

Energiatehnoloogia institut

**TAHKEFAASITIHIDUSE JAOTUS KOLDES PÕLEVKIVI
PÕLETAMISEL TSIRKULEERIVAS KEEVKIHIS HAPNIKU
RIKKAS KESKKONNAS**

**AXIAL SOLIDS DISTRIBUTION IN CFB-FUEL OIL SHALE COMBUS-
TION**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Lossev

Üliõpilaskood: 192410MASM

Juhendaja: Dmitri Nešumajev, vanemteadur

Tallinn 2021

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Aleksandr Lossev 192410MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja: Dmitri Nešumajev, vanemteadur 55651943

Konsultant:(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Tahkefaasi tiheduse jaotus koldes põlevkivi põletamisel tsirkuleerivas keevkihis hapniku rikkas keskkonnas

(inglise keeles) Axial Solids Distribution in CFB OXY-fuel Oil Shale Combustion

Lõputöö põhieesmärgid:

1. tahke faasi tiheduse jaotumise profiil piki kolde kõrgust
2. võrrelda erinevaid meetodeid, kuidas tahke faasi jaotumise profiili määrata
3. kuidas leida selleks vajalikke väärtuseid

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.		
2.		
3.		

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** “25”mai 2021a

Üliõpilane: “.....”.....201...a
/allkiri/

Juhendaja: “.....”.....201...a
/allkiri/

Konsultant: “.....”.....201...a
/allkiri/

Programmijuht: “.....”.....201...a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

Sisukord

TalTech Instituudi nimetus.....	3
Sissejuhatus.....	5
Protsesside ja kasutatavate seadmete kirjeldus	7
Tsirkuleeriv keevhikit	7
Hapniku põlemise kirjeldus.....	8
Stendi kirjeldus.....	9
Kasutatavate seadmete kirjeldus	10
Rõhulangus.....	11
Gaasijaotusrestid tareerimine.....	12
Andmete ettevalmistamine arvutamiseks ja mudeli koostamine	14
Gaasi viskoossuse määramine.....	14
Suitsugaasi koostis.....	15
Õhuvoolu hulk.....	15
Põlemisproduktid.....	17
Kolde parameetrite arvutamine.....	19
Kolde alumine osa.....	20
Mullid emulsioonifaasis ja keevkihi tühimike määramine.....	21
Tsirkuleerivate osakeste suuruse määramine.....	24
Koldest väljuva tahkefaasi massivoo määramine.....	26
Lagunemiskoefitsient.....	30
Tahke faasi tiheduse jaotumine koldes ja keevkihi kõrgus.....	33
Arvutuste tulemused	36
Kokkuvõte	46

Sissejuhatus

Maailm karmistab üha enam kontrolli kasvuhoonegaaside atmosfääri paiskamise üle. See sunnib kogu tööstust, sh energiatootmist, heitkoguseid vähendama ja uusi tehnilisi lahendusi otsima. CO₂ kvoodihinnad aina tõusevad, kuid nüüdisaja poliitikat jälgides ning jätkusuutlikult lähenedes ei ole vanade tehnoloogiatega enam võimalik sooja ja elektrit toota.

Praeguse aja põhilised heitkoguste vähendamise meetodid on:

1. süsiniku püüdmise ja salvestamise tehnoloogia;
2. väiksema süsiniku- ja vesinikusisaldusega kütuste kasutamine;
3. efektiivsuse parandamine;
4. Fossiilkütustest loobumine.

Üks põhilisi süsiniku püüdmise ja salvestamise tehnoloogiaid on hapniku põlemine. Seda meetodit kasutades põleb kütus gaasisegus, mis koosneb peaaegu täielikult hapnikust ja retsirkuleerivatest gaasidest. Protsessi tulemusena tekivad peaaegu puhas süsihappegaas ning veeaur. Saadud gaasisegu on üsna lihtne eraldada, süsihappegaas kokku suruda ja salvestada. Nii välditakse suure koguse kasvuhoonegaaside sattumist atmosfääri.

Sellist põlemisviisi saab kasutada tsirkuleerivas keevkihis, mille katlas moodustavad kütus, gaas ning tuhk või liiv ühe voo. Tsirkuleeriva keevkihi hüdrodünaamika mõjutab seal kasutatavate seadmete projekteerimist ja kasutamist. Teadmised seadme sees toimuvatest hüdrodünaamilistest protsessidest võimaldavad soojus- ja massilevi juhtida. Kuid tasub ka märkida, et mõõdistamine on sellistes tingimustes mõnede hüdrodünaamiliste voogude parameetrite arvutuste jaoks üsna problemaatiline.

Valdav osa kirjandusest räägib tööstuslikest seadmetest, mille geomeetrilised parameetrid erinevad tugevalt väikeste stendide omast. Ka TalTechis kasutatakse just neid viimaseid põlemistehnoloogia uurimiseks hapnikulises keskkonnas.

Käesoleva töö eesmärk on TalTechi hapnikukatseseadme jaoks välja selgitada, milline on tahke faasi tiheduse jaotumise profiil piki kolde kõrgust. Töö põhineb sama seadmega tehtud katsete andmetel. Samuti on töö raames oluline võrrelda erinevaid meetodeid, kuidas tahke faasi jaotumise profiili määrata, kuidas leida selleks vajalikke väärtuseid. Nende

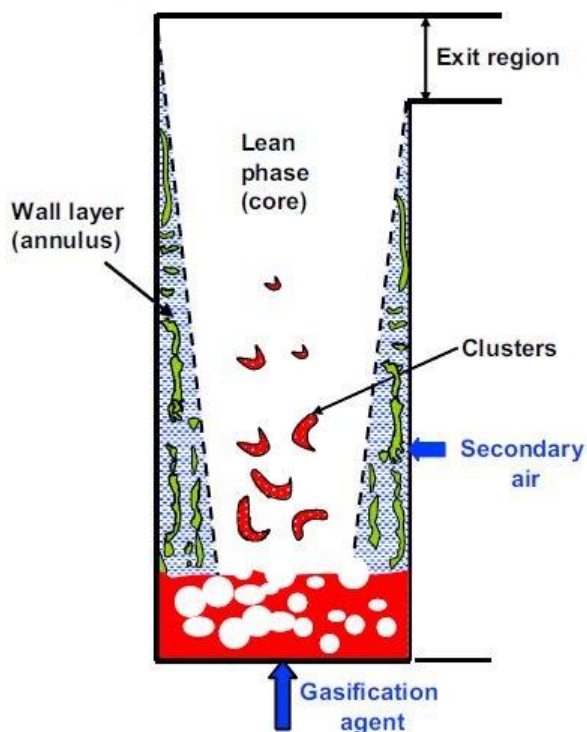
teadmiste põhjal tuleb ehitada mudel, mida saab kasutada edasisteks arvutusteks ja seadme erinevate režiimide analüüsiks

Protsesside ja kasutatavate seadmete kirjeldus

Tsirkuleeriv keevhikit

Keevkihtkatlas satuvad kütus ning tuhk või liiv gaasialduspinna kohale. Suurema osa tahkete osakeste massist moodustavad tuhk, liiv jne. Kütuse ja lendavate osakeste kogus on veidi väiksem ning üldiselt eeldatakse, et nad ei mõjuta tahkete osakeste üldist vostruktuuri. Sellest järeldub, et keevkihi hüdrodünaamika arvutatakse inertsete tahkete ainete, näiteks tuha, omaduste põhjal. Keevkihti sattuvad kütuseosakesed põlevad tsirkuleeriva keevkihi tõusvas osas. Et koldes sobivat temperatuuri hoida, tuleb kütuse põlemisel eralduv soojus eemale juhtida. Selleks kasutatakse kolde ülemises osas soojusvaheteid, tsirkuleeriva keevkihi puhul aga välist keevkihiga soojusvahetit tsirkuleeriva materjali jaoks. Sellise protsessi projekteerimiseks ja juhtimiseks on oluline teada tahke faasi tiheduse jaotumise profiili ning tsirkuleeriva materjali massi[1].

Nagu teada, siis on tsirkuleeriva keevkihi protsessid keerulised. Nendes tingimustes toimuvat voogu iseloomustab gaasi ja tahkete osakeste segu vertikaalne jagunemine. Gaasialdajas paiknevad tahked osakesed paisatakse gaasivooga üles, kus moodustavad kogumeid, milles nad ka liiguvad. Selliseid kogumeid nimetatakse klastriteks[1].



Joonis 1.1 Keevkihi voolu skeem [2]

Seoses sellega ei saa tsirkuleeriva keevkihi hüdromehaanika kirjeldus põhineda ainult ümber üksiku osakese toimuval gaasivool. Tuleb arvestada gaasifaasi ning klastrite vastastikuse mõjuga.

Tahkete osakeste voog koldes ei ole suunatud ainult üles. Kolde keskosast seinaga poole lähenedes voo kiirus aeglustub ja osakesed hakkavad koldest väljumata keevkihti tagasi langema.

Hapniku põlemise kirjeldus

Hapnikulises keskkonnas põlemine on protsess, mille käigus eraldatakse etteantud gaasisegust lämmastik kui oksüdeerija. Kuna tavaliselt on oksüdeerija hapnikuprotsent kõrgem kui õhus, siis võib see potentsiaalselt viia suurema soojuseraldumiseni kolde ristlõikepinnalt, tõstes protsessi efektiivsust. Lisaks viib hapnikusisalduse suurendamine etteantavas gaasis väiksemate CO heitmeteni ning väävlit puhastamine muutub tõhusamaks. Hapniku põlemist peetakse potentsiaalseks süsinikdioksiidi püüdmise võimaluseks. Enamikus hapniku rikkas keskkonnas põlemist käsitlevas kaasaegses kirjanduses on põlemistingimusi optimeeritud, et need sarnaneks traditsioonilisele õhus põlemise protsessile. Seega, uut tehnoloogiat saab edukalt kasutada ka tavaliste kollete puhul. Et saavutada tavalisele põlemisele analoogne temperatuuritase, siis osa suitsugaase retsirkuleeritakse[3], [4].

Katlast väljuvat suure CO₂ sisaldusega heitgaasi puhastatakse suitsugaaside puhastussüsteemis, misjärel saadetakse see kompressiooni- ja puhastusseadmesse. Saadud puhast ning vedelat CO₂ saab transportida, ladustada ning kasutusele võtta.

Hapnikulises keskkonnas põlemisel on järgmised eelised [4]:

1. põlemiskiirus suureneb;
2. põlemisaeg ning kütuse leekpunkti temperatuur langeb;
3. väheneb liigõhutegur ja põlemisjärgne suitsugaaside hulk;
4. on konkurentsivõimelisem, võrreldes teiste CO₂ juhtimistehnoloogiatega;
5. sobib nii uute kui ka vanade katelde jaoks;
6. vähendab märkimisväärselt NO_x heitmeid.

Stendi kirjeldus

Õhu etteanne toimub läbi suruõhuga täidetud trassi, mille mõõdetud rõhk on 284,8 kPa. Trassist satub õhk rõhu- ja vooluregulaatoritele, läbi mille jaguneb see stardi-, primaar- ja sekundaarõhu, välise soojusvaheti veeldatud õhu ning kütusepaakide jaoks vajaliku õhu vahel läbipuhketrassides. Kõik õhu etteandeliini peamised osad on varustatud õhuküttekehade, et õhk sobiliku temperatuurini viia. Õhuküttekehadena kasutatakse kanalitega õhukütteseadmeid võimsusega 6 kW, samuti õhu etteandeks kasutatavate torude ümber keritud küttelinti.

Primaar- ja stardiõhu trass tuleb õhukarpi, mis asub kolde kohal. Õhukarbis tekib vajalik rõhk ning õhk siseneb perforeeritud resti kaudu kolde alumisse ossa. Seejärel liigub õhk mööda kollet üles, võttes tahked osakesed kaasa. Kolde ülemises osas väljub gaasi ning tahkete osakeste segu tsüklon-separaatorisse, kus jämedama fraktsiooniga osakesed settivad ja suunduvad alla. Peenema fraktsiooniga gaas lahkub nn tsirkuleerimistsüklist. Tsükloni ladestunud osakesed suunduvad mööda toru alla ning satuvad silpotisse. Silpot takistab gaasi ja tahkete ainete tagasivoolu koldest tsüklonisse. Selles seadmes käitub silpot ka välise soojusvahetina (edaspidi *EHE*). EHEs on torukesed, mis eemaldavad tsirkuleerivast materjalist liigse soojuse. Tahkete ainete voolu parandamiseks on EHEs mitu väikest õhu veeldamise toru. EHEst väljuv materjal seguneb sekundaarse õhu etteandeliinist väljuva gaasiga ning suundub tagasi koldesse, sulgedes tsirkuleeriva keevkihi tsükli. Materjal läheb tagasi koldesse, mis on perforeeritud gaasijaotusrestist 0,95 m kõrgusel.

Kõnealusel seadmes on võimalik suitsugaasi retsirkuleerida. Suitsugaasi saab ette anda nii primaarse kui ka sekundaarse õhu jaoks. Kui suitsugaasi kasutatakse primaarse gaasina, tuleb ta otse õhukarpi. Kui suitsugaasi kasutatakse sekundaarse gaasina, tuleb ta sekundaarse õhu trassi, seguneb EHEst väljuva tahke osaga ning satub koldesse.

Ülejäänud osa seadmest näeb välja järgmine. Tsüklonist väljuv ja lenduvaid tuhaosakesi sisaldav gaas satub kaheastmelisse jahutisse. Jahutis on soojuskandja ühendatud hoone kütte- ja veesüsteemiga, nii et katsete käigus tekkinud soojus kasutatakse ära, mitte ei paisata atmosfääri. Pärast soojuse eraldamist satub jahutatud suitsugaas kahte kottfiltrisse, kus gaas puhastatakse lenduvatest tuhaosakestest ning paisatakse atmosfääri või saadetakse tsirkulatsioonipumpade kaudu tagasi koldesse.

Kütuse etteanne toimib selles seadmes tigusööturite abil, mis annavad ette juba eelnevalt punkrisse puistatud kütust. Sööturist puistatakse kütus läbi toru koldesse.

Stendil saab sisse lülitada nn *OXY-Fuel Combustion* süsteemi. Suruõhuga trassist tuleva primaar- või sekundaarõhu asemel ühendatakse hoopis surugaasiga täidetud balloonid. Neis balloonides olevas gaasis on hapnik kui oksüdeerija ning süsihappegaas, mis hoiab kolde nõutavat mahulist täitumist ning ette nähtud kiirust. Nagu ka trassist tuleva suruõhuga, toimub hapniku-režiimis gaasi etteandmine läbi rõhu- ja vooluregulaatorite, et saavutada nõutavad gaasiproportsioonid ning võimaldada eri eksploatatsioonirežiimide seadistamist, katsetamist.

Seade töötab, põletades 0–3 mm fraktsiooniga tahket kütust. Eelnevalt sõelutakse kütus läbi spetsiaalse sõela, mis eraldab vajaliku peene fraktsiooni jämedast. Alles jäänud jäme fraktsioon purustatakse ja segatakse kokku sõelutud fraktsiooniga. Saadud kütuse valmis-segu saadetakse laborisse, et teada saada selle täpne koostis, põlemissoojus jne.

Tehtud arvutustes on kasutatud Eestis leiduva põlevkivi – kukersiidi – põletamisel saadud andmeid.

Kasutatavate seadmete kirjeldus

Laborikatsetes kasutatakse andmete saamiseks ja stendi juhtimiseks mitmesuguseid seadmeid.

Gaasi etteandeliinil paiknevad massivooluregulaatorid, mis juhivad stardiõhu, primaarse õhu ja sekundaarse õhu jaoks etteantava gaasi hulka. Hapniku-režiimis töötamiseks on sarnased regulaatorid ka hapniku ja süsihappegaasi etteandeliinidel. Gaasi etteandeliinile on paigaldatud kanali-tüüpi õhuküttekehad, et saavutada etteantava gaasisegu vajalik temperatuur. Etteantava gaasi temperatuuri kontrollimiseks on etteandeliinidele paigaldatud termopaarid. Nii on etteantava gaasisegu maht ja temperatuur täielikult kontrolli all.

Eri kõrgustele paigaldatud termopaarid mõõdavad koldes kahefaasilise gaasivoolu ja tahkete osakeste temperatuuri. Samuti mõõdetakse mõningate vaheväärtustega rõhulangust õhukarbist kuni kolde laeni. Mõõtmised toimuvad impulsstorude abil, mis on paigaldatud kolde siseseinaga ühele tasapinnale. Rõhk edastatakse mööda neid torusid anduritele, mis mõõdavad kas rõhulangust nende punktide vahel, millesse on paigaldatud impulsstorud, või absoluutrõhku impulsstoru paigalduskohas. Absoluutrõhk tekib kolde ülaosas ning automaatika hoiab märgitud väärtust, et tagada kolde ühtlane tõmme.

Kolde alumises välimises osas on reguleeritava etteandega tigu, mille abil eemaldatakse hoiupaaki sattuv põhjatuhk. See on vajalik, et kontrollida materjalihulka kolde alumises

osas. Teo pöörete jälgimisel antakse kütus koldesse. Tigu on tareeritud sellisel moel, et annab ette pöörlemiskiiruse põhjal arvestatud kütusekoguse.

Edasi mõõdetakse temperatuuri tsüklonist väljumisel jahutisse ning alla mööda toru. Allavoolutoru on lisaks varustatud soojendussüsteemiga, mis koosneb pinge all olevatest kütetelintidest.

Soojenemistemperatuuri kontrollitakse termopaaride abil, mis on paigaldatud allavoolutoru ja küttelindi vahele. Kui materjal jõuab EHEsse, mõõdavad termopaarid selle temperatuuri. Samuti mõõdetakse temperatuuri EHE all asuvas õhukarbis. Õhukarpi tuleb õhk, mis on vajalik EHEs oleva materjali veeldamiseks. Selle kulu kontrollib massivooluregulaator.

Jahuti esimeses astmes mõõdetakse toitevee temperatuuri jahutisse sisenemisel ja väljumisel. Seejärel mõõdetakse temperatuuri väljumisel ja enne jahuti teise astmesse sisenemist on sinna paigaldatud hapnikusisalduse andur. Siis võetakse temperatuurinäidud jahutis olevast toiteveest (nii sisenemisel kui ka väljumisel), jahutist ja kottfiltrist väljuvast gaasist, kondensaatoris olevast veest (nii sisenemisel kui ka väljumisel) ning kondensaatorist väljuvast gaasist. Pärast seda paisatakse gaas atmosfääri või suunatakse retsirkuleeriva ventilaatori abil tagasi primaarsesse või sekundaarsesse liini. Seda reguleeritakse kulumõõturitega, samuti mõõdetakse retsirkuleerivate gaaside temperatuuri.

Laborikatsete käigus toimuva täielikuks vaatluseks analüüsitakse väljuvaid suitsugaase GASMET FTIR seadme abil. See aparaat võtab teise jahuti ja kottfiltrist vahelisest kanalist väikese osa suitsugaase, et laborikatsete ajal põlemisprotsesse pidevalt ning täielikult jälgida.

Rõhulangus

Kui seade töötab, siis kütuse veeldamise käigus liiguvad tuhaosakesed kolde alumisest osast gaasijaotusresti juurest kolde väljalaskeava juurde. Samal ajal toimub piki kõrgust rõhulangus. Teades laboritingimustes mõõdetud rõhulangust, saab välja arvutada nii tsirkuleeriva materjali hulga kui ka materjali kontsentratsiooni igas konkreetses koldepunktis. Rõhulangust mõjutab suur hulk parameetreid, millest põhilised on koldesse etteantava gaasi kiirus, osakeste suurus ja kolde geomeetria. Tsirkuleeriva keevkihi puhul on rõhumuutuste profiil eksponentsiaalne, kuna suur osa koldes tsirkuleerivast materjalist on all keevkihis ning veidi ülevamal piirikihis. Seejuures on kolde keevkihi alumises osas paiknevate tahkete osakeste kontsentratsioon püsiv. Edasine rõhumuutus koldes sõltub seadme töörežiimist, näiteks etteantava sekundaarse õhu hulgast jm.

Gaasijaotusresti tareerimine

On oluline märkida, et suurema osa rõhulangusest tekitab gaasijaotusrest. Kui õhukarpi antav gaas siseneb läbi restiavade kolde alumisse ossa, avaldavad need vastupanu ning selles osas tekibki rõhulangus. Rõhulanguse eraldamiseks viiakse läbi nn resti tareerimine. Teisisõnu, tehakse katse, mille käigus määratakse resti hüdrodünaamilise vastupanu mõju mõõdetavale rõhulangusele.

Resti hüdrodünaamilise vastupanu määramise katse ajal ei ole seadmes tsirkuleerivat materjali, et teada saada ainult resti tekitatud rõhulangust. Seetõttu jagatakse katse kaheks: nn külmaks ja kuumaks katseks.

Külma katse ajal antakse õhukarpi trassist tulevat suruõhku. Impulsstoru ja rõhuanduri abil mõõdetakse õhukarbi absoluutrõhk. Seejärel kaotab läbi resti sisenev õhuvool oma staatilise rõhu ning 1170 mm kõrgusel restist registreeritakse õhukarbi suhtes rõhulangus. Rõhunäitajaid mõõdetakse ka kolde ülemises osas, mida toetab ka automaatika. Samuti mõõdetakse õhukarpi etteantava õhu temperatuuri, et määrata etteantava gaasi tegelik maht. Et saada teada, kuidas rõhulangus sõltub etteantava gaasi hulgast, võetakse näidud sammhaaval. Iga korraga suurendatakse õhukarpi antavat õhku 20–30 SLPM võrra. Gaasivoolu suurendatakse kuni 500 SLPMni, seejärel alandatakse etteantava gaasi mahtu kuni väärtuseni 100 SLPM. Katse käigus ei hakata näitajad kohe märkima. Seda tehakse siis, kui suurenenud gaasivoog stabiliseerub ja rõhulanguse kõikumine enam olulisi muudatusi ei tekita. Andmete registreerimisel teeb programm seda 1 Hz sagedusega 20 sekundi vältel. Andmete töötlemisel arvutatakse konkreetse gaasikulu keskmine väärtus.

Kuuma katse käigus toimub kõik põhimõtteliselt samamoodi. Ainult et õhukarpi antavat õhku on eelnevalt soojendatud. Selle katse käigus on esialgne kogus 100 SLPM, mida tõstetakse 30 SLPM kaupa kuni 500 SLPMni. Seejärel kahandatakse väärtust samade sammude kaupa kuni 100 SLPMni.

Pärast katse tegemist ja saadud andmete analüüsi tuleb teada saada, kuidas sõltub resti õhuvoolu rõhulangus etteantavast õhukogusest kuupmeetri kohta ühes tunnis. Selleks teisendatakse etteantavate õhukoguste väärtused (standardliitrites minutis) kuupmeetriteks, arvestades seadme temperatuuri ja rõhku. Edasi näitavad graafikud, kuidas vooluhulk kuupmeetrites sõltub rõhulangusest õhukarbi ning kõrguspunkti vahel, mis asub 1170 mm kõrgusel kolde sees asuvast restist. Graafikud joonistatakse nii külmade kui ka kuumade katsete ilmestamiseks, graafik tehakse ka mõlema katse keskmise väärtuse kohta.

Keskmise väärtuse graafiku järgi joonistub välja polünoomiaalne sõltuvus resti rõhulanguse ja etteantava gaasimahu vahel. Seda sõltuvust kasutataksegi edaspidistes arvutustes, mida tehakse seadme erinevate tingimuste ja töörežiimide modelleerimiseks.

Tänu sellistele katsetele saab teavet mitte ainult selle kohta, kuidas gaasijaotusrest rõhulangust mõjutab, vaid nende andmete põhjal saab välja joonistada ka sõltuvuse, mida saab kergelt ja kiiresti edasistegi arvutuste puhul kasutada.

Andmete ettevalmistamine arvutamiseks ja mudeli koostamine

Enne arvutuste tegemist tuleb kõik vajalikud andmed ette valmistada ja need SI-süsteemi viia. Kuna selliseid andmeid ei ole palju, siis teisendatakse ainult stardi-, primaarse ja sekundaarse gaasi vood. Temperatuur võib jääda Celsiuse skaalale, vajadusel saab seda mõne konkreetse valemi jaoks kelviniteks teisendada.

Järgmisena tuleb esitada seadme täpsed geomeetrilised andmed ning andurite füüsilised asukohad. Kuna projekteerimisel ei kavandatud kõiki impulsstoru all olevaid rõhuvähendusavasid, siis mõõdeti need kohapeal. Suur osa mõõtudest võeti seadme projektijooniselt.

Gaasi viskoossuse määramine

Seejärel läheb vaja andmeid gaaside viskoossuse ja tiheduse kohta, kuna temperatuur võib kõikuda mitte ainult erinevates katsetes, vaid ka ühe katse käigus ei ole kolde temperatuur ühtlane. Viskoossuse ja tiheduse jaoks puudub kindel temperatuuriväärtus. Siinkohal tuleb jällegi rääkida sõltuvusest viskoossuse ja tiheduse ning temperatuuri vahel. Selleks kasutatakse andmeid [5]. Kui sõltuvused on teada, saab neid kasutada vajalike väärtuste leidmiseks kõigis punktides, kus temperatuuri mõõdetakse. Aga tabeli andmed saab kasutada ainult õhu režiimis, sellepärast, et hapniku režiimides on gaasi koostised erinevad ja viskoossuse arvutamine peab põhinema gaasi koostisel.

Kuna gaasi koostis sõltub seadme töörežiimist, ei ole gaasi viskoossuse sõltuvust temperatuurist võimalik tabeliandmete põhjal välja selgitada. Vastasel juhul võib saada valed andmed, kuid gaasi viskoossus on üks seadme arvutuste jaoks vajalikke põhiparameetreid. Gaasi viskoossuse väljaarvutamiseks tuleb määrata gaasisegu koostis, seejärel komponendi viskoossuse sõltuvus temperatuurist ning selgitada välja iga komponendi molaarmass [6]:

$$\mu_g = \sum_{i=1}^z \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{n_i} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^z n_j \varphi_{i,j}}$$

Kus μ_g – gaasi segu viskoossus, Ps*s

μ – gaasi komponendi viskoossus, Ps*s

$n_{i,j}$ – gaasi komponendi sisu, %

$\varphi_{i,j}$ – gaasi komponendi segu viskoossus, $Ps*s$

Kus gaasi komponendi segu viskoossus on:

$$\varphi_{i,j} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0.25} \right]^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{0.5}}$$

Kus μ_i – gaasi komponendi viskoossus, $Ps*s$

μ_j – gaasi komponendi viskoossus, $Ps*s$

M_i – gaasi komponendi molaarmass, g/mol

M_j – gaasi komponendi molaarmass, g/mol

Suitsugaasi koostis

Õhuvoolu hulk

Kuna põlemisreaktsiooni käigus muutuvad koldes oleva gaasi koostis ja omadused, tuleb gaasikoostise muutmiseks arvutusi teha.

Laborianalüüs näitab täpselt ära katseks ettevalmistatud kütuse koostise. Sisalduvad ained on esitatud protsentides. Õhu koostis ning selles sisalduvad ained on samuti protsentuaalselt teada.

Tahke või vedela kütuse põlemiskomponentide määramiseks tuleb teada reaktsioone, milles osalevad kõik kütuse ning oksüdeerija elemendid. Reaktsiooni käigus tekivad uued saadused nn stöhhiomeetrilistes vahekordades. See toimub vastavalt Daltoni seadusele [7]. Daltoni seaduse järgi reageerivad kütuse põlevad osad hapnikuga teatud keemilises vahekorras. Hapniku ja põlemisproduktide hulk määratakse stöhhiomeetriliste põlemisvõrrandite põhjal, mis on arvestatud ühe mooli iga põleva komponendi kohta.

Sidudes need võrrandid 1 kg kütusega, väljendades gaasili aineid mahuühikutes ning jagades nende massihulga tiheduse väärtusega, saame teada hapniku koguse ja põlemisproduktid 1 kg põleva kütuse iga komponendi kohta kuupmeetrites, kui rõhk on 101,3 kPa ja temperatuur 0°C [3], [7].

1kg süsiniku kohta:

1kg C + 1,866m³ O₂ = 44.01kg CO₂

1kg väävli kohta:

1kg S + 0.7m³ O₂ = 0.7m³ SO₂

1kg vesiniku kohta:

1kg H₂ + 5.56m³ O₂ = 11.12m³ H₂O

Summeerides hapnikukoguse, mida on vaja 1 kg kütuses sisalduvate põlevate elementide põletamiseks, ja lahutades kütuses sisalduva hapniku, saame teada teoreetiliselt vajaliku hapnikukoguse 1 kg tahke kütuse põletamiseks [3], [7]:

$$V_{O_2}^0 = 1866 \frac{C^P}{100} + 0.7 \frac{S_{op+k}^P}{100} + 5.55 \frac{H^P}{100} - \frac{O^P}{100\rho_{O_2}}$$

Kus C – süsiniku massisisaldus kütuses, %

S – väävli massisisaldus kütuses, %

H – vesiniku massisisaldus kütuses, %

O – hapniku massisisaldus kütuses, %

ρ_{O_2} – hapniku tihedus kg/m³

Hapnikusisaldus õhus on umbes 21 mahuprotsenti, mistõttu on põlemiseks vajaliku õhu teoreetiline kogus V^0 , m³/kg, st õhuhulk, mida on vaja 1 kg kütuse täielikuks põletamiseks tingimusel, et kogu temas sisalduv hapnik reageerib [3], [7]:

$$V^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0.21}$$

Kus, V^0 - põlemiseks vajaliku õhu teoreetiline kogus V^0 , m³/kg

Põlemisprotsessi käigus kulub kütust ja hapnikku ja nende toimiv kontsentratsioon väheneb. Põlemine aeglustub.

Seepärast antakse põlemiseks rohkem õhku, kui on teoreetiliselt ette nähtud. Tegelikult koldesse mineva õhu V_g suhet teoreetiliselt vajamineva kogusega nimetatakse liigõhuteguriks.

Käesolevas töös määratakse liigõhutegur iteratiivse arvutuse abil, mille loogika on järgmine:

$$\alpha > V_{\text{air}} > V_{O_2} > V_g > \Sigma(V_{CO_2}, V_{SO_2}, V_{N_2}, V_{H_2O}, V_{O_2}, V_{Ar}) > \alpha$$

Kus α – liigõhutegur

V_{air} - Liigne õhuhulk, m^3/kg

V_{O_2} - Hapniku maht, m^3/kg

V_g - Põlemisgaasi kogu maht, m^3/kg

V_{CO_2} - Süsihappegaasi maht, m^3/kg

V_{SO_2} - Väävlidioksiidi maht püriidist, m^3/kg

V_{N_2} - Lämmastiku maht, m^3/kg

V_{H_2O} - Lämmastiku maht, m^3/kg

V_{Ar_2} - Argooni maht, m^3/kg

Põlemisproduktid

Ühe kilogrammi tahke või vedela kütuse täielikul põlemisel tekkivad produktid sisaldavad:

- süsiniku ja väevli põlemissaaduseid;
- kütuse lämmastikku ja teoreetiliselt vajalikus koguses õhus sisalduvat lämmastikku;
- teoreetilist kogust veeauru, mis sisaldab kütuse niiskuse aurustumisel ja vesiniku täielikul põlemisel tekkivat auru;
- auru, mis on sattunud koldesse teoreetiliselt vajaliku koguse niiske õhuga;
- liigõhku ja selles sisalduvat auru;
- väikest kogust etteantud õhus sisalduvat argooni.

Põlemisproduktide arvutustulemused jagunevad tavaliselt kuivadeks gaasideks ja veeauruks.

Põlemisproduktide ülejäänud komponentide mahud jagatakse teoreetilisteks kogusteks, mis on saadud 1 kg kütuse põletamisel teoreetiliselt vajamineva koguse hapnikuga, ja nende kogusteks põletamiseks etteantud liigõhus [3], [7]:

$$V_{N_2}^0 = 0.79V^0 + 0.8 \frac{N^P}{100}$$

Kus V^0 - põlemiseks vajaliku õhu teoreetiline kogus V^0 , m³/kg

N - lämmastiku massisisaldus kütuses, %

koefitsient 0,8 tähistab ühiku jagamisel lämmastiku tihedusega saadud suhet.

Veeaurude teoreetiline maht:

$$V_{H_2O}^0 = 0.111H^P + 0.0124W^P + 0.0161V_o^0$$

Kus V_{H_2O} - Veeaurude teoreetiline maht, m³/kg

H - vesiniku massisisaldus kütuses, %

W - Tarbimisaine niiskus, %

V_o^0 - põlemiseks vajaliku õhu teoreetiline kogus V_o^0 , m³/kg

Kus, V_o^0 on:

$$\frac{V^0 \rho_{air} d}{1000 \rho_{H_2O}} = 0,0161 V_o^0$$

Kus V^0 - põlemiseks vajaliku õhu teoreetiline kogus V^0 , m³/kg

ρ_{H_2O} - veauru tihedus, kg/m³

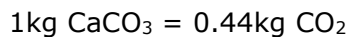
ρ_{Air} - Kuiva õhu tihedus, m³/kg

d - niiskuse sisaldus õhus, %

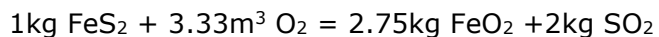
Põlemisproduktide mahud arvutatakse põlemisreaktsioonide abil. Esiteks tuleb kirjutada põlemisreaktsiooni võrrand ja see võrdsustada. Seejärel on vaja saadud hapnikukogus g/mol jagada oksüdeeruva ainega g/mol, misjärel selgub, kui palju hapnikku on vaja 1 kg

oksüdeeruva aine põletamiseks. Teades 1 kg aine oksüdeerumisel saadud produkti üldmassi, tuleb see jagada saadud aine tihedusega. Korrutades saadud koefitsiendi selles reaktsioonis oksüdeerunud aine protsendisisaldusega, saame reaktsiooni käigus tekkinud põlemisprodukti m³/kg.

1kg karbonatide kohta:



1kg Püriitväävli kohta:



Sarnast arvutuste põhimõtet kasutatakse ka OKSI-režiimis. Arvutuste käigus võetakse õhus sisalduvate erinevate kontsentreeritud ainete asemel vajalikus koguses hapniku ja süsihappegaasi segu. Edasine arvutuskäik jääb muutumatuks.

Reaktsioonide käigus saadud suitsugaaside täpse koostise määramiseks saab täpselt välja arvutada näiteks gaasi tiheduse ja viskoossuse, mida on vaja mudeli edasiseks loomiseks.

Kolde parameetrite arvutamine

Käesoleva töö autor toetub mitmetele erinevatele arvutustele. Kuna sisendandmeid on vähe, arvutatakse mõned põhiparameetrid kaudselt. Uuritud tööde autorid kasutavad kas tahkete osakeste mõõdetud andmeid või on neil tsirkuleeriva materjali analüüsiandmed ning nad teavad täpselt iga osakese keskmist suurust ja tsirkuleeriva materjali osakeste suurusjaotust. Esitatud mudeli jaoks kasutatakse nii iteratsioonilisi kui ka rekursiivseid arvutusi.

Koldes muutuvad parameetrid, mis on vajalikud rõhulanguse ja tahke aine kontsentratsiooni muutmise määramiseks, ei tulene ainult temperatuurikõikumistest. Kasutatava seadme korral antakse sekundaarset õhku 0,95 m kõrgusel gaasieraldusresti pinnast. See gaas muudab koldes olevaid kiirusi, mille tõttu muutub rõhu jaotuse ja kontsentratsiooni profiil piki kõrgust silmnähtavalt.

Sel põhjusel jagab töö autor kolde kaheks tinglikuks osaks: kuni sekundaarse õhu etteandeni, st kolde alumiseks osaks; ja pärast sekundaarse õhu etteannet, st kolde ülemiseks osaks.

Kolde alumine osa

Kolde alumises osas satub kütus gaasijaotusrestile, kus restiavade vahelt tulev gaasivoog selle veeldab. Kõige alumises osas – resti peal ja sellest veidi eemal – tekib nn keevkiht, mis koosneb kahest faasist: tihedast (ehk emulsiooni-) faasist, mis tekib kihi osakekestest ja nendevahelisest gaasivoost; ning mullifaasist, mis tekib üles liikuvatest ja eelistatavalt tahkeid osakesi mittesisaldavatest gaasimullidest.

Tihedas faasis ei ole kõik osakesed pseudoveeldatud, mõned tahked osakesed osalevad ka mullifaasis. Käesolevas töös lihtsustatakse seda asjaolu teadlikult.

Materjalikihi pseudoveeldamine toimub, kui gaasi kiirus u_0 ületab pseudoveeldamise minimaalset kiirust u_{mf} . On mitmeid avaldisi, et saada teada Reynoldsi arv nende osakeste jaoks, millest algab pseudoveeldumine. Laialdaselt kasutatakse järgmist suhet[3], [8]:

$$Re_{p,mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1$$

Kus $Re_{p,mf}$ – Osakese Reynoldsi arv tekkemomendil

C_1 – 27.2, constant

C_2 – 0.0408, constant

Ar – Archimedese arv tekkemomendil

Kus Archimedese arv[3], [8]:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g}$$

Kus Ar - Archimedese arv

d – osakese läbimõõt, m

ρ_g – gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

μ_g – gaasi viskoossus, Ps*s

Nii moodustab kihti läbiv vedelgaas selles tühimikke. Keevkihi keskmise tühimiku arutamiseks minimaalse pseudoveeldamise tingimustes kasutatakse Erguni võrrandist saadud tuletist[9]:

$$\frac{1,75Re_{p,mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3\varphi_p} + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})Re_{p,mf}}{\varepsilon_{mf}^2\varphi_p^2} = Ar$$

Kus Ar – Achimedese arv

$Re_{p,mf}$ – osakese Reynoldsi arv tekkemomendil

ε_{mf} – keevkihi poorsus tekkemomendil, m^3/m^3

φ_p – osakese kujutegur

Sellisel juhul saab keevkihis toimuvat rõhulangust näidata lihtsa võrrandiga.

$$\Delta P = \rho gh$$

Kus ΔP – rõhulang andtud kõrguse, Pa

ρ – tahke faasi tihedus, kg/m^3

g – raskuskiirus, m/s^2

h – keevkihi kõrgus, m

On oluline märkida, et arvutustes kasutatakse sellist parameetrit nagu keevkihi materjali keskmise osakese suurus. Kuna algandmetes puudub tsirkuleeriva materjali analüüs, siis praeguses etapis võib selle väärtuse meelevaldselt võtta. Hiljem saab iteratiivsete ja rekursiivsete arvutustega osakeste keskmise diameetri kaudselt leida.

Mullid emulsioonifaasis ja keevkihi tühimike määramine

Erialakirjandus pakub alumise kihi gaasijaotuse arutamiseks kahes faasis kasutada mitmeid lähenemisi. Selles töös autor kirjeldab üht neist, mis on pakkunud A.Gomez-Barea ja B.Leckner artiklis[2].

Mistahes kõrgusel läbib osa gaasist emulsioonifaasi, ülejäänud osa tekitab mulle. Kihi üldiseid poroosus saab esitada järgmiselt[2]:

$$\varepsilon = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b)\varepsilon_e$$

Kus ε - kihi üldiseid poroosus

ε_b – mulli poroosus

ε_e – emulsioonifaasi poroosus

Mulli kiirus[2]:

$$u_b = u_v + u_{br}$$

Kus u_{br} - ühe mulli kiirus lõpmatukihis, m/s

u_v - nähtav mulli kiirus, m/s

Ühe mulli kiirus lõpmatukihis u_{br} saab leida läbi[2]:

$$u_{br} = 0.711(gd_b)^{0.5}$$

Kus g – raskuskiirus, m/s²

d_b – mulli läbimõõt, m

Perforeritud resti jaokos mulli läbimõõt arvutatakse läbi[2]:

$$d_b = 1.38g^{-0.2} \left[\frac{A_B(u_0 - u_{mf})}{N_t} \right]^{0.4}$$

Kus, d_b – mulli läbimõõt, m

g – raskuskiirus, m/s²

A_B – kolde ristlõike pindala, m²

u_0 – pindkiirus, m/s

u_{mf} – kiirus tekkemomendil, m/s

N_t – resti ava kogus, tk

Hüdrodünaamiliste parameetrite leidmiseks võib eeldada, et pinnakiirus on ühtlane läbi kihi, omamata kindlat ühtlast temperatuuri ja mitte arvestades lenduvates ainetes moodustunud mullide mõju. Tahkete osakeste segunemist arvestatakse terves alumises kihis, mille keskmine tühiklikkus ei sõltu kõrgusest gaasijaoturi kohal. Kui eeldatakse, et emulsioonifaasis toimub minimaalne pseudoveeldamine ($\varepsilon_e = \varepsilon_{mf}$), siis mulli kiirus on samuti püsiv ja ei sõltu kihi kõrgusest[2].

Alumisse kihti etteantava pseudoveeldamise täieliku voo, mis liigub antud pinnakiirusel, võib tinglikult jagada kolme ossa: emulsioonifaasi voog u_e , nähtavate mullide voog u_v , läbi kihi tuleva gaasi voog u_{tf} . [2] See tähendab:

$$u_0 = u_e + u_v + u_{tf}$$

Kus u_0 – pindkiirus, m/s

u_v - nähtav mulli kiirus, m/s

u_e - emulsioonifaasi kiirus, m/s

u_{tf} – gaasi läbi vool, m/s

Liiguva läbi kihi mulli poroosus on [2]:

$$\varepsilon_b = \frac{1}{\left(1 + \frac{u_{br}}{u_0 + u_e + u_{tf}}\right)}$$

Kus, ε_b – mulli poroosus

u_0 – pindkiirus, m/s

u_{br} - ühe mulli kiirus lõpmatukihis, m/s

u_e - emulsioonifaasi kiirus, m/s

u_{tf} – gaasi läbi vool, m/s

Ühe mulli kiirus lõpmatukihis on teatud, emulsioonifaasi kiirus tavaliselt võtteakse ε_{mf} [2]. Nähtav mulli kiirus arvutatakse läbi mõõdeteta nähtav kiirus, Ψ [2]:

$$u_v = \psi(u_0 - u_e)$$

Kus u_v - nähtav mulli kiirus, m/s

Ψ - mõõdeteta nähtav kiirus

u_0 – pindkiirus, m/s

u_e – emulsioonifaasi kiirus, m/s

Mõõdeteta nähtav kiirus võib arvutada järgmise võrrandi abil:

$$\psi = 1,45Ar^{-0,18}$$

Kus Ψ - mõõtmata nähtav kiirus

Ar – Achimedese arv

Gaasi läbi vool arvutatakse läbi[2]:

$$u_{tf} = (1 - \psi)(u_0 - u_e)$$

Kus u_{tf} – gaasi läbi vool, m/s

Ψ - mõõtmata nähtav kiirus

u_0 – pindkiirus, m/s

u_e – emulsioonifaasi kiirus, m/s

Nüüd tuvastades kõiki tundmatuid, saab arvutada kihi üldiseid poroosus.

Tsirkuleerivate osakeste suuruse määramine

Tsirkuleerivate osakeste suurusvahemiku määramiseks tuleb välja arvutada osakese maksimaalne suurus, et ta suudaks kihist pinnakiirusel üles tõusta. Selleks on vaja määrata suurus osakesel, mille settimiskiirus raskusjõu ilmnemisel rahulikus õhuvoos on võrdne kolde pinnakiirusega.

Uurides võrrandeid ja sõltuvusi osakeste hõljumiskiiruse leidmiseks, on käesolevas töös välja valitud A.Haideri ja O. Levenspieli välja pakutud sõltuvus[10].

Osakeste hõljumiskiiruse määramine[10]:

$$\left(\frac{4Re}{3C_D}\right)^{\frac{1}{3}} = u_t \left[\frac{\rho_g^2}{g\mu_g(\rho_s - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Kus Re – osakese Reynolds'i arv

C_D – osakese hõõrdetegur

u_t osakese hõljumiskiirus, m/s

g – raskuskiirus, m/s²

μ_g – gaasi viskoossus, Ps*s

ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

ρ_g – gaasi tihedus, kg/m³

Osakeste hõõrdeteguri koefitsiendi määramine[10]:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.1806Re^{0.6459}) + \frac{0.4251}{1 + \frac{6880395}{Re}}$$

Kus C_D – u_t osakese hõljumiskiirus, m/s

Re – osakese Reynoldsi arv

Osakeste Reynoldsi arvu määramine[10]:

$$Re = \frac{\phi u_t \rho_g}{\mu_g}$$

Kus ϕ – osakese kujutegur

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

ρ_g – gaasi tihedus, kg/m³

μ_g – gaasi viskoossus, Ps*s

Teades diameetrit osakesel, mis on võimeline keevkihist tõusma, saab tuletada tsirkuleeriva materjali osakese keskmise suuruse. Lähtudes kirjanduses leitud andmetest nihkub jaotuskõver leitud suurusvahemiku aritmeetilisest keskmisest eemale. Tavaliselt nihe toimub tsirkuleerivate osakeste keskmise suuruse vähenemise suunas.

Veelgi täpsemaks arvutuseks tuleb tsirkuleerivat materjali täiendavalt analüüsida ja määrata selle jaotus Rosin-Rammleri võrrandiga. Samuti läheb edasistes arvutustes vaja tsirkuleerivate osakeste hõljumiskiirust. Selline arvutus ei ole täpne, kuid annab sellegipoolest alguspunkti.

Koldest väljuva tahkefaasi massivoo määramine

Nagu töös eelnevalt mainitud, siis tsirkuleeriva keevkihi tingimustes iseloomustab voogu gaasi ja tahkete osakeste segu jagatud vertikaalne voolamine. Gaasijaoturil paiknevad tahked osakesed visatakse gaasivooga üles ja moodustavad kogumid, milles nad ka liiguvad. Neid kogumeid nimetatakse klastriteks.

Eeldades, et klastris liikuvate tahkete osakeste massivoog on võrdne tahkete osakeste üldise massivooga, saame tahkete osakeste massitasakaalu jaoks [1]:

$$G_s = \rho_s(1 - \varepsilon_{mf})w(1 - \Phi)$$

- Kus G_s – tahkefaasi massivoog, kg/m²/s
 ε_{mf} – keevkihi poorsus tekkemomendil, m³/m³
 w – klasteri kiirus, m/s
 Φ – tahkefaasita rislõike pindala
 ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

Üldine gaasi massivoog koosneb klastrivoost ja ülejäänud gaasist, mis voolab lahjas gaasifaasis. Jõudude tasakaalust torulõigul järeldub, et tahkete osakeste ülekandmiseks vajalik rõhujõud on võrdne tahkete osakeste massi ja ujuvuse vahelise erinevuse summa ja rõhujõud tasakaalustavad klastrite massi ja ujuvuse vahelise erinevuse [1].

$$\Delta P(1 - \Phi)A_B + \lambda \rho_f v_G (v_s - w) \frac{A_B}{d_p} \Delta L = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_{mf})(1 - \Phi)A_B \Delta L g$$

- Kus ΔP – mõõdetud rõhulang, Pa
 Φ – tahkefaasi vaba rislõike pindala
 w – klasteri kiirus, m/s
 ρ_s – osakese tihedus, kg/m³
 ρ_g – gaasi tihedus, kg/m³
 A_B – kolde ristlõike pindala, m²
 λ – ülekandemomendi koefitsient
 d_p – osakese läbimõõt, m

ΔL – toru lõike, m

ε_{mf} – keevkihi poorsus tekkemomendil, m^3/m^3

g – raskuskiirus, m/s^2

v_s – osakese kiirus lahjafaasis, m/s

v_G – gaasi kiirus lahjafaasis, m/s

Gaasi massitasakaal [1]:

$$\frac{v_G}{u_0} = \frac{1}{\Phi} \left[1 - \varepsilon_{mf}(1 - \Phi) - \frac{u_{mf}}{u_0} \frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g\Delta L} (1 - \Phi) \right]$$

Kus ΔP – mõõdetud rõhulang, Pa

Φ – tahkefaasi vaba rislõike pindala

ε_{mf} – keevkihi poorsus tekkemomendil, m^3/m^3

ρ_s – osakese tihedus, kg/m^3

ρ_g – gaasi tihedus, kg/m^3

ΔL – toru lõike, m

g – raskuskiirus, m/s^2

v_G – gaasi kiirus lahjafaasis, m/s

u_0 – pindkiirus, m/s

u_{mf} – gaasi kiirus tekkemomendil, m/s

Tahke fraktsioonita ristlõikepindala leidmiseks on vaja kasutada Wirthi pakutud mõõtmeta rõhugradienti [1]:

$$\frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g\Delta L} = (1 - \Phi)$$

Kus ΔP – mõõdetud rõhulang, Pa

Φ – tahkefaasi vaba rislõike pindala

ε_{mf} – keevkihi poorsus tekkemomendil, m^3/m^3

ρ_s – osakese tihedus, kg/m^3

ρ_g – gaasi tihedus, kg/m^3

ΔL – toru lõike, m

g – raskuskiirus, m/s^2

Tahkete osakeste kiirust lahjas faasis saab esitada mõõtmeteta kujul [1]:

$$\frac{v_s}{u_0} = \frac{v_G}{u_0} - \frac{u_t}{u_0}$$

Kus v_s – osakese kiirus lahjafaasis, m/s

v_G – gaasi kiirus lahjafaasis, m/s

u_0 – pindkiirus, m/s

Ülaltoodud võrranditesse /22/ ja /23/ jääb kaks tundmatut. Võrrandis /22/ on need mas-sivoog kindlal torulõigul ja klastrite kiirus. Võrrandis /23/ jääb klastrile mõjuva jõutasakaalu jaoks üks tundmatu, mida on vaja lihtsalt valida, et võrrand tasakaalustada. Nii saab klastrite kiirust peatades teada konkreetse torulõigu massivoo. On oluline märkida, et gaasi kiiruseid, tihedusi ja teisi olulisi parameetreid tuleb arvutada kolde ülemise osa jaoks, kus sekundaarse õhu juurdevool kiiruseid muudab. Seda on vaja teha, kuna katsetes kasutatud stendi rõhulangus, mis mõõdeti lõigul 1170mm–4370mm (võetuna gaasialdusresti pin-nast), ei sisalda langust, mis tekib gaasijaotusresti takistuse tõttu, vaid kahefaasilist voogu, mis on pigem homogeenne ja "stabiilne" [1]

Võrrand mis ei arvesta seda klasterid, aga kasutab mõõdetud rõhulangu pakkus välja M. Stollhof [11]. Mõõdukõrgusele ülevalt vastavat rõhulangust saab seejärel kasutada järgmise võrrandi abil tahke aine tegeliku massivoo määramiseks:

$$G_s = \rho_s(1 - \varepsilon_A)v$$

Kus G_s – tahkefaasi massivoo, $kg/m^2/s$

ρ_s – osakese tihedus, kg/m^3

ε_A – ristlõike keskmine poroosus

v – keskmine osakeste kiirus, m/s

Et leia keskmine osakeste kiirus M.Stollhof pakub välja järgmine meetod [11]:

$$v = u_0 - u_s$$

Kus v – keskmine osakeste kiirus, m/s

u_0 – pindkiirus, m/s

u_s – libisemiskiirus, m/s

$$u_s = u_t \varepsilon_A^{k-1}$$

Kus u_s – libisemiskiirus, m/s

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

ε_A – ristlõike keskmine poroosus

k – mõõdeta parameeter libisemiskiiruse kirjelduse

$$k = \left(4.45 + 18 \frac{d_p}{D} \right) Re^{-0.1}$$

Kus k – mõõdeta parameeter libisemiskiiruse kirjelduse

d_p – osakese läbimõõt, m

D – kolde läbimõõt, m

Re – osakese Reynoldsi arv

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho_s (1 - \varepsilon_A) g$$

Kus ΔP – mõõdetud rõhulang, Pa

ΔL – toru lõike, m

ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

ε_A – ristlõike keskmine poroosus

g – raskuskiirus, m/s²

Viimasest võrrandist saame leida ristlõike keskmine poroosus, ja siis kõik määratamatud parameetrid on teatud, et arvutada tahkefaasi massivoo pakkutatud välja M.Stollhoffi meetodi läbi.

Massivoo arvutamiseks mõõdetud rõhulangu kasutamata on palju meetodeid. Et võrrelda oli valitud empiiriline võrrand, mis kasutas Johnsson ja Leckner oma töös [12]:

$$G_s = 23.7 \rho_g u_0 e^{\frac{-5.4 u_t}{u_0}}$$

Kus G_s – tahkefaasi massivoo, kg/m²/s

ρ_g – gaasi tihedus, kg/m³

u_0 – pindkiirus, m/s

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

Teades kolde ülemise osa massivoogu, saab leida ühe võtme parameetritest: tahke faasi kontsentratsiooni koldest väljumisel. Jagades kolde ülemise osa massivoo tahkete osakeste tihedusega ning jagades selle pinnakiiruse ja osakeste hõljumiskiiruse erinevusega, on tulemuseks tahke faasi kontsentratsioon kuupmeetrites ühe kuupmeetri vooluhulga kohta.

Lagunemiskoefitsient

Kiires pseudoveeldamise kihis väheneb tahke fraktsioon eksponentsiaalselt koos kõrguse muutumisega. Eksponentsiaalse funktsiooni käitumine sõltub lagunemiskoefitsiendist. See koefitsient muudab kiirust, millega tahke osa jaotusfunktsioon väheneb, ning ta on sõltuv osakeste omadustest, kolde füüsilistest parameetritest ning töörežiimist.

Probleemne on aga see, et suur hulk kirjandust ei arvesta lagunemiskoefitsiendi võrrandites kolde geomeetriliste parameetritega. Paljude teadlaste kinnitusel korrigeeritakse lagunemiskoefitsiendi väärtust, nii et arvutused langeks kokku vaadeldud parameetritega. See võib viidata asjaolule, et võrrandid on puudulikud ja nende kasutamine piiratud.

Läbi töötatud kirjanduses oli üks lähendus, mis arvestas mitte ainult tsirkuleerivate osakeste parameetritega, vaid ka kolde geomeetrilise profiiliga [13]:

$$G_\infty = 0.046 \times \rho_g (u_0 - u_t) Re^{0.3} \frac{u_0 - u_t}{\sqrt{g d_p}} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_s} \right)^{0.15}$$

Kus G_∞ - küllastanud massivoo, kg/m²/s

ρ_g - gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s - osakese tihedus, kg/m³

u_0 - pindkiirus, m/s

u_t - osakese hõljumiskiirus, m/s

Re - osakese Reynoldsi arv

g - raskuskiirus, m/s²

d_p - osakese läbimõõt, m

Siis lagunemiskoeftsiient α on[13]:

$$\alpha d_p = 3.8 \times 10^{-5} \left(\frac{G_\infty}{u_0 \rho_s} \right)^{-0.96} \left(\frac{u_0}{\sqrt{gD}} \right)^{-0.84} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_s} \right)^{0.37}$$

Kus G_∞ - küllastanud massivoo, kg/m²/s

α - lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

ρ_g - gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s - osakese tihedus, kg/m³

u_0 - pindkiirus, m/s

g - raskuskiirus, m/s²

d_p - osakese läbimõõt, m

D - kolde läbimõõt, m

Et võrrelda, tegi autor lagunemiskoeftsiendi arvutamiseks veel järgnevad võrrandid:

$$\alpha u_0 = 10[14]$$

Kus α - lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

u_0 - pindkiirus, m/s

$$\frac{au_t}{u_0} = 1.933 [14]$$

Kus a – lagunemiskoeffitsient, m^{-1}

u_0 – pindkiirus, m/s

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

$$a = \frac{0.88 - 420d_p}{(u_0 - u_t)^2 D^{0.6}} [15]$$

Kus a – lagunemiskoeffitsient, m^{-1}

u_0 – pindkiirus, m/s

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

d_p – osakese läbimõõt, m

D – kolde läbimõõt, m

$$a(u_0 - u_t)^2 = 3.5 - 1670d_p$$

Kus a – lagunemiskoeffitsient, m^{-1}

u_0 – pindkiirus, m/s

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

d_p – osakese läbimõõt, m

Teine lanugenemiskoeffitsient K , mõjub rohkem lahjafaasi jaotusele ja ei anna palju erinevust rõhulangu. Selle töö piirides autor ei hakka võrrelda selline koeffitsienti arvutus meetodit omavahel. Aga kahe eksponentsiaalselt jaotuse võrrandi juhul, oli kasutatud järgmine valem [14]:

$$K(u_0 - u_t) = 0.07$$

Kus K – lagunemiskoeffitsient, m^{-1}

u_0 – pindkiirus, m/s

u_t – osakese hõljumiskiirus, m/s

Tahke faasi tiheduse jaotumine koldes ja keevkihi kõrgus

Tahke faasi jaotumise võrrandit piki kolde kõrgust kirjeldab eksponentsiaalne funktsioon.

Eksponentsiaalsed funktsioonid saab jagada kahe tüübile. Ühega eksponendiga ja kahega eksponendiga.

Kasutatakse selles töös on kaks üheeksponentsiaalsed võrrandid, esimene pakutatud välja H.Yang [16]:

$$\varepsilon_{h,i} = \varepsilon_{exit} + (\varepsilon - \varepsilon_{exit}) \exp(-\alpha(h - H_k))$$

Kus $\varepsilon_{h,I}$ – poroosus kõrgusel I, m³/m³

ε - kihi üldiseid poroosus

ε_{exit} - tahkefaasi poroosus kolde väljunemisel

α – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

H_k – keevkihi kõrgus, m

h – kõrgus gaasijaotuserestist, m

Teine pakutatud välja Mo ja Wang:

$$\varepsilon_{h,i} = e^{-\alpha(h-H_k)}(\varepsilon - \varepsilon_{exit}) + \varepsilon_{exit}$$

Kus $\varepsilon_{h,I}$ – poroosus kõrgusel I, m³/m³

ε - kihi üldiseid poroosus

ε_{exit} - tahkefaasi poroosus kolde väljunemisel

α – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

H_k – keevkihi kõrgus, m

h – kõrgus gaasijaotuserestist, m

Võrreldatud kahe eksponentsiaalsed funktsioonid olid:.

Pakutatud välja Arvo Ots[3]:

$$\varepsilon_{h,i} = \frac{\rho_k e^{-\alpha(h-H_k)} - \rho_{exit} e^{-\alpha(h-H_k)} e^{K(H_r-H_p)} + \rho_{exit} e^{K(H_r-h)}}{\rho_s}$$

Kus $\varepsilon_{h,I}$ – poroosus kõrgusel I, m³/m³

ρ_k – tahkefaasitihedus keevkihi kõrgus, kg/m³

ρ_{exit} – tahkefaasitihedus kolde väljunemisel, kg/m³

α – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

K – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

H_k – keevkihi kõrgus, m

h – kõrgus gaasijaotuserestist, m

H_r – kolde väljunemis ava kõrgus, m

H_p – jaotuse kiiruse muutumis punkt, m

ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

Teine kahe eksponentsiaalne võrrand, kasutatud selles töös, pakkus välja [8]:

$$\varepsilon_{h,i} = \varepsilon e^{-\alpha(h-H_k)} + \varepsilon_{exit} e^{-K(h-H_r)}$$

Kus $\varepsilon_{h,I}$ – poroosus kõrgusel I, m³/m³

ε - kihi üldiseid poroosus

ε_{exit} - tahkefaasi poroosus kolde väljunemisel

α – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

K – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

h – kõrgus gaasijaotuserestist, m

H_k – keevkihi kõrgus, m

H_r – kolde väljunemis ava kõrgus, m

Kolmas võrrand on [2]:

$$\varepsilon_{h,i} = \frac{\left(\rho_k - (\rho_{exit} e^{-K(H_k - H_r)})\right) e^{-\alpha(h - H_k)} + \rho_{exit} e^{-K(h - H_r)}}{\rho_s}$$

Kus $\varepsilon_{h,I}$ – poroosus kõrgusel I, m³/m³

ρ_k – tahkefaasitihedus keevkihi kõrgus, kg/m³

ρ_{exit} – tahkefaasitihedus kolde väljunemisel, kg/m³

α – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

K – lagunemiskoeftsiient, m⁻¹

H_k – keevkihi kõrgus, m

h – kõrgus gaasijaotuserestist, m

H_r – kolde väljunemis ava kõrgus, m

ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

Antud võrrandites kirjeldatakse kontsentratsiooni muutumist maksimumväärtustest minimaalseteni. Tahkete osakeste kontsentratsioon on maksimaalne keevkihis, kolde alumises osas. Minimaalne aga koldest väljumisel. Kolde alumises osas hakkab kontsentratsioon järsult vähenema ning jääb pärast teatud kõrgusele jõudmist jääb praktiliselt.

Teades kõiki võrrandi liikmeid peale keevkihi kõrguse, võib selle parameetri leida, nii et võrrandi lahendamisel saadud rõhulangus oleks võrdne katsete ajal mõõdetud rõhulangusega. Pärast tulemuse saamist võib teha graafikuid, mis näitavad rõhu ja kontsentratsiooni sõltuvust olenevalt kolde kõrgusest.

Selles arvutusetapis on näha, et enamik kirjanduses pakutud variante lagunemiskoeftsiendi leidmiseks ei anna vastuvõetavat tulemust. Kui neis võrrandites keevkihi kõrgust valida, siis ei ole mõõdetud rõhulangusele võimalik ligilähedalegi saada. Mõnedel juhtudel erinevad katsete käigus saadud tulemused lausa kahe suurusjärgu võrra. Arvutustulemuste all kuvatakse nende võrrandite võrdlus.

Arvutuste tulemused

Alustuseks tuleb koostada korrektne võrrand koldest väljuva massivoo määramiseks. See on vajalik, et teada saada kolde ülemises osas olevate tahkete osakeste kontsentratsioon. Just kolde ülemist osa kasutatakse tahke faasi jaotumise määramiseks piki kõrgust.

Tabel 1. Massivoo G_s kolde väljunemis aval hapniku režiimis

Pindkiirus koldes üle- mosal	Osakese hõljumiskiirus	M.Stollhof[11]	A.Johnsson[12]	Karl-Ernst Wirth[1]
U_0	u_t	G_s	G_s	G_s
m/s	m/s	kg/m ² /s	kg/m ² /s	kg/m ² /s
2.46	0.15	15.53	17.37	9.46
2.57	0.15	16.52	17.79	10.35
2.63	0.15	9.46	19.16	8.15
2.63	0.15	4.97	18.80	4.85
2.43	0.16	25.24	15.09	3.76
2.48	0.16	21.87	15.44	7.42
2.87	0.17	15.60	20.79	12.32
3.16	0.17	20.53	20.72	15.81
3.22	0.17	20.08	21.80	16.29
3.27	0.17	28.39	23.10	20.10
3.56	0.17	20.61	24.91	18.12

Tabel 2. Massivoo G_s kolde väljunemis aval õhu režiimis

Pindkiirus koldes ülemosal	Osakese hõljumiskiirus	M.Stollhof[11]	A.Johnsson[12]	Karl-Ernst Wirth[1]
U_0	u_t	G_s	G_s	G_s
m/s	m/s	kg/m ² /s	kg/m ² /s	kg/m ² /s
4.09	0.52	35.31	15.34	13.35
5.08	0.52	6.18	21.84	6.56
4.53	0.53	27.14	18.49	11.42
3.85	0.53	2.66	14.23	2.80
5.10	0.53	40.75	22.61	29.04
4.97	0.53	5.82	21.15	6.16
3.97	0.53	11.19	14.98	9.71
4.18	0.53	23.72	16.14	15.34
4.53	0.53	27.14	18.49	19.42
3.79	0.53	30.14	13.79	9.35
4.02	0.54	27.54	15.63	14.66

Vaadeldes nelja võrrandi tulemusi, on näha, et Wirthi, ja S. Stollhofi võrrandid muutuvad sarnaselt ja on otseses sõltuvuses u_t -st. A. Johnssoni võrrand ei andnud kuigi head tulemust, sest see ei arvesta katsetes mõõdetud rõhulangusega. Wirthi võrrandi annab väiksema väärtuse. See ei võimalda valida keevkihi paksust moel, et tahke faasi jaotumise profiil annaks rõhulanguse väärtuse kolde ülemise osa kõrgusvahemikus 1170 mm – 4370 mm, mis langeks kokku mõõdetud väärtusega. Või on sellise jaotuse viga liiga suur. S. Stollhofi võrrand annab täpsema tulemuse.

Arvutused tegid kindlaks, et lagunemiskoeffitsientil on oluline osa tahke faasi jaotumise profiili määramisel piki kolde kõrgust. Allpool on toodud erinevate võrrandite lahendamisel saadud koeffitsientide võrdlused:

Tabel 3. Lagunemisekoeffitsiedi võrreldamine hapniku reziimis

U_0	A.Gungor[13]		C.Yang,Y.Kim[14]		Y.Alghamdi, Z.Peng[15]		Q.Miao,J.Zhu[17]	
	a_{free}	a_{bot}	a_{free}	a_{bot}	a_{free}	a_{bot}	a_{free}	a_{bot}
m/s	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}
1.73	8.28	53.66	0.02	4.93	0.25	2.59	0.27	2.89
1.77	9.28	50.67	0.02	5.09	0.22	2.39	0.24	2.66
1.80	15.28	50.06	0.02	4.97	0.25	2.36	0.28	2.64
1.87	14.28	44.43	0.02	5.16	0.24	2.10	0.27	2.34
1.90	16.28	44.00	0.02	5.33	0.25	1.97	0.27	2.19
1.98	6.28	38.39	0.02	5.59	0.15	1.71	0.16	1.90
2.02	7.28	36.95	0.02	5.71	0.14	1.61	0.16	1.80
2.39	5.28	22.02	0.02	6.40	0.14	1.03	0.16	1.15

Tabel 4. Lagunemisekoeffitsiedi võrreldamine õhu reziimis

U_0	A.Gungor [13]		C.Yang, Y.Kim[14]		Y.Alghamdi, Z.Peng[15]		Q.Miao, J.Zhu[17]	
	a_{Free}	a_{bot}	a_{Free}	a_{bot}	a_{Free}	a_{bot}	a_{Free}	a_{bot}
m/s	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}	m^{-1}
0.73	11.28	348.67	28.86	9.62	0.59	8.88	0.66	9.90
0.77	10.28	305.83	29.59	8.93	0.56	8.29	0.63	9.24
0.98	5.28	172.24	36.84	6.19	0.32	6.57	0.36	7.32
1.05	4.28	146.82	32.86	5.76	0.41	6.11	0.46	6.81
1.17	16.28	112.57	33.38	5.84	0.51	4.78	0.57	5.33
1.18	6.28	123.64	36.69	5.64	0.32	4.88	0.36	5.44
1.26	13.28	85.31	33.20	5.67	0.49	4.22	0.55	4.70
1.45	12.28	75.91	36.97	5.26	0.32	3.44	0.35	3.83

Kõigist esitatud lagunemiskoeffitsiendi arvutamise võrranditest sobib katseseadmese kasutamiseks ainult A. Gungori pakutud võrrand. Erinevalt teistest võrranditest arvestab see ka kolde geomeetrilise profiiliga. Võib eeldada, et kuna katses kasutatav kolle on väikese diameetriga, siis jõuavad keevkihist väljuvad osakesed kiiremini kolde seinani, kust mööda seinalla poole liikuv osakeste voog nad tagasi viib. See omakorda teeb jaotumise teravamaks. Väärrib märkimist, et katses kasutatava stendi kolle on veidi kõrgem kui neli meetrit ja see võib mõjutada arvutuste tulemusi. Kirjanduses kasutatavate lagunemiskoeffitsiendi arvutamise võrrandite andmeid kohandatakse tööstuslike seadmetega, mille kolle on tavaliselt rohkem kui kümme meetrit kõrge. Nagu ülal toodud tabel näitab, siis võivad TalTechi stendi puhul kasutatavad meetodid erineva mitme suurusjärgu võrra.

Selline erinevus ei luba valida keevkihi kõrgust, nii et katsete käigus mõõdetav rõhulangus langeks mingilgi moel kokku arvutatuga. Sellele tuginedes võib eeldada, et antud seadme tingimustes on oluline arvestada kolde geomeetriliste parameetritega (väikeste ja mittestandardsete mõõtmete pärast).

Tahke faasi jagunemise kahe eksponendiga võrrandisse tekib lagunemise lisakoeffitsient K . Erinevalt lagunemiskoeffitsiendist a , ei täheldatud, et koeffitsient K mõjutaks tugevalt jaotumise profiili. Seetõttu ei võrrelda töös selle koeffitsiendi mõju tahke faasi jaotumise profiilile koldes.

Piki kollet toimuva tahke osa kontsentratsiooni eksponentsiaalse jaotumise võrrandite kõrvutamisel selgub, et neis ei ole suurt vahet. Vaatamata sellele ei ole mõnedel juhtudel võimalik keevkihi kõrgust valida, nii et tulemus langeks kokku katse omadega. Või on viga liiga suur.

Võrrandite võrdlemiseks kõrvutati arvutustulemusi mõõtmistulemustega. Töös esitatud jaotusvõrrandite abil selgitati välja tahke faasi jaotumine piki kolde kõrgust. Selle tulemuse järgi arvutati välja rõhulangus koldes alates $h=0$ m kuni $h=4,370$ m ja alates $h=1,170$ m kuni $h=4,370$ m. Katsete käigus mõõdeti rõhulangust just neil lõikudel. Tabel rõhu mõõtmis- ja arvutustulemustega on allpool, samuti on välja toodud kõrvalekaldegraafikud.

Tabelis oli lihtsustatud rõhumõõtekohta nimetus, et taabel mahus lehe peale. $dP1$ – on rõhulang koldes alates $h=1,170$ m kuni $h=4,370$ m, ja $dP2$ – on $h=0$ m kuni $h=4,370$ m.

Tabel 5. Saatud õhu reziimis rõhulang läbi kasutatud võrrandid võrrelda mõõdetuga

		Mõõde- tud Pa	A.Ot s Pa	Gomez/Lekn er Pa	H.Yan g Pa	Mo/Wan g Pa	Pal- lares/Johnsson Pa	Keev- kihi kõrgus m
	dP 1	28	77	77	75	74	77	
1	dP 2	971	935	933	926	923	933	0.18
	dP 1	314	339	332	310	309	333	
2	dP 2	807	916	903	827	826	911	0.08
	dP 1	46	85	84	82	81	84	
3	dP 2	726	752	749	738	735	750	0.145
	dP 1	47	85	84	82	80	84	
4	dP 2	688	707	704	693	690	705	0.13
	dP 1	279	320	312	285	284	313	
5	dP 2	763	898	876	757	755	880	0.07
	dP 1	229	269	263	242	241	264	
6	dP 2	783	884	867	778	776	871	0.09
	dP 1	239	273	268	248	247	269	
7	dP 2	764	837	821	738	736	738	0.08
	dP 1	279	312	305	278	277	306	
8	dP 2	446	675	655	544	542	659	0.02
	dP 1	166	199	194	187	177	194	
9	dP 2	435	487	474	403	401	476	0.02
	dP 1	115	145	142	131	130	142	
10	dP 2	185	394	386	342	341	388	0.02

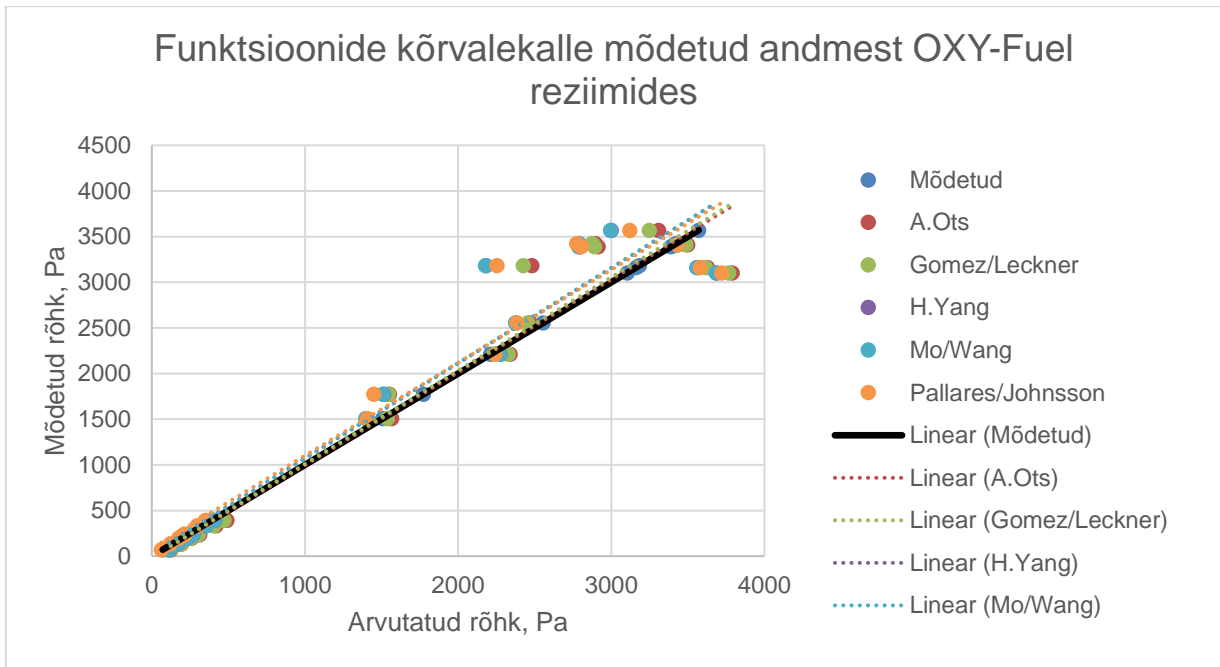
Tabel 6. Saatud hapniku režiimis rõhulang läbi kasutatud võrrandid võrrelda mõõdetuga

		Mõõde- tud Pa	A.Ot s Pa	Gomez/Lekn er Pa	H.Yang Pa	Mo/Wan g Pa	Pal- lares/Johnsson Pa	Keev- kihi kõrgus m
	dP1	204	264	256	231	229	182	
					2379.00			
1	dP2	2556	2471	2454	0	2376	2384	0.115
	dP1	197	258	252	231.000	229	175	
2	dP2	3424	2895	2874	2790	2787	2774	0.11
	dP1	232	291	284	259	257	207	
3	dP2	3164	3630	3616	3562	3559	3581	0.12
	dP1	242	304	296	269	268	216	
4	dP2	3390	2914	2891	2791	2788	2803	0.11
	dP1	215	270	264	243	242	192	
5	dP2	3410	3500	3486	3433	3429	3432	0.115
	dP1	333	420	406	356	354	297	
6	dP2	3185	2482	2425	2184	2180	2254	0.1
	dP1	393	490	473	411	409	351	
7	dP2	3571	3310	3248	3001	2997	3122	0.1
	dP1	135	195	189	171	170	120	
8	dP2	2213	2340	2328	2276	2273	2242	0.125
	dP1	71	125	122	113	111	63	
9	dP2	1773	1552	1545	1515	1511	1449	0.12
	dP1	237	314	304	268	266	212	
10	dP2	3104	3789	3768	3688	3685	3721	0.115
	dP1	241	308	299	264	263	215	
11	dP2	1509	1567	1538	1401	1398	1409	0.11

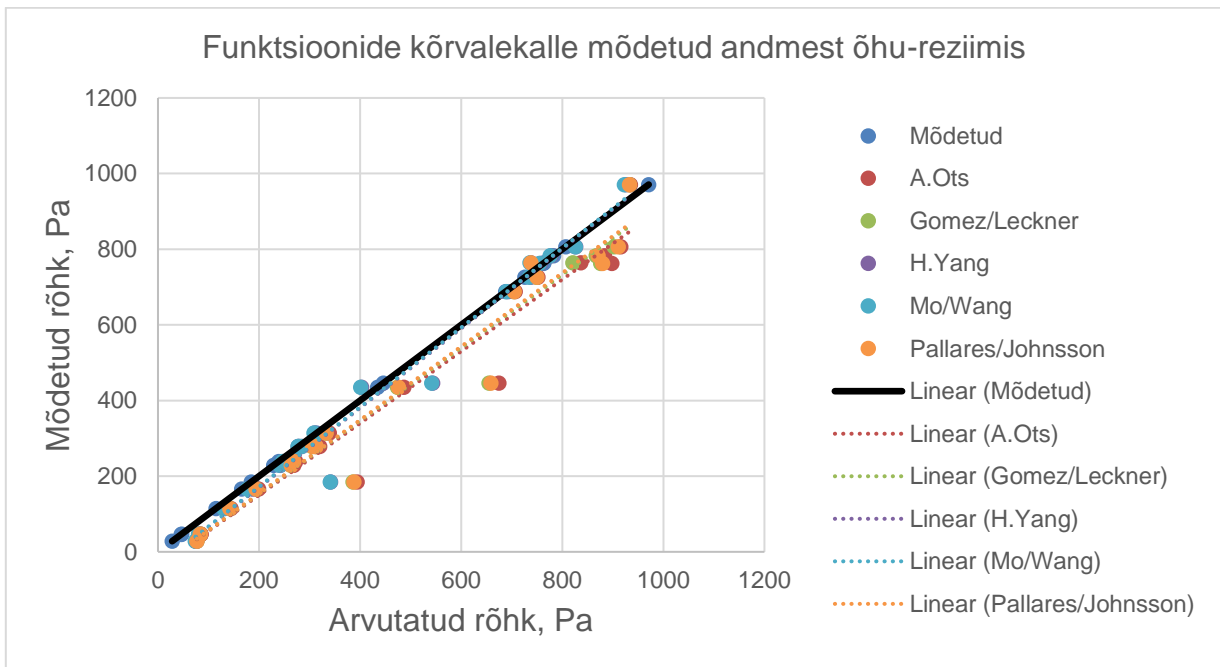
Tuleb märkida, et võrrandite tulemused erinevad sõltuvalt kasutatud režiimist. Ühe eksponendiga jagunemised annavad tavalise õhurežiimi kasutamisel palju täpsema tulemuse. Kahe eksponendiga jagunemine annab paremaid tulemusi hapnikurežiimis.

Arvutuste tulemustest on märgata, et hapnikurežiimis tahke faasi kontsentratsiooni jaotumise arvutusviga suureneb, võrreldes õhurežiimi arvutusega. See nõuab eraldi uurimist.

Graafik 1. Võrreldatud funktsiooni arvutusviga hapniku režiimis

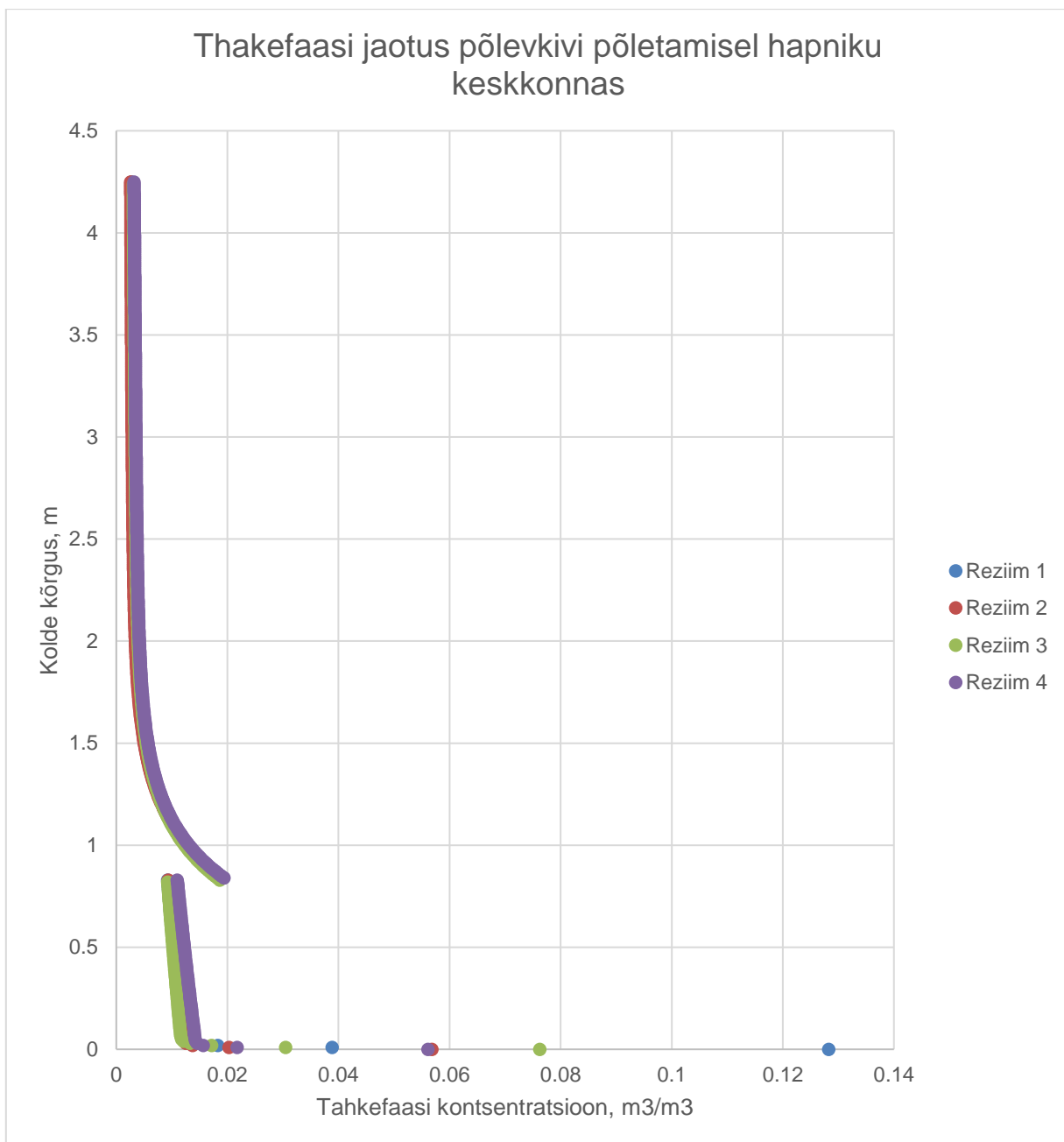


Graafik 2. Võrreldatud funktsiooni arvutusviga hapniku režiimis

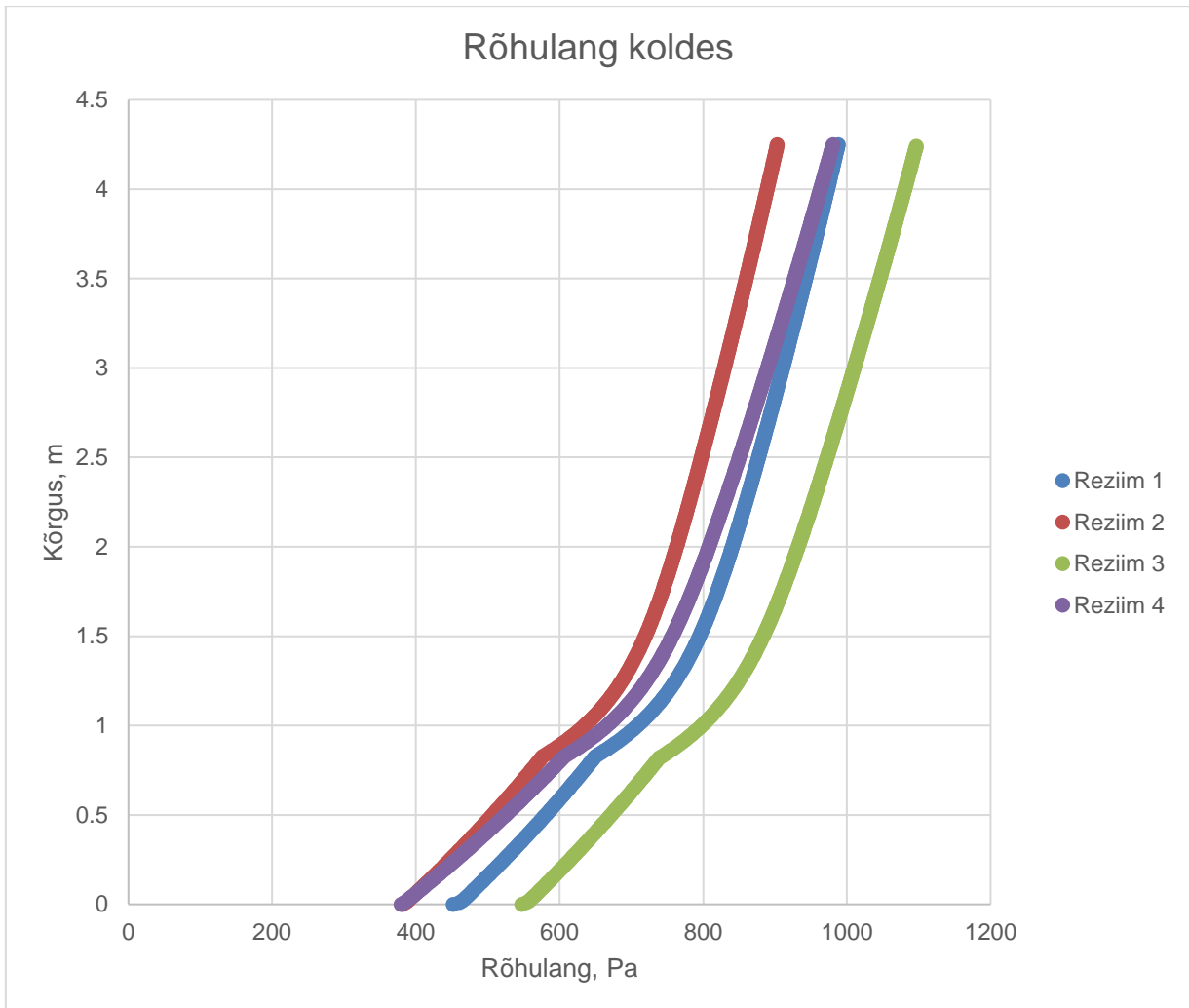


Lõpkus saame panna graafikule tahkefaasi tiheduse jaotus, mõnedes hapniku režiimides, rõhuilang, samades režiimides. Graafikul on hästi nähtud, et tahkefaasi kontsentratsioon ei muutub nii palju režiimi vahetamisel. Aga rõhuilang on rohkem tundlikum režiimi vahetusesl.

Graafik 3. Tahkefaasi jaotus põlevkivi põletamisel hapniku keskkonnas



Graafik 4. Rõhulang koldes



Lisaks saab öelda, et sekundaarõhu lisamine mõjutab jaotumise profiili. Graafikul, mis iseloomustab kontsentratsiooni sõltuvust kõrgusest, on näha, et kontsentratsioon tõuseb järsku seal, kus lisatakse sekundaarset õhku. Nii on, kuna voogu mõõdetakse selles punktis $\text{kg/m}^2/\text{s}$ -s ehk voo kiiruse suurenedes läbib ühes sekundis seda punkti rohkem materjali.

Kokkuvõte

Töö käigus tehti kindlaks meetod kolde tahke faasi jagunemise profiili määramiseks nii OXY-fuel- kui ka tavalises õhurežiimis ning seda TalTechis kasutatava seadme jaoks.

Näidati, et vaadeldud võrrandid annavad OXY-fuel-režiimi jaoks ebatäpsema tulemuse ning nad on jaotusprofiili määramise protsessis tundlikud keevkihi kõrguse muutumise suhtes. Selgus, et ühe eksponendiga tahke faasi jaotumise võrrand sobib paremini tavalise õhurežiimi jaoks. OXY-fuel-režiimis saab täpsema tulemuse kahe eksponendiga jaotusvõrrandit kasutades.

Kolde ülemise osa massivoo leidmiseks kõrvutati võrrandeid. Katsete käigus saadud andmete põhjal selgus, et teadmata kolde ülemise osa täpset massivoogu, pole võimalik määrata ei kontsentratsiooni koldest väljumisel ega tahke faasi jaotust, mis langeks kokku mõõdetud tulemustega. Oli üllatav, et töös osutus täpsemaks lihtsam võrrand.

Oluliseks parameetrik on lagunemiskoeffitsient, mis muudab tahke faasi jaotumist koldes kirjeldava funktsiooni kahanemise kiirust.

Selgus, et TalTechi stendi puhul ei saa kasutada neid koeffitsienti kirjeldavaid empiirilisi võrrandeid, mis ei arvesta kolde geomeetriliste parameetritega, kuna funktsiooni kahanemiskiirus muutub liiga väikeseks.

Tasakaalustatud võrrandite põhjal koostati Exceli mudel, mis arvestas vajalikes töörežiimides koldesse etteantava gaasisegu viskoossusega. Autor analüüsis kirjandusest leitud võrrandeid kriitilise tähtsusega parameetrite leidmiseks ning valis välja need, mille tulemused sobituvad paremini katsete käigus saadud tulemustega. Saadud Exceli mudelit võib kasutada stendi erinevate töörežiimide modelleerimiseks, andmete analüüsiks ja edasiste katsete protsessianalüüsiks vajalike parameetrite leidmiseks. Laiema spektriga ülesannete lahendamiseks saab seda mudelit edaspidi täiendada.

Summary

In the course of the work, a method for determining the solid phase distribution profile of furnace in both OXY-fuel and normal air mode was identified for the device used in Tal-Tech.

The observed equations have been shown to give an inaccurate result for the OXY-fuel mode and are sensitive to changes in fluidized bed height during the distribution profile determination process. It turned out that the solid-phase distribution equation with one exponent is better suited for normal air mode. In OXY-fuel mode, a more accurate result can be obtained using a distribution equation with two exponents.

The equations were compared to find the mass flow at the top of the furnace. Based on the experimental data, it was found that without knowing the exact mass flow of the upper part of the furnace, it is not possible to determine either the concentration at the exit of the furnace or the solid phase distribution that would coincide with the measured results. It was surprising that the simpler equation turned out to be more accurate in the work.

An important parameter is the decay coefficient, which changes the rate of decrease of the function describing the distribution of the solid phase in the furnace.

It turned out that empirical equations describing the coefficient, which do not take into account the geometrical parameters of the furnace, cannot be used for the TalTech stent, because of the function decay becomes too slow.

Based on the balanced equations, an Excel model was constructed, which took into account the viscosity of the gas mixture fed to the furnace in the required operating modes. The author analyzed the equations found in the literature to find critical parameters and selected those whose results fit better with the results obtained during the experiments. The obtained Excel model can be used to model the different operating modes of the stent, to analyze the data and to find the parameters necessary for the process analysis of further experiments. This model can be further developed to solve a wider range of tasks

Kasutatud kirjandus loetelu

- [1] K.-E. Wirth, "Fluid Mechanics of Circulating Fluidized Beds."
- [2] A. Gómez-Barea and B. Leckner, "Modeling of biomass gasification in fluidized bed," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 444–509, 2010. doi: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.
- [3] A. Ots, *Tahkekütuse keevkihipõletustehnika*. 2016.
- [4] I. Dincer, "Comprehensive Energy Systems," 2018.
- [5] И. К. Кикоин, *Таблицы физических величин*. 1976.
- [6] И. Ф. Голубев, *Вязкость газов и газовых смесей*. 1959.
- [7] Д. М. Хзмяян, *Теория горения и топочные устройства*. 1976.
- [8] D. Pallarès and F. Johnsson, "Macroscopic modelling of fluid dynamics in large-scale circulating fluidized beds," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 32, no. 5–6. pp. 539–569, Sep. 2006. doi: 10.1016/j.pecs.2006.02.002.
- [9] S. A. Ergun N D A A Orning, "Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds."
- [10] A. Haider, "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," 1989.
- [11] M. Stollhof, S. Penthor, K. Mayer, and H. Hofbauer, "Estimation of the solid circulation rate in circulating fluidized bed systems," *Powder Technology*, vol. 336, pp. 1–11, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.05.033.
- [12] A. Johansson, F. Johnsson, and B. Leckner, "Solids back-mixing in CFB boilers," *Chemical Engineering Science*, vol. 62, no. 1–2, pp. 561–573, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.ces.2006.09.021.
- [13] A. Gungor, "Predicting axial pressure profile of a CFB," *Chemical Engineering Journal*, vol. 140, no. 1–3, pp. 448–456, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.cej.2007.11.023.
- [14] C. Yang *et al.*, "Oxy-CFB combustion technology for use in power-generation applications," *Fuel*, vol. 267, May 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117206.
- [15] Y. Alghamdi, Z. Peng, K. Shah, B. Moghtaderi, and E. Doroodchi, "Predicting the solid circulation rate in chemical looping combustion systems using pressure drop measurements," *Powder Technology*, vol. 286, pp. 572–581, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.004.
- [16] H. Yang, G. Yue, X. Xiao, J. Lu, and Q. Liu, "1D modeling on the material balance in CFB boiler," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 20, pp. 5603–5611, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.ces.2005.04.081.
- [17] Q. Miao\, J. Zhu\, S. Barghl\, C. Wani, L. Yin, and C. Z. Wu, "AXIAL AND RADIAL SOLIDS HOLDUP MODELING OF CIRCULATING FLUIDIZED BED RISERS."