** Liistakate all on mõeldud ekraanpinnalt võetud proovi valget faasi, mis moodustas küttepinnal nn. kooriku paksusega 1mm. Samal ajal võetud proovi "19.12.00" moodustab peenem fraktsioon, mis kraabiti küttepinnalt.

Erinevalt teistest proovidest on proovi "Liistakad" mustsusaste ja soojusjuhtivustegur määratud mõnevõrra teisiti.

Sadestise valge osa moodustas ekraanpinnal nn. kooriku, mistõttu ekraantorudelt võetud sadestis oli teatud kumerusega. Sadestise ja katseseadme vaheline hea kontakt saavutati vedela plii abil, millega välditi õhupilusid ning suurendati soojusjuhtivust katseseadme aluselt sadestisele. Nimetatud proovi mustsusastme dünaamika kuumutamisel on esitatud joonisel 3.

Järeldused

1. Kuna ekraanpinna sadestise termiline takistus on väike ($R = 0,001 - 0,003$ ($m^2 \cdot K / W$)), siis peamiseks kolde soojusliku efektiivsust mõjutavaks teguriks on sadestise mustsusaste.
2. Tingituna suurest Na sisaldusest, on ekraanpinnalt võetud sadestise mustsusaste madal ja vahemikus 0,53 - 0,68, mis vähendab oluliselt kolde soojuslikku efektiivsust.
3. Käesolevas uurimistöös ei õnnestunud proovile "Liistakad" soojusjuhtivustegurit määrata, mistõttu võib oletada, et me siiski ei saavutanud head kontakti vedela plii ja sadestise pinna vahel.
4. Masuudilt gaaskütusele üleminekul vähenes kolde soojuslik efektiivsus tingituna gaaskütuse leegi väiksemast mustsusastmest.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. *T.Tiikma*. Thermal Operation of Oil Shale Boiler Furnaces. Oil Shale, 1994, v.11, N°4, p.325-329.
2. *T.Tiikma, H. Tran*. The complex method for investigation of thermophysical properties of kraft recovery boiler fireside deposits. Progress in Engineering Heat Transfer. Ed. B. Grochal, J. Mikielewicz, B. Sunden. (Proc. of 3rd Baltic Heat Transfer Conference). IFFM Publishers, Gdansk, 1999. pp. 95 – 102.
3. *A.G.Blokh*. Heat Transfer in Steam Boiler Furnaces, Hemisphere Publishing Corp., 1988, 283 pp.
4. *A.Poobus, T.Tiikma*. Some design aspects of recovery boiler for oil shale retorting unit SHC-3000. Oil Shale, 1997, v.14, N°3 Special, pp.299-306.
5. *E.Raask*. Mineral Impurities in Coal Combustion. Hemisphere Publishing Corp., 1985, 484 pp.
6. *T.Tiikma, A.Vaht*. Pudedate sadestiste soojusjuhtivustegur, lk.12.
7. *I.Mikk*, Soojustehnika käsiraamat. Valgus, Tallinn 1977, lk. 620.
8. *T.Tiikma, Z.Mičević*. The study of thermophysical properties of boiler furnace deposits. Tallinna Tehnikaülikooli toimetised nr.726, lk.37-50.