



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

MST40LT

Hannes Jürivete

**PÕLEVKIVI TUHA OSAKESTE KÄITUMINE KEEVKIHIS
ISOTERMILISTEL TINGIMUSTEL**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb

tehnikateaduste

bakalaureuse kraadi

Tallinn 2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Dmitri Nešumajevi juhendamisel

“.....”200...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”200...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”200... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE

2014. aasta VI semester

Üliõpilane: Hannes Jürivete, 104350

Õppekava: MASB02

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: vanemteadur Dmitri Nešumajev

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Põlevkivi tuha osakeste käitumine keevkihis isothermilistel tingimustel.

The behavior of oil shale ash particles in fluidised bed in isothermic conditions.

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr.	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Katseseadme ehitus	01.01.2014
2.	Katsete teostamine	01.02.2014
3.	Katsetest saadud tulemuste arvutisse sisestamine ning töötlemine	31.03.2014
4.	Lõputöö teostamiseks vajaliku materjali hankimine ning töötlemine	21.05.2014
5.	Lõputöö kirjutamine ning vormistamine	30.05.2014

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Uurida, kuidas muutub põlevkivi tuha osakeste käitumine keevkihis gaasi kiiruse tõstmisega.

Töö keel: eesti

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 30.05.2014

Töö esitamise tähtaeg 03.06.2014

Üliõpilane Hannes Jürivete /allkiri/

kuupäev.....

Juhendaja Dmitri Nešumajev /allkiri/

kuupäev.....

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE	3
SISUKORD	4
EESSÕNA	5
1. SISSEJUHATUS	6
2. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED	7
2.1. Keevkihi osakeste süsteemi iseloomustavad suurused	8
2.1.1. Pindkiirus	8
2.1.2. Kujutegur	10
2.1.3. Poorsus	11
2.1.4. Osakeste keskmine läbimõõt	12
2.1.5. Osakese hõljumiskiirus	12
2.1.6. Geldarti diagramm	13
2.1.7. Kihi aerodünaamilise takistuse Δp sõltuvus pindkiirusest u	14
3. KATSE	15
3.1. Katseseadme kirjeldus	15
3.2. Katses kasutatud tuhad	17
3.3. Tuha tiheduse määramine	17
3.4. Katse teostus	19
3.5. Katseandmete analüüs	20
3.5.1. 4 - 8 mm fraktsioon	20
3.5.2. Segu fraktsioon	25
3.5.3. Segu fraktsiooni ja 0,5 – 1 mm kivisöe põhjatuha minimaalse pindkiiruse võrdlusanalüüs	29
KOKKUVÕTE	31
SUMMARY	32
KASUTATUD KIRJANDUS	33
LISA 1. 4 – 8 mm fraktsiooni katse tulemused ja arvutatud väärtused	34
LISA 2. Segu fraktsiooni katse tulemused ja arvutatud väärtused	35

EESSÕNA

Tallinna Tehnikaülikoolis toimusid katsed põlevkivi tuhaga külmal keevkihi katse stendil. Osalesin katseseadme koostamisel ning sellele järgnenud katsetel, millest lähtudes tekkis mõtte kirjutada bakalaureusetöö antud katsete tulemuste põhjal.

Töö koostamine toimus Soojustehnika instituudis ja juhendajaks oli Dmitri Nešumajev.

Siinkohal soovin avaldada tänu juhendajale abistamise eest.

1. SISSEJUHATUS

Üha enam kasutatakse tänapäeval fossiilsete kütuste põletamiseks keevkihttehnoloogiat. Keevkiht on hõljuvatest tahketest osakestest ja seda läbiva gaasivooluse aerodünaamiline süsteem. Selliselt tekib sisemist liikumist omav keha, mida tuntakse keevkihina või pseudovedelikuna. Pseudovedelik käitub samalaadselt vedelikuga ning omab sellega sarnaseid omadusi. Kuumutades osakestest moodustuva keevkihi vähemalt süttimistemperatuurini ning suunates sinna kütuse voo, toimub pidev põlemine vajamata selleks kõrget temperatuuri [1].

Peamiselt on kasutusel kaks keevkihttehnoloogiat: klassikaline ja tsirkuleeriv keevkihtpõletus. Klassikalises keevkihis tahketele osakestele mõjuv gaasivooluse dünaamiline jõud tasakaalustub osakestele mõjuva raskusjõuga. Tsirkuleerivas keevkihis kanduvad tahked osakesed kolderuumist välja, mis püütakse tuhapüüduritega ehk tsüklonitega kinni, osakesed annavad soojuse küttepindadele ja suunatakse vajadusel koldesse tagasi [2]. Antud tehnoloogiat täiendatakse pidevalt, sest see sobib hästi madalakvaliteetsete kütuste põletamiseks ning tänu kolde madalatele temperatuuridele, ei teki ka erilisi keskkonnavalaseid probleeme.

Kihi moodustamiseks kasutatakse liiva või kütuse oma tuhka. See sõltub sellest, kas on tegemist tuhavaeste või tuharikaste kütustega. Kohaliku põlevkivi kasutamisel liiva pole vaja lisada, sest selle põlemisel tekib piisavalt tuhka mida kasutada kihi moodustamiseks [2].

Antud lõputöö eesmärgiks on uurida ja analüüsida kihi moodustamiseks kasutatava põhjatuha osakeste käitumist erinevates isothermilistes tingimustes. Kivisöe põhjal on sarnaseid uuringuid teostatud, kuid põlevkivi tuha osakeste käitumist pole eriti uuritud. Selleks, et saada võrreldavaid tulemusi analüüsitakse töös katse andmeid, mis toimusid 19 °C gaasi temperatuuril ning seejärel arvutuste põhjal vaadelda, kuidas muutub osakeste minimaalne hõljumise kiirus, kui keskkonna temperatuuriks on 400, 500, 600, 700, 800, 900 °C.

Töö algab teoreetilise poole selgitusega, kus on kirjeldatud osakesi iseloomustavaid suurusi. Seejärel kirjeldatakse katse korraldust ja katseseadme ehitusliku poolt ning lõppeb katseandmete analüüsi ja kokkuvõttega. Lisaks teostatakse võrdlusanalüüs põgusalt katse tulemusi kivisöe osakestele arvutatud pindkiirustega. Lõppu on lisatud katsete käigus saadud tulemused.

2. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

Keevkiht on tahkeosakeste hõljum gaasivooluses, kujutades endast pulseerivat aerodünaamilist süsteemi, millel on vedelikuga mõned ühised omadused, mistõttu keevkiht on tuntud kui pseudovedelik [3].

Keevkiht võib eksisteerida kahe piiroleku vahel. Esimene piirolek kujutab endast seisvat kihti ja teine olek nn pneumotransporti, kus tahkeosakesed koos gaasiga süsteemist välja kantakse. Aerodünaamilisi olekuid võib kahefaasilisel süsteemil olla mitmeid, mis sõltuvad osakeste omadustest ehk mõõtmetest, tihedustest jne. Režiimid jagatakse osakeste mõõtmete ja tiheduste põhjal nelja kategooriasse, kusjuures tuleb arvestada ka tekkivat aerodünaamilist olekut [3]. Aerodünaamilised olekud jagunevad:

- liikumatu kiht,
- agregeeritud keevkiht,
- kiirkeevkiht,
- pneumotransport.

Lisaks jaguneb agregeeritud keevkiht nelja alarežiimi:

- homogeenne,
- heterogeenne,
- kihiline,
- turbulentne.

Kiirust, mille ületamisel viiakse osakesed gaasivoolusega kaasa, nimetatakse teiseks kriitiliseks kiiruseks ehk transpordikiiruseks. Tsirkuleeriva keevkihiga põletustehnoloogia korral koldest väljakanduvad osakesed püütakse kinni ja suunatakse koldesse tagasi, millega tagatakse tahkefaasi katkematu ringlus. Keevkihi moodustub seejuures kas selleks otstarbeks kasutatavast materjalist (nt liiv), kütuse enese tuhast või mõnel muul moel [3].

2.1. Keevkihi osakeste süsteemi iseloomustavad suurused

2.1.1. Pindkiirus

Pindkiirusel u_{mf} toimub püsikihi üleminek keevkihile, mis tähendab, et selle kiiruse juures hakkavad osakesed liikuma ja tekib kindlate omadustega pseudovedelik ehk keevkiht. Enne pindkiiruse saavutamist on osakestele mõjuv aerodünaamiline jõud väike ning kiht jääb restile püsima ja gaas voolab läbi osakestevaheliste tühimike välja. Vajalik minimaalne pindkiirus u_{mf} on keevkihi tekitamisel tuntud kui esimene kriitiline keevkihi tekkekiirus. Minimaalsele pindkiirusele vastab kihi poorsus ϵ_{mf} . Kui kiirus u le kehtib tingimus $0 \leq u \leq u_{mf}$, siis osakesed ei liigu ning kihi poorsus ei muutu [3].

Piirkiirust u_{mf} on võimalik eksperimentaalselt määrata enamikel juhtudel kasutades kihi aerodünaamilise takistuse muutust sõltuvalt pindkiirusest. Piirkiirus u_{mf} sõltub osakeste Reynoldsi ja Archimedese arvust ning selle arvutamiseks kasutatakse mitmeid valemeid, millest üks võimalikest on [3]

$$Re_{mf} = \sqrt{27,2^2 + 0,0408Ar} - 27,2, \quad (2.1)$$

Re_{mf} - on keevkihi esimesele kriitilisele tekkekiirusele vastav Reynoldsi arv

$$Re_{mf} = \frac{u_{mf}\Delta}{\nu}, \quad (2.2)$$

Archimedese arv

$$Ar = \frac{g\Delta^3}{\nu^2} \left(\frac{\rho_0}{\rho_g} - 1 \right), \quad (2.3)$$

Δ - osakese läbimõõt,

ν - gaasilise keskkonna kinemaatiline viskoossus,

g - raskuskiirendus,

ρ_0 - osakese tihedus,

ρ_g - gaasi tihedus.

Kiiruse tõustes suureneb kihi poorsus ja kõrgus ning moodustub kas homogeenne või heterogeenne keevkiht. Homogeense kihi teke on võimalik ainult Geldarti diagrammi (Sele 2.2) A tüüpi materjali puhul ning see sõltub osakeste omadustest. Kui homogeenne ja heterogeense režiimi lahutava kiiruse tähistame u_{mb} , siis homogeenne keevkiht esineb vahemikus $u_{mf} \leq u \leq u_{mb}$. Homogeenne keevkiht on stabiilne ja selgelt on väljendatav eralduspind, kuid pole välistatud mõningane osakeste pulsatsioon kihipeelses tsoonis [3].

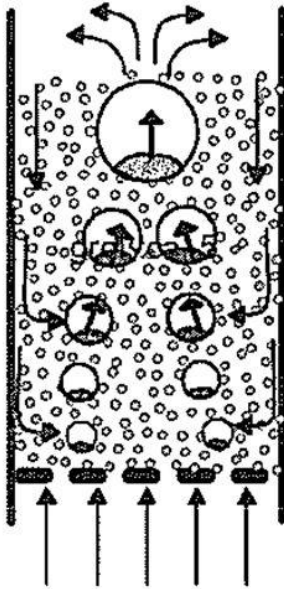
Suuremal pindkiirusel kui u_{mb} kasvab nii kõrgus kui ka suureneb poorsus. Gaasimullid, mis tekivad restpinna lähedases alas, tõusevad ülespoole ning väljuvad kihi pinnalt. Selliselt käituvat keevkihti nimetatakse heterogeenseks ehk mullivaks keevkihiks. Kiiruse kasvades mullide mõõtmed suurenevad. Heterogeenne kiht on stabiilne ning selge lahutuspinna. See eksisteerib vahemikus $u_{mb} \leq u \leq u_{ms}$ ja püsib kiiruseni u_{ms} , mis tähendab kiiruse piiri heterogeense ja turbulentsse keevkihi vahel [3].

Kiiruse tõustes saavutatakse järgmine piirkiirus u_{ms} , millest edasi tõustes algab keevkihi ristlõikeline kihistumine, kus piirkonnad vahelduvad tihedamate ja vähemtihedamate aladega ning saavutab kihistunud keevkihi oleku. Samaaegselt kasvab ka kihi kõrgus ja suureneb poorsus. Kihistumise toimumine sõltub suuresti kolde geomeetristest mõõtmetest, kihi kõrgusest ja osakeste suurusest. Väikse mõõduliste osakeste korral kihistumist sääraselt ei toimu, sest tühimikel pole võimalik kasvada kolde mõõtme suurusjärguni. Sellist tüüpi keevkiht eksisteerib vahemikus $u_{ms} \leq u \leq u_c$, kus u_c on piirkiiruseks kihistunud ja turbulentsse keevkihi vahel [3].

Edasisel kiiruse kasvul hakkab tekkima suure kiirusega ja ühtlase struktuuriga turbulentsne kiht. Selles piirkiirusel kasvab kihist väljakanduvate ja teistest kriitilistest kiirusest kiiremalt liikuvate osakeste arv. Turbulentsse kihi omapäraks on osakeste grupeerumine ja gaasitühimike teke. Lisaks toimub nende sööstliikumine edasi- tagasi. Enam ei ole lahutuspind vabalt määratletav [3].

Kui pindkiirust veelgi tõsta ületatakse turbulentsse oleku piirkiirus u_{se} ning süsteem läheb üle kiirrežiimi, kus algab osakeste intentsiivne väljakanne. Sarnaselt turbulentssele kihile, puudub siingi kihil selge lahutuspind. Sellist režiimi kasutatakse tsirkuleeriva keevkihiga kolletes. Koldest väljunud osakesed püütakse kinni ning suunatakse tagasi alla kolde restile, sellest tingitult on kiirrežiimis restilähedases tsoonis rohkem osakesi kui ülevalpool. Lisaks esineb ka koldesisest tsirkulatsiooni, mis tähendab, et restile suunatud osakesed liiguvad mööda kolde

südamiku üles ning langevad alla tagasi mööda kolde seinu ääri (Sele 2.1). Kiirrežiim esineb pindkiiruse vahemikus $u_{se} \leq u \leq u_{tr}$. [3]



Sele 2.1. Osakeste liikumine koldes [5]

Edasisel kiiruse suurenemisel saavutatakse järgmine piirkiirus u_{tr} , kust alates algab pneumotransport. Seda režiimi iseloomustab tahkefaasi suure kontsentratsiooniga tsooni puudumine restipealses alas, välja arvata osakesi kiirendav osa. Tahkefaasi tihedus muutub kolde kõrguse ulatuses vähe, kuid võivad tekkida tahkeosakeste kolooniad kolde seinteäärses alas [3].

2.1.2. Kujutegur

Keevkihi aerodünaamiline režiim ja piir- ehk kriitilised kiirused sõltuvad osakeste mõõtmetest, nende aerodünaamilisest kujust ja tihedusest. Ideaalne oleks kerakujuline osake, kuid realses süsteemis ideaalseid osakesi ei leidu ja tegelike osakeste geomeetrilist kuju iseloomustatakse kujuteguriga ϕ [3].

$$\varphi = \frac{F_s}{F_0}, \quad (2.4)$$

F_s - sfäärilise osakese pindala,

F_0 - tegeliku osakese pindala.

Kujuteguri φ väärtus sõltub materjalist, näiteks liivale, mida keevkihttehnoloogias laialt kasutatakse $\varphi = 0,66 - 0,86$. Osakese kujutegur määratakse sageli katseliselt. Selleks võrreldakse katsega määratud tegeliku geomeetrilise kujuga osakeste aerodünaamilist takistustegurit sfääriliste osakeste takistusteguriga. Niimoodi saadud suhet nimetatakse ka osakeste aerodünaamiline kujutegur [3].

2.1.3. Poorsus

Kihti ehk süsteemi kui tervikut iseloomustab poorsus ε . Kihi poorsus on võrdne süsteemi gaasimahu ja kogumahu suhtega. Poorsus näitab tahketest osakestest vaba mahu suhtelist väärtust. Poorsuse kaudu on võimalik avaldada kahefaasilise süsteemi tihedust [3].

$$\rho_k = \varepsilon \rho_g + (1 - \varepsilon) \rho_0, \quad (2.5)$$

ρ_g - gaasi tihedus,

ρ_0 - osakese tihedus.

Antud töös määrati poorsus katseliselt, milleks avaldamiseks kasutati keevkihi rõhulangu valemit, kus rõhulang oli valitud minimaalse pindkiiruse järgi

$$\Delta p_{mf} = H_{mf}(\rho_0 - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g, \quad (2.6)$$

H_{mf} - kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel m ,

ρ_0 - osakese tihedus kg/m^3 ,

ρ_g - gaasi tihedus kg/m^3 ,

ε - poorsus,

g - raskuskiirendus $9,8 \text{ m/s}^2$.

2.1.4. Osakeste keskmine läbimõõt

Keevkihi puhul iseloomustatakse süsteemi sageli ka osakese keskmise läbimõõdu kaudu, mis on defineeritav [3]

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\Delta_{ki}}, \quad (2.7)$$

x_i - osakese läbimõõt,

Δ_{ki} - osakese läbimõõdule vastav ainese hulk.

2.1.5. Osakese hõljumiskiirus

Aerodünaamilisest seisukohast iseloomustab osakest hõljumiskiirus v_t , mida tuntakse ka osakese vabalangemise- ehk terminaalkiirusena. Gravitatsiooniväljas gaasilises keskkonnas vabalt langev osake omandab hõljumiskiiruse gaasilise keskkonna suhtes, kui temale mõjuv aerodünaamiline jõud tasakaalustab keha raskusjõud. Hõljumiskiiruse arvutamise aluseks on jõudude tasakaalu võrrand [3]

$$\frac{1}{6}\pi\Delta^3 g(\rho_0 - \rho_g) = \frac{1}{8}\pi\gamma\rho_g\Delta^2 v_t^2, \quad (2.8)$$

Δ - osakese läbimõõt,

g - raskuskiirendus,

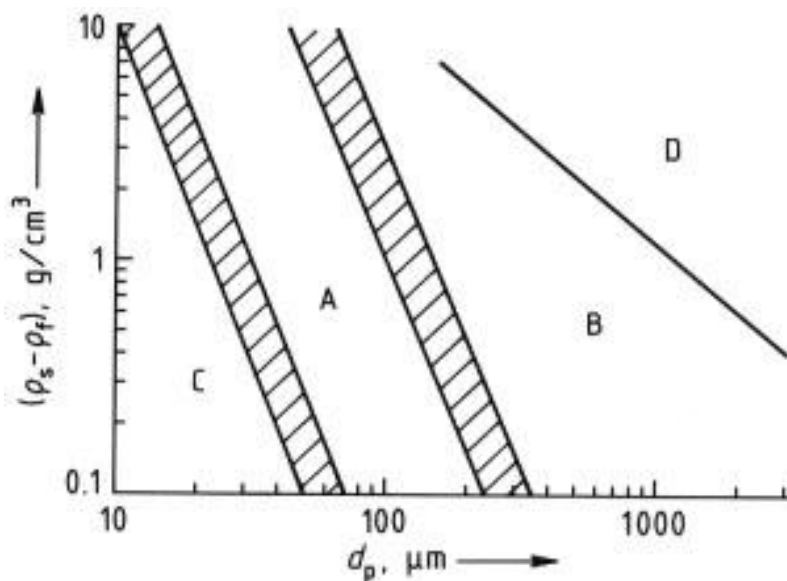
ρ_0 - osakese tihedus,

ρ_g - gaasi tihedus,

γ - osakese aerodünaamiline takistustegur.

2.1.6. Geldarti diagramm

Keevkihis kasutatavate osakeste omaduste hindamiseks sõltuvalt mõõtmetest ja tihedusest kasutatakse Geldarti diagrammi. Graafikul, kus vertikaalteljel on osakeste tiheduste vahe ja horisontaalteljel osakeste läbimõõt, on osakesed jagatud nelja erinevasse piirkonda C, A, B ja D (Sele 2.2) [4].



Sele 2.2. Geldarti diagramm [4]

Piirkond C koosneb peeneteralistest kergetest osakestest, millest keevkihti on võimalik tekitada vaid abivahendeid kasutades. Osakeste vaheline kleepumine elektrostaatiliste jõudude toimel on suurem kui gaasi poolt avaldatav surve. Kihti läbivast gaasist tekivad kanalid, mis raskendavad veelgi korrektse keevkihi teket.

Piirkonnas A paiknevad väikese diameetriga ($\sim 0,1 \text{ mm}$) ning väikese puistetihedusega osakesed. See võimaldab moodustada stabiilse homogeense keevkihi. Pindkiiruse kasvades on võimalik nii kihistumine kui ka turbulentsse kihi tekkimine.

Piirkond B koosneb keskmise ($0,06 - 0,5 \text{ mm}$) läbimõõduga osakestest. Pärast esimese kriitilise kiiruse u_{mf} ületamist tekib heterogeenne keevkiht. Kiiruse tõusuga tekib osakeste kihistumine.

Piirkonda D kuuluvad suuremad ja raskemad osakesed kui mujal piirkondades. Piirkond on ideaalne heterogeense keevkihi tekkeks. Antud piirkonnas on kriitiline kiirus u_{mf} suurem kui ülejäänud kihtides. Suurematel pindkiirustel tekib osakeste kihistumine [3, 4].

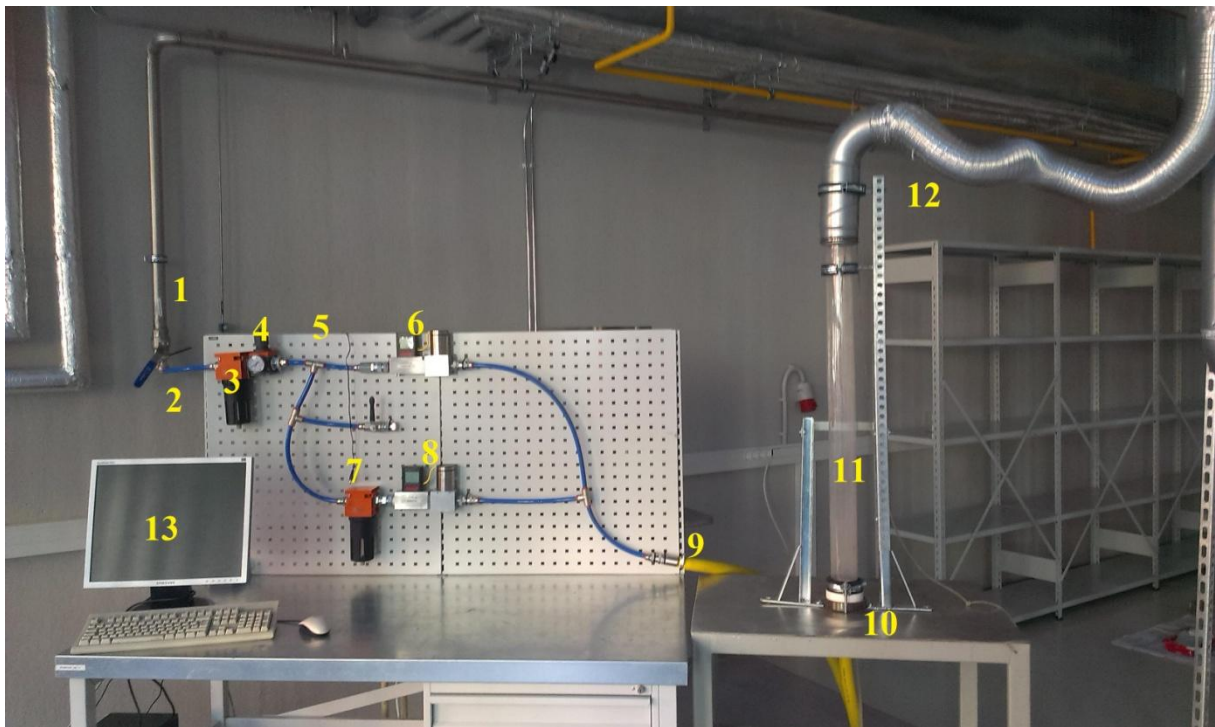
2.1.7. Kihi aerodünaamilise takistuse Δp sõltuvus pindkiirusest u

Rõhulang seisva kihi läbimisel suureneb pindkiiruse u kasvades, kuni kiirusel u_{mf} tekib keevkiht. Minimaalsest piirkiirusest suuremal kiirusel rõhulang Δp väheneb (1 - 5%). Kiiruse u_{mf} juures täheldatakse sellist rõhulangu hüpet, kuna kiht vajab lisa energiat keemise alustamiseks. Kui aga läheneda piirkiirusele u_{mf} teiselt poolt ehk kiirust vähendades, siis takistuse Δp hüpe puudub ning rõhulang väheneb sujuvalt seisva kihi piirkonda. Eksperimentaalselt saadud karakteristik $\Delta p = p(u)$ on segeli u_{mf} määramise aluseks [3].

3. KATSE

3.1. Katseseadme kirjeldus

Katseseade saab alguse maja sisesest suruõhutrassist (1) (Sele 3.1) rõhuga 7,5 bar. Seadmesse sisenevat õhku saab muuta mehaanilise kuulkraaniga (2), mis on kinnitatud trassi külge. Seejärel liigub õhk mööda õhuvoolikut (5) filtrisse (3), mis puhastab kasutatava õhu trassi sattunud tahketest osakestest. Järgmiseks läbib õhk rõhuregulaatori(4), mis on varustatud manomeetriga. Pärast rõhuregulaatorit jaguneb trass kaheks, üks liin liigub otse esimesse õhukulumõõturisse (6), teine liigub läbi teise filtri (7) õhukulumõõturisse number kaks (8). Õhk, mis on läbinud mõõturid liigub edasi ühisesse voolikusse (9), mis on ühendatud katseseadme kolderestiga (10).



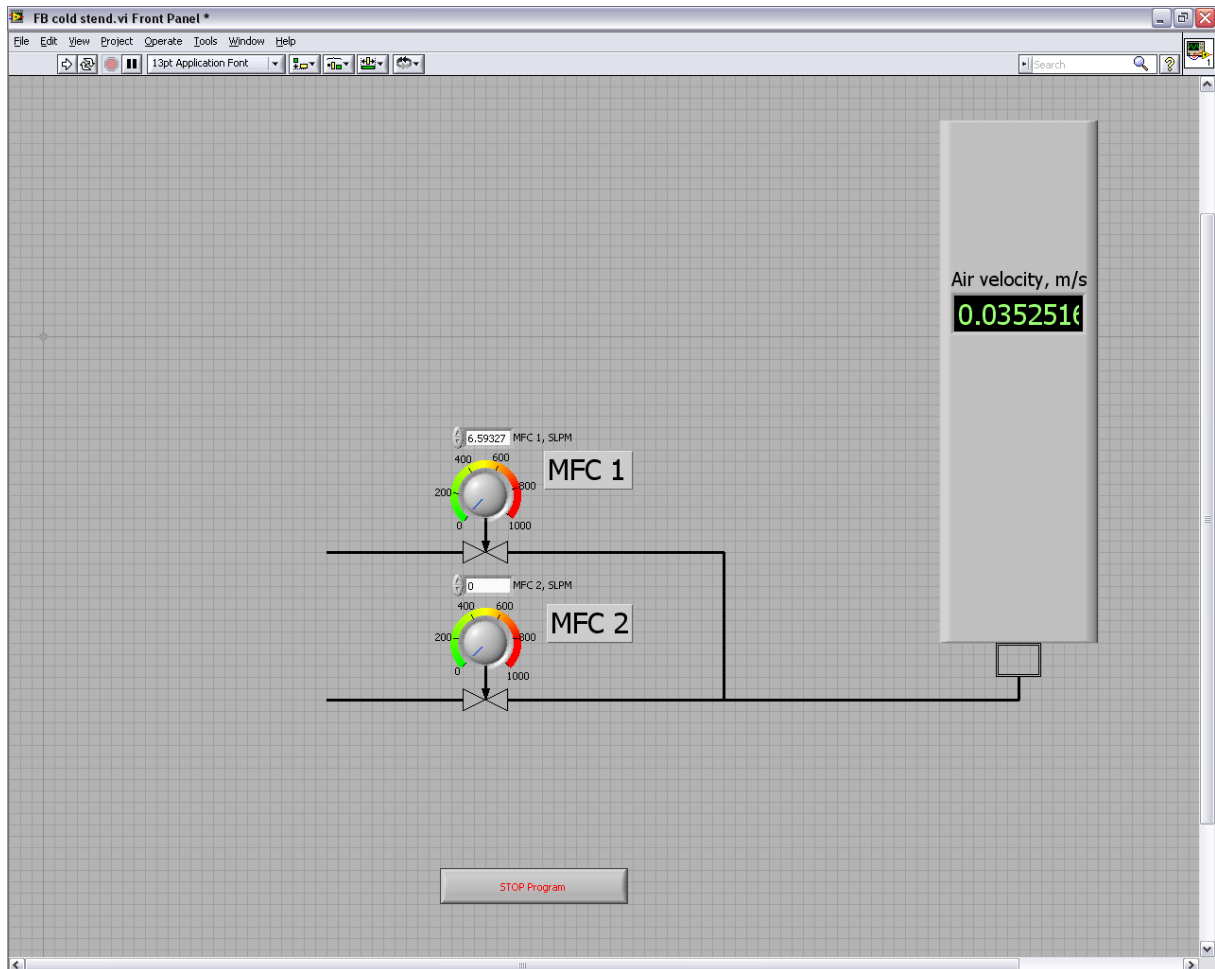
Sele 3.1. Katseseade

Kolderestis liigub õhk düüsidesse ning sealt kvartsklaasist koldesse (11) siseläbimõõduga 63 mm. Koldes paikneb impulsstoru, mille kaudu mõõdetakse koldes valitsevat rõhku. Koldest väljuv õhk (12) liigub edasi kottfiltrisse (Sele 3.2), kus puhastatakse korstnasse minev õhk tahketest osakestest.



Sele 3.2. Kottfilter

Õhukulumõõtureid juhitakse läbi arvuti (13) programmiga LabVIEW (Sele 3.3). Seal saab määrata õhukulu, mis jõuab koldesse.



Sele 3.3. Arvutiprogramm LabVIEW

3.2. Katses kasutatud tuhad

Katsetes kasutati kahte erineva päritoluga põhjatuhka. Esimene katsetus viidi läbi tuhaga, mis sisaldas eelnevalt välja sõelatud 4 – 8 mm tuha osakesi. Teine katse toimus tuhaga, mis sisaldas väga erinevates mõõtmetes osakesi. Graafikult (Sele 3.11) on näha, et peamine fraktsioon selles jääb kuni 3 mm.

3.3. Tuha tiheduse määramine

Esimeseks ülesandeks oli määrata tuhaosakeste tihedus. Selleks kasutati mõõtühikutega anumad, mis kaaluti ning pärast seda täideti destilleeritud veega. Seejärel kaaluti eraldi

anumas tuhk, mis pärast seda kallati vee anumasse. Saadi kogu kaal, millest välja arvutada osakeste tihedus. 4 - 8 mm tuha fraktsiooni tiheduseks saadi 2110,5 kg/m³ ning segu tiheduseks valiti erinevate fraktsioonide keskmine tihedus 2386,6 kg/m³.

Tabel 3.1. Tuha tiheduse määramise andmed ja tulemused

Destilleeritud vesi	997,7 kg/m ³	
Tuha fraktsioon kootsis, mm:	4-8	Segu
Tuha osakeste keskmine läbimõõt, mm	6	
Suure anumi kaal, g:	615,0	
Tuha topsi kaal, g:	56,8	
Tuha kaal (koos topsiga), g:	281,4	
Vee maht (algne), cm ³ :	300,0	
Vee temperatuur, °C:	23,0	
Vee kaal koos anumaga, g:	920,5	
Vee kaal koos anumaga ja tuhaga, g:	1145,0	
Vee maht tuhaga, cm ³ :	405,0	
	412,6	
Vee kaal, g:	305,5	
Tuha kaal, g:	224,6	
Tuha kaal (vees), g:	224,5	
Vee tihedus (katseline), kg/m ³ :	1018,3	
Mahu erinevus, cm ³ :	106,4	
Tuha tihedus, kg/m ³	2110,5	2386,6
Tuha tihedus (+10cc), kg/m ³	1929,3	
	181,3	
Tuha tihedus (-10cc), kg/m ³	2329,4	
	218,9	
vee tihedus, kg/m ³	997,7	
Tegelik vee maht, l:	306,2	

3.4. Katse teostus

Katset teostati kahe erineva põhjatuha fraktsiooni vahemikega. Eelmainitud Geldarty diagrammi järgi osakestega, mis kuuluvad piirkonda D. Esimene tuhk koosnes nelja kuni kaheksa millimeetristest tuha osakestest ning teine tuhk koosnes erinevate osakeste segust.



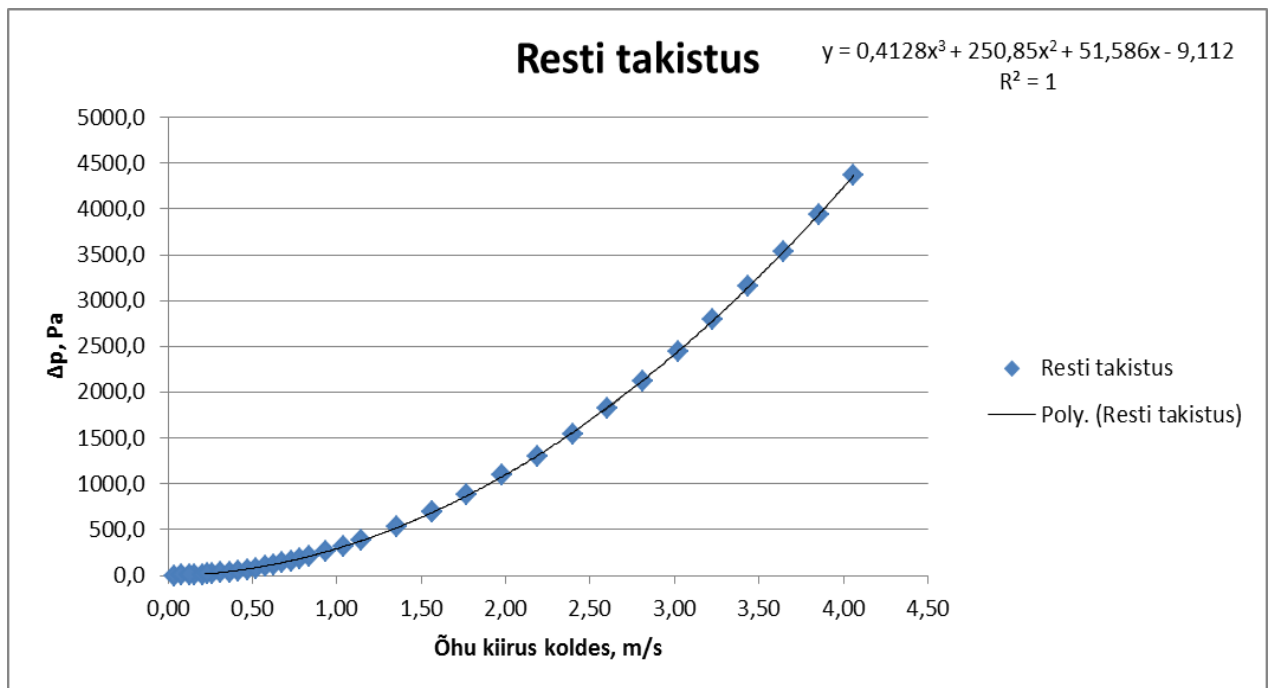
Sele 3.4. Segu fraktsioon. Põhjatuhk

Pärast tuha tiheduste määramist võis liikuda katseseadme juurde. Enne katsete alustamist tuhaga määrati restitakistus, et hiljem oleks võimalik arvutada kihi takistust. Selleks lasti õhku läbi resti, vooluhulka järk järgult tõstes. Pärast igit tõstet registreeriti rõhulang. Seejärel oli koostatud graafik (Sele 3.5), mis kirjeldab rõhulangu ja õhu kiiruse vahelist sõltuvust. Kasutades antud graafikult regressioonanalüüsi käigus saadud võrrandit (3.1), saab arvutada restitakistuse soovitud kiirusele.

$$y = 0,4128x^3 + 250,85x^2 + 51,586x - 9,112, \quad (3.1)$$

y - restitaksitus Pa,

x - minimaalne pindkiirus m/s.



Sele 3.5. Resti takistus

Edasi sai alustada katseid tuhaga. Esmalt täideti kolle tuha fraktsiooniga. Esimese tuha puhul täideti silinder 0,155 m kihiga, teise korral 0,175 m tuha kihiga, mille järel silinder suleti ning katse võis alata. Järgmiseks sammuks oli õhu suunamine koldesse kihi alla. See toimus järk-järgult, esimese katse puhul alates 100 SLPM ja sammuga 25 SLPM ning teise katse puhul alates 20 SLPM ja sammuga 10 SLPM. Õhu vooluhulga tõstmine toimus seni, kuni toimus täielik keemine. Seejärel hakati vooluhulka vähendama samuti nagu oli tõstetud. Iga kord, kui vooluhulka muudeti registreeriti baromeetiline rõhk, rõhk koldes ning rõhulang. Katse lõppedes puhastati seade ning töödeldi saadud andmed.

3.5. Katseandmete analüüs

3.5.1. 4 - 8 mm fraktsioon

Esimese katse toimus fraktsiooniga 4 - 8 mm. Pärast katseandmete (LISA 1) töötlust moodustus neist kaks graafikut. Esimene graafik (Sele 3.6) kirjeldab kogu rõhulangu seost õhu kiirusega koldes. Teine graafik (Sele 3.7) 4 - 8 mm fraktsiooniga katsest kirjeldab tuha kihi rõhulangu ja kiiruse vahelist seost ning selle graafiku põhjal määrati u_{mf} . Minimaalse

pindkiiruse määramiseks kasutati sirgeid. Üks sirge paigutati graafikule puutujaks ning teine punkti, kus puutuja lõikab graafikut [5]. Kihi rõhulang saadi, kui kogu rõhulangust lahutati resti rõhulang.

Sinised rombikesed kirjeldavad rõhulangu muutust kiiruse tõstes ning punased ruudukesed rõhulangu kiiruse vähenemisel. Graafikutelt on näha, et kiiruse tõustes oli rõhulang suurem kui kiiruse alanedes ning lõpus langud ühtisid. Rõhulangu tõusu põhjustas ilmselt õhu vooluhulga tõstes toimunud osakeste separatsioon. Selle käigus jagati osakesed vastavalt suurusele erinevatesse kihtidesse. Raskemad osad vajusid alla, kergemad tõusid üles. Graafikult (Sele 3.7) nähtub, et osakeste separatsioon algas kiirusel 1,7 m/s ning kestis kuni minimaalse pindkiiruse saavutamiseni, milleks oli 3,3 m/s. Pärast separeerimist pääses õhk paremini osakeste vahelt läbi ning rõhulang vähenes, saavutades taas stabiilse tõusutrendi.

Õhuhulga vähenemisega langes rõhulang ühtlaselt, sest separeeritud kihti läbib õhk ilma olulise takistuseta. Hetkeline muutus toimus kiirusel 1,8 m/s ja rõhulangul 1900 Pa. See juhtus ilmselt kihi hetkelise kokku pakkimise tõttu, mis katseandmeid ei mõjuta.

Üheks töö eesmärgiks oli uurida, kuidas muutub minimaalne pindkiirus gaasi temperatuuri tõusuga nn. töökeskkonna temperatuurile. Ümber arvutuste tegemiseks kasutasin katse käigus määratud minimaalset pindkiirust u_{mf} ning Erguni valemit (3.2), mille kaudu teisendusi teostasin.

$$\frac{1,75}{\varphi_s \varepsilon_{mf}^3} \frac{d_s^2 u_{mf}^2}{\vartheta^2} + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_s^2} \frac{d_s u_{mf}}{\vartheta} = \frac{g d_s^3 (\rho_s - \rho_g)}{\vartheta^2 \rho_g}, \quad (3.2)$$

ε_{mf} - kihi poorsus,

ρ_s - osakese tihedus kg/m^3 ,

ρ_g - gaasi tihedus kg/m^3 ,

g - raskuskiirendus,

φ_s - osakese sfäärilisus,

d_s - osakeste keskmine diameeter,

u_{mf} - minimaalne pindkiirus m/s ,

ν - gaasi viskoossus m^2/s .

Esmalt arvutasin kihi poorsuse minimaalsel pindkiirusel. Selleks kasutasin järgnevat valemit

$$\Delta p_{mf} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)gH_{mf}, \quad (3.3)$$

Δp_{mf} - rõhulang u_{mf} juures Pa,

ϵ_{mf} - kihi poorsus,

ρ_s - osakese tihedus kg/m^3 ,

ρ_g - gaasi tihedus kg/m^3 ,

g - raskuskiirendus,

H_{mf} - kihi kiirus minimaalsel pindkiirusel m.

Järgmiseks sammuks oli $d_s\varphi_s$ ehk osakeste sfäärilisuse ja keskmise diameetri korrutise arvutamine, milleks kasutasin Erguni valemist avaldatud $d_s\varphi_s$.

$$d_s\varphi_s = \frac{1,75u_{mf}^2\rho_f}{\epsilon_{mf}^3g\Delta\rho^2} \pm \sqrt{\left(\frac{1,75u_{mf}^2\rho_g}{\epsilon_{mf}^3g\Delta\rho^2}\right)^2 + 150\frac{(1-\epsilon_{mf})u_{mf}^3\rho_g}{\epsilon_{mf}^3g\Delta\rho}}, \quad (3.4)$$

ϵ_{mf} - kihi poorsus,

ρ_s - osakese tihedus kg/m^3 ,

ρ_g - gaasi tihedus kg/m^3 ,

g - raskuskiirendus,

v - gaasi viskoossus m^2/s .

Edasi valisin võimalikud töötemperatuurid 400, 500, 600, 700, 800 ja 900 kraadi, mille minimaalseid pindkiirusi arvutama hakkasin. Selleks kasutasin Erguni valemist avaldatud u_{mf} arvutamise valemist

$$u_{mf} = 42,86\frac{\vartheta}{d_s\varphi_s} \left(\sqrt{1 + 3,1 * 10^{-4} \frac{\epsilon_{mf}^3}{(1-\epsilon_{mf})^2} d_s^3\varphi_s^3 \frac{g}{\vartheta^2} \frac{(\rho_s-\rho_g)}{\rho_f}} - 1 \right), \quad (3.5)$$

ϵ_{mf} - kihi poorsus,

ρ_s - osakese tihedus kg/m^3 ,

ρ_g - gaasi tihedus kg/m^3 ,

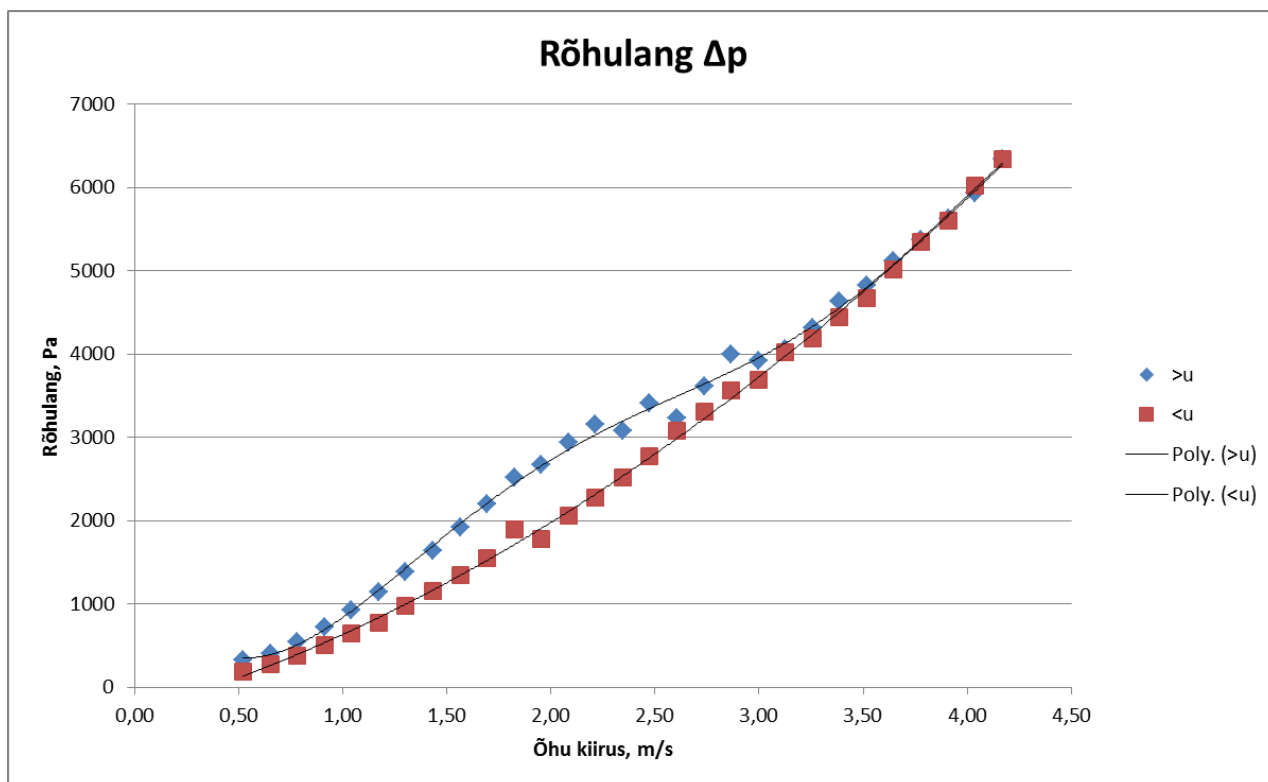
g - raskuskiirendus,

φ_s - osakese sfäärilisus,

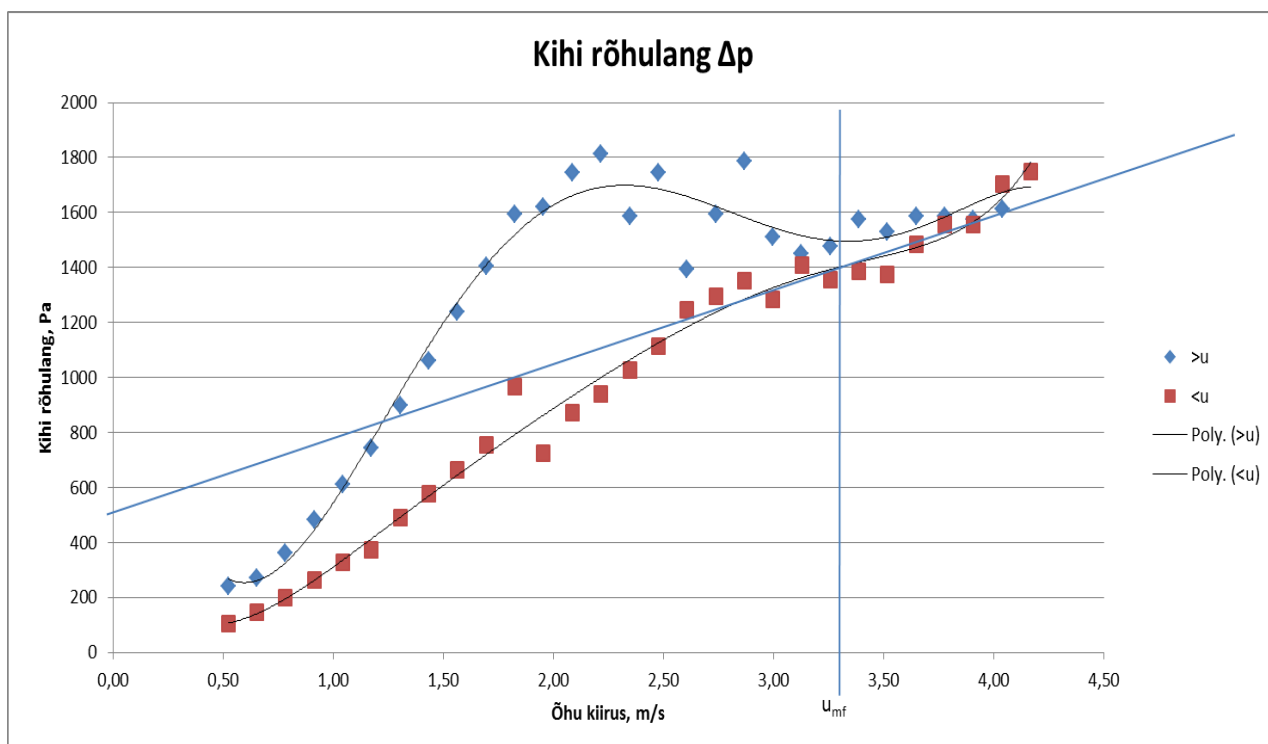
d_s - osakeste keskmine diameeter,

v - gaasi viskoossus m^2/s .

Arvutuste tulemused on toodud tabelis 3.2 ja kajastatud graafikutel Sele 3.6, Sele 3.7 ja Sele 3.8..



Sele 3.6. 4 - 8 mm fraktsiooni kogu rõhulangu seos õhu kiirusega koldes. Sinised rombide tähistavad rõhulangu kiiruse tõstmisel ja punased ruudud rõhulangu kiiruse vähenemisel.



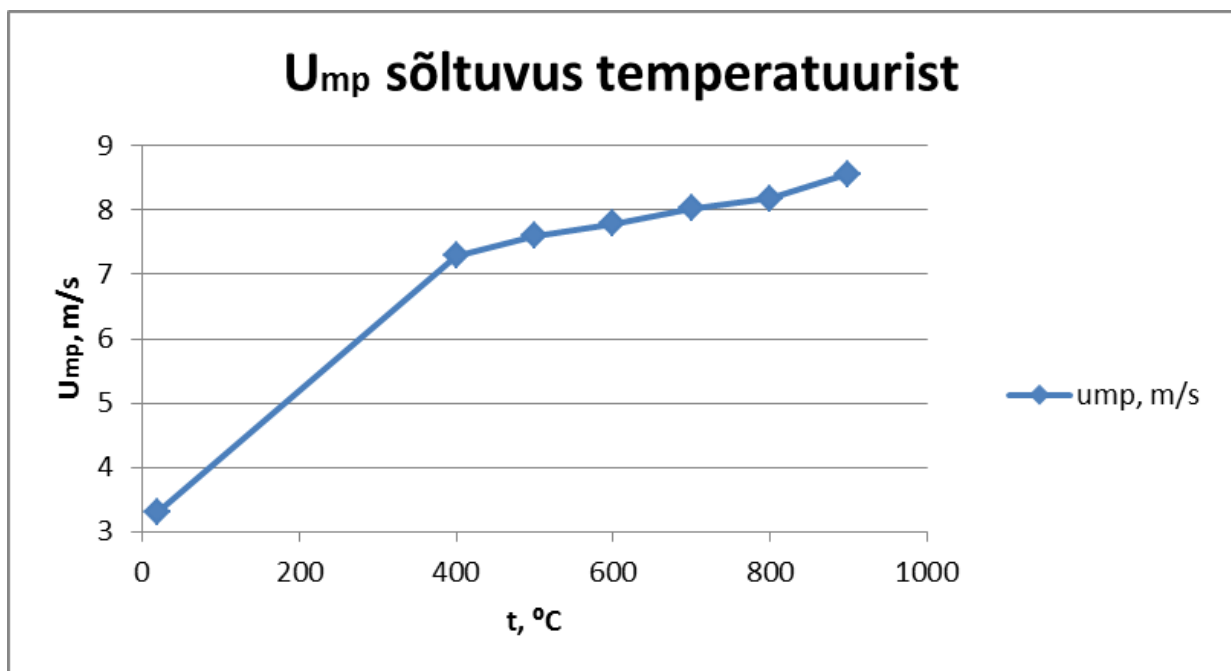
Sele 3.7. 4 - 8 mm fraktsiooni kihi rõhulangu seos õhu kiirusega koldes. Sinised rombide tähistavad rõhulangu kiiruse tõstmisel ja punased ruudud rõhulangu kiiruse vähenemisel.

Tulemustest võib järeldada, et temperatuuri tõusuga kaasneb ka minimaalse pindkiiruse u_{mf} tõus (Sele 3.8). See tõuseb, sest gaasi temperatuuri tõusuga väheneb gaasi tihedus ning tõuseb viskoossus.

Osakese kujutegur $d_s\phi_s$, kirjeldab katse keskmise osakese kuju. Antud katsele vastav kujutegur 0,003 vastab 6 mm osakesele.

Tabel 3.2. 4 - 8 mm katse tulemuste ümberarvutused töötemperatuuridele

Tuht	4- 8 mm						
Gaasi temperatuur t_g , C:	19	400	500	600	700	800	900
Kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel							
Kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel H_{mp} , m:	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155
Osakese tihedus ρ_s , kg/m ³ :	2110,5	2110,5	2110,5	2110,5	2110,5	2110,5	2110,5
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,2	0,52	0,46	0,42	0,38	0,35	0,31
Möödetud rõhulang kihis Δp_{mf} , Pa:	1390	1390	1390	1390	1390	1390	1390
Kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel ϵ_{mf} :	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
Osakese sfäärilisus ja keskmine läbimõõt							
Minimaalne pindkiirus u_{mp} , m/s:	3,30	7,28	7,60	7,79	8,03	8,18	8,55
Õhu kinemaatiline viskoossus ν , m ² /s:	1,47E-05	6,21E-05	7,78E-05	9,47E-05	1,13E-04	1,33E-04	1,54E-04
$d_s\phi_s$:	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Minimaalne pindkiirus							
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,21	0,52	0,46	0,42	0,38	0,35	0,31
Õhu kinemaatiline viskoossus ν , m ² /s:	1,47E-05	6,21E-05	3,79E-05	5,13E-05	6,63E-05	8,23E-05	9,93E-05
Minimaalne pindkiirus u_{mp} , m/s:	3,3	7,28	7,60	7,79	8,03	8,18	8,55



Sele 3.8. Minimaalse pindkiiruse sõltuvus temperatuurist

3.5.2. Segu fraktsioon

Teine katse toimus segu fraktsiooniga, kus võis leida väga erineva läbimõõduga osakesi (Sele 3.13). Sarnaselt esimesele katsele kirjeldavad sinised rombikesed rõhulangi kiiruse tõstmisel ja punased ruudukesed rõhulangi kiiruse vähendamisel.

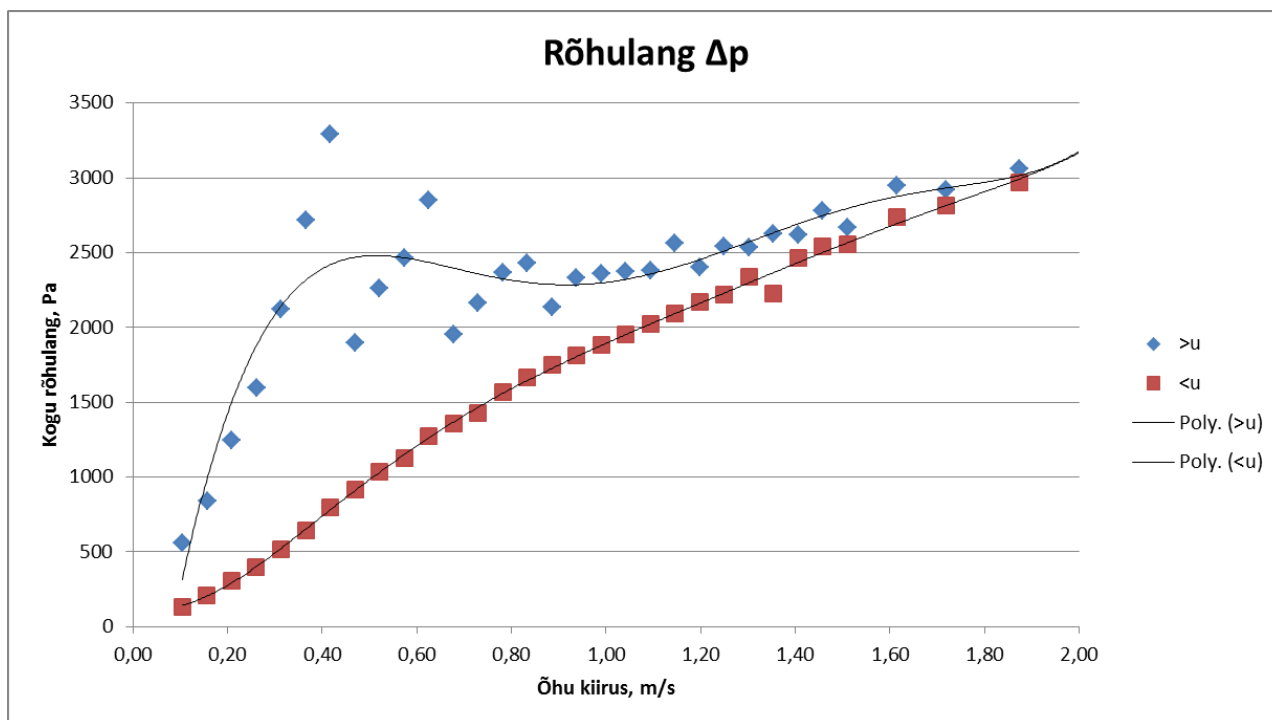
Võrreldes esimese katsega nähtub, et osakeste separeerimine algab palju väiksematel kiirustel 0,4 m/s ning rõhulang muutub osakeste jaotamise ajal väga järsult. Kiirusel umbes 0,9 m/s jõuab lõpule osakeste separeerimine ning edasi tõuseb rõhulang küllaltki konstantses tõusutrendis.

Õhu kiiruse vähenemisega hakkab langema ka rõhulang. Graafikult on näha, et langus toimub ühtlaselt, ilma järskude muutusteta. Ainuke hetkeline kõikumine toimub kiirusel 1,4 m/s, mis arvatavasti on põhjustatud, nagu ka esimese katse puhul, kihi hetkelisest kokku langemisest.

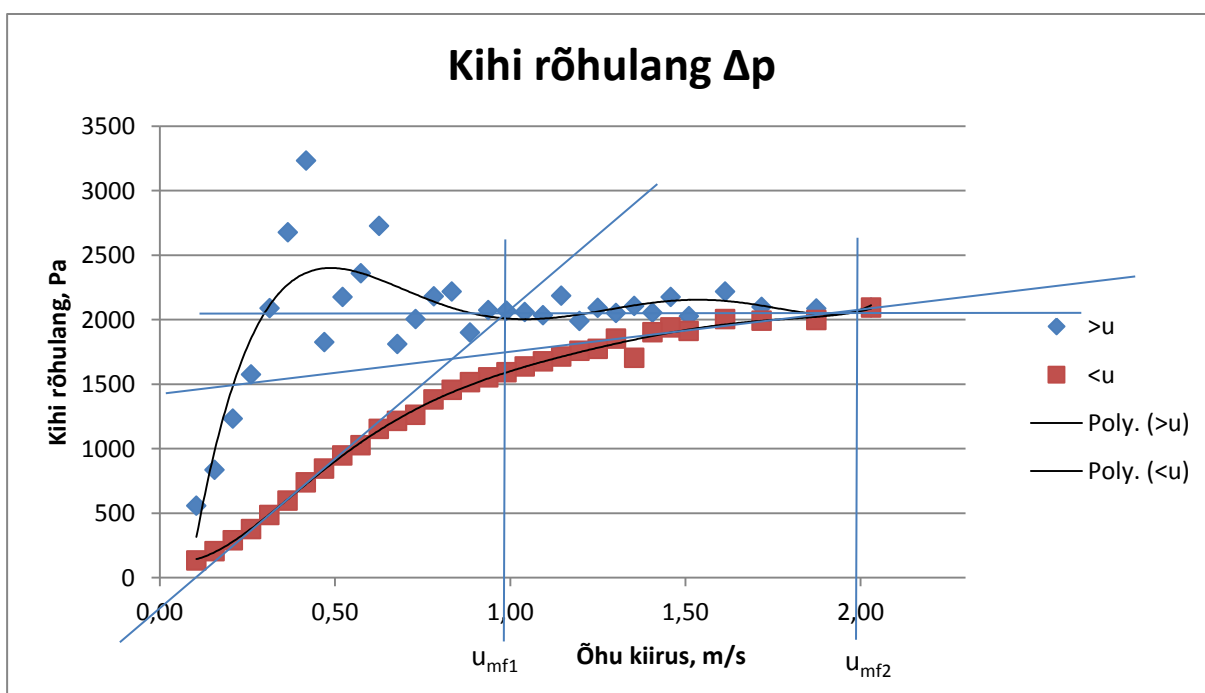
Võrreldes esimeses katses kasutatud fraktsiooniga võib teises katses välja tuua graafikult (Sele 3.10) kaks piirkiirust. Siin u_{mf2} tähistab kiirust, kus toimub kihi täielik keemine (Sele 3.11) ning u_{mf1} piirkiirust, kus peenemad osad keevad ja jämedam fraktsioon püsib paigal (Sele 3.12).

Kiiruse u_{mf} ümberarvutused teistele temperatuuridele toimusid sarnaselt punktis 3.3.1. kirjeldatule.

Tulemused on toodud tabelis Tabel 3.3 ja kajastatud graafikutel Sele 3.9, Sele3.10 ja Sele 3.14.



Sele 3.9. Segu kogu rõhulangu seos õhu kiirusega koldes. Sinised rombid tähistavad rõhulangu kiiruse tõstmisel ja punased ruudud rõhulangu kiiruse vähenemisel.



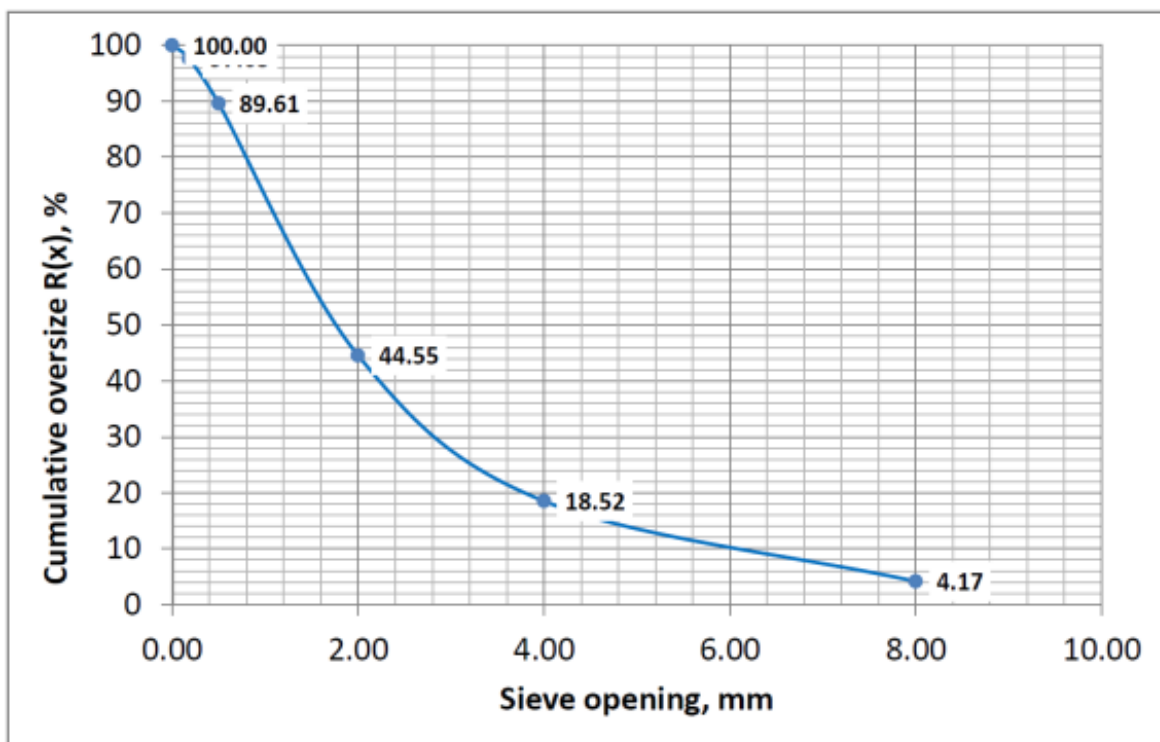
Sele 3.10. Segu kihi rõhulangu seos õhu kiirusega koldes. Sinised rombid tähistavad rõhulangu kiiruse tõstmisel ja punased ruudud rõhulangu kiiruse vähenemisel.



Sele 3.11. Kiht kiirusel 1 m/s. Peenemad osakesed keevad, jämedam fraktsioon püsib paigal



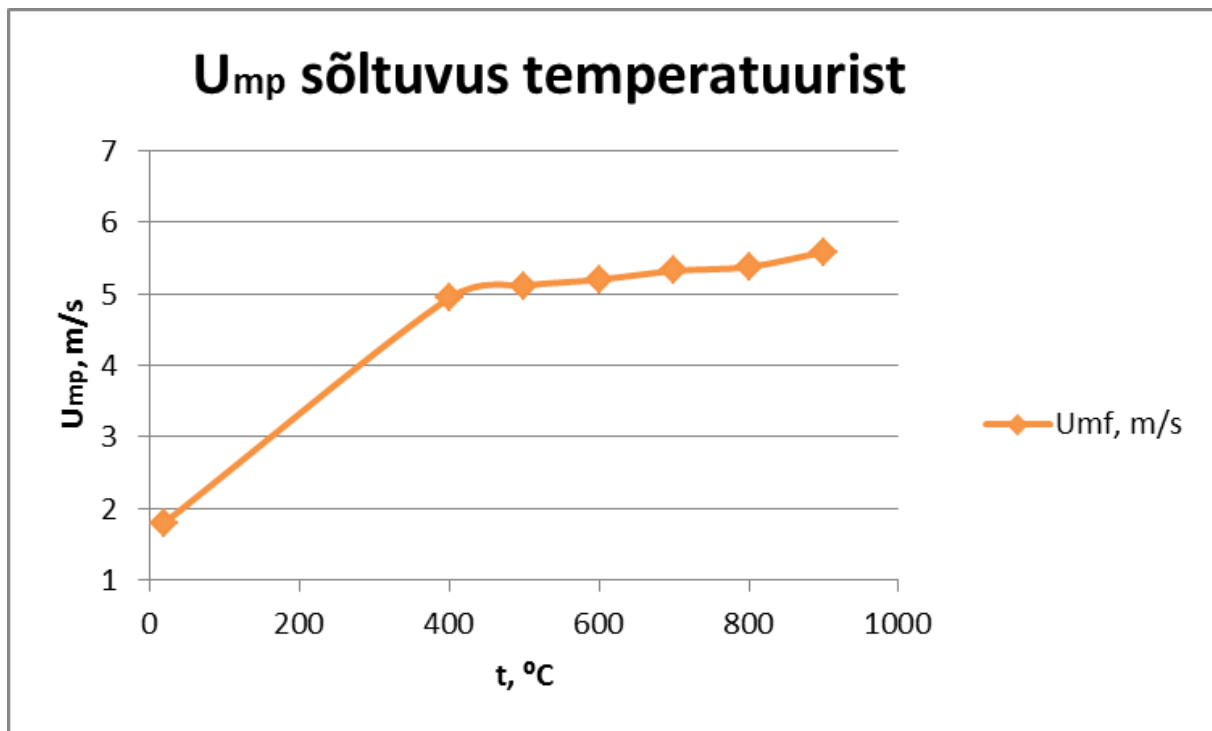
Sele 3.12. Kiht kiirusel 2,3 m/s. Toimub kihi täielik keemine



Sele 3.13. Segu osakeste kuhjumine sõeladele

Tabel 3.3. Segu katse tulemuste ümberarvutused töötemperatuuridele

Tuhk	Segu						
	19	400	500	600	700	800	900
Gaasi temperatuur t_g , C:	19	400	500	600	700	800	900
Kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel							
Kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel H_{mp} , m:	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175
Osakese tihedus ρ_s , kg/m ³ :	2386,6	2386,6	2386,6	2386,6	2386,6	2386,6	2386,6
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,2	0,52	0,46	0,42	0,38	0,35	0,31
Möödetud rõhulang kihis Δp_{mf} , Pa:	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel ϵ_{mf} :	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499
Osakese sfäärilisus ja keskmine läbimõõt							
Minimaalne pindkiirus u_{mp} , m/s:	1,8	4,95	5,61	5,72	5,86	5,95	6,18
Õhu kinemaatiline viskoossus ν , m ² /s:	1,47E-05	6,21E-05	3,79E-05	5,13E-05	6,63E-05	8,23E-05	9,93E-05
$d_s \phi_s$:	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Minimaalne pindkiirus							
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,21	0,52	0,46	0,42	0,38	0,35	0,31
Õhu kinemaatiline viskoossus ν , m ² /s:	1,47E-05	6,21E-05	3,79E-05	5,13E-05	6,63E-05	8,23E-05	9,93E-05
Minimaalne pindkiirus u_{mp} , m/s:	1,8	4,95	5,61	5,72	5,86	5,95	6,18



Sele 3.14. Minimaalse pindkiiruse sõltuvus temperatuurist

3.5.3. Segu fraktsiooni ja 0,5 – 1 mm kivisöe põhjatuha minimaalse pindkiiruse võrdlusanalüüs

Katseandmete analüüsi käigus toodi võrdlus segu fraktsiooni ja kivisöe põhjatuha välja sõelutud 0,5 – 1 mm fraktsiooniga. Sai valitud antud fraktsioon, sest graafikult (Sele 3.11) on näha, et segu põhilise osa moodustab just sarnase suurusega osakesed.

Kivisöe tuha osakeste minimaalse pindkiiruse arvutamiseks kasutati Erguni valemi tuletist

$$u_{mf} = 7,14(1 - \varepsilon_{mf})\vartheta S_v \left[\sqrt{1 + 0,067 \frac{\varepsilon_{mf}^3 (\rho_s - \rho_f)g}{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \varphi_f \vartheta^2 S_v^3}} - 1 \right], \quad (3.6)$$

ε_{mf} – poorsus,

ρ_s – osakese tihedus kg/m^3 ,

ρ_f – gaasi tihedus kg/m^3 ,

S_v – osakese eripind m^2/kg ,

g - raskuskiirendus,

ν – gaasi viskoossus m^2/s .

Kiiruse arvutamisel kasutati söele vastavat poorsust, eripinda ning osakese tihedust.

Tabel 3.4. Kivisöe tuha karakteristika ja arvutus tulemused

Tuhk	Kivisöe sõelutud põhjatuhk 0,5 - 1 mm						
Gaasi temperatuur t_g , C:	19	400	500	600	700	800	900
Kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel H_{mp} :	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175
Osakese tihedus ρ_s , kg/m ³ : [6]	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,2	0,52	0,46	0,42	0,38	0,35	0,31
Osakese eripind S_v , m ² /kg: [6]	390	390	390	390	390	390	390
Kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel ϵ_{mf} :	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Õhu kinemaatiline viskoossus ν , m ² /s:	1,47E-05	6,21E-05	7,78E-05	9,47E-05	1,13E-04	1,33E-04	1,54E-04
Minimaalne pindkiirus u_{mp} , m/s:	2,391	4,152	4,479	4,734	5,029	5,283	5,677

Tulemustest selgub, et kivisöe tuha kihi tõstmiseks on vaja suuremaid kiirusi, mis on tingitud kivisöe väiksemast poorsusest ja suuremast tihedusest. Kivisöe osakesed on tihedamalt üksteise vastas ning gaasi läbi pääsemiseks on tarvis kasutada suuremat jõudu, mis tulebki kiiruse tõstmise arvelt.

KOKKUVÕTE

Tallinna Tehnikaülikoolis Soojustehnika instituudis toimunud katsetel uuriti põlevkivi tuha osakeste käitumist isothermilistel tingimustel. Katse teostati, kuna põlevkivi tuha osakeste käitumist keevkihis on vähe uuritud. Tulemuste põhjal koostati vastavad graafikud ning analüüsiti osakeste käitumist kiiruse ja rõhulangu tõusul ning alanemisel.

Kasutati kahte erineva fraktsiooniga põhjatuha. Esimene neist sisaldas põhjatuhaast välja sõelutud 4 – 8 mm läbimõõduga osakesi. Teine katse toimus põhjatuha seguga, mis sisaldas erineva läbimõõduga osakesi.

Pärast tulemuste analüüsimist saadi mitmed kirjeldavad graafikud. Kihi rõhulangu ja kiiruse vaheliselt graafikult määrati sirgete abil minimaalne pindkiirus u_{mf} . See määratakse graafiku joonelt, mis kirjeldab olukorda kus toimus kiiruse vähenemine. Kiiruse vähenemisel langeb rõhulang ühtlaselt ilma hüpeteta ning saadakse sujuv joon, mida kasutatakse minimaalse pindkiiruse määramiseks.

Kasutades kiirust u_{mf} ning Erguni valemit, arvutati minimaalsed pindkiirused olukordadele, kui gaasi temperatuur oleks 400, 500, 600, 700, 800 ja 900 °C ning võrreldi saadud tulemusi katses kasutatud 19 °C-le vastava pindkiirusega. Temperatuuri tõustes tõusis ka minimaalne pindkiirus, sest muutusid gaasi tihedus ja viskoossus.

Võrreldes katse tulemusi kiviõe sõelutud põhjatuha fraktsiooniga 0,5 – 1 mm selgub, et sarnaste parameetrite juures oleks kiviõe tuha keema ajamiseks tarvis suuremaid kiirusi, mis on põhjustatud kiviõe suuremast tihedusest ja väiksemast poorsusest.

Antud tööga on tehtud algust uurimaks põlevkivi tuha osakeste käitumist keevkihis. Edasisel uurimisel ja analüüsimisel on kindlasti võimalik teha järeldusi, mis aitaksid valida keevkihtkatlasse kõige sobivama fraktsiooniga materjali, et parandada efektiivsustegureid.

SUMMARY

This thesis is based on an experiment which was carried out in Tallinn University of Technology, Department of Thermal Engineering. The aim of this research was to investigate the behavior of oil shale ash particles in fluidized bed in isothermic conditions. By the results of these tests data was acquired and relevant graphs were composed.

The bottom ash was used in two different fractions. The first one contained sieved particles from 4 to 8 mm in diameter. The second ash sample was a mixture of different fractions in various diameters.

After tests analyzable data was acquired that were used to compose various graphs. From the bed pressure drop and gas velocity graphs the minimum fluidization velocities u_{mf} were determined by using straight lines by the line of the graph, which describes the case when there was a decrease in the velocity rate. Decreasing velocity gives a smooth line without leaps that is used to determine the minimum fluidization velocity.

Using the speed u_{mf} and the Ergun formula, the minimum fluidization was calculated in different situations, for gas temperature of 400, 500, 600, 700, 800, and 900 °C and was compared with the results obtained in the test used 19 °C with the speed of the particles. It turned out that the rising temperature also increased the minimum fluidization velocity of the particles because of changes in the gas density and viscosity.

The results of oil shale bottom ash particles behavior was compared to coal bottom ash fraction sieved from 0,5 to 1 mm. Results show that in similar conditions higher speeds are necessary in order to fluidize coal particles. This is due to greater density and lower porosity of coal.

This work has been carried out to investigate the behavior of oil shale ash particles in a fluidized bed. Upon further analysis and investigation it is certainly possible to draw conclusions that help to choose the most appropriate fractions of the material fluidized bed boilers to improve efficiency factors.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] A. Paist, „Katlatehnika“, Tallinn, 2013

[2] Siirde, A., (2011). Energeetika: juhtmeid pidi põlevkivi küljes. – *Horisont*, 2. [Online] Horisont (06.05.2014)

[3] A. Ots, „Põlevkivi põletustehnika“, Tallinn, Tallinna Raamatutrükikoda, 2004.

[4] J. Werther, „Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Fluidized-Bed Reactors“, Hamburg, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2007.

[5] J. Werther, „Introduction to fluid- mechanical principles“, 2012

[6] S. Kim, G. S. Ryu, K. T. Koh, J. H. Lee, „Flowability and Strength Development Characteristics of Bottom Ash based Geopolymer“, 2012

LISA 1. 4 – 8 mm fraktsiooni katse tulemused ja arvutatud väärtused

4.0- 8.0																													
Osakeste läbimõõt mm																													
Mõõdetud väärtused																													
Kolde sisemine diameeter, m	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063			
Vooluhulk 1 MFC, SLPM	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Vooluhulk 2 MFC, SLPM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Vooluhulk 3 MFC, SLPM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	800	
Kogu vooluhulk, SLPM	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	800	
Õhu temperatuur, °C	18,8	19,05	19,06	19,05	19,04	19,02	19,01	18,96	18,92	18,89	18,86	19,2	19,18	19,145	19,12	19,09	19,075	19,055	19,035	19,01	19	18,985	18,975	18,955	18,95	18,94	18,94	18,95	18,96
Baromeetriline rõhk, psia	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78
Rõhk koldes, Pa	-9	-8	-7	-1	-0,5	2,5	-2,5	1,5	3,5	2,5	5,5	6,5	6	4	1	6	5	8	14,5	15,5	16	16	17	21	21,8	23	23	35	30
Rõhulang, Pa	326	400,7	545	728,7	929,7	1141,9	1381,3	1640,7	1925,7	2203,2	2516,7	2674,4	2937,7	3153,2	3084,4	3405,2	3230,9	3610,5	3994,6	3918,3	4065,3	4310,7	4635,2	4822	5120,7	5373,1	5623	5926,8	6341,4
Arvutatud väärtused																													
Resti takistus, Pa	85,9845	131,0942	184,7481	246,9283	317,6818	396,9766	484,9005	581,3164	686,32	799,9428	922,0886	1052,853	1192,244	1340,27967	1496,965	1662,033	1835,897	2018,241	2209,046	2408,6903	2616,992601	2833,96393	3059,52808	3293,55048	3536,415	3787,909	4048,157	4316,086	4594,072
Kolde ristlõike pindala, m ²	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312
Baromeetriline rõhk, Pa	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905
Kolde kogu vooluhulk, Nm ³ /h	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5	36	37,5	39	40,5	42	43,5	45	46,5	48
Kolde absoluutne rõhk, Pa	101896	101897	101898	101904	101904	101907	101907	101908	101908	101907	101910	101911	101911	101909	101906	101911	101910	101913	101919	101920	101921	101922	101926	101926	101928	101928	101940	101940	101935
Kihi rõhulang, Pa	240,0155	269,6058	360,2519	481,7717	612,0182	744,9234	896,3995	1059,384	1239,38	1403,257	1594,611	1621,547	1745,456	1812,92033	1587,435	1743,167	1395,003	1592,259	1785,554	1509,6097	1448,307399	1476,73607	1575,67192	1528,44952	1584,285	1585,191	1574,843	1610,714	1747,328
Kolde kogu vooluhulk, m ³ /h	5,85	7,31	8,77	10,23	11,69	13,15	14,61	16,08	17,54	19,00	20,46	21,92	23,38	24,84	26,31	27,77	29,23	30,69	32,15	33,61	35,07	36,53	37,99	39,45	40,91	42,37	43,83	45,29	46,75
Õhu kiirus koldes, m/s	0,52	0,65	0,78	0,91	1,04	1,17	1,30	1,43	1,56	1,69	1,82	1,95	2,08	2,21	2,35	2,48	2,61	2,74	2,87	3,00	3,13	3,26	3,39	3,52	3,65	3,78	3,91	4,04	4,17

0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
775	750	725	700	675	650	625	600	575	550	525	500	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100			
775	750	725	700	675	650	625	600	575	550	525	500	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100			
18,97	18,98	18,985	18,995	18,945	19	19,005	19,01	19,015	19,04	19,05	19,075	19,085	19,09	19,095	19,1	19,01	19	18,98	18,96	18,96	18,97	18,97	18,98	18,97	18,98	18,97	18,98	18,97	18,99	
14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	
28,5	25	22	23,1	20	19	16	14,5	13,6	12,5	13	10,2	9,5	4,5	7	4	6	4	3,5	1,5	3	-1	-2	0,5	-3,6	-1	-3,4	-1,8			
6021,3	5603	5342,4	5021,3	4667,2	4444,4	4190,2	4024,4	3691,1	3562,3	3311,5	3081,6	2775,1	2523,7	2280,1	2064,3	1778,6	1889,3	1554,8	1349,8	1158,4	973,6	771,1	643,7	509,6	384,7	277,6	191			
4316,626	4048,001	3787,982	3536,326	3293,614	3059,411	2833,964	2617,068	2408,778	2209,13	2018,048	1835,715	1661,922	1496,866	1340,203	1192,289	1052,863	922,1147	799,9277	686,3457	581,3001	484,8869	397,0099	317,6759	246,9402	184,7276	131,0831	85,97296			
0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312
101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905
46,5	45	43,5	42	40,5	39	37,5	36	34,5	33	31,5	30	28,5	27	25,5	24	22,5	21	19,5	18	16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6			
101933	101930	101927	101928	101925	101924	101921	101919	101918	101917	101918	101915	101914	101909	101912	101909	101911	101909	101908	101906	101908	101904	101903	101905	101901	101904	101901	101903			
1704,674	1554,999	1554,418	1484,974	1373,586	1384,989	1356,236	1407,332	1282,322	1353,17	1293,452	1245,885	1113,178	1026,834	939,8965	872,0111	725,7373	967,1853	754,8723	663,4543	577,0999	488,7131	374,0901	326,0241	262,6598	199,9724	146,5169	105,027			
45,29	43,83	42,37	40,91	39,45	37,99	36,53	35,07	33,61	32,15	30,69	29,23	27,76	26,30	24,84	23,38	21,92	20,46	19,00	17,54	16,08	14,61	13,15	11,69	10,23	8,77	7,31	5,85			
4,04	3,91	3,78	3,65	3,52	3,39	3,26	3,13	3,00	2,87	2,74	2,61	2,48	2,35	2,21	2,08	1,95	1,82	1,69	1,56	1,43	1,30	1,17	1,04	0,91	0,78	0,65	0,52			

LISA 2. Segu fraktsiooni katse tulemused ja arvutatud väärtused

Segu																																	
Mõõdetud väärtused																																	
olde sisemise diameeter, mm	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063				
Vooluhulk 1 MFC, SLPM	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	310	330	360	390	
Vooluhulk 2 MFC, SLPM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Vooluhulk 3 MFC, SLPM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Kogu vooluhulk, SLPM	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	310	330	360	390	
Õhu temperatuur, °C	19,45	19,49	19,5	19,52	19,52	19,49	19,42	19,35	19,315	19,27	19,23	19,19	19,14	19,1	19,05	19,02	19	18,98	18,96	18,92	18,9	18,88	18,86	18,85	18,83	18,81	18,8	18,79	18,78	18,76	18,75	18,73	
Baromeetriline rõhk, psia	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78		
Rõhk koldes, Pa	-7	-6,5	-5	-4	-3,5	-2	-4,5	-3,2	-1	-4	-2,4	-1,4	-1,5	-2,8	-1	-0,5	-0,5	-0,6	1,5	2	0,2	2	0,5	1,7	2,7	2,5	-10	2	2,8	7	7,6	8,3	
Rõhulang, Pa	556,4	840,4	1245,6	1596,7	2120	2718,8	3288,5	1895,2	2261,9	2462,2	2847,5	1951,9	2166,2	2365	2427	2134,6	2334	2356,7	2376,5	2382,8	2564,6	2403,2	2540,2	2535,7	2628,4	2615,3	2776,4	2669,4	2948,2	2920,4	3058,1	3226,8	
Arvutatud väärtused																																	
Resti takistus, Pa	-0,99145	5,123122	12,60547	21,4591875	31,68016	43,26112	56,19617	70,48524	86,14796	103,1747	121,5562	141,2975	162,3896	184,8528	208,6488	233,8319	260,3926	288,3157	317,5878	348,1843	380,1985	413,5483	448,2839	484,3892	521,8259	560,6338	600,9795	642,4153	729,6895	822,3282	971,7311	1133,388	
Kolde ristlõike pindala, m ²	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	
Baromeetriline rõhk, Pa	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	
olde kogu vooluhulk, Nm ³ /h	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	6,6	7,2	7,8	8,4	9	9,6	10,2	10,8	11,4	12	12,6	13,2	13,8	14,4	15	15,6	16,2	16,8	17,4	18,6	19,8	21,6	23,4	
Kolde absoluutne rõhk, Pa	101898	101898	101900	101901	101901	101903	101900	101901	101904	101901	101902	101903	101903	101904	101904	101904	101904	101904	101906	101907	101905	101907	101905	101907	101907	101895	101907	101895	101907	101912	101912	101913	101913
Kihi rõhulang, Pa	557,3915	835,2769	1232,995	1575,240813	2088,32	2675,539	3232,304	1824,715	2175,752	2359,025	2725,944	1810,602	2003,81	2180,147	2218,351	1900,768	2073,607	2068,384	2058,912	2034,616	2184,401	1989,652	2091,916	2051,311	2106,574	2054,666	2175,42	2026,985	2218,511	2098,072	2086,369	2093,412	
Kolde kogu vooluhulk, m ³ /h	1,17	1,76	2,34	2,93	3,51	4,10	4,68	5,27	5,85	6,44	7,02	7,60	8,19	8,77	9,35	9,94	10,52	11,11	11,69	12,27	12,86	13,44	14,02	14,61	15,19	15,77	16,36	16,94	18,11	19,27	21,03	22,78	
Õhu kiirus koldes, m/s	0,10	0,16	0,21	0,26	0,31	0,37	0,42	0,47	0,52	0,57	0,63	0,68	0,73	0,78	0,83	0,89	0,94	0,99	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,41	1,46	1,51	1,61	1,72	1,87	2,03	

0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063		
360	330	310	290	280	270	260	250	240	230	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
360	330	310	290	280	270	260	250	240	230	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20			
18,72	18,73	18,74	18,75	18,79	18,8	18,81	18,82	18,83	18,83	18,83	18,83	18,84	18,84	18,85	18,86	18,87	18,88	18,88	18,86	18,87	18,92	18,93	18,94	18,96	18,96	18,97	18,98	19	19,01	19,04			
14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	14,78	
4,4	3,8	2,1	1,8	3,8	1,6	0,4	1,2	1	0,4	-0,4	-1,6	-0,9	-0,6	-2,5	-1,2	-1,6	-2,2	-1,6	-2	-4	-3,5	-3,5	-7	-4,5	-5,5	-6	-5,5	-6	-5	-6			
2967,5	2813,6	2734,4	2554,4	2539,8	2462	2225,7	2336,6	2221,8	2171,8	2094,3	2023,6	1954,4	1881,2	1812,7	1748,3	1664,4	1565,5	1424,7	1356,6	1275,1	1128,9	1033,2	916,5	793,8	641,1	517,4	398,7	303	211,4	133,2			
971,5977	822,2156	729,5077	642,2496	600,785	560,6066	521,7802	484,299	448,1922	413,4262	380,0301	348,0045	317,3553	288,0549	260,15	233,5936	208,4091	184,5889	162,1181	140,9988	121,2776	102,9403	85,93653	70,30103	56,02464	43,10849	31,55881	21,37192	12,54998	5,089374	-1,00677			
0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312	
101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	101905	
21,6	19,8	18,6	17,4	16,8	16,2	15,6	15	14,4	13,8	13,2	12,6	12	11,4	10,8	10,2	9,6	9	8,4	7,8	7,2	6,6	6	5,4	4,8	4,2	3,6	3	2,4	1,8	1,2			
101909	101908	101907	101906	101908	101906	101905	101906	101906	101905	101904	101903	101904	101904	101902	101903	101903	101902	101903	101903	101901	101901	101901	101898	101900	101899	101899	101899	101899	101900	101899	101900	101899	
1995,902	1991,384	2004,892	1912,15	1939,015	1901,393	1703,92	1852,301	1773,608	1758,374	1714,27	1675,596	1637,045	1593,145	1552,55	1514,706	1455,991	1380,911	1262,582	1215,601	1153,822	1025,96	947,2635	846,199	737,7754	597,9915	485,8412	377,3728	290,45	206,3106	134,2068			
21,02	19,27	18,11	16,94	16,36	15,77	15,19	14,61	14,02	13,44	12,85	12,27	11,69	11,10	10,52	9,93	9,35	8,77	8,18	7,60	7,01	6,43	5,84	5,26	4,68	4,09	3,51	2,92	2,34	1,75	1,17			
1,87	1,72	1,61	1,51	1,46	1,41	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,09	1,04	0,99	0,94	0,89	0,83	0,78	0,73	0,68	0,63	0,57	0,52	0,47	0,42	0,36	0,31	0,26	0,21	0,16	0,10			