



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Virumaa kolledž

**Petroter III destilleerimiskoloni 3K-202  
rekonstrueerimine ettevõttes VKG OIL AS**

**Reconstruction of Petroter III distillation column 3K-202 of VKG  
OIL AS**

MASINAEHITUS- JA ENERGIATEHNOLOOGIA PROTSESSIDE JUHTIMINE LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Vladimirov

Üliõpilaskood: 178526

Juhendaja: Andres Petritshenko, insener

Kohtla-Järve, 2021

## **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.

"26" 05. 2021.

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele  
"26" 05. 2021.

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele

lubatud

"26" 05. 2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS**

Mina Aleksandr Vladimirov (sünnikuupäev: 21.09.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Petroter III destilleerimiskolonne 3K-202 rekonstrueerimine ettevõttes VKG OIL AS , mille juhendaja on Andres Petritshenko.

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas 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 punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.



# SISSUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	6
SISSEJUHATUS .....	8
1 KIRJELDAV OSA .....	9
2 ARVUTUSLIK OSA.....	10
2.1 Sisemise rõhuga koormatud silindersein .....	11
2.1.1 Silindersein $D_i = 2600$ mm .....	11
2.1.2 Silindersein $D_i = 1200$ mm .....	12
2.2 Sisemise rõhuga koormatud kumerots.....	13
2.2.1 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=2624$ mm.....	13
2.2.2 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=1220$ mm.....	15
2.3 Välisrõhuga koormatud silinderseina arvutus .....	17
2.3.1 Silindersein $D_i=2600$ mm .....	17
2.3.2 Silindersein $D_i=1200$ mm .....	18
2.4 Välisrõhuga koormatud kumerots .....	19
2.4.1 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=2624$ .....	19
2.4.2 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=1220$ mm .....	20
2.5 Üksik-avade kontroll silindrilises seinas.....	20
2.5.1 Tuts DN800 silinderseinas $D_e=2624$ mm .....	21
2.5.2 Luuk DN600 silinderseinas $D_e=1220$ mm .....	23
2.6 Kumerotsas oleva ava kontrollarvutused.....	25
KOKKUVÕTE .....	28
SUMMARY .....	30
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	33

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- $A$  – suhteline pikenemine pärast rebenemist, %;
- $A_{f_s}; A_{f_w}; A_{f_b}; A_{p_s}; A_{p_b}; A_s$  – silinderseina tugevdatav pind, mm<sup>2</sup>;
- $C$  – korrosiooni varutegur, mm;
- $d_{eb}$  – tutsi välisläbimõõt, mm;
- $D_i$  – korpuse siseläbimõõt, mm;
- $d_{ib}$  – tutsi siseläbimõõt, mm;
- $D_m$  – korpuse siseläbimõõt koos seinapaksuga, mm;
- $D_u$  – korpuse välisläbimõõt, mm;
- $E$  – elastsusmoodul 370°C juures, MPa;
- $e$  – seinapaksus, mm;
- $e_a$  – korpuse seina paksus, arvestades korrosiooni, mm;
- $e_{ab}$  – tutsi seina analüütiline paksus, mm;
- $e_{as}$  – silinderseina analüütiline paksus, mm;
- $e_{min}$  – minimaalne seinapaksus, mm;
- $e_n; e_{nb}$  – valitud seina paksus, mm;
- $e_{Nmin}$  – minimaalne seinapaksus kõverduses, mm;
- $e_s; e_y; e_b$  – minimaalselt lubatus seinapaksus, mm;
- $f_b$  – pinge töötingimustes, MPa;
- $f_s; f_{ob}$  – arvutuslik pinge, MPa;
- $f_{test}$  – arvutuslik pinge testimisel, MPa;
- $f_{20}; f_{370}$  – arvutuslik pinge 20°C ja 370°C juures, MPa;
- $h'$  – kumerotsa kõrgus, mm;
- $l_{bo}$  – tutsi arvutuslik pikkus, mm;
- $L$  – silinderseina pikkus, mm;

$P$  – arvutuslik rõhk, MPa;

$P_m; P_v; P_r$  – arvutuslik rõhk, MPa;

$P_{max}$  – Maksimaalselt lubatav rõhk, MPa;

$P_s; P_y; P_b$  – maksimaalselt lubatud surve, MPa;

$P_{t1}; P_{t2}$  – minimaalne katserõhk keres, MPa;

$R$  – kumerotsi suur radius, mm;

$r$  – kumerotsi väike radius, mm;

$Rm_{20}; Rm_{370}$  – tõmbetugevus 20°C ja 370°C juures, MPa;

$\delta_e$  – seinapaksuse tolerants, mm;

$\sigma_e$  – arvutuslik pinge, MPa;

# SISSEJUHATUS

Eesti põlevkivitööstus sai oma alguse 1916. aastal, sündides esimese vabariigi ajal. Alates 1924. aastast põlevkivitööstus varustas Eestimaa linnasid soojusega, gaasiga ja valgusega.

Kohtla-Järvel toodeti aastate vältel erinevat toodangut:

- põlevkiviõli
- peenkemikaale
- epoksüvaiku
- lämmastikväetist
- bituumeni
- juuksevärvi

Täna VKG toodab ja müüb peamiselt peenkeemiatoodangut ja põlevkiviõli.

Põlevkivist energia saamise tehnoloogia pidevalt kasvas ja laienes

Põlevkivitootmise asutamise algusest põlevkivist energia tootmise efektiivsus moodustas 30-40%. Tänapäeval efektiivsus ületab 80%.

VKG Oil AS-il on kaks tehnoloogiat, mida nad kasutavad põlevkiviõli tootmiseks, s.o. Petroter ja Kiviter tootmised. Hetkeseisuga on ehitatud tehased Petroter I, Petroter II ja Petroter II ja kolm Kiviter tootmise osakonda.

Kuus sellist seadet töötlevad aastas umbes 5 miljonit tonni põlevkivi, Petroter tehased võtavad enda kanda 70% sellest koormusest.

2015. aastal ehitati lõpuni ja anti töösse Petroter III seade, mille ülesannete hulka kuulub peendisperse tehnoloogilise põlevkivi termiline lagundamine vedelate põlevkivitoodete saamise eesmärgil, need on: bensiini fraktsioon, diisli fraktsioon, raske ja kerge masuut, destillatsioonijääk, fenoolvesi ja kõrge kalorsusega poolkoksigaas. Peale kuueaastast eksploateerimist Petroter III tehas on ikka veel uusim VKG seade, kuid selle aja jooksul paljud seadmed allusid mehaanilisele kulumisele, mõned neist olid juba välja vahetatud ja remonditud, ülejäänud aga ootavad oma järjekorda ja piisavat finantseerimist.



# 1 KIRJELDAV OSA

Antud diplomitöö uurimise objektiks autor valis Petroter III kondensatsiooniosakonna ühe peamistest aparaatidest, s.o. destillatsioonikoloni 3K-202.

Kolonn on ettenähtud puhastatud auru-gaasisegu destilleerimiseks järgmisteks fraktsioonideks: destillatsiooni jääk, raske masuut ja keskmine fraktsioon.

Kolonn 3K-202 on taldriktüüpi massivahetusseade. Koloni diameeter on 2 600 mm, põhiosa kõrgus on 21 150 mm, kuubiosa on 3 200 mm diameetri juures 1 200 mm. Kolonn on paigaldatud vundamendile kestaga, kõrgusega 12 000 mm, mis on vahetult ühendatud koloni korpuse põhiosaga. Kolonn on varustatud 24 taldrikuga. Koloni korpuse materjaliks on P265GH marki süsinikteras. Koloni kõik sisemised komponendid on valmistatud AISI 316L marki legeeritud terasest.

Koloni elemendid (korpus, tugirõngad ja kandeplaadid, taldrikud ja ülevalutaskud), mis on valmistatud erinevatest materjalidest (terasmaterjalidest) on kokku pandud ühisesse konstruktsiooni.

Ekspluateerimise algusest peale toimub kolonnikorpuse ebaühtlane paksuse kulumine kohtades, kus sisemised tugielemendid on ühendatud korpusega. Samuti toimub ka tugirõngaste paksuse kulumine korpuse ja taldriku vahelistes kohtades. Antud defektid viitavad elektrikeemilise kontaktkorrosiooni protsessidele.

Kontaktkorrosiooniks nimetatakse elektrikeemilist korrosiooni, mis on põhjustatud metallide kontaktiga, millel on erinevad statsionaarsed potentsiaalid antud elektrolüüdis. Vaadeldaval juhul on need erinevat marki terasmaterjalid, millest on valmistatud koloni konstruktiivosa. Seejuures tekib korrosiooniline galvaaniline element, mille töö mõjutab iga kontakteeruva metalli korrodeerumise kiirust ja on konstruktsiooni paikkorrodeerimise hävinemise põhjuseks. Kontaktkorrosiooni mõju tulemusena 3K-202 korpuses tekkivad läbivad augud, alates 5-ndast kuni 15-nda taldrikuni mööda koloni kõrgust, mille kaudu toimuvad aurugaasisegu ja vedela toodangu läbilasked. Korpuses aukude tekkimine toob iga kord endaga kaasa tsehhi avariilist seiskamist, kuna sellisel juhul tekib suur põlengu oht.

Vaid remonditööde läbiviimiseks, mis olid seotud läbilaskete kõrvaldamisega, tugirõngaste ja koloni muude konstruktiivelementide taastamisega oli viimase kahe aasta jooksul kulutatud ligikaudu 100 000 eurot.

Antud lõputöö eesmärgiks on uurida, kas on võimalik asendada destilleerimiskoloni 3K-202 olemasolev korpuse sein õhema roostevaba materjaliga. Selleks teostab autor järgnevas tugevusarvutused nii välis- kui ka siserõhule.

## 2 ARVUTUSLIK OSA

Tabel 1 - Arvutuse algandmed

Korpuse materjal	1.4404 (Grupp 8.1) [3]
Korpuse siseläbimõõt	$D_i = 2600/1200$ mm
Töötemperatuur	/ 120 °C
Arvutustemperatuur	370 °C
Töörõhk	$P_o = 0,03 / -0,012$ MPa
Arvutamiseks valitud rõhk	$P_d = 0,3 / -0,1$ MPa
Maksimaalselt lubatud rõhk	PS=0,3 MPa
Maksimaalne hüdrostaatiline rõhk:	
- Töötingimustes	0,04 MPa (alumises osas DN1200)
- Testimisel	0,2 MPa
Anuma maht	V=87 900 liitrit
Testimise grupp	3b
Piirpinged 20°C juures	$R_{p1,0/20} = 260$ MPa [3]
Piirpinged 375°C juures	$R_{p1,0/375} = 137$ MPa [3]
Korrosiooni varutegur	C = 1 mm
Elastsusmoodul 370°C juures	E = 170000 MPa

Leiame arvutuslikud pinged

$A=40-45\%$  ja  $R_{m20}=520$  MPa vastavalt [3]

$R_{m370} = 380$  MPa vastavalt [3]

Vastavalt tabelile [4]

$$f_{20} = \max \left[ \left( \frac{R_{(p1.0)20}}{1.5} \right); \min \left( \frac{R_{(p1.0)20}}{1.2}; \frac{R_{(p1.0)20}}{3} \right) \right] = \max \left[ \left( \frac{260}{1.5} \right); \min \left( \frac{260}{1.2}; \frac{520}{3} \right) \right] = 173.3 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

$$f_{370} = \max \left[ \left( \frac{R_{(p1.0)370}}{1.5} \right); \min \left( \frac{R_{(p1.0)370}}{1.2}; \frac{R_{(p1.0)370}}{3} \right) \right] = \max \left[ \left( \frac{137}{1.5} \right); \min \left( \frac{137}{1.2}; \frac{380}{3} \right) \right] = 114 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

$$f_{test} = \max \left( \frac{R_{(p1.0)20}}{1.05}; \frac{R_{(m)200}}{2} \right) = \max \left( \frac{260}{1.05}; \frac{520}{2} \right) = 260 \text{ MPa} \quad (2.3)$$

Minimaalne katserõhk keres [5]

$$P_{t1} = 1.25P_d \frac{f_{20}}{f_{370}} = 1.25 \cdot 0.3 \cdot \frac{173.3}{114} = 0.57 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

$$P_{t2} = 1.43PS = 1.43 \cdot 0.3 = 0.43 \text{ MPa} \quad (2.5)$$

Võtame katserõhuks

- vertikaalasendis -  $P_t = 0,57 \text{ MPa}$
- horisontaalasendis -  $P_t = 0,57 + 0,2$  (staatiline veesamba rõhk) =  $0,77 \text{ MPa}$

Kõik järgmised valemid on võetud standardist EN 13445-3 [4]

## 2.1 Sisemise rõhuga koormatud silindersein

### 2.1.1 Silindersein $D_i = 2600 \text{ mm}$

Tabel 2 - Silinderseina arvutuse algandmed

1.	Silinderseina siseläbimõõt	$D_i = 2600 \text{ mm}$
2.	Valitud seinapaksus	$e_n = 12 \text{ mm}$
3.	Seinapaksuse tolerants	$\delta_e = 0,3 \text{ mm}$ (EN 10029, klass B)
4.	Arvutuslik rõhk	$P = 0,3 \text{ MPa}$

Minimaalne seinapaksus lisadeta töötingimustes

$$e = \frac{PD_i}{2f_z - P} = \frac{0.3 \cdot 2600}{2 \cdot 114 \cdot 0.85 - 0.3} = 4.03 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Minimaalne seinapaksus lisadeta testimisel

$$e = \frac{P_t D_i}{2f_{testZ} - P_t} = \frac{0.77 \cdot 2600}{2 \cdot 260 \cdot 0.85 - 0.77} = 4.54 \text{ mm} \quad (2.7)$$

Minimaalne seinapaksus lisadega

$$e_{min} = e + C + \delta_e = 4.54 + 1 + 0.3 = 5.84 \text{ mm} \quad (2.8)$$

$$e_{min} = 5.84 < e_n = 12 \text{ mm}$$

Tingimus on täidetud.

Maksimaalselt lubatav rõhk seinapaksuse  $e_n=12\text{mm}$  juures töötingimustes

$$e_a = e_n - C - \delta_e = 12 - 1 - 0,3 = 10,7 \text{ mm} \quad (2.9)$$

$$D_m = D_i + e_a = 2600 + 10,7 = 2610,7 \text{ mm} \quad (2.10)$$

$$P_{max} = \frac{2fze_a}{D_m} = \frac{2 \cdot 114 \cdot 0,85 \cdot 10,7}{2610,7} = 0,8 \text{ MPa} > 0,3 \text{ MPa} \quad (2.11)$$

### 2.1.2 Silindersein $D_i = 1200 \text{ mm}$

Tabel 3 - Silinderseina arvutuse algandmed

1.	Silinderseina siseläbimõõt	$D_i = 1200 \text{ mm}$
2.	Valitud seinapaksus	$e_n = 10 \text{ mm}$
3.	Seinapaksuse tolerants	$\delta_e = 0,3 \text{ mm [12]}$

Arvutuslik rõhk arvestades hüdrostaatilist rõhku

$$P = 0,3 + 0,04 = 0,34 \text{ MPa} \quad (2.12)$$

Minimaalne seinapaksus lisadeta töötingimustes

$$e = \frac{PD_i}{2fz-P} = \frac{0,34 \cdot 1200}{2 \cdot 114 \cdot 0,85 - 0,34} = 2,11 \text{ mm} \quad (2.13)$$

Minimaalne seinapaksus lisadeta testimisel

$$e = \frac{P_t D_i}{2f_{test} z - P_t} = \frac{0,77 \cdot 1200}{2 \cdot 260 \cdot 0,85 - 0,77} = 2,1 \text{ mm} \quad (2.14)$$

Minimaalne seinapaksus lisadega, vastavalt valemite (2.8)

$$e_{min} = e + C + \delta_e = 2,11 + 1 + 0,3 = 3,41 \text{ mm} \quad (2.15)$$

$$e_{min} = 3,41 < e_n = 10 \text{ mm}$$

Tingimus on täidetud.

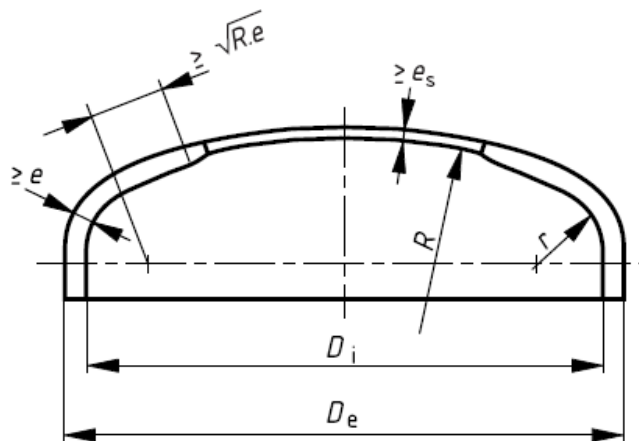
Maksimaalselt lubatav rõhk seinapaksuse  $e=10\text{mm}$  juures töötingimustes, vastavalt valemile (2.9), (2.10), (2.11)

$$e_a = e_n - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm}$$

$$D_m = D_i + e_a = 1200 + 8,7 = 1208,7 \text{ mm} \quad (2.16)$$

$$P_{max} = \frac{2fze_a}{D_m} = \frac{2 \cdot 114 \cdot 0,85 \cdot 8,7}{1208,7} = 1,39 \text{ MPa} > 0,34 \text{ MPa}$$

## 2.2 Sisemise rõhuga koormatud kumerots



Joonis 1 – Kumerots

### 2.2.1 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=2624 \text{ mm}$

Tabel 4 - Arvutamise lisaandmed

1.	Suur radius	$R = 0,8 \cdot D_u = 2100 \text{ mm}$
2.	Väike radius	$r = 0,154 \cdot D_u = 404 \text{ mm}$
3.	Kumerotsa kõrgus	$h' = 661 \text{ mm}$
4.	Minimaalne seinapaksus kõverduses	$e_{Nmin} = 12 \text{ mm}$ (ei ole miinushälvet)

Töötingimustes

Arvutuslik rõhk:  $P=0,3$  MPa.

Vajalik seinapaksus e peab olema suurem, kui  $e_s$ ,  $e_y$ ,  $e_b$ .

$$e_s = \frac{PR}{2fz-0,5P} = \frac{0,3*2100}{2*114*0,85-0,5*0,3} = 3,25 \text{ mm} \quad (2.17)$$

$$e_y = \frac{\beta * P(0,75R+0,2D_i)}{f} \quad (2.18)$$

kus:  $\beta = 0,76$  - lähtudes suhetest:

$$\frac{r}{D_i} = \frac{404}{2600} = 0,16 \quad \text{ja} \quad \frac{P}{f} \left(0,75 + 0,2 \frac{D_i}{R}\right) = \frac{0,3}{114} \left(0,75 + 0,2 \frac{2600}{2100}\right) = 0,0026 \quad (2.19)$$

vastavalt valemite (2.18)

$$e_y = \frac{\beta * P(0,75R+0,2D_i)}{f} = \frac{0,76*0,3(0,75*2100+0,2*2600)}{114} = 4,19 \text{ mm}$$

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[ \frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = (0,75 * 2100 + 0,2 * 2600) \left[ \frac{0,3}{111*74} \left(\frac{2600}{404}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = 6,4 \text{ mm} \quad (2.20)$$

$$f_b = \frac{R_{p0,2/t}}{1,5} = 111/1,5 = 74 \text{ MPa} \quad (2.21)$$

Testimisel, vastavalt valemite (2.15), (2.16), (2.17), (2.18), (2.19)

$$e_s = \frac{0,77*2100}{2*260*0,85-0,5*0,77} = 3,66 \text{ mm}$$

$$\frac{P}{f} \left(0,75 + 0,2 \frac{D_i}{R}\right) = \frac{0,77}{260} \left(0,75 + 0,2 \frac{2600}{2100}\right) = 0,00295$$

$\beta = 0,75$

$$e_y = \frac{0,75*0,77(0,75*2100+0,2*2600)}{260} = 4,65 \text{ mm} \quad (2.22)$$

$$f_b = \frac{R_{p0,2/t}}{1,05} = 220/1,05 = 209,5 \text{ mm}$$

$$e_b = (0,75 * 2100 + 0,2 * 2600) \left[ \frac{0,77}{111*209,5} \left(\frac{2600}{404}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = 6,01 \text{ mm}$$

Minimaalne seinapaksus lisadega

$$e_{min} = e_b + C = 6,41 + 1 = 7,41 \text{ mm} \quad (2.23)$$

$$e_{min} = 7,41 < e_n = 12 \text{ mm}$$

Tingimus on täidetud.

Valitud seinapaksuse puhul ei tohi maksimaalselt lubatud surve olla suurem, kui  $P_s$ ;  $P_y$ ;  $P_b$ .

$$e_a = e_n - C = 12 - 1 = 11 \text{ mm} \quad (2.24)$$

$$P_s = \frac{2fze_a}{R+0,5e_a} = \frac{2 \cdot 114 \cdot 0,85 \cdot 11}{2100+0,5 \cdot 11} = 1,01 \text{ MPa} \quad (2.25)$$

$$P_y = \frac{fe_a}{\beta(0,75R+0,2D_i)} = \frac{114 \cdot 11}{0,69(0,75 \cdot 2100+0,2 \cdot 2600)} = 0,867 \text{ MPa} \quad (2.26)$$

Kus:  $\beta = 0,69$  - lähtudes suhetest:

$$\frac{r}{D_i} = \frac{404}{2600} = 0,16 \quad \text{ja} \quad \frac{e}{R} = \frac{11}{2100} = 0,0052 \quad (2.27)$$

$$P_b = 111f_b \left( \frac{e_a}{0,75R+0,2 \cdot 2600} \right)^{1,5} \left( \frac{r}{D_i} \right)^{0,825} = 111 \cdot 74 \left( \frac{11}{0,75 \cdot 2100+0,2 \cdot 2600} \right)^{1,5} \left( \frac{404}{2600} \right)^{0,825} = 0,672 \text{ MPa} \quad (2.28)$$

$$P_{max} = 0,672 > P = 0,3 \text{ MPa}$$

Tingimus on täidetud.

## 2.2.2 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=1220 \text{ mm}$

Tabel 5 - Arvutamise lisaandmed

1. Suur raadius	$R = 0,8 \cdot D_u = 976 \text{ mm}$
2. Väike raadius	$r = 0,154 \cdot D_u = 188 \text{ mm}$
3. Korbbogen kumerotsa kõrgus	$h' = 305 \text{ mm}$
4. Minimaalne seinapaksus kõverduses	$e_{Nmin} = 10 \text{ mm}$ (ei ole miinushälvet)

Töötingimustes

Arvutuslik rõhk arvestades hüdrostaatilist rõhku

$$P = 0,3 + 0,04 = 0,34 \text{ MPa}$$

Vajalik seinapaksus  $e$  peab olema suurem, kui  $e_s$ ,  $e_y$ ,  $e_b$ . vastavalt valemite (2.17), (2.18)

$$e_s = \frac{PR}{2fz-0,5P} = \frac{0,34 \cdot 976}{2 \cdot 114 \cdot 0,85 - 0,5 \cdot 0,34} = 1,71 \text{ mm} \quad (2.29)$$

$$e_y = \frac{\beta P(0,75R+0,2D_i)}{f}$$

Kus,  $\beta = 0,75$  - lähtudes suhetest, vastavalt valemite (2.18), (2.19), (2.20), (2.21)

$$\frac{r}{D_i} = \frac{188}{1200} = 0,16 \quad \text{ja} \quad \frac{P}{f} \left(0,75 + 0,2 \frac{D_i}{R}\right) = \frac{0,34}{114} \left(0,75 + 0,2 \frac{1200}{976}\right) = 0,00297$$

$$e_y = \frac{\beta P (0,75R + 0,2D_i)}{f} = \frac{0,75 * 0,34 (0,75 * 976 + 0,2 * 1200)}{114} = 2,17 \text{ mm} \quad (2.30)$$

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[ \frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = (0,75 * 976 + 0,2 * 1200) \left[ \frac{0,34}{111 * 74} \left(\frac{1200}{188}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = 3,22 \text{ mm}$$

$$f_b = \frac{R_{p0,2/t}}{1,5} = 111/1,5 = 74 \text{ MPa}$$

Testimisel, vastavalt valemite (2.22)

$$e_s = \frac{0,77 * 976}{2 * 260 * 0,85 - 0,5 * 0,77} = 1,7 \text{ mm}$$

$$\frac{P}{f} \left(0,75 + 0,2 \frac{D_i}{R}\right) = \frac{0,77}{260} \left(0,75 + 0,2 \frac{1200}{976}\right) = 0,00295$$

$$\beta = 0,75 \quad (2.31)$$

$$e_y = \frac{0,75 * 0,77 (0,75 * 976 + 0,2 * 1200)}{260} = 2,16 \text{ mm}$$

$$f_b = \frac{R_{p0,2/t}}{1,05} = 220/1,05 = 209,5 \text{ MPa}$$

$$e_b = (0,75 * 976 + 0,2 * 1200) \left[ \frac{0,77}{111 * 209,5} \left(\frac{1200}{188}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = 2,78 \text{ mm}$$

Minimaalne seinapaksus lisadega, vastavalt valemite (2.23)

$$e_{min} = e_b + C = 3,22 + 1 = 4,22 \text{ mm} \quad (2.32)$$

$$e_{min} = 4,22 < e_n = 10 \text{ mm}$$

Tingimus on täidetud.

Valitud seinapaksuse puhul ei tohi maksimaalselt lubatud surve olla suurem, kui  $P_s$ ;  $P_y$ ;  $P_b$ , vastavalt valemite (2.24), (2.25), (2.26), (2.27), (2.28)

$$e_a = e_n - C = 10 - 1 = 9 \text{ mm}$$

$$P_s = \frac{2fze_a}{R + 0,5e_a} = \frac{2 * 114 * 0,85 * 9}{976 + 0,5 * 9} = 1,78 \text{ MPa}$$



$$P_y = \frac{f e_a}{\beta(0,75R+0,2D_i)} = \frac{114 \cdot 9}{0,63(0,75 \cdot 976 + 0,2 \cdot 1200)} = 1,675 \text{ MPa} \quad (2.33)$$

Kus,  $\beta = 0,63$  - , lähtudes suhetest

$$\frac{r}{D_i} = \frac{188}{1200} = 0,16 \quad \text{ja} \quad \frac{e}{R} = \frac{9}{976} = 0,0092$$

$$P_b = 111 f_b \left( \frac{e_a}{0,75R+0,2 \cdot 2600} \right)^{1,5} \left( \frac{r}{D_i} \right)^{0,825} = 111 \cdot 74 \left( \frac{9}{0,75 \cdot 976 + 0,2 \cdot 1200} \right)^{1,5} \left( \frac{188}{1200} \right)^{0,825} = 1,586 \text{ MPa}$$

$$P_{max} = 1,586 > P = 0,34 \text{ MPa}$$

Tingimus on täidetud.

## 2.3 Välisrõhuga koormatud silinderseina arvutus

### 2.3.1 Silindersein $D_i=2600$ mm

Arvutuslik silinderseina pikkus:  $L=3000$  mm

Arvutuslik pinge  $\sigma_e = R_{p0,2/t}/1,25 = 111/1,25 = 88,8$  MPa

Kontrollime valitud seinapaksust  $e_n = 12$  mm.

Vastavalt valemite (2.9)

$$e_a = e_n - C - \delta_e = 12 - 1 - 0,3 = 10,7 \text{ mm} \quad (2.34)$$

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_a}{R} = \frac{88,8 \cdot 10,7}{1305,4} = 0,73 \text{ MPa} \quad (2.35)$$

Kus,  $R = \frac{D_m}{2}$  - - silinderseina keskmine raadius.

$$P_m = \frac{E \cdot e_a \cdot \epsilon}{D}, \text{ kus} \quad (2.36)$$

$\epsilon = 0,0003$  ja järgnevate suhete alusel

$$\frac{L}{2R} = \frac{300}{2 \cdot 1305,4} = 1,15; \quad (2.37)$$

$$\frac{2R}{e_a} = \frac{2 \cdot 1305,4}{10,7} = 244 \quad (2.38)$$

Vastavalt valemite (2.36)

$$P_m = \frac{170000 \cdot 10,7 \cdot 0,0003}{1305,4} = 0,418 \text{ MPa} \quad (2.39)$$

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{0,418}{0,73} = 0,573, \text{ järelikult } \frac{P_r}{P_v} = 0,28 \quad (2.40)$$

$$P_r = 0,28 \cdot P_y = 0,28 \cdot 0,73 = 0,2 \text{ MPa} \quad (2.41)$$

Peab olema täidetud tingimus

$$P < \frac{P_r}{S} = \frac{0,2}{1,5} = 0,133 \text{ MPa, kus } P - \text{ arvutuslik rõhk.}$$

$$S=1,5$$

$$0,133 > 0,1 \text{ MPa}$$

Tingimus on täidetud.

### 2.3.2 Silindersein $D_i=1200 \text{ mm}$

Silinderseina arvutuslik pikkus

$$L = L'_s + 0,4h' = 3400 + 0,4 \cdot 305 = 3522 \text{ mm} \quad (2.42)$$

Arvutuslik pinge

$$\sigma_e = R_{p0,2/t}/1,25 = 111/1,25 = 88,8 \text{ MPa} \quad (2.43)$$

Kontrollime valitud seinapaksust  $e_n= 10 \text{ mm}$

Vastavalt valemite (2.34), (2.35), (2.36), (2.37), (2.38), (2.39), (2.40), (2.41)

$$e_a = e_n - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm}$$

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_a}{R} = \frac{88,8 \cdot 8,7}{604,4} = 1,28 \text{ MPa,}$$

kus R – sein keskmine raadius.

$$P_m = \frac{E \cdot e_a \cdot \epsilon}{D}, \text{ kus}$$

$\epsilon = 0,00026$  ja järgnevate suhete alusel

$$\frac{L}{2R} = \frac{3522}{2 \cdot 604,4} = 2,91; \quad (2.44)$$

$$\frac{2R}{e_a} = \frac{2 \cdot 604,4}{8,7} = 139$$

$$P_m = \frac{170000 \cdot 8,7 \cdot 0,00026}{604,4} = 0,636 \text{ MPa}$$

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{0,636}{1,28} = 0,5, \text{ järelikult } \frac{P_r}{P_y} = 0,251$$

$$P_r = 0,251 \cdot P_y = 0,251 \cdot 1,28 = 0,32 \text{ MPa}$$

Peab olema täidetud tingimus

$$P < \frac{P_r}{S} = \frac{0,32}{1,5} = 0,21 \text{ Mpa, kus } P - \text{ arvutuslik surve.}$$

$$S=1,5$$

$$0,21 > 0,1 \text{ MPa}$$

Tingimus on täidetud. Võtame  $e_n=10$  mm.

## 2.4 Välisrõhuga koormatud kumerots

### 2.4.1 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=2624$

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.43)

$$\sigma_e = R_{p0,2/t}/1,25 = 111/1,25 = 88,8 \text{ MPa} \quad (2.45)$$

Valime seinapaksuseks  $e_n= 12$  mm.

Kontrollime valitud seinapaksust

Vastavalt valemite (2.24)

$$e_a = e_n - C = 12 - 1 = 11 \text{ mm} \quad (2.46)$$

$$P_y = \frac{2\sigma_e \cdot e_a}{R} = \frac{2 \cdot 88,8 \cdot 11}{2100} = 0,93 \text{ MPa} \quad (2.47)$$

$$P_m = \frac{1,21 \cdot E \cdot e_a^2}{R^2} = \frac{1,21 \cdot 170000 \cdot 11^2}{2100^2} = 5,64 \text{ MPa} \quad (2.48)$$

Vastavalt valemite (2.40)

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{5,64}{0,93} = 6,06, \text{ järelikult } \frac{P_r}{P_y} = 0,56 \quad (2.49)$$

Vastavalt valemite (2.41)

$$P_r = 0,56 \cdot P_y = 0,56 \cdot 0,93 = 0,52 \text{ MPa} \quad (2.50)$$

Peab olema täidetud järgmine tingimus

$$P = 0,1 < \frac{P_r}{S} = \frac{0,52}{1,5} = 0,35 \text{ Mpa, kus } P - \text{ arvutuslik rõhk.}$$

Tingimus on täidetud.

## 2.4.2 Kumerots DIN 28013 (Korbbogen), $D_u=1220$ mm

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.43)

$$\sigma_e = R_{p0,2/t}/1,25 = 111/1,25 = 88,8 \text{ MPa} \quad (2.51)$$

Valime seinapaksuseks  $e_n = 10$  mm.

Kontrollime valitud seinapaksust, vastavalt valemite (2.24), (2.46), (2.47), (2.48), (2.49), (2.50)

$$e_a = e_n - C = 10 - 1 = 9 \text{ mm}$$

$$P_y = \frac{2\sigma_e \cdot e_a}{R} = \frac{2 \cdot 88,8 \cdot 9}{976} = 1,638 \text{ MPa}$$

$$P_m = \frac{1,21 \cdot E \cdot e_a^2}{R^2} = \frac{1,21 \cdot 170000 \cdot 9^2}{976^2} = 17,5 \text{ MPa} \quad (2.52)$$

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{17,5}{1,638} = 10,7, \text{ jarelikut } \frac{P_r}{P_y} = 0,57$$

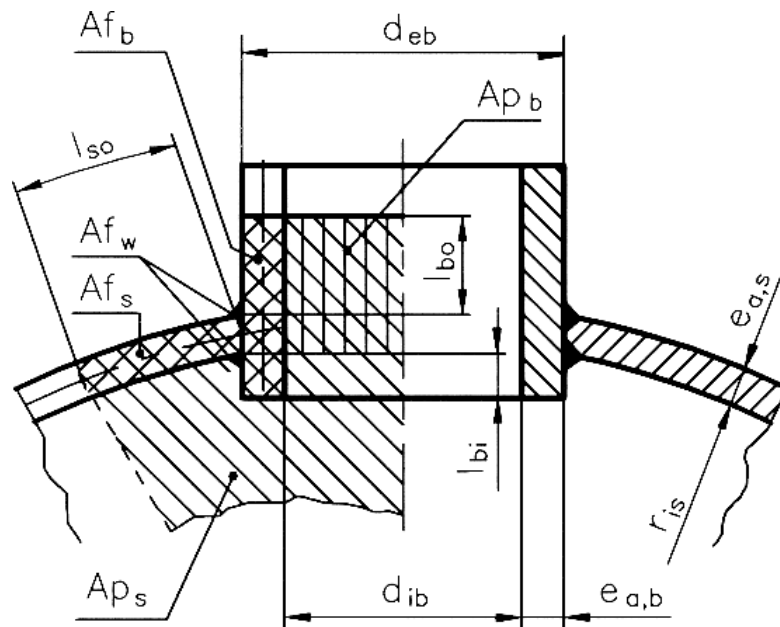
$$P_r = 0,57 \cdot P_y = 0,57 \cdot 1,638 = 0,93 \text{ MPa}$$

Peab olema täidetud järgmine tingimus

$$P = 0,1 < \frac{P_r}{S} = \frac{0,93}{1,5} = 0,62 \text{ Mpa, kus } P - \text{ arvutuslik rõhk.}$$

Tingimus on täidetud.

## 2.5 Üksik-avade kontroll silindrilises seinas



Joonis 2 - Üksik-avade kontroll silindrilises seinas

## 2.5.1 Tuts DN800 silinderseinas $D_e=2624$ mm

Tabel 6 - Arvutuse algandmed

1.	Tutsi välisläbimõõt	$d_{eb} = 813$ mm
2.	Tutsi seinapaksus:	$e_{nb} = 10$ mm
3.	Lehe paksuse tolerants	$\delta_e = 0,3$ mm [12]
4.	Silinderseina siseraadius:	$r_{is} = 1300$ mm
5.	Silinderseina paksus:	$e_n = 10$ mm

Silinderseina analüütiline paksus

$$e_{as} = e_n - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm} \quad (2.53)$$

Tutsi seina analüütiline paksus

$$e_{ab} = e_{nb} - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm} \quad (2.54)$$

Tugevdatavate avade jaoks peab olema täidetud tingimus

$$(Af_s + Af_w)(f_s - 0,5P) + Af_b(f_{ob} - 0,5P) \geq P(Ap_s + Ap_b) \quad (2.55)$$

Tutsi arvutuslik pikkus

$$I_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_{ab}) \cdot e_{ab}} = \sqrt{(813 - 8,7) \cdot 8,7} = 83,65 \text{ mm} \quad (2.56)$$

Silinderseina tugevdatav pind

$$I_{so} = \sqrt{(2r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = \sqrt{(2 \cdot 1300 + 10,7) \cdot 10,7} = 167,1 \text{ mm} \quad (2.57)$$

$$Af_s = e_{as} \cdot I_{so} = 10,7 \cdot 167,1 = 1788 \text{ mm}^2 \quad (2.58)$$

$$Af_b = e_b \cdot (I_{bo} + I_{bi} + e_{as}) = 8,7 \cdot (83,65 + 10 + 10,7) = 908 \text{ mm}^2 \quad (2.59)$$

$$Ap_s = A_s + 0,5d_{ib} \cdot e_{as}, \text{ kus} \quad (2.60)$$

$$A_s = r_{is} \cdot (I_{so} + 0,5d_{eb}) = 1300 \cdot (167,1 + 0,5 \cdot 813) = 745680 \text{ mm}^2 \quad (2.61)$$

$$d_{ib} = d_{eb} - 2e_{ab} = 813 - 2 \cdot 8,7 = 795,6 \text{ mm} - \text{tutsi siseläbimõõt} \quad (2.62)$$

Vastavalt valemite (2.60)

$$Ap_s = A_s + 0,5d_{ib} \cdot e_{as} = 745680 + 0,5 \cdot 795,6 \cdot 10,7 = 749936 \text{ mm}^2 \quad (2.63)$$

$$Ap_b = 0,5d_{ib} \cdot (I_{bo} + e_{as}) = 0,5 \cdot 795,6 \cdot (83,65 + 10,7) = 37532 \text{ mm}^2 \quad (2.64)$$

Töötingimustes

$$f_s = f = 114 \text{ MPa}$$

Z = 0,85 - keevitustegur

$$f_b = f \cdot Z = 114 \cdot 0,85 = 97 \text{ MPa} \quad (2.65)$$

Arvutuslik pinge

$$f_{ob} = \min(f_s; f_b) = \min(114; 97) = 97 \text{ MPa} \quad (2.66)$$

Vastavalt valemite (2.55)

$$(1788 + 0)(114 - 0,5 \cdot 0,3) + 908(97 - 0,5 \cdot 0,3) = 203564 + 87940 = 291504 \text{ N} \quad (2.67)$$

$$0,3(749936 + 37532) = 236240 \text{ N.}$$

$$291504 \text{ N} > 236240 \text{ N}$$

Tingimus on täidetud.

Leiame maksimaalselt lubatud rõhu

$$P_{max} = \frac{(Af_s + Af_w)f_s + Af_b f_{ob}}{(Ap_s + Ap_b) + 0,5(Af_s + Af_w + Af_b + Af_p)} = \frac{(1788+0) \cdot 114 + 908 \cdot 97}{(749936+37532) + 0,5(1788+0+908+0)} = 0,37 \text{ MPa} \quad (2.68)$$

$$0,37 \text{ MPa} > 0,3 \text{ MPa}$$

Tugevustingimus on täidetud.

Testimisel

$$f_s = f = 260 \text{ MPa}$$

Vastavalt valemite (2.65)

$$f_b = f \cdot Z = 260 \cdot 0,85 = 221 \quad (2.69)$$

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.66), (2.67)

$$f_{ob} = \min(f_s; f_b) = \min(260; 221) = 221 \text{ MPa}$$

$$(1788 + 0)(260 - 0,5 \cdot 0,77) + 908(221 - 0,5 \cdot 0,77) = 464191 + 200318 = 664509 \text{ N} \quad (2.70)$$

$$0,77(749936 + 37532) = 606350 \text{ N}$$

$$664509 \text{ N} > 606350 \text{ N}$$

Tingimus on täidetud.

## 2.5.2 Luuk DN600 silinderseinas $D_e=1220 \text{ mm}$

Tabel 7 - Arvutuse algandmed

1.	Tutsi välisläbimõõt	$d_{eb} = 610 \text{ mm}$
2.	Tutsi seinapaksus:	$e_{nb} = 10 \text{ mm}$
3.	Lehe paksuse tolerants	$\delta_e = 0,3 \text{ mm}$ [12]
4.	Silinderseina siseraadius:	$r_{is} = 600 \text{ mm}$
5.	Silinderseina paksus:	$e_n = 10 \text{ mm}$

Silinderseina analüütiline paksus, vastavalt valemite (2.53)

$$e_{as} = e_n - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm} \quad (2.71)$$

Tutsi seina analüütiline paksus, vastavalt valemite (2.54)

$$e_{ab} = e_{nb} - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm} \quad (2.72)$$

Tugevdatavate avade jaoks peab olema täidetud tingimus, vastavalt valemite (2.55)

$$(Af_s + Af_w)(f_s - 0,5P) + Af_b(f_{ob} - 0,5P) \geq P(Ap_s + Ap_b) \quad (2.73)$$

Tutsi arvutuslik pikkus, vastavalt valemite (2.56)

$$I_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_{ab}) \cdot e_{ab}} = \sqrt{(610 - 8,7) \cdot 8,7} = 72,32 \text{ mm} \quad (2.74)$$

Silinderseina tugevdatav pind, vastavalt valemite (2.57), (2.58), (2.59), (2.60), (2.61), (2.62), (2.63), (2.64)

$$I_{so} = \sqrt{(2r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = \sqrt{(2 \cdot 600 + 8,7) \cdot 8,7} = 102,5 \text{ mm}$$

$$Af_s = e_{as} \cdot I_{so} = 8,7 \cdot 102,5 = 891,7 \text{ mm}^2$$

$$Af_b = e_b \cdot (I_{bo} + I_{bi} + e_{as}) = 8,7 \cdot (72,32 + 10 + 8,7) = 791,8 \text{ mm}^2$$

$$Ap_s = A_s + 0,5d_{ib} \cdot e_{as}, \text{ kus} \quad (2.75)$$

$$A_s = r_{is} \cdot (I_{so} + 0,5d_{eb}) = 600 \cdot (102,5 + 0,5 \cdot 610) = 244500 \text{ mm}^2$$

$$d_{ib} = d_{eb} - 2e_{ab} = 610 - 2 \cdot 8,7 = 592,6 \text{ mm} - \text{tutsi siseläbimõõt}$$

$$Ap_s = A_s + 0,5d_{ib} \cdot e_{as} = 244500 + 0,5 \cdot 592,6 \cdot 8,7 = 247078 \text{ mm}^2$$

$$Ap_b = 0,5d_{ib} \cdot (I_{bo} + e_{as}) = 0,5 \cdot 592,6 \cdot (72,32 + 8,7) = 24006 \text{ mm}^2$$

Töötingimustes, vastavalt valemite (2.65)

$$f_s = f = 114 \text{ MPa}$$

$$f_b = f \cdot Z = 114 \cdot 0,85 = 97 \quad (2.76)$$

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.66)

$$f_{ob} = \min(f_s; f_b) = \min(114; 97) = 97 \text{ MPa} \quad (2.77)$$

Arvutuslik rõhk arvestades hüdrostaatilist rõhku, vastavalt valemite (2.67)

$$P = 0,3 + 0,04 = 0,34 \text{ MPa}$$

$$(891,7 + 0)(114 - 0,5 \cdot 0,34) + 791,8(97 - 0,5 \cdot 0,34) = 101502 + 76670 = 178172 \text{ N} \quad (2.78)$$

$$0,34(247078 + 24006) = 92168 \text{ N.}$$

$$178172 \text{ N} > 92168 \text{ N.}$$

Tingimus on täidetud.

Leiame maksimaalselt lubatud rohu, vastavalt valemite (2.68)

$$P_{max} = \frac{(Af_s + Af_w)f_s + Af_b f_{ob}}{(Ap_s + Ap_b) + 0,5(Af_s + Af_w + Af_b + Af_p)} = \frac{(891,7 + 0) \cdot 114 + 791,8 \cdot 97}{(247078 + 24006) + 0,5(891,7 + 0 + 791,8 + 0)} = 0,65 \text{ MPa} \quad (2.79)$$

$$0,65 \text{ MPa} > 0,34 \text{ MPa}$$

Tugevustingimus on täidetud.

Testimisel, vastavalt valemite (2.69)

$$f_s = f = 260 \text{ MPa}$$

$$f_b = f \cdot Z = 260 \cdot 0,85 = 221 \quad (2.80)$$

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.70)

$$f_{ob} = \min(f_s; f_b) = \min(260; 221) = 221 \text{ MPa}$$



$$(891,7 + 0)(260 - 0,5 \cdot 0,77) + 791,8(221 - 0,5 \cdot 0,77) = 231499 + 174683 = 406182 \text{ N} \quad (2.81)$$

$$0,77(247078 + 24006) = 208735 \text{ N}$$

$$406182 \text{ N} > 208735 \text{ N}.$$

Tingimus on täidetud.

## 2.6 Kumerotsas oleva ava kontrollarvutused.

Tabel 8 - Arvutuse algandmed

1.	Tutsi välisläbimõõt	$d_{eb} = 1220 \text{ mm}$
2.	Tutsi seinapaksus:	$e_{nb} = 10 \text{ mm}$
3.	Materjali paksuse tolerants	$\delta_e = 0,3 \text{ mm}$ [12]
4.	Kumerotsa siseraadius	$r_{is} = 2100 \text{ mm}$
5.	Kumerotsa seinapaksus:	$e_n = 12 \text{ mm}$ (ei ole miinushälvet)

Kumerotsa analüütiline paksum, vastavalt valemite (2.53)

$$e_{as} = e_n - C = 12 - 1 = 11 \text{ mm} \quad (2.82)$$

Tutsi seina analüütiline paksum, vastavalt valemite (2.54)

$$e_{ab} = e_{nb} - C - \delta_e = 10 - 1 - 0,3 = 8,7 \text{ mm} \quad (2.83)$$

Kindlustatava ava jaoks peab olema täidetud tingimus, vastavalt valemite (2.55)

$$(Af_s + Af_w)(f_s - 0,5P) + Af_b(f_{ob} - 0,5P) \geq P(Ap_s + Ap_b) \quad (2.84)$$

Tutsi arvutuslik pikkus, vastavalt valemite (2.56)

$$I_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_{ab}) \cdot e_{ab}} = \sqrt{(1220 - 8,7) \cdot 8,7} = 102,6 \text{ mm} \quad (2.85)$$

Kumerotsa tugevdatav pind, vastavalt valemite (2.57), (2.58), (2.59), (2.60),(2.62)

$$I_{so} = \sqrt{(2r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = \sqrt{(2 \cdot 2100 + 11) \cdot 11} = 215,22 \text{ mm}$$

$$Af_s = e_{as} \cdot I_{so} = 11 \cdot 215,22 = 2367 \text{ mm}^2$$

$$Af_b = e_b \cdot (I_{bo} + I_{bi} + e_{as}) = 8,7 \cdot (102,6 + 0 + 11) = 988,3 \text{ mm}^2 \quad (2.86)$$

$$Ap_s = A_s + 0,5d_{ib} \cdot e_{as} , \text{ kus}$$

$$d_{ib} = d_{eb} - 2e_{ab} = 1220 - 2 \cdot 8,7 = 1202,6 \text{ mm} - \text{tutsi siseläbimõõt}$$

Kumerotste jaoks

$$A_s = 0,5r_{is}^2 \frac{I_{so}+a}{0,5e_{as}+r_{is}} = 0,5 \cdot 2100^2 \frac{215,22+609,8}{0,5+11+2100} = 864008 \text{ mm}^2 \quad (2.87)$$

$$a = r_{ms} \cdot \arcsin \frac{d_{ib}}{2r_{ms}} = 2105,5 \cdot \arcsin \frac{1202,6}{2 \cdot 2105,5} = 609,8 \text{ mm} \quad (2.88)$$

$$r_{ms} = r_{is} + 0,5e_{as} = 2100 + 0,5 \cdot 11 = 2105,5 \text{ mm} \quad (2.89)$$

Sel juhul, Vastavalt valemite (2.63), (2.64)

$$Ap_s = A_s + 0,5d_{ib} \cdot e_{as} = 864008 + 0,5 \cdot 1202,6 \cdot 11 = 870622 \text{ mm}^2 \quad (2.90)$$

$$Ap_b = 0,5d_{ib} \cdot (I_{bo} + e_{as}) = 0,5 \cdot 1202,6 \cdot (102,6 + 11) = 68307 \text{ mm}^2$$

Töötingimustes, vastavalt valemite (2.65)

$$f_s = f = 114 \text{ MPa}$$

$$f_b = f \cdot Z = 114 \cdot 0,85 = 97 \quad (2.91)$$

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.66)

$$f_{ob} = \min(f_s; f_b) = \min(114; 97) = 97 \text{ MPa} \quad (2.92)$$

Arvutuslik rõhk arvestades hüdrostaatilist rõhku, vastavalt valemite (2.67)

$$P = 0,3 + 0,04 = 0,34 \text{ MPa}$$

$$(2367 + 0)(114 - 0,5 \cdot 0,34) + 988,3(97 - 0,5 \cdot 0,34) = 269435 + 95697 = 365132 \text{ N} \quad (2.40)$$

$$0,34(870622 + 68307) = 319236 \text{ N}.$$

$$365132 \text{ N} > 319236 \text{ N}$$

Tingimus on täidetud.

Leiame maksimaalselt lubatud rõhu, vastavalt valemite (2.68)

$$P_{max} = \frac{(Af_s + Af_w)f_s + Af_b f_{ob}}{(Ap_s + Ap_b) + 0,5(Af_s + Af_w + Af_b + Af_p)} = \frac{(2367+0) \cdot 114 + 988,3 \cdot 97}{(870622+68307) + 0,5(2367+0+988,3+0)} = 0,388 \text{ MPa} \quad (2.93)$$

$$0,388 \text{ MPa} > 0,34 \text{ MPa}$$

Tugevustingimus on täidetud.

Testimisel, vastavalt valemite (2.69)

$$f_s = f = 260 \text{ MPa}$$

$$f_b = f \cdot Z = 260 \cdot 0,85 = 221 \quad (2.94)$$

Arvutuslik pinge, vastavalt valemite (2.70)

$$f_{ob} = \min(f_s; f_b) = \min(260; 221) = 221 \text{ MPa}$$

$$(2367 + 0)(260 - 0,5 \cdot 0,77) + 988,3(221 - 0,5 \cdot 0,77) = 614508 + 218033 = 832541 \text{ N} \quad (2.95)$$

$$0,77 (870622 + 68307) = 722975 \text{ N}$$

$$832541 \text{ N} > 722975 \text{ N}$$

Tingimus on täidetud.

## KOKKUVÕTE

Arvutusliku osa ajal oli õnnestus teada saada:

- Maksimaalselt lubatud sisemist rõhku silindriseina jaoks sisseläbimõõtega 2600 mm (seina paksus 12 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Maksimaalselt lubatud sisemist rõhku silindriseina jaoks sisseläbimõõtega 1200 mm (seina paksus 10 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Maksimaalselt lubatud sisemist rõhku kumerotsi jaoks sisseläbimõõtega 2600 mm (seina paksus 12 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Maksimaalselt lubatud sisemist rõhku kumerotsi jaoks sisseläbimõõtega 1200 mm (seina paksus 10 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Lubatud välisrõhku silindriseina jaoks sisseläbimõõtega 2600 mm (seina paksus 12 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Lubatud välisrõhku silindriseina jaoks sisseläbimõõtega 1200 mm (seina paksus 10 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Lubatud välisrõhku kumerotsi jaoks sisseläbimõõtega 2600 mm (seina paksus 12 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Lubatud välisrõhku kumerotsi jaoks sisseläbimõõtega 1200 mm (seina paksus 10 mm) – *seina paksus olemasoleval kolonnil on 16 mm*
- Võimalust tutsi läbimõõtega 813 mm (seina paksus 10 mm) ühendada silindriseinaga.
- Võimalust luuki läbimõõtega 1200 mm (seina paksus 10 mm) ühendada silindriseinaga.
- Võimalust üksik-avade kontroll läbimõõtega 1200 mm (seina paksus 10 mm) ühendada kumerotsiga.

Kõik maksimaalselt lubatud sisemist ja välisrõhu tulemused on suurem, kui tekkivad selles apparadis töötamise ajal. See tähendab, et kolonn täpselt peab vastu koormuseid, kui paksuse kulumine ei ületa 1 mm. Sama ka on võimalust tutsi, luuki ja üksik-avade kontroll ühendada silindriseinaga.

Võib teha järeldus, et on võimalik olemasoleva kolonni süsinikterasest 1.4404 (grupp 8.1) seinaga paksuga 16 mm asendada uute kolonniga roostevaba terasest, mille seinaga paksus:

- 12 mm silindrisel osal läbimõõtega 2600 mm
- 10 mm silindrisel osal läbimõõtega 1200 mm

Miinusest võib öelda, et roostevaba teras on kallim, kui süsinikteras. Aga kui vahetada materjali ja vähendada metalli paksus, võib säästa ja see ei mõjuta aparadi efektiivsuse. Kolonni kõrguse põhjal võib eeldada, et kokkuvõid on märkimisväärne.

Pärast järeltuste analüüsimist võib öelda, et lõputöö eesmärk on saavutatud. Autoril õnnestus teha seinaga maksimaalselt rõhku tugevus arvutused, valmistanud roostevabast terasest, ja ühtlasi sai teada, et seinaga paksust või vähendada 16 mm kuni 12 mm silindrisel osas läbimõõtega 2600 mm ja 16 mm kuni 10 mm silindrisel osas läbimõõtega 1200 mm.

## SUMMARY

The author chose one of the main units of the condensation department of the Petroter III department, the distillation column 3K-202, as the object of research of this diploma thesis.

The column is designed for distillation of the purified steam-gas mixture into the following fractions: distillation residue, heavy mazut, middle fraction.

Column 3K-3-202 is a disc-type mass transfer apparatus. Columns diameter is 2 600mm, main body height is 21 150mm, cube part height is 3 200mm with a diameter of 1 200mm. The column is installed on a fundament by means of a housing 12 000mm high, which is directly mated with the lower part of the main corpus of the column. The column is equipped with 24 discs. Column corpus material is carbon steel P265GH. All column internals are made of alloy steel AISI 316L.

Column elements (corpus, support rings and bearing plates, discs and overflow pockets) made of various materials (steels) are assembled into a unified construction.

From the moment of commissioning, an uneven thinning of the column corpus occurs at the points of mating of the internal supporting elements to the corpus. The thinning of the support rings also occurs in the places between the corpus and the disc. These defects indicate the processes of contact electrochemical corrosion.

Contact corrosion is called electrochemical corrosion caused by the contact of metals with different stationary potentials in a given electrolyte. In our case, these are different marks of steels from which the structural elements of the column are made. In this case, a corrosive galvanic element appears, the operation of which affects the corrosion speed of each contacting metal and is the cause of local corrosion destruction of structures. As a result of the action of contact corrosion, through holes began to appear in the 3K-202 corpus, from the 5th to the 15th disc along the column height, through which the steam-gas mixture and liquid product are passed. The appearance of holes in the corpus always entails an emergency shutdown of the department, since there is a high probability of fire.

Over the past two years, about 100 000 euros have been spent on repair work related to elimination of gaps, restoration of support rings and other structural elements of the column.

The purpose of this diploma work is to calculate the strength of the corpus of the 3K-202 column under internal and external pressure, made of stainless steel.

In the course of the calculational part, it was possible to find out:

- The maximum permissible internal pressure for a cylindrical wall with a diameter of 2 600 mm and a wall thickness of 12 mm - *wall thickness of an existing column 16mm;*
- The maximum permissible internal pressure for a cylindrical wall with a diameter of 1 200 mm and a wall thickness of 10 mm - *the wall thickness of the existing column is 16 mm;*
- The maximum permissible internal pressure for Kumerots with a diameter of 2 600 mm and a wall thickness of 12 mm - *the wall thickness of the existing column is 16 mm;*
- The maximum permissible internal pressure for Kumerots with a diameter of 1 200 mm and a wall thickness of 10 mm - *the wall thickness of the existing column is 16 mm;*
- The permissible external pressure on a cylindrical wall with a diameter of 2 600 mm and 1 200 mm;
- The maximum permissible external pressure for Kumerots with a diameter of 2 600 mm;
- The maximum permissible external pressure for Kumerots with a diameter of 1 200 mm;
- The possibility of mounting a nozzle with a diameter of 813 mm into a cylindrical wall with thickness of 10 mm;
- The possibility of mounting a hatch with an inner diameter of 1 200 mm into a cylindrical wall with thickness of 10 mm;
- The possibility of mounting pipes with an inner diameter of 1 200 mm into Kumerots with wall thickness of 10 mm.

All the results for the permissible ultimate pressure and force turned out to be greater than those arising in this apparatus during operation. This means that the column will accurately withstand the loads caused by its intended use, with metal wear no more than 1 mm. And it is also possible to mount pipes, hatches and fittings into it for the operation of the mechanism and its maintenance.

It can be concluded that it is possible to replace the old column with a corpus made of ferrous metal and with a wall thickness of 16 mm with a new column with a corpus made of stainless steel 1.4404 (group 8.1) - en 10028- 7:

- with wall thickness of 12 mm in a cylindrical part with a diameter of 2 600 mm;
- with wall thickness of 10 mm in a cylindrical part with a diameter of 1 200 mm

Because stainless steel is more expensive than ferrous metal, you can save by reducing the thickness of the metal and this will not affect the performance of the mechanism in any way. Based on the height of the column, it can be assumed that the savings will be tangible.

After analyzing the conclusions, we can say that the goal of the diploma work has been achieved. The author managed to make strength calculations for the column corpus made of stainless steel, and also found out that the thickness of the corpus can be reduced from 16 mm to 12 mm in the cylindrical part with a diameter of 2 600 mm and up to 10 mm in the cylindrical part with a diameter of 1 200 mm.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] RT I, 29.10.2019, 11. SURVESEADMELE, AEROSOO LIBALLOONILE JA GAASIBALLOONILE ESITATAVAD NÕUDED JA NENDE NÕUETELE VASTAVUSE TÕENDAMISE KORD.
- [2] RTL 2002, 76, 1168. NÕUDED SURVESEADMETÖÖDELE.
- [3] EVS – EN 10028-7: 2016. SURVEOTSTARBELISED TASAPINNALISED TERASTOOTED. OSA 7:ROOSTEVABAD TERASED.
- [4] EVS – EN 13445-1: 2014+A1+A2: 2018. LEEKKUUMUTUSETA SURVEANUMAD. OSA 1: ÜLDINE.
- [5] EVS – EN 13445-2: 2014+A1+A2+A3: 2018. LEEKKUUMUTUSETA SURVEANUMAD. OSA 2: MATERJALID.
- [6] EVS – EN 13445-3: 2014+A1+A2+A3+A4: 2018. LEEKKUUMUTUSETA SURVEANUMAD. OSA 3: KAVANDAMINE.
- [7] EVS – EN 13445-4: 2014+A1: 2016. LEEKKUUMUTUSETA SURVEANUMAD. OSA 4: VALMISTAMINE.
- [8] EVS – EN 13445-5: 2014+A1: 2018. LEEKKUUMUTUSETA SURVEANUMAD. OSA 5: KONTROLL JAKATSETAMINE.
- [9] EVS – EN 1092-1: 2018. ÄÄRIKUD JA NENDE ÜHENDUSED. ÜMMARGUSED ÄÄRIKUD TORUDELE, VENTIILIDELE, ÜHENDUSDETAILIDELE JA LISASEADMETELE, PN KLASSIFIKATSIOONIGA. OSA 1: TERASÄÄRIKUD.
- [10] ЛИСИЦЫН Н.В., ФЕДОРОВ В.И., 2004 Г. «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ БУТАНА»
- [11] [HTTPS://WWW.VKG.EE/](https://www.vkg.ee/)
- [12] EVS – EN 10029: 2010. HOT-ROLLED STEEL PLATES 3 MM THICK OR ABOVE - TOLERANCES ON DIMENSIONS AND SHAPE.