

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
**ENERGIATEHNOLOOGIA INSTITUUT**

**Laboratoorne töö õppeaines**

**KAT0125**

**Rakenduslik vedelike ja gaaside voolamine keskkonnakaitse tehnoloogiates**

**HÜDRODÜNAAMIKA ALUSED**

**Tallinn**

**2019**

## SISUKORD

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. VEDELIKE VOOLAMINE TORUSTIKES .....</b>                                 | <b>3</b>  |
| 1.1. ÜLDPÕHIMÕTTED .....                                                      | 3         |
| 1.2. TÖÖ EESMÄRK .....                                                        | 7         |
| Käesoleva töö eesmärgiks on .....                                             | 7         |
| 1.3. KATSESEADME KIRJELDUS .....                                              | 7         |
| 1.3.1. Toitesüsteem .....                                                     | 7         |
| 1.3.2. Katsetorustik .....                                                    | 8         |
| 1.3.3. Mõõtesüsteem .....                                                     | 10        |
| 1.4. TÖÖKÄIK .....                                                            | 11        |
| Katseandmed .....                                                             | 12        |
| 1.5. ARVUTUSED .....                                                          | 13        |
| <b>2. VEDELIKE VÄLJAVOOLAMINE AVADEST .....</b>                               | <b>14</b> |
| 2.1. ÜLDPÕHIMÕTTED .....                                                      | 14        |
| 2.2. TÖÖ EESMÄRK .....                                                        | 16        |
| 2.3. KATSESEADME KIRJELDUS .....                                              | 16        |
| 2.4. TÖÖKÄIK .....                                                            | 17        |
| 2.4.1. Ava kulukoefitsiendi määramine statsionaarse režiimi korral .....      | 17        |
| 2.4.2. Ava kulukoefitsiendi määramine mittestatsionaarse režiimi korral ..... | 18        |
| 2.5. ARVUTUSED .....                                                          | 19        |
| <b>3. PUMBA KARAKTERISTIKUD .....</b>                                         | <b>19</b> |
| 3.1. TÖÖ EESMÄRK .....                                                        | 20        |
| 3.2. KATSESEADME KIRJELDUS .....                                              | 20        |
| 3.3. TÖÖKÄIK .....                                                            | 21        |
| <b>LISA 1 .....</b>                                                           | <b>23</b> |
| <b>KASUTATUD KIRJANDUS .....</b>                                              | <b>24</b> |

# 1. VEDELIKE VOOLAMINE TORUSTIKES

## 1.1. ÜLDPÕHIMÕTTED

Gaaside ja vedelike liikumine, mida uurib hüdrodünaamika, on keemiatehnoloogias suure tähtsusega, kuna gaasilised ja vedelikeskkonnad esinevad paljudes protsessides.

Torustikus vedelikku või gaasi liikuma panevaks jõuks on rõhkude vahe, mida on võimalik tekitada pumbaga, kompressoriga või vedeliku nivoo tõstmisega. Teades hüdrodünaamika põhiseadusi, on võimalik leida rõhkude vahe, mis on vajalik selleks, et teatud kogus vedelikku või gaasi panna liikuma etteantud kiirusega ning järelikult ka vedeliku voolamiseks vajaminevat energiakulu. Samuti on võimalik lahendada ka pöördülesannet – leida etteantud rõhukaole vastav vedeliku kiirus ja kulu.

**Energiakadu (rõhukadu)** vedelike voolamisel torustikus sõltub torustiku pikkusest ja kohttakistustest (nt. torupõlved, torukäänakud, kolmikud, järsud ahendid ja laiendid, toru armatuur). Kõik need kaod on tingitud vedeliku viskoossusest, järelikult mehaaniline energia hajub ja läheb üle soojuslikuks.

Torustiku sirgel osal tekkivat **hõõrderõhukadu**  $\Delta p_h$  ja **kohttakistuse rõhukadu**  $\Delta p_{kt}$  määratakse järgmiste empiiriliste sõltuvuste abil

$$\Delta p_h = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1.1)$$

$$\Delta p_{kt} = \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1.2)$$

kus  $\Delta p_h$ ,  $\Delta p_{kt}$  – vastavalt hõõrderõhukadu ja kohttakistuse rõhukadu, Pa,  $\lambda$  – hõõrdekoefitsient,  $l$  – toru pikkus, m,  $d$  – toru diameeter, m,  $\rho$  – vedeliku tihedus, kg/m<sup>3</sup>,  $w$  – vedeliku voo liikumise keskmine kiirus, m/s,  $\zeta$  – kohttakistuskoefitsient.

**Vedeliku voo keskmine kiirus** määratakse järgmiselt:

$$w = V/A, \quad (1.3)$$

kus  $V$  – mahtkulu, m<sup>3</sup>/s,  $A$  – vedeliku voo ristlõige, m<sup>2</sup>.

Valemitest (1.1) ja (1.2) järeldub, et hõõrdumisest ja kohttakistustest tingitud energiakadu on proportsionaalne kiirusliku ehk dünaamilise rõhuga  $\rho\omega^2/2$ , mis on voo kineetiline erienergia s.o. kineetiline energia vedeliku mahuühiku kohta.

Tegelikkuses on need sõltuvused keerulisemad, kuna hõõrdekoefitsient ja kohttakistuskoeffitsient ei ole konstantsed suurused, vaid sõltuvad vedeliku voolamise kiirusest, vedeliku tihedusest ja viskoossusest, samuti toru diameetrist ning toru seinte karedusest.  $\lambda$  ja  $\zeta$  väärtused leitakse tabelitest ja graafikutest, mis on saadud eksperimentaalandmete üldistamisel kasutades sarnasusteooriat.

Vedeliku voo ühtlast liikumist kirjeldab võrrand:

$$Eu = \varphi(Re, \Gamma_1, \Gamma_2), \quad (1.4)$$

mis kujutab endast Navier-Stokes'i võrrandi kriteeriaalkuju muutumatu survevoolu korral sirges torustikus.

Valemis (1.4) on  $Eu$  – Euleri arv, mis väljendab rõhu- ja inertsijõudude suhet:

$$Eu = \Delta p / (\rho w^2) \quad (1.5)$$

ning  $Re$  – Reynoldsi arv, mis väljendab inerts- ja viskoossusjõudude suhet:

$$Re = \rho w d / \mu. \quad (1.6)$$

$\Gamma_1, \Gamma_2$  on geomeetrilise sarnasuse kriteeriumid.

Valem (1.4) esitatakse tavaliselt järgmise astmefunktsiooni kujul:

$$Eu = C Re^m \Gamma_1 \Gamma_2^n \quad (1.7)$$

ning leitakse eksperimentaalselt.

Valemis (1.7)  $\Gamma_1 = 1/d_e$  – geomeetrilise sarnasuse simpleks pikkuse järgi,

$\Gamma_2 = e_e/d_e$  – geomeetrilise sarnasuse simpleks kareduse järgi,

$C, m, n$  – suurused, mis sõltuvad voolamise režiimist,

$e_e$  – ekvivalentne karedus, m, s.o. selline kogu toru pikkuses tinglikult konstantne karedus (moodustunud ühesuguse kõrgusega konarustest), mille puhul hõõrdest tingitud energiakaod on võrdsed vaadeldava reaalse kareduse (moodustunud ebaühtlaselt paiknevate erineva kõrgusega konarustest) poolt tekitatud rõhukadudega.

Analoogiliselt vaadeldakse ka kohttakistuskoeffitsiente. Asetades valemid (1.1) ja (1.2) võrrandisse (1.5), saame, et  $\lambda = 2 Eu$  (kui  $l/d = 1$ ) ning  $\zeta = 2 Eu$ , see tähendab, et mõlemad takistuskoeffitsiendid sõltuvad  $Re$  arvust ja süsteemi geomeetrilistest karakteristikutest

$$\lambda = \varphi(Re, \Gamma_2), \quad (1.8)$$

$$\zeta = \varphi_1(Re, \Gamma_1) \quad (1.9)$$

ning võivad olla esitatud kujul

$$\lambda = 2 C Re^m \Gamma_2^n, \quad (1.10)$$

$$\zeta = 2 C_1 Re^m, \quad (1.11)$$

kus koeffitsientide ja astmenäitajate väärtused määratakse eksperimentaalselt iga toru ning kohttakistuse jaoks eraldi.

Sõltuvus (1.10) võib olla esitatud kas graafiliselt (vt. joon.1.1 ja 1.2) või järgmiste valemitega:

- laminaarsel voolamisel ( $Re < 2300$ )  $\lambda$  ei sõltu karedusest

$$\lambda = 64 / Re; \quad (1.12)$$

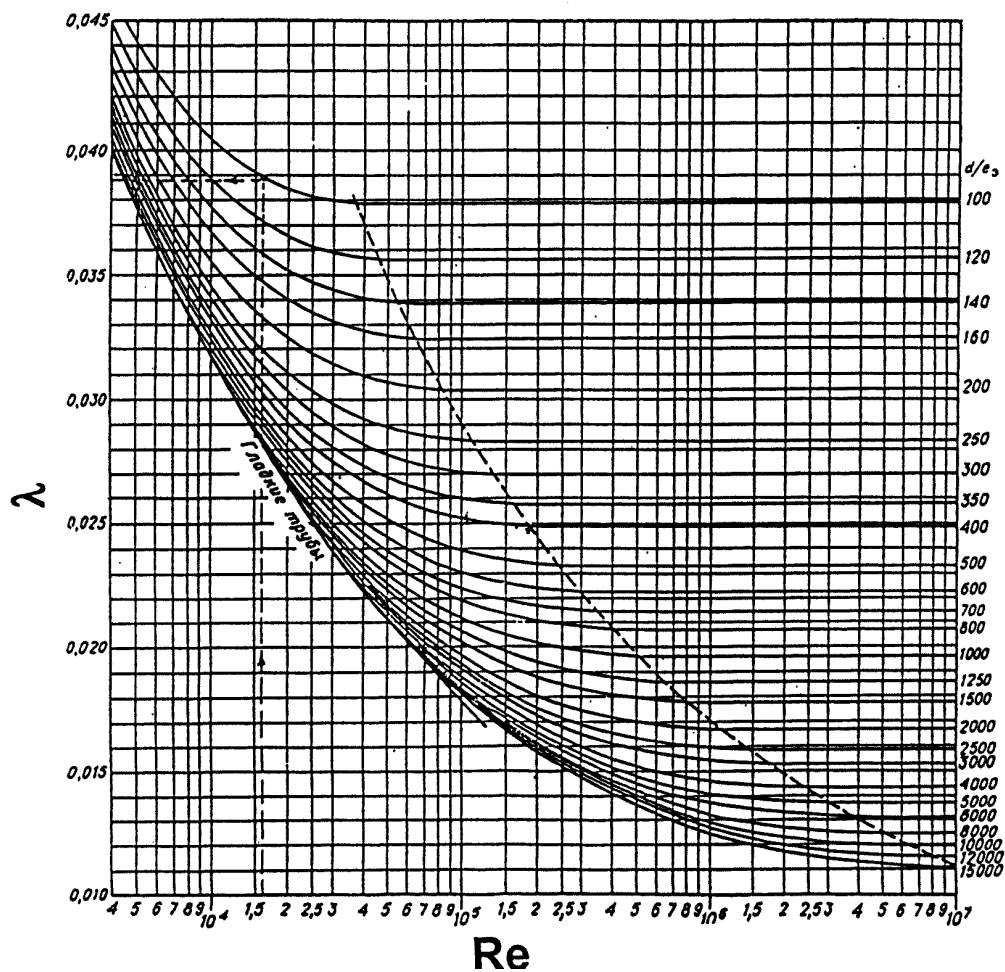
- turbulentsel voolamisel ( $Re > 2300$ ) hüdrauliliselt siledates torudes (klaas-, vask-, tsink-, plastmasstorud)

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25}; \quad (1.13)$$

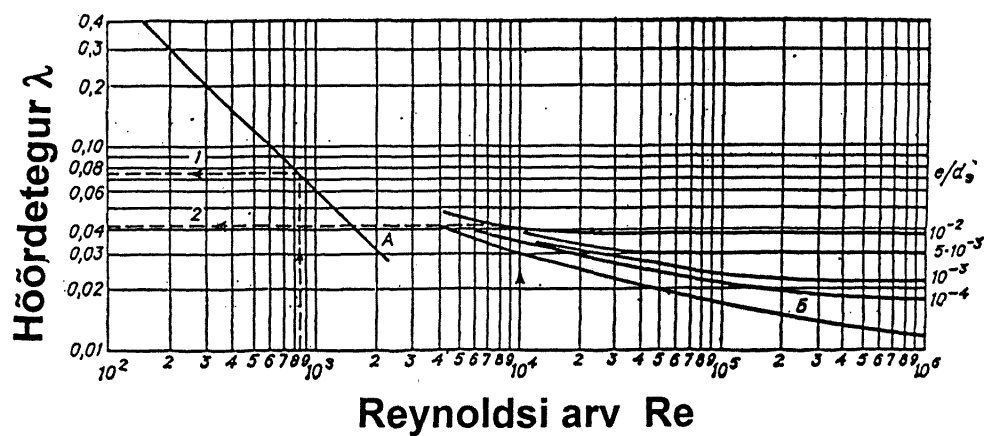
- turbulentsel isotermilisel voolamisel karedates torudes (teras-, malmstorud)

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \log \left( \varepsilon/3,7 + (6,81/Re)^{0,9} \right), \quad (1.14)$$

kus  $\varepsilon = e / d_e$ .



Joonis 1.1. Hõõrdeteguri sõltuvus  $Re$  arvust toru seinte erinevate suhteliste kareduste korral



Joonis 1.2. Hõõrdeteguri sõltuvus Reynoldsi arvust sileda seinaga toru korral

## 1.2. TÖÖ EESMÄRK

Käesoleva töö eesmärgiks on

1. tutvuda katseseadme konstruktsiooniga ja torustiku elementide erinevate ühendamise viisidega;
2. hõõrdekoefitsiendi  $\lambda$  ja kohttakistuskoeffitsientide  $\zeta_i$  väärtuste eksperimentaalne määramine erinevatel vedeliku voolamise kiirustel;
3. torustiku ekvivalentkareduse orienteeruv hindamine;
4. saadud tulemuste võrdlemine kirjandusandmetega.

## 1.3. KATSESEADME KIRJELDUS

Katseseade torustiku hüdraulilise takistuse määramiseks koosneb 3 osast:

1. toitesüsteem,
2. katsetorustikud,
3. mõõtesüsteem.

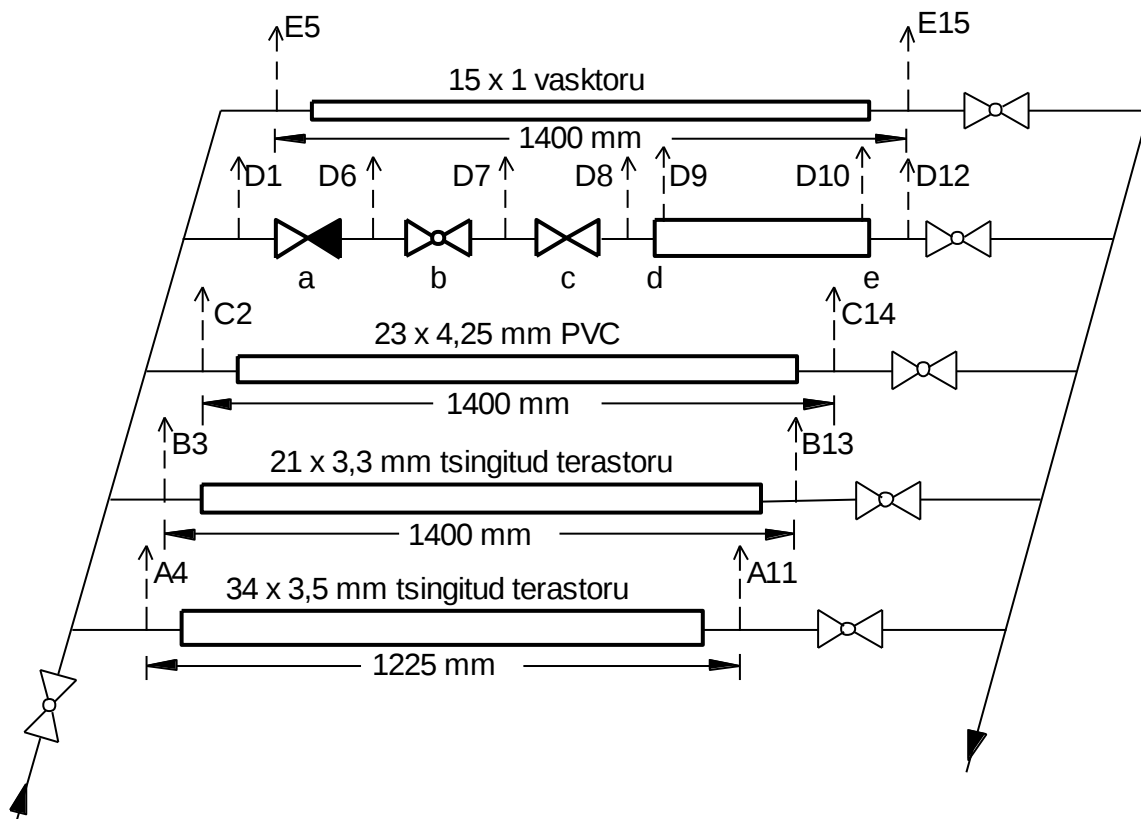
### 1.3.1. Toitesüsteem

Katseseadme toitesüsteem (Joonis 1.3) koosneb kulupaagist **23**, milles on teatav vedeliku (vee) varu, tsentrifugaalpumbast **16**, paagist **1** ning armatuuriga torustike süsteemist.

Toitesüsteem võimaldab:

- 1) täiendada vee varu süsteemis vooliku **26** abil, suunates vee linna veevõrgust paaki **23** või **1**. Vee nivoo paagis **1** peab olema mõõtemahuti **3** põhjast allpool. Kui paak **23** on veega täidetud ja vesi voolab ülevoolu **8** kaudu paaki **1**, peab vee nivoo paagis **1** nivootoru **13** järgi olema umbes 530 mm.





**Joonis 1.4 Katsetorustiku skeem**

↑ - ühendus piesomeetriga,  - tagasilöögi klapp,  - kuulkraan,  - ventiil

Torustik koosneb järgmistest osadest:

A - tsingitud toru DN 25

B - tsingitud toru DN 15

C - polüvinüülkloriidtoru DN 15

D - toru, millel on järgmised kohttakistused:

a - tagasilöögiklapp

b - kuulkraan

c - normaalventiil

d - järsk laiend 15/40

e - järsk ahend 40/15

E - vasktoru DN 15.

Iga toru mõõdetava osa ette on paigaldatud kolmik, millest impulsstoru on ühendatud piesomeetriga. Mõõdetavate osade pikkus on näidatud skeemil. Piesomeetrid on kinnitatud statiivile ja nende järjestus (vasakult paremale) on tähistatud skeemil numbrita 1–15.

### 1.3.3. Mõõtesüsteem

Mõõtesüsteem koosneb kahest osast:

- torustikus voolava vedeliku kulu mõõtesüsteem
- vedeliku nivoo mõõtesüsteem

Vedeliku kulu mõõtmiseks kasutatakse spetsiaalset paagil **1** asuvat mõõteanumat **3**, millel on põhjaklapp **5** ja nivooklaasiga **4** varustatud nivood näitav ujuk **6**. Vedeliku kulu mõõtmiseks sulgetakse põhjaklapp **5** ning kindlal algnivool käivitatakse stopper (märkida ülesse algnäit). Fikseeritakse mingi kindel lõppnivoo (märkida ülesse lõppnäit) ning märgitakse üles aeg, mis kulus selle saavutamiseks. Kasutades kaliibrimisgraafikut (Lisa 1), määratakse vedeliku maht, mis antud ajavahemikus välja voolas. Seejärel avatakse põhjaklapp ning lastakse veel voolata paaki **1**, kus vedeliku nivoo peab olema allpool mõõteanuma põhja.

Vedeliku nivood mõõdetakse klaasist piesomeetrites visuaalselt, kasutades gradueeritud skaalasid.

## **1.4. TÖÖKÄIK**

**1.4.1.** Tutvuda katseseadme ehitusega.

**1.4.2.** Kontrollida vedeliku nivood paagis **1**. Kui survepaak **23** on veega täidetud, peab vedeliku nivoo paagis **1** nivootoru **13** järgi olema umbes 400 mm, kui survepaak **23** on tühi, siis umbes 530 mm.

**1.4.3.** Käivitada pump **16** nagu eespool kirjeldati ja täita survepaak veega nii, et toimuks ülevool.

**1.4.4.** Avada kraan **12** pealevoolutorustikul ning täita piesomeetrid veega. Kui impulsstorudesse tekivad õhumullid, siis tuleb need eemaldada süsteemist avades ja sulgedes järsult kraane väljumisel. Süsteemis pole õhku, kui vedeliku nivood piesomeetrites on ühesugused (kraanid väljumisel on suletud).

**1.4.5.** Mõõta vedeliku algnivoo kõikides piesomeetrites (kraanid väljumisel suletud).

**1.4.6.** Reguleerida kraani abil välja mingi kindel vedeliku kulu ühes torus. Kulu peab olema selline, et ei toimuks õhu sisseimemist süsteemi läbi piesomeetrite, kuna siis pole võimalik läbi viia mõõtmisi.

**1.4.7.** Reguleerida vedeliku pealevool survepaaki **23** selliselt, et toimuks ülevool ja nivood piesomeetrites oleksid konstantne.

**1.4.8.** Mõõta vedeliku kulu ning vedelikunivoode kõrgus piesomeetrites, mis asuvad vaadeldaval torul. Kontrollida mõõtmistulemusi, viies läbi 2–3 paralleelmõõtmist.

**1.4.9.** Reguleerida välja uus vedeliku kulu ning korrata kõik operatsioonid. Iga uuritava elemendi puhul on vaja mõõtmised läbi viia 3–5 erineva kulu juures. Mõõtmistulemused kanda tabelisse 1.1.

**1.4.10.** Mõõtmiste lõpetamisel sulgeda kraan väljumisel (katsetorustikus torudel A, B, C, D ja E), kraan **12** ja seisata pump **16**.

Tabel 1.1.

**Katseandmed**

Vee temperatuur,..... °C

| Kat-se nr. | Torus-tiku osa | Vee maht V, l |      | Aeg, $\tau$ , s | Vee kulu, $V/\tau$ , l/s | Vee nivoo kõrgus pieso-meetrites ja kõrguste vahe, mm |    |            |
|------------|----------------|---------------|------|-----------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|----|------------|
|            |                | Alg           | lõpp |                 |                          | H1                                                    | H2 | $\Delta H$ |
| 1.         |                |               |      |                 |                          |                                                       |    |            |
| 2.         |                |               |      |                 |                          |                                                       |    |            |

## 1.5. ARVUTUSED

### 1.5.1. Katseandmete põhjal leitakse:

- 1) vedeliku voo kiirus  $w$ , m/s;
- 2)  $Re$  arvu väärtus;
- 3) rõhukadu  $\Delta p$ , Pa (katse käigus mõõdetud rõhulangu  $\Delta H$  põhjal);
- 4)  $Eu$  kriteeriumi väärtus;
- 5) sirge toru hõõrdekoefitsiendi  $\lambda$  väärtus (valemi (1.1) järgi) ja iga uuritud toruosa kohttakistuskoeffitsiendi  $\zeta$  väärtused (valemi (1.2) järgi);

**1.5.2.** Arvutatakse sirge toru hõõrdekoefitsiendi  $\lambda_{arv}$  väärtus empiirilise võrrandi (1.12) või (1.13) abil;

**1.5.3.** Leitakse sõltuvuse  $\lambda = A Re^m$  kordaja  $A$  ja astmenäitaja  $m$  väärtused (kas graafiliselt või arvutuslikult)

**1.5.4.** Teades  $\lambda$  ja  $Re$  (või  $Eu$ ) väärtusi ja kasutades Joonist 1.1 või 1.2, hinnata katses uuritud sirgete torude kareduse  $e$  väärtusi.

**1.5.5.** Võrrelda eksperimendi tulemusi kirjandusandmetega ning esitada töö kokkuvõte.

**NB! Arvutustulemused esitatakse tabeli kujul.**

**Tabel 1.2**

Arvutustulemused

| Katse nr. | Torus-tiku osa | Vee kiirus $w$ , m/s | $Re$ | $Eu$ | $\Delta p$ , Pa | $\lambda$ | $\lambda_{arv}$ | $e$ , mm | $\zeta$ |
|-----------|----------------|----------------------|------|------|-----------------|-----------|-----------------|----------|---------|
| 1.        |                |                      |      |      |                 |           |                 |          |         |

jne

## 2. VEDELIKE VÄLJAVOOLAMINE AVADEST

### 2.1. ÜLDPÕHIMÕTTED

Keemiatööstuses puututakse sageli kokku protsessidega, kus on tegemist vedelike väljavoolamisega anumate külgsseinast või põhjas olevatest mitmesuguse kujuga avadest. Sel juhul on tihti vajalik määrata väljavoolava vedeliku kulu või aeg, mis kulub kogu vedeliku või osa vedeliku anumast väljavoolamiseks.

Selliste ülesannete lahendamine põhineb Bernoulli'i võrrandi kasutamisele, arvestusega, et voolavad vedelikud on ideaalsed:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} \quad (2.1)$$

Konstantsena hoitava vedelikunivooga (statsionaarne režiim) pealt lahtise anuma jaoks valime tasapinna 1, mis vastab vedeliku ülemisele nivoole anumas, tasapinna 2 aga kohale, mis vastab avast väljavoolava vedeliku joa kõige kitsamale ristlõikepinna. Jättes arvestamata küllaltki väikese vahemaa anuma põhjas oleva ava ja väljavoolava vedeliku joa kõige väiksema ristlõikepinna asukoha vahel, võib võtta, et

$$z_1 - z_2 \simeq H, \quad (2.2)$$

kus  $H$  – anumas oleva vedeliku kihi kõrgus väljavoolava kohal.

Kuna eespool toodud eelduste põhjal  $p_1 = p_2$  ja  $w_1 = 0$  (vedeliku ülemine nivoo anumas hoitakse konstantsena), saab võrranditest (2.1) ja (2.2)

$$\frac{w_2^2}{2g} = H \quad (2.3)$$

ning avast väljavoolava vedeliku kiirus on

$$w_2 = \sqrt{2gH}. \quad (2.4)$$

Vedeliku reaalsel väljavoolamisel avast kulub kõrgusega  $H$  vedeliku samba survest osa avas vedeliku voo ristlõikepinna vähenemisest tingitud takistuse

ning hõõrdetakistuse ületamiseks. Seetõttu võib avast väljavoolava vedeliku reaalse kiiruse avaldada järgmiselt:

$$w_2 = \phi \sqrt{2gH} \quad (2.5)$$

kus  $\phi$  – parandustegur, mida nimetatakse ka kiiruskoefitsiendiks.

Kuna väljavoolava vedeliku joa ristlõikepind  $S_0$  avas on suurem joa ristlõikepinnast  $S_2$  tema kõige kitsamas kohas, siis on vedeliku kiirus  $w_0$  avas väiksem kui  $w_2$ . Sel juhul

$$w_0 = \varepsilon w_2 = \varepsilon \phi \sqrt{2gH} = \alpha \sqrt{2gH}, \quad (2.6)$$

kus  $\varepsilon = S_2/S_0$  on vedeliku joa kokkusurutavuse koefitsient ja  $\alpha = \varepsilon \phi$  – kulukoefitsient.

Kulukoefitsient  $\alpha$  määratakse tavaliselt katseliselt. Kulukoefitsiendi väärtus sõltub väljavoolava vedeliku kiirusest ja omadustest (iseloomustatakse  $Re$  kriteeriumiga) ning ava kujust. Tihti leitakse  $\alpha$  väärtus käsiraamatutest. Vedelike jaoks, mis oma omaduste poolest erinevad veest vähe, võib teravaservalise väljavoolava puhul kulukoefitsiendi väärtuseks võtta  $\alpha = 0,62$ , otsikuga ava puhul  $\alpha = 0,82$ .

Kui väljavoolamise ajal vedelikunivoo anumasse muutub, siis muutub järelkult ka vedeliku kiirus väljavoolavas (**mittestatsionaarne režiim!**).

Lõpmatult väikese ajavahemiku  $d\tau$  jooksul voolab anuma põhjas olevast avast (ristlõikepinnaga  $S_0$ ) välja vedeliku kogus  $dV$ :

$$dV = V_{sec} d\tau = w_0 S_0 d\tau = \alpha S_0 \sqrt{2gH} d\tau \quad (2.7)$$

Ajavahemiku  $d\tau$  jooksul väheneb vedeliku nivoo kõrgus anumasse samuti lõpmatult väikese suuruse  $dH$  võrra. Anumasse konstantse ristlõikepinna puhul võib väljavoolanud vedelik hulga leida:

$$dV = -S dH. \quad (2.8)$$

Võrranditest (2.7) ja (2.8) saab:

$$\alpha S_0 \sqrt{2gH} d\tau = -S dH, \quad (2.9)$$

millest võib avaldada aja

$$d\tau = -\frac{S}{\alpha S_0 \sqrt{2gH}} dH \quad (2.10)$$

Arvestades, et  $\alpha = \text{const}$ , s.t., et kulukoefitsiendi väärtus ei sõltu vedeliku voolamise kiirusest, võib võrrandist (2.10) leida aja, mis on vaja vedeliku nivoo langemiseks kõrguselt  $H_1$  kõrguseni  $H_2$

$$\int_0^\tau d\tau = \int_{H_1}^{H_2} \frac{S}{\alpha S_0 \sqrt{2gH}} dH, \quad (2.11)$$

$$\tau = -\frac{S}{\alpha S_0 \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} H^{-1/2} dH = \frac{2S}{\alpha S_0 \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}) \quad (2.12)$$

Anuma täielikuks tühjenemiseks kuluv aeg leitakse seosest:

$$\tau = \frac{2S}{\alpha S_0 \sqrt{2g}} \sqrt{H_1} \quad (2.13)$$

Kasutades seoseid (2.12) ja (2.13) on katsetulemuste põhjal võimalik arvutada kulukoefitsiendi väärtus ka vedelike mittestatsionaarsel väljavoolamisel avadest.

## 2.2. TÖÖ EESMÄRK

Määrata katseliselt kulukoefitsientide väärtused vee väljavoolamisel paagi erineva kujuga külgavadest statsionaarsel ja mittestatsionaarsel režiimil ning võrrelda saadud tulemusi kirjandusandmetega.

## 2.3. KATSESEADME KIRJELDUS

Katseseadme (Joon. 1.3) põhiosaks on toru **8**, mille külgseinas on 3 erineva kujuga ava. Ülemine ava on 50 mm pikkuse otsikuga, keskmine ümardatud servaga ning alumine teravaservaline; kõigi sisediaameeter on 12,7 mm. Toru **8** täidetakse veega paagist **23**, mille sisemõõdud on 395x595x492 mm.

Avade tsentrite kõrgused paagi **23** nivootoru **25** nullnivoost on järgmised:

- ülemine ava – 134 mm,
- keskmine ava – 13 mm,
- alumine ava – -87 mm.

Paaki **23** on võimalik täita veega veevõrgust voolikuga **26**, või pumbaga **16**. Paagil asub nivootoru **25**. Avadest väljavoolava vee kogumiseks kasutatakse renni **7**, mis juhib vee kas paaki **1** või mõõteanumasse **3**.

## 2.4. TÖÖKÄIK

### 2.4.1. Ava kulukoefitsiendi määramine statsionaarse režiimi korral

NB! Statsionaarsel režiimil vee väljavoolamise kiirus ei muutu; see on saavutatav, kui vee nivoo ava kohal on konstantne.

Katse ava kulukoefitsiendi arvutamiseks vajalike suuruste määramiseks tuleb sooritada järgmiselt:

- 1) Sulgeda kõik avad korgiga ning täita survepaak **23** veega nagu on kirjeldatud punktis 1.3.1. Kogu katse jooksul tuleb jälgida, et vee nivoo paagis oleks muutumatu, kasutades selleks nivootoru **25**. Nivoo kõrgust on võimalik reguleerida kraanidega **15** ja **21** või muutes sagedusmuunduriga **18** pumba töörotta pöörlemissagedust.
- 2) Eemaldada kork uuritava ava eest ja lasta vee voolul stabiliseeruda.
- 3) Nihutada mõõteanum **3** veejoa alla ning mõõta aeg, mille jooksul ujuk **6** tõuseb fikseeritud algpunktist lõpp-punktini. Kasutades kaliibrimisgraafikut (lisa 1), määrata vedeliku maht, mis antud ajavahemikus välja voolas.
- 4) Nihutada mõõteanum **3** veejoa alt, avada põhjaklapp **5** ning lasta veel voolata paaki **1**.
- 5) Mõõta veekihi kõrgus ava tsentri kohal kasutades nivootoru **25**. Iga ava jaoks tuleb läbi viia 3 paralleelkatset. Tulemused kanda tabelisse 2.1.
- 6) Kui kõik mõõtmised on sooritatud, tuleb pump **16** välja lülitada.

Tabel 2.1.

Ava kulukoefitsientide määramine  
Statsionaarne režiim

| Ava | Veekihi kõrgus ava kohal, m | Ujuki algpunkt mm | Ujuki lõpp-punkt mm | Välja voolanud vee maht, m <sup>3</sup> | Aeg, s | Vee tegelik kiirus, m/s | Vee teor. kiirus, m/s | Kulu koefitsient, $\alpha$ |
|-----|-----------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------------|--------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
|     |                             |                   |                     |                                         |        |                         |                       |                            |

### 2.4.2. Ava kulukoefitsiendi määramine mittestatsionaarse režiimi korral

NB! Mittestatsionaarse režiimi korral vee kiirus väljavoolamisel avadest muutub, s.t. vee nivoo ava kohal muutub (antud töös väheneb).

Katse ava kulukoefitsiendi arvutamiseks vajalike suuruste määramiseks tuleb sooritada järgmiselt:

- 1) Sulgeda kõik avad korgiga ning täita pumba **16** abil paak **23** veega nagu on kirjeldatud punktis 1.3.1.
- 2) Katkestada vee juurdevool paaki (lülitada pump **16** välja).
- 3) Eemaldada kork uuritava ava eest.
- 4) Mõõta aeg, mille jooksul vee nivoo langeb paagis fikseeritud algkõrguselt  $H_1$  lõppkõrguseni  $H_2$  (nivootoru **25** järgi).
- 5) Vajaduse korral täita paaki **23** täiendavalt. Iga ava jaoks tuleb läbi viia 3 paralleelkatset. Tulemused kanda tabelisse 2.2.

Tabel 2.2.

Ava kulukoefitsientide määramine  
Mittestatsionaarne režiim

| Ava | Veekihi algkõrgus avast, $H_1$ , m | Veekihi lõppkõrgus avast, $H_2$ , m | Aeg, s | $\alpha$ |
|-----|------------------------------------|-------------------------------------|--------|----------|
|     |                                    |                                     |        |          |

## 2.5. ARVUTUSED

Katseandmete põhjal:

- Arvutatakse kulukoefitsientide väärtused statsionaarsel režiimil:

$$V = \alpha S_0 \sqrt{2gH},$$

kus  $V$  – veekulu, m<sup>3</sup>/s,  
 $S_0$  – avade ristlõikepindala, m<sup>2</sup>,  
 $H$  – vedelikunivoo kõrgus ava keskpunktist, m.

- Arvutatakse kulukoefitsientide väärtused mittestatsionaarsel režiimil:

$$\tau = \frac{2S(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\alpha S_0 \sqrt{2gH}},$$

kus  $\tau$  – aeg, s,  
 $S$  – survepaagi ristlõikepindala, m<sup>2</sup>,  
 $S_0$  – avade ristlõikepindala, m<sup>2</sup>,  
 $H_1$  ja  $H_2$  – veekihi kõrgus ava keskpunktist mõõtmise alguses ja lõpus, m.

Katse- ja arvutustulemused kantakse tabelitesse 2.1 ja 2.2.

Töö **kokkuvõttes** esitada ka katseliste kulukoefitsientide võrdlus kirjandusandmetega.

## 3. PUMBA KARAKTERISTIKUD

Pumba karakteristikute all mõeldakse pumba tõstekõrguse, tootlikkuse, võimsuse ja efektiivsuse sõltuvust pumba töörratta pöörlemissagedusest.

Pumba tõstekõrguse saab määrata torustikule paigutatud manomeetri ja vaakummeetri näidu järgi kasutades sõltuvust

$$H = \frac{p_m - p_v}{\rho g} + h, \quad (3.1)$$

kus  $p_m$  ja  $p_v$  – manomeetri ja vaakummeetri näit, Pa,  
 $h$  – manomeetri ja vaakummeetri vaheline kõrguste erinevus, m.

Pumba tootlikkus ( $Q$ ) määratakse kasutades kulumõõtjat. Teades pumba tõstekõrgust ( $H$ ), tootlikkust ( $Q$ ) ja vedeliku tihedust ( $\rho$ ), saab leida kasuliku võimsuse ( $N_n$ ), mis kasutatakse pumbas vedeliku liikuma panemiseks:

$$N_n = QH \rho g. \quad (3.2)$$

Vattmeetriga mõõdetav pumba võllile ülekantud võimsus  $N_e$  (kulutatud võimsus) on pumbas tekkivate energiakadude tõttu alati suurem võimsusest, mis on vajalik vedeliku liikuma panemiseks. Teades kasulikku võimsust ja kulutatud võimsust, saab arvutada pumba efektiivsuse  $\eta$ :

$$\eta = \frac{N_n}{N_e}.$$

### 3.1. TÖÖ EESMÄRK

Töö eesmärgiks on määrata rõhud, torustikuga ühendatud pumba tootlikkus ja võimsus pumba elektrimootori erinevatel pöörlemissagedustel.

### 3.2. KATSESEADME KIRJELDUS

Töös kasutatav katseseade on esitatud joonisel 1.3, tööpõhimõtted on kirjeldatud punktis 1.3.1. Tsentrifugaalpump **16** on ühendatud elektrimootoriga **17**, mille pöörlemissagedust saab reguleerida. Pöörlemissagedust reguleeritakse muutes sagedusmuunduriga **18** voolu sagedust. Voolu sagedusel 50 hertsi on mootori pöörlemissagedus 2850 p/min. Elektrimootori poolt tarbitavat võimsust mõõdetakse kilovattmeetriga **19**. Pumba imemisavapoolsele torustikule on paigutatud vaakummeeter **14**, surveavapoolsele torustikule manomeeter **22**.

Manomeetri ja vaakummeetri torustikuga ühenduspuntide vaheline kõrguste erinevus on 0,08 m.

Pumba tootlikkus määratakse kulumõõtjaga **24** või mõõtes vedelikunivoo muutumist paagi **23** nivootoru **25** abil.

### 3.3. TÖÖKÄIK

Töö teostamiseks on kindlasti vajalik:

- mõõta vedelikunivoo paagis **1**,
- tutvuda käesoleva juhendi punktiga 1.3.1.

Pumba karakteristikute määramiseks:

- 1) Aeglaselt, 1–2 minutiliste intervallidega, suurendada pumba pöörlemissagedust seni, kuni vesi ei hakka voolama ülevoolu **8** kaudu paaki **1**;
- 2) Juhindudes kulumõõtjast **24**, vähendada kiirus miinimumini, mille juures vesi veel voolab paaki **23**;
- 3) Kõikidel pöörlemissagedustel, millel tehakse mõõtmisi, määrata kulumõõtjaga **24** vee kulu, pumba imi- ja surveavapoolne rõhk ja tarbitav võimsus. Imiteerida rõhu muutust kraanide **15** ja **21** abil. Juhul kui  $n = \text{const}$ , fikseerida  $Q_e$ ,  $H_e$  ja  $N_e$ .

Töö ajal ei tohi rõhk süsteemis tõusta üle 3 atmosfääri. Pumba suurimal pöörlemissagedusel tuleb kõik mõõtmised teostada võimalikult kiiresti.

Töö tulemused sõltuvuste  $H=f(n)$ ,  $Q=f(n)$ ,  $N_e=f(n)$ ,  $\eta=f(n)$  ning  $Q_e-H_e$ ,  $Q_e-N_e$ ,  $Q_e-\eta$  kui  $n=\text{const}$  kohta esitada graafiliselt.

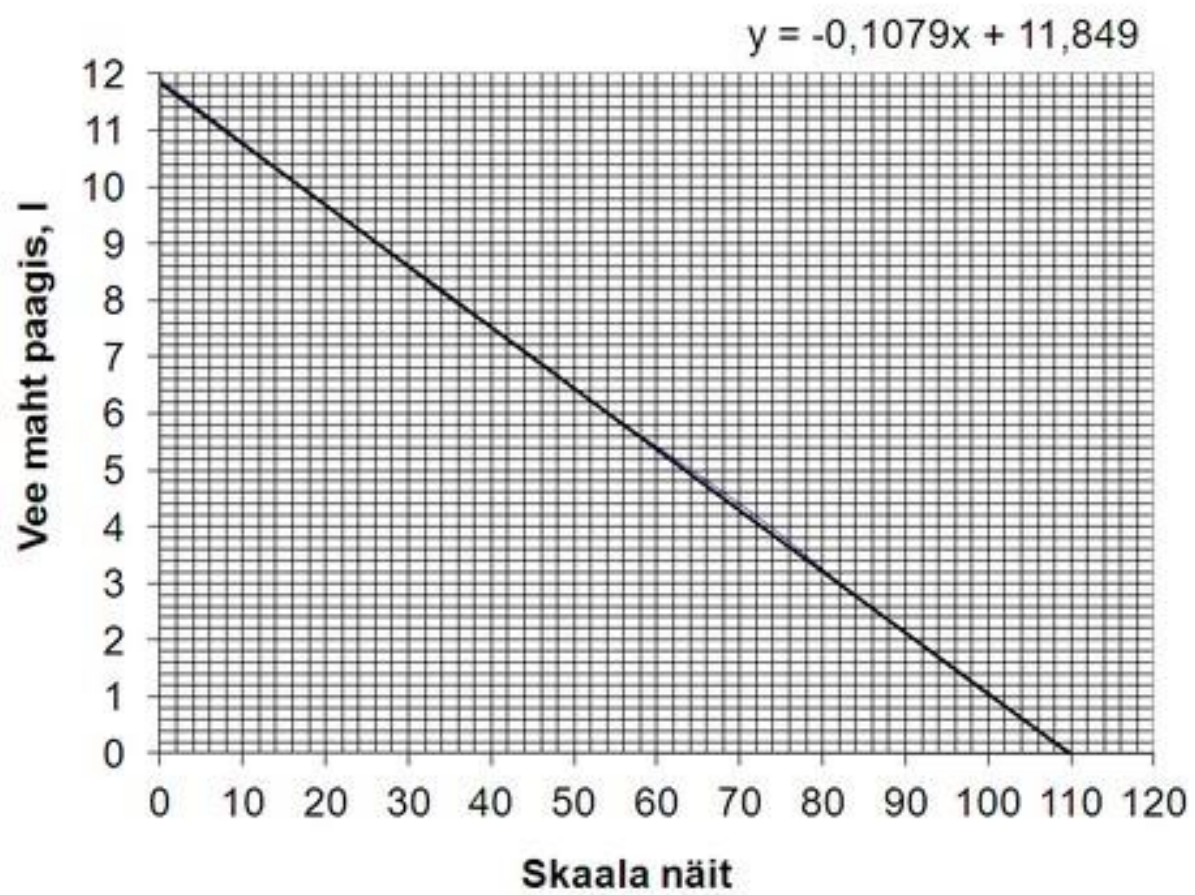
Tabel 3.1.

Pumba karakteristikute määramine

| Nr | Sagedus | Maht, L | Aeg, s | Kulu, | Rõhk | Võimsus | Kasutegur |
|----|---------|---------|--------|-------|------|---------|-----------|
|----|---------|---------|--------|-------|------|---------|-----------|

|  |  |  |  |                   |               |           |                 |               |  |
|--|--|--|--|-------------------|---------------|-----------|-----------------|---------------|--|
|  |  |  |  | m <sup>3</sup> /s | Imemis,<br>Pa | Surve, Pa | Kulutatav,<br>W | Kasulik,<br>W |  |
|  |  |  |  |                   |               |           |                 |               |  |

## LISA 1



## **KASUTATUD KIRJANDUS**

1. W.L.McCabe, J.C.Smith, P.Harriot. Unit Operations of Chemical Engineering. 5th ed., 1993, pp.1130.
2. A.Maastik, H.Haldre, T.Koppel, L.Paal. Hüdraulika ja pumbad. 1995, 467 lk.