

L. Paal, A. Aitsam

HÜDRAVLIKA
ülesannete kogu

Tallinn
1962

Arh. - 2000

ARH

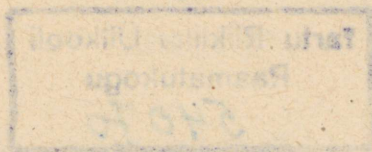


A-24563

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
Sanitaartechnika ja hüdraulika kateeder

A. Aitsam, L. Paal

HÜDRAULIKA ÜLESANNETE KOGU



ARHIIVKOGU

Tallinn
1962

Таллинский политехнический институт
Калинина 101

Кафедра гидравлики и сантехники

А. Айтсам и Л. Пааль

Сборник задач по гидравлике

На эстонском языке

2



ARHIIVKOGU

S i s s e j u h a t u s

Käesolev ülesannete kogu sisaldab 136 ülesannet hüdrauliika üldkursuse ulatuses. Ülesannete kogu iga osa ees on toodud lühike selgitav lõik koos vajalike valemitega. Torustike arvutamise hõlbustamiseks on lisades antud arvutustabelid.

Ülesannete kogu koostamisel on kasutatud järgmisi materjale:

И.И. Куколевский, Задачник по гидравлике, 1956.

А.Б. Соколов, Задачи по гидравлике, 1956.

С.Б. Старк, Основы гидравлики, насосы и воздухоподъемные машины, 1951.

И.А. Панчурин, Сборник задач по гидравлике, ч. I, 1953.

I. Hydrostaatika

§ 1. Hydrostaatiline rõhk

Hydrostaatiline rõhk p antud vedeliku punktis on avaldatav valemiga

$$p = \lim_{d\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta \omega} \right) = \frac{dP}{d\omega}, \quad (1 - 1)$$

kus P on vedeliku rõhujõud pinnale.

Hydrostaatiline rõhk mõjub risti pinnale (pinna sisenise normaali suunas) ja tema suurus ei olene pinna orientatsioonist ruumis. Rõhk oleneb ainult antud punkti koordinaatidest ja vedeliku tihedusest

$$p = f(\varphi, x, y, z). \quad (1 - 2)$$

Rõhu dimensiooniks on jõud pinnale, s. o. kg/cm^2 , kg/m^2 , t/m^2 jne.

Vedelikule mõjuvatest välisjõududest tingitud rõhku seisvas vedelikus nimetatakse absoluutseks rõhkuks (p_a) ja väljendatakse harilikult absoluutsetes atmosfäärides (ata).

Rõhku võib arvutada ka tinglikust nullist, milleks tavaliselt võetakse atmosfäärirõhk ($p_{at} = 1 \text{ kg/cm}^2$). Viimasel juhul saame ülerõhu ($p_{ü}$), mis näitab tegeliku rõhu erinevust atmosfäärirõhust ($atü$), s. o.

$$p_{ü} = p_a - p_{at}. \quad (1 - 3)$$

Kui absoluutne rõhk on atmosfäärirõhust väiksem, on ülerõhk negatiivne suurus. Atmosfääri- ja absoluutse rõhu vahet nimetatakse vaakumiks (p_v), mis avaldub järgmiselt:

$$p_v = p_{at} - p_a \quad (1 - 4)$$

ehk

$$p_v = - p_{ü}. \quad (1 - 5)$$

Kokkusurumatus, liikumatus vedelikus on rõhujaotus (2) avaldatav valemiga (joon. 1)

$$p_{a2} = p_{a1} + \delta h = p_{at} + \delta H, \quad (1 - 6)$$

kus p_{a1} on absoluutne rõhk meelevaldses punktis 1;

p_{a2} - absoluutne rõhk punktis 2;

δ - vedeliku erikaal kg/m^3 .

Ülerõhk punktis 2 on

$$p_{ü} = \delta H, \quad (1 - 7)$$

kus H on punkti 2 kaugus veepinnast.

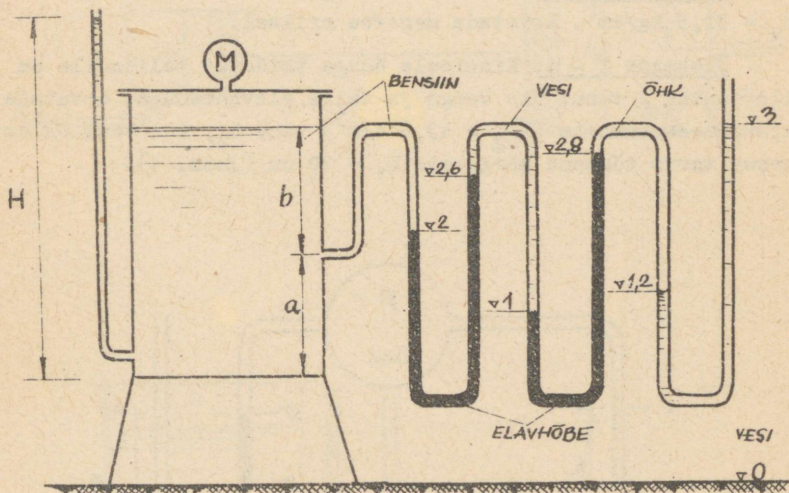
Seega võib hüdrostaatilist rõhku vedeliku antud punktis avaldada vedelikusamba kõrguse kaudu järgmiselt:

$$\frac{p_a - p_{at}}{\delta} = \frac{p}{\delta} = H, \quad (1 - 8)$$

Joon. 1 mida nimetatakse piesomeetriliseks kõrguseks.

Ülesanne 1 - 1. Reservuaarile, mis on täidetud bensiiniga ($\gamma_b = 700 \text{ kg/m}^3$) kõrguseni $a + b = 1,9 \text{ m}$, on kinnitatud kolm erinevat seadet rõhu mõõtmiseks (joon. 2). Reservuaari kaanele on kinnitatud metallmanomeeter, külgsseinale põhja juurde pie-

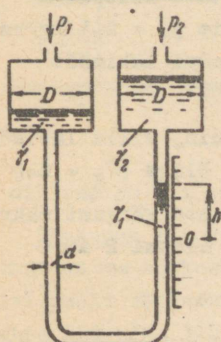
someeter ja teisele külgeinalale sügavusel $b = 1,3$ m kolmekordne diferentsiaalmanomeeter, mis täidetud elavhõbeda ($\gamma_{Hg} = 13600$ kg/m^3), vee ($\gamma = 1000$ kg/m^3) ja õhuga ($\gamma_g \approx 0$).



Joon. 2

Arvutada metallmanomeetri lugem M ja bensiinisamba kõrgus H piesomeetris, kui vedeliku pinnad kolmekordses diferentsiaalmanomeetris on joonisel näidatud kõrgusel (vedelike pinnad on antud meetrites pörandast).

Ülesanne 1 - 2. Kahe vedelikuga mikromeeter koosneb U torust läbimõõduga $d = 5$ mm. Manomeeter on ühendatud anumatega, millede läbimõõt $D = 50$ mm (joon. 3). Seade on täidetud kahe mitteseguneva ja lähedaste erikaaludega vedelikuga: etüülpiirituse vesilahuse ($\gamma_1 = 870$ kg/m^3) ja petrooleumiga ($\gamma_2 = 830$ kg/m^3).



Joon. 3

Anda seos mikromanomeetriga mõõdetava gaasi rõhkude vahe $\Delta p = p_1 - p_2$ ja vedelike lahutustasapinna paigutuse h vahel. Arvutada Δp , kui $h = 280$ mm.

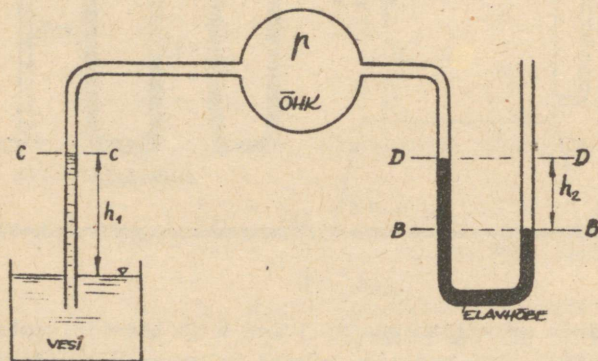
Näidata, mitu korda väheneb h antud Δp juures, kui

a) puuduvad ülemised armad;

b) seade on täidetud ainult vedelikuga δ_1 .

Ülesanne 1 - 3. Meres 300 m sügavusel mõõdetud ülerõhk $p_{\text{ü}} = 31,5 \text{ kg/cm}^2$. Arvutada merevee erikaal.

Ülesanne 1 - 4. Kinnisele õhuga täidetud ballooni on kinnitatud 2 toru: üks veega ja teine elavhõbedaga. Arvutada elavhõbedasammaste ($\delta_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ t/m}^3$) vahe h_2 , kui vesi on esimeses torus tõusnud kõrgusele $h_1 = 30 \text{ cm}$ (joon. 4).



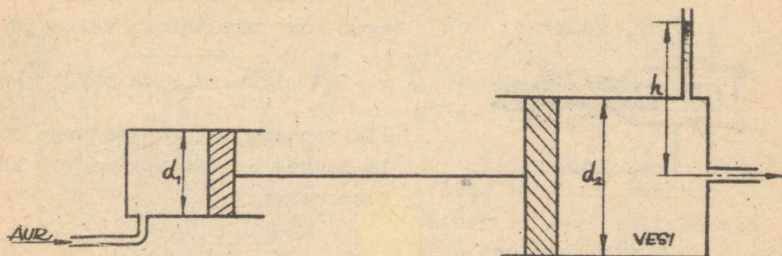
Joon. 4

Ülesanne 1 - 5. Kui suur on auruga töötava kolbpumba rõhk h , kui manomeetriline rõhk aurusilindris $p_1 = 2,5 \text{ kg/cm}^2$. Aurusilindri läbimõõt $d_1 = 12 \text{ cm}$ ja veesilindri läbimõõt $d_2 = 20 \text{ cm}$ (joon. 5).

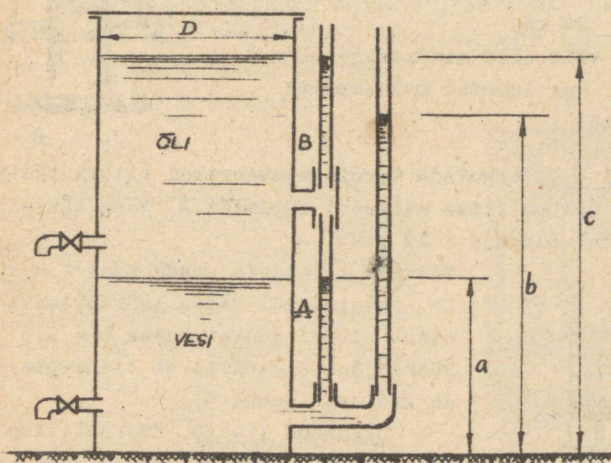
Ülesanne 1 - 6. Silindriline settebassein, mille läbimõõt $D = 0,4 \text{ m}$, on täidetud veega kõrguseni a ja õliga ($\delta_{\text{õ}} = 840 \text{ kg/m}^3$) kõrguseni C . Vee ja õli lahutustasapinna kõrgust määratakse mõõteklaasi A abil, aga õli tasapinda klaasi B abil (joon. 6).

Arvutada:

1) vee ja õli maht settebasseinis, kui $a = 0,5 \text{ m}$ ja $b = 1,6 \text{ m}$;



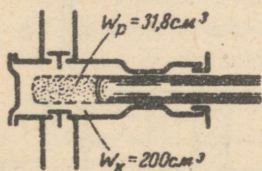
Joon. 5



Joon. 6

2) milline on õli erikaal, kui $a = 0,2$ m, $c = 1,4$ m ja $b = 1,2$ m.

Ülesanne 1 - 7. Arvutada kolbpumba mahuline kasutegur, mis on tingitud vee kokkusurumisest pumbas, kui pumba maht $W_k = 200$ cm³. Kolvi poolt väljasurutud vee maht on $W_p = 31,8$ cm³ ja rõhk pumbas 210 ning 320 atü. Vee mahuline elastsusmoodul $E = 21\ 000$ kg/cm². Pumba korpus on jäik (joon. 7).

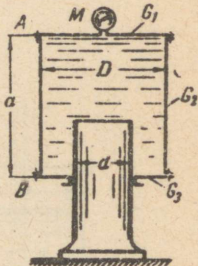


Joon. 7

Ülesanne 1 - 8. Silindriline anum, läbimõõduga $D = 0,2 \text{ m}$ ja kõrgusega $a = 0,4 \text{ m}$, on täidetud veega ja toetub $d = 0,10 \text{ m}$ läbimõõduga plunžerile (joon. 8).

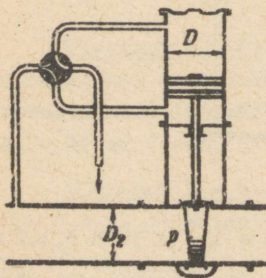
Arvutada manomeetri lugem M ja jõud poldigruppides A ja B , kui anuma ülemise kaane kaal $G_1 = 150 \text{ kg}$, silindrilise osa kaal $G_2 = 300 \text{ kg}$, anuma alumise osa kaal $G_3 = 120 \text{ kg}$.

Milline rõhk võib olla minimaalne plunžeri läbimõõd, kui lubatud maksimaalne rõhk $M = 30 \text{ atü}$?



Joon. 8

Ülesanne 1 - 9. Arvutada torule monteeritud siibri tõstmiseks vajaliku hüdraulilise silindri läbimõõd D . Toru läbimõõd $D_2 = 1 \text{ m}$ ja rõhk torus $p = 10 \text{ atü}$.



Joon. 9

Arvutada, kui plunžeri ja

Märkus: pumba mahuline kasutegur on arvatav valemiga

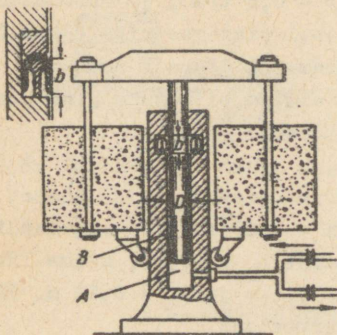
$\eta = \frac{W_d}{W_p}$, kus W_d on pumba tegelik toodang, s. o. toodang, mille juures on arvestatud vee kokkusurutavust.

Kõikide liikuvate osade kaal $G = 200 \text{ kg}$. Arvutamisel võtta hõõrdekoefitsient siibri juhtpindades $\mu = 0,3$ ja hõõrdejõud silindris 5% liikuvate osade kaalust (joon. 9).

Ülesanne 1 - 10. Hüdraulilise akumulaatori laadimisel pumpab pump vett silindrisse A , tõstes plunžeri B koos koormusega üles. Akumulaatori tühjendamisel liigub plunžer alla ja vee maht silindris A väheneb (joon. 10).

Arvutada:

1) vee rõhk aku laadimisel ja tühjendamisel, kui lisaraskuse kogukaal $P = 100 \text{ t}$;



Joon. 10

Arvutada pumpamiseks vajalik jõud pumba käepidemele, kui õlgade suhe on $a/b = 60/700$, vedeliku rõhk tungrauas koormuse juures $P = 12$ t. Pumba kasutegur võtta $\eta_p = 0,65$, silindril $\eta_s = 0,9$.

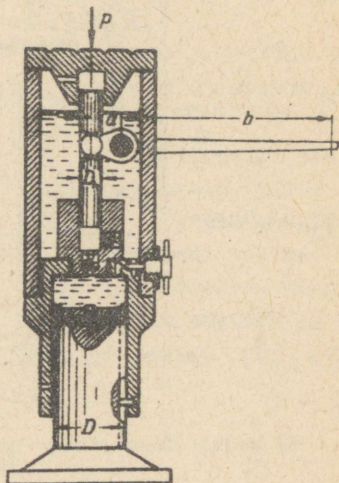
Ülesanne 1 - 12. Õhukeseseinälises silindris, mille läbimõõdud $d = 0,3$ ja $D = 0,8$ m, on tekitatud vaakuum ja vesi silindris on tõusnud kõrguseni $a+b=1,9$ m. Silinder on asetatud üle veepinna A kõrgusele $b = 1,5$ m ja toetatud tugeledele C (joon. 12).

Arvutada jõud, mis mõjub tugeledele C, kui silindri omakaal $G = 100$ kg.

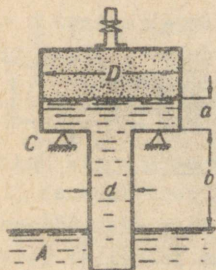
Ülesanne 1 - 13. Väikeste jõudude mõõtmiseks kasutatakse vedeliku dünamomeetrit, mis koosneb mingisuguse kõrguseni elavhõbedaga täidetud anumast A ja elavhõbedasse asetatud kuplist G. Ruum kupli all on täidetud pii-

plunžeri läbimõõd $D = 400$ mm, mansett-tihendi kõrgus $b = 40$ mm ja hõõrdekoefitsient tihendis $\mu = 0,1$;
2) aku kasutegur.

Ülesanne 1 - 11. Hüdrauliline tungraud koosneb liikumatust alusest läbimõõduga $D = 200$ mm ja sellel liikuvast kahekambrilisest silindrist. Silindri alumisele osale on kinnitatud $D_h = 20$ mm läbimõõduga plunžerpump. Silindri ülemises osas on vedeliku reservuaar (joon. 11).



Joon. 11

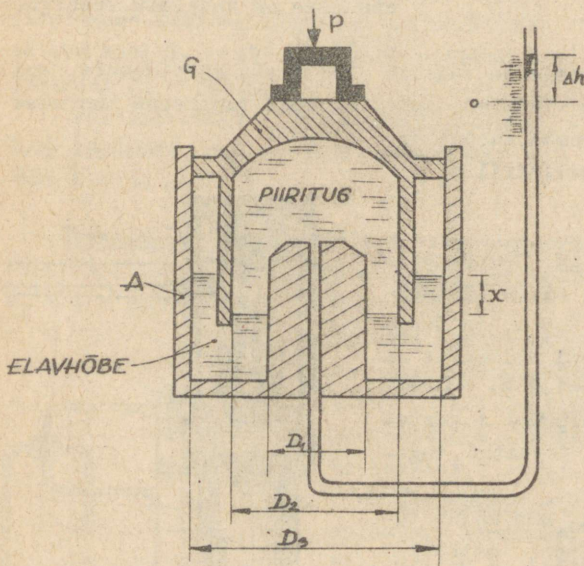


Joon. 12

ritusega ($\gamma = 0,8 \text{ t/m}^3$) ja ühendatud klaastoru abil piesomeetriga (joon.13). Kupli koormamisel jõuga P suureneb rõhk kupli all ja piirituse pind piesomeetris tõuseb.

Arvutada jõud P, mille mõjul piirituse pind piesomeetris tõuseb kõrguse $\Delta h = 0,25 \text{ m}$ võrra algasendist. Kupli läbimõõt $D_2 = 0,2 \text{ m}$, anuma läbimõõdud $D_1 = 0,1 \text{ m}$ ja $D_3 = 0,21 \text{ m}$. Hõõret mitte arvestada.

Ülesanne 1 - 14. Ohukeseseinaline kuppel, läbimõõduga $D = 3 \text{ m}$

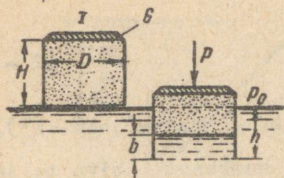


Joon. 13

ja kõrgusega $H = 2 \text{ m}$, on massiivse põhjaga. Kuppel lastakse vette I asendist, kus ta on täidetud atmosfäärirõhuga (joon. 14).

Arvutada:

1) kupli süvis h ja tema täitumine veega b , kui kupli kaal on 10 t . Atmosfäärirõhk võtta 750 mm elavhõbedasammast;



Joon. 14

2) täiendav jõud P , mis on vajalik kupli uputamiseks ($h = H$).
 Öhu temperatuur kupli all on konstantne.

§ 2. Hüdrostaatiline rõhujõud tasapinnale

Hüdrostaatiline rõhujõud tasapinnalisele seinale (joon.15) arvutatakse valemiga

$$P = p_c \omega, \quad (2 - 1)$$

kus p_c on rõhk seina raskuskeskmes C ;

ω - seina pindala.

Kui arvestada ainult ülerõhuga, siis

$$P = \delta h_c \omega, \quad (2 - 2)$$

kus h_c on pindala ω raskuskeskme c sügavus vedeliku pinnast.

Kui on tegemist nelinurkse pinnaga, mille laius on b ja mis on asetatud horisondi suhtes kaldu nurga α võrra ning kui vedeliku sügavus on H ja pinna pikkus $\frac{H}{\sin \alpha}$, siis

Joon. 15

$$P = \frac{1}{2} \delta \frac{H^2}{\sin \alpha} b. \quad (2 - 3)$$

Kui $\alpha = 90^\circ$, s. o. vertikaalseina puhul, saab valem (2 - 3)

kuju

$$P = \frac{1}{2} \delta H^2 b. \quad (2 - 4)$$

Punkti, kuhu rakendub alati pinna normaali suunas mõjuv rõhujõud P , nimetatakse rõhukeskmeks D .

Kui arvestada ainult ülerõhku, siis rõhukeskme kaugus l_d

(joon. 15) on arvatav valemiga:

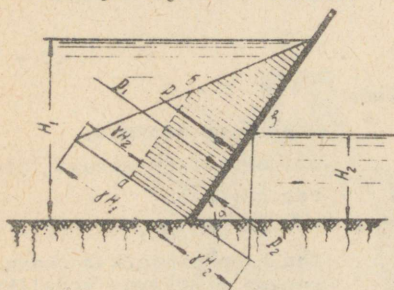
$$l_d = l_c + \frac{I_c}{\omega l_c}, \quad (2 - 5)$$

kus l_c on raskuskeskme kaugus vedeliku pinnast (joon. 15),

I_c - pinna inertsmoment pinna raskuskeset läbiva telje suhtes.

Suurust $e = \frac{I_c}{\omega l_c}$ nimetatakse hüdrostaatilise rõhu ekstsentrilisuseks ja ta on alati positiivne, s. t. rõhukese asetseb alati allpool pinna raskuskeset.

Hüdrostaatilise rõhujõu leidmiseks on sageli sobiv kasutada rõhu epiüüri, mis annab hea ettekujutuse rõhujaotusest, suurusest ja mõjumise suunast.



Joon. 16

Juhul, kui tasapinnalise seina mõlemal pool on vedelik (joon. 16), arvutatakse summaarne rõhujõud vasakult ja paremalt mõjuvate rõhujõudude vahena.

Seega antud juhul (joon. 16)

$$P = P_1 - P_2$$

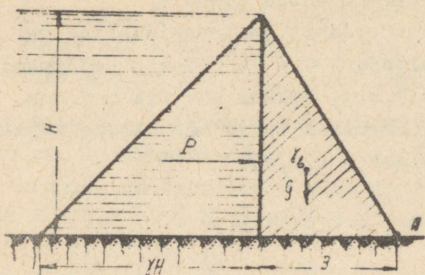
ehk

$$P = \frac{1}{2} \gamma \frac{H_1^2}{\sin \alpha} b - \frac{1}{2} \gamma \frac{H_2^2}{\sin \alpha} b = \frac{1}{2} \gamma \frac{b}{\sin \alpha} (H_1^2 - H_2^2)$$

ja jõud P on suunatud vasakult paremale pinna normaali suunas.

Ülesanne 2 - 1. Arvutada kolmnurkse profiiliga paisu põhja laius B tingimusel, et pais oleks ümberlukkamisele püsiv punkti A suhtes. Arvutamisel lähtuda 1 m paisu pikkusest, kusjuures $H = 5,0$ m ja betooni mahukaal $\gamma_b = 2,2$ t/m³. Ümberlukkamisel tagavarakoeffitsient võtta $k = 1,50$ (joon. 17).

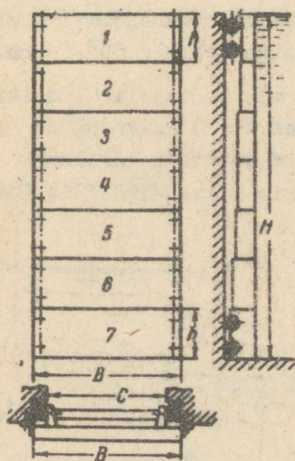
Ülesanne 2 - 2. Paistu on tehtud nelinurkne väljalõige H x C, mille kaudu vesi voolab turbiini (joon. 18). Turbiinide remondi ajal ava suletakse 7 šandooriga, kusjuures üksiku šandoori mõõtmed $h \times B = 1,2 \times 3,4$ m². Kõikidel šandooridel on 2 paari rullrattaid.



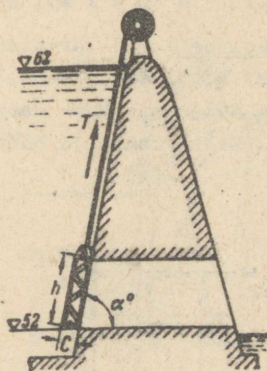
Joon. 17

Arvutada:

- 1) hüdrostaatiline rõhujõud esimesele ja seitsmendale šandoorile ning maksimaalne paindemoment juhul, kui rattad asuvad šandoori otstes;



Joon. 18

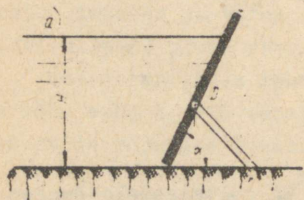


Joon. 19

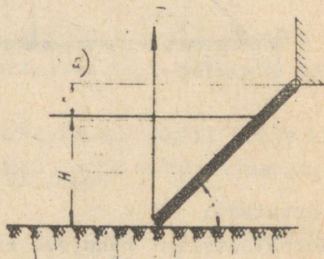
- 2) millisele vertikaalkaugusele Δh šandoori raskuskeskmest tuleks asetada üks paar rattaid senise kahe paari asemel, et

ei rikutaks šandoori tasakaalu antud asendis.

Ülesanne 2 - 3. Veehaardehitise tasapinnaline vari liigub kaldpinnal, mille kaldenurk $\alpha = 70^\circ$. Varja mõõtmed: kõrgus $h = 1,8$ m, laius $b = 2,4$ m, paksus $c = 0,4$ m (joon. 19). Varja omakaal $G = 2,0$ t. Arvutada varja tõstmiseks vajalik jõud T , kui hõõrdekoefitsient $f = 0,35$.



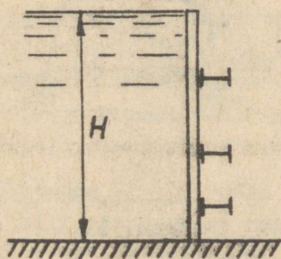
Joon. 20



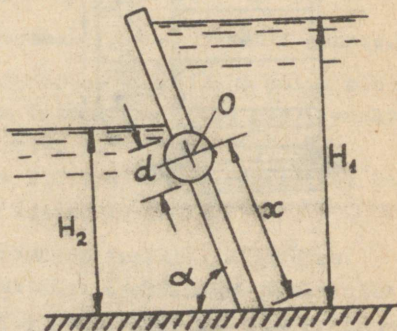
Joon. 21

Ülesanne 2 - 4. Kaldu asetatud tasapinnaline kilp on toetatud punktis D, mis asub 20 cm allpool kilbi raskuskeset C. Kilp on tasakaalus. Arvutada hüdrostaatiline rõhujõud 1 m pikkusega kilbile ($b = 1$ m), kui kilbi kaldenurk $\alpha = 60^\circ$ (joon.20).

Ülesanne 2 - 5. Arvutada jõud T , mis on vajalik 1 m laiuse ($b = 1$ m) kilbi tõstmiseks. Vee sügavus $H = 3$ m, veepinna ja šarniiri telje vaheline kaugus $h = 1,0$ m ja kilbi kaldenurk $\alpha = 60^\circ$. Kilbi kaalu ja hõõret šarniiris mitte arvestada (joon. 21).



Joon. 22



Joon. 23

Ülesanne 2 - 6. Asetada vertikaalseina kolm horisontaalset kandetala selliselt, et talad oleksid võrdselt koormatud. Kilbi kõrgus $H = 3$ m, kilbi laius 5 m (joon. 22).

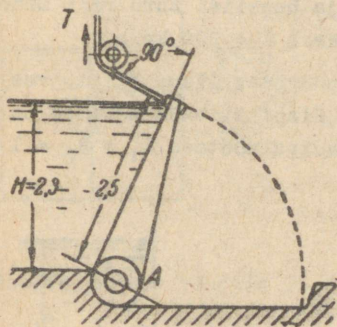
Ülesanne 2 - 7. Tasapinnaline kilp peab pöörduma automaatselt vee läbilaskmiseks, kui veepinna kõrgus $H_1 \geq 6$ m. Kilp on kinnitatud šarniirile punktis O, kusjuures šarniiri läbimõõt $d = 0,4$ m ja hõõrdekoefitsient šarniiris $f = 0,2$ (joon. 23).

Arvutada, millisel kaugusel x peab asetsema šarniiri telg O, kui kilbi teisel poolel veepinna kõrgus $H_2 = 3$ m. Kilbi laius $B = 8$ m, kaldenurk $\alpha = 60^\circ$. Kui suur jõud mõjub šarniiridele?

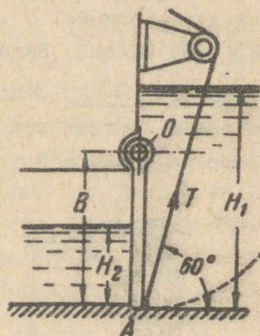
Ülesanne 2 - 8. Tasapinnalise klappsulu $2,5 \times 10$ m² abil hoitakse paisutusvee pind kõrgusel $H = 2,3$ m (joon. 24).

Arvutada:

- 1) varja hoidmisel antud asendis trossis T tekkiv summaarne jõud;
- 2) maksimaalne varja paindemoment ja reaktsioon šarniiris A.



Joon. 24



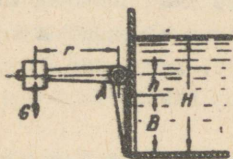
Joon. 25

Ülesanne 2 - 9. Tasapinnaline nelinurkne kilp mõõtmetega $B \times L = 3 \times 4$ m² sulgeb paisu ava. Paremal pool kilpi on veepinna kõrgus $H_1 = 5$ m, vasakul pool $H_2 = 2$ m. (joon. 25).

Arvutada:

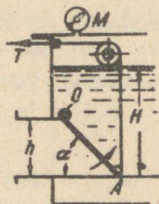
- 1) kilbi tõstmiseks vajalik trossi tõmbejõud;
- 2) millise jõuga P_4 surutakse kilp vastu tuge A suletud olekus.

Ülesanne 2 - 10. Nelinurkne ava $B \times B = 1 \times 1 \text{ m}^2$ vertikaalseinas suletakse kilbiga. Kilp surutakse vastu seina vastu-kaaluga G , mille õlg $r = 1,5 \text{ m}$ (joon. 26).



Joon. 26

Arvutada vastukaalu G suurus, mis on vajalik veepinna hoidmiseks kõrgusel $H = 2 \text{ m}$, kui kaugus $h = 0,3 \text{ m}$. Leida reaktsioonijõud liigendis A.

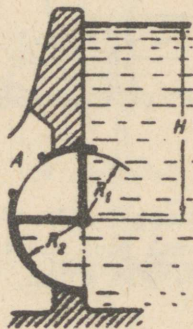


Joon. 27

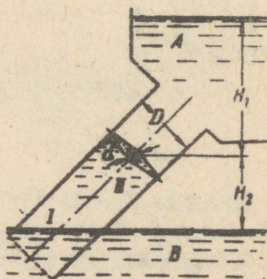
Ülesanne 2 - 11. Pöörduv klapp AO sulgeb väljavoolu bensiinihoidlast ruudukujulise ristlõikega torusse $h = 0,3 \text{ m}$. Klapp on kinnitatud šarniirselt punktis O ja asetseb marga all $\alpha = 45^\circ$ (joon. 27).

Arvutada trossi tõmbejõud T , mis on vajalik klapi avamiseks. Bensiini pind kõrgusel $H = 0,85 \text{ m}$ ja bensiini auru rõhk manomeetri järgi $0,05 \text{ kg/cm}^2$. Bensiini erikaal $\delta = 700 \text{ kg/m}^3$.

Ülesanne 2 - 12. Täisnurkne pööratav klapp sulgeb vee väljavoolu reservuaarist ava kaudu A. Klapi tiibade mõõtmed on: risti joonise pinnaga $B = 1 \text{ m}$ ja radiaalmõõtmed $R_1 = R_2 = 1 \text{ m}$ (joon. 28).



Joon. 28



Joon. 29

Arvutada:

- 1) klapi mõjuv hüdrostaatiline rõhujõud ja selle jõu moment klapi telje suhtes, mis asub $H = 2,5$ m võrra allpool veepinda;
- 2) millise pikkuse R_2 juures rõhujõudude moment telje suhtes võrdub nulliga.

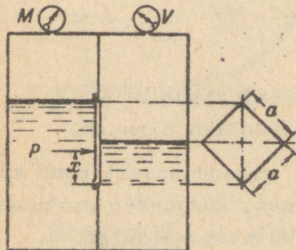
Ülesanne 2 - 13. Torusse $D = 1$ m, mis asetseb 45° nurga all ja ühendab reservuaare A ja B, on asetatud ketasklapp (joon. 29). Arvutada klapi avamiseks vajalik algmoment M , kui klapi laagrite läbimõõt $d = 0,15$ m ja hõõrdekoefitsient laagrites $f = 0,2$. Klapi avamine toimub kellaosuti liikumisele vastassuunas.

Ülesanne lahendada juhtudel, kui

- 1) torus klapi all ei ole vett ja klapi mõjub alt atmosfääri rõhk ning
- 2) torus klapi all on vesi.

Kõrgused $H_1 = 1,2$ m ja $H_2 = 2,0$ m.

Ülesanne 2 - 14. Suletud reservuaar on täidetud naftaga ($\gamma = 900$ kg/m³). Reservuaar on jagatud kahte ossa, kusjuures vaheseinas ära on suletud ruudukujulise luugiga, mille küljepikkus $a = 1,0$ m (joon. 30). Rõhk reservuaari kummaski osas on erinev: vasakul on rõhk määratud manomeetriga $M = 0,15$ kg/cm² ja paremal vaakuummeetriga $V = 0,1$ kg/m². Nafta pind on näidatud joonisel. Arvutada summaarse hüdrostaatilise rõhujõu suurus luugile ja jõu rakenduspunkt.



Joon. 30

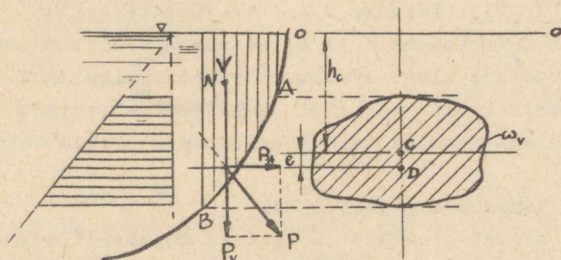
rõhujõu suurus luugile ja jõu rakenduspunkt.

§ 3. Hüdrostaatiline rõhujõud kõverpinnale

Hüdrostaatilist rõhujõudu kõverpinnalisele kujundile võib vaadelda kui pinna igas punktis pinnale risti olevate elementaarrõhujõudude summat $\Sigma p d\omega$.

Praktikas esinevate ülesannete puhul (näit. kera ja silind-

rilised pinnad) võib elementaarrõhujõudude summat alati vaheldada kui ühte tasakaalustavat jõudu P . Jõu P suurus ja suund arvutatakse sel juhul horisontaalse ja vertikaalse komponendi geometrilise summana (joon. 31).



Joon. 31

Horisontaalne rõhujõu komponent kõverpinnale arvutatakse kui rõhujõud vertikaalsele tasapinnale, mille moodustab kõverpinna projektsioon vertikaalpinnal.

$$P_h = \delta h_c \omega_v,$$

kus ω_v - kõverpinna vertikaalprojektsiooni pindala;

h_c - pinna ω_v raskuskeskme kaugus vedeliku pinnast.

Horisontaalse rõhujõu komponendi rakenduspunkt asub kõverpinna vertikaalprojektsiooni rõhukeskmes, kusjuures raskuskeskme ja rõhukeskme vaheline kaugus on arvutatav valemiga

$$e = \frac{I_c}{\omega_v h_c},$$

kus I_c - kõverpinna vertikaalprojektsiooni ω_v inertsmoment raskuskeset läbiva telje suhtes.

Rõhujõu vertikaalne komponent P_v kõverpinnale võrdub kõverpinnal oleva tegeliku või näiva vedeliku kaaluga (joon. 31 vertikaalselt viirutatud pind) ja on avaldatav

$$P_v = \delta V,$$

kus V on vedeliku maht kõverpinnal.

Rõhujõu vertikaalse komponendi P_v rakenduspunkt asub ve-

deliku mahu V raskuskeskmes N .

Summaarne rõhujõud on geomeetriline summa komponentidest P_H ja P_V (tasapinnalise ülesande puhul):

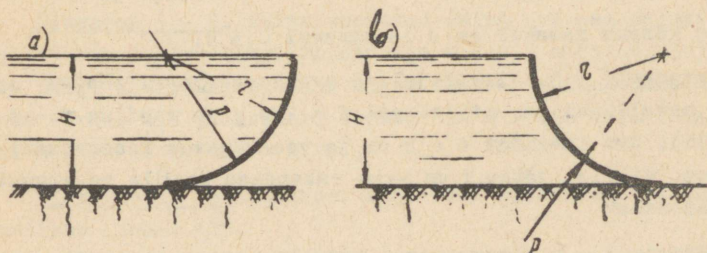
$$P = \sqrt{P_H^2 + P_V^2},$$

kusjuures jõu P mõjumise suund läbib komponentide P_H ja P_V suundade ristumispunkti.

Rõhujõu P mõjumise suuna kaldenurka horisondi suhtes võib arvutada valemist

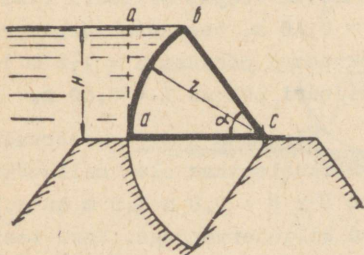
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_V}{P_H}.$$

Ülesanne 3 - 1. Arvutada rõhujõu suurus ja näidata mõjumise suund silindrilisele pinnale (joon. 32a), mis on täidetud veega kõrguseni $H = r = 2$ m. Silindri pikkus on 1 m ($b = 1$ m). Ülesande variant joon. 32 b.

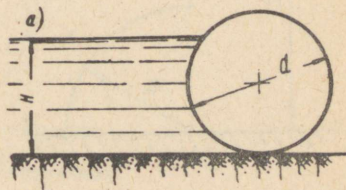


Joon. 32

Ülesanne 3 - 2. Arvutada rõhujõu suurus ja mõjumise suund sektorvarjale (joon. 33), kui $H = 3$ m ja $\alpha = 45^\circ$. Varja pikkus $L = 5$ m.



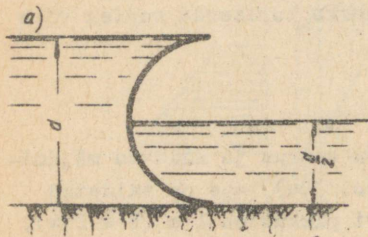
Joon. 33



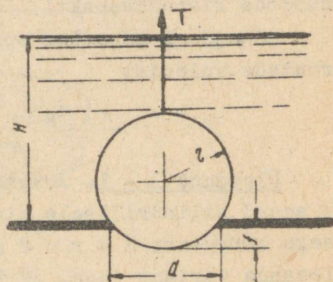
Joon. 34

Ülesanne 3 - 3. Kui suur jõud mõjub silindervarjale (joon. 34), kui varja läbimõõt $d = 3$ m ja vee sügavus tšel pool varja $H = 2,5$ m? Varja pikkus $L = 6$ m. Millise nurga moodustab rõhujõu mõjumise suund horisondiga?

Ülesanne 3 - 4. Leida rõhujõu suurus ja suund $d = 3$ m läbimõõduga poolsilinderpinnale (joon. 35). Silindri pikkus $L = 1$ m,



Joon. 35

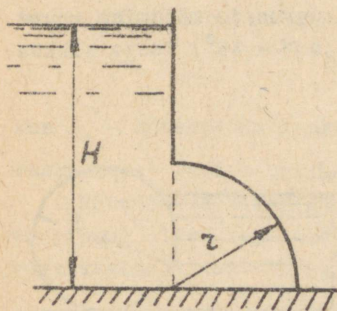


Joon. 36

veepinna kõrgus vasakul on d ja paremal $0,5 d$.

Ülesanne 3 - 5. Ringikujuline ava reservuaari põhjas on suletav metallkuuliga, mille kaal $G = 250$ g ja raadius $r = 4$ cm (joon. 36). Ava läbimõõt $d = 5$ cm ja vee sügavus reservuaaris $H = 20$ cm. Millist jõudu T on vaja rakendada kuulile reservuaari tühjendamiseks?

Ülesanne 3 - 6. Reservuaari vertikaalseina alumises osas on veerandsilindrikujuline ühendusosa (joon. 37). Arvutada rõhujõud veerandsilindrilisele seina osale, kui reservuaar on täidetud veega. Silindri raadius $r = 0,40$ m, veepinna kõrgus reservuaari põhjast $H = 1,2$ m ja silindri pikkus $L = 0,80$ m.

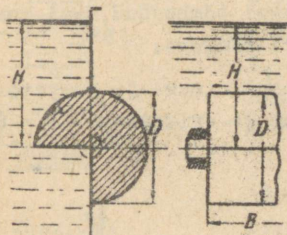


Joon. 37

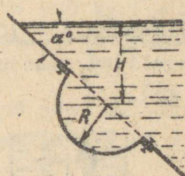
Ülesanne 3 - 7. Reservuaari vertikaalseinas olev nelinurkne ava $D \times B = 0,8 \times 3,0$ m on suletud silindervarjaga. Vari toetatase otstes asuvate laagritega.

Arvutada:

- 1) laagritele mõjuv jõud ja vee poolt tekitatud pöördemoment, kui $H = 1$ m (joon. 38);
- 2) kuidas muutub laagritele mõjuv jõud ja varja pöördemoment, kui varja pöörata 180° võrra.



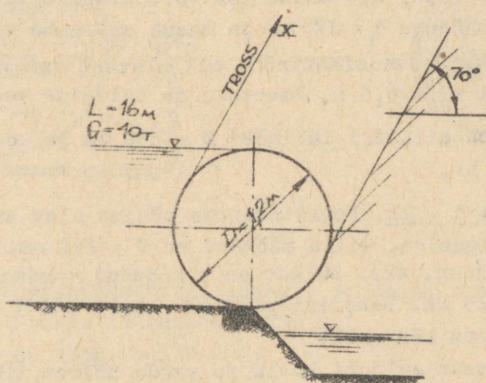
Joon. 38



Joon. 39

Ülesanne 3 - 8. Kaldal asetatud sein üks osa moodustab poolsfäärilise luugi raadiusega $R = 0,5$ m (joon. 39). Arvutada luugi kinnitusneetidele mõjuv tõmbe- ja nihkejõud, kui vee pinna kõrgus üle poolsfääri tsentri on $H = 1,0$ m ja seina kaldenurk horisondi suhtes $\alpha = 30^\circ$.

Ülesanne 3 - 9. Silindervarja abil suletakse vee juurdevool kanalisse (joon. 40).

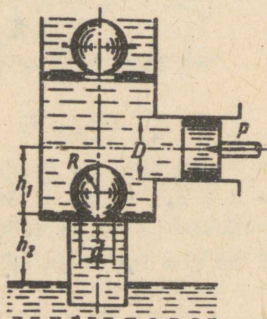


Joon. 40

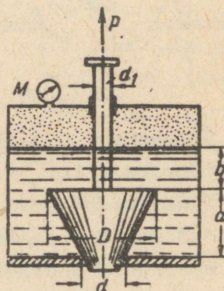
Arvutada:

- 1) hüdrostaatilise rõhujõu suurus ja suund silindervarjale, kui varja läbimõõt $D = 1,2$ m ja pikkus $L = 16$ m;
- 2) trossi tõmbejõud, mis on vajalik varja tõstmiseks mööda kaldpinda kaldenurgaga horisondi suhtes 70° . Varja kaal $G = 40$ t;
- 3) kuidas muutuvad rõhujõud ja trossi tõmbejõud, kui paremal pool varja veepind on varja tsentri kõrgune.

Ülesanne 3 - 10. Kolbpumba klapid imev- ja survetorul on kerakujulised raadiusega $R = 100$ mm ja erikaaluga $\gamma_1 = 8$ t/m³ (joon. 41).



Joon. 41



Joon. 42

Arvutada jõud, mis mõjub imevtoru klapile, kui klapp asub sadulal läbimõõduga $d = 125$ mm ja sadul on pumba teljest $h_1 = 0,5$ m madalamal, kuid atmosfäärirõhu all olevast reservuaari veepinnast kõrgemal $h_2 = 6,5$ m. Imevtoru on täidetud veega.

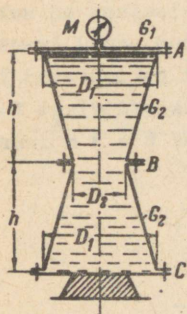
Kolbpumba silindri läbimõõt $D = 350$ mm ja kolvile mõjub jõud $P = 400$ kg.

Ülesanne 3 - 11. Bensiinianuma põhjas olev ava on suletud koonilise sulguriga, mille mõõtmed on $D = 100$ mm; $d = 50$ mm; $a = 100$ mm (joon. 42). Sulgur on ühendatud vardaga, mille läbimõõt $d_1 = 25$ mm. Bensiini pind ($\gamma = 0,83$ t/m³) on sulgurist $b = 50$ mm võrra kõrgemal.

Arvestamata sulguri kaalu ja varda hõõret tihendis, arvutada:

- 1) sulguri tõstmiseks vajalik algjõud P , kui anuma manomeetri lugem $M = 0,1$ kg/cm²;

2) õhurõhk anum, mille juures jõud P võrduks nulliga.

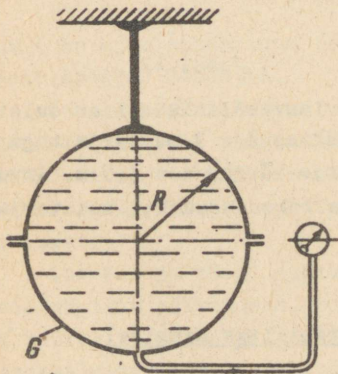


Joon. 43

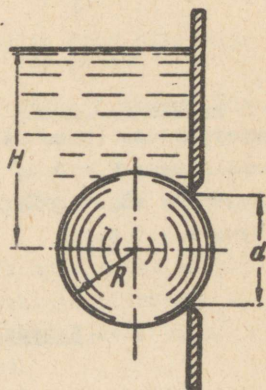
Ülesanne 3 - 12. Arvutada sümmeetrilise anuma hüdraulilisel proovimisel poldigruppidele A, B ja C mõjuvad jõud, kui anuma mõõtmed on $D_1 = 1,8$ m, $D_2 = 0,9$ m, $h = 1,2$ m ja anuma kaante ning kooniliste külgede kaalud on vastavalt $G_1 = 600$ kg ja $G_2 = 900$ kg (joon. 43). Anum on täidetud veega ja proovirõhk $M = 0,5$ kg/cm².

Kuidas muutuvad jõud poltides, kui anum põhjast toetamise asemel riputata üles kaanest A?

Ülesanne 3 - 13. Kuulikujuuline veega täidetud anum raadiusega $R = 0,4$ m on üles riputatud anuma ülemise poole külge kinnitatud vardaga (joon. 44). Milline peab olema rõhk anuma



Joon. 44



Joon. 45

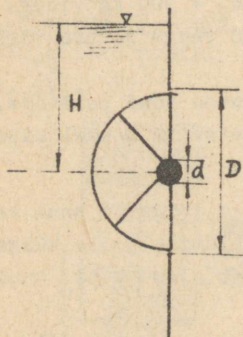
tsentris (mano-vaakuummeetri lugem), et hoida vabalt üleval anuma alumist poolt kaaluga $G = 150$ kg?

Milline on rõhk, kui $G = 0$?

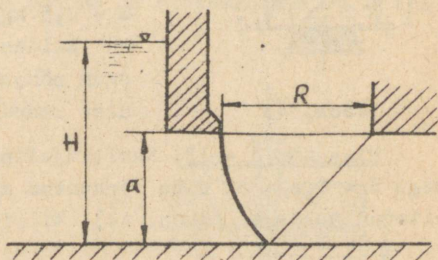
Ülesanne 3 - 14. Milline peab olema minimaalne veepind H anum, et metallkuul ($\gamma_1 = 8000$ kg/cm³) raadiusega $R = 100$ mm

sulgeks tasakaaluolekus vertikaalseinas oleva ava läbimõõduga $d = 1,5 R$ (joon. 45) ?

Ülesanne 3 - 15. Nelinurkne ava vertikaalseinas on suletud silindervarjaga, mille läbimõõt $D = 1,2 \text{ m}$ (joon. 46). Arvutada varja avamisel ületada tulev moment, kui vari on toetatud laagritele läbimõõduga $d = 100 \text{ mm}$ ja laagri hõõrdekoefitsient $f = 0,1$. Milline jõud mõjub laagritele veepinna kõrguse $H = 3 \text{ m}$ juures? Varja pikkus $L = 5 \text{ m}$.



Joon. 46



Joon. 47

Ülesanne 3 - 16. Veelaske ava laevasõidulüüsil on suletud sektorvarjaga (joon. 47), mille raadius $R = 3 \text{ m}$. Varja taga veepinna kõrgus $H = 5 \text{ m}$, kusjuures varja kõrgus $a = 1,5 \text{ m}$. Arvutada varjale mõjuv rõhujõud ja selle rakenduspunkt, kui varja pikkus $L = 5 \text{ m}$.

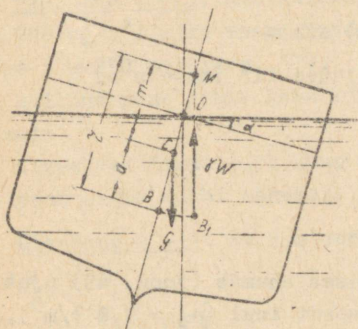
§ 4. Kehade ujuvus ja stabiilsus ujumisel

Archimedese seaduse järgi igale täielikult või osaliselt vedelikku asetatud kehale mõjub üleslükkejõud, mis võrdub keha poolt väljatõrjutud vedeliku kaalule. Üleslükkejõud (Archimedese jõud) on suunatud alt üles ja on arvutatav valemiga:

$$P = \delta W,$$

kus W on keha poolt väljatõrjutud vedeliku maht.

Ujuvatel kehal eraldatakse peale raskuskeskme C veel 2 punkti: rõhukese ja metatsenter. Rõhukese ehk vedeliku väl-



Joon. 48

avaldatav valemiga

$$r = -\frac{I}{W},$$

kus I on ujumistasapinna inertsmoment ujuva keha pikitelje (sümmeetriatelje) O suhtes.

Kehade stabiilsuseks ujumisel nimetatakse kehade võimet taastada tasakaal pärast kõrvalekalatumist põhjustanud jõudude eemaldumist. Stabiilsuse tingimuseks on positiivne metatsentriline raadius, st. et metatsenter asetseks kõrgemal keha raskuskeskmest.

Laevade ja kõigi pikkade ujuvate kehade juures huvitab meid püsivus pöiksuunas, kuna püsivus kehade pikisuunas on palju suurem. Jõudude paari momenti, mis püüab ujuvat keha viia tasakaaluasendisse, arvutatakse valemist

$$M = \delta W m \sin \alpha,$$

kus m on metatsentriline kõrgus.

Seda avaldist nimetatakse stabiilsuse metatsentriliseks valemiks ja ta on arvutusteks küllalt täpne, kui $\alpha \leq 5^\circ$.

Paralleelsete poortidega laevade puhul avaldub metatsentriline kõrgus

$$m = \frac{J}{W} \mp a,$$

jasurve-kese B on keha poolt väljatõrjutud vedeliku mahu raskuskese. Metatsentriks M nimetatakse tasakaalust väljaviidud ujuva keha ujumiselje ja üleslükkejõu mõjumissirge lõikepunkti (joon. 48). Ujuva keha metatsentri asukoht väikese kaldenurga puhul ($\sin \alpha \approx \alpha$) ei muutu.

Metatsentri ja rõnukeskme vahelist kaugust r nimetatakse metatsentriliseks raadiuseks ja ta on

kus a on rõhukeskme ja raskuskeskme vaheline kaugus.

Viimasel juhul tasakaalustav moment

$$M = \gamma W \left(\frac{J}{W} + a \right) \sin \alpha$$

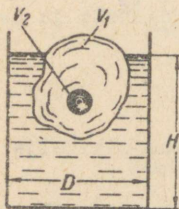
ja sellest järeldub, et stabiilsuse tingimuseks on

$$m = \frac{J}{W} + a > 0$$

ehk

$$\frac{r}{a} < 1.$$

Ülesanne 4 - 1. Silindrilises anumates (joon. 49) ujub tükk jääd, millesse on asetatud terasest kuul ($\gamma_2 = 7,8 \text{ t/m}^3$). Jäätüki mahukaal $\gamma_1 = 0,9 \text{ t/m}^3$ ja maht $V_1 = 12 \text{ dm}^3$. Kuuli maht $V_2 = 50 \text{ cm}^3$ ja anuma läbimõõt $D = 500 \text{ mm}$.



Joon. 49

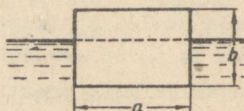
Arvutada:

- 1) milline osa summaarsest mahust (jääd + teras) asub vee peal;
- 2) kuidas muutub anumates jääd sulamisel vee sügavus H ;
- 3) milline osa jääd mahust asub vee peal, kui teraskuul eemaldada;
- 4) milline osa jääd mahust asub vee peal, kui V_2 on asetatud õhuga.

Ülesanne 4 - 2. Anumatesse, mis on täidetud õli ($\gamma_{\text{õ}} = 900 \text{ kg/m}^3$) ja veega, on asetatud tükk vaha mahukaaluga $\gamma = 960 \text{ kg/m}^3$ (joon. 50).



Joon. 50



Joon. 51

Arvutada, milline osa vaha mahust asub õlis ja milline osa vees.

Ülesanne 4 - 3. Ristkülikukujulise ristlõikega keha ($\gamma = 700 \text{ kg/m}^3$) ujub vees. Keha alus on ruudukujuline küljepikkusega $a = 250 \text{ mm}$ (joon. 51).

Milline peab olema keha kõrgus b , et ujumine toimuks stabiilselt?

Samas vedelikus ujub kuup küljepikkusega $a = 250 \text{ mm}$. Milline peab olema kuubi mahukaal, et kuup ujuks stabiilselt?

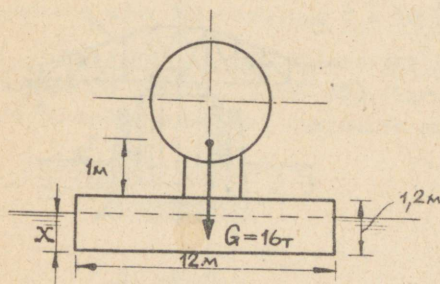
Ülesanne 4 - 4. 8t pontooni kasutatakse 16 t katla veoks.

Pontooni põhja mõõtmed on $12 \times 4 \text{ m}^2$ ja poordi kõrgus $1,2 \text{ m}$ (joon. 52).

Arvutada:

- 1) pontooni süvis, kui katel on asetatud pontooni keskele;
- 2) ujumise stabiilsus, kui kaldenurk $\alpha = 10^\circ$.

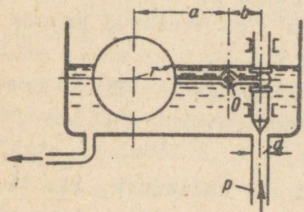
Arvutamisel lähtuda sellest, et katla raskuskese asub 1 m kõrgusel pontooni laest, pontooni



Joon. 52

oma aga $0,8 \text{ m}$ laest allpool, kusjuures kaal on jaotatud ühtlaselt üle kogu pontooni põhja.

Ülesanne 4 - 5. Bensiin erikaaluga $\gamma = 700 \text{ kg/m}^3$ pumbatakse karburaatorisse rõhu all $p = 0,3 \text{ atü}$ $d = 4 \text{ mm}$ läbimõõduga toru kaudu (joon. 53). Sissevoolutoru on suletav nõelaga, mis kaalub bensiinis 12 g . Nõel on ühendatud ujukiga, mille kaal õhus on 25 g . Nõela ja ujuki ühenduskang on toetatud šarniirselt punktis O , kusjuures kangi õlad on vastavalt $a = 40 \text{ mm}$ ja $b = 15 \text{ mm}$.



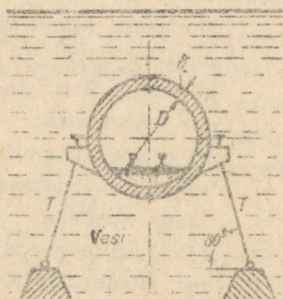
Joon. 53

Arvutada ujuki mõõtmed (raadius r), kui bensiini pind kamb-

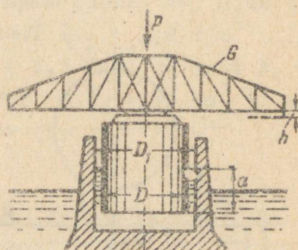
ris on kogu aeg konstantsel kõrgusel ja sissevooluava avamisel on ujuk poole kõrguseni bensiniis. Hõõrat šarniiris 0 mitte arvestada.

Ülesanne 4 - 6. Veealune raudbetoonist tunnel sisemise läbimõõduga $D = 3$ m ja seinapaksusega $d = 250$ mm hoitakse trosside abil vee all (joon. 54). Iga 6 m järel on tunneli kinnitatud paari trossidega.

Arvutada pinge trossis, kui lisakaal tunneli 1 jm kohta on 1000 kg ja betooni mahukaal $2,5 \text{ t/m}^3$.



Joon. 54



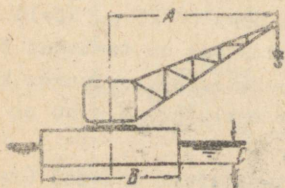
Joon. 55

Ülesanne 4 - 7. Silla pööratav ava on asetatud kambris $D_1 = 3,6$ m ujuvale silinderujukile läbimõõduga $D = 3,4$ m (joon. 55).

Arvutada:

- 1) ujuki süvis e , kui sillaava kaal $G = 30$ t;
- 2) silla teepinna vajumine h , kui silda koormata välisjõuga $P = 10$ t.

Ülesanne 4 - 8. Praamile, mille mõõtmed on $L \times B = 60 \times 10 \text{ m}^2$, on asetatud kraana tõstejõuga $T = 10$ t ja noole maksimaalse ulatusega $A = 15$ m. Seejuures praami süvis $C = 1,5$ m (joon. 56).



Joon. 56

Arvutada kaldemurk, mis tekitab kraana töötamisel, kui raskus-

kese asub 3,5 m kõrgemal rõhukeskmest.

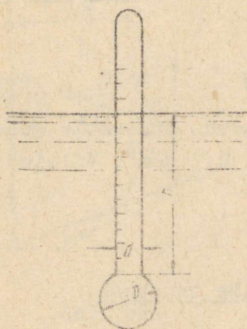
Ülesanne 4 - 9. Vertikaalseintega anum põhjapindalaga $F = 1000 \text{ cm}^2$ ujub vees süvisega $H_0 = 40 \text{ cm}$. Anum on täidetud õliga ($\gamma = 900 \text{ kg/m}^3$) kõrguseni $h_0 = 20 \text{ cm}$ (joon. 57).



Joon. 57

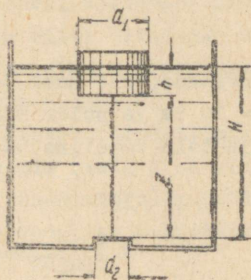
Arvutada anuma süvis ja õli sügavus anumal, kui anumasse asetada ujuv keha kaaluga $G = 10 \text{ kg}$.

Ülesanne 4 - 10. Areomeeter koosneb silindrilisest klaasitorust ja kuulist (joon. 58). Toru diameeter $d = 1,5 \text{ cm}$ ja kuuli läbimõõt $D = 3 \text{ cm}$, kusjuures areomeetri kaal $G_1 = 100 \text{ g}$.



Joon. 58

Arvutada areomeetri piiritusse ($\gamma = 0,8 \text{ g/cm}^3$) vajumise sügavus h .



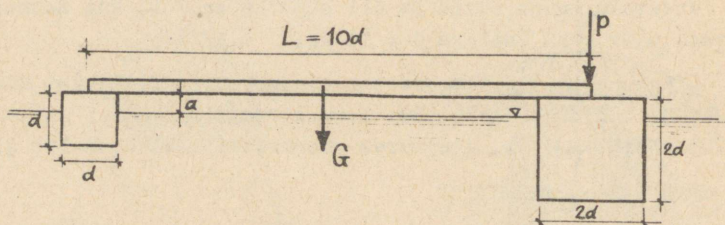
Joon. 59

Ülesanne 4 - 11. Bensini reservuaari põhjas on ümmargune klapp, mis on kinnitatud trossi abil ujuki külge (joon. 59). Ujuki läbimõõt $d_1 = 10 \text{ cm}$, klapi läbimõõt $d_2 = 2 \text{ cm}$.

Arvutada, millise H väärtuse juures avaneb klapp, kui klapi ja ujuki kaal on $G = 100 \text{ g}$, bensiini erikaal $\delta = 0,75 \text{ g/cm}^3$ ja trossi pikkus $z = 15 \text{ cm}$.

Ülesanne 4 - 12. Veos ujub puidust silinder kõrgusega h ja diameetriga $d = 0,5 \text{ m}$. Arvutada kõrgus h , mille puhul silinder ujub veel vertikaalasendis. Puidu mahukaal $\delta_p = 0,7 \text{ t/m}^3$.

Ülesanne 4 - 13. Kaks puitkuupi küljepikkustega d ja $2d$ ujuvad vees (joon. 60). Kuubid on omavahel ühendatud talaga ($G = 0,5 \text{ kg}$).



Joon. 60

Arvutada, kui suur jõud P rakendada suuremale kuubile, kui $d = 10 \text{ cm}$ ja puidu mahukaal $\delta_p = 0,7 \text{ t/m}^3$. Milline on vee-pinna ja tala vaheline kaugus a ?

§ 5. Vedeliku suhteline tasakaal

Vedeliku suhteliseks tasakaaluks nimetatakse nähtust, mille puhul liikuvas anumast olev vedelik on anuma suhtes tasakaalus. Raskusjõule, mis mõjub vedeliku osakesele, liitub inertsijõud või tsentrifugaaljõud.

Sel juhul on rõhujaotuse seaduspärasus seisvas vedelikus avaldatav diferentsiaalvõrrandiga:

$$dp = \rho (Xdx + Ydy + Zdz),$$

kus x, y, z on vedeliku punkti koordinaadid anumaga seotud koordinaadisüsteemis;

$p = f(x, y, z)$ - rõhk vedelikus;

ρ - vedeliku tihedus;

X, Y, Z - mahujõu projektsioonid koordinaattelgedel.

Mahujõud on arvatatud vedeliku massi ühikule.

Samarõhu pinna võrrandi saame tingimusel, kui $p = \text{const}$ ja seega $dp = 0$ ehk

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0.$$

Massi ühikule arvatatud mahujõu vektor \bar{q} igas vedeliku punktis kujutab endast ühikraskusjõu \bar{g} ja ühikinertsjõu \bar{j} summat:

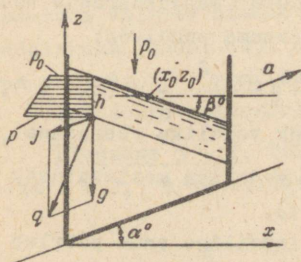
$$\bar{q} = \bar{g} + \bar{j}, \quad \bar{j} = -\bar{a},$$

kus \bar{a} on liikumise kiirendus antud vedeliku punktis.

Rõhk vedelikus muutub igas suunas, välja arvatud ühikmahujõu vektoriga \bar{q} risti olev suund. Seega samarõhu pind ja vedeliku vabapind igas oma punktis on risti antud punktis mõjuva ühikmahujõu vektoriga.

Anuma sirgjoonelisel liikumisel konstantse kiirendusega \bar{a} samarõhu pinnad kujutavad endast paralleeltasapindade parve, mis on risti liikumise tasapinnaga ja kaldu horisontaaliga nurga β võrra (joon. 61).

Ristkoordinaatide x, y, z süsteemis (telg y on risti liikumise tasapinnaga) punkti x_0, z_0 läbiv vedeliku vabapinna võrrand esineb kujul:



Joon. 61

$$z - z_0 = -\frac{a \cos \alpha}{g + a \sin \alpha} (x - x_0);$$

$$\text{tg} \beta = \frac{a \cos \alpha}{g + a \sin \alpha},$$

kus x ja z on vabapinna meeleväldse punkti koordinaadid.

Anuma sirgjoonelisel liikumisel rõhujäotuse seaduspärasus vedelikus antakse seosega:

$$p = p_0 - \rho [a \cos \alpha (x - x_0) + (g + a \sin \alpha) (z - z_0)],$$

kus p_0 on rõhk punktis (x_0, z_0) ;

p - rõhk meeleväldses vedeliku punktis (x, z) .

Sügavusel h on rõhk arvutatav valemiga:

$$p = p_0 + \rho(g + a \sin \alpha)h.$$

Silindrilise anuma pöörlemisel ümber vertikaaltelje nurkkiirusega ω lisandub raskusjõule tsentrifugaaljõud ja koordinaat-
telgedele ühikmahujõu projektsioonid. Sel juhul

$$X = \omega^2 x, \quad Y = \omega^2 y, \quad Z = -g.$$

Tähistades

$$x^2 + y^2 = r^2,$$

saame silinderkoordinaatides (r, z) vedeliku vabapinna võrrandile anda kuju (joon. 62):

$$z - z_0 = \frac{\omega^2 r^2}{2g},$$

kus z_0 on pöörleva parabooli tippu vertikaalkoordinaat;

r, z - vedeliku vabapinna meeleväldse punkti koordinaadid.

Parabooli kõrgus $H = \frac{\omega^2 R^2}{2g}$, kus R

on anuma raadius.

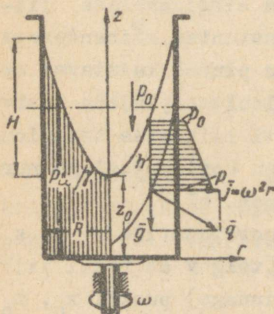
Rõhujäotuse seaduspärasus vedeliku pöörleva anuma puhul on:

$$p = p_0 + \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} - \rho(z - z_0),$$

kus p_0 on rõhk vedeliku vabapinnal,

p - rõhk vedeliku meeleväldses punktis (r, z) .

Kui silindriline anum pöörleb ümber horisontaaltelje nurkkiirusega ω , siis ω suure väärtuse puhul on tsentrifugaaljõud $\vec{J} = \omega^2 r$ suur ühikraskus-



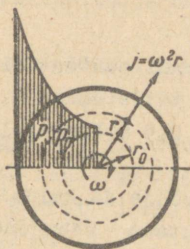
Joon. 62

jõuga \vec{g} võrreldes, mispärast viimane jäetakse harilikult arvestamata.

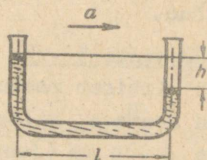
Toodud juhul samarõhu pinnad kujutavad endast kontsentri-
lisi silindreid anuma pöörlemisteljega ühtivate telgedega (joon. 63).

Pöörlemisteljest kaugusel r olevas vedeliku punktis avaldub rõhk nii:

$$p = p_0 + \rho \frac{\omega^2 (r^2 - r_0^2)}{2},$$



Joon. 63



Joon. 64

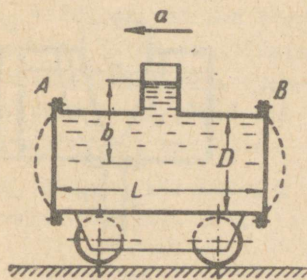
kus p_0 on rõhk silindrilisel pinnal, mille raadius on r_0 .

Nagu nähtub viimasest valemist, on rõhujaotus raadiuse suunas paraboolne.

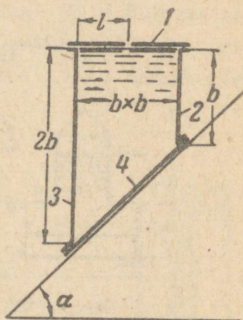
Ülesanne 5 - 1. Liikuva keha kiirenduse mõõtmiseks võib kasutada väikese diameetriga U-kujulist toru, mis on täidetud vedelikuga (joon. 64). Keha liikumisel vedeliku paiknemine torus muutub: $h = 5$ cm, kui torude vahekaugus $l = 30$ cm.

Kui suure kiirendusega liigub keha?

Ülesanne 5 - 2. Tsistern, läbimõõduga $D = 1,2$ m ja pikkusega $L = 2,5$ m, on täidetud naftaga ($\gamma = 900$ kg/m³) kõrguseni



Joon. 65



Joon. 66

$b = 1$ m (joon. 65). Tsistern liigub horisontaalselt kiirendusega $a = 2$ m/sek².

Arvutada tsisterni tasapinnalistele otstele A ja B mõju rõhujõud.

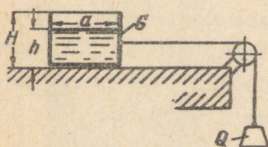
Ülesanne 5 - 3. Kaldpinnal horisondi suhtes kaldenurgaga $\alpha = 45^\circ$ libiseb raskusjõu mõjul veega täidetud anum. Anum on kaetud kaanega, millel on seinast $l = 0,5$ m kaugusel ümmargune ava $d = 5$ mm (joon. 66).

Anuma omakaal $G = 150$ kg, anuma põhja ja kaldpinna vaheline hõõrdekoefitsient $\mu = 0,278$. Arvutada rõhujõud anuma kaanele, külgseintele ja põhjale.

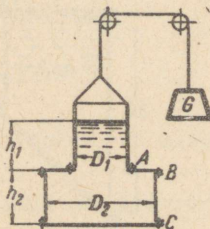
Ülesanne 5 - 4. Anum, nelinurkse ristlõikega $a \times a = 200 \times 200$ mm², omakaaluga $G = 4$ kg, on veega täidetud sügavuseni $h = 150$ mm (joon. 67). Anum libiseb tasapinnal jõu $Q = 25$ kg mõjul.

Arvutada anuma kõrgus H , et kogu vedelik jääks liikumisel anumasse. Hõõrdekoefitsient tasapinna ja anuma vahel $\mu = 0,3$.

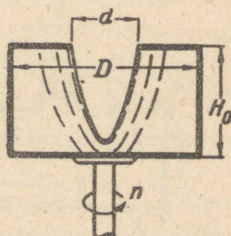
Ülesanne 5 - 5. Anum, kõrgusega $h_1 + h_2 = 800$ mm, on trossiga üles riputatud. Tross on asetatud plokkidele ja ploki teise otsa on kinnitatud raskus $G = 200$ kg.



Joon. 67



Joon. 68



Joon. 69

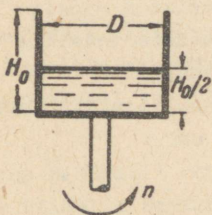
Arvutada jõud poldigruppidele A, B ja C anuma kiireneval liikumisel. Anuma mõõtmed $D_1 = 400$ mm, $D_2 = 600$ mm ja $h_2 = 300$ mm (joon. 68). Mitte arvestada anuma kaalu ja hõõrdega plokkides.

Ülesanne 5 - 6. Silindriline anum, läbimõõduga $D = 400$ mm ja kõrgusega $H_0 = 300$ mm, on eelnevalt veega täidetud. Anum pöörleb vertikaaltelje ümber pöörete arvuga 200 p/min (joon. 69).

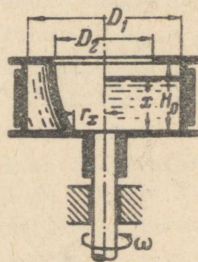
Milline vedeliku maht jääb anumasse, kui ülemise ava läbimõõd $d = 200$ mm?

Ülesanne 5 - 7. Arvutada vedelikuga kõrguseni $\frac{H_0}{2}$ täidetud silindrilise anuma pöörlemiskiirus tingimusel, et vedelik tõuseks anuma ääreni (joon. 70). Anuma läbimõõt $D = 0,8$ m ja kõrgus $H_0 = 1,2$ m.

Kui suur on pöörete arv, kui anumasse jääb ainult pool esialgsest vedeliku mahust?



Joon. 70

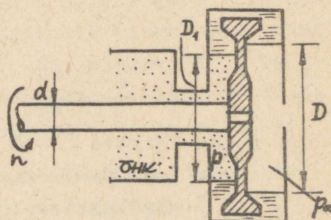


Joon. 71

Ülesanne 5 - 8. Piduri ketas, läbimõõduga $D_1 = 800$ mm ja kõrgusega $H_0 = 200$ mm, pöörleb tsentraaltelje suhtes pöörete arvuga $n = 120$ p/min. Ketas on täidetud jahutusvedelikuga antud pöörete arvule vajaliku kõrguseni (joon. 71).

Arvutada ketta põhja kuuva osa raadius r_x , kui $D_2 = 500$ mm. Millise kõrguseni x tõuseb vedelik seisva ketta puhul?

Ülesanne 5 - 9. Arvutada läbimõõd D_1 , milleni ulatub vesi vaakumpumba pumba võlli tihendava hüdraulilise tihendi siseküljel. Võlli läbimõõd



Joon. 72

$d = 0,15$ m ja läbimõõt, milleni ulatub vesi tihendi välisküljel, on $D = 0,30$ m (joon. 72). Vaakuum pumbas on $0,7$ at. Võlli pöörde arv $n = 2000$ p/min ja vee pöörlemise nurkkiirus tihendis on pool võlli nurkkiirusest.

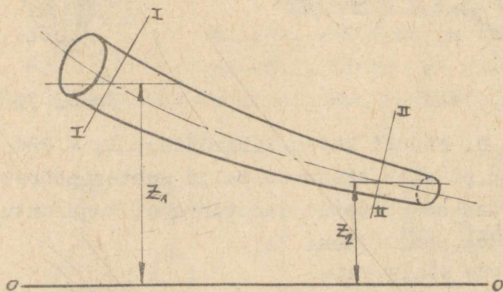
II. Põhimõisteid hüdrodünaamikast

§ 6. Bernoulli võrrand ideaalvedeliku koguvoolule

Ideaalvedelikeks nimetatakse vedelikke, milles puuduvad sisehõrdejõud. Kuna reaalvedelikes esinevad sisehõrdejõud alati, on ideaalvedelik vedeliku lihtsustatud mudel.

Põhiseaduspärasuseks, mida kasutatakse vedelike voolamisnähtuste uurimisel, on Bernoulli võrrand.

Bernoulli võrrand, kirjutatuna ideaalvedeliku koguvoolu lõigetele I - I ja II - II (joon. 73), on



Joon. 73

$$z_1 + \frac{p_1}{\delta} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\delta} + \frac{v_2^2}{2g}, \text{ kus (6-1)}$$

z_1, z_2 on lõigete I - I ja II - II raskuskeskmete vertikaalkaugused meelevaldselt valitud võrdlustasapinnast 0 - 0;

p_1, p_2 - rõhud lõigete I - I ja II - II raskuskeskmetes;

v_1, v_2 - keskkiirused lõigetes I - I ja II - II.

Ülaltoodud kujul on Bernoulli võrrand rakendatav juhtudel, kui

- 1) vedelikule mõjub mahujõududest vaid raskusjõud ja
- 2) voolu pöiklõige piki voolu on sujuvalt muutuv.

Energeetilisest seisukohast väljendab Bernoulli võrrand vedeliku ühe raskusühiku kogu energiat, mida nimetatakse erienergiaks ja tähistatakse E-ga.

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}, \quad (6 - 2)$$

mille z on vedeliku ühe raskusühiku potentsiaalne asendienergia meelevaldselt valitud võrdlustasapinna suhtes;

$\frac{p}{\gamma}$ - vedeliku ühe raskusühiku potentsiaalne rõhuenergia;

$\frac{v^2}{2g}$ - vedeliku ühe raskusühiku kineetiline energia.

Vastavalt energetilisele tõlgendusele väljendab Bernoulli võrrand vedeliku erienergia jäävust. Ideaalvedeliku erienergia on voolu pikkusel konstantne:

$$E = \text{const.} \quad (6 - 3)$$

Kuna Bernoulli võrrandi kõik liikmed on pikkuse dimensiooniga, on võimalik Bernoulli võrrandit graafiliselt kujutada.

Graafilisel Bernoulli võrrandi kujutamisel nimetatakse võrrandi üksikuid liikmeid järgmiselt:

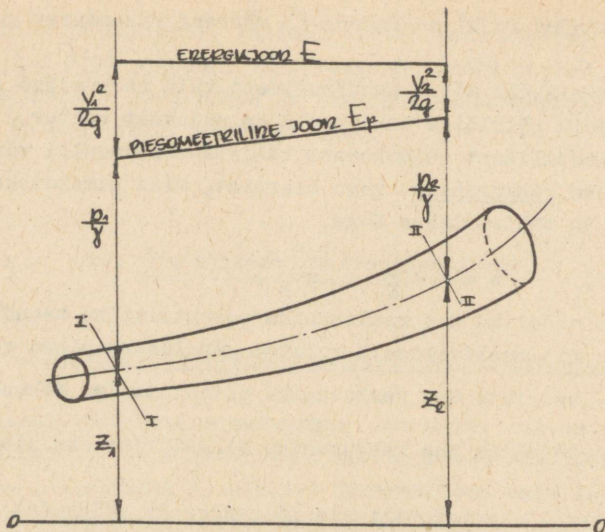
z on geodeetiline kõrgus;

$\frac{p}{\gamma}$ - piesomeetiline kõrgus, s. o. kõrgus, milleni tõuseb vedelik vooluga ühendatud piesomeetris;

$\frac{v^2}{2g}$ - kiiruskõrgus.

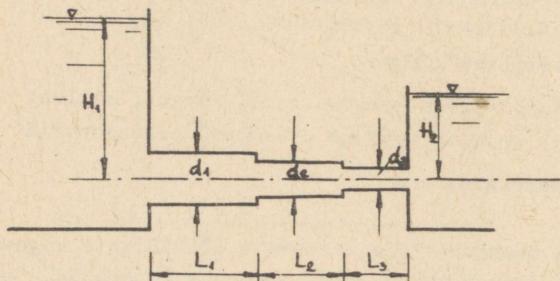
Joont, mis ühendab voolu erinevate pöiklõigete koguenergia lõikude otsi, nimetatakse energiajooneks (joon. 74) ning joont, mis ühendab piesomeetrilisi kõrgusi, piesomeetriliseks jooneks. Nagu nähtub joonisest, asetseb ideaalvedelike piesomeetriline joon energiajoonest kiiruskõrguse võrra allpool.

Ülesanne 6 - 1. Leida vooluhulk kahte anumat ühendavas torus (joon. 75), kui $H_1 = 4,5$ m, $H_2 = 2,0$ m, $d_1 = 100$ mm,



Joon. 74

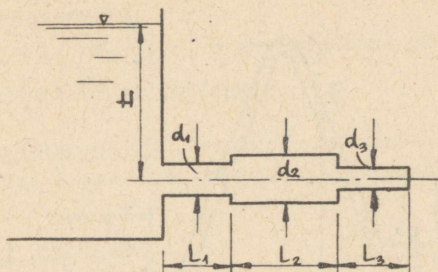
$d_2 = 75 \text{ mm}$ ja $d_3 = 50 \text{ mm}$. Joonestada piesomeetriline joon. Rõhukadusid mitte arvestada.



Joon. 75

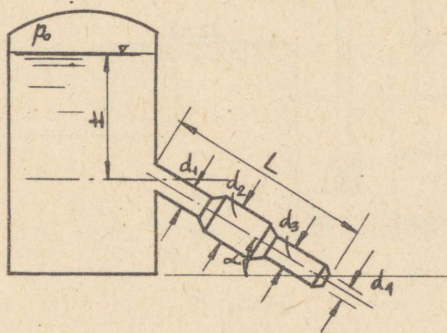
Ülesanne 6 - 2. Vesi voolab anumast atmosfääri üksteisega järjestikku ühendatud erinevate diameetritega torusid mööda (joon. 76). Leida, millise survekõrguse H juures saavutab vaakuum esimeses torus võimaliku piirväärtuse, s. o. 10 m veesammast, kui $d_1 = 10 \text{ cm}$, $d_2 = 20 \text{ cm}$, $d_3 = 15 \text{ cm}$. Joonestada ener-

giajoon ja piesomeetriline joon. Rõhukadusid mitte arvestada.



Joon. 76

Ülesanne 6 - 3. Suletud anumast voolab vesi atmosfääri muutuva põiklõikega kaldtoru mööda (joon. 77). Leida toru vooluhulk ja joonestada energiajoon ning piesomeetriline joon, kui $p_0 = 0,25 \text{ atü}$, $\alpha = 30^\circ$, $H = 15 \text{ m}$, $d_1 = 125 \text{ mm}$, $d_2 = 150 \text{ mm}$, $d_3 = 100 \text{ mm}$, $d_4 = 75 \text{ mm}$ ja torustiku pikkus $L = 15 \text{ m}$. Rõhukadusid mitte arvestada.

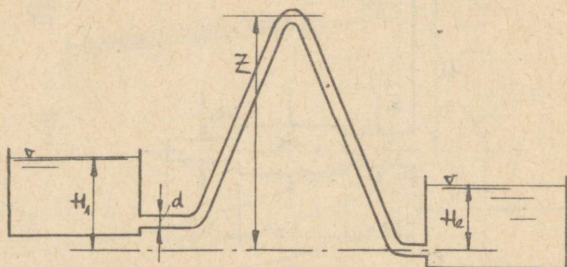


Joon. 77

Ülesanne 6 - 4. Leida sifooni (joon. 78) vooluhulk, kui $d = 150 \text{ mm}$, $H_1 = 3,3 \text{ m}$, $H_2 = 1,5 \text{ m}$, $z = 6,8 \text{ m}$. Joonestada piesomeetriline joon ja leida vaakuum sifooni kõrgeimas punktis. Rõhukadusid mitte arvestada.

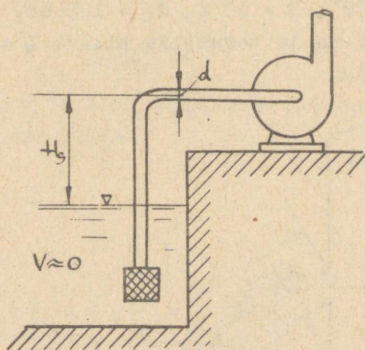
Ülesanne 6 - 5. Leida vaakuum tsentrifugaalpumba sissevoo-

luavas, kui pumba toodang on $20 \text{ m}^3/\text{tunnis}$, $H_s = 5,5 \text{ m}$ ja



Joon. 78

$d = 100 \text{ mm}$ (joon. 79). Rõhukadusid mitte arvestada. Joonestada energiajoon ja piesomeetiline joon.



Joon. 79

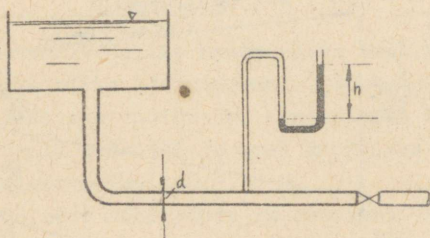
Ülesanne 6 - 6. Anumast atmosfääri väljuvale torule on paigutatud elavhõbemanomeeter (joon. 80). Leida vooluhulk torus, kui suletud siibri puhul manomeetri näit on $h = 550 \text{ mm}$ elavhõbedasammast, avatud siibri puhul 500 mm elavhõbedasammast ning $d = 100 \text{ mm}$. Takistusi mitte arvestada.

Ülesanne 6 - 7. Pumba käivitamisel tsentrifugaalpumba imev-toru veega täitmiseks kasutatakse ežektorit (joon. 81). Leida,

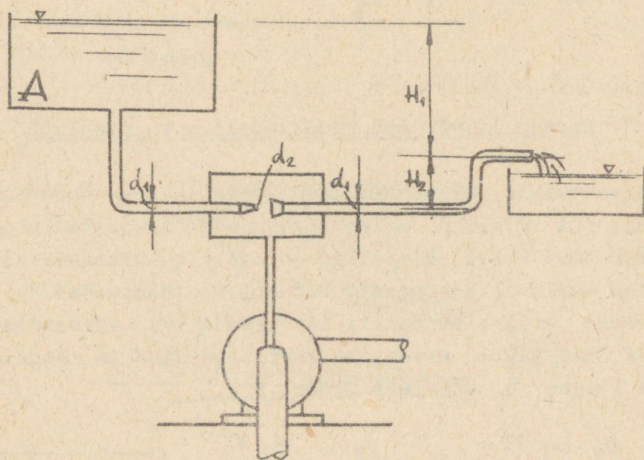
kui kõrgele üle ežektori äravoolutoru väljumisava H_1 survepaak A paigutada, et ežektor looks imevtorus vaakuumi 200 mm elavhõbedasammast.

$H_2 = 1,5$ m, $d_1 = 75$ mm, ežektori düüsi diameeter $d_2 = 50$ mm. Leida ežektori vooluhulk.

Ülesanne 6 - 8. Tsentrifugaalpumba sissevooluava juurde imevtorule paigutatud vaakuummeeter näitab vaakuumit 300 mm



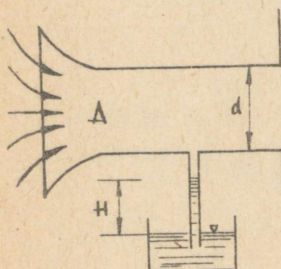
Joon. 80



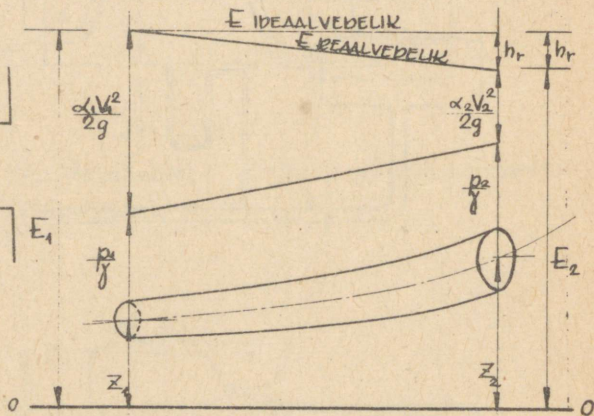
Joon. 81

elavhõbedasammast pumba toodangu juures $60 \text{ m}^3/\text{tunnis}$ (joon. 79). Leida pumba telje kõrgus H_g reservuaari veepinnast, kui imetoru diameeter on 150 mm . Joonestada energiajoon ja piesomeetri-line joon. Rõhukadusid mitte arvestada.

Ülesanne 6 - 9. Tsentrifugaalventilaator imeb õhku toru A abil, mille silindrilist osa veenanuga ühendab klaastoru (joon. 82). Leida ventilaatori toodang sekundis, kui vesi klaastorus tõusis kõrgusele $H = 250 \text{ mm}$ ja õhu mahukaal $\delta = 1,29 \text{ kg/m}^3$.



Joon. 82



Joon. 83

§ 7. Bernoulli võrrand reaalvedeliku koguvoolule

Reaalvedelikes, erinevalt ideaalvedelikest, esinevad sisehõõrdejõud, mis vedeliku osakesi pidurdades tekitavad ebahütlase kiirusjaotuse voolu põiklõikes ja millede ületamiseks kulutatakse osa voolu erieneugiast. Bernoulli reaalvedeliku koguvoolu võrrand erineb Bernoulli ideaalvedeliku võrrandist kiirusjaotuse ebahütlust arvestava koefitsiendi α ja rõhukadusid arvestava liikme h_r poolest (joon. 83).

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_r, \quad (7-1)$$

kus

α_1 ja α_2 on Coriolise koefitsiendid lõigetele I - I ja II - II, mis arvestavad keskkiiruse kaudu väljendatud kineetilise energia erinevust tegelikust, kiirusjootust arvestavast kineetilisest energiast. Tavaliselt võetakse $\alpha = 1,1$ ja ligikaudsetes arvutustes $\alpha = 1,0$;

h_r - erienergia kadu sisehõõrde ületamiseks lõigete I - I ja II - II vahel.

Kirjutades Bernoulli võrrandi erienergiatega kaudu, saame

$$E_1 = E_2 + h_r. \quad (7 - 2)$$

Seega reaalvedelike energijoon asub rõhukadude võrra allpool ideaalvedeliku energijoot (joon. 83).

Vedelike voolamisel eraldatakse kahesuguseid rõhukadusid: kaod voolu pikkusel ja kaod kohalikes takistustes (põlved, siibrid, sissevoolud jne.).

Torudes rõhukadude määramiseks voolu pikkusel kasutatakse Darcy valemit:

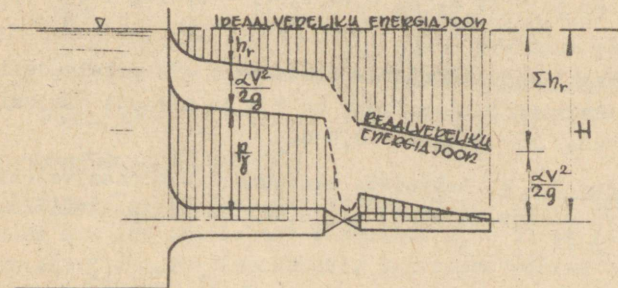
$$h_{r,L} = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}, \quad (7 - 3)$$

milles L on toru pikkus;

D - toru diameeter;

V - voolu keskkiirus;

λ - takistuskoefitsient, mis sõltub voolurežiimist (vt. § 8).



Joon. 84

Nagu nähtub Darcy valemist on rõhukaod toru pikkusel pro-

portsionaalsed toru pikkusega ja põhjustavad energiajoone lineaarse langu (joon. 84). Ühele toru pikkusühikule taandatud rõhulanguga nimetatakse hüdrauliliseks languks:

$$J = \frac{h_r}{L}. \quad (7 - 4)$$

Kohalikes takistustes rõhukadude määramiseks kasutatakse Weisbachi valemit:

$$h_{r,k} = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (7 - 5)$$

milles V on keskkiirus;

ζ - kohaliku takistuse koefitsient, mis sõltub kohaliku takistuse iseloomust.

Mõningate iseloomulike kohalike takistuste koefitsiendi väärtused on toodud lisas I.

Weisbachi valemist nähtub, et kohalike takistuste rõhulanguga iseloomustatakse energiajoone järsu astmega (joon. 84).

Kogu rõhulang torustikus on väljendatav valemiga:

$$h_r = \sum_{i=1}^m \left(\lambda_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} \right) + \sum_{k=1}^n \left(\zeta_k \frac{V_k^2}{2g} \right). \quad (7 - 6)$$

Ülesanne 7 - 1. Lahendada ülesanne 6 - 1 reaalvedelikule, kui $L_1 = 10$ m, $L_2 = 20$ m, $L_3 = 5$ m, $\lambda_1 = 0,025$, $\lambda_2 = 0,030$ ja $\lambda_3 = 0,035$.

Ülesanne 7 - 2. Lahendada ülesanne 6 - 2 reaalvedelikule, kui $L_1 = 5$ m, $L_2 = 10$ m, $L_3 = 10$ m, $\lambda_1 = 0,030$, $\lambda_2 = 0,025$ ja $\lambda_3 = 0,030$.

Ülesanne 7 - 3. Lahendada ülesanne 6 - 3 reaalvedelikule, kui toru pikkus sifooni harjani on 5 m ja sifooni harjast alumise reservuaarini 10 m. $\lambda = 0,030$.

Ülesanne 7 - 4. Lahendada ülesanne 6 - 4 reaalvedelikule, kui imevtoru pikkus on 10 m, $\lambda = 0,025$ ja sõela takistuskoeffitsient $\zeta = 10$.

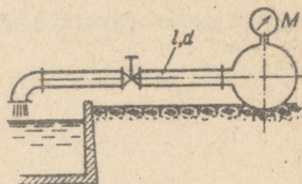
Ülesanne 7 - 5. Bassein mahuga 36 m^3 täidetakse horisontaalsete abil magistraalitorust (joon. 85). Leida magistraalitoru diameeter, kui bassein täitub 30 minuti jaoksul.

Magistraalitoru rõhk $M = 2,5$ atü, torustiku pikkus $l = 45$ m,

$\lambda = 0,035$, ventiili siibri kohaliku takistuse koefitsient

$\zeta = 4$, põlve kohaliku takistuse koefitsient $\zeta = 0,3$.

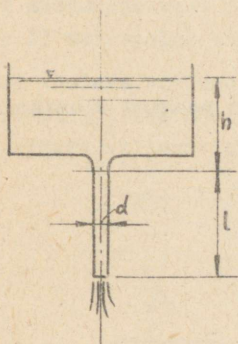
Ülesanne 7 - 6. Vesi temperatuuriga 20°C voolab anumast atmosfääri piki vertikaaltoru pikkusega $l = 6$ m ja diameetriga $d = 40$ mm (joon. 86). Joonestada toru vooluhulga sõltuvus anuma survekõrgusest h . Joonestada energiajoon ja piesomeetriline joon survekõrgustele $h = 0,5$ m ja $h = 2$ m, kui $\lambda = 0,030$.



Joon. 85

Ülesanne 7 - 7. Kolb diameetriga $D = 200$ mm liigub silindris ühtlase kiirusega üles, imedes vett toru kaudu silindrisse konstantse veepinnaga anumast (joon. 87). Leida kolvi

liikumiskiirus, kui 2 m üle veepinna asetseva kolvi liikumiseks vajalik jõud $P = 240$ kg. Leida kolvi võimalik maksimaalne tõusukõrgus kiiruse juures, mis veel ei tekita veesamba lahtirebimist kolvist.

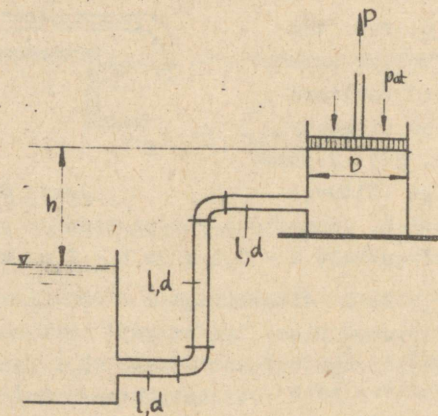


Joon. 86

Torustik koosneb kolmest järjestikku ühendatud võrdsest torust diameetriga $d = 50$ mm, pikkusega $l = 4$ m. $\lambda = 0,03$ ja iga põlve takistuskoeffitsient $\zeta = 0,5$. Atmosfäärirõhk $p = 740$ mm elavhõbedasammast ja küllastunud aururõhk $0,043$ kg/cm².

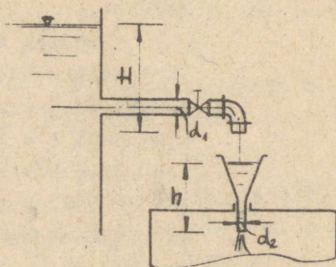
Ülesanne 7 - 8. Paak täidetakse lehtri kaudu bensiiniga kõrguseni $h = 400$ mm. Lehtri diameeter $d_2 = 50$ mm ja takistuskoeffitsient $\zeta = 0,25$ (joon. 88). Lehtrisse voolab bensiin lühikese toru kaudu konstantse nivooga reservuarist. Leida reservuaari maksimaalne bensiininivoo, mille juures lehtrist ei voola üle, ning sellele nivoole vastav bensiini vooluhulk.

Toru diameeter $d_1 = 30$ mm, pikkus $L = 3$ m ja takistuskoeffitsient $\lambda = 0,025$. Põlve ja kraani kohaliku takistuse koeffitsiendid on vastavalt 0,8 ja 8,5.



Joon. 87

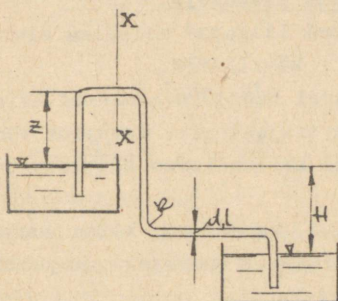
Ülesanne 7 - 9. Vesi voolab ülemisest paagist alumisse



Joon. 88

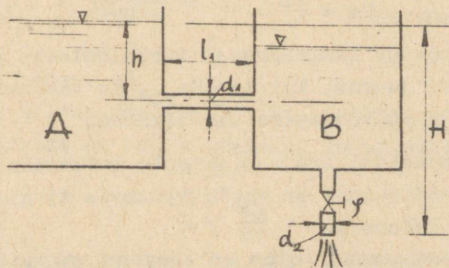
paaki $d = 50$ mm diameetri ja 30 m kogupikkusega sifooni kaudu (Joon. 89). Leida vaakuum sifooni harjal, kui paakides veepindade vahe on $H = 4,5$ m, sifooni harja kõrgus $Z = 2,5$ m, torustiku takistuskoeffitsient $\lambda = 0,028$, põlvede raadiused $R = 50$ mm ja torustiku pikkus ülemisest paagist lõikeni $x - x$ on 10 m.

Ülesanne 7 - 10. Vesi voolab paagist A paaki B mööda lühikest toru, diameetriga $d_1 = 20$ mm ja pikkusega $l_1 = 100$ cm,



Joon. 89

kust mööda lühikest ja ventiiliga varustatud toru diameetriga $d_2 = 25$ mm voolab atmosfääri (joon. 90). Leida paagist atmosfääri voolava vooluhulga Q sõltuvus ventiili takistuskoeffitsiendist ξ , kui $h = 400$ mm, $H = 900$ mm. Takistusi lühikese, atmosfääri väljuva toru pikkusel mitte arvestada.



Joon. 90

§ 8. Vedelike voolamisrežiimid

Katsetega on tõestatud vedeliku kahe voolamisrežiimi - laminaarse ja turbulentsse olemasolu.

Laminaarsel voolamisel liiguvad vedeliku elementaarjoad üksteisega paralleelselt - kihiliselt.

Turbulentsel voolamisel vedeliku osakesed liiguvad kaootiliselt mööda juhuslikke trajektoore. Tavaline vedelike voolamine nii torustikes, kui ka lahtistes sängides on turbulentsne.

Katsetega on tõestatud, et ühe või teise voolamisrežiimi olemasolu sõltub dimensioonitust suurusest, Reynoldsi arvust:

$$Re = \frac{VL}{\nu} , \quad (8 - 1)$$

kus V on voolu iseloomustav kiirus,

L - voolu iseloomustav pikkus ja

ν - vedeliku kinemaatiline viskoossuskoeffitsient.

Torustikes voolamisnähtuste uurimisel võetakse voolu iseloomustavaks pikkuseks tavaliselt toru diameeter ja iseloomustavaks kiiruseks voolu keskkiirus. Reynoldsi arv torustikele määratakse seosega:

$$Re = \frac{VD}{\nu} . \quad (8 - 2)$$

Voolurežiim muutub laminaarsest turbulentseks nn. kriitilise Reynoldsi arvu juures. Kui $Re < Re_{kr}$, on voolamine laminaarne, ja kui $Re > Re_{kr}$, on voolamine turbulentsne.

Kriitiline Reynoldsi arv voolamisele torustikus on 2320.

Laminaarsel voolamisel on voolu takistus tingitud viskoossetest sisehõrdejõududest.

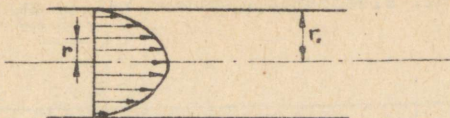
Voolamisel ümmarguses torus on tangentsiaalpinged toru seinal määratud avaldisega

$$\tau_0 = \delta \frac{r_0}{2} J , \quad (8 - 3)$$

kus r_0 on toru raadius,

J - hüdrauliline lang.

Kiirusjaotus on paraboolne (joon. 91) ja määratud võrrandiga:



Joon. 91

$$v = \frac{\Delta p}{4\mu l} (r_0^2 - r^2), \quad (8 - 4)$$

kus Δp on rõhulang torus;

μ - absoluutne viskoossuskoeffitsient;

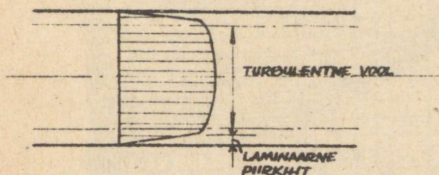
r - vaadeldava punkti kaugus toru teljest.

Vooluhulk laminaarsel voolamisel ümmartorus:

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{8\mu l} r_0^4. \quad (8 - 5)$$

Turbulentses voolus on voolu takistus tingitud turbulent-

sest segunemisest tule-
nevatest sisehõrdejõu-
dudest. Turbulentses voo-
lus on võimalik toru kes-
kel eraldada turbulentset
voolusüdamikku ja toru
seinte ääres laminaarset
piirkihti (joon. 92).



Joon. 92

Takistuskoeffitsien-

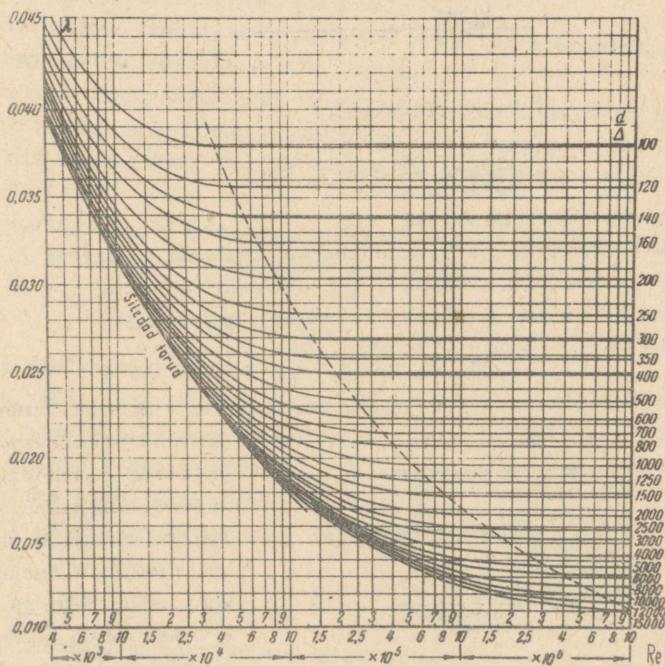
di λ muutus sõltub voolurežiimist. Laminaarses voolus sõltub λ Reynoldsi arvust ja see määratakse ümmarguses torus voolamisel valemiga

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (8 - 6)$$

Turbulentses voolus on takistuskoeffitsiendi λ muutus keerukas, see määratakse eksperimentaalselt. Joonisel 93 on näitena toodud λ muutus ümmargustes terastorudes turbulentsse voolu korral.

Toodud graafikust selgub, et suurte Re arvude puhul takistuskoeffitsient sõltub vaid nn. suhtelisest toru karedusest, s.o. toru diameetri d ning absoluutkareduse Δ suhtest, ega sõltu sisehõrdejõududest. Väiksemate Re arvude korral takistuskoeffit-

sient sõltub nii sisehõrdejõududest kui ka suhtelisest toru karedusest.



Joon. 93

Torude absoluutkareduseks võetakse:

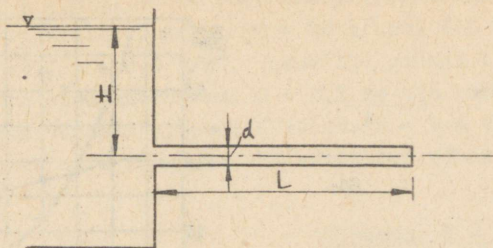
uutel tõmmatud terastorudel 0,1 mm,

uutel keevisõmblusega terastorudel 0,2 mm,

vanadel eksploatatsioonis olnud torudel 1,3 mm.

Ülesanne 8 - 1. Vesi voolab paagist atmosfääri piki horisontaalset terastoru diameetriga $d = 1,0$ cm ja pikkusega 10 m (joon. 94). Leida maksimaalne survekõrgus H , mille juures toru voolamine on veel laminaarne. Vee kinemaatiline viskoossuskoeffitsient $\nu = 0,01$ cm²/sek. Milline on sissevoolu takistuskoeffitsiendi $\xi = 0,5$ mõju maksimaalsele survekõrgusele?

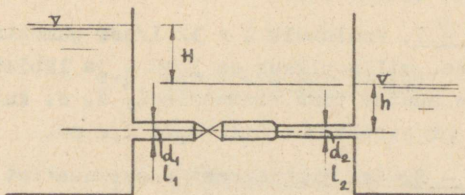
Ülesanne 8 - 2. Leida ülesande 8 - 1 tingimustel, kui



Joon. 94

toru diameeter on $d=2,5$ cm, vooluhulga sõltuvus survekõrgusest viimase muutumisel 0 - 25 m. Joonestada $Q - H$ sõltuvus graafiliselt. Toru absoluutkareduseks Δ võtta 0,01 mm.

Ülesanne 8 - 3. Leida survekõrgus H , et kahte anumad ühendavas torustikus vooluhulk oleks $Q=2$ l/sek (joon. 95), kui $h=2$ m, $d_1 = 50$ mm, $d_2 = 32$ mm, $l_1 = 4$ m, $l_2 = 6$ m, $\Delta_1 = 0,1$ mm ja

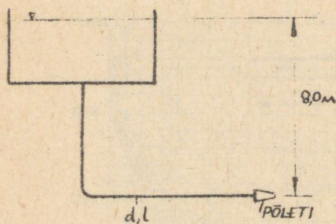


Joon. 95

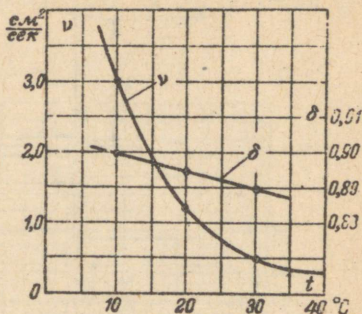
$\Delta_2 = 0,05$ mm. Ventili takistuskoeffitsient $\xi = 8,0$, vee kinemaatiline viskoossuskoeffitsient $0,01$ cm²/sek.

Ülesanne 8 - 4. Torus diameetriga 100 mm voolab masuut mahukaaluga $\gamma = 0,9$ t/m³ ja dünaamilise viskoossuskoeffitsiendiga $\mu = 22,5 \cdot 10^{-4}$ kg sek/m². Leida kiirus ja nihkepinge jaotus toru põiklõikes, kui masuudi keskkiirus on 0,25 m/sek.

Ülesanne 8 - 5. Keskkütteahi tarbib tunnis 300 kg masuuti. Leida rõhk ahjus põletite ees, kui masuudi paak asub 8 m kõrgemal põletite teljest. Survetorustiku pikkus $l = 30$ m ja diameeter $d = 25$ mm (joon. 96). Masuudi mahukaal on $\gamma = 0,88$ ja kinemaatiline viskoossuskoeffitsient $\nu = 0,25$ cm²/sek.



Joon. 96

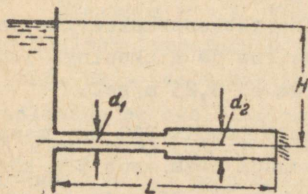


Joon. 97

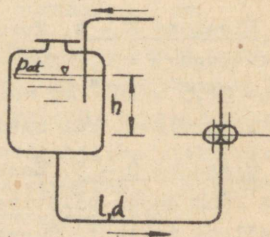
Ülesanne 8 - 6. Mõõda 5 km pikkust ja 150 mm diameetriga horisontaalitoru pumbatakse masuuti. Leida rõhukaod torustikus masuudi temperatuuridel 10°C , 20°C ja 30°C , kui masuudi vooluhulk on 50 l/sek ja toru absoluutkaredus $\Delta = 0,1$ mm. Masuudi mahukaalu ja viskoossuse muutus võtta lisatud graafikust temperatuurist sõltuvalt (joon. 97).

Ülesanne 8 - 7. Vooluhulk $Q = 12$ l/sek pumbatakse reservuaari toru kaudu, mille pikkus on 1000 m ja läbimõõt 125 mm. Leida rõhukaadude muutus toru vananemisel, s. o. kui absoluutkaredus suureneb järjekordselt: $\Delta = 0,1; 0,2; 1,2$ mm.

Ülesanne 8 - 8. Vee juhtimiseks reservuaarist 400 m kaugusel asuva tarbijani võib kasutada 150 mm ja 200 mm diameetriga torusid (joon. 98). Leida, kui palju on vaja paigaldada kumbagi toru, kui $H = 9$ m, $Q = 2,1$ m³/min ja torude absoluutkaredus $\Delta = 1,2$ mm.

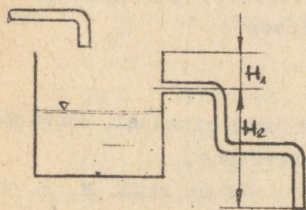


Joon. 98



Joon. 99

Ülesanne 8 - 9. Leida rõhk määrimissüsteemi sissevooluavas, kui vooluhulk süsteemis $Q = 60 \text{ l/min}$, õli temperatuur 20°C , $\nu = 2 \text{ st.}$, $\gamma = 0,9 \text{ t/m}^3$, torustiku pikkus $l = 5 \text{ m}$, $d = 35 \text{ mm}$, toru absoluutkaredus $\Delta = 0,1 \text{ mm}$ ja pumba sissevooluava asub reservuaaris allpool õlipinda $h = 1 \text{ m}$ võrra (joon. 99). Kohalike takistuste rõhukadudeks võtta 10% rõhukadudest toru pikkusel.



Joon. 100

ja toru absoluutkaredus $\Delta = 0,1 \text{ mm}$.

Ülesanne 8 - 10. Ülevoolu vältimiseks on veepaak varustatud 18 meetri pikkuse ülevoolutoruga (joon. 100). Leida ülevoolutoru diameter, kui see peab laskma läbi vett $100 \text{ m}^3/\text{tunnis}$ survekõrguse $H_1 = 0,2 \text{ m}$ juures.

Paagi sein kõrgus üle ülevoolutoru väljumisava on $H_2 = 5,0 \text{ m}$

III. Torustike arvutamine

§ 9. Lihttoru arvutamine

Toodetavaid torusid iseloomustatakse järgmiste põhiparameetritega: toru välisläbimõõt, seinapaksus, pikkus ja tinglähimõõt. Toru tinglähimõõduks nimetatakse toru läbimõõtu millimeetrites, mis vastab ligikaudselt torude ühendamiseks määratud otste siselähimõõdule. Toru tinglähimõõt on torude liigituste aluseks jämeduse järgi ja ta määratakse GOST 355-41 alusel järgmiselt (mm-tes): 3, 6, 10, 15, 20, 25, 32, 40, 50, 70, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 ning edasi kuni 4000-ni 200 mm viisi. Vastavalt kasutatavale töö rõhule toodetakse torusid kas normaalse või tugevdatud seinapaksusega, kusjuures kummalgi juhul toru välisläbimõõt on sama.

Hüdraulilisest seisukohast iseloomustab toru tema arvutuslik läbimõõt, mis on aluseks toru ristlõike määramisel. Toru arvutuslik läbimõõt võetakse võimaliku settekivi arvel tegelikust siseläbimõõdust ühe millimeetri võrra väiksem.

Torustike arvutamise põhialuseks on Chezy valem

$$v = c \sqrt{RJ}, \quad (9 - 1)$$

kus V on keskkiirus m/sek;

R - toru hüdrauliline raadius meetrites, mis ümmargustel torudel on pool geomeetrilisest raadiusest;

J - hüdrauliline lang;

C - Chezy koefitsient.

Chezy valem arvestab vaid takistusi toru pikkusel, kuna pikkade torude puhul kohalikke takistusi ei arvestata.

Chezy koefitsiendi määramiseks kasutatakse akad. N. P. Pavlovski valemit

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (9 - 2)$$

kus n on karedusarv, mis tavaliselt võetakse

uutele torudele 0,011,

ekspluatatsioonis olnud

torudele 0,012 ja

vanadele torudele 0,014;

y - astmenäitaja, mis sõltub toru hüdraulilisest raadiusest ja karedusarvust.

Torustike arvutamisel astmenäitaja võetakse Pavlovski valemis võrdseks 1/6-ga, seega

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}. \quad (9 - 3)$$

Chezy koefitsient ja takistuskoefitsient on seotud järgmise valemiga

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}. \quad (9 - 4)$$

Vooluhulk torus määratakse valemiga

$$Q = \omega c \sqrt{RJ}. \quad (9 - 5)$$

Valemi esimesed kolm liiget on määratud torustiku parameetritega (diameeter, karedus). Seega on nende korrutis iga toru puhul konstantne suurus, mida nimetatakse vooluhulga mooduliks või karakteristikuks K :

$$K = \omega C \sqrt{R}. \quad (9 - 6)$$

Vooluhulk torus määratakse valemiga

$$Q = K \sqrt{\frac{H}{L}}, \quad (9 - 7)$$

kus H on rõhukadu torus ja

L - toru pikkus.

Rõhulang torus on määratud valemiga

$$H = \frac{L}{K^2} Q^2 = ALQ^2 = SQ^2, \quad (9 - 8)$$

kus $A = \frac{1}{K^2}$ on toru eritakistus;

$S = AL$ - toru takistuskarakteristik.

A ja K väärtused terasest vee- ja gaasitorudele ГОСТ 3262-55 järgi on toodud lisas II.^x

Lihttorustiku arvutamisel esineb neli põhiülesannet:

- 1) leida vooluhulk Q (antud survekõrgus H , toru diameeter D , toru karedus λ või n , toru pikkus L);
- 2) leida survekõrgus H (antud Q , D , λ või n , L);
- 3) leida diameeter D (antud Q , H , L , λ või n);
- 4) leida diameeter D ja survekõrgus H (antud Q ja L).

a) Lihttorustiku arvutamine tabeliteta:

Vooluhulga leidmiseks arvutatakse Chezy koefitsient Manningi valemist (9 - 2), leitakse vooluhulga moodulkoefitsient ja vooluhulk valemist 9 - 6.

Survekõrgus arvutatakse valemist 9 - 7, kusjuures enne leitakse vooluhulga moodulkoefitsient.

Toru diameetri leidmiseks arvutatakse esmalt vooluhulga moodulkoefitsient ja sellele vastav diameeter, lahendades võrrandi 9 - 5 graafiliselt või järkjärgulise lähenemise teel. Leitavad sisediameetri järgi võetakse lähim suurema tinglähimõdduga toru.

Toru pikkuse ja vooluhulga järgi diameetri ja vajaliku survekõrguse leidmiseks on lõpmatult palju lahendeid. Lahendite arvu piiramiseks viiakse sisse lisatingimus, milleks on tavaliselt ökonoomilised kaalutlused. Eksploatatsiooni seisukohast ei või torudes liialt suuri voolamiskiirusi lubada, kuna kiiruse kasvades suurenevad rõhukaod kiiruse ruuduga võrdeliselt. Pro-

^x Л.А. Тепакс, Гидравлическое сопротивление водопроводных труб,

jektarimispraktika alusel peaksid kiirused torustikes jmsma tabelis toodud piiridesse.

Tabel 1

Õkonoomsed kiirused torudes N. N. Abramovi järgi

Toru dia- meer- ter mm	<100	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
Maksi- maal- kiirus m/sek	0,70	0,71	0,73	0,85	0,91	0,92	0,96	1,00	1,04	1,06	1,21	1,26	1,27
Mini- maal- kiirus m/sek	-	-	0,45	0,51	0,48	0,58	0,64	0,71	0,76	0,82	0,84	0,86	0,93

Ülesande lahendamisel valitakse keskkiirus ning leitakse sellele vastav toru diameeter ja rõhukadu.

b) Lihttorustike arvutamine tabelite abil.

Torude arvutamisel kasutatakse kaheksaguseid tabelleid:

1) torude moodulkoeffitsientide ja eritakistuste tabelleid ning

2) Seveljovi^x jt. tabelleid.

Torude arvutamine moodulkoeffitsientide tabelite abil (vt. lisa II) on analoogiline tabeliteta arvutamisega.

Seveljovi tabelid on koostatud valemi 9 - 7 alusel, mida võib kirjutada kujul:

$$J = AQ^2. \quad (9 - 9)$$

Seveljovi tabelites on antud igale torule erinevate vooluhulka puhul keskkiirus ja 1000 J. Terastorudele (ГОСТ 3262-55) on toodud arvutustabelid lisa III.

Torude arvutamine Seveljovi tabelite alusel on järgmine: vooluhulga leidmiseks arvutatakse hüdrauliline lang ning leitak-

^x Ф.А. Шевелев, Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных и асбестоцементных водопроводных труб, 1956.

se tabelist vooluhulk langu ja diameetri järgi. Survekõrguse leidmiseks määratakse tabelitest diameetri ja vooluhulga järgi 1000 J ja leitakse survekõrgus seosest:

$$H = JL.$$

Toru diameetri leidmiseks arvutatakse esmalt hüdrauliline lang ja määratakse tabelist diameeter vooluhulga ja langu järgi.

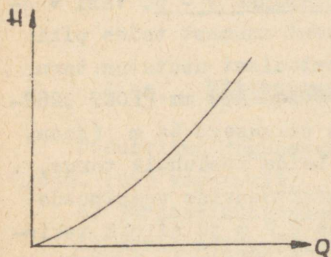
c) Lihttorustiku arvutamine graafiliselt:

Survekõrguse H graafilist sõltuvust vooluhulgast nimetatakse toru karakteristikuks (joon. 101).

Toru karakteristikule leidmiseks kasutatakse valemit 9 - 8, milles eritakistus A kas arvutatakse või leitakse Ševeljovi või teistest vastavatest tabelitest, kasutades seost:

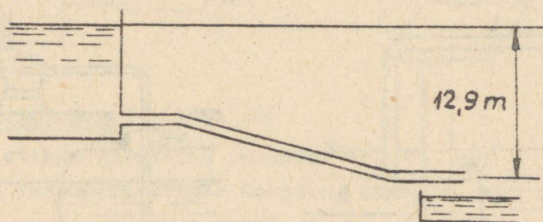
$$A = \frac{J}{Q^2}.$$

Joon. 101



Leitud karakteristik võimaldab määrata vooluhulka või rõhukadu torus erinevatel töörežiimidel.

Ülesanne 9 - 1. Leida isevoolava toru (joon. 102) vooluhulk, kui toru pikkus on 820 m, tinglähimõõt 80 mm, arvutuslik siselähimõõt 79,5 m ja $n = 0,012$. Arvutada tabeliteta.

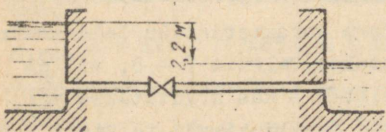


Joon. 102

Ülesanne 9 - 2. 3600 meetri pikuse vesivarustustoru lõpp on 32 meetrit toru algusest kõrgemal. Leida vooluhulga $2,5 \text{ m}^3/\text{min}$ läbilaskmiseks vajalik rõhk toru (ГОСТ 3101 - 46) alguses, kui toru $D = 200 \text{ mm}$, $\lambda = 0,034$ ja vajalik vabarõhk toru lõpus peab olema 2,5 at.

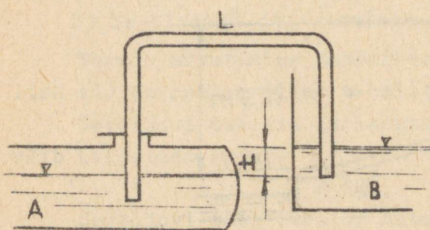
Ülesanne 9 - 3. Vooluhulk $Q = 300 \text{ m}^3/\text{t}$ juhitakse piki toru, mille lõpp-punkt on $13,0 \text{ m}$ kõrgemal toru algusest, $6,0 \text{ km}$ kaugusele. Leida vajalik toru diameeter, kui toru $n = 0,011$ ja rõhk toru alguses on 40 m . Arvutada tabeliteta.

Ülesanne 9 - 4. Leida toru läbimõõt ja vajalik survekõrgus toru alguses, kui $L = 100 \text{ m}$, $n' = 0,012$ ja $Q = 8 \text{ l/sek}$. Arvutatada täbeleid kasutamata.

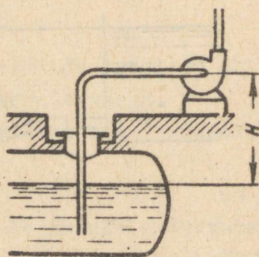


Joon. 103
koefitsientide ja Seveljovi tabelit.

Ülesanne 9 - 6. Leida vooluhulk eelmise ülesande tingimuste puhul, kui täiesti avatud siibri takistuskoeffitsient on $8,0$. Joonestada vooluhulga muutmine siibri sulgemisel sõltuvalt siibri takistuskoeffitsiendi muutumisest.



Joon. 104



Joon. 105

Ülesanne 9 - 7. Vesi voolab sifoontoru kaudu anumast B anumasse A (joon. 104). Leida sifoontoru läbimõõt, kui $Q = 2,0 \text{ l/sek}$, $L = 20 \text{ m}$ ja veepindade vahe $H = 0,20 \text{ m}$. Ülesanne lahendada Seveljovi ja vooluhulga moodulkoeffitsientide tabelite abil. Leida te-

gelik maksimaalne vooluhulk.

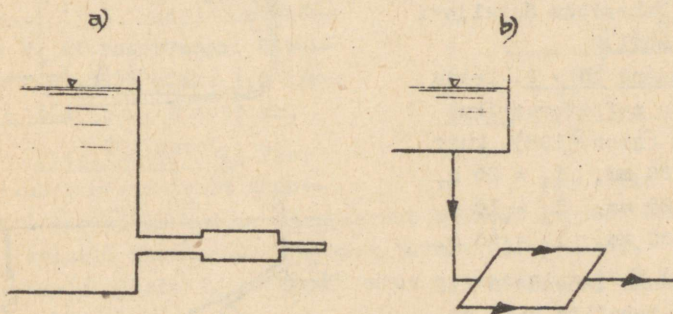
Ülesanne 9 - 8. Benssiini pumbatakse maa-alusest reservuaarist 21 m pikkuse 70 mm toru kaudu (joon. 105). Leida vaakuum torus pumba juures, kui $Q = 4000$ l/min ja $H = 6$ m.

Ülesanne 9 - 9. Vesi voolab reservuaarist atmosfääri piiki 100 mm ja 100 m pikkust horisontaaltoru. Joonestada toru vooluhulga karakteristik.

§ 10. Mitmesuguste torustike arvutamine

Torustikud jagunevad üksikute torude ühenduskeemile (joon. 106) vastavalt:

- järjestikühendusega torustikeks ja
- paralleelühendusega torustikeks.



Joon. 106

Järjestikku ühendatud torudes:

- on vooluhulk kõigis torudes sama, s. o.

$$Q = \text{const} ;$$

- summaarne rõhulang koosneb üksikute torude rõhulangude summast

$$H = \sum_{i=1}^n h_{i1} = Q^2 \sum_{i=1}^n s_i. \quad (10 - 1)$$

Paralleelselt ühendatud torudes:

- rõhulang kõigis torudes on sama, s. o.

$$H = \text{const} ;$$

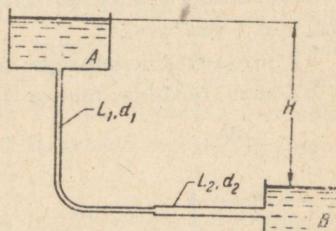
b) summaarne vooluhulk koosneb üksikute torude vooluhul-
kade summast

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{\sqrt{H}}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (10 - 2)$$

Torustike graafilisel lahendamisel tuleb järjestikku ühen-
datud torude karakteristikud liita vertikaalsuunas, s. o. sama
vooluhulga juures summeerida rõhulangud ja paralleelselt ühen-
datud torude karakteristikud liita horisontaalsuunas, s. o. sama
rõhu juures summeerida vooluhulgad.

Ülesanne 10 - 1. Vesi voolab paagist A paaki B teineteise-
ga järjestikku ühendatud terastoru (ГОСТ 3262-55) mööda (joon.
107). Leida vooluhulk Q , kui:
 $d_1 = 40$ mm, $d_2 = 70$ mm,
 $L_1 = L_2 = 40$ m ja $H = 5$ m.

Ülesanne lahendada Seveljovi
tabelite abil.

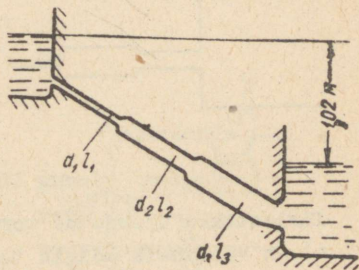


Joon. 107

Ülesanne 10 - 2. Leida
isevoolava naftatorustiku
vooluhulk (joon. 108), kui:

$$\begin{aligned} d_1 &= 100 \text{ mm}, & l_1 &= 20 \text{ m}, \\ d_2 &= 125 \text{ mm}, & l_2 &= 10 \text{ m}, \\ d_3 &= 80 \text{ mm}, & l_3 &= 40 \text{ m}. \end{aligned}$$

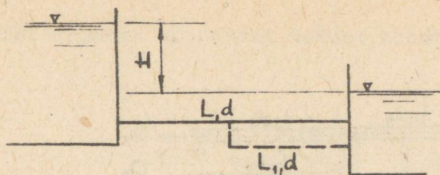
Ülesanne lahendada nii
Seveljovi tabelite kui ka
vooluhulga moodulkoeffitsien-
tide tabelite abil.



Joon. 108

Ülesanne 10 - 3. Voolu-
hulga suurendamiseks (joon.
109) ühendatakse olemasoleva
toruga paralleelselt sama
diameetriga toru (punktir) pikkusega $L_1 = \frac{L}{2}$. Määrata voolu-
hulk ühe ja kahe toru kasutamisel, kui $H = 1$ m, $d = 100$ mm ja
 $L = 10$ m.

Ülesanne 10 - 4. Tarbijat punktis D (joon. 110) toidetakse
reservuaaridest A ja B. Leida maksimaalne vooluhulk tarbija



Joon. 109

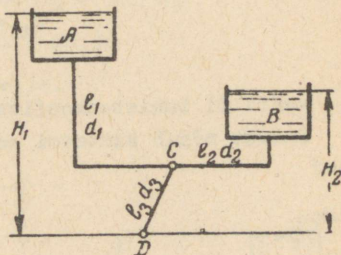
juures, kui:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= 30 \text{ m}, & H_2 &= 20 \text{ m}; \\
 d_1 &= 100 \text{ mm}, & d_2 &= 125 \text{ mm}, & d_3 &= 150 \text{ mm}; \\
 l_1 &= 400 \text{ m}, & l_2 &= 500 \text{ m}, & l_3 &= 250 \text{ m}.
 \end{aligned}$$

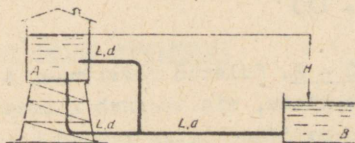
Ülesanne 10 - 5. Reservuaar B toitub reservuaarist A kolmest ühesugusest torust koosneva torustiku kaudu (joon. 111). Leida survekõrgus H , et reservuaari B voolav vooluhulk oleks $1,0 \text{ l/sek}$.

$$L = 50 \text{ m}, \quad d = 50 \text{ mm}.$$

Ülesanne 10 - 6. Vesi voolab reservuaarist atmosfääri torustiku kaudu, mis koosneb kolmest järjestikku ja paralleelselt ühendatud erinevast torust (joon. 112). Joonestada vooluhulkade Q_2 ja Q_3 sõltuvus survekõrgusest H viimase



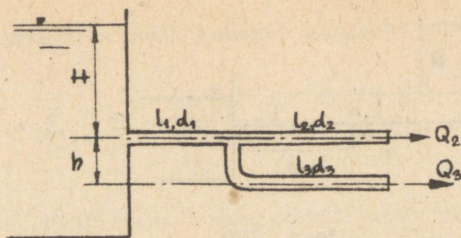
Joon. 110



Joon. 111

muutumisel $0 - 3 \text{ m}$, kui $h = 2 \text{ m}$ ja

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 10 \text{ m}, & l_2 &= 20 \text{ m}, & l_3 &= 20 \text{ m}; \\
 d_1 &= 150 \text{ mm}, & d_2 &= 100 \text{ mm}, & d_3 &= 90 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$



Joon. 112

Ülesanne 10 - 7. Leida vooluhulk torustikus, mis ühendab kahte reservuaari nivoode vahega $H = 24$ m (joon. 113), kui

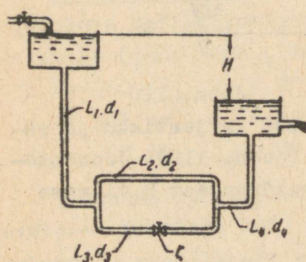
$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 100 \text{ m};$$

$$d_1 = d_2 = d_4 = 100 \text{ mm};$$

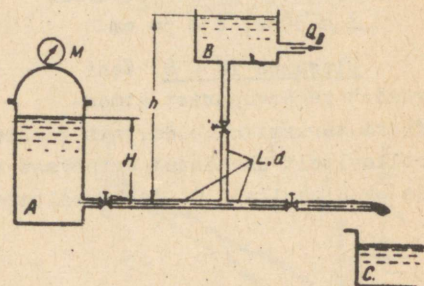
$$d_3 = 150 \text{ mm};$$

ventiili takistuskoeffitsient $\zeta = 30$.

Kuidas mõjub süsteemi vooluhulgale ventiili täielik sulgemine?



Joon. 113



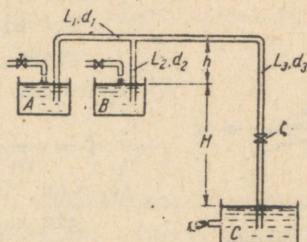
Joon. 114

Ülesanne 10 - 8. Suletud reservuaar A varustab veega paake B ja C torustiku kaudu, mis koosneb kolmest ühesugusest 210 m pikkusest ja 100 mm diameetriga torust (joon. 114).

Leida paaki C suubuv vooluhulk ja veepinna kõrgus h paagis B, kui vooluhulk paagist B on 5 l/sek, manomeetri näit paagil A 4 atü ja $H = 3$ m.

Ülesanne 10 - 9. Reservuaaridest A ja B voolab vesi anum-

se C piki kolmest erinevast torust koosnevat torustikku (joon. 115).



Joon. 115

Leida reservuaari C vooluhulk, kui:

$H = 16 \text{ m}$; $L_1 = 200 \text{ m}$, $L_2 = 100 \text{ m}$, $L_3 = 500 \text{ m}$;

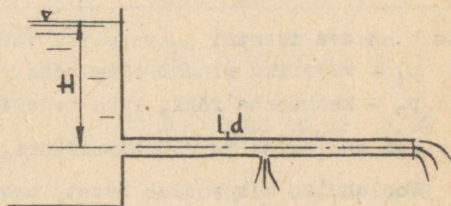
$d_1 = 125 \text{ mm}$, $d_2 = 100 \text{ mm}$, $d_3 = 125 \text{ mm}$ ja

ventiili takistuskoefitsient $\xi = 12$.

Ülesanne 10 -10. Ve-

si voolab reservuaarist atmosfääri piki horisontaalset 300 meetri pikust toru, mille läbimõõt $d = 125 \text{ mm}$ (joon. 116).

Reservuaarist 200 m kaugusel on torus ava läbimõõduga 50 mm. Leida vooluhulgad süsteemis, kui $H = 10 \text{ m}$.



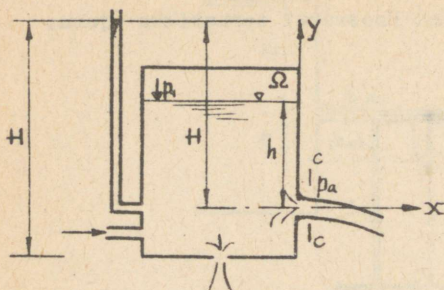
Joon. 116

IV. Voolamine anumatest

§ 11. Vedelike voolamine avadest ja jätkudest

Vedelike voolamisel väikesest avast muutumatu rõhu juures avaldub kiirus joa kitsendatud lõikes valemiga (joon. 117)

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH},$$



Joon. 117

kus H on hüdrostaatilise rõhu kõrgus üle ava telje (tsentri);

φ - kiiruskoefitsient.

Kiiruskoefitsient φ on arvutatav seosest

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}},$$

kus α on kineetilise energia koefitsient jao kitsendatud lõikes ja esimeses lähenduses võib $\alpha = 1$;

ζ - ava takistuskoefitsient.

Üldjuhul hüdrostaatiline rõhukõrgus voolamisel kinnisest reservuaarist üle ava tsentri võrdub:

$$H = h + \frac{p_1 - p_2}{\gamma},$$

kus h on ava tsentri ja vedeliku vabapinna vaheline kaugus,

p_1 - vedeliku pinnal olev rõhk reservuaaris,

p_2 - keskkonna rõhk, kuhu vedelik voolab.

Kui voolamine toimub atmosfääri, siis $p_2 = p_a$.

Vooluhulk, mis voolab avast, arvutatakse valemiga:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH},$$

kus $\mu = \varepsilon \varphi$ on vooluhulga koefitsient.

Kontraktsiooni koefitsient ε avaldub kui jao kitsendatud ristlõike pindala ω_c suhe ava ristlõike pindalasse ω :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega} = \frac{d_c^2}{d^2}.$$

Koefitsientide φ , ζ , ε ja μ väärtused olenevad ava geomeetrisest kujust ja servade töötlustest, vedeliku juurdevoolu tingimustest avale ja Reynoldsi arvust.

Ava võib lugeda väikeseks, kui tema läbimõõt ei ületa

$0,1 H_0$, kus $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$ on rõhukõrgus üle ava telje. Juurdevoolu kiiruskõrgus $\frac{v_0^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g\omega^2}$ võetakse arvesse siis,

kui ava ristlõike pindala ω on suurem kui $\frac{1}{10}$ vedeliku vabapinna pindalast reservuaaris Ω .

Joja trajektoori võrrandid vedeliku voolamisel vertikaalseinas oleva ava kaudu

$$x = 2\varphi\sqrt{Hy},$$

$$y = \frac{x^2}{4\varphi^2 H},$$

kus x ja y on joja raskuskeskme koordinaadid.

Vedeliku voolamisel jätkust kontraktsiooni koefitsient $\varepsilon = 1$ ja järelikult $\mu = \varphi$.

Jätkuks nimetatakse lühikest toru, mille pikkus $l = (3+4)d$.

Koefitsientide $\varepsilon, \varphi, \mu$ ja ξ arvulised väärtused, mis ise-loomustavad vee voolamist avadest ja jätkudest, on toodud alljärgnevas tabelis:

Nr.	Jätku tüüp	Koefitsiendid			
		ε	φ	μ	ξ
1.	Teravate servadega ümmargune ava	0,64	0,97	0,62	0,06
2.	Väline silindriline jätk (venturi jätk)	1,00	0,82	0,82	0,50
3.	Sisemine silindriline jätk (Borda jätk)	1,00	0,71	0,71	1,00
4.	Kooniline kitsenev jätk (koonilisuse nurk $13^\circ 40'$)	0,99	0,96	0,95	0,09
5.	Kooniline laienev jätk (koonilisuse nurk $5 + 6^\circ$)	1,00	0,50	0,50	3,00

Märkus: tabelis toodud andmed on kehtivad ainult täieliku kontraktsiooni puhul, s. t. kui ava kaugus külkseintest ja põhjast on vähemalt $3d$.

Uputatud avade ja jätkude puhul võib kasutada samu valemeid ja koefitsiente, mida kasutatakse voolamisel atmosfääri. Erinevus on ainult selles, et uputatud avade ja jätkude puhul on rõhukõrguseks H veepindade vahe.

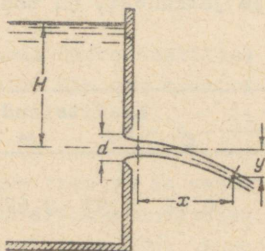
Voolamisel jätkudest tekib jätkus sissevoolu taga kitsendatud lõikes vaakuum. Silindrilise välise jätku puhul vaakuumi

suurus on arvutatav valemiga

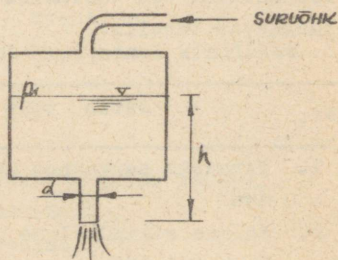
$$h_v = 2\varphi^2 \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) H.$$

Asetades viimasesse valemisse väärtused $\varphi = 0,82$ ja $\varepsilon = 0,64$, saame $h_v \approx 0,75 H$ ja seega maksimaalne H , mille juures väline silindriline jätk võib töötada veel jätkuna, on $H_{\text{maks}} = 13$ m. Voolamisel atmosfääri rebib juga end jätku seinete küljest lahti, aga juba rõhukõrgusel $H = (8 + 9)$ m ja rõhu suurendamisel töötab jätkavana.

Ülesanne 11 - 1. Vesi voolab avast ($d = 10$ mm) atmosfääri rõhu juures $H = 2$ m (joon. 118). Arvutada ava vooluhulga-, kiirus- ja takistuskoeffitsient, kui vooluhulk $Q = 0,294$ l/sek ja



Joon. 118



Joon. 119

joa raskuskeskme tõe punkti koordinaadid on : $x = 3$ m ja $y = 1,2$ m.

Ülesanne 11 - 2. Arvutada maksimaalne võimalik õhurõhk bensiinipaagis tingimusel, et paagi väljavoolutoru töötaks veel jätkuna. Toru läbimõõt $d = 50$ mm, $h = 1,5$ m, bensiini auru rõhk 200 mm elavhõbedasammast ja bensiini erikaal $\gamma = 750$ kg/m³ (joon. 119). Baromeetiline rõhk on 730 mm elavhõbedasammast. Kui suur on bensiini kaaluline vooluhulk?

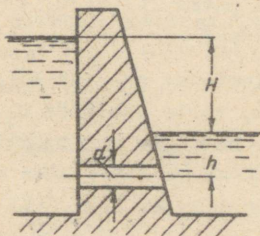
Ülesanne 11 - 3. Paisu silindrilise veelasu kaudu lastakse läbi vooluhulk $Q = 2,3$ m³/sek, kui rõhukõrgus $H = 10$ m.

Arvutada veelasu läbimõõt d ja minimaalne veepinna kõrgus h üle jätku telje tingimusel, et vaakuum jätkus ei ületaks 6-m vee-sammast (joon. 120).

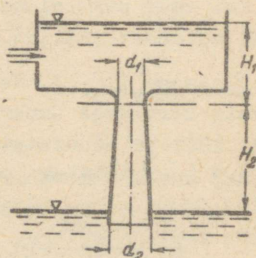
Ülesanne 11 - 4. Veereservuaar on alumise biefiga ühendatud

difuusoriga, mille läbimõõdud on : $d_1 = 100 \text{ mm}$ ja $d_2 = 150 \text{ mm}$ (joon. 121). Difuusori sissevoolu takistuskoeffitsient on $\zeta = 0,06$ ja rõhukadude koeffitsient difuusoris $\varphi_k = 0,2$.

Arvutada veepinna kõrgus H_1 ülemises reservuaaris tingimusel, et difuusori kitsendatud lõikes absoluutne rõhk võrduks



Joon. 120

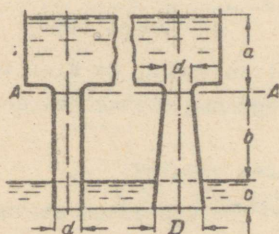


Joon. 121

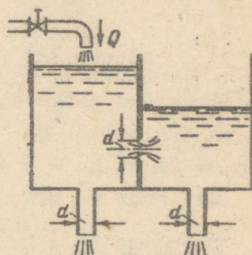
nulliga. Difuusori kitsendatud lõike ja alumise veepinna vaheline kaugus $H_2 = 1,2 \text{ m}$.

Ülesanne 11 - 5.

Vesi voolab ülemisest paagist alumisesse toru ja difuusori kaudu, kusjuures toru ja difuusori sissevoolu läbimõõt (lõige A - A) $d = 300 \text{ mm}$ ja difuusori väljavoolu läbimõõt $D = 600 \text{ mm}$ (joon. 122).



Joon. 122



Joon. 123

Arvutada, mitu korda difuusori vooluhulk on suurem vooluhulgast torus, kui on teada kõrgused $a = 0,8 \text{ m}$, $b = 1,4 \text{ m}$ ja $c = 0,6 \text{ m}$. Sissevoolu osa takistuskoeffitsient nii torus kui ka difuusoris on $\zeta = 0,05$ ja rõhukadude koeffitsient difuusoris

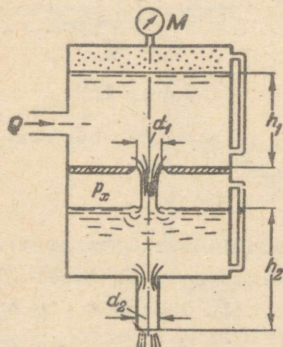
$\varphi_k = 0,25$.

Kui suur on rõhk mõlemal juhul lõikes A - A?

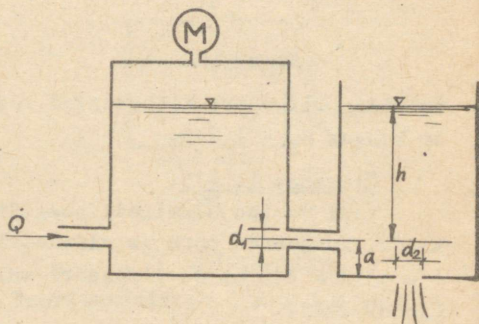
Ülesanne 11 - 6. Paak on eraldatud vaheseinaga kaheks osaks, kusjuures vaheseinas on teravate servadega ümmargune ava läbimõõduga $d = 100$ mm (joon. 123). Vasakpoolsesse paagi osasse voolab vesi $Q = 80$ l/sek. Mõlema sektsiooni põhjad on varustatud silindrilise välisjätkuga, millede läbimõõt $d = 100$ mm. Arvutada mõlema jätku vooluhulk.

Kui suur peab olema vasakpoolse jätku läbimõõt, et vooluhulgad mõlemast jätkust oleksid võrdsed?

Ülesanne 11 - 7. Vesi voolab ülemisest paagist alumisse teravate servadega ümmargusest avast, mille läbimõõt $d_1 = 30$ mm (joon. 124) ja alumisest paagist silindrilise välisjätku ($d_2 = 20$ mm) kaudu atmosfääri.



Joon. 124



Joon. 125

Arvutada jätku vooluhulk Q , kui on teada, et ülemise paagi manomeeter näitab $M = 0,5$ atu ja veepinnad mõõteklaaside järgi on $h_1 = 2$ m ja $h_2 = 3$ m.

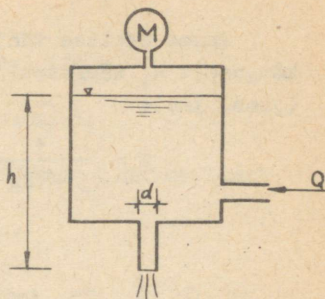
Kui suur on siis rõhk p_x alumises paagis?

Ülesanne 11 - 8. Kaks reservuaari on ühendatud omavahel jätkuga (joon. 125), mille läbimõõt $d_1 = 30$ mm. Mõlemas reservuaaris on vedeliku ($\gamma = 750$ kg/m³) pind samal kõrgusel, s. t. $h = 1,20$ m. Manomeetri lugem vasakpoolses anumast $M = 0,40$ atu.

Arvutada ava läbimõõt d_2 ja vooluhulk Q , kui tegemist on muutumatu voolamisega. Jätaku telje ning ava vaheline kaugus $a = 0,50$ m.

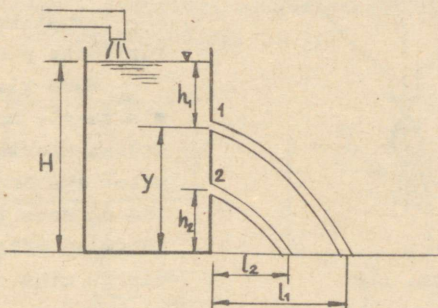
Ülesanne 11 - 9. Suletud reservuaar on varustatud silindrilise välisjätkuga, mille läbimõõt $d = 40$ mm. Jätku väljavoolu ava ja veepinna vaheline kaugus $h = 1,3$ m (joon. 126).

Mitu korda suureneb vooluhulk Q , kui ülerõhk veepinnal muuta algväärtusest ($M_1 = 0,45$ atü) lõppväärtuseni ($M_2 = 1,50$ atü)?



Joon. 126

Ülesanne 11 - 10. Reservuaari seinas on 2 teravate servadega ja erinevatel kõrgustel asuvad ava läbimõõduga $d = 25$ mm (joon. 127). Kui kaugele paiskub kummastki avast juga, kui $H = 2$ m, $h_1 = 0,4$ m ja $h_2 = 0,6$ m? Kui suur peab olema kõrgus h_2 , et joa lennukaugused oleksid võrdsed ($l_1 = l_2$)?



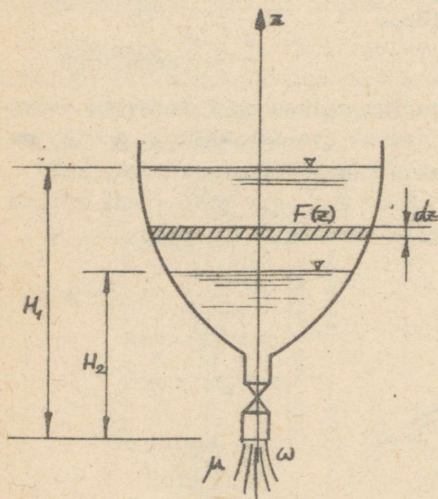
Joon. 127

§ 12. Voolamine muutuva rõhu all

Vedelikud voolavad muutuva rõhu all tavaliselt reservuaaride tühjendamisel ja täitmisel. Kui on tegemist voolamisega ruuttakistuse piirkonnas, võib vooluhulga koefitsiendi μ võtta konstantseks suuruseks kogu anuma tühjenemise või täitumise aja vältel. Seda esineb praktikas kõige sagedamini, sest enamikel juhtudel on tegemist väheviskoossete vedelike voolamisega.

Anuma osalise tühjenemise aeg vedeliku pinna langemisel kõrguselt H_1 kõrguseni H_2 on üldjuhul arvatav valemiga (joon. 128):

$$t = \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{F(z) dz}{\sqrt{z}},$$



Joon. 128

kus $F(z)$ on anuma vedeliku vabapinna pindala funktsioon rõhust z ; dz - vedeliku pinna alanemine anumasa aja dt jooksul ($dz < 0$);

μ - väljavoolutorustiku vooluhulga koefitsient, mis on arvatud väljavoolu ristlõikele;

ω - torustiku väljavoolu ristlõike pindala.

Kuna viimases valemis ei ole arvestatud vedeliku inertsjõudu torustikus ega anumasa, siis valem on seda täpsem, mida lühem on väljavoolutorustik ja mida väiksem on torustiku ristlõike pindala anuma ristlõike pindalaga võrreldes.

Prismaatilise reservuaari jaoks, kus $F(z) = F = \text{const}$, saame peale integreerimist

$$t = \frac{2F}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}).$$

Kui anuma tühjenemisel voolab anumasse samal ajal juurde konstantne vooluhulk q , siis anuma tühjenemise aeg pikeneb aja Δt võrra:

$$\Delta t = \frac{2F}{\mu\omega\sqrt{2g}} \sqrt{z} \ln \frac{\sqrt{H_1} - \sqrt{z}}{\sqrt{H_2} - \sqrt{z}},$$

kus z on rõhk, mis arvutatakse valemist

$$q = \mu \omega \sqrt{2g z}.$$

Anuma täieliku tühjenemise aeg (joon. 129):

$$T = \frac{2F}{\mu \omega \sqrt{2g}} (\sqrt{h_0 + h_1} - \sqrt{h_1}),$$

kus väljavoolutorustiku vooluhulga koefitsient (lühike toru)

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi + \lambda \frac{L}{D}}}.$$

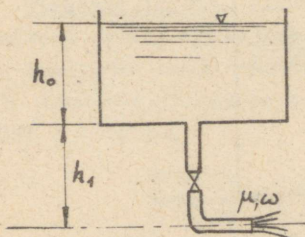
Kui väljavool toimub avast või jätkust, siis $h_1 \approx 0$ ja tühjenemise aeg

$$T = \frac{2 F \sqrt{h_0}}{\mu \omega \sqrt{2g}} = \frac{2 W_0}{Q_0},$$

kus $W_0 = F \cdot h_0$ on vedeliku esialgne maht reservuaaris,

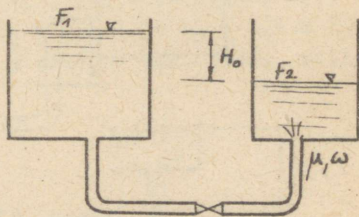
$Q_0 = \mu \omega \sqrt{2g h_0}$ - vedeliku vooluhulk algmomendil.

Kahes omavahel ühendatud anumades saavutavad veepinnad sama kõrguse aja T möödumisel (joon. 130).



Joon. 129

$$T = 2 \frac{F_1 F_2}{F_1 + F_2} \frac{\sqrt{H_0}}{\mu \omega \sqrt{2g}},$$



Joon. 130

kus F_1 ja F_2 on reservuaaride ristlõike pindalad (konstantsed).

Suure viskoossusega vedelike puhul võib esineda väljavoolutorustikus laminaarne voolamine. Mitte arvestades kohalike takistuste mõju, on viskoosete vedelike puhul anumate osalise tühjenemise aeg $F(z) = F = \text{const}$ arvutatav valemist (joon. 128)

$$T = \frac{F}{k} \ln \frac{H_1}{H_2},$$

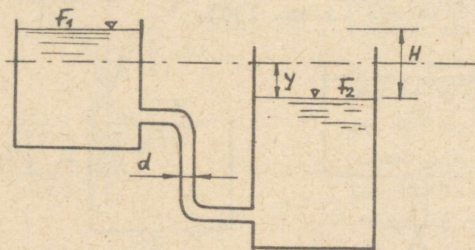
kus -

$$k = \frac{\pi g d^4}{128 \nu l}.$$

Ülesanne 12 - 1. Vee juurdevool silindrilisse anumasse võrdub väljavooluga külgseinas oleva ava kaudu rõhu juures $H = 1,0$ m. Pärast vee juurdevoolu katkestamist tühjeneb anum 100 sek. jooksul.

Arvutada ava läbimõõt ja anumasse juurdevoolava vee vooluhulk, kui anuma ristlõike pindala $F = 0,5$ m².

Ülesanne 12 - 2. Arvutada aeg, mille jooksul omavahel ühendatud anumates veepind saavutab sama kõrguse. Anumate ristlõike pindalad $F_1 = 10$ m² ja $F_2 = 6$ m² (joon. 131) on omavahel ühendatud 10 m pikkuse ja $d = 100$ mm läbimõõduga toruga. Esialgne veepindade vahe anumates $H = 4$ m.



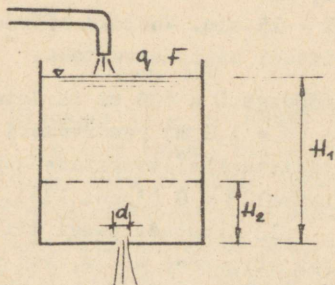
Joon. 131

Arvutamisel võtta takistuskoeffitsient toru käänakule $\zeta = 0,30$ ja hõõrdekoeffitsient $\lambda = 0,040$.

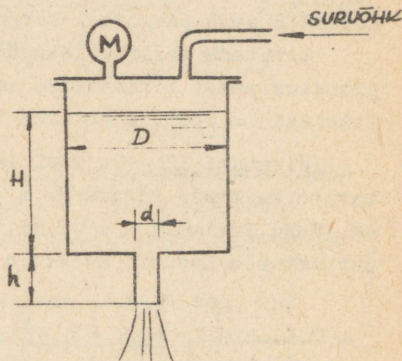
Ülesanne 12 - 3. Reservuaari, ristlõike pindalaga $F = 1$ m², voolab vooluhulk $q = 1$ l/sek. Reservuaari põhjas on teravate servadega $d = 30$ mm läbimõõduga ava, mille kaudu vesi välja voolab (joon. 132). Väljavoolu algmomendil on veepinna kõrgus $H_1 = 60$ cm. Kui palju kulub aega, et veepind langeks kõrguseni $H_2 = 30$ cm?

Ülesanne 12 - 4. Kui suurt ülerõhku peab hoidma paagis, et paak tühjeneks kaks korda kiiremini, kui atmosfäärirõhu puhul?

Paagi läbimõõt $D = 800$ mm ja esialgne veepinna kõrgus $H = 900$ mm (joon. 133). Väljavool paagist toimub $d = 25$ mm läbimõõduga silindrilise välisjätku kaudu, mille pikkus $h = 100$ mm.

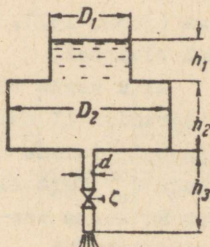


Joon. 132

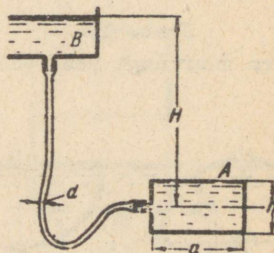


Joon. 133

Ülesanne 12 - 5. Silindriline anum koosneb kahest osast: üleemisest osast, mille läbimõõt $D_1 = 1,5$ m ja kõrgus $h_1 = 1,0$ m, ning alumisest osast vastavalt $D_2 = 2,2$ m ja $h_2 = 1,5$ m (joon. 134). Anum tühjendatakse $h_3 = 2$ m pikkuse toru kaudu, mille läbimõõt $d = 60$ mm.



Joon. 134



Joon. 135

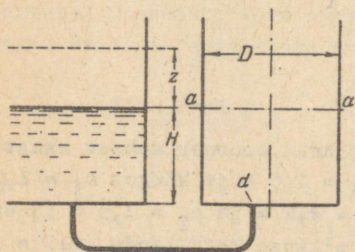
Arvutada anuma tühjenemise aeg, kui on teada, et hõõrdekoefitsient torus $\lambda = 0,03$ ja täiesti avatud ventiili takis-

tuskoefitsient $\zeta = 4$.

Ülesanne 12 - 6. Ruudukujulise põhjaga $a \times a = 2 \times 2 \text{ m}^2$ paak A kõrgusega $h = 1,6 \text{ m}$ täidetakse vooliku abil bensiiniga tsentraalsest bensiinihoidlast B. Vooliku pikkus $l = 7 \text{ m}$ ja ta on ühendatud paagiga A $\frac{1}{2} h$ kõrgusel (joon. 135), kusjuures hoidla B asub paagist A kõrgemal $H = 5 \text{ m}$.

Arvutada vooliku läbimõõd d , kui on teada, et antud tingimustes paagi A täitumise aeg $T = 15 \text{ min}$. Vooliku hõõrdekoefitsient $\lambda = 0,05$. Kohalikke takistusi mitte arvestada.

Ülesanne 12 - 7. Paak läbimõõduga $D = 600 \text{ mm}$ täidetakse torustiku kaudu kõrguseni $a - a$ ($H = 1,2 \text{ m}$) reservuaari vee-ga. Toru läbimõõd $d = 25 \text{ mm}$ ja takistuskoeffitsientide summa (arvestades kadusid ka voolu pikkusel) $\zeta = 8$ (joon. 136).



Joon. 136

kera suurringi pool all- ja II anumal ülalpool.



Joon. 137

täielik tühjenemise aeg anuma põhjas oleva $d_o = 50 \text{ mm}$ läbimõõduga ava kaudu. Tühjenemise ajal on veepinnal atmosfäärirõhk (joon. 138).

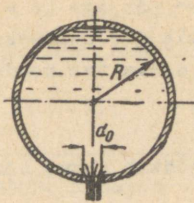
1) Arvutada paagi täitmise aeg kõrguseni $a - a$, kui reservuaari veepind jääb samale kõrgusele.

2) Millise kõrguseni z peab tõstma reservuaari veepinda, et paagi täitmine kõrguseni $a - a$ toimuks poole kiiremini?

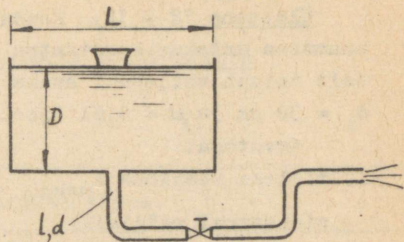
Ülesanne 12 - 8. Kaks poolkerakujulist anumast on täidetud vee-ga (joon. 137). I anumal on

Mitu korda tühjeneb I anum kiiremini II anumast, kui väljavool toimub avast läbimõõduga d_o ? Kera sisemine raadius on R . Anuma vee pinnal on atmosfäärirõhk.

Ülesanne 12 - 9. Arvutada kerakujulise anuma $R = 0,8 \text{ m}$



Joon. 138

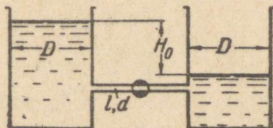


Joon. 139

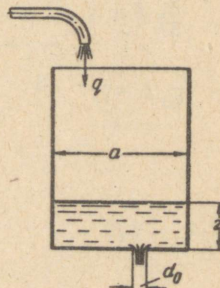
Ülesanne 12 - 10. Bensiini tsistern tühjendatakse põh-
jas oleva toru kaudu, mille pikkus $l = 7$ m ja läbimõõt
 $d = 50$ mm. Toru kohalike takistuskoeffitsientide summa $\sum \zeta = 8$
ja hõõrdekoeffitsient $\lambda = 0,025$.

Arvutada tsisterni tühjendamiseks vajalik aeg, kui
tsisterni pikkus $L = 6$ m ja läbimõõt $D = 2,4$ m (joon. 139).
Arvutamisel toru väljavoolu ristlõike kõrguseks võtta tsis-
terni põhja kõrgus.

Ülesanne 12 - 11. Kaks ühesugust reservuaari läbimõõduga
 $D = 0,8$ m on täidetud õliga ($\nu = 1,4 \frac{\text{cm}^2}{\text{sek}}$), kusjuures õli
pindade vahe $H_0 = 1,20$ m (joon. 140). Õli pinnad ühtlustuvad



Joon. 140



Joon. 141

ühendustoru kraani avamisega. Kui palju kulub aega, et õli
pindade vahe oleks $H = 0,1$ m. Ühendustoru pikkus $l = 6$ m ja
tema läbimõõt $d = 12$ mm. Õli voolamine torus toimub lami-

naarselt.

Ülesanne 12 - 12. Ruudukujulise põhjaga ($a = 800 \text{ mm}$) anumasse antakse konstantne vooluhulk $q = 2 \text{ l/sek}$. Samaaegselt toimub väljavool anuma põhjas oleva ava kaudu, mille $d_0 = 30 \text{ mm}$ ja $\mu = 0,61$ (joon. 141).

Arvutada:

- 1) millise veepinna $z_{\text{maks.}}$ puhul töötab antud süsteem stationsaarsel režiimil;
- 2) kui palju kulub aega, et veepindade z ja $z_{\text{maks.}}$ vahe oleks $\Delta z = 0,10 \text{ m}$?

Mõningaid kohalike takistuste koefitsiente

Jrk. nr.	Takistuse nimetus	Takistuse skeem	ξ
1.	Sissevool torusse a) teravad sisse- vooluservad		a) 0,5
	b) ümardatud ser- vadega sisse- vool		b) 0,1 - 0,2
2.	Väljavool torust anumasse		1,0
3.	Voolu järsk kitse- nemine		$h = \xi \frac{v_2^2}{2g}$ $\xi = 0,5(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1})$
4.	Voolu järsk laie- nemine		$h = \xi \frac{v_2^2}{2g}$ $\xi = (\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1)^2$
5.	Toru pölv		0,5 - 0,6

LOOT 3262-55 järgel valmistatavate vee- ja gaasitorude
vooluhulga karakteristikud K ja eritaktiivsused A

P O R T U		Tavalised torud ($\sqrt{r_{max}} = 10 \text{ at}$)						Pugevdatud torud ($\sqrt{r_{max}} = 16 \text{ at}$)					
ting- lähil- mõõt	vähi- lähil- mõõt	seina paksus	sise- lähil- mõõt	arvru- tus- lik sise- lähil- mõõt	arvutus- lik pöik- pind	$K \cdot 10^3$	$A \cdot 10^3$	sei- na pak- sus	sise- lähil- mõõt	arvru- tus- lik sise- lähil- mõõt	arvutus- lik pöik- pind	$K \cdot 10^3$	$A \cdot 10^3$
mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	m ³ /sek.	sek ² /m	mm	mm	mm	cm ²	m ³ /sek.	sek ² /m ⁶
8	13,5	2,25	9	8	0,5027	0,0517	374000	2,75	8	7	0,3848	0,0354	798000
10	17,00	2,25	12,5	11,5	1,039	0,144	48400	2,75	11,5	10,5	0,8659	0,111	80600
15	21,25	2,75	15,75	14,75	1,709	0,288	12100	3,25	14,75	13,75	1,485	0,237	17900
20	26,75	2,75	21,25	20,25	3,221	0,691	2490	3,5	19,75	18,75	2,761	0,559	3200
25	33,50	3,25	27	26	5,309	1,37	530	4	25,5	24,5	4,714	1,17	734
32	42,25	3,25	35,75	34,75	9,484	3,03	109	4	31,25	33,25	8,683	2,69	138
40	48,00	3,50	41	40	12,57	4,45	50,5	4,25	39,5	38,5	11,64	4,01	62,2
50	60,00	3,50	53	52	21,24	9,06	12,2	4,5	51	50	19,63	8,15	15,1
70	75,50	3,75	68	67	35,26	18,0	3,10	4,5	66,5	65,5	33,70	16,9	3,50
80	88,50	4,00	80,5	79,5	49,64	28,5	1,23	4,75	79	78	47,78	27,0	1,37
100	114,00	4,00	106	105	86,59	60,1	0,277	5	104	103	83,32	57,1	0,307
125	140,00	4,50	131	130	132,7	106	0,0883	5,5	129	128	128,7	102	0,0959
150	165,00	4,50	156	155	188,7	170	0,0345	5,5	154	153	183,9	164	0,0370

Seveljovi arvutustabelid terastoruudele ГОСТ 3262-55

v m/sek.

1/sek.	d mm																	
	8		10		15		20		25		32		40		50		70	
	v	1000l	v	1000l	v	1000l	v	1000l	v	1000l	v	1000l	v	1000l	v	1000l	v	1000l
0,025	0,50	162																
0,030	0,60	226																
0,035	0,70	300	0,34	50,4														
0,040	0,80	384	0,38	63,9														
0,045	0,89	476	0,43	79,0	0,26	23,5												
0,050	0,99	580	0,48	95,5	0,29	28,4												
0,055	1,09	692	0,53	113	0,32	33,8												
0,060	1,19	815	0,58	133	0,35	39,2												
0,065	1,29	953	0,63	154	0,38	45,2	0,20	9,76										
0,070	1,39	1105	0,67	176	0,41	51,8	0,22	11,1										
0,075	1,49	1268	0,72	200	0,44	58,6	0,23	12,5										
0,080	1,59	1443	0,77	225	0,47	65,7	0,25	14,0										
0,085	1,69	1629	0,82	252	0,50	73,3	0,26	15,6										
0,090	1,79	1827	0,87	280	0,53	81,5	0,28	17,3										
0,095	1,89	2035	0,91	310	0,56	89,8	0,29	19,1										
0,10	1,99	2255	0,96	340	0,58	98,5	0,31	20,8										
0,11	2,19	2729	1,06	406	0,64	117	0,34	24,7	0,21	7,36								
0,12	2,39	3247	1,15	478	0,70	137	0,37	28,8	0,23	8,59								
0,13	2,59	3811	1,25	557	0,76	159	0,40	33,3	0,24	9,91								
0,14	2,78	4420	1,35	646	0,82	182	0,43	38,0	0,26	11,3								
0,15	2,98	5074	1,44	742	0,88	208	0,46	43,0	0,28	12,7								
0,16			1,54	843	0,94	234	0,50	48,5	0,30	14,3								
0,17			1,64	953	0,99	262	0,53	54,1	0,32	15,9								
0,18			1,73	1068	1,05	291	0,56	60,1	0,34	17,6								
0,19			1,83	1189	1,11	322	0,59	66,3	0,36	19,4	0,20	4,75						
0,20			1,92	1318	1,17	354	0,62	72,7	0,38	21,3	0,21	5,22						
0,25			2,41	2059	1,46	551	0,78	109	0,47	31,8	0,26	7,70	0,20	3,92				
0,30			2,89	2965	1,76	793	0,93	153	0,56	44,2	0,32	10,7	0,24	5,42				
0,35			3,37	4036	2,05	1079	1,09	204	0,66	58,6	0,37	14,1	0,28	7,08				
0,40					2,34	1409	1,24	263	0,75	74,8	0,42	17,9	0,32	8,98				
0,45					2,63	1784	1,40	333	0,85	93,2	0,47	22,1	0,36	11,1	0,21	3,12		
0,50					2,93	2202	1,55	411	0,94	113	0,53	26,7	0,40	13,4	0,23	3,74		
0,55					3,22	2665	1,71	497	1,04	135	0,58	31,8	0,44	15,9	0,26	4,44		
0,60							1,86	591	1,13	159	0,63	37,3	0,48	18,4	0,28	5,16		
0,65							2,02	694	1,22	185	0,68	43,1	0,52	21,5	0,31	5,97		
0,70							2,17	805	1,32	214	0,74	49,5	0,56	24,6	0,33	6,83	0,20	1,99
0,75							2,33	924	1,41	246	0,79	56,2	0,60	28,3	0,35	7,70	0,21	2,26
0,80							2,48	1051	1,51	279	0,84	63,2	0,64	31,4	0,38	8,52	0,23	2,53
0,85							2,64	1187	1,60	316	0,90	70,7	0,68	35,1	0,40	9,63	0,24	2,81
0,90							2,79	1330	1,69	354	0,95	78,7	0,72	39,0	0,42	10,7	0,25	3,11

1/sek	d mm															
	25		32		40		50		70		80		100		125	
	v	10001	v	10001	v	10001	v	10001	v	10001	v	10001	v	10001	v	10001
0,95	1,79	394	1,00	86,9	0,76	43,1	0,45	11,8	0,27	3,42						
1,0	1,88	437	1,05	95,7	0,80	47,3	0,47	12,9	0,28	3,76	0,20	1,64				
1,05	1,98	481	1,11	105	0,84	51,8	0,49	14,1	0,30	4,09	0,21	1,78				
1,1	2,07	528	1,16	114	0,87	56,4	0,52	15,3	0,31	4,44	0,22	1,95				
1,15	2,17	578	1,21	124	0,91	61,3	0,54	16,6	0,33	4,81	0,23	2,10				
1,2	2,26	629	1,27	135	0,95	66,3	0,56	18,0	0,34	5,18	0,24	2,27				
1,25	2,35	682	1,32	147	0,99	71,6	0,59	19,4	0,35	5,57	0,25	2,44				
1,3	2,45	738	1,37	159	1,03	76,9	0,61	20,8	0,37	5,99	0,26	2,61				
1,35	2,54	796	1,42	171	1,07	82,5	0,64	22,3	0,38	6,41	0,27	2,79				
1,4	2,64	856	1,48	184	1,11	88,4	0,66	23,7	0,40	6,83	0,28	2,97				
1,45	2,73	918	1,53	197	1,15	94,4	0,68	25,4	0,41	7,27	0,29	3,16				
1,5	2,82	983	1,58	211	1,19	101	0,71	27,0	0,42	7,72	0,30	3,36				
1,55	2,92	1049	1,63	226	1,23	107	0,73	28,7	0,44	8,22	0,31	3,56				
1,6	3,01	1118	1,69	240	1,27	114	0,75	30,4	0,45	8,70	0,32	3,76				
1,65			1,74	256	1,31	121	0,78	32,2	0,47	9,19	0,33	3,97				
1,7			1,79	271	1,35	129	0,80	34,0	0,48	9,69	0,34	4,19	0,20	1,09		
1,75			1,85	287	1,39	136	0,82	35,9	0,50	10,2	0,35	4,41	0,202	1,15		
1,8			1,90	304	1,43	144	0,85	37,8	0,51	10,7	0,36	4,66	0,21	1,21		
1,85			1,95	321	1,47	152	0,87	39,7	0,52	11,3	0,37	4,89	0,214	1,27		
1,9			2,00	339	1,51	161	0,89	41,8	0,54	11,9	0,38	5,13	0,22	1,32		
1,95			2,06	357	1,55	169	0,92	43,8	0,55	12,4	0,39	5,37	0,225	1,39		
2,0			2,11	375	1,59	178	0,94	46,0	0,57	13,0	0,40	5,62	0,23	1,47		
2,1			2,21	414	1,67	196	0,99	50,3	0,60	14,2	0,42	6,13	0,24	1,58		
2,2			2,32	454	1,75	216	1,04	54,9	0,62	15,5	0,44	6,66	0,25	1,72		
2,3			2,43	497	1,83	236	1,08	59,6	0,65	16,8	0,46	7,22	0,27	1,87		
2,4			2,53	541	1,91	256	1,13	64,5	0,68	18,2	0,48	7,79	0,28	2,00		
2,5			2,64	587	1,99	278	1,18	69,6	0,71	19,6	0,50	8,41	0,29	2,16		
2,6			2,74	635	2,07	301	1,22	74,9	0,74	21,0	0,52	9,03	0,30	2,31	0,20	0,826
2,7			2,85	684	2,15	325	1,27	80,8	0,77	22,6	0,54	9,66	0,31	2,48	0,203	0,878
2,8			2,95	736	2,23	349	1,32	86,9	0,79	24,1	0,56	10,3	0,32	2,63	0,21	0,940
2,9					2,31	374	1,37	93,2	0,82	25,7	0,58	11,0	0,33	2,81	0,22	0,995
3,0					2,39	400	1,41	99,8	0,85	27,4	0,60	11,7	0,35	2,98	0,23	1,06
3,1					2,47	428	1,46	107	0,88	29,1	0,62	12,4	0,36	3,17	0,233	1,12
3,2					2,55	456	1,51	114	0,91	30,9	0,64	13,2	0,37	3,36	0,24	1,19
3,3					2,63	485	1,55	121	0,94	32,7	0,66	13,9	0,38	3,54	0,25	1,26
3,4					2,71	515	1,60	128	0,96	34,5	0,68	14,7	0,39	3,74	0,26	1,32
3,5					2,78	545	1,65	136	0,99	36,5	0,70	15,5	0,40	3,93	0,264	1,40
3,6					2,86	577	1,69	144	1,02	38,4	0,72	16,3	0,42	4,14	0,27	1,46
3,7					2,94	610	1,74	152	1,05	40,4	0,74	17,2	0,43	4,34	0,28	1,54
3,8					3,02	643	1,79	160	1,08	42,5	0,76	18,0	0,44	4,57	0,29	1,61

Q 1/sek	d mm											
	50		70		80		100		125		150	
	v	1000 f	v	1000 f	v	1000 f	v	1000 f	v	1000 f	v	1000 f
3,9	1,84	169	1,11	44,6	0,79	18,9	0,45	4,77	0,294	1,69	0,207	0,723
4,0	1,88	177	1,13	46,8	0,81	19,8	0,46	5,01	0,30	1,76	0,21	0,754
4,1	1,93	186	1,16	49,0	0,83	20,7	0,47	5,22	0,31	1,84	0,217	0,785
4,2	1,98	196	1,19	51,2	0,85	21,7	0,48	5,46	0,32	1,92	0,22	0,824
4,3	2,02	205	1,22	53,5	0,87	22,6	0,50	5,71	0,324	2,01	0,23	0,857
4,4	2,07	215	1,25	56,0	0,89	23,6	0,51	5,94	0,33	2,09	0,233	0,890
4,5	2,12	224	1,28	58,6	0,91	24,6	0,52	6,20	0,34	2,18	0,24	0,924
4,6	2,17	235	1,30	61,2	0,93	25,7	0,53	6,44	0,35	2,27	0,244	0,966
4,7	2,21	245	1,33	63,9	0,95	26,7	0,54	6,71	0,354	2,35	0,25	1,00
4,8	2,26	255	1,36	66,7	0,97	27,8	0,55	6,95	0,36	2,45	0,254	1,04
4,9	2,31	266	1,39	69,5	0,99	28,9	0,57	7,24	0,37	2,53	0,26	1,08
5,0	2,35	277	1,42	72,3	1,01	30,0	0,58	7,49	0,38	2,63	0,265	1,12
5,1	2,40	288	1,45	75,2	1,03	31,1	0,59	7,77	0,384	2,72	0,27	1,15
5,2	2,45	300	1,47	78,2	1,05	32,2	0,60	8,04	0,39	2,82	0,276	1,20
5,3	2,50	311	1,50	81,3	1,07	33,4	0,61	8,34	0,40	2,91	0,28	1,24
5,4	2,54	323	1,53	84,4	1,09	34,6	0,62	8,64	0,41	3,02	0,286	1,28
5,5	2,59	335	1,56	87,5	1,11	35,8	0,63	8,92	0,414	3,11	0,29	1,32
5,6	2,64	348	1,59	90,7	1,13	37,0	0,65	9,23	0,42	3,22	0,297	1,37
5,7	2,68	360	1,62	94,0	1,15	38,3	0,66	9,52	0,43	3,32	0,30	1,41
5,8	2,73	373	1,64	97,3	1,17	39,5	0,67	9,84	0,44	3,43	0,31	1,45
5,9	2,78	386	1,67	101	1,19	40,8	0,68	10,1	0,444	3,53	0,313	1,50
6,0	2,82	399	1,70	104	1,21	42,1	0,69	10,5	0,45	3,65	0,32	1,54
6,1	2,87	412	1,73	108	1,23	43,5	0,70	10,8	0,46	3,76	0,323	1,59
6,2	2,92	426	1,76	111	1,25	44,9	0,72	11,1	0,47	3,87	0,33	1,64
6,3	2,97	440	1,79	115	1,27	46,4	0,73	11,4	0,475	3,99	0,334	1,69
6,4	3,01	454	1,81	118	1,29	47,9	0,74	11,8	0,48	4,09	0,34	1,73
6,5			1,84	122	1,31	49,4	0,75	12,1	0,49	4,22	0,344	1,78
6,6			1,87	126	1,33	50,9	0,76	12,4	0,50	4,33	0,35	1,83
6,7			1,90	130	1,35	52,4	0,77	12,8	0,505	4,45	0,355	1,88
6,8			1,93	134	1,37	54,0	0,78	13,2	0,51	4,57	0,36	1,93
6,9			1,96	138	1,39	55,6	0,80	13,5	0,52	4,70	0,366	1,98
7,0			1,99	142	1,41	57,3	0,81	13,9	0,53	4,81	0,37	2,03
7,1			2,01	146	1,43	58,9	0,82	14,3	0,535	4,95	0,376	2,08
7,2			2,04	150	1,45	60,6	0,83	14,6	0,54	5,06	0,38	2,14
7,3			2,07	154	1,47	62,3	0,84	15,0	0,55	5,20	0,39	2,19
7,4			2,10	158	1,49	64,0	0,85	15,4	0,56	5,32	0,392	2,24
7,5			2,13	163	1,51	65,7	0,87	15,8	0,565	5,46	0,40	2,30
7,6			2,15	167	1,53	67,5	0,88	16,2	0,57	5,60	0,403	2,36
7,7			2,18	172	1,55	69,3	0,89	16,6	0,58	5,73	0,41	2,41
7,8			2,21	176	1,57	71,1	0,90	17,0	0,59	5,87	0,413	2,46

Q	d mm									
	70		80		100		125		150	
	v	1000 i	v	1000 i	v	1000 i	v	1000 i	v	1000 i
7,9	2,24	181	1,59	72,9	0,91	17,4	0,595	6,00	0,42	2,53
8,0	2,27	185	1,61	74,8	0,92	17,8	0,60	6,15	0,424	2,58
8,1	2,30	190	1,63	76,7	0,93	18,2	0,61	6,28	0,43	2,64
8,2	2,33	195	1,65	78,6	0,95	18,6	0,62	6,43	0,435	2,71
8,3	2,35	199	1,67	80,5	0,96	19,1	0,625	6,56	0,44	2,76
8,4	2,38	204	1,69	82,4	0,97	19,5	0,63	6,72	0,445	2,82
8,5	2,41	209	1,71	84,4	0,98	19,9	0,64	6,85	0,45	2,88
8,6	2,44	214	1,73	86,4	0,99	20,3	0,65	7,01	0,456	2,95
8,7	2,47	219	1,75	88,4	1,01	20,8	0,655	7,15	0,46	3,00
8,8	2,50	224	1,77	90,5	1,02	21,2	0,66	7,31	0,466	3,06
8,9	2,52	229	1,79	92,6	1,03	21,7	0,67	7,45	0,47	3,14
9,0	2,55	234	1,81	94,6	1,04	22,1	0,68	7,62	0,477	3,20
9,1	2,58	240	1,83	96,8	1,05	22,6	0,69	7,78	0,48	3,26
9,2	2,61	245	1,85	98,9	1,06	23,0	0,693	7,93	0,49	3,33
9,3	2,64	250	1,87	101	1,07	23,5	0,70	8,10	0,493	3,39
9,4	2,67	256	1,89	103	1,09	24,0	0,71	8,25	0,50	3,45
9,5	2,69	261	1,91	105	1,10	24,5	0,72	8,42	0,503	3,52
9,6	2,72	267	1,93	108	1,11	25,0	0,723	8,57	0,51	3,59
9,7	2,75	272	1,95	110	1,12	25,4	0,73	8,74	0,514	3,66
9,8	2,78	278	1,97	112	1,13	26,0	0,74	8,90	0,52	3,72
9,9	2,81	284	1,99	115	1,14	26,4	0,75	9,08	0,525	3,80
10,0	2,84	289	2,01	117	1,15	26,9	0,753	9,23	0,53	3,87
10,25	2,91	304	2,06	123	1,18	28,2	0,77	9,67	0,54	4,04
10,5	2,98	319	2,11	129	1,21	29,5	0,79	10,1	0,56	4,22
10,75	3,05	334	2,16	135	1,24	30,9	0,81	10,6	0,57	4,41
11,0			2,21	141	1,27	32,4	0,83	11,0	0,58	4,60
11,25			2,27	148	1,30	33,8	0,85	11,5	0,60	4,79
11,5			2,32	155	1,33	35,4	0,87	11,9	0,61	4,98
11,75			2,37	161	1,36	36,9	0,88	12,4	0,62	5,19
12,0			2,42	168	1,39	38,5	0,90	12,9	0,64	5,39
12,25			2,47	175	1,41	40,1	0,92	13,4	0,65	5,59
12,5			2,52	183	1,44	41,8	0,94	14,0	0,66	5,80
12,75			2,57	190	1,47	43,5	0,96	14,5	0,68	6,03
13,0			2,62	197	1,50	45,2	0,98	15,0	0,69	6,24
13,25			2,67	205	1,53	46,9	1,00	15,5	0,70	6,46
13,5			2,72	213	1,56	48,7	1,02	16,1	0,71	6,68
13,75			2,77	221	1,59	50,6	1,04	16,7	0,73	6,92
14,0			2,82	229	1,62	52,4	1,05	17,2	0,74	7,15
14,25			2,87	237	1,65	54,3	1,07	17,8	0,75	7,38
14,5			2,92	246	1,67	56,2	1,09	18,4	0,77	7,61

Q 1/sek	d mm						Q 1/sek	d mm			
	100		125		150			125		150	
	v	1000i	v	1000i	v	1000 i		v	1000i	v	1000 i
14,75	1,70	58,2	1,11	19,0	0,78	7,88	34,5	2,60	103	1,83	40,4
15,0	1,73	60,2	1,13	19,6	0,79	8,12	35,0	2,64	106	1,85	41,6
15,5	1,78	64,2	1,17	20,8	0,82	8,62	35,5	2,67	109	1,88	42,8
16,0	1,85	68,5	1,20	22,1	0,85	9,15	36,0	2,71	112	1,91	44,0
16,5	1,90	72,8	1,24	23,5	0,87	9,67	36,5	2,75	115	1,93	45,2
17,0	1,96	77,3	1,28	24,9	0,90	10,2	37,0	2,79	118	1,96	46,5
17,5	2,02	81,9	1,32	26,4	0,93	10,8	37,5	2,82	121	1,99	47,7
18,0	2,08	86,6	1,36	27,9	0,95	11,4	38,0	2,86	125	2,01	49,0
18,5	2,14	91,5	1,39	29,5	0,98	11,9	38,5	2,90	128	2,04	50,3
19,0	2,19	96,5	1,43	31,1	1,01	12,6	39,0	2,94	131	2,07	51,6
19,5	2,25	102	1,47	32,8	1,03	13,2	39,5	2,98	135	2,09	53,0
20,0	2,31	107	1,51	34,5	1,06	13,8	40	3,01	138	2,12	54,3
20,5	2,37	112	1,54	36,2	1,09	14,5	41			2,17	57,1
21,0	2,42	118	1,58	38,0	1,11	15,2	42			2,23	59,9
21,5	2,48	124	1,62	39,9	1,14	15,8	43			2,28	62,8
22,0	2,54	129	1,66	41,7	1,17	16,5	44			2,33	65,7
22,5	2,60	135	1,69	43,6	1,19	17,2	45			2,38	68,7
23,0	2,66	141	1,73	45,6	1,22	18,0	46			2,44	71,8
23,5	2,71	148	1,77	47,6	1,24	18,7	47			2,49	75,0
24,0	2,77	154	1,81	49,7	1,27	19,5	48			2,54	78,2
24,5	2,83	161	1,85	51,8	1,30	20,4	49			2,60	81,5
25,0	2,89	167	1,88	53,9	1,32	21,2	50			2,65	84,9
25,5	2,94	174	1,92	56,1	1,35	22,1	51			2,70	88,3
26,0	3,00	181	1,96	58,3	1,38	22,9	52			2,76	91,8
26,5			2,00	60,5	1,40	23,8	53			2,81	95,4
27,0			2,03	62,9	1,43	24,7	54			2,86	99,0
27,5			2,07	65,2	1,46	25,7	55			2,91	103
28,0			2,11	67,6	1,48	26,6	56			2,97	106
28,5			2,15	70,0	1,51	27,6	57			3,02	110
29,0			2,18	72,5	1,54	28,5					
29,5			2,22	75,0	1,56	29,5					
30,0			2,26	77,6	1,59	30,5					
30,5			2,30	80,2	1,62	31,6					
31,0			2,34	82,9	1,64	32,6					
31,5			2,37	85,6	1,67	33,7					
32,0			2,41	88,3	1,70	34,8					
32,5			2,45	91,1	1,72	35,9					
33,0			2,49	93,9	1,75	37,0					
33,5			2,52	96,8	1,77	38,1					
34,0			2,56	99,7	1,80	39,2					

S I S U K O R D

lk.

Sissejuhatus	3
I. Hüdrostaatika	
§ 1. Hüdrostaatiline rõhk	3
§ 2. Hüdrostaatiline rõhujõud tasapinnale	11
§ 3. Hüdrostaatiline rõhujõud kõverpinnale	17
§ 4. Kehade ujuvus ja stabiilsus ujumisel	24
§ 5. Vedeliku suhteline tasakaal	30
II. Põhimõisteid hüdrodünaamikast	
§ 6. Bernoulli võrrand ideaalvedeliku koguvoolule	36
§ 7. Bernoulli võrrand reaalyvedeliku koguvoolule	42
§ 8. Vedelike voolamisrežiimid	48
III. Torustike arvutamine	
§ 9. Lihttoru arvutamine	53
§ 10. Mitmesuguste torustike arvutamine	59
IV. Voolamine anumatest	
§ 11. Vedelike voolamine avadest ja jätkudest	63
§ 12. Voolamine muutuva rõhu all	69
Lisa I	
Lisa II	
Lisa III	

Toimetaja H. Velner

TPI rotaprint, 1962. Trükipoognaid 5,25.

Tiraaž 1000 eks. MB-00918. Tell.nr. 154

Hind rbl. -.18

Hind rbl. -.18

A-24563

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00344746 5