



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia instituut

DEAERAATORI PIHUSTIPEA TOOTEARENDEUS

DEAERATOR SPRAY NOZZLE PRODUCT DEVELOPMENT

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Linda Sakala

Üliõpilaskood: 192115MASM

Juhendaja: Andrei Dedov, vanemlektor
Sander Kahk, protsessiinsener

(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.

“25” 05. 2021

Autor: Linda Sakala

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“25 ” 05. 2021

Juhendaja: Andrei Dedov

/ allkirjastatud digitaalselt /

“25 ” 05. 2021

Juhendaja: Sander Kahk

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“25 ” 05 .2021

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Linda Sakala (sünnikuupäev:11.06.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Deaeraatori pihustipea tootearendus,

mille juhendajad on Anderi Dedov ja Sander Kahk

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

TalTech Energiatehnoloogia Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Linda Sakala, 192115MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): Andrei Dedov, vanemlektor, 6203913

Sander Kahk, protsessiinsener, AS ESTANC

Konsultant:(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) DEAERAATORI PIHUSTIPEA TOOTEARENENDUS

(inglise keeles) Deaerator Spray Nozzle Product Development

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade deaeraatoritest ja nende pihustite tööpõhimõtetest
2. Uurida ja katsetada ettevõtte ESTANC'i poolt välja pakutud deaeraatori pihustipeade tööd
3. Katsete põhjal hinnata pihustipeade tööd, leida tööparameetrid ja võrrelda ettevõttesse sisseosteva pihustiga

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilise osa koostamine	12.12.2020
2.	Katsete läbiviimine	29.03.2021
3.	Katsete analüüsimine	05.04.2021

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 25.05.2021 a

Üliõpilane: Linda Sakala "25".05.2021.a
/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Andrei Dedov "25".05.2021.a
/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Sander Kahk "25".05.2021.a
/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: Eduard Latõšov ".....".....2021.a
/ allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. VEE DEAEREERMINE.....	10
2. VEE DEAEREERIMISE TEHNOLOOGIAD	12
2.1 Membraan degaseerimine	12
2.2 Termiline degaseerimine	13
2.2.1 Kandiku tüüpi deaeraator	14
2.2.2 Pihusti tüüpi deaeraator	15
2.2.3 Hapniku eraldus.....	17
2.3 Vaakumdegaseerimine	18
2.4 Keemiline degaseerimine	19
3. TERMILISE DEAERAATORI PIHUSTIPEA DISAINID	21
3.1 Vedrupeaga pihustipea	21
3.2 Ketta tüüpi pihustipea	22
4. ESTANCI PIHUSTIPEADE DISAIN	24
4.1 Vedrupeaga pihustipea	24
4.2 Piluavadega pihustipea	25
4.3 Olemasolev pihusti.....	26
5. AS ESTANC'I PIHUSTIPEADE KATSED.....	28
5.1 Katsestend.....	28
5.2 Katsete läbiviimine.....	29
5.3 Katsete tulemused	31
5.3.1 Vedrupeaga pihustipea	31
5.3.2 Piluavadega pihustipea	33
5.3.3 Olemasolev pihusti	34
5.4 Katsete järelused	36
5.4.1 Vedrupeaga pihustipea	36
5.4.2 Piluavadega pihustipea	36
5.4.3 Olemasolev pihustipea	36
5.4.4 Katsestend	36
5.5 ESTANCI pihustipea võrdlus olemasoleva pihustipeaga	37
5.5.1 Vedrupeaga pihustipea	37
5.5.2 Piluavadega pihustipea	38
6. ESTANTCI PIHUSTIPEA ARVUTUSED.....	40

6.1	Pihustipeade arvutusmetoodika	40
6.2	Pihustipeade arvutused.....	42
6.2.1	Vedrupeaga pihusti arvutused.....	42
6.2.2	Piluavadega pihusti arvutused.....	44
6.2.3	Olemaoleva pihusti arvutused	44
6.3	Arvutustulemuste analüüs.....	46
	KOKKUVÕTE	48
	SUMMARY.....	50
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	53
	LISAD	55
Lisa 1	Vedrupeaga pihusti katsetulemused.....	55
Lisa 2	Piluavadega pihusti katsetulemused.....	58
Lisa 3	Olemaoleva pihusti katsetulemused	62

EESSÕNA

Lõputöö teema sõnastati kaasjuhendaja ESTANC AS protsessiinseneri Sander Kahk poolt. Töö ülesandeks on termilise deaeraatori pihusti tootearendus. Põhilised algandmed koguti ESTANC AS poolt. Ettevõtte andis deaeraatori pihusti mõõtmed. Lisaks ettevõttes sooritatud katsete põhjal kogutud andmed. Katsetel osales lisaks lõputöö koostajale kaasjuhendaja, ettevõtte arenduse juht, Tõnis Tuuder, konstruktor, Aleksey Petrov, ja tehnikud, Vladimir Kutserov ja Vyacheslav Kovalenko.

Töö juhendajaks on Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi vanemlektor Andrei Dedov ja kaasjuhendajaks ESTANC AS protsessi insener Sander Kahk. Autor tänab ESTANC AS ning oma juhendajaid suurepärase juhendamise, teemapüstituse, ideede ja ettepanekute eest.

Märksõnad: Deaeraator, toiteveemahuti, pihusti, pihustipea, magistritöö.

SISSEJUHATUS

Antud magistritöö on koostatud teemal „Deaeraatori pihustipea tootearendus“. Magistritöö eesmärgiks on termilise deaeraatori pihustipea tooterendus, katsete teel saadud tulemuste põhjal tööparameetrite leidmine ja pihustite töö hindamine.

Töö teema on välja pakkunud ettevõtte ESTANC AS. Varasemalt on ettevõttega koostöös tehtud magistritöö „Termilise deaeraatori arvutuse algoritmi väljatöötamine“, milles vaadeldakse ka deaeraatori pihusti tööpõhimõtet aga kokkuvõttes soovitatakse jätkata deaeraatori veepihusti arendusega.

Ettevõtte hetkel ostab deaeraatori pihusteid sisse, kuid on avaldanud soovi ise hakata pihusteid tootma ning arendama. Selleks on arenduses kahte tüüpi deaeraatori pihustit: vedrupeaga ja piluavadega. Mõlemad pihustuspead on füüsilisel kujul olemas ja välja arendatud ESTANC'i poolt. Ettevõtte on seadnud autorile eesmärgiks katsete teel hinnata pihustipeade tööd, võrrelda neid olemasoleva pihustiga ning leida mõõtetulemuste analüüsi teel pihustipea tööparameetrid.

Gaasiliste ainete olemasolu vees võib kahjustada seadmete metalle ja tekitada korrosiooni. Vett on võimalik deaereerida neljal erineval viisil: membraandegaseerimine, termiline degaseerimine, vaakumdegaseerimine, keemiline degaseerimine. Vee termiline degaseerimine toimub vee peaaegu keemiseni viimiseni. Kuum aru suunatakse läbi pihustatud vee, millega saavutatakse soojusülekanne ning selle tõttu toimub veest gaaside eemaldumine. Termilises deaeraatorites kasutatakse kahte tüüpi pihusteid: vedrupeaga ja ketta tüüpi.

Esimeses peatükis selgitab autor, mis on vee deaereerimine ja miks on vajalik seda kasutada tööstusprotsessides. Teises peatükis toob autor välja neli vee deaereerimise tehnoloogiat ja nende tööpõhimõtted. Põhirõhk on termilise deaeraatori töös ja selle hapniku eraldusel, kuna see on tehnoloogia, mida ESTANC'is toodetakse.

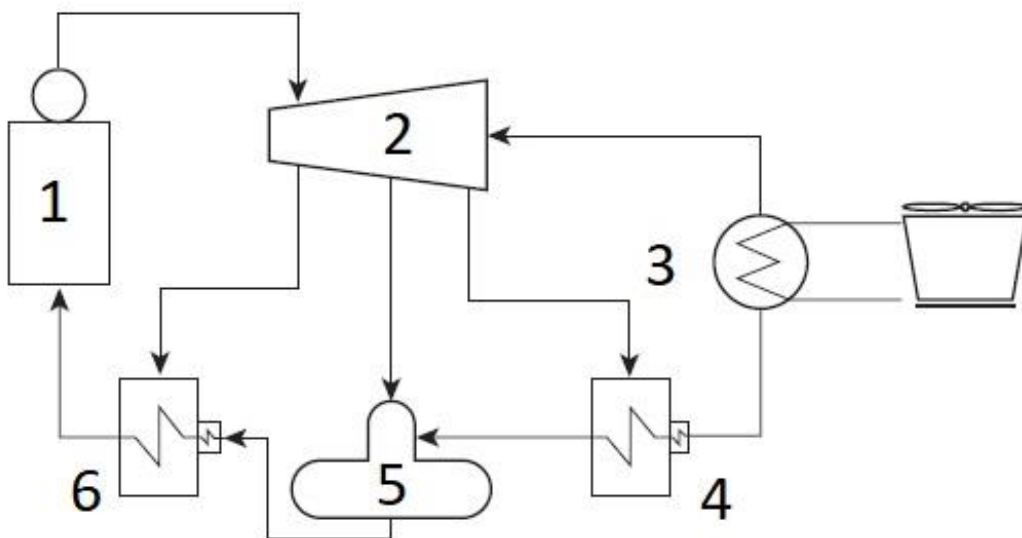
Kolmandas peatükis selgitab autor, milliseid termilise deaeraatori pihusteid hetkel kasutatakse ja selgitab nende tööpõhimõtteid. Neljandas peatükis tutvustab autor ettevõtte poolt arendatud pihustipäid ja nende tööpõhimõtteid, mille andmed pärinevad ettevõttest.

Viiendas peatükis selgitab autor katsete läbiviimise meetodikat. Lisaks annab ülevaate katsete tulemustest ja teostab nende analüüsi. Kuuendas peatükis selgitab autor arvutusmeetodikat ja katsetulemuste põhjal viib läbi arvutused ning nende analüüsi.

1. VEE DEAEREERIMINE

Deaeraator on kaasaegsete ja suurte soojuselektrijaamade jaoks hädavajalik. Deaeraatori esmane ülesanne on veest õhu eemaldamine koos muude gaasidega. Süsteemi toitevee soojusvaheti kontseptsioon tuleneb auruelektrijaamade töötava Rankine'i tsükli soojustõhususe suurendamisest, säästes see läbi kütust ja vähendades gaaside heitkogustest tulenevat õhusaastet. [1]

Joonisel 1.1 on kujutatud elektrijaama lihtsustatud skeem, mille esimene pool koosneb katlast (aurugeneraatorist) ja selle abiseadmetest. Teine pool koosneb auruturbiinist, generaatorist, kondensaatorist ja toitevee soojenditest.



Joonis 1.1 Elektriijaama lihtsustatud skeem: katel (1), turbiin (2) , kondensaator (3), soojusvaheti (4 ja 6), deaeraator (5) [2]

Joonisel 1.1 on näidatud auru ja vee skeemi jaamas. Toitevesi juhitakse katla trumlisse ökonomaiseris kaudu. Vesi kuumutatakse ja muundatakse kuivaks küllastunud auruks. See kuiv aur kuumutatakse ülekuumendis edasi ja juhitakse seejärel kõrgrõhu turbiini osasse. Turbiinist väljuv aur naaseb katlasse, kus seda uuesti soojendatakse. Kuumutatud aur juhitakse keskmise rõhuga turbiini osasse ning seejärel juhitakse madala rõhuga turbiini osasse. Viimase abil ammendatud aur läheb kondensaatorisse. Kondensaatoris, kus kondenseeritakse aur, kandes selle aurustumissoojus jahutusveele. Kondensaatori kondensaat pumbatakse kondensaatorist deaeraatorisse veetemperatuuri tõstmiseks ja lahustunud gaaside nagu O_2 ja CO eemaldamiseks, moodustades katlale sobiva toitevee. Katla etteandepump juhib deaeraatorist toitevett ja pumpab kõrgsurvelise soojusvaheti kaudu. [3]

Kuigi deaeraatorit kasutatakse peamiselt gaaside eemaldamiseks kondensaadiveest, toimib see ka küttekehana, mis paikneb madala rõhu ja kõrgrõhu kütteseadmete vahel toitevee tsüklis ja toitevee mahutina. See tagab ka nõutavad parameetrid toitevee pumbale. [1]

Tõestatud on, et saasteainete, näiteks lahustunud hapniku, süsinikdioksiidi ja muude mittekondenseeruvate gaaside, olemasolu katlasse juhitud toitevees on peamised korrosiooni põhjustajad seadmetes ja torudes. Näiteks on hapnik peamine element, mis põhjustab korrosiooni. Korrosioonile aitab kaasa madal pH töövedelikus, mis tähendab vee happelist käitumist, mis tuleneb saasteainete nagu süsinikdioksiid olemasolust. Süsinikdioksiid lahustub vees ja tekitab söövitavat süsinikhapet, mis on katla metallidele kahjulik, põhjustades happe aktiveerimist. Seega on süsteemi mitte kahjustamiseks äärmiselt oluline eemaldada katlaga seotud toiteveest kõik lahustunud gaasid. [1]

Deaeraatorid kasutavad peamiselt kaht tööpõhimõtte teooriat. Esimene teooria: „Gaaside lahustuvus lahuses väheneb, kui lahuse temperatuur tõuseb ja läheneb küllastustemperatuurile.” Teises teooria on vastav Henry seadusele: „Gaasi lahustuvus lahuses väheneb, kui gaasi osarõhk lahuse kohal väheneb.” Tegelikult on vedeliku küllastumistemperatuuri saavutamisel gaasi lahustuvus selles null, kuid selle saab saavutada ainult siis, kui vedelik allutatakse turbulentsile, segades vedelikku täieliku õhustumise tagamiseks. Mõlemat teooriat kasutatakse deaeraatori töös lahustunud gaaside eemaldamiseks katla toiteveest. [4]

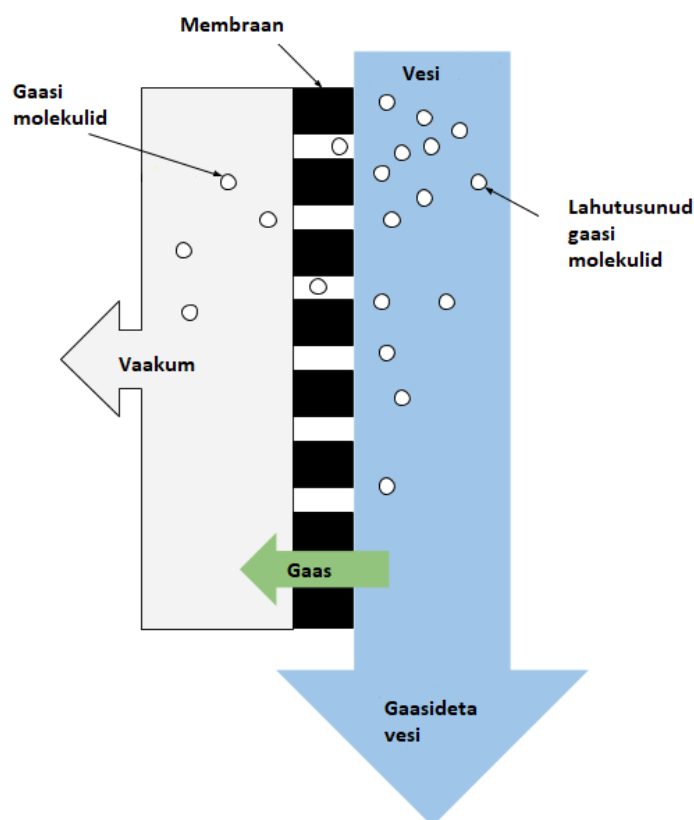
2. VEE DEAEREERIMISE TEHNOLOOGIAD

Kuna lisaks hapnikule võib leida veel teisi gaasilisi elemente siis hapniku eraldamist veest kutsutakse degaseerimiseks. Selleks on peamiselt neli põhilist degaseerimis meetodit:

- Membraandegaseerimine;
- Termiline degaseerimine;
- Vaakumdegaseerimine;
- Keemiline degaseerimine.

2.1 Membraan degaseerimine

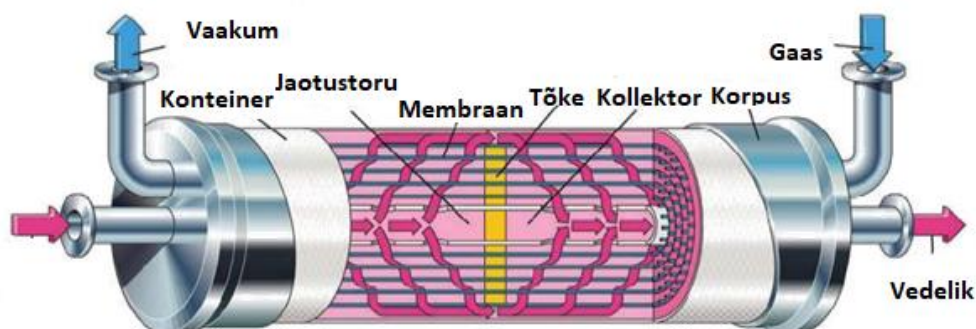
Membraangaasi eemaldamine võimaldab lahustunud süsinikdioksiidi (CO_2) eemaldada veest väärtuseni $<2 \text{ mg/l(ppm)}$. Vee eraldamine membraani gaasimolekulidest toimub difusiooni teel. Membraani degaseerimise erilised eelised on ühelt poolt väike ruumivajadus võrreldes teiste tehnoloogiatega ning lisaks on neil madal energiavajadus (madal veetemperatuur ja madal rõhk <5 baar). Pealegi saab vajadust keemiatoodete järele oluliselt vähendada ja on isegi võimalik ilma järel degaseerimiseta. [5]



Joonis 2.1 Membraan degaseerimine [6]

Vastava osalise rõhugradiendi loomine kui liikuma panev jõud (õhu/gaasiga eemaldamine ja/või vaakumi tekitamine) põhjustab gaaside difusiooni vedelikust ja gaasi kandvatesse membraanikiududesse mikropoorse, hüdrofoobse (vett läbilaskmatu) õõnsuse kaudu - kiudmembraanimoodulid ja transportida koos eemaldusgaasiga. Antud süsteem on kujutatud joonisel 2.1. [5]

Joonisel 2.2. on kujutatud membraan degaseerimis seade, mida iseloomustavad üksikud õõneskiud-membraanid on ühendatud moodulitena (tuntud kui membraankontaktorid). Membraani kasutatakse gaasi ja vedeliku otseseks kokkupuuteks ilma segamiseta. Esiialgu voolab vedelik kontaktori sisselaskeotsikute kaudu jaotustorusse ja suunatakse mööda õõneskiude läbipaindetõkke abil, nii et gaasid võivad tungida õõneskiududesse. Seejärel väljub degaseeritud vedelik kontaktorist kollektori. Vastuvoolus juhitakse eemaldusgaas läbi õõnsate kiudude kahe sisemise eraldi düüsi kaudu. [5]



Joonis 2.2 Membraan degaseerimise seade [5]

2.2 Termiline degaseerimine

Vee termiline deaereerimine on veest gaaside eemaldamiseks enam kasutatavam meetod. Vee karboniseeriminegi, põhineb Henry-Daltoni seadusel. Eemaldatava gaasi osarõhu veepinna kohal vähendatakse auru läbipuhumisega veest (barboriseerimine), sellega kaasneb vee kuumutamine kuni keemiseni. Et gaasisegu komponentide osarõhkude summa veepinna kohal $\sum P_g$ võrdub üldrõhu ($P_{\bar{u}}$) ja veeauru osarõhu (P_a) vahega, siis vee summa keemise korral, kui $P_a = P_{\bar{u}}$, $P_g = 0$ ning järelkult ka lahustunud gaaside tasakaalukontsentratsioon vees $C_g = 0$. [7]

Gaaside eemaldumine on veest siiski võrdlemisi aeglane, mistõttu täielikku degaseerimist ei saavutata. Protsessis on oluline, et eralduspind vee ja auru-gaasifaasi vahel oleks võimalikult suur ning voolamisrežiim turbulentne. Samuti mõjub ka temperatuuri tõstmine: selle tulemusel pindpinevus väheneb ja gaaside eemaldamiseks peab olema tagatud hea ventilatsioon. [7]

Vees lahustunud gaasidest on vee termilisel deaereerimisel suhteliselt kõige kergemini eemaldatav hapnik. Tunduvalt väiksem on CO puhul, eriti kui vee auru sisaldab CO₂. Kõige raskemini eraldub veest NH₃, mille eemaldamismäär ei ületa 8 - 10%. [7]

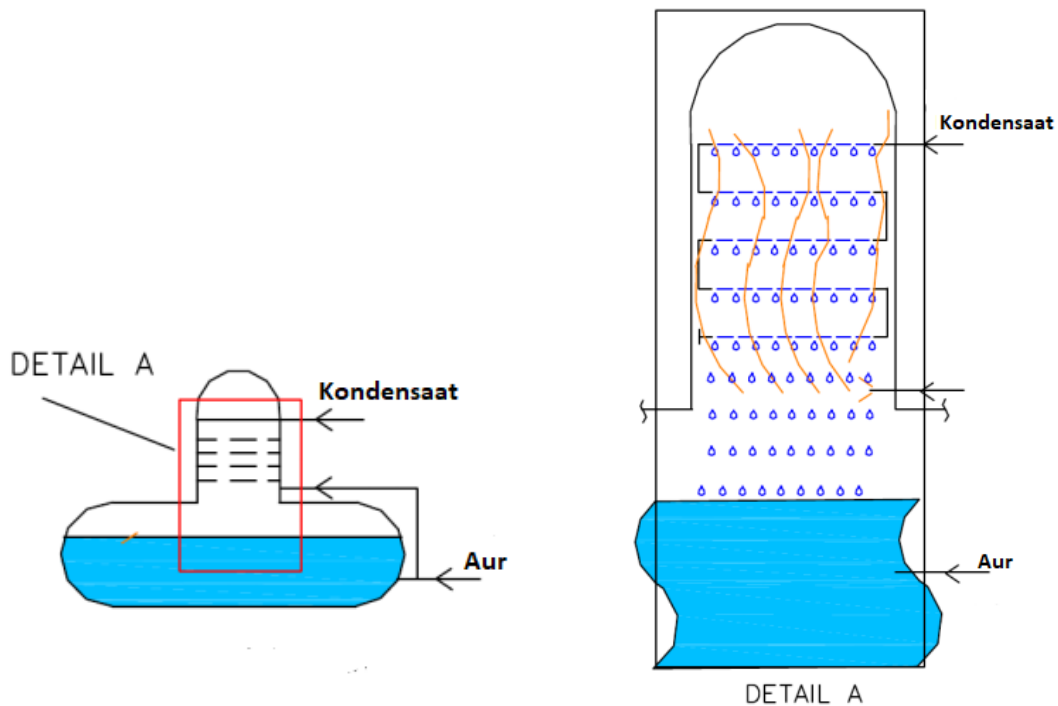
Lisaks gaaside eemaldamisele on termilisel deaeraatoril veel kaks eesmärki: soojendavad vett ja toimida ka katla toiteveemahutitena. Atmosfäärirõhul töötav deaeraator koosneb kolonnist ja toiteveemahutist. Deaereeritav vesi lastakse kolonni ülaossa, kust ta, olenevalt kolonni konstruktsioonist ning töörežiimist, jugadena, kelmena või tilkadena alla voolab toiteveemahutisse. Kolonni alumisesse ossa juhitakse kuumutusaur, mis liigub veele vastu. Olenevalt konstruktsioonist juhitakse auru ka toiteveemahuti alumisse ossa, küllastunud temperatuuri tõstmiseks. Eraldunud gaasid väljuvad õhutusventilaatori ülemisest kambrist läbi selle ventilatsiooniava. Toiteveemahutis on soovitatav barboteerida 20 - 30% deaeraatorisse antavast aurust, vesi peab mahutis viibima vähemalt 20 - 30 minutit. Gaaside uuesti imendumise tagamiseks hoitakse toiteveepaagis kohal paks aurukiht. Väga tõhus deaeraator suudab kõrvaldada lahustunud hapniku kontsentratsiooni, mis on võrdne või isegi > 0,005 cm³/l (7 ppb). [4] [7] [8]

Termilise deaeraatoreid liigitatakse kaheks, mis iseloomustavad kolonnis veejoa tilkadeks moodustamise konstruktsiooni, milleks on:

- Kandiku tüüpi: kasutatakse väga suuretes elektrijaamades;
- Pihusti tüüpi: kasutatakse teistes tööstustes.

2.2.1 Kandiku tüüpi deaeraator

Kandiku tüüpi deaeraator koosneb kandikutest, millel on põhjas väiksed augud. Kui vesi on juhitakse läbi kandikute siis osa tuleb läbi aukude ja seetõttu muutub vesi tilkadeks. See tagab suuremat kontaktpinda auruga, mis on kõrge temperatuuriga ning tänu sellel vabanevad kondenseerumata gaasid, mis juhitakse atmosfääri. Enamust kondenseerunud aurust kondenseerub veemahutisse. Kandiku tüüpi deaeraator on kujutatud joonisel 2.3, millel on eraldi välja toodu detail B, mis iseloomustab kolonnis olevat konstruktsiooni. [1]

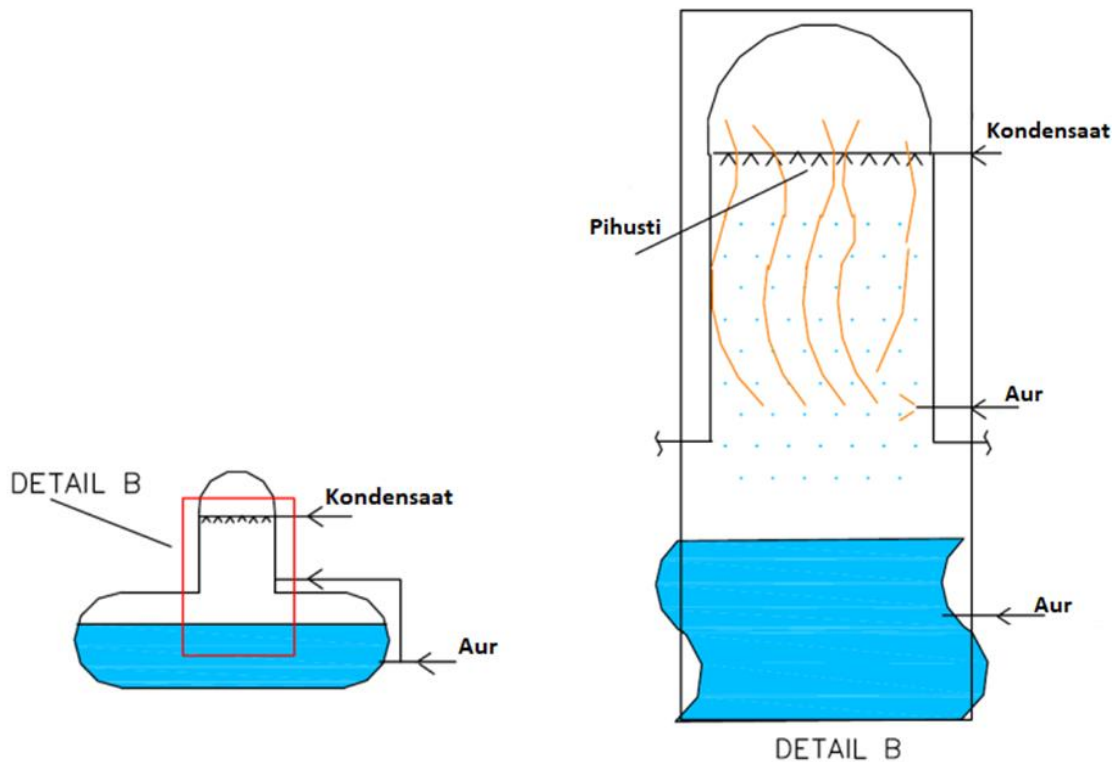


Joonis 2.3 Kandiku tüüpi deaeraator [1]

2.2.2 Pihusti tüüpi deaeraator

Inimestele jääb tihti segaseks termin "pihusti", sest kandiktüüpi ja vaakum deaeraatoritel kasutavad ka veepihusteid. Pihusti tüüpi deaeraatoritel ei ole kandikuid ja vaakumtüüpi deaeraatoris kasutatakse enamasti rootor pihusteid, mis on erinevad pihusti tüüpi deaeraatorite pihustite tööpõhimõttest. [8]

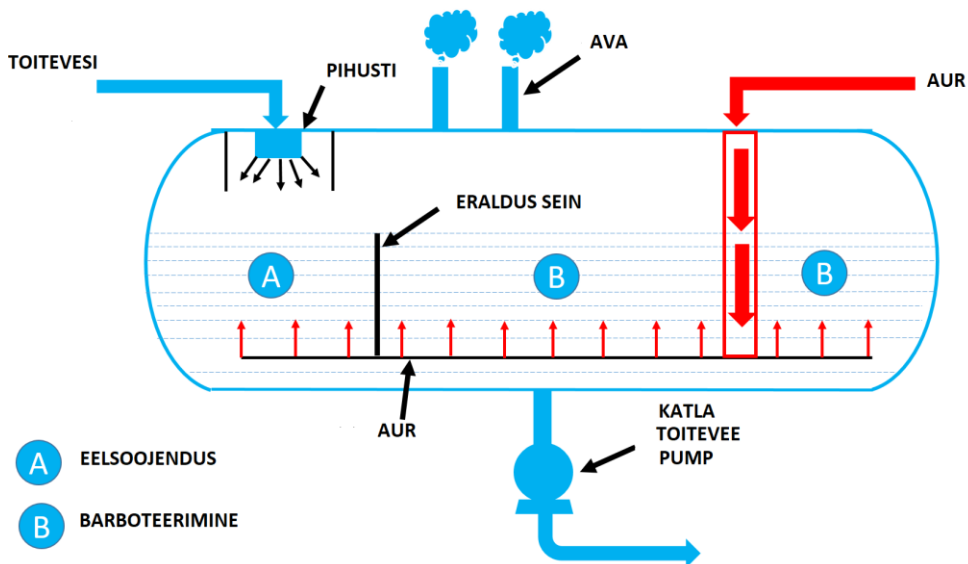
Deaeraatori sees hoitakse auru atmosfääri rõhul. Toitevesi pritsitakse deaeraatori ülemisse ossa, mida nimetatakse õhutuspiirkonnaks. Kondensaat on paigutatud nii, et see läbib spetsiaalset tüüpi pihustussüsteemi. Seejärel tuleb see välja õhukese kujuga või vesi purustatakse uduks või veetilkadeks. Pihusti tüüpi deaeraator on kujutatud joonisel 2.4. See süsteem tagab kõrge pinna ja massi suhte ning seda saab auruga kokkupuutel kiiresti segada ja kuumutada, seega kiirem soojusülekanne aurust vette. Selle tulemusena on deaeraatori sees olev vedelik küllastumata. Oluline on märkida, et veetemperatuuri tõstmine ja gaaside vabastamine peab õhust eemaldamiseks toimuma väga lühikese aja jooksul. See lahustunud gaasi eraldumine viiakse seejärel koos auruga, mis juhatakse atmosfääri. [1]



Joonis 2.4 Mitme pihustiga deaeraator [4]

Pihusti tüüpi deaeraator kasutab pihusteid kondensaadivee sisse laskmiseks kollektorisse. Sarnast pihustamis efekti saadakse ka siis kui kondensaadi veejuga juhitakse vastu tõkkeplaati. Mitme sellise elemendiga saadakse peened veeosakesed. Need annavad suurema kontaktpinna auruga, mis annab kiire soojenemise ja kondenseeruvate gaaside eraldumise. Seda tüüpi pihusti deaeraatori efektiivsuse tõstmiseks lisatakse pärast pihustustsooni pesur (inglise keeles scrubber) ja alles see järel juhitakse vesi kollektorisse. [1] [8]

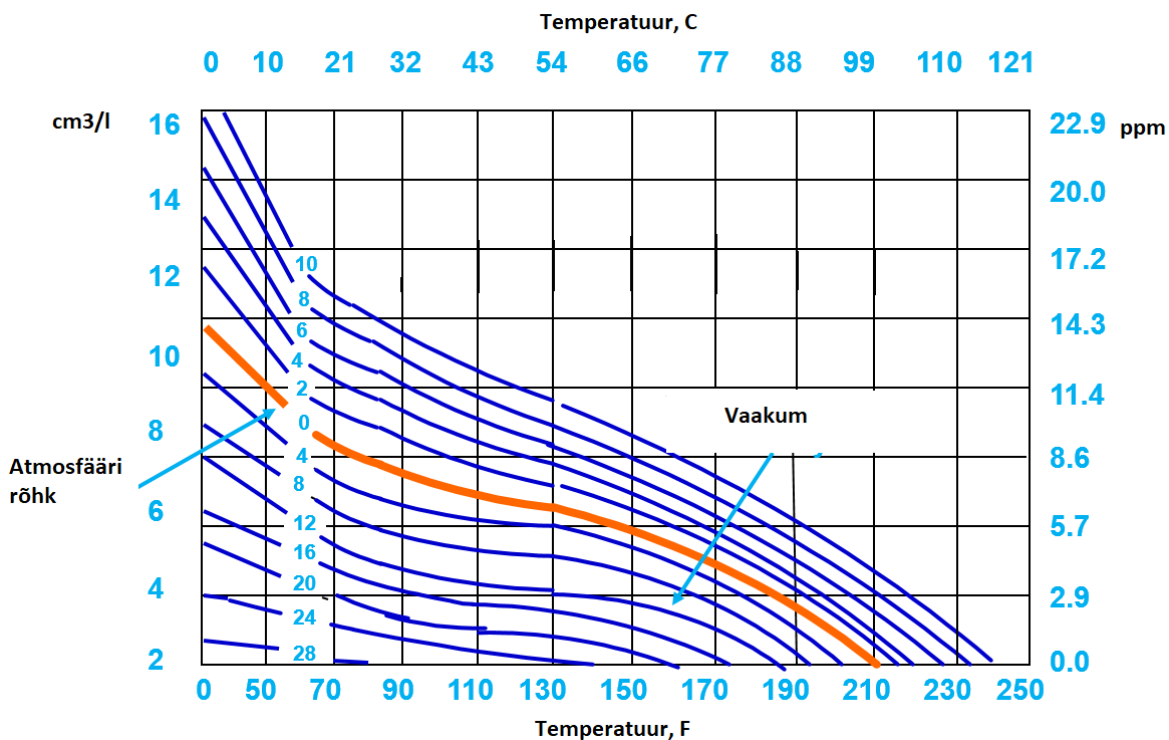
Teist tüüpi pihusti deaeraatoritel ei ole kasutusel kolonni. Vesi juhitakse löögile, näiteks joa vastu tõkkeplaati, et see väljub nagu oleks pihustatud. Teist tüüpi süsteemi on kujutatud joonisel 2.5. Need annavad aga rohkem pinda, mis puutub auruga kokku, et kiiresti kuumeneda ja vabaneda mittekondenseeruva gaasina. [4]



Joonis 2.5 Ühe pihustiga deaeratori skeem [9]

2.2.3 Hapniku eraldus

Veest eraldub hapnik vee keemisel. Vesi kuumutatakse auruga mõne kraadi ulatuses selle küllastustemperatuurist vastavalt deaeratori töö rõhule. Kui deaerator töötab atmosfääri rõhul siis keemistemperatuur on 100°C ja vaakum deaeratorite puhul on keemistemperatuur madalam, seda kirjeldab joonis 2.6.



Joonis 2.6 Hapniku osakaal vees vastavalt rõhule ja temperatuurile [9]

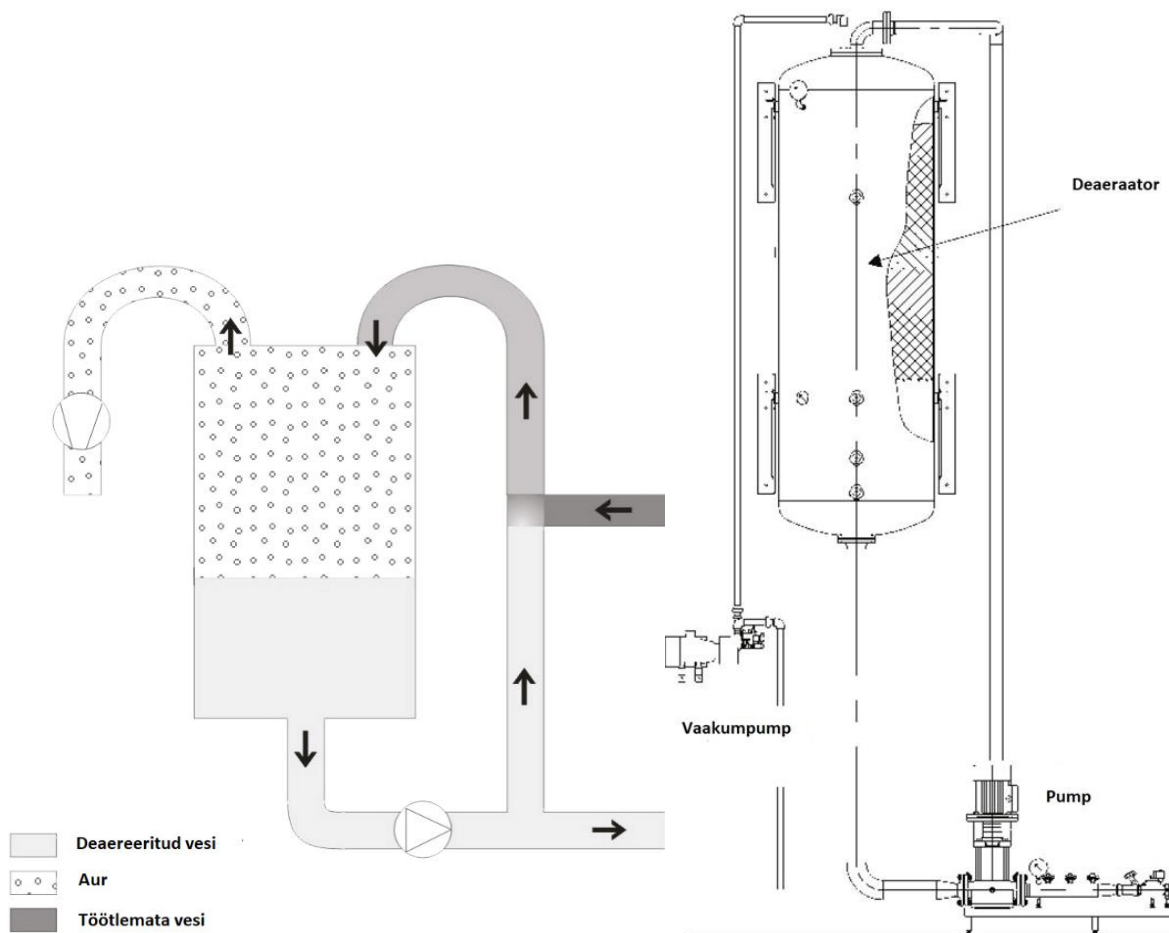
Deaeraator lisab töötlemata vee läbi düüsi aukude kõrgsurve- ja temperatuurikeskkonnas, et eemaldada lahustunud O₂ ja CO₂ (Henry seadus). Deaereerimise efektiivsust mõjutab veepiiskade pihustamine, sest mida suurem on pind, seda suurem on õhu ja atmosfääri vastastikmõju. [10]

Pihustatud vesi düüsi august (esimesed tilgad), mis suundub düüsi ümbritsevale seinale, pritsib vastu seinu paljudeks väikesteks tilkadeks (teisteks tilkadeks). Pärast pritsimist hajutatakse teised tilgad juhuslikult seinu lähedale (ruumiline massijaotus). Vesi, mis ei muutunud veetilksadeks voolab alla mööda seinu. Seinast kukuvad tilgad mitte nagu veejuga, vaid kirme. [10]

2017. aastal tehtud magistri lõputöö „A parametric study of deaerator spray nozzle for an improvement of deaeration efficiency“ uuris mikroskoopilisi pihustusomadusi, esimese ja teise tilga läbimõõtu, võrreldi mitmesuguste düüsiavude läbimõõtudega nurkadega ning düüside ja seinu kaugustega. Tulemusena suurenes esimese tilga läbimõõt koos düüsi ava läbimõõdu suurenemisega, kuid seda ei mõjutanud düüsi ava nurk ega düüsi seinu kaugus. Ükski parameetritest ei mõjutanud teist tilga läbimõõtu. Deaeraatori efektiivsust saab tõsta düüsiavude läbimõõdu vähendamise, voolukiiruse suurendamisega, et tekkiks rohkem nn teisi tilkasid. [10]

2.3 Vaakumdegaseerimine

Hapnik eraldatakse vaakumpumba abil. Vesi soojendatakse soojusvaheti abil umbes 60 – 70 kraadini, sest vaakumis keemistemperatuur on umbes 60 - 70 kraadi, mida on iseloomustatud joonisel 2.6. Selle abil eralduvad gaasid veest. Seade vajab kõrget ruumi aga ei vaja tööstuslikku auru. Lahustunud gaasid - hapnik ja vaba süsinikdioksiid eralduvad auru ja aurutatakse läbi vaakumpumba. Vaakumdeaeraatorite lahustatud hapniku jääksisaldus ei ületa 0,1 mg/l, kuigi vaakumdeaeraatoreid katlamajades tavaliselt ei kasutata, sest vett kuumutatakse kõrgematele temperatuuridele. [11] [8]



Joonis 2.7 Vaakum degaseerimine (vasakul) ja vaakumdeaeraator (paremal) [12]

Joonisel 2.7 on kujutatud deaereerimist vaakumdeaeraatoris, mis võib toimuda ka ülekuumendatud vee režiimil, kus deaeraatorisse antava vee temperatuur on kõrgem vee keemistemperatuurist hakkab keema ilma täiendava auru andmiseta. Hapnikusisaldus deaereeritud vees, ei tohi vaakumdeaeraatorite puhul ületada 50 ug/kg, võrreldes atmosfäärirõhul töötavate deaeraatorite puhul aga 30 ug/kg. Vaba CO₂ ei tohi deaereeritud vees praktiliselt olla. [7]

2.4 Keemiline degaseerimine

Keemiline degaseerimine või järel degaseerimine toimub kemikaalide lisamise teel. Need kemikaalid lahustatakse lahendusvees ja sobivad vees sisalduva hapniku eemaldamiseks või muundamiseks. Reaktsiooniajad varieeruvad erinevate kemikaalide vahel, mida kasutatakse. Üldiselt, mida kõrgem on veetemperatuur, seda lühem on reaktsiooniaeg. Enamike kemikaalide kasutamisel pole peaaegu mingeid kõrvaltoimeid, välja arvatud kahjutute soolade minimaalne suurenemine. Keskmise suurusega ja

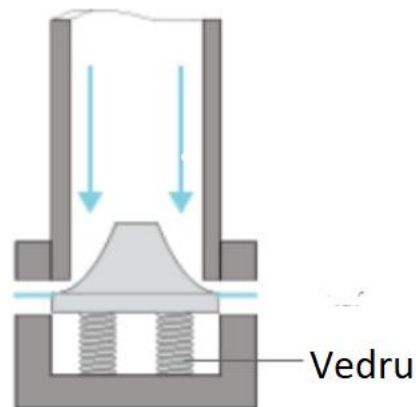
suurtes süsteemides kasutatakse keemilist degaseerimist ainult siis, kui on vaja saavutada hapniku jääksisaldus <10 ug/l. [13]

3. TERMILISE DEAERAATORI PIHUSTIPEA DISAINID

Termilise pihustipea eesmärk on vett pihustada deaeraatorisse. Termilise pihustitüüpi deaeraatori pihustipeades ei kasutata õhku, mis üldistelt pihustiteks kasutatakse, et vesi jugadeks ja veetilkadeks muuta. Laialdaselt on levinud vedrupeaga pihustid erinevate disainidega.

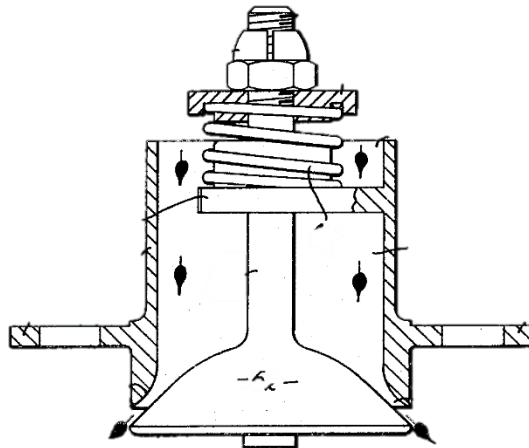
3.1 Vedrupeaga pihustipea

Tavapäraselt koosneb vedrupeaga pihusti düüsisist ja vedrust, mida on kujutatud joonisel 3.1. Düüside lahendused on erinevad. Vedru eesmärk on avada düüs - rõhu avaldumisel süsteemis surutakse vedru kokku ja avaned düüsis olevad avad.



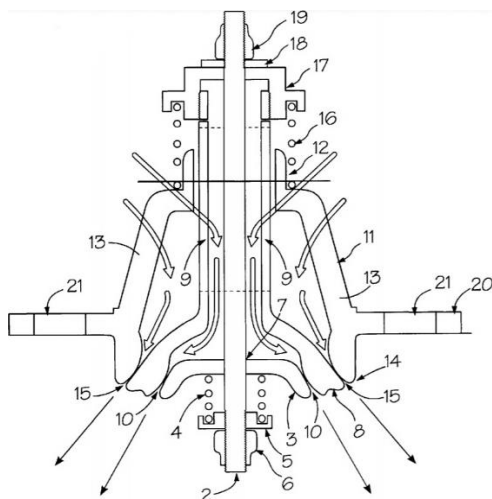
Joonis 3.1 Vedrupeaga pihusti [14]

Vedrupeaga pihustid deaeraatorites on üle maailma levinud, 1981. aastal anti välja patent vedrupeaga pihustile (joonis 3.2). Antud pihustipea koosneb välisdüüsisist, vedrust ja sisedüüsisist, mis on lõpust koonulise kujuga. Spiraalvedru on ette nähtud pihusti sulgemiseks ja avamiseks. Antud pihusti loob lehviku kujulise veemustri, mis on üldine levinud praktika. [15]



Joonis 3.2 Vedrupeaga pihustipea Ameerikas 1981. aastal [15]

1999. aastal välja antud patenti kasutatakse siiani üle maailma. Pihustuspea sisaldab kahte vedrusüsteemi, mis panevad vastavad avad sulgema suunas, mis on vastupidine pihustusventiilile tarnitava rõhu all oleva vedeliku mõjule. Seda on võimalik reguleerida nii, et pihustusmustrid saaksid püsida suhteliselt õhukesed või kiletaolised ühtlase, pideva ja katkematu pinnaga, nii et pihustusmustrite pind oleks maksimaalne. Joonisel 3.3 on lisatud ka pihustusmuster. [16]

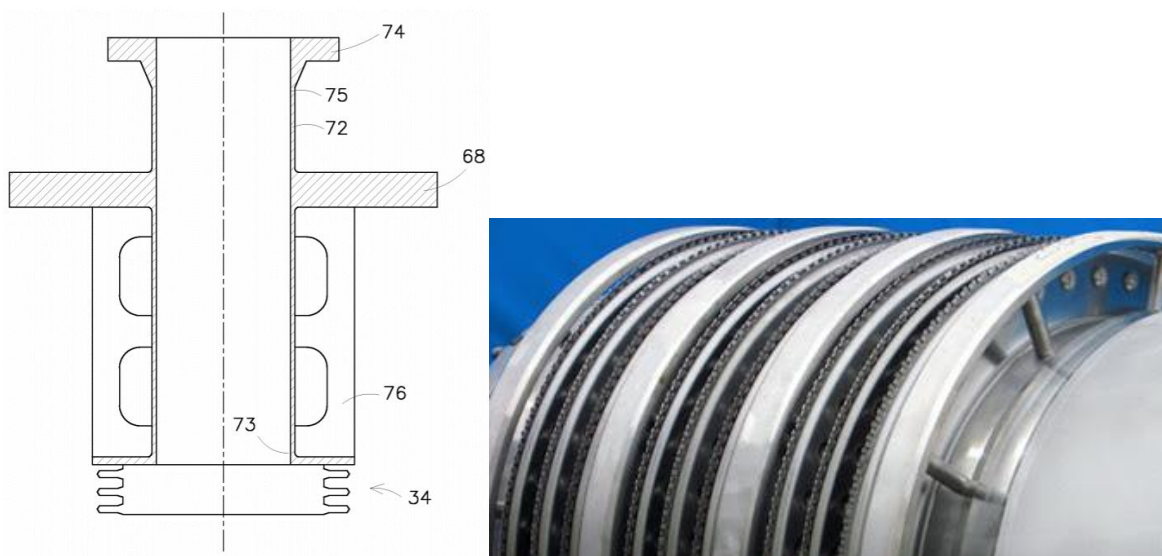


Joonis 3.3 Vasakult vedrupeaga pihusti joonis, vedrupeaga pihusti ja pihustusmuster [16] [17]

3.2 Ketta tüüpi pihustipea

Joonisel 3.4 on kujutatud ketta tüüpi pihustipead, milles ei kasutata vedrude süsteemi, et reguleerida avade suuruseid. Vaid see koosneb düüsist, mille lõpus on nn kettad, mis on keevitatud düüsi külge. Kettad koosnevad kahest lehtmetail plaadist, mille lõpus on

nn hambad, mis veesurve tõttu avanevad ja millest väljuvad õhukesed veejoad. Pihustusmuster on lehvik. Lehviku ruumpinda on võimalik suurendada kui lisatakse kettaid, ehk pihustus muster on nn lehvik lehviku sees. [18]



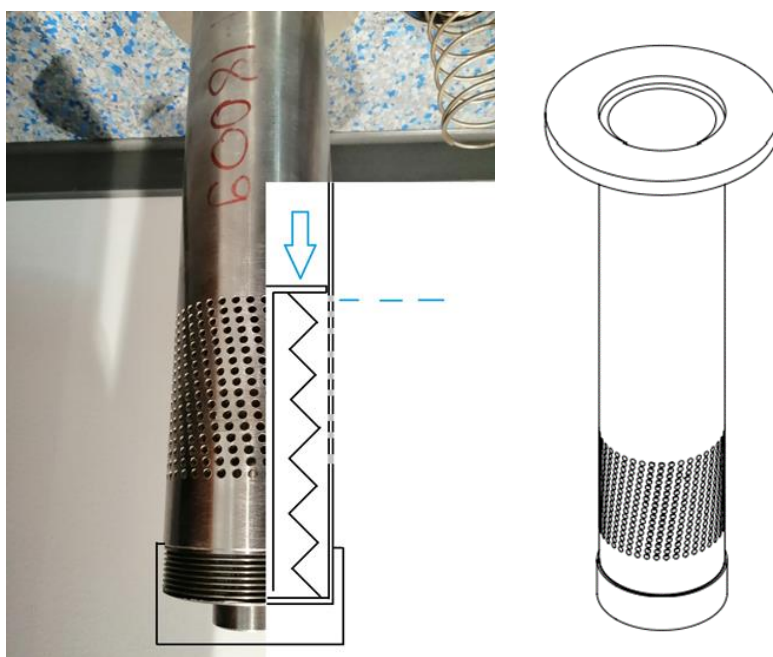
Joonis 3.4 Ketta tüüpi pihustipea [18] [19]

4. ESTANCI PIHUSTIPEADE DISAIN

ESTANC on väljaarendanud kaht tüüpi pihustipead - vedrupeaga ja piluavadega. Pihustuspeasid on modifitseeritud ja täiendatud hetkel kasutatavatest pihustitest. Mõlemad pihustite vee piisa trajektooriid on sarnased ning moodustavad nn lehviku. Väljatöötatud pihustipäid võrreldakse olemasoleva pihustiga, mille konstruktsioon on vedrupeaga.

4.1 Vedrupeaga pihustipea

Vedrupeaga pihustipea koosneb düüsist, avadega välimisest düüsist ja vedrust. Vedruka juhatakse kui palju vett lastakse avadest läbi. Vesi siseneb düüsi ja rõhu suurenemisel vesi lükkab vedru kokku ja see järel saab vesi avadest väljuda. Mida suurem on rõhk düüsis, seda rohkemate avadest väljub vesi. Pihustipea pihustusjoon on lehviku kujuga. Välisdüüsi avad on ümmargused. Ringikujuline ava on vähem altid kulumisele ja ummistumisele. Vedrupeaga pihusti on kujutatud joonistel 4.1 ja 4.2. [20]



Joonis 4.1 Vedrupeaga pihustipea väljast [20]

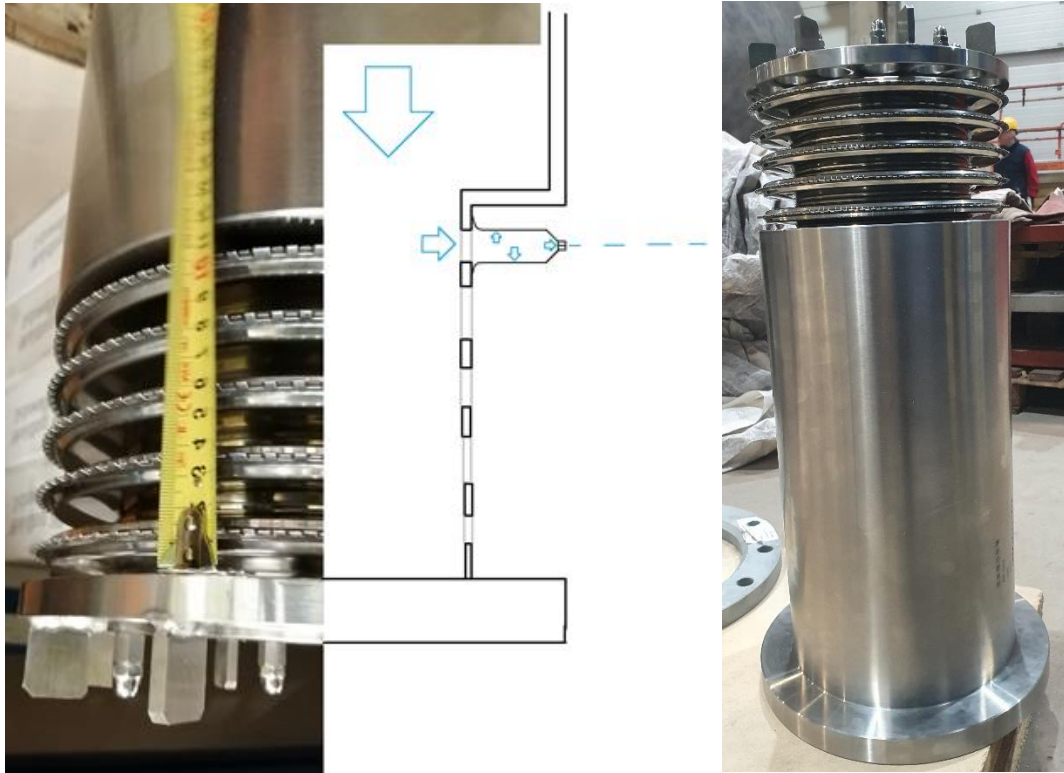
Pihustipea on 421 mm kõrge ja avade juurest on välisdiameeter 88,9 mm. Kokku on 678 ava, mille läbimõõt on 4 mm ja avade vahemaa avade keskpunktist on 7 mm. [20]



Joonis 4.2 Vedrupeaga pihustipea seest [20]

4.2 Piluavadega pihustipea

Piluavadega pihustipea koosneb düüsisist ja nn rõngas ketastest ehk on ketas tüüpi pihusti. Ketaste välisäärel on metall-lehed omavahel kokku surutud. Süsteemi vee sisenemisel ja rõhu suurenemisel lükkab vesi lehed lahti, vee liikumist iseloomustab joonis 4.1. Pihustis on kokku on 140 pilu, mis on suletud kui rõhku ei avaldata ja need asuvad viiel real. Pilud on düüsi keskelt läbimõõduga 2 mm ja rõhu avaldumisel pilud avanevad 1,75 mm suuruseks. [20]



Joonis 4.3 Piluavadega pihustipea [20]

4.3 Olemasolev pihusti

Olemasolevat pihustipead kasutatakse hetkel AS ESTANC'i deaeraatorites. Olemuselt on sarnane vedrupeaga pihustile - aukudega hülss on põhihülssi sees, veesurve tekkides surub vesi aukudega hülssi põhihülssist välja avanevad augud. Erinevus võrreldes väljapakutud lahendustega on see et, tekib ainult üks lehvik, kuna ainult üks rida auke. Maksimaalne lubatud vooluhulk on 41,7 kg/s ja minimaalne vooluhulk on 1,7 kg/s. [20]



Joonis 4.4 Olemasoleva pihusti

5. AS ESTANC'I PIHUSTIPEADE KATSED

AS ESTANC'i pihustipeade katsed toimusid 28 ja 29 märtsil 2021. aastal ettevõtte tootmisüksuses Põrguvälja tee 5a, Pildiküla, 75308 Harju maakond. Katseid viisid läbi Tõnis Tuuder – arenduse juht, Aleksey Petrov – konstruktor, Vladimir Kutserov ja Vyacheslav Kovalenko- katsed teostanud tehnikud, Sander Kahk – katse insener, Linda Sakala – katsetaja.

Katsete eesmärgiks oli vaja mõõta süsteemis olevat rõhku ja aega, et nende põhjal tööparameetrid leida. Samuti oli eesmärgiks hinnata visuaalselt lehviku kuju, veejoa trajektoori, nn esimeste tilkade (tilga, mis tekivad avast väljudes) ja nn teistest tilkade (tilgad, mis tekivad veejoa vastu seina pörkumisel) tekkimist ja veejoa läbimõõtu. Katsete tulemuste põhjal hinnatakse pihusti tööd ja saadud andmete põhjal arvutatakse tööparameetrid.

5.1 Katsestend



Joonis 5.1 AS ESTANC'I pihustipea katsestend: paisupaak (1), kollektor (2), rõhuandur (3), kraan (4), pihustipea kinnitus (5) ja veetünn(6)

Katsete tarbeks projekteeriti AS ESTANC'i poolt katsestend. Joonisel 5.1 on kujutatud katsestend, mis koosneb kuuest veemahutist, torustikust, rõhuandurist, kraanist, pihustipea kinnitusest ja veetünnist. Veemahutid on toodetud Onnineni poolt, mahtuvus on 500 l ning maksimaalne lubatud rõhk on 10 baari. Põhi torustik on DN250. Veetünni laius on 1220 mm, pikkus 2450 mm ja kõrgus 1700 mm. Joonisel 5.2 on kujutatud

katsestendil kasutatav manomeeter, mis on Onnineni D100 ja mille mõõtmispiirkond on 0 kuni 4 baari. Katsestendi hüdraulika andmed on välja toodud tabelis 5.1. [20]



Joonis 5.2 Katsestendi manomeeter

Pihusti asukoht veetünnis oli 147 cm kõrgemast seinast sellest vastas madalamast seinast 97 cm, ning vastavalt joonisele 5.1 oli asukoht 55 cm taga seinast ja 53 cm esiseinast. Anuma kõrgendiku kõrgus on 50 cm. [20]

Tabel 5.1 Katsestendi hüdraulika andmed [20]

	Tähis	Väärtus	Ühik
Maksimaalne vooluhulk	$Max Q$	250	t/h
Maksimaalne vooluhulk	$Max Q$	69,4	l/s
Kollektori diameeter	d	250	Mm
Kollektori pindala	A	0,049087	m ²
Kollektorist läbiv veekiirus	v	1,41	m/s
Paisupaakide maht	V	0,5	m ³
Paisupaakide arv		6	Tk
Paisupaagi ühenduse läbimõõt	d	100	Mm
Pihusti ühenduse pindala	A	0,007854	m ²
Pihusti ühenduse läbiv veekiirus	v	1,47	m/s

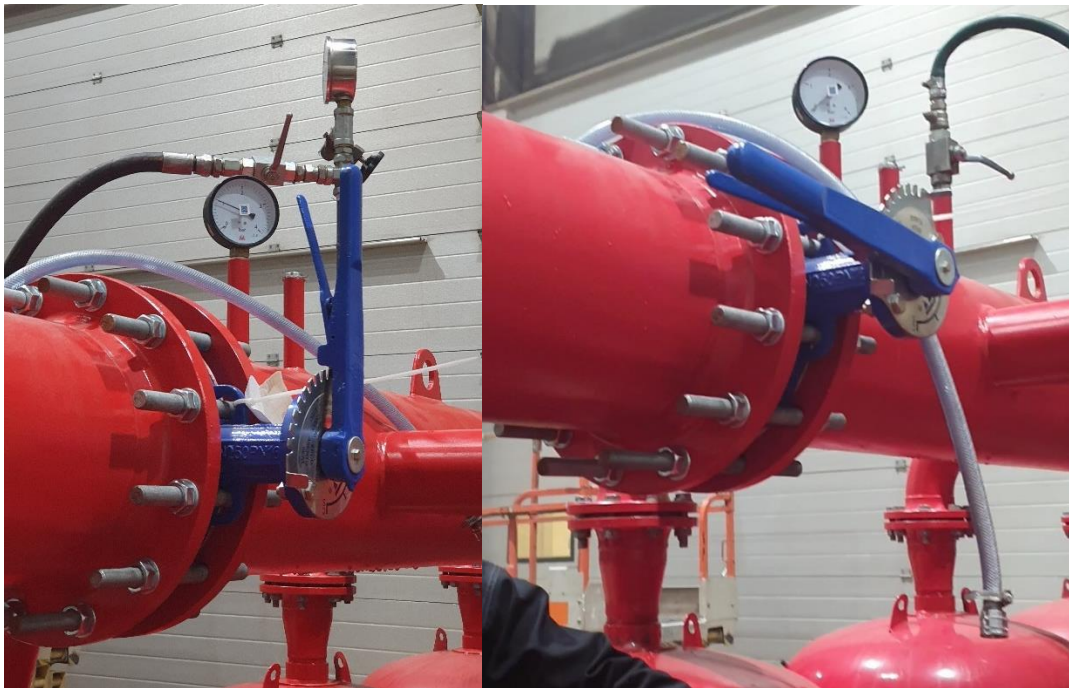
5.2 Katsete läbiviimine

Katse läbiviimiseks täideti paisupaagid veega, mille temperatuur oli umbes 10°C. Kinnitati katsetatav pihusti. See järel lisati rõhk, mida on kujutatud joonisel 5.3. Pihustite rõhkude vahe töörežiimis on tavaliselt 0,1 kuni 0,7 baari, mille järgi valiti süsteemi 1 baar rõhku pumbata, et katsetada pihusteid maksimaalses töörežiimis. [20]



Joonis 5.3 Katsestendi rõhu pumpamine

Katsed viidi läbi kolmes järgus, ehk esimesel korral katsetati vedrupeaga pihustit, ning see järel lasti vesi mahutist välja ja viidi uuesti läbi katsete ettevalmistus, et katsetada piluavadega pihustit. Sellele järgnes uuesti mahutist vee välja laskmine ja kolmas katse toimus järgmisel päeval ning katsetati olemasolevat pihustit.



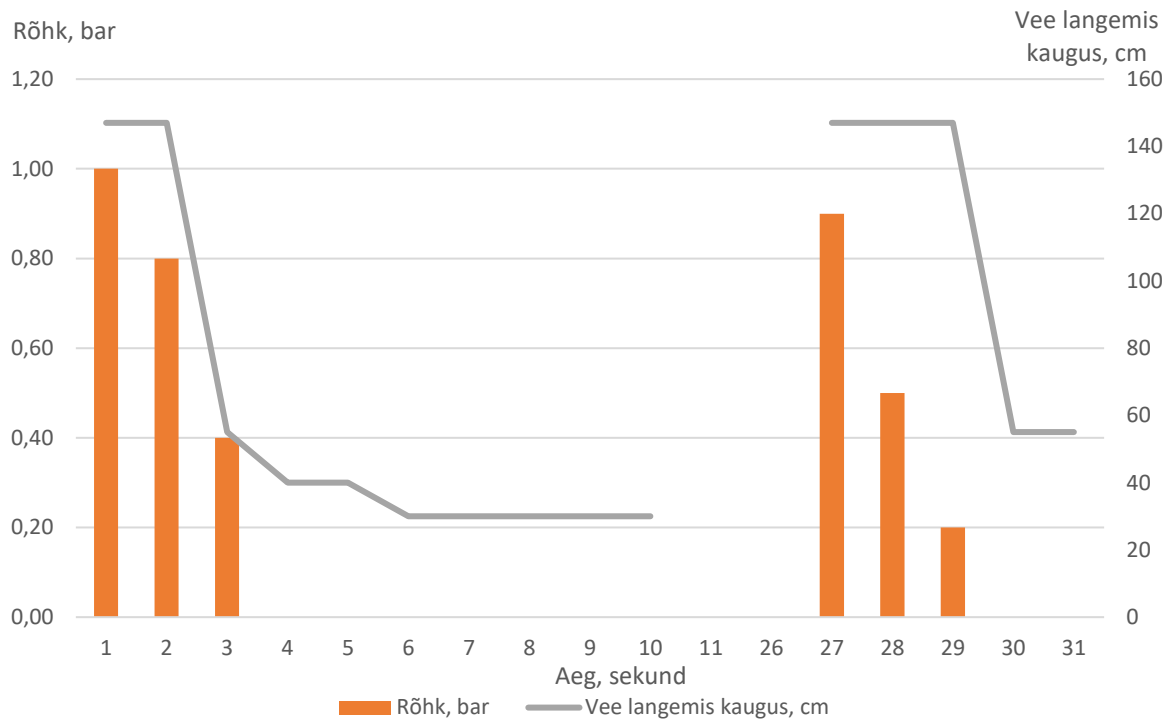
Joonis 5.4 Suletud kraani asend (vasakul) ja avatud kraani asend (paremal)

Kui süsteemis oli rõhku 1 baar avati kraan, mida on kujutatud joonisel 5.4. Katse käigus mõõdeti süsteemis olevat rõhku, aega ning jälgiti ja ka filmiti pihustipea moodustavat lehvikut. Visuaalsel hindamisel analüüsiti pihustusjoont ehk trajektoori, veemahuti seinale langevat veejuga ning mis hetkel ei tekkinud enam veest lehvikut.

5.3 Katsete tulemused

5.3.1 Vedrupeaga pihustipea

Joonisel 5.5 iseloomustab vedrupeaga pihusti katsetulemusi. Kraani avamisel tekkis väga suur jõud ja vee trajektoor oli 90 kraadi nurga all. Kraani avamisel tekkinud suur jõud lükkas vedru kinni ehk enam vedru ei töötanud ning kõik avad olid avatud. 2 sekundiga langes rõhk 0,8 baarile ning visuaalne vee trajektoor langes 80 kraadi nurga peale. 3 sekundil langes rõhk 0,4 baarile ja vee trajektoor langes 75 kraadi peale. Juba neljandal sekundil ei suutnud süsteem rohkem rõhku hoida ja rõhk langes 0 baarile, iga sekundiga veetrajektoor langes umbes 5 kraadi. 11 sekundil keerati kraan uuesti kinni ja avati uuesti 28 sekundil, selle aja jooksul tõusis rõhk uuesti 0,9 baari peale. Kui kraan uuesti avati tekkis taas 90 kraadise nurgaga lehvik ning rõhk langes koheselt 0,5 baarile. 29 sekundil oli rõhk 0,2 baari ja 30 sekundil oli rõhk süsteemis langenud 0 baarile. Lehviku trajektoor 40 kraadi nurga all ja püsis kuni 169 sekundini. Katsetest tehtud pildid ja mõõtmistulemuste tabel (L1.1), kus on kirjas rõhk vastaval ajahetkel, asuvad lisas 1.



Joonis 5.5 Vedrupeaga pihusti katse tulemused esimesel 31 sekundil



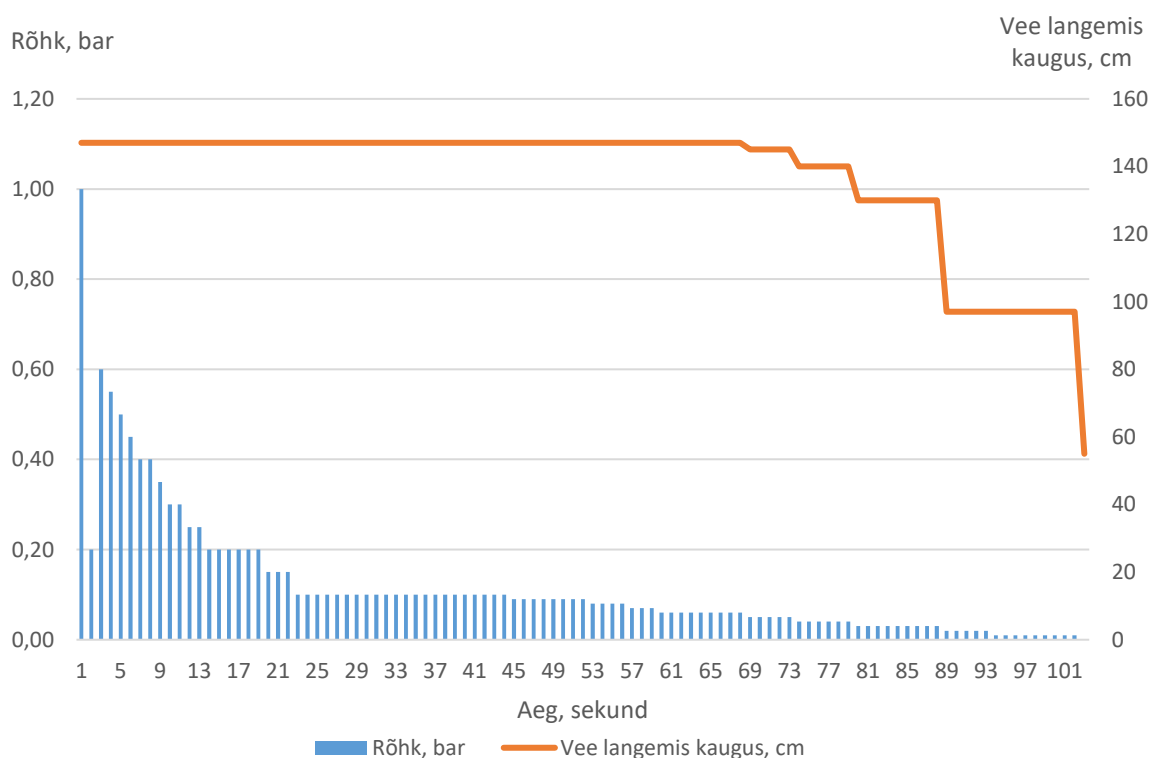
Joonis 5.6 Vedrupeaga pihusti vasakult 1. sekundil, 10. sekundil ja 180. sekundil

Joonisel 5.6 on kujutatud vedrupeaga pihusti katsete tulemusi visuaalselt. Pihustist väljuv vee juga oli suure läbimõõduga. Vee tilgad moodustusid ainult kraani avamisel ja sellest edasi paaril sekundil. Vee langemise kaugus on toodud joonisel 5.5, kuna sein asus 147 cm kaugusel pihustist, mis iseloomustab teiste tilkade moodustamist. Seega

tekkis teised tilgad kraani avamisel ainult esimesel 3 sekundil, mida on võimalik hinnata ka visuaalselt joonisel 5.6.

5.3.2 Piluavadega pihustipea

Joonisel 5.7 on kujutatud pilupihusti katsetulemuse graafikul. Kraani avamisel tekkis väga suur jõud ja vee trajektoor oli 90 kraadi nurga all, mis püsis kuni 89 sekundini kui rõhk süsteemis langes 0,02 baari peale. See järel 94 sekundil langes rõhk 0,01 baarini ja ka lehviku trajektoor läks väiksemaks. 103 sekundil langes rõhk 0 baarini ja lehviku trajektoor püsis 70 kraadi peal, ning hakkas tasapisi väiksemaks jääma kuni 180 sekundini, kus ei moodustunud enam ühtlast lehvikut. 210 sekundil hakkas lehviku kuju muutuma ja 280 sekundil ei moodustunud enam üldse lehvikut. Katsetest tehtud pildid ja mõõtetulemuste tabel, kus on kirjas rõhk vastaval ajahetkel, asuvad lisas 2.



Joonis 5.7 Pilupihusti katsete tulemused esimesel 103 sekundil

Joonisel 5.8 on kujutatud piluavadega pihusti katsete tulemused visuaalselt. Pihustist väljuv veejuga oli väga peenike ja tekkis palju veetilkasid. Piltidelt on näha, et lisaks veejoa kokkupõrkel seinaga tekitas lisaks veel palju veetilkasid, et võib väita, et kui süsteemis on vähemalt 0,2 baari rõhku siis tekib sudu. Kuigi teisi tilkasi tekkis kuni 69 sekundini kui rõhk oli 0,05 baari. Aga visuaalselt saab hinnata, et alla 0,2 baari ei põrku veejuga enam nii suure jõuga vastu seina kuigi siiski on 90 kraadine lehvik, millest siiski tekivad veetilgad. Samuti pihusti kolmandal real viis pilu ei avanenud.

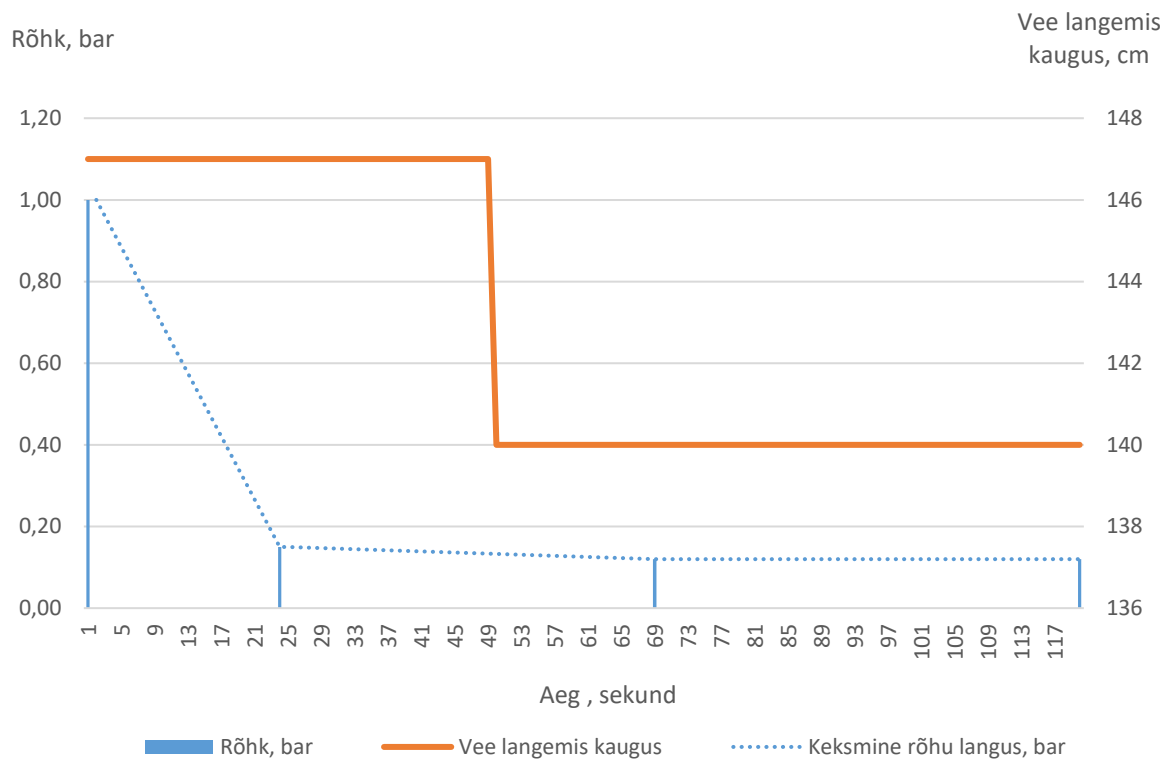


Joonis 5.8 Piluavadega pihusti vasakult 1. sekundil, 10. sekundil ja 280. sekundil

5.3.3 Olemasolev pihusti

Joonisel 5.6 on kujutatud olemasoleva pihusti katsetulemusi. Katsetel polnud võimalik filmida sekundi täpsusega rõhku, tehnilistel põhjustel, ehk rõhulang on leitud keskmise trendi teel.

Kraani avamisel, tekkis 90 kraadine lehvik, mis kümne sekundiga langes 85 kraadi peale. 24 sekundil oli süsteemis rõhku 0,15 baari, 69 ja 120 sekundil oli rõhku süsteemis 0,12 baari. 103 sekundil ei tekkinud enam ühtlast lehvikut, ning mõnedest avadest ei teki enam ühtlast veejuga ja 173 sekundil langes rõhk 0,11 baari peale. 190 sekundil ei tekkinud enam lehvikut. Katsetest tehtud pildid ja mõõtmistulemuste tabel, kus on kirjas rõhk vastaval ajahetkel, asuvad lisas 3.



Joonis 5.9 Olemasoleva pihusti katsetulemused esimesel 120 sekundil



Joonis 5.10 Olemasoleva pihusti katsed 1.sekundil, 10. sekundil ja 212. sekundil

Joonisel 5.10 on kujutatud olemasoleva pihusti katsetulemusi visuaalselt. Pihustist väljuvad veejoad olid peenikesed aga paksemad kui piluavaga pihustipeaga tekkinud veejoad. Esimesel 5 sekundil tekkis ka sudu kuna tekkis palju teisi tilkasid. 10 sekundil enam silmnähtavalt sudu ei tekkinud, ehk tekkis vähem esimesi ja teisi tilkasid.

5.4 Katsete järelused

5.4.1 Vedrupeaga pihustipea

Vedrupeaga pihustipea katsetulemuse järelused on, et pihustipead tuleks modifitseerida. Pihustipeas tuleks parendada vedru tööd, et suure jõu avaldumisel nn ei kiiluks kinni. Esimeseks parendamise võimaluseks on valida jäigem vedru, mis ei laseks suure surve korral kinni kiiluda, samuti reguleeriks madalama rõhuga paremini ja efektiivsemalt. Järgmiseks võimaluseks on konstruktsiooni muutmine, et liugpind oleks suurem. Hetkel on pind 2 cm kõrge, aga olemasoleval 20 cm. Ehk pinna suurenemisel on võimalik leida sarnast töökindlust, ning ei vääna sisemist hülssi kinni. Kolmandaks võimaluseks on vähendada lõtku sisemise ja välimise hülsi vahel, mil puhul tuleb arvestada termiliste deformatsioonidega, sh soojuspaisumise mõjul kinni kiilumisega. Modifitseerimise järel on võimalik pihustipead uuesti katsetada ja hinnata, kas eelnevad hinnangud on pihustipea töökindlust parendanud. Samuti võib katsetada erinevatel püsivatel rõhkudel, et leida vedrupeaga pihusti töörežiimi.

5.4.2 Piluavadega pihustipea

Piluavadega pihustipea töötab hästi kui rõhk süsteemis on vähemalt 0,2 baari. Pihusti esimesed tilkased oli palju ja pihustusjoon oli väikese läbimõõduga. Kui süsteemis on vähemalt 0,2 baari rõhku tekib ka teisi tilkased ning tekib sudu.

Viis pilu ei avanenud, selleks võib olla kolm põhjust. Esiteks need pilud vajavad suuremat rõhku süsteemis, kasutatud metall oli ebaühtlane ja/või lehtmets oli võrreldes teiste avadega rohkem kinni pressitud. Seda võib uurida edaspidi ja üldist pihustipea tööd see ei mõjuta. [20]

5.4.3 Olemasolev pihustipea

Kui süsteemis on rõhku vähemalt 0,12 baari siis tekib lehvik ja pihustipea töötab korrektselt. Kui süsteemis on rõhku üle 0,8 baari tekib märgatavalt rohkem teisi tilkased.

5.4.4 Katsestend

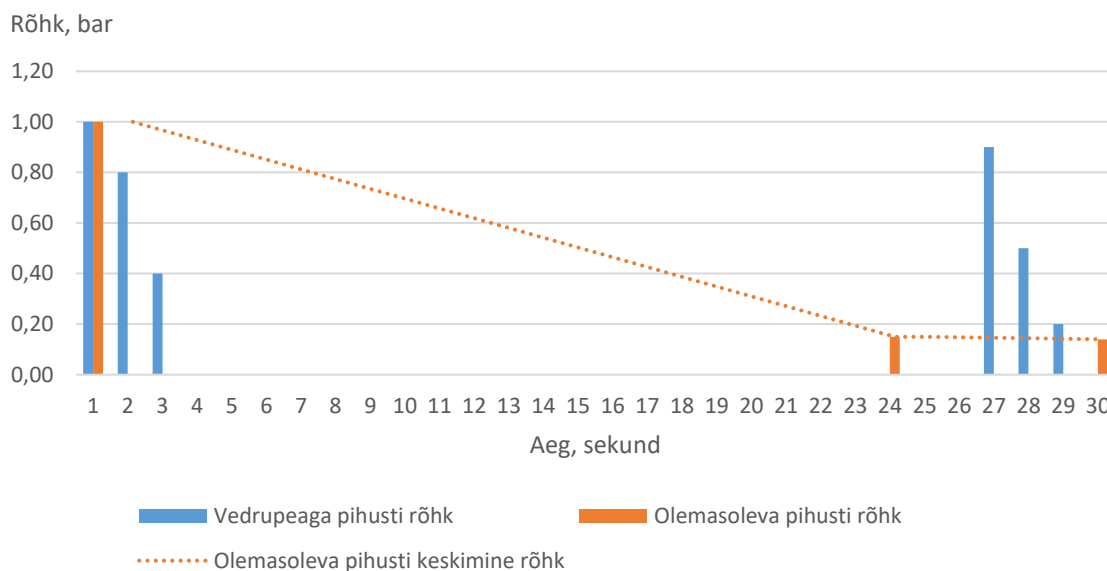
Katsete kvaliteedi ja täpsusastme tõstmiseks tuleks katsestendis hoida ühtlast rõhku ja vooluhulka, nagu deaeraatori süsteemides kasutatakse. Seejärel on võimalik täpsemalt

leida vooluhulka ja leida ka minimaalsed tööparameetrid. Samuti võiks lisada katsestendile elektrooniline manomeeter ja vooluhulga mõõtur.

5.5 ESTANCI pihustipea võrdlus olemasoleva pihustipeaga

5.5.1 Vedrupeaga pihustipea

Joonisel 5.11 on kujutatud vedrupeaga ja olemasoleva pihusti katsete tulemused. Vedrupeaga pihustil langes rõhk kiiremini kui olemasoleva pihustil. Kiirem rõhu langus oli vedrupeaga pihustil, sest vedrupeaga katsetamisel nn kiilus vedru kinni. Ehk vedru ei saanud reguleerida avatud avade arvu, seega pihustil olid kõik avad avatud.



Joonis 5.11 Vedrupeaga ja olemasoleva pihusti võrdlus

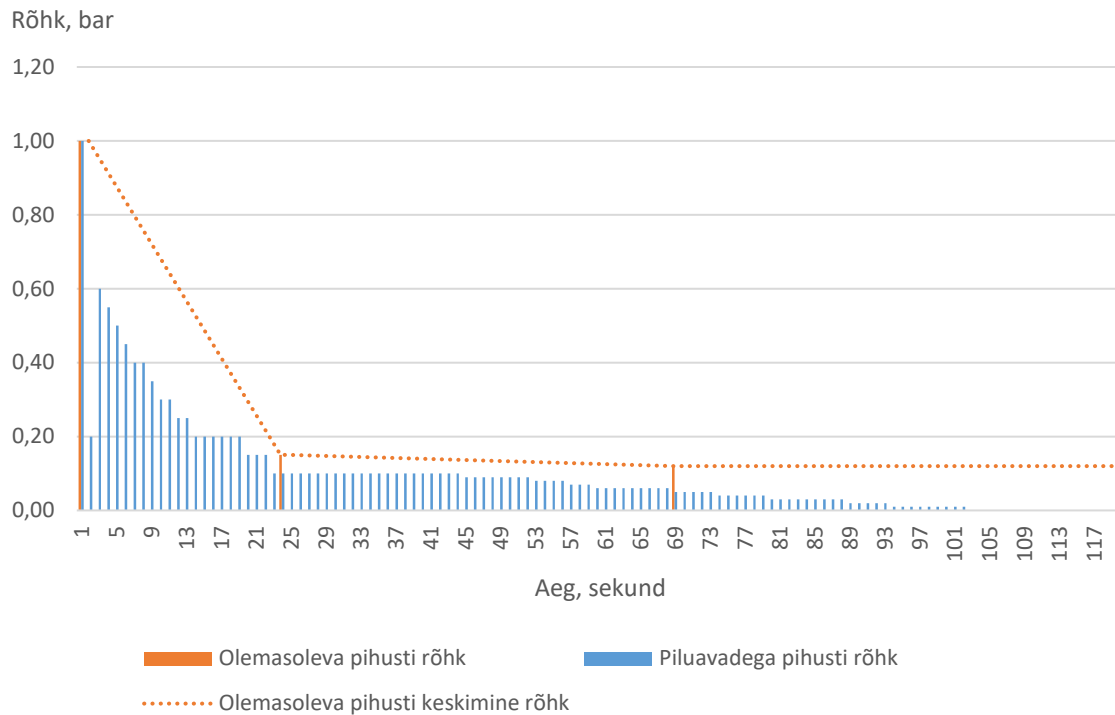
Joonisel 5.12 on võrreldud visuaalselt vedrupeaga ja olemasolevat pihustit esimesel ja viiendal sekundil. Vedrupeaga pihustil tekkis sarnane lehvik nagu olemasoleval pihustipeal, aga veejoad olid suurema läbimõõduga. Hetkel katsetatud pihusti soojusülekanne oli vähem efektiivsem kui olemasoleval pihustipeal, kuna tekkis vähem esimesi ja teisi tilkasid veejoa läbimõõdu tõttu. Samuti olemasoleval pihustil avanes üks rida avasid võrreldes piluavadega pihustil avanesid 17 real avad, mis katab suurema ruumala veejoa ja tilkadega.



Joonis 5.12 Vedrupeaga pihusti ja olemasolev pihusti 1 sekundil (vasakul), vedrupeaga pihusti ja olemasolev pihusti 5 sekundil (paremal)

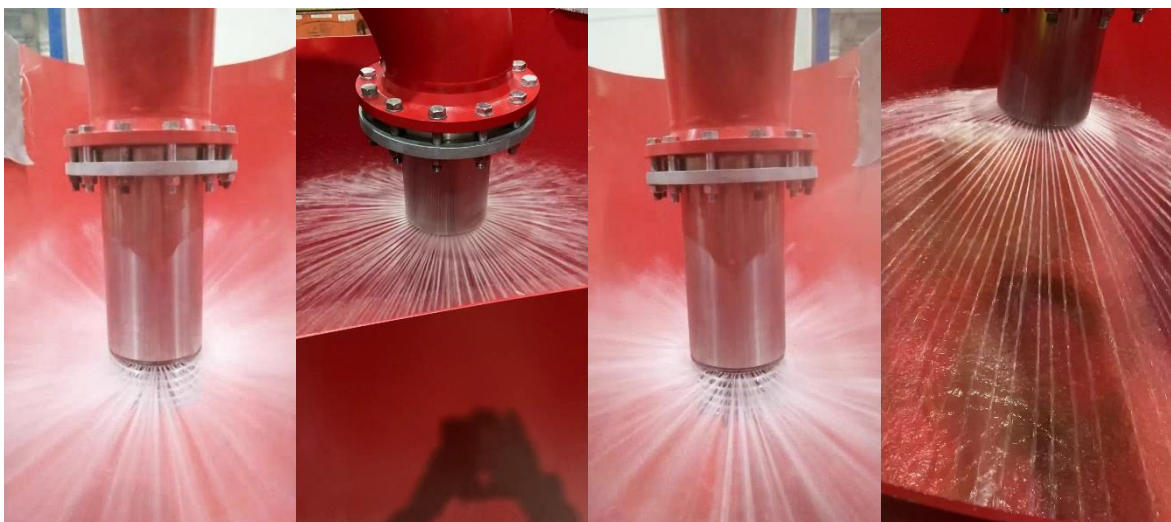
5.5.2 Piluavadega pihustipea

Joonisel 5.13 on kujutatud piluavadega ja olemasoleva pihusti katsete tulemusi. Rõhk langes süsteemis sarnaselt 24 sekundini, mil rõhk oli langenud vastavalt 0,10 ja 0,15 baarile. Olemasolev pihusti suutis hoida rõhku kauem süsteemis sees. Rõhk süsteemis langes 0 baarile vastavalt 103 sekundil ja 336 sekundil, kuigi lehvik püsis vastavalt 280 ja 190 sekundini. Seega piluavadega pihusti töötab paremini väikesemate rõhu vahedega kui olemasolev pihusti.



Joonis 5.13 Piluavadega ja olemasoleva pihusti katsetulemused

Joonisel 5.14 on võrreldud visuaalselt piluavadega ja olemasolevat pihustit esimesel ja kümnel sekundil. Piluavadega pihustipea levik oli suurema ruumalaga ehk tekkis nn mitu levikut. Võrreldes olemasoleva pihustipeaga siis veejoad olid peenemad ja tekkis rohkem nn sudu. Samuti tekkis piluavaga pihustil rohkem esimesi ja teisi tilkasid. Ehk võib järeldada, et soojusülekanne on efektiivsem kui olemasoleval pihustipeal. Samuti olemasoleval pihustil avanes üks rida avasid võrreldes piluavadega pihustil avanesid viiel real pilud, mis katab suurema ruumala veejoa ja tilkadega.



Joonis 5.14 Piluavadega pihusti ja olemasolev pihusti 1 sekundil (vasakul), piluavadega pihusti ja olemasolev pihusti 10 sekundil (paremal)

6. ESTANTCI PIHUSTIPEA ARVUTUSED

Katsete tulemuste põhjal oli võimalik teha üldistatavad arvutused, mille eesmärk on leida tööparameetreid – voolukiirus ja vooluhulk.

6.1 Pihustipeade arvutusmetoodika

Eeldades, et rõhk süsteemis on sama mõõtepunktis ja düüsis – ehk takistusi ei arvestata siis on võimalik leida veekiirus- ja kulu. Takistusi ei arvestata kuna pole teada veekiirus ja katsestendi takistused on kõikidel pihustitel sama, mis võrdlemist ei mõjuta. Takistused erinevad konkreetse pihustipea düüside konstruktsioonist.

Veekiiruse valem:

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (6.1)$$

kus v - väljavoolu kiirus, m/s,

φ - kiirusetegur, mis arvestab avas tekkinud kohttakistusest tingitud kiiruse kadu,

p - rõhk vedelikus, Pa,

ρ - vedeliku tihedus, kg/m³. [7]

Vooluhulga valem ühele avale:

$$q = \mu A \cdot \sqrt{\frac{2H_t}{\rho}}, \quad (6.2)$$

kus q - vooluhulk avast, m³/s,

H_t - vedeliku voolama panev surve, p_m,

μ - vooluhulgategur. [21]

Aga kuna läbi pilude voolamise on määrav rõhkude vahe, siis $H_t = \Delta p$, [7] ehk vooluhulga valem ühele avale on:

$$q = \mu A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (6.3)$$

Kiirustegurit leitakse valemiga:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}, \quad (6.4)$$

kus ζ - õhukeses seinas oleva ava kohttakistustegur. [21]

Vooluhulgategur leitakse valemiga:

$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon , \quad (6.5)$$

kus ε - joa ahendustegur. [21]

Joahendustegur leitakse valemiga:

$$\varepsilon = \frac{A_c}{A}, \quad (6.6)$$

kus A_c – ahenenud ristlõike pindala, m,
 A – ava ristlõike pindala, m. [21]

Ristlõike pindala leitakse valemiga:

$$A = r^2 \pi , \quad (6.7)$$

kus A - ristlõike pindala, m²,
 r - ristlõike raadius, m,
 π – konstant.

Ahenenud ristlõike raadiuse leidmiseks tuleb ava raadiusest lahutada viskoose aluskihipaksus, mis saadakse valemiga:

$$\delta_v = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}, \quad (6.8)$$

kus d – ava läbimõõt, m,
 Re – Reynoldsi arv,
 λ - hõõrdetakistustegur. [21]

Vedeliku voolurežiimi arvutuslikul teel leitakse Reynoldsi arvuga:

$$Re = \frac{v_d}{\nu}, \quad (6.9)$$

kus Re - Reynoldsi arv
 v_d – vedeliku voolukiirus, m/s,
 d – toru siseläbimõõt, m
 ν – vedeliku kinemaatiline viskoossus, m²/s. [7]

Vedeliku kinemaatiline viskoossus leitakse valemiga:

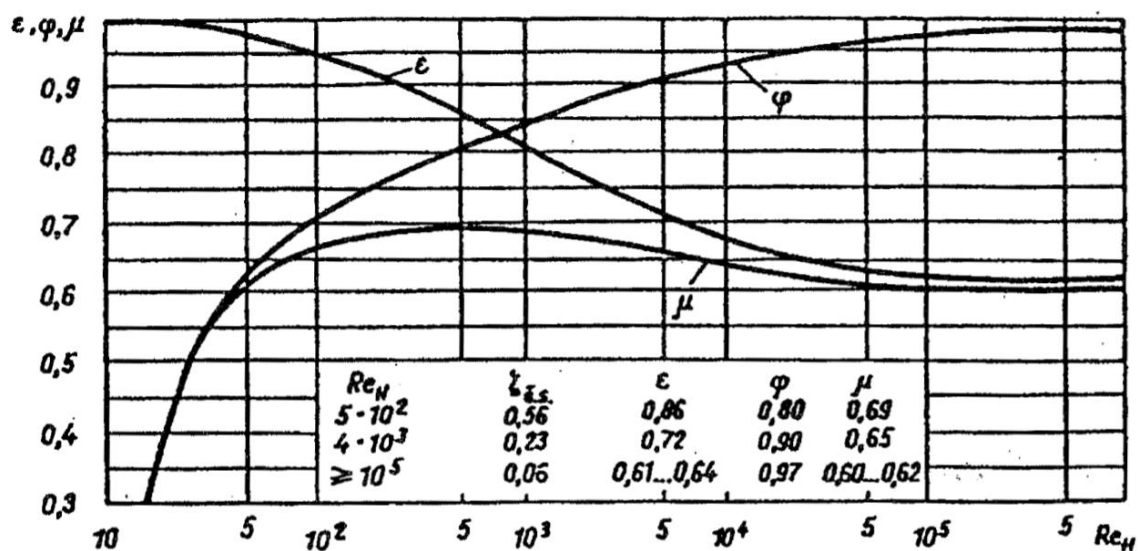
$$\nu = \frac{0,0178 \cdot 10^{-4}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 t^2}, \quad (6.10)$$

Kus t – temperatuur, °C. [21]

Turbulentne voolamisel hõõrdetakistustegur:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (6.11) [7]$$

Joonisel 6.1 olev graafik on koostatud eelnevate arvutusvalemite põhjal. Kui valemiga 6.9 leitakse Reynoldsi arv siis sellest sõltuvalt on jooniselt leitav kiirustegur, joa ahendustegur ja vooluhulgategur.



Joonis 6.1 Vooluhulga-, ahendus- ja kiirusteguri sõltuvuse Reynoldsi arvust [21]

6.2 Pihustipeade arvutused

Kuna esimesel sekundil oli kõikides pihustites rõhk 1 baar siis tehakse kõik arvutused 1 baarile. Pihustite rõhkude vahe töörežiimis on tavaliselt 0,1 kuni 0,7 baari siis umbes 1 baar on eeldatavasti maksimaalne lubatud rõhk. Arvutustes eeldades, et süsteemirõhk on sama ka düüsis, enne väljuvat ava. Rõhu kaoga ehk takistustega pole arvestatud.

6.2.1 Vedrupeaga pihusti arvutused

Pihustusava diameeter on $d = 4$ mm ja avasid on kokku 678, kust kõikidest avadest väljus vesi. Eeldusel vee temperatuur oli $t = 10^\circ\text{C}$, siis vee tihedus on $\rho = 999,70$ kg/m³ [22]. Õhukeses seinas oleva ava kohttakistustegur ζ on 0,065. [7]

Kiirustegur leiti vastavalt valemile (6.4):

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,065}} = 0,97$$

Veekiiruse leiti valemiga (6.1):

$$v = 0,97 \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 100000}{999,7}} = 13,71 \text{ m/s}$$

Vee kinemaatiline viskoossus leiti valemiga (6.10):

$$\nu = \frac{0,0178 \cdot 10^{-4}}{1 + 0,0337 \cdot 10 + 0,000221 \cdot 10^2} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Reynoldis arv leiti valemiga (6.9), kasutades leitud kiirust:

$$\text{Re} = \frac{13,71 \cdot 0,004}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 43092$$

Turbulentne voolamisel hõõrdetakistustegur leiti valemiga (6.11):

$$\lambda = \frac{0,316}{43092^{0,25}} = 0,02$$

Ahenenud ristlõike raadiuse leidmiseks tuleb ava raadiusest lahutada viskoose aluskihipaksus, mis saadakse valmiga:

$$\delta_v = \frac{30 \cdot 0,004}{43092 \sqrt{0,02}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Ristlõike A_c pindala leitakse valmiga (6.7):

$$A = (0,002 - 1,9 \cdot 10^{-5})^2 \pi = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ristlõike A_0 pindala leitakse valmiga (6.7):

$$A = (0,002)^2 \pi = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Joa ahendustegur leitakse valemiga (6.6):

$$\varepsilon = \frac{1,2 \cdot 10^{-5}}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 0,98$$

Vooluhulgategur leitakse valemiga (6.5):

$$\mu = 0,97 \cdot 0,98 = 0,95$$

Vooluhulk ühes avas arvutati vastavalt valemile (6.2):

$$q = 0,98 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 100000}{999,7}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Vooluhulk kokku:

$$Q = q \cdot 678 = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 678 = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vedrupeaga pihustist väljuva veekiirus $v = 13,7 \text{ m/s}$ ja vooluhulk $Q = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.2.2 Piluavadega pihusti arvutused

Pilupihusti pihustusava diameeter $d = 2$ mm ja ESTANCI andmetel ava avaneb $d = 1,75$ mm, ühel real on avasid kokku 140, millest 5 ei avanenud, ja ridu on 5. Eeldusel vee temperatuur oli $t = 10^{\circ}\text{C}$, siis vee tihedus on $\rho = 999,70$ kg/m³ [22] ja eelnevalt on leitud vee kinemaatiline viskoossus 6.10 valemiga $\nu = 0,0000013$ m²/s.

Kiirustegur leiti vastavalt valemile (6.4):

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,04}} = 0,98$$

Veekiiruse leiti valemiga (6.1):

$$v = 0,98 \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 100000}{999,7}} = 13,9 \text{ m/s}$$

Ristlõike A_c pindala leitakse valemiga (6.7):

$$A_c = (8,75 \cdot 10^{-4})^2 \pi = 2,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Ristlõike A pindala leitakse valemiga (6.7):

$$A = 0,001^2 \pi = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Joa ahendustegur leitakse valemiga (6.6):

$$\varepsilon = \frac{2,41 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 10^{-6}} = 0,77$$

Vooluhulgategur leitakse valemiga (6.5):

$$\mu = 0,98 \cdot 0,77 = 0,63$$

Vooluhulk ühes avas arvutati vastavalt valemile (6.2):

$$q = 0,63 \cdot 2,41 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 100000}{999,7}} = 0,00003 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vooluhulk kokku:

$$Q = q \cdot 678 = 0,00003 \cdot 140 = 0,017 \text{ m}^3/\text{s}$$

Piluavadega pihustist väljuva veekiirus $v = 13,9$ m/s ja vooluhulk on $Q = 0,017$ m³/s.

6.2.3 Olemasoleva pihusti arvutused

Pilupihusti pihustusava diameeter on 6 mm ja kokku avasid 100. Eeldusel vee temperatuur oli $t = 10^{\circ}\text{C}$ siis vee tihedus on $\rho = 999,70$ kg/m³ [22] ja eelnevalt on leitud vee kinemaatiline viskoossus 6.10 valemiga $\nu = 0,0000013$ m²/s.

Kiirustegur leiti vastavalt valemile (6.4):

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,065}} = 0,97$$

Veekiiruse leiti valemiga (6.1):

$$v = 0,97 \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 100000}{999,7}} = 13,7 \text{ m/s}$$

Reynoldis arv leiti valemiga (6.9), kasutades arvatud veekiirust:

$$\text{Re} = \frac{13,7 \cdot 0,006}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 64637$$

Turbulentne voolamisel hõõrdetakistustegur leiti valemiga (6.11):

$$\lambda = \frac{0,316}{64637^{0,25}} = 0,02$$

Ahenenud ristlõike raadiuse leidmiseks tuleb ava raadiusest lahutada viskoose aluskihipaksus, mis saadakse valmiga (6.8):

$$\delta_v = \frac{30 \cdot 0,004}{64637 \sqrt{0,02}} = 1,98 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ristlõike A_c pindala leitakse valmiga (6.7):

$$A_c = (0,006 - 1,98 \cdot 10^{-5})^2 \pi = 2,79 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ristlõike A pindala leitakse valmiga (6.7):

$$A = (0,006)^2 \pi = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Joa ahendustegur leitakse valemiga (6.6):

$$\varepsilon = \frac{1,98 \cdot 10^{-5}}{2,82 \cdot 10^{-5}} = 0,98$$

Vooluhulgategur leitakse valemiga (6.5):

$$\mu = 0,97 \cdot 0,98 = 0,95$$

Vooluhulk ühes avas arvutati vastavalt valemile (6.2):

$$q = 0,95 \cdot 2,82 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 100000}{999,7}} = 0,0004 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vooluhulk kokku:

$$Q = q \cdot 678 = 0,0004 \cdot 100 = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$$

Olemasolev pihustist väljuva veekiirus $v = 13,7 \text{ m/s}$ ja vooluhulk $Q = 0,038 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.3 Arvutustulemuste analüüs

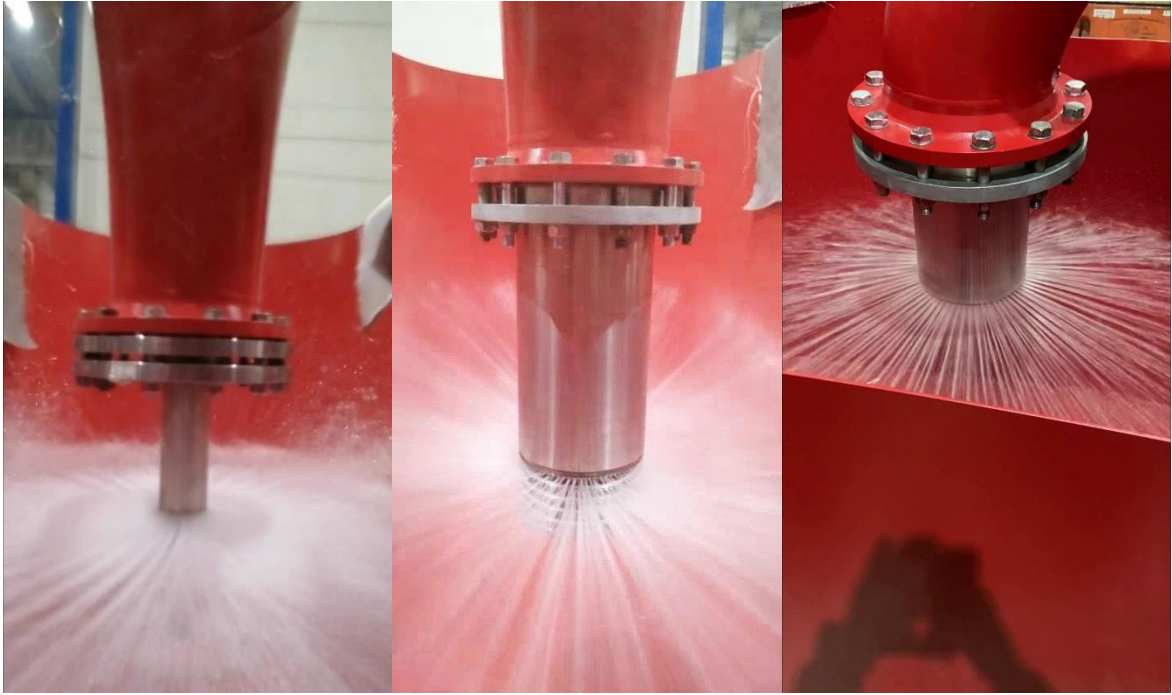
Tabelis 6.1 on väljatoodud kõik arvutused, mis tehti 1 baari kohta, mis esimesel sekundil katsestendis oli. Võrreldakse andmeid, mis on leitud kirjeldatud arvutusmeetodiga. Kõige rohkem mõjutab kiirust pihustite avade suurused ja veehulka mõjutab lisaks avade arv. Lisaks teiste tilkade tekkimiseks on vajalik suur voolukiirus.

Kõige suurem voolukiirus oli piluavadega pihustil $v = 13,9$ m/s, seejärel vedrupeaga ja olemasolev pihusti $v = 13,7$ m/s, mis erinesid ainult $v = 0,2$ m/s. Kõige suurem vooluhulk $Q = 114$ kg/s oli vedrupeaga pihustil, sest sellel on kõige rohkem avasid. Võrreldes olemasoleva pihustiga 6 korda rohkem avasid. Vooluhulk oli kõige väiksem $Q = 17,2$ kg/s piluavadega pihustil kuna piluavaga pihustil on kõige väiksem avade läbimõõt. Võrreldes olemasoleva pihustiga erinev ava suurus ligikaudu 3 korda. Olemasoleva pihustil on teada maksimaalne lubatud vooluhulk on $Q = 41,7$ kg/s ja minimaalne vooluhulk on $Q = 1,7$ kg/s, antud katsega jäi puud maksimaalsest vooluhulgast 3,5 kg/s.

Tabel 6.1 Arvutustulemused

	Ava läbimõõt	Avade arv	v	q	Q	Q
Ühik	mm	tk	m/s	m³/s	m³/s	kg/s
Vedrupeaga pihusti	4	678	13,7	0,0002	0,11	114
Piluavadega pihusti	1,75	140	13,9	0,00003	0,017	17,2
Olemasolev pihusti	6	100	13,7	0,0004	0,038	38,2

Visuaalseks võrdlemiseks on toodud pildid esimest sekundist kõikides kastetest joonisel 6.2. Kuna veekiirus on tähtis teiste tilkade tekkimiseks ja need arvutus tulemuse põhjal suuresti ei erinenud, siis visuaalselt hinnates olemasoleval tekkis vähem teisi tilkasid, mis olenes sellest, et avade ridasid on ainult üks. Arvutus tulemustega kooskõlas on visuaalselt hinnates vedrupeaga pihustil kõige suurem vooluhulk, mida mõjutavad avade suurus ja arv.



Joonis 6.2 Vasakult vedrupeaga pihusti, piluavadega pihusti ja olemasolev pihusti esimesel sekundil

KOKKUVÕTE

Deaeraatoreid kasutatakse tööstusprotsessides, et eemalda veest hapnik ja muud gaasid. Nende eemaldamine on vajalik, et ei tekiks torustikes ja seadmetes korrosiooni, mis vähendab torustike ja seadmete tööeluiga. Selleks kasutatakse nelja erinevat tehnoloogiat: membraan- ja vaakumdegaseerimine ning termiline ja keemiline degaseerimine. Termilised deaeraatorid jagunevad omakorda kaheks: kandik tüüpi ja pihusti tüüpi. Pihusti tüüpi deaeraatorites on kasutusel kahel pihustipead - vedrupeaga ja kettas tüüpi. Rohkem on kasutusel vedrupeaga pihustid, millel on erinevaid lahendusi.

Varasemalt on leitud, et pihustite tööd on võimalik hinnata veejoo suuruse, esimeste tilkade (väljumisel avast) ja teiste tilkade (lõök vastu seinu) moodustamisega. Kuna oluline on eralduspind vee ja auru-gaasifaasi vahel oleks võimalikult suur, mida suurem on pind seda paremini toimub degaseerimine. Lisaks on leitud, et väiksema ava korral tekkib rohkem esimesi tilkasid ja suurema veekiiruse korral tekib rohkem teisi tilkasid.

ESTANC AS-is toodetakse termilisi deaeraatoreid, kus vesi pritsitakse deaeraatorisse ja auruga viiakse vesi küllastustemperatuurini, kus veest eralduvad gaasid. Ettevõtte on arendanud kaks pihustipead, mida võrreldi hetkel sisse ostetava pihustiga. Vedrupeaga pihusti koosneb välimisest düüsist, millel on avad, ja vedrust, milles veesurve avaldumisega avanevad välisdüüsi avad. Piluavadega pihusti koosneb nn ketastest, mille välisäärel on metall-lehed omavahel kokku surutud, veesurvel avanevad metall lehed. Olemasolev pihusti koosneb vedrust, välimisest ja sisemisest düüsist, millel on avad. Veesurve ületab vedru vastujõu ja surub sisedüüsi välisdüüsist välja ning avanevad sisedüüsi avad.

Eelnevast lähtudes seadis lõputöö autor koos ettevõttega eesmärgiks analüüsida ESTANC pihustite tööd ja leida sobivad tööparameetrid. Analüüsimiseks viidi läbi katsed koostöös ettevõttega. Katsete eesmärgiks oli hinnata visuaalselt pihustite tööd, mõõta süsteemis olevat rõhku vastaval aja hetkel, mis sai aluseks pihustite võrdlemiseks ja analüüsimiseks.

Katsete tulemused on näidanud, et kraani avamisel vedrupeaga pihusti nn kiilus kinni. Visuaalselt hinnati, et vedrupeaga pihustil tekkisid suure läbimõõduga veejoad ja esimesel 3 sekundil tekkis esimesi ja teisi tilkasid. Vedrupeaga ja olemasoleval pihustil tekkisid sarnased lehvikud, kuigi olemasoleva pihusti veejuga oli peenem ja sellel oli ainult üks rida auke, ehk vedrupeaga pihusti täitis suuremat ruumpindala. Rõhk langes kiiresti kuna vedru jäi kinni ning ei reguleerinud pihustipea tööd. Katsete analüüsil

järeldati, et vedru tööd tuleb parendada ja selleks on kolm võimalust. Esimeseks võimaluseks on valida jäigem vedru, järgmiseks võimaluseks on konstruktsiooni muutmine, et liugpind oleks suurem ja ei väänaks sisemist hülssi kinni. Kolmandaks on vähendada lõtku sisemise ja välimise hülsi vahel. Modifitseerimise järel soovitab autor pihustipead uuesti katsetada ja hinnata, kas eelnevad hinnangud on pihustipea töökindlust parendanud. Samuti võib vedrupeaga pihusti töörežiimi leidmiseks katsetada pihustit erinevatel püsivatel rõhkudel.

Pilupihusti katsetulemused on näidanud, et üldiselt pihusti töötas. Visuaalsel hinnangu tulemusel selgus, et tekkisid peened veejoad ning palju esimesi ja teisi tilkasid võrreldes olemasoleva pihustiga. Ühtlasi ei avanenud katse käigus viis pilu. Rõhk süsteemis langes natuke kiiremini kui olemasoleva pihustiga kuigi sarnaselt ning olemasolev pihusti lõpetas varem töötamise. Antud analüüsi põhjal saab järeldada, et piluavadega pihusti töötab paremini väiksema rõhu vahe korral. Pilupihustil viis rida avasid, ehk see täitis suuremat ruumpindala. Süsteemis peaks olema vähemalt 0,2 baari, et tekiks piisavalt esimesi ja teisi tilkasid. Viis pilu ei avanenud, selleks võib olla kolm põhjust. Esiteks need pilud vajavad suuremat rõhku süsteemis, kasutatud metall oli ebaühtlane ja/või võrreldes teiste avadega rohkem kinni pressitud. Autor soovitab leida põhjus ja seda lahendada, aga üldist pihustipea tööd see ei mõjuta.

Arvutuse teel leiti tööparameetrid 1 baarile, mida kasutati ka katsetel. Pihustite veekiirus leiti vastavalt 13,7, 13,9 ja 13,7 m/s ja vooluhulk 114, 17 ja 38 kg/s. Kui veekiirusel suuri erinevusi ei leitud, siis vooluhulk erines suuresti, kuna vooluhulk oleneb pihustite avade pindalast ja avade arvust. Tunduvalt suuremal veelhulgal töötab vedrupihusti võrreldes teiste pihustitega.

Saadud tulemuste alusel võib teha järgmisi järeldusi, et antud tingimisel vedrupeaga pihusti vedrutööd tuleb parandada. Vedrupeaga pihusti töötab suurtematel vooluhulkadel, seega on suuremal vooluhulga korral eelistatud. Piluavaga pihusti rõhulang saadi praktiliselt sarnane võrreldes olemasoleva pihustiga ja tekkis rohkem tilkasid. Pilupihustit võib kasutusele võtta kuigi autor soovitab likvideerida põhjus, miks viis pilu ei avanenud. Pärast täienduste tegemist soovitab autor katsed uuesti läbi viia katsestendis, püsival rõhul ja samal vooluhulgal, et oleks sarnane reaalsele tingustele. Sellele järgnevalt tuleks analüüsida hapniku eraldumise efektiivsust.

SUMMARY

Deaerators are used in industrial processes to remove oxygen and other gases from water. The removal of gases is necessary to prevent corrosion of piping and equipment, which reduces the service life. There are four different technologies: membrane and vacuum degassing and thermal and chemical degassing. There are two types of thermal deaerators: tray type and spray type. Spray type deaerators use two different nozzle types - spring and disc. Spring nozzles are more commonly used.

It has also been previously found that nozzle performance is evaluated by measuring the thickness of water jets, the quantity of primary droplets from the holes, and the quantity of secondary droplets impacting against the wall. Water droplets have a larger surface area and are therefore more efficient when used in degassing. that smaller holes produce more primary droplets and higher water velocities produce more secondary droplets.

ESTANC AS currently produces thermal deaerators, in which water is injected into a deaerator and brought to saturation temperature by steam. At saturation temperature, gases are released from the water. The company has developed two nozzles, which the author has tested and compared to a previously used nozzle. The new spring nozzle consists of an outer nozzle with numerous holes, an inner nozzle without holes, and a spring, which allows the outer nozzle holes to open when water pressure is applied. Disc nozzles consist of five consecutive discs made from compressed metal sheets, which open when water pressure is applied. The existing spring nozzle consists of an inner nozzle with numerous holes, an outer nozzle without holes, and a spring. When water pressure is applied, the inner nozzle protrudes from the outer nozzle and the inner nozzle holes are opened.

Based on the above, the author and ESTANC have set the aim to test the performance of ESTANC spray nozzles and to determine the operating parameters. For analysis, tests were performed in collaboration with ESTANC. During the tests spray nozzle performance was visually analysed, in order to measure the time and the pressure of the system. Results were analysed and compared with the already existing spray nozzle.

Test results showed that immediately after opening the tap of the spring nozzle, the spring remained fixed in a compressed position and did not return to the resting position after the test. Large diameter jets of water were produced by the spring nozzle, and primary and secondary droplets were formed in the first 3 seconds. Similar fans formed

on the spring head and on the existing spring nozzle. Although the existing water jet was thinner and had only one row of holes, so the spring nozzle filled a larger space area. The pressure dropped quickly because the spring got stuck and the spring did not regulate the operation of the nozzle. The tests concluded that the performance of the spring needs to be improved and for that there are three possibilities. The first option is to choose a stiffer spring, the next option is to change the design so that the sliding surface is larger and does not twist the inner nozzle. Third is to reduce the clearance between the inner and outer nozzle. After modification, the author recommends retesting the nozzle and evaluating whether previous evaluations have improved the reliability of the nozzle. The spring head nozzle can also be tested at different constant pressures to find the operating parameters.

Disc nozzle test results have shown that the disc nozzle works. Visually, it was assessed that fine water jets and many primary and secondary droplets were produced comparing with of the existing spray nozzle. The five holes did not open. The pressure in the system dropped a little faster than with the existing spray nozzle, although similar. The existing sprayer nozzle stopped working earlier. The disc spray nozzle will work better with a smaller pressure difference. There were five rows of openings on the disc sprayer, which also filled a larger space area. There should be at least 0.2 bar in the system to get the first and secondary droplets. Five slits did not open, there could be three reasons. First, the holes require more pressure in the system, the metal used was uneven and/ or the holes more pressed together. The author suggests finding the cause and solving it, but it does not affect the overall operation of the nozzle.

Following testing, operating parameters were calculated at 1 bar, which was the same as the pressure used in testing. Respectively, the water velocities of the new spring nozzle, disc nozzle, and pre-existing spring nozzle were found to be 13.7, 13.9 and 13.7 m/s and the flow rates were 114, 17 and 38 kg/s. No major differences were identified between water velocities, but flow rates varied greatly as they depend on the area and quantity of the nozzle holes.

Based on the results, it is concluded that under these conditions, the spring performance of the spring sprayer needs to be improved. It also works at higher flow rates, so higher flow rates are preferred. The disc nozzle pressure drop was practically similar to the existing nozzle, but more drops were formed. The disc nozzle can be used, although the author recommends determine and address why the five holes did not open. Following these modifications, the author recommends repeating tests on the revised nozzles. The tests should be at a constant pressure and at the same flow rate, in order to be similar

to the real conditions. Analysis of the oxygen removal efficiency of the thermal deaerators should then be conducted.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] A. K. D. Swapan Basu, Power plant instrumentation and control handbook, London : Elsevier Ltd, 2015.
- [2] POWER HX TECH CO., LTD., „POWER HX,“ POWER HX TECH CO., LTD., 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.powerhx.com/>. [Kasutatud 24 05 2021].
- [3] Scribd, „Scribd,“ 03 08 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.scribd.com/document/355457589/Chapter-2-Steam-Cycle-Theory>. [Kasutatud 26 12 2020].
- [4] S. a. A. K. D. Basu, Power Plant Instrumentation and Control Handbook : A Guide to Thermal Power Plants, Elsevier Science & Technology, Elseiver, 2014.
- [5] Lennetech, „Lenntech.pl,“ Lennetech, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lenntech.pl/membrane-contractors.htm>. [Kasutatud 31 10 2020].
- [6] Zena Mebranes, „Zena Mebranes,“ Zena Mebranes, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.zena-membranes.cz/index.php/applications/contactor/degassing>. [Kasutatud 03 01 2021].
- [7] I. Mikk, Soojustehnika käsiraamat, Tallinn: Valgus, 1977.
- [8] K. E. Heselton, Bolier Operater's handbook, Lilburn: The Fairmont Press, 2005.
- [9] Water Treatment Basics, „Water Treatment Basics,“ Water Treatment Basics, [Võrgumaterjal]. Available: <https://watertreatmentbasics.com/how-does-deaerator-work/>. [Kasutatud 03 01 2021].
- [10] 강종빈, „A parametric study of deaerator spray nozzle for an improvement of deaeration efficiency,“ 한양대학교, 2017.
- [11] IEC, „iec-energy.by,“ TES DMK Group, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iec-energy.by/en/our-services/technology-equipment/water-supply-systems/deaerators/vacuum-deaerator>. [Kasutatud 15 11 2020].
- [12] Eurowater, „eurowater.com,“ Eurowater, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eurowater.com/water-treatment-plants/deaeration/vacuum-deaerator>. [Kasutatud 15 11 2020].
- [13] HydroGroup, „HydroGroup,“ HydroGroup, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hydrogroup.biz/products/process-water-treatment/chemical-degassing.html>. [Kasutatud 17 11 2020].

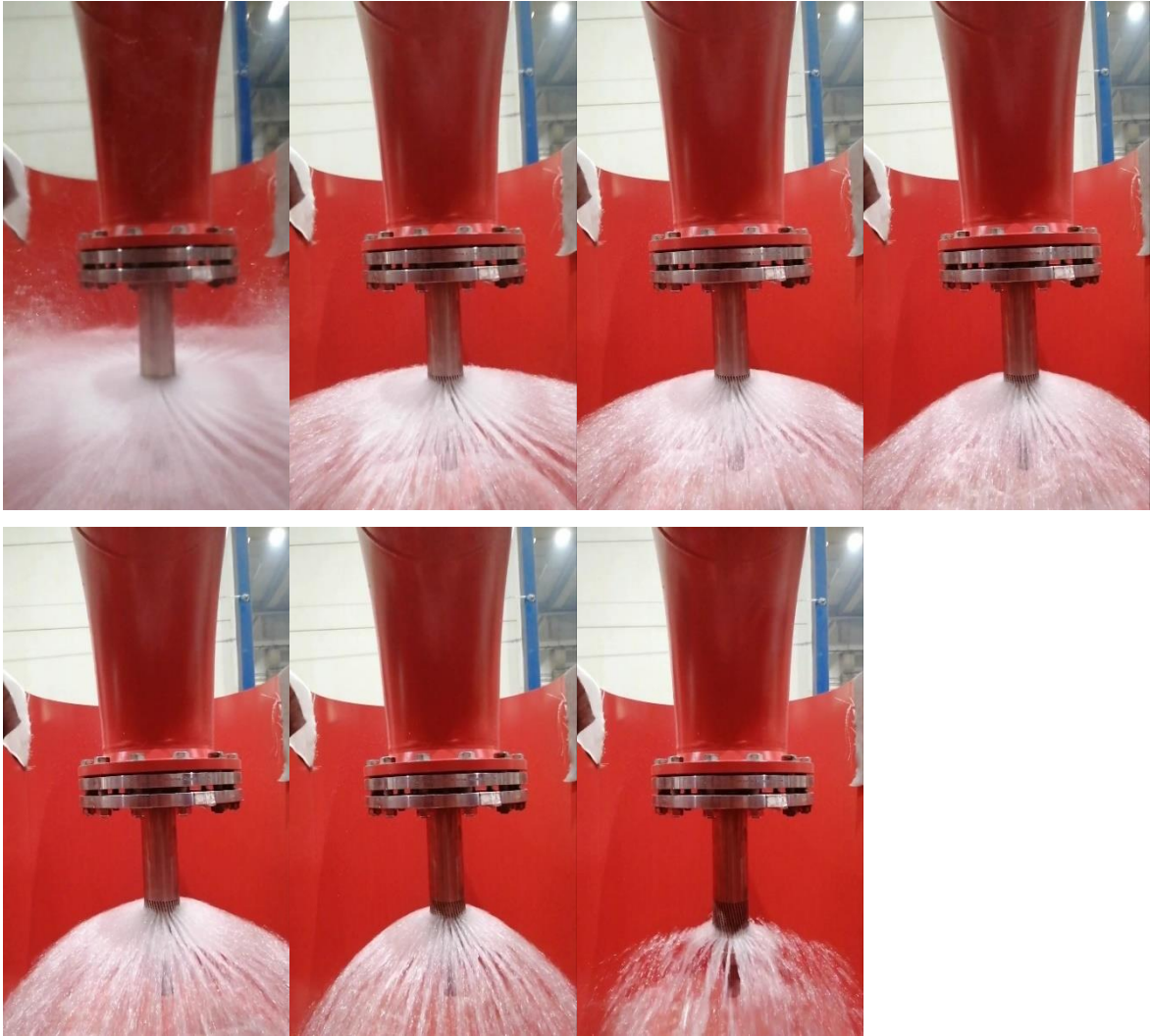
- [14] Limited. Spirax Sarco, „Spirax Sarco Limited.,” Spirax Sarco Limited., 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/pressurised-deaerators>. [Kasutatud 02 05 2021].
- [15] O. P. K. Roderick E. Athey ja K. C. Alan G. Furnish, „BOILERFEED WATER DEAERATOR SPRAY”. United States Patent Patent 4,445,537, 1 May 1984.
- [16] D. Douglas L. Stinson, C. b. o. G. Brian D. Stinson, L. S. M. Scott D. Ross, D. G. John C. Brunson ja B. M. Robert G. Anderson, „ADJUSTABLE DUAL CONE SPRAY PATTERN WALWE APPARATUS AND RELATED METHODS”. United States Patent 5,862,992 , 26 01 1999.
- [17] Company, Sterling Deaerator, „Sterling Deaerator Company,,” Sterling Deaerator Company, 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <http://sterlingdeaerator.com/tech.htm>. [Kasutatud 02 05 2021].
- [18] R. (. Jan Johan Aversch, „Spray type deaerator”. United States of America Patent 8,936,670 B2, 20 01 2015.
- [19] M. Co., „MFS Co.,” MFS Co., [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.mfs-co.com>. [Kasutatud 04 05 2021].
- [20] ESTANC AS, *Kirjavahetus ettevõtte ESTANC'iga*, Tallinn, 2021.
- [21] H. H. T. K. L. P. Aleksander Maastik, *Hüdraulika ja pumbad*, Tartu: Greif, 1995.
- [22] E. ToolBox, „Engineering ToolBox,,” Engineering ToolBox, 2003. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html. [Kasutatud 24 04 2021].

LISAD

Lisa 1 Vedrupeaga pihusti katsetulemused

Tabel L1.1 Vedrupeaga pihusti katsetulemused

Vedrupeaga pihusti			
Aeg	Rõhk	Visuaalne trajektoor	Vee langemis kaugus x- teljel
s	bar	kraadi	cm
1	1	90	147
2	0,8	80	147
3	0,4	75	55
4	0	70	40
5	0	65	40
6	0	60	30
7	0	55	30
8	0	50	30
9	0	45	30
10	0	45	30
11		kraan keerati kinni, pole ühtlane	
12		pole ühtlane	
13		pole ühtlane	
14		pole ühtlane	
15		pole ühtlane	
16		pole ühtlane	
17		pole ühtlane	
18		pole ühtlane	
19		pole ühtlane	
20		pole ühtlane	
21		pole ühtlane	
22		pole ühtlane	
23		pole ühtlane	
24		pole ühtlane	
25		pole ühtlane	
26		pole ühtlane	
27	0,9	Kraan keerati lahti	147
28	0,5	90	147
29	0,2	70	147
30	0	40	55
...
74	0	40	55
75	0	40	45
76	0	40	40
...
168	0	40	40
169	0	Ei teki enam lehvikut	30



Joonis L1.1 Vedrupeaga pihustipea katsete pildid vasakult ülevalt 1., 2., 3., 4., 5., 10. ja 20. sekundil



Joonis L1.2 Vedrupeaga pihustipea katsete pildid vasakult ülevalt 28., 29., 30., 47., 85., 160., 220. ja 230. sekundil

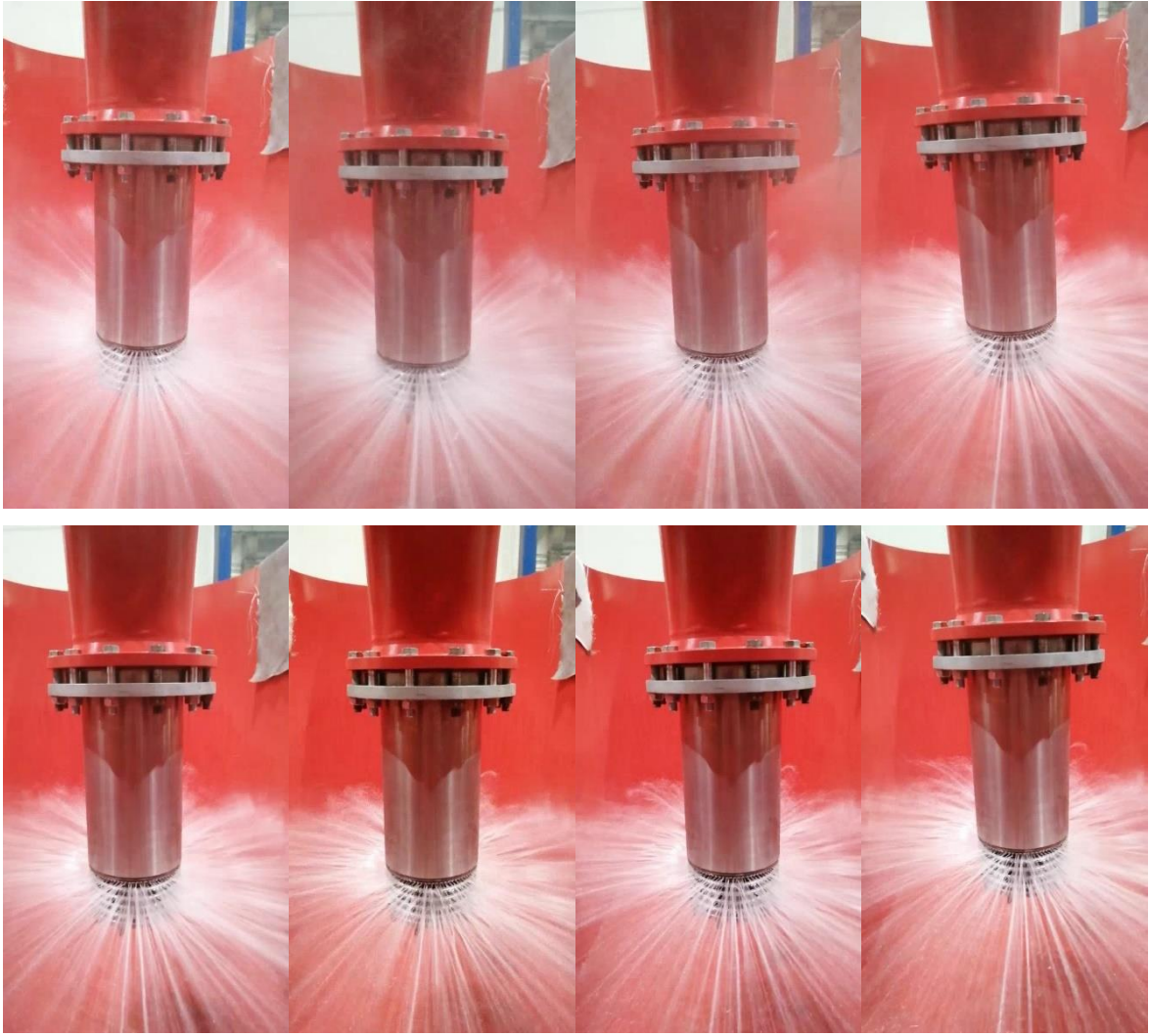
Lisa 2 Piluavadega pihusti katsetulemused

Tabel L2.1 Piluavadega pihusti katsetulemused

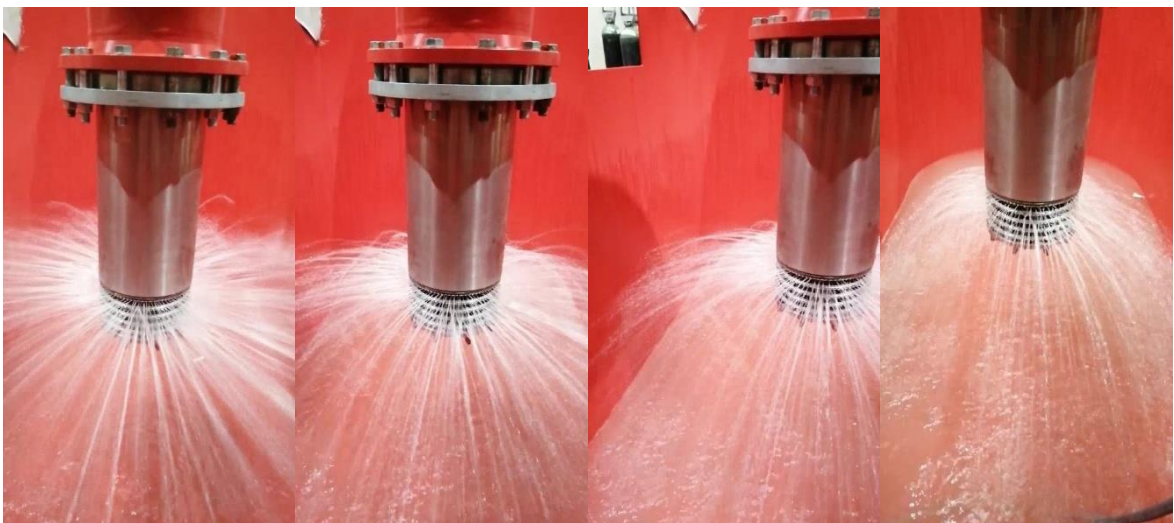
Piluavadega pihusti			
Aeg	Rõhk	Visuaalne trajektoor	Vee langemis kaugus x- teljel
s	bar	kraadi	cm
1	1,00	90	147
2	0,20	90	147
3	0,60	90	147
4	0,55	90	147
5	0,50	90	147
6	0,45	90	147
7	0,40	90	147
8	0,40	90	147
9	0,35	90	147
10	0,30	90	147
11	0,30	90	147
12	0,25	90	147
13	0,25	90	147
14	0,20	90	147
15	0,20	90	147
16	0,20	90	147
17	0,20	90	147
18	0,20	90	147
19	0,20	90	147
20	0,15	90	147
21	0,15	90	147
22	0,15	90	147
23	0,10	90	147
24	0,10	90	147
25	0,10	90	147
26	0,10	90	147
27	0,10	90	147
28	0,10	90	147
29	0,10	90	147
30	0,10	90	147
31	0,10	90	147
32	0,10	90	147
33	0,10	90	147
34	0,10	90	147
35	0,10	90	147
36	0,10	90	147
37	0,10	90	147
38	0,10	90	147
39	0,10	90	147

Piluavadega pihusti			
Aeg	Rõhk	Visuaalne trajektoor	Vee langemis kaugus x- teljel
s	bar	kraadi	cm
40	0,10	90	147
41	0,10	90	147
42	0,10	90	147
43	0,10	90	147
44	0,10	90	147
45	0,09	90	147
46	0,09	90	147
47	0,09	90	147
48	0,09	90	147
49	0,09	90	147
50	0,09	90	147
51	0,09	90	147
52	0,09	90	147
53	0,08	90	147
54	0,08	90	147
55	0,08	90	147
56	0,08	90	147
57	0,07	90	147
58	0,07	90	147
59	0,07	90	147
60	0,06	90	147
61	0,06	90	147
62	0,06	90	147
63	0,06	90	147
64	0,06	90	147
65	0,06	90	147
66	0,06	90	147
67	0,06	90	147
68	0,06	90	147
69	0,05	90	145
70	0,05	90	145
71	0,05	90	145
72	0,05	90	145
73	0,05	90	145
74	0,04	90	140
75	0,04	90	140
76	0,04	90	140
77	0,04	90	140
78	0,04	90	140
79	0,04	90	140
80	0,03	90	130
81	0,03	90	130
82	0,03	90	130

Piluavadega pihusti			
Aeg	Rõhk	Visuaalne trajektoor	Vee langemis kaugus x- teljel
s	bar	kraadi	cm
83	0,03	90	130
84	0,03	90	130
85	0,03	90	130
86	0,03	90	130
87	0,03	90	130
88	0,03	90	130
89	0,02	90	97
90	0,02	85	97
91	0,02	85	97
92	0,02	85	97
93	0,02	85	97
94	0,01	85	97
95	0,01	85	97
96	0,01	75	97
97	0,01	75	97
98	0,01	75	97
99	0,01	75	97
100	0,01	70	97
101	0,01	70	97
102	0,01	70	97
103	0	70	55
...
209	0	70	55
210	0	väike lehvik	45
...
279	0	väike lehvik	45
280	0	ei moodustu enam lehvikut	



Joonis L2.1 Piluavadega pihustipea katsete pildid vasakult ülevalt 1., 5., 10., 15., 20., 25., 30. ja 35. sekundil



Joonis L2.2 Piluavadega pihustipea katsete pildid vasakult 50., 100., 150. ja 210. sekundil

Lisa 3 Olemasoleva pihusti katsetulemused

Tabel L3.1 Olemasoleva pihusti katsetulemused

Olemasolev pihusti			
Aeg	Rõhk	Visuaalne trajektoor	Vee langemis kaugus x-teljel
s	bar	kraadi	cm
1	1.00	90 kraadi	147
2		90 kraadi	147
3		90 kraadi	147
4		90 kraadi	147
5		90 kraadi	147
6		90 kraadi	147
7		90 kraadi	147
8		90 kraadi	147
9		90 kraadi	147
10		90 kraadi	147
11		85 kraadi	147
12		85 kraadi	147
13		85 kraadi	147
14		85 kraadi	147
15		85 kraadi	147
16		85 kraadi	147
17		85 kraadi	147
18		85 kraadi	147
19		85 kraadi	147
20		85 kraadi	147
21		85 kraadi	147
22		85 kraadi	147
23		85 kraadi	147
24	0,15	85 kraadi	147
49		85 kraadi	147
50		85 kraadi	140
68		85 kraadi	140
69	0,12	85 kraadi	140
70		85 kraadi	140
104		Pole enam ühtlane lehvik, ei teki enam ühtlast veejuga	
119		85 kraadi	140
120	0,12	85 kraadi	140
121		85 kraadi	140
136		85 kraadi	110
173	0,11	85 kraadi	110
180		85 kraadi	100
189		85 kraadi	100
190		Ei teki enam juga	100



Joonis L3.1 Olemasoleva pihusti katsete pildid ülevalt vaskault 1., 5., 10., 15., 20., 80., 104. ja 190. sekundil