

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Energiatehnoloogia instituut

Laboratoorne töö õppeaines
KAT0125 Rakenduslik vedelike ja gaaside voolamine
keskkonnakaitse tehnoloogiates

TÄIDISKOLONNI HÜDRODÜNAAMIKA

Tallinn
2019

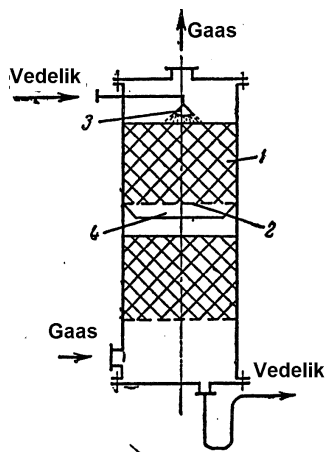
SISSEJUHATUS

Paljudes tööstuslikes protsessides, milles toimub massivahetus (näiteks, absorptsioon ja rektifikatsioon), kasutatakse kolonnaparaate. Kolonnaparaatides toimub massivahetus kahe faasi piirpinnal, seega peaks kolonni ehitus olema selline, et oleks tagatud suur faaside kokkupuutepind. Kolonnid saavad ehituse poolest olla kolme tüüpi:

- pindkolonnid, kus massivahetus toimub kolonni elementide pinnal (kelmekolonnid, täidiskolonnid);
- pihustuskolonnid, kus vedeliku pihustatakse gaasifaasi,
- barbotaažkolonnid, kus gaasi juhitakse mullidena läbi vedeliku kihi.

Selline kolonnide jaotus on tinglik ja näitab ainult faaside kokkupuutepinna iseloomu. Kõige levinumad on täidis- ja taldrikkolonnid.

Käesolevas töös uurime täidiskolonnid hüdrodünaamikat. Täidiskolonnid põhimõtteline skeem on esitatud joonisel 1.



Joonis 1. Täidiskolonn

1 – täidis, 2 – tugirest, 3 – vedeliku pihusti, 4 – vedeliku ümberjaotusseade

Joonisel 1 esitatud kolonnis pihustatakse vedelik kolonni ülemises osas täidisekihile, kust see voolab kelmena mööda täidise elementide pinda alla. Samal ajal juhitakse alt kolonni gaasi, mis liigub üles. Gaasi ja vedeliku piirpinnal (kokkupuutepinnal) toimub massivahetusprotsess.

Gaasi kokkupuude vedelikuga toimub täidise niisutataval pinnal, vedelik voolab piki täidist õhukese kelmena ühelt elemendilt teisele, kusjuures voolamisel ühelt elemendilt alumisele kelme katkeb ja taastub uuesti alumisel elemendil. Seejuures võib osa vedelikku läbida täidise alumisi kihte jugade või ja pritsmetena. Osa vedelikku jääb aga täidise elementide vahele paigale moodustades nn surnud tsoone.

Põhilised näitajad, mis iseloomustavad täidist, on täidise eripind ja vaba mahu osa.

Täidise eripind a – ühes ruumalaühikus olevate täidiseelementide pind

$$a = \frac{A_{\text{täidis}}}{V_{\text{kogu}}}, \quad (1)$$

kus $A_{\text{täidis}}$ on täidise elementide kogu geomeetriline pind, V_{kogu} – kolonni täidisega täidetud osa ruumala.

Vaba mahu osa ε – täidise elementide vahel oleva vaba mahu suhe kolonni täidisega täidetud osa mahtu

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{kogu}} - V_{\text{täidis}}}{V_{\text{kogu}}} = \frac{V_{\text{vaba}}}{V_{\text{kogu}}}, \quad (2)$$

kus $V_{\text{täidis}}$ on täidise elementide ruumala.

Kuiva täidisekihi takistus Δp_{kuiv}

$$\frac{\Delta p_{\text{kuiv}}}{H} = \xi \frac{\omega_0^2 \rho_g a}{8\varepsilon^3}, \quad (3)$$

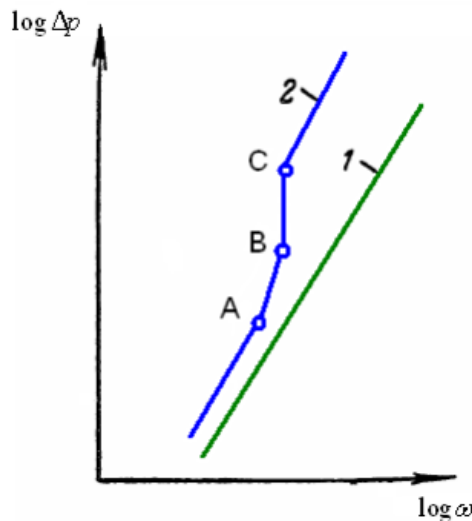
kus H on täidisekihi kõrgus, ξ on kuiva täidise takistuskoeffitsient, mis sõltub hüdrodünaamilisest režiimist, ω_0 – gaasi fiktiivne kiirus (kogu ristlõikepinna kohta), ρ_g – gaasi tihedus, ε - täidise vaba mahu osa.

Gaasi fiktiivne kiirus ω_0

$$\omega_0 = \frac{V}{S}, \quad (4)$$

kus V on gaasi mahtkulu ja S on kolonni ristlõikepindala.

Täidisekihi takistus Δp sõltuvus gaasi fiktiivsest kiirusest, kui vedeliku kulu on konstantne, on esitatud Joonisel 2.



Joonis 2. Täidiskolonne takistuse sõltuvus fiktiivsest gaasi kiirusest
1 – kuiv täidis, 2 – niisutatav täidis
A – rippepunkt, B – inversioonipunkt, C – uppumispunkt

Täidisaparaadid võivad töötada erinevates hüdrodünaamilistes režiimides:

- **kelmerežiim** – tekib väikeste gaasi kiiruste ja niisutustiheduste juures. Täidises kinnipeetava vedeliku hulk praktiliselt ei sõltu sellel režiimil gaasi kiirusest. Kelmerežiim lõpeb esimeses üleminekupunktis ehk nn rippepunktis A.
- **ripperežiim** – kui rippepunktis s.o ripperežiimi alguses gaasi kiirust suurendada, siis gaasi voog talistab vedeliku allavoolamist. Selle tulemusena suureneb täidises kinnipeetava vedeliku hulk. Sellega kaasneb ka täidisekihi takistuse suurenemine ning massiülekanne intensiivistumine.
- **emulgeerimisrežiim** – alates inversioonipunktist B algab täidiseelementide vaheliste tühimike täitumine vedelikuga. Seejuures toimub ***inversioon*** – vedelik muutub pidevaks faasiks, gaas aga dispergeeritud faasiks. Ühtlasi toimub kolonne takistuse järsk tõus. Emulgeerimisrežiimis saavutatakse massivahetuse maksimaalne efektiivsus, kuid samal ajal omab kolonn suurimat hüdraulilist takistust.
- **kaasakanderežiim (uppumisrežiim)** – niisutuseks antud vedelik transporditakse gaasiga kolonnist tagasi välja. Praktilises töös kasutust ei leia.

Emulgeerimisrežiimi säilitamisega on probleeme, selleks kasutatakse erivahendeid. Seega on tavaliselt täidiskolonnide töö piiriks inversioonipunkt. (Tavalistes kolonnides on emulgeerimisrežiim ebapüsiv ning läheb sageli kohe üle uppumisrežiimiks).

2. TÖÖ EESMÄRK

- 2.1. Tutvuda täidiskolooni ehituse ja tööpõhimõttega.
- 2.2. Uurida eksperimentaalselt täidiskolooni hüdrodünaamilisi režiime
 - määrata kuiva täidisekihi takistuse sõltuvus gaasi fiktiivsest kiirusest koloonis,
 - määrata niisutatava täidisekihi takistuse sõltuvus gaasi fiktiivsest kiirusest koloonis (erinevatel niisutustihedustel).
- 2.3. Katseandmete põhjal saada kuiva täidisekihi ja niisutatava täidise takistuse sõltuvused fiktiivsest kiirusest, mis esitatakse graafiliselt, nagu on näidatud joonisel 2.
- 2.4. Katseandmete põhjal arvutada kuiva täidise takistuskoeffitsiendi väärtus ja võrrelda seda arvutusliku takistuskoeffitsiendiga.
- 2.5. Määrata katseandmetest uppumispunkt ning võrrelda seda arvutuslikuga erinevatel niisutustihedustel.

3. KATSESEADME KIRJELDUS

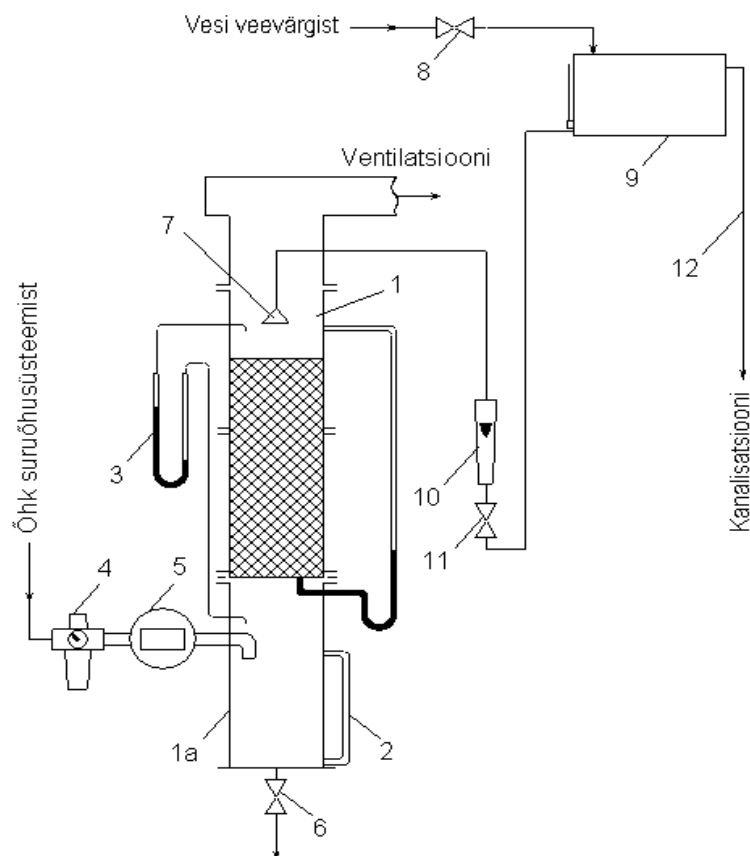
Katseseadme skeem on esitatud Joonisel 3. Katseseadme põhiosaks on kolonn 1. Kolooni sisediaameeter on 98 mm ning täidisekihi kõrgus koloonis on 540 mm. Täidiseks on klaasrõngad mõõtmetega 1x10x14 mm. Rõngaste arv on 222.

Gaas (õhk) juhitakse kolooni alumisse osasse suruõhusüsteemist. Gaasi kulu reguleeritakse redukoriga 4 ning mõõdetakse gaasiarvestiga 5.

Survepaagist 9 suunatakse vesi isevoolu teel kolooni ülemises osas asuvale pihustile 7. Vee kulu reguleeritakse ventiiliga 11 ja mõõdetakse rotameetriga 10. Survepaaki täidetakse veevärgi veega torustikust avades kraani 8. Veenivood surve hoitakse ülevoolu 12 abil.

Kolooni (täidisekihi) takistust mõõdetakse diferentsiaalmanomeetriga 3, mis on ühendatud kolooniga enne ja pärast täidisekihti.

Kolooni veekoguja 1a tühjendatakse kraaniga 6. Vee nivood veekogujas mõõdetakse nivootoruga 2.



Joonis 3. Katseseadme skeem

4. TÖÖ KÄIK

4.1. Kuiva täidisekihi takistuse mõõtmine

- Kuivatatakse kolonni täidisekiht. Selleks avatakse suruõhuliin ning puhutakse kolonn õhuga läbi ~10 – 20 minuti kestel,
- Kui täidis on kuiv, mõõdetakse täidisekihi takistust erinevatel õhu kiirustel. (Õhu kulu suurendatakse 0 kuni 10 l/s).

Selleks reguleeritakse reductoriga välja kindel õhu kulu. Pärast *kolonni töö stabiliseerumist s.o statsionaarse režiimi saabumisel*, mõõdetakse arvesti abil õhu kulu ja diferentsiaalmanomeetriga täidisekihi takistus. Mõõtetulemused kantakse tabelisse 1.

Seejärel korratakse mõõtmist järgmise õhu kulu juures.

- Mõõtmiste lõpetamise järel suletakse suruõhuliin,
- Saadud tulemuste põhjal joonestatakse graafik $\Delta p_{kuiv} = f(\omega)$. Sõltuvus peab olema lineaarne.
- Vajadusel korratakse mõõtmisi.

NB! Kolonni töö on stabiliseerunud, õhu (ja vee) kulu ning kolonni takistus ei muutu ajas st – kui manomeetri näit antud õhu (ja vee kulu juures) ei muutu, siis võib kolonni tööd lugeda stabiliseerunuks.

(Statsionaarne režiim – režiim, milles seadme tööd iseloomustavad suurused ei muutu ajas).

4.2. Niisutatava täidisekihi takistuse mõõtmine

- Survepaak 9 täidetakse veega veevärgist. Selleks avatakse kraan ning kui survepaagist hakkab vesi voolama ülevoolutorusse, siis vähendatakse survepaaki voolava vee kulu,

NB! Kogu katse vältel peab ülevool olema, sest sellega tagatakse püsiv vee kulu kolonni.

- Rotameetri abil reguleeritakse välja kindel vee kulu (vahemikus 2 kuni 22 ml/s).
- Mõõdetakse niisutatava täidisekihi takistust erinevatel õhu kiirustel. (Õhu kulu suurendatakse 0 kuni 10 l/s).

Selleks reguleeritakse reduktoriga välja kindel õhu kulu. Pärast kolonni töö stabiliseerumist s.o statsionaarse režiimi saabumisel, mõõdetakse arvesti abil õhu kulu ja diferentsiaalmanomeetriga täidisekihi takistus. Mõõtetulemused kantakse tabelisse 2.

Seejärel korratakse mõõtmist järgmise õhu kulu juures.

- Uppumisrežiimi saabumisel lõpetatakse katse – suletakse suruõhuliin ja vee vool kolonni.

5. KATSEANDMETE ANALÜÜS JA ARVUTUSED

5.1 Kuiva ja niisutatava täidisekihi takistuse sõltuvus gaasi fiktiivsest kiirusest

Katseandmete põhjal leitakse graafilised sõltuvused (vt joonis 2)

$$\Delta p_{kuiv} = f(\omega_0) \quad (5)$$

$$\Delta p_{niiske} = f(\omega_0) \quad (6)$$

Graafilisest sõltuvusest (6) määratakse rippepunkt A, inversioonipunkt B ja uppumispunkt C. Leitakse õhu fiktiivsed kiirused vastavates punktides.

5.2. Katselise kuiva täidise takistuskoeffitsiendi ξ määramine

Kuiva täidise takistuskoeffitsient ξ arvutatakse valemi (3) abil

$$\frac{\Delta p_{kuiv}}{H} = \xi \frac{\omega_0^2 \rho_g a}{8\varepsilon^3}.$$

Selleks

- Arvutatakse täidise eripind a ja vaba mahu osa ε kasutades valemeid (1) ja (2),
- Täidise pindala A, kolonni täidisega täidetud osa ruumala V_{kogu} ja täidiseelementide ruumala $V_{täidis}$ arvutatakse lähtudes täidiskolonni ja täidiseelemendi geomeetriast,
- Kuiva täidisekihi talistus Δp_{kuiv} ja õhu fiktiivne kiirus kolonnis ω_0 võetakse graafiliselt sõltuvuselt (5).

5.3. Teoreetilise (arvutusliku) kuiva täidise takistuskoeffitsiendi ξ määramine

On kindlaks tehtud, et takistuskoeffitsient sõltub gaasi voolamise hüdrodünaamilisest režiimist ning seda on võimalik arvutada kasutades järgmisi seoseid:

- Laminaarne režiim, $Re_G < 40$

$$\xi = \frac{140}{Re_G} \quad (7)$$

- Turbulentne režiim, $Re_G > 40$

$$\xi = \frac{16}{Re_G^{0,2}} \quad (8)$$

NB! Re leitakse järgmise valemi abil

$$Re_G = \frac{4\omega_0\rho_G\varepsilon}{a\mu_G} \quad (9)$$

Kus μ_G on õhu dünaamiline viskoossuskoeffitsient katse temperatuuril, Pa·s.

5.4. Määrata katseandmetest uppumispunkt ning võrrelda seda arvutusliku uppumispunktiga

Katseline uppumispunkt C (s.o õhu kiirus ω selles punktis) leitakse graafiliselt sõltuvuselt (6).

Seejärel arvutatakse õhu kiirus uppumispunktis o kasutades järgmist seost

$$\log\left(\frac{\omega_0^2 a \rho_G \mu_L^{0,16}}{g \varepsilon^3 \rho_L}\right) = b - 1,75 \left(\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}\right)^{0,125}, \quad (10)$$

Kus μ_L on vee dünaamiline viskoossus, mPa·s, ρ_L on vee tihedus, kg/m³, L on vee masskulu, kg/s, ja G õhu masskulu, kg/s.

Rippepunktis on $b=0,022$ ja uppumispunktis on $b=-0,073$.

Võrreldakse katsest saadud ja arvutatud õhu kiirust uppumispunktis.

6. TULEMUSTE ESITAMINE

Töö aruandes peavad olema järgmised osad:

- töö ülesanne,
- katseseadme skeem ja katseandmed (Tabelid 1 ja 2),
 - joonis - kuiva ja niisutatava täidisekihi takistuse sõltuvus gaasi fiktiivsest kiirusest kolonnis,
- arvutustulemused, katseliste ja arvutuslike suuruste võrdlus,
- kokkuvõte ja järeldused.

KIRJANDUS:

Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987. 567 с.

W.L.McCabe, J.C.Smith, P.Harriot. Unit Operations of Chemical Engineering. 5th ed., 1993

Tabel 1. Kuiva täidisekihi takistuse mõõtmine

Nr	Õhu kulu G, l/s			Õhu fiktiivne kiirus, m/s	Dif manomeetri näit, mmH ₂ O	Kuiva täidisekihi takistus, Δp_{kuiv} , Pa
	Õhu maht, l	Aeg, s	G, l/s			

Tabel 2. Niisutatava täidisekihi takistuse mõõtmine

Rotameetri näit :

Vee kulu, l/min:

Nr	Õhu kulu G, l/s			Õhu fiktiivne kiirus, m/s		Dif manomeetri näit, mmH ₂ O	Niisutatava täidisekihi takistus, Δp_{niiske} , Pa
	Õhu maht, l	Aeg, s	G, l/s				