

# PROJEKTAS „MOKYMOŠI VISĄ GYVENIMĄ GEBĖJIMŲ UGDYMAS APLINKOS INŽINERIJOJE IR KRAŠTOTVARKOJE“

## TRUMPAS PROJEKTO ESMĖS APIBŪDINIMAS

Sudaryti sąlygas kiekvienam jaunam žmogui įsigyti jo sugebėjimus ir poreikius atitinkančias studijų paslaugas bei plėtoti mokslo ir studijų žmoniškąjį kapitalą. Aplinkos inžinerijos ir kraštotvarkos studijų krypties studijų programos apima įvairius hidrotechnikos inžinerijos, vandens apsaugos inžinerijos ir valdymo, kraštotvarkos ir žemės kadastro klausimus.

## Pagrindiniai laukiami rezultatai įgyvendinus projektą bus:

- atnaujintos trys bakalauro studijų programos
- atnaujinti 49 studijų dalykų aprašai
- pritaikytos 267 metodinės priemonės atnaujintiems studijų dalykams
- apie 50 dėstytojų pakels kvalifikaciją
- 75 bakalaurai atliks profesinės veiklos praktiką
- įsigyta ar sukurta 14 kompiuterinių programų;
- 49 studijų dalykų metodinė medžiaga pritaikyta nuotoliniam mokymui;

SFMIS numeris

BPD2004-ESF-2.4.0-03-05/0032

BPD priemonė

2.4 priemonė „Mokymosi visą gyvenimą sąlygų plėtojimas“

Vykdytojas

Lietuvos žemės ūkio universitetas

Skirta paramos suma

1 234 978 Lt

Projekto pradžia

2006 m. birželis

Projekto pabaiga

2008 m. balandis

Detali informacija:

<http://www.lzuu.lt/projektai>



**JUOZAPAS VYČIUS  
RENĖ KUSTIENĖ**



# HIDRAULINĖS MAŠINOS IR HIDROELEKTRINĖS

## MOKOMOJI KNYGA

LIETUVOS ŽEMĖS ŪKIO UNIVERSITETAS  
Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakultetas  
Hidrotechnikos katedra

Juozapas Vyčius, Renė Kustienė

# HIDRAULINĖS MAŠINOS IR HIDROELEKTRINĖS

MOKOMOJI KNYGA

KAUNAS, ARDIVA,  
2008

UDK 621.22(075.8)

Vi<sup>29</sup>  
Juozapas Vyčius, Renė Kustienė

HIDRAULINĖS MAŠINOS IR HIDROELEKTRINĖS

Mokomoji knyga

**Recenzavo:**

Doc. dr. Algirdas Radzevičius (LŽŪU Hidrotechnikos katedra)

Prof. Petras Punys (LŽŪU Vandentvarkos katedra)

**Aprobuota:**

Hidrotechnikos katedros posėdyje 2007 10 12, protokolo Nr. 323

Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto tarybos studijų komisijos posėdyje 2007 11 19, protokolo Nr. 19

Kalbą redagavo

Marytė Židonienė ir Vita Siaurodinienė

Maketavo

Laurynas Arminas

Viršelio dailininkas

Dainius Rudeckas

# TURINYS

## I DALIS. SIURBLIAI

<b>ĮVADAS</b> .....	<b>5</b>
<b>IŠCENTRINIAI SIURBLIAI</b> .....	<b>6</b>
1.1. Išcentrinio siurblio schema ir veikimo principas .....	6
1.2. Išcentrinų siurblių klasifikacija .....	7
1.3. Skysčio tekėjimas išcentrinio siurblio siurbliartyje.....	8
1.4. Pagrindinė išcentrinio siurblio lygtis.....	10
1.5. Siurbliaračio menčių forma ir jos įtaka siurblio darbui.....	12
1.6. Išcentrinų siurblių charakteristikos .....	14
1.1. Vamzdyno charakteristika .....	17
1.2. Lygiagretus siurblių darbas .....	18
1.3. Nuosekliai sujungtų siurblių darbas .....	20
1.4. Vakuuminis, manometrinis ir pilnutinis siurblio slėgio aukštis .....	21
1.11. Kavitacija.....	25
1.12. Išcentrinio siurblio galia. Naudingumo koeficientas.....	26
1.13. Siurblio darbo parametrų priklausomybė nuo apsisukimų dažnio .....	29
1.14. Išcentrinų siurblių panašumo dėsniai. Greitaeigiškumo koeficientas .....	30
1.15. Išcentrinų siurblių našumo reguliavimo būdai.....	32
1.16. Ašinis slėgis.....	35
<b>LITERATŪRA</b> .....	<b>37</b>

## II DALIS. HIDROELEKTRINĖS

<b>1. HIDROENERGETINIAI IŠTEKLIAI</b> .....	<b>40</b>
1.1. Gamtinių energijos šaltinių struktūra ir ištekliai .....	40
1.2. Hidroenergetikos reikšmė bendroje energijos šaltinių struktūroje.....	41
1.3. Pasaulio ir Lietuvos hidroenergetiniai ištekliai .....	42
1.4. Hidroenergetikos vystymosi istorija.....	44
<b>2. HIDROENERGETIKOS PAGRINDAI</b> .....	<b>46</b>
2.1. Bendras supratimas apie vandens energiją.....	46
2.2. Vandens srauto energija ir galia.....	46
2.3. Energijos išdirbis.....	48
2.4. Slėgio aukščio sudarymo būdai.....	49
2.5. Hidroelektrinės darbo principas, jos galia.....	50
2.6. Hidroelektrinių klasifikacija.....	52
2.7. Elektros energijos vartotojai ir energijos poreikio grafikai .....	53
2.8. Energetinė sistema.....	54
<b>3. VANDENS ŪKIO IR ENERGETINIAI SKAIČIAVIMAI</b> .....	<b>55</b>
3.1. Vandens išteklių kompleksinis naudojimas.....	55
3.2. Hidroelektrinės veikimo sąlygos kompleksinės paskirties hidromazge.....	55
3.3. Vandens ūkio skaičiavimų tikslas ir uždaviniai.....	56
3.4. Skaičiuojamoji tikimybė .....	58
3.5. Hidroelektrinių pagrindiniai hidrotechniniai ir energetiniai parametrai .....	59
3.7. Hidroelektrinės energetiniai parametrai esant nuotėkio reguliavimui ir be jo .....	59
3.7. Įrengtos hidroelektrinės galios nustatymo principai .....	60

<b>4. HIDROTURBINOS .....</b>	<b>61</b>
4.1. Hidroturbinų tipai.....	61
4.2. Turbinų greitaeigumo koeficientas.....	62
4.3. Aktyvinės turbinos.....	62
4.4. Reaktyvinės turbinos.....	65
4.4.1. Frensio turbinos.....	66
4.4.2. Propelerinės turbinos.....	67
4.4.3. Kaplano turbinos.....	67
4.5. Reaktyvinių turbinų kreipračiai.....	68
4.6. Turbinų kameros.....	68
4.7. Čiulpvamzdžiai.....	69
4.8. Čiulpimo aukštis ir kavitacija.....	70
4.9. Turbinų panašumo dėsniai.....	72
4.10. Turbinų charakteristikos.....	77
4.11. Turbinų tipo ir agregatų skaičiaus parinkimas .....	80
4.12. Hidrogeneratoriai .....	81
4.13. Turbinų reguliavimas.....	83
<b>5. HIDROELEKTRINIŲ STATINIAI .....</b>	<b>84</b>
5.1. Užtvankinių ir derivacinių hidroelektrinių komponavimo schemas ir pagrindiniai hidrotechnikos statiniai .....	84
5.2. Hidroelektrinių pastatai .....	85
5.3. Mažųjų hidroelektrinių projektavimo ypatumai.....	86
5.4. Hidroelektrinių eksploatacija .....	86
5.5. Hidroakumuliacinės elektrinės.....	86
5.6. Potvynių–atoslūgių elektrinės .....	87
<b>6. HIDROELEKTRINIŲ TECHNINIAI EKONOMINIAI RODIKLIAI .....</b>	<b>89</b>
<b>LITERATŪRA .....</b>	<b>91</b>

J. VYČIUS

# SIURBLIAI

I DALIS



## ĮVADAS

*Hidraulinėmis mašinomis* vadinamos tokios mašinos, kurių mašinarčiai gauna iš skysčio tėkmės energiją arba ją atiduoda tėkmei. Pirmuoju atveju hidraulinės mašinos tėkmės energiją paverčia mechanine (hidrovarikliai, turbinos), antruoju atveju – hidraulinės mašinos mechaninę energiją paverčia tėkmės energija (hidrosiurbliai arba tiesiog siurbliai).

*Siurbliais* vadinamos hidraulinės mašinos, kurios mechaninę arba kitokią energiją paverčia skysčio tėkmės energija. Mechaninė energija (elektros, vidaus degimo variklio, vėjo) varomi: stūmokliniai, išcentriniai, sūkuriniai, ašiniai, diafragminiai ir kiti siurbliai; potencine arba kinetine – čiurkšliniai, hidrauliniai taranai, pneumatiniai vandens kėlimo įrenginiai.

Siurblys – vienas iš seniausių žmogaus sukurtų įrenginių (gervė, kaušai, ranka sukamas velenas, Archimedo sraigtas sukurti ir naudoti dar prieš mūsų erą). Nuo 18 amžiaus, įsisavinus plieno ir ketaus gamybą, sukūrus garo mašinas, sparčiai tobulėjo stūmokliniai siurbliai. 19 amžiaus pabaigoje sukuriami išcentriniai giluminiai siurbliai. Išcentrinų siurblių teorijos pagrindai sukurti L.Eulerio (1707-83). 20 amžiuje siurbliai labai paplito.

Žmogaus širdis yra dvigubo veikimo diafragminis siurblys, kuris vienu susitraukimu išstumia 50 – 70 ml kraujo. Bet kokiam automobilyje yra mažiausiai keturių tipų siurbliai: išcentrinis – aušinimo, diafragminis – kuro tiekimo, rotorinis (krumpliartinis) – tepimo sistemoje, pats vidaus degimo variklis veikia stūmoklinio siurblio principu.

Siurbliai plačiai paplitę vandentvarkos sistemose (vandentiekio, nuotekų, šildymo tinkluose), melioracijoje – vandens kėlimo stotys polderiuose, taip pat drėkinimo sistemose.

Siurbliai gali būti stacionarieji ir kilnojамиеji. Hidrotechninėje statyboje naudojami siurbliai – vadinamieji adatiniai filtrai, žeminantys vandens lygius, žemsiurbėmis pumpuojama vandens ir grunto emulsija (pulpa), valomi ežerai, upių vagos, siurbliai naudojami kalnakasybos darbuose, statant žemių užtvankas (Kauno HES statyba) (Ruplys, 1988).

Didžiausi siurbliai Lietuvoje įrengti Kruonio HAE: čia vieno siurblio našumas yra 189 – 190 m<sup>3</sup>/s, pilnutinis siurblio slėgio aukštis – 100 m, slėgimo vamzdžio skersmuo – 7,5 m, vandens tekėjimo greitis – 6,5 m/s, galia siurblio režime – 217 MW.

Taigi siurbliai – hidraulinės mašinos, mechaninę (arba kitokią energiją) verčiančios kinetine arba potencine tėkmės energija. Siurblio suteikta skysčiui energija vadinama pilnutiniu siurblio slėgio aukščiu.

Pagal suteiktos energijos rūšį siurbliai skirstomi į dinامينius, tūrinius ir skysčio keltuvus. Dinaminiai siurbliai per siurbliaratį suteikia skysčiui kinetinę energiją  $\frac{\alpha v^2}{2g}$ , vėliau virstančią slėgio energija. Dinaminiai siurbliai savo ruožtu skirstomi į mentinius ir specialiuosius. Mentiniams siurbliams priklauso išcentriniai, ašiniai, sūkuriniai ir kiti siurbliai. Tūrinių siurblių stūmoklis arba rotorius betarpiškai suteikia slėgio  $\frac{P}{\gamma}$  arba potencinę  $(z + \frac{P}{\gamma})$  energiją. Tūriniams siurbliams priklauso stūmokliniai, rotoriniai, diafragminiai ir kitokie siurbliai.

Skysčio keltuvai suteikia skysčiui padėties energiją – pakelia tam tikrą skysčio tūrį aukšty. Skysčio keltuvams priskiriami vandens ratai, gervės, Archimedo sraigtai ir kiti nesudėtingi vandens kėlimo įrenginiai.

Taip pat hidraulinėms mašinoms priskiriami ventilatoriai (jų sukuriamas oro srauto slėgis  $p$  mažesnis negu 0,3 megapaskalio MPa) ir kompresoriai ( $p > 0,3$  MPa).

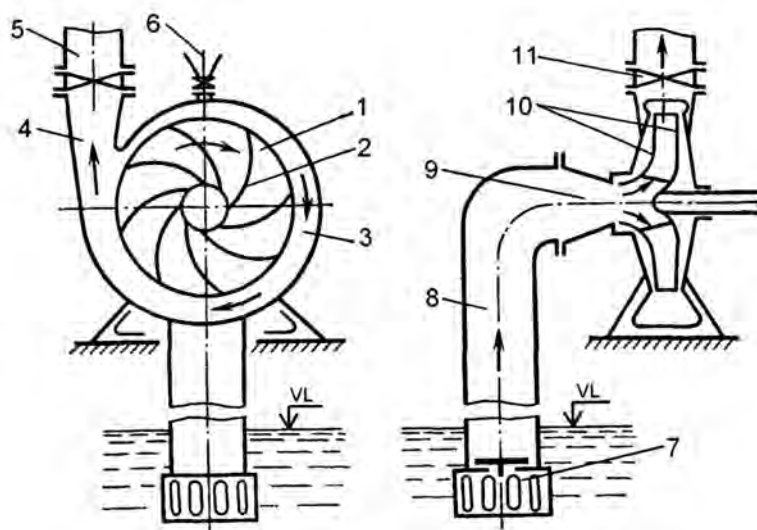


# IŠCENTRINIAI SIURBLIAI

Išcentriniai siurbliai labiausiai naudojami vandentvarkos sistemose. Jų privalumai: didesnis negu kitų siurblių naudingumo koeficientas  $\eta$ , palyginti paprasta konstrukcija, tolygus našumas, platus slėgio aukščių ir debitų diapazonas, pigi eksploatacija. Jie dažniausiai naudojami vandens ir vandens klampio skysčiams pumpuoti.

## 1.1. Išcentrinio siurblio schema ir veikimo principas

Išcentrinio siurblio schema pateikta 1 paveiksle. Pagrindinės siurblio detalės yra šios: siurbliaratis su mentėmis, velenas, korpusas, siurbimo ir slėgimo (pakėlimo) atvamzdžiai su prie jų prijungtais siurbimo ir slėgimo vamzdžiais. Be to, prie siurblio montuojami atbulinis vožtuvas, sklendė (už siurblio), vakuumetras, manometras, anga (pro kurią pripildo skysčio į siurblio korpusą), čiaupas orui išleisti, apsauginis vožtuvas (už siurblio), debitomatis.



1 pav. Išcentrinio vienračio siurblio schema:

1 – siurbliaratis; 2 – mentė; 3 – spiralinė kamera; 4 – plėtėjantis difuzorius; 5 – slėgimo vamzdis; 6 – anga siurblio korpusui užpildyti; 7 – atbulinis vožtuvas ir filtras; 8, 9 – siurbimo vamzdis; 10 – siurbliaračio priekinis ir užpakalinis diskai; 11 – sklendė

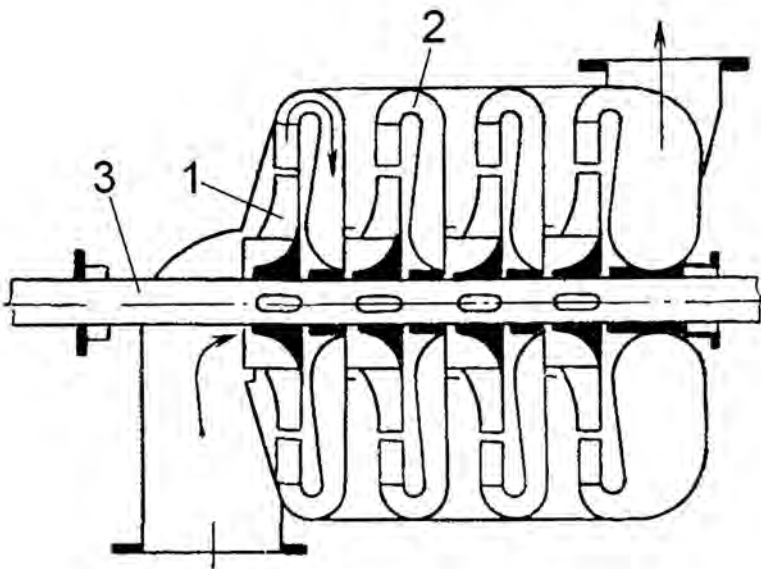
Prieš paleidžiant siurbį, jo korpusas ir siurbimo vamzdis pripildomi skysčio. Siurbliaračiui sukantis, skystis tarpmentiniais kanalais, veikiant išcentrinėms jėgoms, nubloškiamas į siurbliaračio pakraščius ir toliau – į spiralinę kamerą ir slėgimo vamzdį. Todėl siurbliaračio centrinėje dalyje susidaro vakuumas. Atmosferos slėgio, veikiančio laisvąjį skysčio paviršių siurbimo rezervuare, slegiamas skystis siurbimo vamzdžiu teka į siurbliarati, iš jo nuolatos išstumiamas į slėgimo vamzdį. Toks skysčio tekėjimas, sukantis

siurbliaračiui, vyksta nenutrūkstamai. Spiralinėje kameroje, kurios skersplotis palaipsniui didėja, skysčio tekėjimo greitis mažėja, kinetinė energija virsta potencine.

## 1.2. Išcentrinių siurbių klasifikacija

Išcentrinių siurbių gaminama daug rūšių. Visi jie klasifikuojami pagal tam tikrus požymius (Dabužinskas ir kt., 1975) :

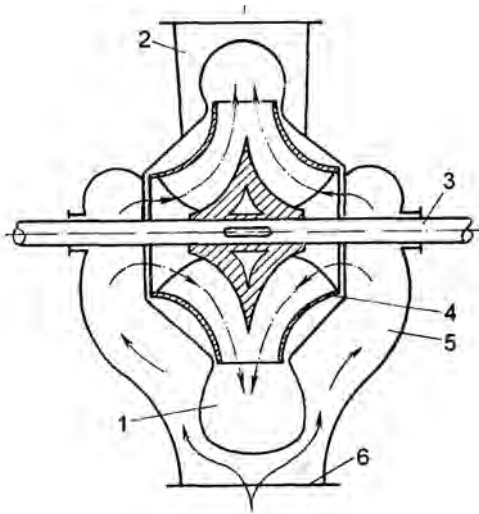
- 1) pagal siurbliaračių skaičių: *vienračiai* su vienu siurbliaračiu (1 pav.) ir *daugiaračiai* su dviem arba daugiau siurbliaračių, užmautų ant vieno veleno (2 pav.);



2 pav. Daugiaračio siurblio schema:

1 – siurbliaračiai; 2 – kreipratis; 3 – velenas

- 2) pagal skysčio įtekėjimo į siurbliaračią pobūdį: *vienpusio įtekėjimo* (1 pav.), kai skystis įteka į siurbliaračią tik iš vienos pusės (maži siurbliai, orientaciniai, kai našumas mažesnis kaip 100 l/s); *dvipusio įtekėjimo*, kai skystis įteka į siurbliaračią iš abiejų pusių (3 pav.);
- 3) pagal slėgio aukštį: *mažo (žemo) slėgio*, kai pilnutinis slėgio aukštis  $H < 20$  m; *vidutiniai*, kai  $H = 20-60$ ; *didelio (aukšto) slėgio*, kai  $H > 60$  m;
- 4) pagal veleno padėtį: *horizontalūs* ir *vertikalūs* siurbliai;
- 5) pagal siurbių palyginimo kriterijų – greitaeigiškumo koeficientą  $n_s$ , siurbliai skirstomi į *lėtaeigius*, *normalius* ir *greitaeigius*;
- 6) pagal pumpuojamą skystį – švariam vandeniui, vandeniui su mechaninėmis priemaišomis, naftai, klampiems skysčiams ir pan.



3 pav. Dvipusio įtekėjimo siurblio schema:

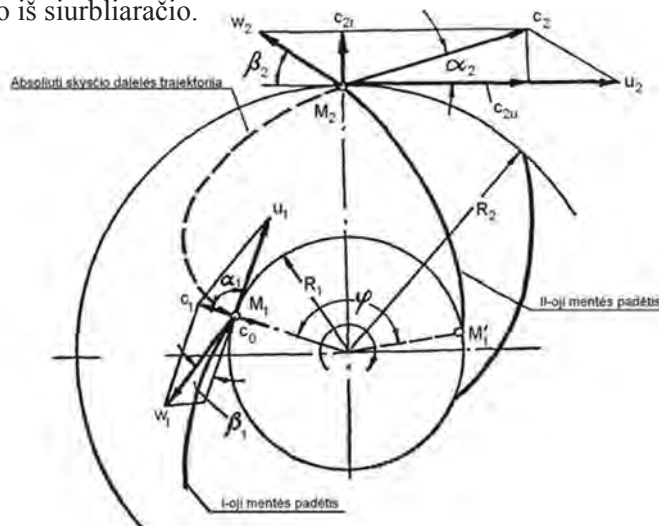
1 – spiralinė slėgimo kamera; 2 – slėgimo antvamzdis; 3 – velenas; 4 – siurbliaratis; 5 – pusspiralė siurbimo kamera; 6 – siurbimo antvamzdis

### 1.3. Skysčio tekėjimas išcentrinio siurblio siurbliaratyje

Skysčio tekėjimas siurbliaratyje yra sudėtingas, todėl jį nagrinėjant taikoma čirukšlinio tekėjimo teorija, kurios pagrindinės prielaidos yra tokios:

- 1) skysčio dalelių trajektorijos lygiagrečios kreiviniams menčių paviršiams;
- 2) siurbliaračio menčių yra be galo daug.

Dirbant siurbliui, skysčio dalelė sukasi kartu su siurbliaračiu ir juda išilgai mentės (4 pav.). Paveiksle parodyta bet kurios dalelės trajektorija  $M_1M_2$  ir vektorinės greičių diagramos menčių galuose: indeksu „1“ pažymėti įtekėjimo į siurbliarati vektoriai, indeksu „2“ – ištekėjimo iš siurbliaračio.



4 pav. Skysčio dalelių tekėjimo siurbliaratyje trajektorijos

Skysčio dalelės judėjimo greitis mentės atžvilgiu vadinamas *santykiniu* greičiu ir paprastai žymimas  $w$ . Dalelės sukimosi greitis kartu su siurbliaračiu vadinamas *apskritiminiu* (periferiniu) greičiu  $u$  ir bet kuriame mentės taške skaičiuojamas pagal formulę:

$$u_i = \frac{\pi D_i n}{60}; \quad (1)$$

čia  $D_i = 2R_i$ , kur  $R_i$  – nagrinėjamo taško atstumas nuo siurbliaračio ašies;  
 $n$  – siurbliaračio sūkių dažnis per minutę.

Geometrinė santykinio ir apskritiminio greičio suma vadinama *absoliučiuoju* greičiu, žymimu raide  $c$  ir išbraižomu pagal lygiagretainio taisyklę. Kampai  $\alpha$  ir  $\beta$  vadinami menčių kampais (kampą  $\alpha$  sudaro  $c$  ir  $u$  vektorių teigiamos kryptys, kampą  $\beta$  – greičio  $w$  teigiama ir greičio  $u$  neigiama kryptis).

Suskaidę absoliučiojo greičio vektorių į du tarpusavyje statmenus komponentus, gauname:

$$c_r = c \sin \alpha, \quad (2)$$

$$c_u = c \cos \alpha \quad (3)$$

čia  $c_r$  – radialinis (spindulinis) greitis;  
 $c_u$  – tangentinis greitis.

Siurblio teorinis debitas nustatomas pagal tėkmės vientisumo lygtį:

$$Q_t = F c_{2r}; \quad (4)$$

čia  $F$  – tėkmės už siurbliaračio skersplotis;  
 $c_{2r}$  – radialinis greitis skysčiui ištekant iš siurbliaračio.

Neatsižvelgiant į tėkmės suspaudimą siurbliaračio mentėmis plotas  $F$  yra:

$$F = \pi D_2 b_2; \quad (5)$$

čia  $D_2$  – išorinis siurbliaračio skersmuo;  
 $b_2$  – siurbliaračio tarpmentinių kanalų plotis.

Taigi

$$Q_t = \pi D_2 b_2 c_{2r}. \quad (6)$$

Tikrasis siurblio debitas apskaičiuojamas:

$$Q = \psi \eta_t Q_t \quad (7)$$

$\psi$  – koeficientas, įvertinantis skysčio suspaudimą mentėmis ( $\psi = 0,9-0,95$ );  
 $\eta_t$  – tūrinis naudingumo koeficientas.

Norint, kad skystis sklandžiai be smūgių įtekėtų į siurbliarati, reikia įvykdyti dvi sąlygas:

1) kad kampas  $\alpha_1$  būtų status  $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ ;

2) kad vidinis mentės galas būtų nusmailintas ir užapvalintas.

Kad skystis sklandžiai ištekėtų iš siurbliaračio, kampas  $\alpha_2$  turi būti smailas ir mentės galas nusmailintas.

#### 1.4. Pagrindinė išcentrinio siurblio lygtis

Pagrindinė išcentrinio siurblio lygtis naudojama pilnutiniam siurblio slėgio aukščiui nustatyti. Šią lygtį pirmą kartą 1754 m. sudarė L. Euleris. Slėgį skysčiui perduoda besisukančio siurbliaračio mentės. Nagrinėjant skysčio tekėjimą siurbliartyje taikoma judesio kiekių momentų lygtis, kuri esant nusistovėjusiai tėkmei formuluojama taip: esant begaliniam menčių skaičiui ir čiurkšliniam tekėjimui, pro siurbliarati per laiko vieneta pratekančios skysčio masės judesio kiekio pokytis yra lygus tėkmę veikiančių išorinių jėgų momentui. Idealiajame skystyje hidrauliniai nuostoliai lygūs nuliui. Taigi, momentų lygtys skysčio įtekėjimo  $M_1$  ir ištekėjimo  $M_2$  taškuose A ir B (5 pav.) yra tokios:

$$M_1 = \rho Q_t \cdot c_1 \cdot l_1 ;$$

$$M_2 = \rho Q_t c_2 l_2 ;$$

čia  $l_1$  ir  $l_2$  greičių vektorių  $c_1$  ir  $c_2$  petys sukimosi veleno atžvilgiu.

Momentų skirtumas  $M$  yra lygus:

$$M = M_2 - M_1 = \rho Q_t (c_2 l_2 - c_1 l_1) ;$$

Kadangi

$$l_1 = R_1 \cos \alpha_1 ;$$

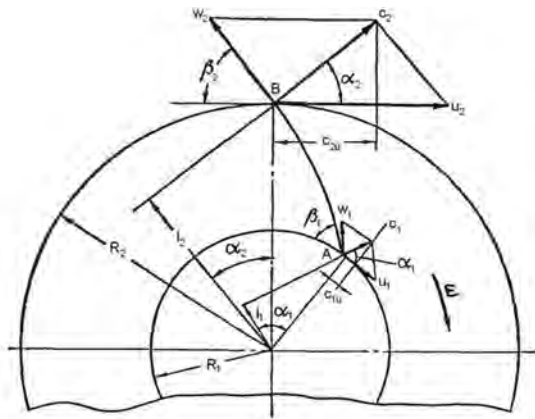
$$l_2 = R_2 \cos \alpha_2 ;$$

tai

$$M = \rho Q_t (c_2 R_2 \cos \alpha_2 - c_1 R_1 \cos \alpha_1) .$$

Padauginę abi gautos lygties puses iš kampinio siurbliaračio sukimosi greičio  $\omega$  gauname:

$$M\omega = \rho\omega Q_t (c_2 R_2 \cos \alpha_2 - c_1 R_1 \cos \alpha_1) .$$



5 pav. Skysčio tekėjimo siurbliartyje greičių vektorių diagramos

Sandauga  $M\omega$  išreiškiama siurblio galia, kuri savo ruožtu yra tokia:

$$M\omega = \rho g Q_t H_t$$

Kadangi  $\omega R_1 = u_1$  ir  $\omega R_2 = u_2$ ,

tai

$$\rho g Q_t H_t = \rho Q_t (u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1).$$

Iš pastarosios lygties išreiškę teorinį siurblio slėgio aukštį, gauname:

$$H_t = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1}{g}$$

Kai  $\alpha_1 = 90^\circ$ , tai  $\cos \alpha_1 = 0$  ir  $u_1 c_1 \cos \alpha_1 = 0$ . Tuomet

$$H_t = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2}{g}. \quad (8)$$

Kadangi  $c_2 \cos \alpha_2 = c_{2u}$ , tai

$$H_t = \frac{u_2 c_{2u}}{g}. \quad (9)$$

Pastaroji 9 lygtis vadinama pagrindine išcentrinio siurblio lygtimi.

Tikrasis pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  yra mažesnis dėl dviejų priežasčių:

- 1) dėl hidraulinių nuostolių  $h_w$  siurbliartyje;
- 2) dėl riboto menčių skaičius siurbliartyje, todėl skysčio čiurkšlės jame nėra lygiagrečios.

Dėl šių priežasčių skaičiuojant tikrąjį siurblio slėgio aukštį, į 9 lygtį įrašomi du pataisos koeficientai:

$$H = \eta_h \cdot k \frac{u_2 c_{2u}}{g}; \quad (10)$$

čia  $\eta_h$  – hidraulinis siurblio naudingumo koeficientas, lygus 0,8 – 0,95;  
 $k$  – koeficientas, įvertinantis baigtinį menčių skaičių;  $k = 0,75 \dots 0,90$ , kai menčių skaičius  $z_m = 6 - 12$ .

Kadangi pagal 10 formulę apskaičiuoti pilnutinį siurblio slėgio aukštį sudėtinga, neretai tikrasis siurblio slėgio aukštis apytiksliai nustatomas pagal empirinę formulę:

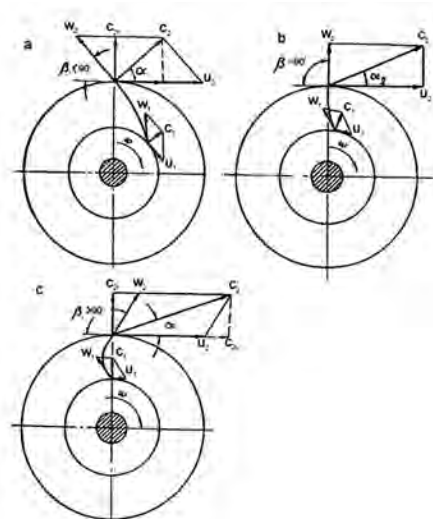
$$H = 0,00028 \varepsilon D_2^2 n^2; \quad (11)$$

čia  $\varepsilon$  - koeficientas priklausantis nuo siurblio konstrukcijos (siurbliams su spiraline kamera  $\varepsilon = 0,35-0,50$ , su kreipračiu  $\varepsilon = 0,45-0,55$ );  
 $D_2$  – išorinis siurbliaračio skersmuo;  
 $n$  – siurbliaračio sūkių dažnis per minutę.

### 1.5. Siurbliaračio menčių forma ir jos įtaka siurblio darbui

Nuo siurbliaračio menčių formos priklauso pilnutinis siurblio slėgio aukštis, kuri sąlygoja menčių kampas  $\beta_2$ . Didėjant kampui  $\beta_2$ , didėja siurblio pilnutinis slėgio aukštis. Teoriškai išcentriniai siurbliai gali būti konstruojami trejų menčių formos (6 pav.):

- a) atgal lenktos mentės  $\beta_2 < \frac{\pi}{2}$ ;
- b) radialinės krypties mentės  $\beta_2 < \frac{\pi}{2}$ ;
- c) į priekį lenktos mentės  $\beta_2 < \frac{\pi}{2}$ .



6 pav. Siurbliaračio menčių formos:

a – atgal lenktos mentės; b – radialinės (spindulinės) krypties mentės; c – į priekį lenktos mentės

Atrodo, kad į priekį lenktos mentės turėtų būti tinkamiausios, tačiau praktikoje daugiausia naudojamos atgal lenktos mentės vadovaujantis šiais samprotavimais. Siurblio teorinis pilnutinis slėgio aukštis  $H_t$  susideda iš statinio  $H_{st}$  ir dinaminio  $H_d$  slėgio aukščių:

$$H_t = H_{st} + H_d. \quad (12)$$

Pagal hidraulikos dėsnius tekančio skysčio lyginamoji kinetinė energija yra:

$$H_d = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}. \quad (13)$$

Konstruojant siurblius stengiamasi, kad  $c_1 = c_{2r}$ , tada iš greičių lygiagretainio (4 pav.)

$$H_d = \frac{c_2^2 - c_{2r}^2}{2g}, \text{ kadangi } c_2^2 - c_{2r}^2 = c_{2u}^2. \text{ Tuomet}$$

$$H_d = \frac{c_{2u}^2}{2g}. \quad (14)$$

Taigi didėjant  $\beta_2$ , kartu didėja  $c_2$  (ir  $c_{2u}$ ), dėl to didėja dinaminis slėgio aukštis, tačiau tai nenaudinga dėl dviejų priežasčių:

- 1) siurblys turi sudaryti statinį slėgį  $H_{st}$ , o ne dinaminį  $H_d$ ;
- 2) didėjant absoliučiajam greičiui  $c_2$  didėja hidrauliniai nuostoliai  $h_w$ .

Naudingiau statinį slėgį  $H_{st}$  sukurti pačiame siurbliartyje.

Tikslinga nustatyti, kokia dalis teorinio pilnutinio slėgio aukščio  $H_t$  tenka dinaminiam slėgio aukščiui  $H_d$ , esant įvairios formos mentėms:

- a) kai mentės lenktos atgal  $\beta_2 < \frac{\pi}{2}$  ( $\beta_2 = 15^\circ \dots 40^\circ$ ) (6 pav. a),

$$c_{2u} < u_2.$$

Padauginę abi nelygybės puses iš daugiklio  $c_{2u}$ , gauname:

$$c_{2u}^2 < u_2 c_{2u}.$$

Padalinę abi nelygybės puses iš  $2g$ , gauname:

$$\frac{c_{2u}^2}{2g} < \frac{1}{2} \frac{u_2 c_{2u}}{g}; \quad (15)$$

$$H_d < \frac{1}{2} H_t. \quad (16)$$



Taigi, siurbliaračiai su atgal lenktomis mentėmis skysčiui suteikia daugumoje statinį slėgį  $H_{st}$ , kadangi  $H_d < \beta_2 = \frac{\pi}{2}$ ;

b) kai siurbliaračio mentės nukreiptos radialiai  $\beta_2 = \frac{\pi}{2}$  (6 pav. b),

$$c_{2u} = u_2, / * c_{2u}$$

$$c_{2u}^2 = u_2 c_{2u} .$$

Iš čia

$$H_d = \frac{1}{2} \frac{c_{2u}^2}{g} = \frac{1}{2} \frac{c_{2u} u_2}{2} = \frac{1}{2} H_t ; \quad (17)$$

c) kai siurbliaračio mentės lenktos į priekį (6 pav. c),

$$c_{2u} > u_2, / * c_{2u}$$

$$c_{2u}^2 > u_2 c_{2u} .$$

Tada

$$H_d = \frac{1}{2} \frac{c_{2u}^2}{g} > \frac{1}{2} \frac{u_2 c_{2u}}{g} ;$$

$$H_d > \frac{1}{2} H_t . \quad (18)$$

Taigi, kai mentės lenktos į priekį, siurbliaračiai sukuria daugiausia dinaminį slėgio aukštį, o tai nenaudinga, nes žymiai padidėja hidrauliniai nuostoliai.

Praktikoje dažniausiai gaminami siurbliaračiai, kurių menčių kampai  $\alpha_1 = 90^\circ$ ,  $\beta_1 = 13,7^\circ - 25^\circ$  ir  $\alpha_2 = 8^\circ - 12^\circ$ ,  $\beta_2 = 20 - 25^\circ$ .

Paprastai švariam vandeniui pumpuoti daroma 6–12 menčių, kurių storis  $\delta = 3 - 12$  mm. Nuotekoms pumpuoti dažniausiai naudojami siurbliaračiai su 1–3 mentėmis ir plačiais tarpmentiniais kanalais, nes tokių siurbliaračių mažesnis užsikimšimo pavojus.

## 1.6. Išcentrinių siurblių charakteristikos

Siurblių darbo režimas neretai yra nepastovus, dažnai siurblių debitas  $Q$  reguliuojamas sklende. Keičiant debitą  $Q$ , kinta ir kiti siurblio darbo parametrai: pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$ , galia  $P$ , leistinasis vakuuminis siurbimo aukštis  $H_{vak}^{leist}$ , naudingumo koe-

ficientas  $\eta$ . Todėl parenkant ir eksploatuojant siurblius, svarbu žinoti ryšį tarp siurblio debito ir kitų darbo parametrų  $H, P, \eta, H_{vak}^{leist}$ .

Tam patogiu naudotis siurblių charakteristikomis:  $H=f_1(Q); P=f_2(Q), \eta=f_3(Q)$ . Svarbiausia yra  $H=f_1(Q)$  kreivė. Ji vadinama pagrindine siurblio charakteristika.

Norint sudaryti  $H-Q$  teorinę charakteristiką, reikia žinoti matematinę priklausomybę tarp siurblio teorinio našumo  $Q_t$  ir teorinio pilnutinio slėgio aukščio  $H_t$ . Tam iš pagrindinės siurblio lygties  $H_t = \frac{c_{2u}u_2}{g}$  ir žinodami, kad pagal greičių vektorius (4 pav.)

$$c_{2u} = u_2 - c_{2r}ctg\beta_2,$$

gauname

$$H_t = \frac{u_2}{g}(u_2 - c_{2r}ctg\beta_2). \quad (19)$$

Žinodami, kad  $Q_t = \pi D_2 b_2 c_{2r}$ , gauname:

$$c_{2r} = \frac{Q_t}{\pi D_2 b_2}. \quad (20)$$

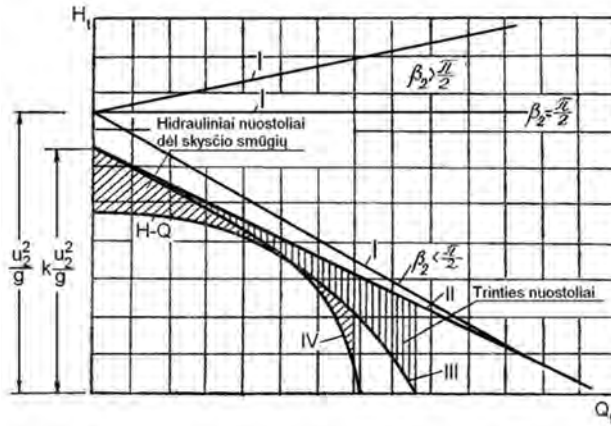
Įrašę 20 lygtį į 19 lygtį, gauname:

$$H_t = \frac{u_2}{g} \left( u_2 - \frac{Q_t ctg\beta_2}{\pi D_2 b_2} \right) = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 Q_t ctg\beta_2}{g\pi D_2 b_2}. \quad (21)$$

Pastaroji 21 lygtis rodo  $H_t$  ir  $Q_t$  ryšį. Kadangi esant pastoviam sūkių dažniui  $n$  dydžiai  $u_2, b_2, \beta_2$  yra pastovūs, todėl galima pažymėti  $\frac{u_2^2}{g} = A$  ir  $\frac{u_2 ctg\beta_2}{g\pi D_2 b_2} = B$ , ir tuomet gauname:

$$H_t = A - BQ_t. \quad (22)$$

Taigi, ryšys tarp  $H_t$  ir  $Q_t$  yra linijinis. 22 lygties grafiko – tiesės posvyrio kampas priklauso nuo siurbliaračio menčių formos, – kai  $\beta_2 > \frac{\pi}{2}$ , ši tiesė kyla aukštyn, kai  $\beta_2 < \frac{\pi}{2}$  – leidžiasi žemyn, o kai  $\beta_2 = \frac{\pi}{2}$ , tiesė yra horizontali (7 pav. I tiesė)



7 pav. Teorinė išcentrinio siurblio charakteristika

Tikroji siurblio charakteristika skiriasi nuo teorinės, nes ją sudarant buvo daroma prielaida, kad menčių skaičius  $z_m$  begalinis, iš tikrųjų jis yra baigtinis dydis ( $z_m \neq \infty$ ), ir yra tam tikrų hidraulinių nuostolių  $h_w$  siurbliartyje. Dėl baigtinio menčių skaičiaus charakteristika įgyja II tiesės padėtį.

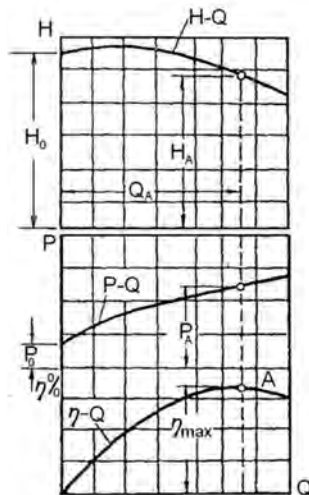
Toliau H-Q koordinatės sumažėja dar dėl dviejų priežasčių:

- 1) dėl skysčio trinties ir vietinių pasipriešinimų (III kreivė);
- 2) dėl skysčio smūgių į menčių paviršius, jam įtekant į siurbliartį (IV kreivė).

Aprašytu būdu sudaryti charakteristiką sunku, todėl paprastai charakteristikos sudaromos eksperimentiniu būdu išbandant siurbli specialiaame stende (Flygt...,1991). Keičiant sklende našumą  $Q$ , fiksuojami parametrai  $H$ ,  $P$ , o naudingumo koeficientas  $\eta$

paskaičiuojamas pagal formulę  $\eta = \frac{\gamma Q H}{1000 N_s}$ . Siurblio charakteristikos sudaromos es-

ant tam tikram pastoviam (nominaliajam) apsisukimų dažniui  $n$ . Siurblio charakteristikos sudaromos atskirame lape, atitinkamai masteliais pavaizduojamos siurblio darbo kreivės H-Q, P-Q,  $\eta$ -Q (8 pav.).



8 pav. Išcentrinų siurblių darbinės charakteristikos

Maksimalią naudingumo koeficiento reikšmę  $\eta_{max}$  atitinka siurblio darbo parametrai  $Q_A, H_A, P_A$ ; taškas A yra optimaliausias darbo taškas, o optimali darbo zona yra kai,  $\eta = 0,9\eta_{max}$ . Kai  $Q = 0, P_0 \approx 0,3P_{max}$ , ši galia sunaudojama trinties ir hidrauliniams nuostoliams kompensuoti. Įvairios konstrukcijos siurblių charakteristikos yra skirtingų tipų (9 pav.). Charakteristikos tipas priklauso nuo greitaiegiškumo koeficiento  $n_s$ , menčių formos ir jų skaičiaus  $z_m$ , menčių kampų  $\alpha_2, \beta_2$ . Gali būti sudaromos universalios siurblių charakteristikos, esant įvairiems apsisukimų dažniams.



9 pav. Išcentrinių siurblių H-Q charakteristikų formos:

1 – staigiai krintančioji; 2 – lėkštoji; 3 – turinti maksimumą kreivės vidurinėje dalyje

### 1.1. Vamzdyno charakteristika

Projektuojant siurbines parenkant joms siurblius, nagrinėjamas siurblio darbo režimas, – tai patogiausia atlikti grafiškai, sudarant siurblio H-Q ir vamzdyno  $H_v$ -Q charakteristikas, nubrėžtas vienodu masteliu.

Pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$H = h_s + h_p + h_{ws} + h_{wp} = h_g + \sum h_w; \quad (23)$$

čia  $h_s$  ir  $h_p$  – atitinkamai siurbimo ir pakėlimo (slėgimo) aukščiai;

$h_{ws}$  ir  $h_{wp}$  – hidrauliniai nuostoliai siurbimo ir pakėlimo linijose;

$h_g$  – geometrinis skysčio kėlimo aukštis;

$$\sum h_w = h_{ws} + h_{wp}.$$

Iš hidraulikos žinoma, kad

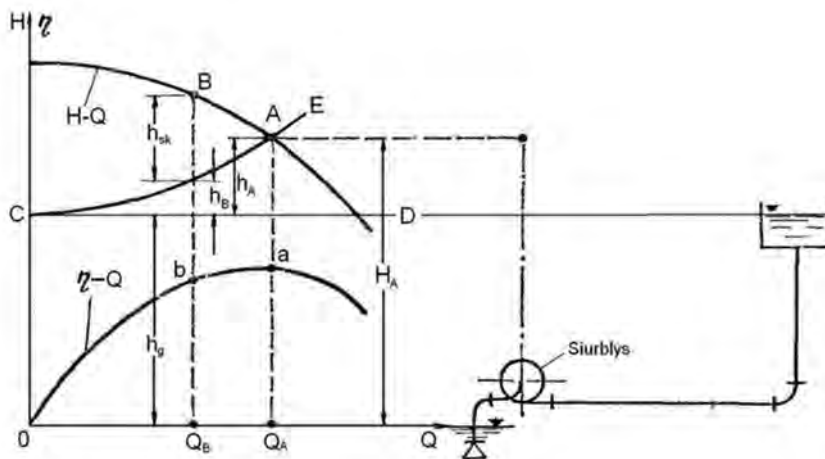
$$\sum h_w = sQ^2; \quad (24)$$

čia  $s$  – daugiklis, įvertinantis visus vamzdyno hidraulinius nuostolius. (Dabužinskas, 1984).

Taigi, slėgis vamzdyne  $H_v$ , pratekat atitinkamiems debitams, toks:

$$H_v = h_g + sQ^2 . \quad (25)$$

Grafiškai pavaizdavę 25 lygybę, gauname vamzdyno charakteristikos grafiką (10 pav.). Tuo pačiu masteliu sudaromos siurblio  $H-Q$  ir  $\eta-Q$  charakteristikos. Vamzdyno charakteristikos sankirta su pagrindine siurblio charakteristika vadinamas režimo (darbo) tašku. Tas taškas apibūdina siurblio darbo parametrus:  $Q_A$ ,  $H_A$  ir  $\eta_A$ . Tik taške A pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H_A$  prilygsta  $h_g + \sum h_w$ .



10 pav. Vamzdyno charakteristika

Didesnio negu  $Q_A$  našumo siurblys išvystyti negali, nes didėjant našumui  $Q$ , siurblio pilnutinis slėgio aukštis  $H$  dėl hidraulinių nuostolių sumažėja tiek, kad nebeįstengia padengti šių nuostolių vamzdyne.

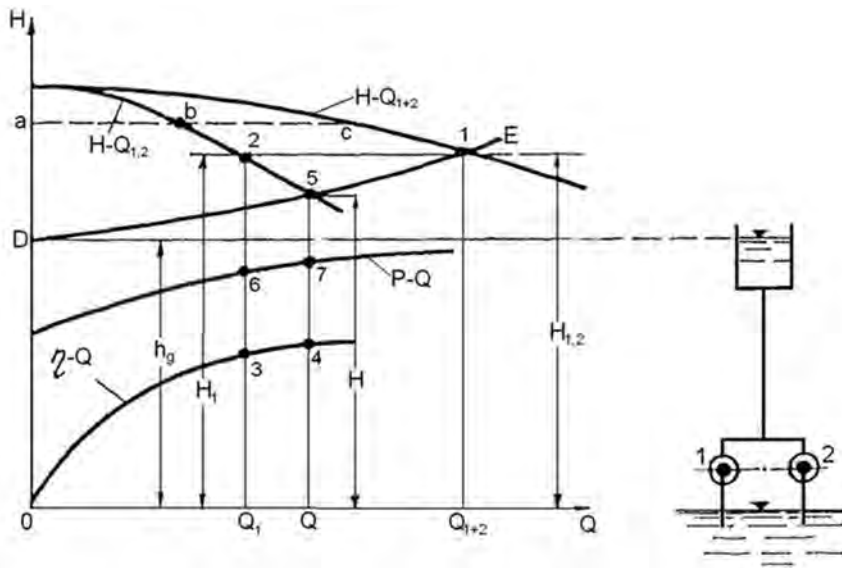
Norint sumažinti siurblio našumą, slėgimo vamzdyne prisukama sklendė, sudaromi papildomi nuostoliai sklendėje  $h_{sk}$ . Tada pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  sunaudojamas  $h_g$ ,  $h_B$  (vamzdyno  $h_w$ ) ir  $h_{sk}$  kompensuoti:

$$H_B = h_g + h_B + h_{sk} . \quad (26)$$

Taškai a ir b rodo siurblio naudingumo koeficientą  $\eta$ , kai siurblio našumas atitinkamai  $Q_A$  ir  $Q_B$ .

## 1.2. Lygiagretus siurblių darbas

Lygiagretus siurblių darbas naudojamas tada, kai vieno siurblio našumo nepakanka, tada lygiagrečiai jungiami du ar daugiau siurblių. Norint nustatyti lygiagrečiai dirbančių siurblių darbo režimą, reikia sudaryti sistemos vamzdyno charakteristiką  $H_v-Q$  ir rasti siurblio  $H-Q$  ir vamzdyno  $H_v-Q$  charakteristikų kirtimosi režimo tašką 1. Suminis našumas yra  $Q_{1+2}$  ir slėgio aukštis –  $H_{1,2}$  (11 pav.).



11 pav. Dviejų vienodų lygiagrečiai sujungtų siurblių charakteristika

Norint nustatyti kiekvieno siurblio našumą, per tašką 1 reikia brėžti horizontalią liniją. Taško 2 parametrai yra kiekvieno atskirai dirbančio siurblio našumas  $Q_1$  ir pilnutinis slėgio aukštis  $H_1$ . Taigi,  $H_1 = H_2 = H_{1+2}$ , o  $Q_1 = Q_2 = \frac{Q_{1+2}}{2}$ ;

Jeigu dirbtų tik vienas siurblys tada tiektų debitą  $Q$  ir jį keltų į aukštį  $H$ . Kadangi  $Q_1 < Q$ , tai  $Q_{1+2} < 2Q$ . Todėl susidaro debitų deficitas, nes padidėjus debitui vamzdyne, padidėja hidrauliniai nuostoliai  $h_w$ . Kiekvieno lygiagrečiai dirbančio siurblio naudingumo koeficientas yra taško 3 ordinatė. Atskirai dirbančio siurblio naudingumo koeficientas yra taško 4 ordinatė. Parenkant siurblius lygiagrečiam darbui reikia žiūrėti, kad 2 taškas būtų optimalioje darbo zonoje. Sistemoje lygiagrečiai ir atskirai dirbančių siurblių galią iš eilės apibūdina P-Q charakteristikos 6 ir 7 taškai.

Jungiant lygiagrečiai 2 nevienodus siurblius, bendroji jų charakteristika sudaroma analogiškai aprašytu būdu.

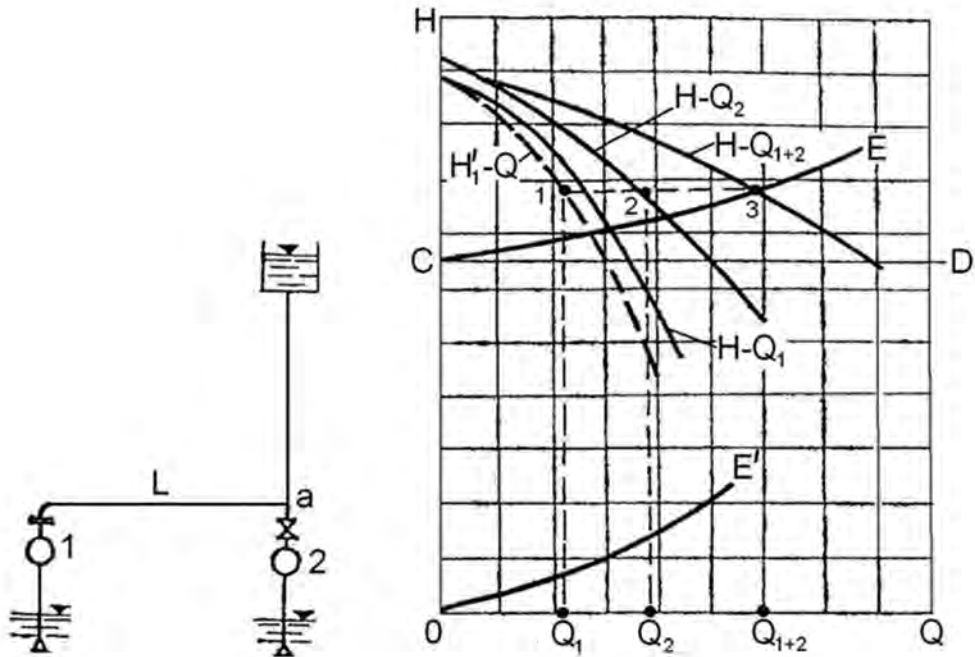
Debitų deficitas  $\Delta Q$  skaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta Q = Q_1 + Q_2 - Q_B; \quad (27)$$

čia  $Q_1$  ir  $Q_2$  – atskirai dirbančių pirmo ir antro siurblių debitai;

$Q_B$  – dviejų lygiagrečiai dirbančių siurblių bendras debitas.

Parenkant siurblius lygiagrečiam darbui, reikia, kad jų pagrindinė charakteristika nebūtų per daug lėkšta, nes ir nežymiai padidėjus slėgio aukščiui  $H$ , smarkiai sumažėja debitas  $Q$ . Antra vertus, kuo lėkštesnė vamzdyno charakteristika, tuo efektyvesnis lygiagretus darbas. Kartais lygiagrečiam darbui tenka jungti toli vienas nuo kito esančius siurblius (12 pav).



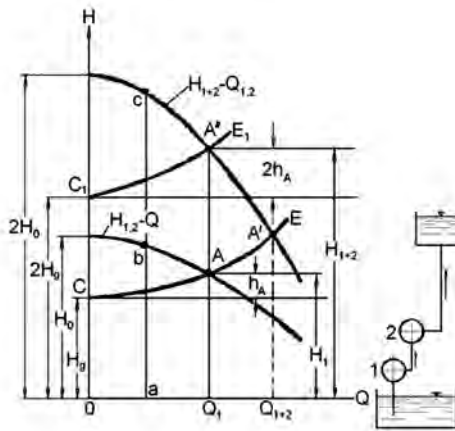
12 pav. Dviejų lygiagrečiai sujungtų ir esančių toli vienas nuo kito siurblių pagrindinė charakteristika

Tada bendroji darbo charakteristika sudaroma taip: pirmiausiai bendrajame grafike braižomos abiejų siurblių charakteristikos  $H-Q_1$  ir  $H-Q_2$ , abu siurblius jungiančio vamzdyno  $L$  charakteristika  $O-E'$  ir bendrojo abiejų siurblių vamzdyno charakteristika  $C-E$  (nu taško  $a$ ). Paskui pirmojo siurblio charakteristika perkeliama į tašką  $a$ . Tam iš  $H-Q_1$  charakteristikos ordinačių atimami abu siurblius jungiančio vamzdyno hidrauliniai nuostoliai (charakteristikos  $O-E'$  ordinatės). Taip gaunama charakteristika  $H'_1-Q$ . Po to horizontaliai sumuojant  $H'_1-Q$  ir  $H-Q_2$  darbo charakteristikas, sudaroma bendroji abiejų siurblių charakteristika  $H-Q_{1+2}$ ; bendrojo lygiagretaus siurblių darbo taškas pažymėtas skaičiumi 3.

Jeigu atskirų siurblių apatinių rezervuarų vandens lygiai yra nevienodame aukštyje, jų charakteristikas reikia privesti prie vieno aukščio, pagrindu imant aukščiausiai esantį siurblinės apatinį rezervuarą. Kitų siurblių darbo charakteristikos pataisomos sumažinant jų ordinates (geometrinius slėgio aukščius) rezervuarų lygių skirtumu.

### 1.3. Nuosekliai sujungtų siurblių darbas

Nuosekliai siurbliai jungiami tada, kai vienu siurbliu nepajėgiama pakelti į reikiamą aukštį (13 pav.). Bendro dviejų nuosekliai dirbančių siurblių darbo charakteristika gaunama vertikalčiai sumuojant sistemoje dirbančių siurblių slėgio aukščių ordinates:  $2H_0$  ir t.t. Kreivė  $CE$  yra vamzdyno charakteristika dirbant vienam siurbliui, o režiminis taškas –  $A$ . Dirbant nuosekliai dviem siurbliams, darbo taškas yra  $A'$ , bendrasis našumas –  $Q_{1,2}$ , taigi našumas padidėja nežymiai, palyginus su vieno siurblio našumu.



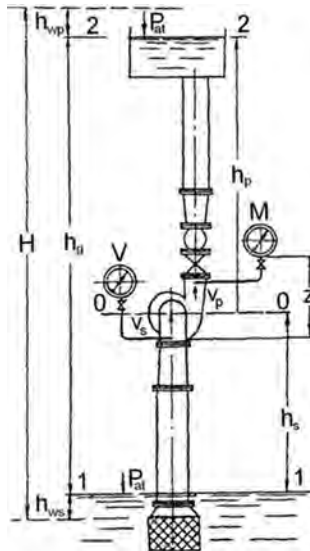
13 pav. Dviejų vienodų nuosekliai sujungtų siurblių pagrindinė charakteristika

Jeigu du siurbliai kelia vandenį į aukštį  $2h_g$ , tai vamzdyno charakteristika yra kreivė  $C_1E_1$ , o darbo taškas –  $A''$ , bendrasis našumas yra  $Q_{1,2}$ , o bendrasis pilnutinis slėgio aukštis –  $H_{1+2}$ . Taigi, nuosekliai dirbdami siurbliai išvysto dvigubą slėgio aukštį  $2H$ , o našumas lieka dažniausiai nepakitęs  $Q_1 = Q_{1+2}$ .

Ekonomiškai labiau apsimoka įrengti vieną didesnio slėgio siurblį, jeigu toks yra, negu du ar daugiau siurblių jungti nuosekliai.

#### 1.4. Vakuuminis, manometrinis ir pilnutinis siurblio slėgio aukštis

Įsiurbimas į siurbliarati vyksta dėl vakuumo siurbliaračio centre. Šis vakuumas turi būti toks, kad vanduo, įveikęs hidraulinius pasipriešinimus  $h_w$  siurbimo vamzdyje, pakiltų iš siurbimo rezervuaro iki siurbliaračio (14 pav.).



14 pav. Išcentrinio siurblio įrangos schema, kai manometras aukščiau už vakuumetrą



Nagrinėjant tekėjimą vandens kėlimo sistemoje, pjūviams O-O ir 1-1 pritaikome Bernulio lygtį, palyginimo plokštuma laikydami pjūvį 1-1:

$$\frac{p_{at}}{\gamma} = h_s + \frac{p_s}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2g} + h_{ws} .$$

čia  $p_{at}$  – atmosferos slėgis Pa;  
 $\gamma = \rho g$  – skysčio tūrio vieneto sunkis N/m<sup>3</sup>;  
 $h_s$  – geometrinis siurbimo aukštis m;  
 $p_s$  – absoliutusias slėgis siurbliaračio centre Pa;  
 $v_s$  – skysčio tekėjimo greitis siurbimo vamzdyje m/s;  
 $g$  – žemės traukos pagreitis m/s<sup>2</sup>;  
 $h_{ws}$  – hidrauliniai nuostoliai siurbimo vamzdyje m.

Šią lygtį galima perrašyti taip:

$$\frac{p_{at} - p_s}{\gamma} = h_s + \frac{v_s^2}{2g} + h_{ws} .$$

Kairėje lygties pusėje esantis narys vadinamas vakuuminio siurbimo aukščiu  $h_{vak}$ :

$$h_{vak} = h_s + \frac{v_s^2}{2g} + h_{ws} . \quad (28)$$

Iš 28 lygties matome, kad  $h_s < h_{vak}$ . Kiekvienam siurbliui nustatomas tam tikras leistinas vakuuminis siurbimo aukštis  $h_{vak}^{leis}$  siurblių išbandant gamykloje. Viršyti  $h_{vak}^{leis}$  negalima, nes atsiranda kavitacijos reiškinių. Charakteristikose nurodomas  $h_{vak}^{leis}$ , kai atmosferos slėgio aukštis  $h_{at} = 10$  m. Kitokio geometrinio aukščio vietovėje

$$h_{vak}^{leist} = h_{vak}^0 - 10,0 + h'_{at}; \quad (29)$$

čia  $h_{vak}^0$  – kataloginis leistinasis vakuuminis siurbimo aukštis;

$h'_{at}$  – atmosferos slėgio aukštis m vietovėje, kur įrengiamas siurblys.

Kitas svarbus išcentrinių siurblių parametras yra geometrinis pakėlimo (slėgimo) aukštis  $h_p$ .

$$h_p = A_{PR} - A_{SA}; \quad (30)$$

čia  $A_{PR}$  – skysčio lygio altitudė slėgimo (priėmimo) rezervuare;  
 $A_{SA}$  – siurbliaračio ašies altitudė.

Pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  yra suteikiamos lyginamosios energijos, išreikštos vandens stulpo aukščiui, prieaugis.

Lyginamoji energija siurbimo antvamzdyje plokštumos O-O atžvilgiu

$$E_1 = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2g}, \quad (31)$$

o slėgimo antvamzdyje

$$E_2 = z_1 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_p^2}{2g}; \quad (32)$$

čia  $z_1$  – taško, kuriame matuojamas slėgis, atstumas nuo palyginimo plokštumos 0–0;

$p_1$  ir  $p_2$  – absoliutus slėgis siurbimo ir slėgimo antvamzdžiuose;

$v_s$  ir  $v_p$  – skysčio tekėjimo greitis atitinkamai siurbimo ir slėgimo antvamzdžiuose.

$$H = E_2 - E_1 = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2g}.$$

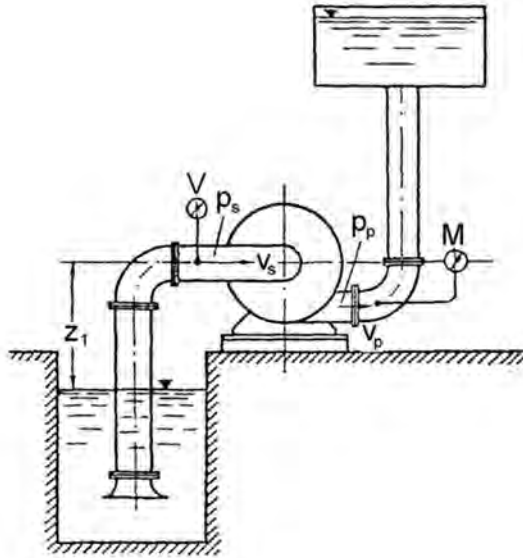
Kadangi  $p_1 = p_{at} - p_{vak}$  ir  $p_2 = p_{at} + p_{man}$ , tai

$$H = \frac{p_{at} + p_{man} - p_{at} + p_{vak}}{\gamma} + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2g}.$$

Atlikę matematinius veiksmus, gauname:

$$H = h_{man} + h_{vak} + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2g}. \quad (33)$$

Pastaroji formulė tinka tada, kai vakuummetro prijungimo vieta ir manometro rodyklės ašis yra vienoje horizontalioje plokštumoje (15 pav.).



15 pav. Išcentrinio siurblio įrangos schema, kai manometras ir vakuumetras yra vienodame lygyje

Kai ta sąlyga neįvykdoma, pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  nustatomas pagal formulę:

$$H = h_{vak} + h_{man} \pm z + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2g} \text{ m.} \quad (34)$$

Dydis  $z$  teigiamas, kai manometro rodyklės ašis aukščiau už vakuumetro prijungimo tašką, ir  $z$  neigiamas, kai vakuumetro prijungimo vieta aukščiau už manometro rodyklės ašį.

Siurblio, kurio siurbimo aukštis neigiamas, (kai siurblys įrengtas žemiau vandens lygio siurbimo rezervuare) pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  nustatomas pagal formulę:

$$H = h_{man1} - h_{man2} + z + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2g}; \quad (35)$$

čia  $h_{man1}$  ir  $h_{man2}$  – manometriniai slėgio aukščiai atitinkamai slėgimo ir siurbimo atvamzdžiuose.

Sifoninio tipo siurblinėse, kuriose siurblys pastatytas aukščiau už vandens lygį abiejuose rezervuaruose, pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$H = h_{vak1} - h_{vak2} + z + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2g}; \quad (36)$$

čia  $h_{vak1}$  ir  $h_{vak2}$  – vakuuminiai slėgio aukščiai atitinkamai siurbimo ir slėgimo atvamzdžiuose.

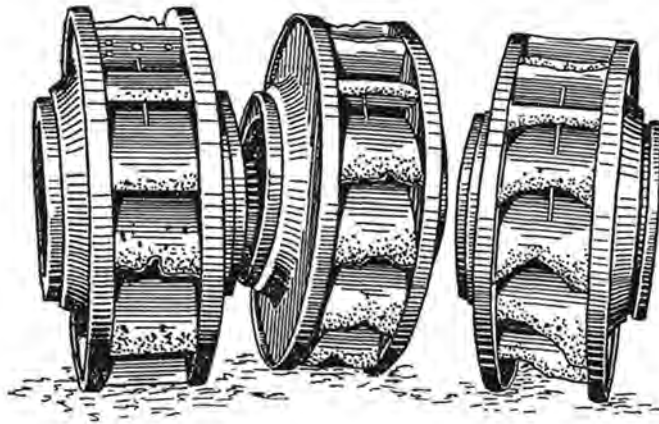
Projektuojant siurbines, pilnutinis  $H$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$H = h_s + h_p + h_{ws} + h_{wp}. \quad (37)$$

Visi 37 formulės simboliai paaiškinti anksčiau.

### 1.11. Kavitacija

Skystis įsiurbiamas į siurbliarą dėl vakuomo siurbliaračio centre. Tačiau absoliutųjį slėgį siurbliaračio centre galima mažinti tik iki tam tikros ribos, vadinamos prisotintų garų slėgiu  $p_g$ . Sumažėjus slėgiui siurbliaratyje žemiau  $p_g$ , skystyje siurbliaračio centrinėje dalyje vyksta šaltas virimas, išsiskiria skysčio garai ir dujos. Išcentrinės jėgos veikiami garai nubloškiami į periferinę siurbliaračio zoną ir čia kondensuojasi, susidaro absoliučios tuštumos. Skysčio dalelės dideliu greičiu veržiasi į atsiradusias tuštumas ir susidurdamos išvysto 1000 ir daugiau atmosferų slėgį. Tas reiškinys vadinamas *kavitacija*. Vykstant kavitacijai, siurbliaračio ir korpuso metaliniai paviršiai ardomi, be to, iš skysčio išsiskiria deguonis, kuris didina koroziją, ardo siurbliarą chemiškai (16 pav.).



16 pav. Kavitacijos paveikti siurbliaračiai

Būdingi kavitacijos reiškiniai – triukšmingas darbas, vibracija, netolygus našumas, sumažėjęs slėgio aukštis (Karassik et al, 1986; Silke, 1984).

Kad nevyktų kavitacija, detalės daromos iš nerūdijančio plieno, bronzos, tačiau geriausiai šalinti kavitacijos priežastis. Tai pasiekama dviem būdais:

- 1) siurbimo aukštis  $h_s$  turi būti toks, kad slėgis vakuomo zonoje siurbliaračio centre  $p_s$  būtų didesnis už prisotintų garų slėgį ( $p_s > p_g$ );
- 2) mažinant hidraulinius nuostolius siurbimo vamzdyje.

Iš Bernulio lygties  $\frac{p_{at}}{\gamma} = h_s + \frac{p_s}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2g} + h_{ws}$  galima nustatyti leistinąjį siurbimo aukštį:

$$\frac{p_s}{\gamma} = \frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{v_s^2}{2g} - h_s - h_{ws} . \quad (38)$$

Kad nevyktų kavitacija siurblyje, slėgis siurbliaračio centre turi būti  $\Delta h_k$  dydžiu didesnis už prisotintų garų slėgį  $p_g$ :

$$\frac{p_s}{\gamma} = \frac{p_g}{\gamma} + \Delta h_k ; \quad (39)$$

čia  $\Delta h_k$  - vakuuminio slėgio aukščio atsarga, arba kavitacinė atsarga.

Nustatyti dydį  $\Delta h_k$  sudaroma siurblio kavitacinė charakteristika arba ją galima apytiksliai apskaičiuoti pagal formulę:

$$\Delta h_k = \alpha \delta H ; \quad (40)$$

čia  $\alpha$  – atsargos koeficientas (1,2 – 1,3)

$\delta$  – kavitacijos koeficientas, kuris nustatomas pagal formulę

$$\delta = \frac{10}{H} \left( \frac{n\sqrt{Q}}{C_k} \right)^{4/3} ; \quad (41)$$

čia  $C_k$  – greitaigiškumo kavitacijos kriterijus, kuris lėtaeigiams siurbliams  $C_k = 600 - 800$ , normaliems – 900–1000, greitaeigiams – 1000–1300.

Irašę lygybę 40 į 39 formulę ir sulyginę tarpusavyje 38 ir 39 lygčių dešiniąsias puses, gauname:

$$\frac{p_g}{\gamma} + \alpha \delta H = \frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{v_s^2}{2g} - h_s - h_{ws} . \quad (42)$$

Tuomet

$$h_s^{leist} = \frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{p_g}{\gamma} - \frac{v_s^2}{2g} - h_{ws} - \alpha \delta H . \quad (43)$$

## 1.12. Išcentrinio siurblio galia. Naudingumo koeficientas

Galia yra darbas per laiko vienetą. Galios matavimo vienetai SI sistemoje yra vatas W ir jo kartotiniai dydžiai: kilovatas 1kW = 1000W, megavatas 1MW = 1000kW.

Siurblio naudingąją (atiduodamąją) galią  $P_n$  apskaičiuojame pagal formulę:

$$P_n = \frac{\gamma QH}{1000} ; \text{ kW} \quad (44)$$

čia  $Q$  – siurblio našumas  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $H$  – pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $\text{m}$ ;  
 $\gamma$  – skysčio tūrio vieneto sunkis  $\text{N}/\text{m}^3$  .

Galia, kurią reikia suteikti siurblio velenui,  $P_s$  lygi

$$P_s = \frac{P_n}{\eta} ;$$

čia  $\eta$  - bendrasis siurblio naudingumo koeficientas.

Taigi

$$P_s = \frac{\gamma QH}{1000\eta} \text{ kW.} \quad (45)$$

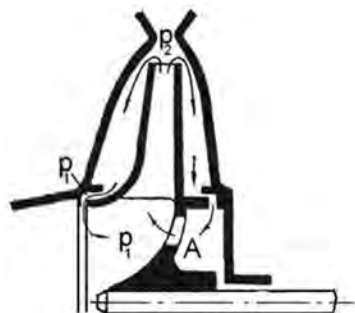
Naudingumo koeficientas  $\eta$  apibūdina visus nuostolius, kurie atsiranda pumpuojant skystį siurbliu. Šie nuostoliai skirstomi į hidraulinius, tūrinius ir mechaninius.

Hidrauliniai nuostoliai vadinami energijos nuostoliai hidraulinės tėkmės pasipriešinimams siurblyje nugalėti. Jie apibūdinami hidrauliniu siurblio naudingumo koeficientu  $\eta_h$ :

$$\eta_h = \frac{H}{H_t} = \frac{H}{H + h_w} ; \quad (46)$$

čia  $H$  – pilnutinis siurblio slėgio aukštis;  
 $H_t$  – teorinis siurblio slėgio aukštis;  
 $h_w$  – hidrauliniai nuostoliai siurblyje.

Tūriniai nuostoliai siurblyje atsiranda dėl dviejų priežasčių: 1) dalis skysčio iš slėgimo zonos grįžta į siurbimo zoną (17 pav.); 2) dalis skysčio nenaudingai nuteka per nesandarumus riebokšliuose ir sujungimuose.



17 pav. Skysčio pratekėjimo iš slėgimo į siurbimo zoną schema

Tūriniai nuostoliai apibūdinami tūriniu naudingumo koeficientu  $\eta_t$ :

$$\eta_t = \frac{Q}{Q_t} = \frac{Q}{Q+q} ; \quad (47)$$

čia  $Q$  – debitas slėgimo vamzdyje;

$Q_t$  - debitas siurbimo vamzdyje;

$q$  – skysčio nuostoliai dėl nesandarumo riebokšliuose ir sujungimuose.

Mechaniniai nuostoliai siurblyje atsiranda dėl besisukančių elementų mechaninės trinties guoliuose bei riebokšliuose, dėl išorinių siurbliaračio paviršių trinties į skystį. Šie nuostoliai apibūdinami mechaniniu naudingumo koeficientu  $\eta_m$ :

$$\eta_m = \frac{P_H}{P_s} = \frac{P_s - P_m}{P_s} ; \quad (48)$$

čia  $P_H$  – hidraulinė galia, kuri lygi  $P_s - P_m$ ;

$P_m$  – mechaniniai galios nuostoliai;

$P_s$  – siurblio galia.

Bendrasis siurblio naudingumo koeficientas  $\eta$  yra:

$$\eta = \eta_h \eta_t \eta_m. \quad (49)$$

Siurblio naudingumo koeficientas kinta nuo 0,7 iki 0,92 (mažesnės reikšmės – mažiems siurbliams), o skirtingų kategorijų naudingumo koeficientai yra tokie:

$$\eta_h = 0,75 \dots 0,95;$$

$$\eta_t = 0,95 \dots 0,99;$$

$$\eta_m = 0,9 \dots 0,97.$$

Siurblio variklio galia  $P_v$  turi būti didesnė už siurblio galią ( $P_v > P_s$ ). Ji nustatoma pagal formulę:

$$P_v = kP_s = \frac{k\gamma QH}{1000\eta} \text{ kW}; \quad (50)$$

čia  $k$  – variklio galios atsargos koeficientas (1,05...2,0).

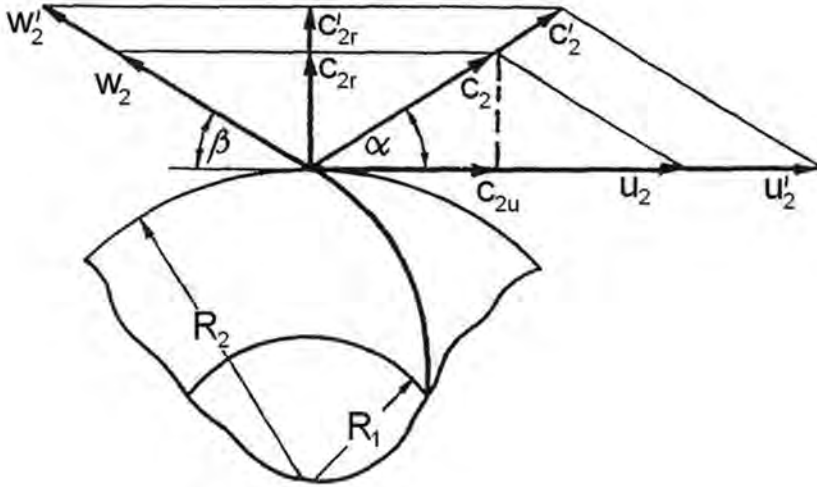
Jei variklis ir siurblys jungiami diržine arba kitokia pavara, tai:

$$P_v = \frac{kP_s}{\eta_p} \text{ kW}; \quad (51)$$

čia  $\eta_p$  – pavaros naudingumo koeficientas.

### 1.13. Siurblio darbo parametrų priklausomybė nuo apsisukimų dažnio

Apsisukimų dažnio keitimas yra vienas iš siurblių darbo parametrų reguliavimo būdų. Keičiant apsisukimų dažnį  $n$ , menčių kampai  $\alpha$ ,  $\beta$  lieka pastovūs, o greičių vektoriai proporcingi apsisukimų dažniui, todėl trikampiai tarp greičių vektorių yra panašūs (18 pav.). Nustatysime, kaip priklauso pagrindiniai siurblio darbo parametrai nuo apsisukimų dažnio.



18 pav. Greičių vektorių lygiagretainiai, skysčiui ištekant iš siurbliaračio

Jei apsisukimų dažnis kinta nuo  $n$  iki  $n'$ , tai darbo parametrai: našumas, pilnutinis slėgio aukštis, galia, esant sukiamams  $n$ , – atitinkamai yra  $Q$ ,  $H$ ,  $P$  ir esant sukiamams  $n'$  –  $Q'$ ,  $H'$ ,  $P'$ .

Pagal greičių lygiagretainių panašumo požymius galima užrašyti:

$$\frac{u_2}{u_2'} = \frac{c_2}{c_2'} = \frac{w_2}{w_2'} = \frac{c_{2r}}{c_{2r}'},$$

arba

$$\frac{u_2}{u_2'} = \frac{\pi D_2 n 60}{60 \pi D_2 n'} = \frac{n}{n'}.$$

Be to,  $\frac{Q}{Q'} = \frac{\pi D_2 b_2 c_{2r} \cdot \eta_t}{\pi D_2 b_2 c_{2r}' \cdot \eta_t} = \frac{c_{2r}}{c_{2r}'}$ , nes  $\eta_t = \eta_t'$ .

Naudingumo koeficientas  $\eta$  lieka pastovus, kai sukiai  $n$  keičiasi ne daugiau kaip 50%.

$$\text{Todėl } \frac{Q}{Q'} = \frac{n}{n'}. \quad (52)$$



Pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H$  apskaičiuojamas taip:

$$H = \eta_n \cdot k \frac{u_2 c_2 \cos \alpha}{g}.$$

Tada

$$\frac{H}{H'} = \frac{\eta_n \cdot k \cdot u_2 c_2 \cos \alpha_2}{\eta_n' k' u_2' c_2' \cos \alpha_2}. \quad (53)$$

Kadangi  $\frac{u_2}{u_2'} = \frac{c_2}{c_2'} = \frac{n}{n'}$  ir  $\eta_n = \eta_n'$  ir  $k = k'$ , todėl

$$\frac{H}{H'} = \left( \frac{n}{n'} \right)^2. \quad (54)$$

Siurblio galia proporcinga našumui  $Q$  ir slėgio aukščiui  $H$ ; kai  $\eta = \eta'$ ,

$$\frac{P}{P'} = \left( \frac{n}{n'} \right)^3. \quad (55)$$

Formulės 52, 54, 55 vadinamos išcentrinių siurblių proporcingumo lygtimis (formulėmis).

#### **1.14. Išcentrinių siurblių panašumo dėsniai. Greitaigiškumo koeficientas**

Konstruojant siurblius plačiai naudojami siurblių panašumo dėsniai. Siurbliaračiai gali būti panašūs geometriškai ir kinematiškai. Siurbliaračiai geometriškai panašūs tada, kai jų atitinkami matmenys proporcingi (siurbliaračio išorinis skersmuo  $D_2$ , tarpmentinių kanalų plotis  $b_2$ , menčių kreivumo spindulys  $R_m$ ). Kinematinį panašumą apibūdina vienos greičių vektorių kryptys atitinkamuose taškuose. Jeigu natūralaus dydžio siurblio matmenis ir darbo parametrus pažymėsime taip: išorinis siurbliaračio skersmuo  $D_n$ ; sūkliai  $n_n$ , pilnutinis siurblio slėgio aukštis  $H_n$ , našumas  $Q_n$ , galia  $P_n$ , o modelinio siurbliaračio atitinkamai –  $D_m$ ,  $n_m$ ;  $H_m$ ,  $Q_m$ ,  $P_m$ , tai, pagal 54 formulę ir žinant, kad  $c_2$  ir  $u_2$  proporcingi siurbliaračių skersmenims  $D_2$ , o  $\eta_t = \eta_t'$ , galima parašyti

$$\frac{H_n}{H_m} = \left( \frac{n_n}{n_m} \right)^2 \left( \frac{D_n}{D_m} \right)^2. \quad (56)$$

Debitas  $Q$  proporcingas tėkmės už siurbliaračio skerspločiui ir greičiui  $c_{2r}$ . Geometriškai panašių siurbliaračių skerspločiai proporcingi išorinio siurbliaračio skersmens kvadratui, o greičiai  $c_{2r}$  – išoriniam siurbliaračio skersmeniui. Todėl

$$\frac{Q_n}{Q_m} = \left( \frac{n_n}{n_m} \right) \left( \frac{D_n}{D_m} \right)^3. \quad (57)$$

Kadangi galia yra lygi debito ir pilnutinio siurblio slėgio aukščio sandaugai, tai:

$$\frac{P_n}{P_m} = \left( \frac{n_n}{n_m} \right)^3 \left( \frac{D_n}{D_m} \right)^5. \quad (58)$$

Lygtys 56, 57, 58 vadinamos išcentrinų siurblių panašumo dėsniais. Pagal jas galima tiksliai apskaičiuoti konstruojamo siurblio darbo parametrus (debitą, pilnutinį siurblio slėgio aukštį, galią), žinant modelinio siurblio analogiškus rodiklius. Panašumo dėsniai galioja, jei matmenys skiriasi ne daugiau 2 – 3 kartus (Spruogis, 1991; Rushel, 2002). Siurblių proporcingumo dėsnis yra atskiras siurblių panašumo dėsnio atvejis, kai  $D_m = D_n$ .

Įvairių mentinių siurblių panašumo kriterijus yra siurblio greitaeigiškumo koeficientas  $n_s$ . Greitaeigiškumo koeficientu vadinamas apsisukimų dažnis per minutę tokio etaloninio siurbliaračio, kuris geometriškai panašus į nagrinėjamą siurbliaračią ir, esant slėgio aukščiui  $H = 1,0$  m, išvysto našumą  $Q = 0,075$  m<sup>3</sup>/s. Pagal 56 ir 57 lygtis dviems geometriškai panašioms siurbliaračiams: nagrinėjamam, kurio skersmuo  $D$  ir apsisukimų dažnis  $n$ , ir į jį panašiam etaloniniam, kurio parametrai atitinkamai –  $D_s$  ir  $n_s$ , galima pritaikyti siurblių panašumo lygtis:

$$\frac{1,0}{H} = \frac{n_s^2 D_s^2}{n^2 D^2} \quad \text{ir} \quad \frac{0,075}{Q} = \frac{n_s D_s^3}{n D^3}.$$

Iš pirmosios lygties išreiškę  $D_s$  ir jo reikšmę įrašę į antrąją lygtį bei atlikę matematiškus veiksmus, gauname:

$$n_s = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}; \quad (59)$$

čia  $n$  – apsisukimų dažnis per minutę;

$Q$  – siurblio našumas m<sup>3</sup>/s;

$H$  – pilnutinis siurblio slėgio aukštis.

Pagal greitaeigiškumo koeficientą  $n_s$  siurbliai skirstomi į penkias grupes:

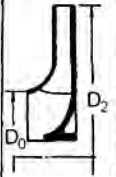
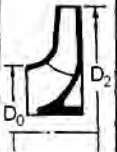
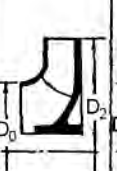
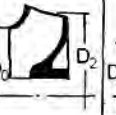

- lėtaeigiai  $n_s = 50 \dots 80$   $D_2/D_0 = 2,5 \dots 3,0$

- normalieji  $n_s = 80 \dots 150$   $D_2/D_0 = 2,0$

- greitaeigiai  $n_s = 150 \dots 350$   $D_2/D_0 = 1,4 \dots 1,8$
- diagonaliniai  $n_s = 350 \dots 500$   $D_2/D_0 = 1,1 \dots 1,2$
- ašiniai  $n_s = 500 \dots 1500$   $D_2/D_0 = 1,0$  (19 pav.);

čia  $D_2$  – išorinis siurbliaračio skersmuo;

$D_0$  – skysčio įtekėjimo į siurbliaratį angos skersmuo.

Mentinių siurblių pavadinimas	Išcentriniai				Ašiniai
	Lėtaeigiai	Normalūs	Greitaeigiai	Diagonaliniai	
Greitaeigiškumo koeficientas	$50 < n_s < 80$	$80 < n_s < 150$	$150 < n_s < 350$	$350 < n_s < 500$	$500 < n_s < 1500$
Siurbliaračio eskizas					
Siurbliaračio matmenų santykiai	$\frac{D_2}{D_0} = 2,5 \dots 3$	$\frac{D_2}{D_0} = 2,0$	$\frac{D_2}{D_0} = 1,4 \dots 1,8$	$\frac{D_2}{D_0} = 1,1 \dots 1,2$	$\frac{D_2}{D_0} = 1,0$
Menčių forma	Cilindrinė	Cilindrinė-erdvinė	Erdvinė	Erdvinė	Erdvinė

19 pav. Siurbliaračio konstrukcijos priklausomybė nuo greitaeigiškumo koeficiento

### 1.15. Išcentrinių siurblių našumo reguliavimo būdai

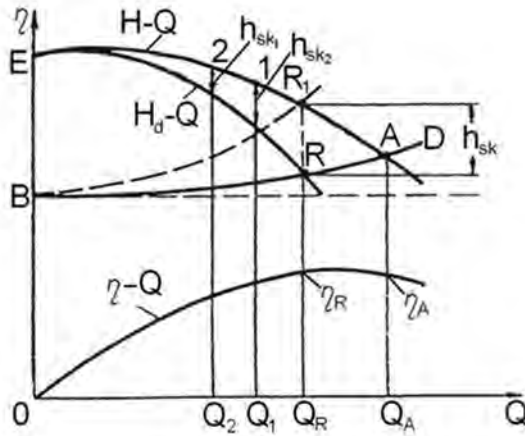
Išcentrinių siurblių našumą galima reguliuoti trimis pagrindiniais būdais:

- 1) keičiant vamzdyno charakteristiką;
- 2) keičiant siurbliaračio apsisukimų dažnį;
- 3) mažinant išorinį siurbliaračio skersmenį  $D_2$ .

1. Keisti vamzdyno charakteristiką panaudojant papildomus hidraulinius pasipriešinimus neekonomiška. Taip galima tik mažinti debitą  $Q$ , bet dėl paprastumo šis būdas dažnai taikomas. Keisti vamzdyno charakteristiką galima keliais būdais:

- a) droseliuojant skysčio tėkmę slėgio vamzdyne;
- b) permetant dalį pumpuojamo skysčio iš slėgimo atgal į siurbimo vamzdį;
- c) į siurbimo vamzdį įleidžiant oro.

Slėgimo vamzdžio droseliavimas – labiausiai paplitęs siurblio debito reguliavimo slėgimo vamzdyne įmontuota sklende būdas: laipsniškai ją uždarančios didėja hidrauliniai pasipriešinimai, mažėja pumpuojamo skysčio debitas. Grafiškai siurblio režimą patogiau nustatyti naudojantis droseline charakteristika (20 pav.).



20 pav. Siurblio droselinė charakteristika

Vamzdyno charakteristikoje, kurioje darbo taškas atitinka maksimalų debitą duotoje sistemoje, pažymimas norimas gauti debitas  $Q_R$ . Per tašką  $Q_R$  einanti vertikalė kerta vamzdyno charakteristiką taške R ir siurblio H-Q taške  $R_1$ . Atkarpa  $RR_1$  rodo slėgio aukščio nuostolius sklendėje  $h_{sk}$ . Kadangi siurblio patikslintai charakteristikai  $H_d - Q$  išbrėžti reikia kelių taškų, apskaičiuojame  $h_{sk1}$  ir  $h_{sk2}$  ir t.t. esant laisvai pasirinktiems debิตams  $Q_1$ ,  $Q_2$  ir t.t.:

$$h_{sk1} = h_{sk} \frac{Q_1^2}{Q_R^2};$$

$$h_{sk2} = h_{sk} \frac{Q_2^2}{Q_R^2};$$

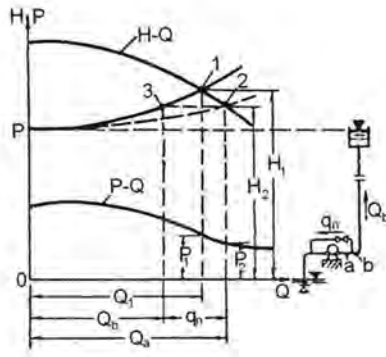
Pažymėję žemyn nuo siurblio H-Q charakteristikos dydžius  $h_{sk1}$  ir  $h_{sk2}$ , gauname droselinę siurblio charakteristiką  $H_d - Q$ . Droselinių charakteristikų gali būti daug – atitinkančių įvairius sklendės pridarymo laipsnius. Kai sklendė atdara visiškai  $H_d - Q$  sutampa su H-Q. Prarasta sklendėje galia ( $\Delta P$ ) reguliuojant droseliavimo būdu apskaičiuojama taip:

$$\Delta P = \frac{\gamma h_{sk} Q_R}{1000 \eta_R}; \quad (60)$$

čia  $\eta_R$  našumą  $Q_R$  atitinkanti naudingumo koeficiento reikšmė.

Kadangi dalis galios prarandama sklendėje, taip reguliuoti siurblio darbą nenaudinga.

Siurblio našumą galima reguliuoti nukreipiant dalį debito iš slėgimo į siurblio vamzdį. Tam siurbimo ir slėgimo vamzdžiai sujungiami trumpa atšaka su sklende (21 pav.). Norint sumažinti debitą nuo  $Q_1$  iki  $Q_B$  reikia, kad atšaka pratekėtų debitas  $q_n$ .



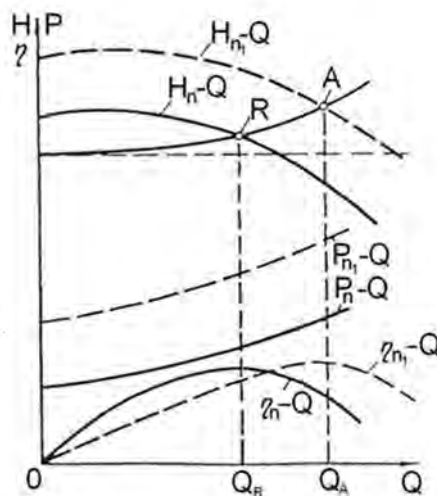
21 pav. Siurblio charakteristika, nukreipiant dalį vandens iš slėgimo į siurbimo vamzdį

Siurblio darbo režimas dėl to žymiai pasikeis: darbo taškui iš padėties „1“ persikėlus į padėtį „2“, bendrasis siurblio debitas padidės nuo  $Q_1$  iki  $Q_a = Q_b + q_n$ , o siurblio slėgio aukštis – nuo  $H_1$  iki  $H_2$ .

Šis siurblių debito reguliavimo būdas ekonominiu (energetiniu) požiūriu nenaudingas, išskyrus greitaeigius išcentrinis ir sukurinius siurblius, kurių galia mažėja didėjant debitui.

Išcentrinių siurblių debitą taip pat galima reguliuoti į siurbimo vamzdį įleidžiant oro. Dėl to padidėja tūriniai nuostoliai, sumažėja tūrinis naudingumo koeficientas  $\eta_t$ , kartu ir bendrasis naudingumo koeficientas  $\eta$ , tačiau šis siurblių debito reguliavimo būdas naudojamas ribotai, nes padidėja siurblio kavitacija.

2. Siurblio debito  $Q$  reguliavimas keičiant apsisukimų dažnį  $n$ , atliekamas naudojant specialius įtaisus (hidraulinės ir elektromagnetinės movas) arba dabartiniu metu dažniausiai naudojant kintamų apsisukimų dažnio variklius – variklius su dažnio keitikliu. Siurblio sūčiai parenkami tokie, kad siurblio H-Q charakteristika kirstų vamzdyno charakteristiką norimą gauti debitą  $Q_R$  atitinkančiame darbo taške R (22 pav.).



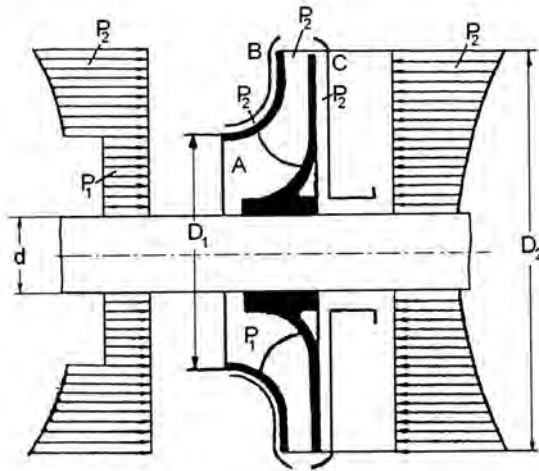
22 pav. Siurblio charakteristika, keičiant siurbliaračio apsisukimų dažnį

Tam sudaroma nauja siurblio charakteristika, kuri gaunama apskaičiuavus siurblio darbo parametrus pagal siurblių proporcingumo formules. Šis siurblių našumo reguliavimo būdas pastaruoju metu plačiai naudojamas. Taip pat šis būdas plačiai taikomas, kai naudojami vidaus degimo varikliai (Vyčius, 1995).

3. Išorinis siurbliaračio skersmuo mažinamas aptekinant siurbliarati. Dėl to proporcingai sumažėja siurblio darbo parametrai. Šis būdas naudojamas tada, kai siurblio darbo parametrus reikia sumažinti nežymiai ir pastoviai. Aptekinto siurbliaračio charakteristikos sudaromos pagal siurblių panašumo formules (56, 57, 58).

### 1.16. Ašinis slėgis

Vienpusio įtekėjimo išcentrinuose siurbliuose, jiems dirbant, atsiranda hidraulinė ašinė jėga, traukianti siurbliarati nuo ašies siurbimo atvamzdžio kryptimi. Pagrindinė ašinės jėgos atsiradimo priežastis – nevienodas priekinio ir užpakalinio diskų plotas (23 pav.).



23 pav. Ašinio slėgio diagramos

Įtekėjimo angoje slėgis  $p_1$  mažesnis negu ištekėjimo angoje  $p_2$  ( $p_1 < p_2$ ). Taigi užpakalinį siurbliaračio diską veikia slėgio jėga:

$$P_u = p_2 \frac{\pi (D_2^2 - d^2)}{4} . \quad (61)$$

Priekinį siurbliaračio diską veikia slėgio jėga:

$$P_p = p_1 \frac{\pi (D_1^2 - d^2)}{4} + p_2 \frac{\pi (D_2^2 - D_1^2)}{4} . \quad (62)$$

Šių jėgų atstojamoji  $P$  veiks skysčio įtekėjimui priešinga kryptimi, nes  $P_u > P_p$ .

$$P = P_u - P_p = (p_2 - p_1) \frac{\pi (D_1^2 - d^2)}{4} \quad (63)$$

Siurbliaračio skersmenų simboliai pažymėti 23 paveiksle. Ašinio slėgio jėga, apskaičiuota pagal formulę, yra truputį padidinta, nes tikrasis slėgis taškuose B ir C yra šiek tiek mažesnis.

Ašinė jėga neigiamai veikia siurblio darbą: perkrauna atraminius guolius, o siurbliaračiui pasislinkus, sukelia jo išorinio paviršiaus trintį į siurblio korpusą, todėl stengiamasi išvengti šios ašinės jėgos.

Yra du būdai ašinę jėgą subalansuoti: hidraulinis ir mechaninis.

Hidrauliškai išlyginant ašinę jėgą, skystis tiekiamas iš dviejų pusių į siurbliarati. Lengviausia tai padaryti dvipusio įtekėjimo siurbliuose.

Vienpusio įtekėjimo siurblyje ašinė jėga subalansuojama, įrengiant tarp užpakalinio disko ir siurblio korpuso specialią, iš visų pusių atskirtą ertmę. Pragręžus apatinėje disko dalyje skylutes A ši ertmė sujungiama su įtekėjimo į siurbliarati anga; taigi slėgis šioje ertmėje iš abiejų pusių vienodas ir lygus  $p_1$  (žiūrėti 17 pav.). Dėl to sumažėja siurblio naudingumo koeficientas  $\eta$  4-6%. Visiškai išlyginti ašinės jėgos hidraulinėmis priemonėmis neįmanoma, todėl tam papildomai naudojamos ir mechaninės priemonės.

Mechaniškai ašinė jėga išlyginama, perduodant ją į atraminį guolį. Energetiniu požiūriu tai gana racionalu, nes mechaniniai nuostoliai guoliuose nedideli, todėl naudingumo koeficientas sumažėja nežymiai, tačiau tai padidina atraminio guolio susidėvėjimą.

## LITERATŪRA

1. Dabužinskas K., Dumbliauskas A., Kusta A. SiurbLIAI ir siurbLINĖS. – V.: Mokslas, 1975. – 278 p.
2. Dabužinskas K. Hidraulika. – V.: Mokslas, 1984. – 320 p.
3. FLYGT Submersible pumps. Edition 1991. – ITT Fluid Technology Corporation, Sweden, 1991 (19 brochures). – 570 p.
4. Hidrotechninė statyba: Metodiniai patarimai/ Sudarė Č. Ramonas – Kaunas- AkademiJA: LŽŪU LC, 2000. – 324 p.
5. Karassik I.J., Krutzsch W.C., Fraser W.H., Messina J.P. Pump handbook. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1986. – 1911 p.
6. Lukianas A. Inžinerinė hidraulika. – V.: Technika, 2001. – 160p.
7. Rushel J. B. Water pumps and pumping systems. – New York: McGraw-Hill, 2002. – 742p
8. Ruplys B. Hidrotechniniai statiniai. – V.: Mokslas, 1988. – 343p.
9. Silke K. Sūkni un sūknu stacijas. – Ryga: Zvaigzne, 1984. – 234 p.
10. Spruogis B. Hidraulinės mašinos ir pavaros. – V.: Mokslas, 1991. – 327 p.
11. Urbonas R. Sausinimas – drenažas. – V.: Petro ofsetas, 1998. – 435 p.
12. Vyčius J., Dumbliauskas A. Metodiniai patarimai siurblių ir siurblinių kontroli- niam darbui rengti. – Kaunas-AkademiJA, 1988. – 27 p.
13. Vyčius J. Siurblys – ūkininko padėjėjas. – Kaunas: Ūkininko patarėjas, 1995. – 45 p.
14. Vyčius J., Zubė V. Siurblinės. Metodiniai patarimai kursiniam ir diplominiam projektavimui. – Kaunas- AkademiJA, 2000. – 9 p.
15. Vyčius J., Zubė V. Vandentiekio ir kanalizacijos siurblinių kursinio projektavimo metodiniai patarimai. – Kaunas-AkademiJA, 1998. – 20 p.
16. Рычагов В.В. и др. Проектирование насосных станций и испытание установок. – М.: Колос, 1982. – 320 с.
17. Чабаетский В.Ф. и др. Насосы и насосные станции. – М.: ВО „Агропромиздат”, 1989. – 416 с.





R. KUSTIENĖ

# HIDROELEKTRINĖS

II DALIS

# 1. HIDROENERGETINIAI IŠTEKLIAI

## 1.1. Gamtinių energijos šaltinių struktūra ir ištekliai

Energetiniais ištekliais vadinami gamtiniai energijos šaltiniai, transformuojami į įvairias energijos formas, kurios naudojamos gamybiniuose procesuose, transporte, buityje.

Visus energijos šaltinius galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes:

- 1) atsinaujinantys energijos šaltiniai;
- 2) neatsinaujinantys energijos šaltiniai.

Atsinaujinantys energijos šaltiniai yra gamtos ištekliai, kurių atsiradimą ir atsinaujinimą sąlygoja gamtos procesai. Jų naudojimas nedidina CO<sub>2</sub> emisijų į aplinką.

Atsinaujantiems arba alternatyviems energijos šaltiniams priklauso (Renewable..., 2004; www.energyportal.eu):

- 1) saulės energija;
- 2) vėjo energija;
- 3) vandens energija;
- 4) biomasės energija;
- 5) geoterminė energija.

Neatsinaujantiems arba tradiciniams energijos šaltiniams priklauso:

- 1) nafta;
- 2) akmens anglis;
- 3) dujos;
- 4) branduolinis kuras.

Tradiciniai energijos šaltiniai pasaulyje pasiskirstę gana netolygiai, pvz., naftos gavyba sutelkta 6 proc. pasaulio valstybių. Naftos ištekliai nėra beribiai. Jiems senkant galima prognozuoti neišvengiamus konfliktus ne tik tarp atskirų valstybių, bet ir tarp ekonominių regionų. Naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius, galima būtų bent iš dalies panaikinti tuos netolygumus tarp valstybių.

Tradicinių energijos šaltinių naudojimas daro didelę žalą aplinkai, nes juos deginant į aplinką patenka daug kenksmingų medžiagų.

Atsinaujinančių šaltinių energetikos plėtojimas svarbus bent dviem požiūriais:

- 1) aplinkosauginiu;
- 2) socialiniu.

Aplinkosauginiu požiūriu alternatyvūs energijos šaltiniai yra ekologiški, nes juos naudojant neišmetamos į aplinką kenksmingos medžiagos, mažėja „šiltnamio“ efekto galimybė ir kt. Socialiniu – steigiamos mažos įmonės, tolygiau išsidėsčiusios teritorijoje, atsiranda naujų darbo vietų.

Dėl minėtų priežasčių atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas turėtų didėti. Pagal Europos Sąjungos (ES) direktyvos 2001/77/EC „Elektros energijos gamybos, naudojant atsinaujinančius energijos išteklius, vidaus elektros rinkoje skatinimas“ reikalavimus turi būti siekiama, kad iki 2010 m. atsinaujinančių energijos išteklių dalis Lietuvos kuro balanse sudarytų 12 % (Aplinkos..., 2003).

Lietuvoje iš atsinaujinančių energijos šaltinių perspektyviausi yra šie:

- 1) biomasės energija;
- 2) vandens energija.

Esamas ir planuojamas atsinaujinančių energijos išteklių vartojimas Lietuvoje bei ekonominis jų vartojimo potencialas pateikiami 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Esamas ir planuojamas atsinaujinančių energijos išteklių vartojimas, ekonominis jų vartojimo potencialas (www.avei.lt)

Atsinaujinantieji energijos ištekliai	Vartojimas TWh			Potencialas TWh/metus
	2006 m.	2010 m.	2020 m.	2020 m.
Mediena	8,46	9,50	9,80	9,80
Šiaudai	0,019	0,50	1,50	3,59
Komunalinės atliekos	0,00	0,00	0,46	0,80
Sąvartynų dujos	0,023	0,14	0,28	0,10
Biodujos				0,30
Geoterminė energija	0,0097	0,11	0,11	0,80
Mažos hidroelektrinės	0,397	0,46	0,58	0,50
Didelės hidroelektrinės				1,00
Saulės energija	0,00	0,00	0,00	1,30
Vėjo energija	0,0137	0,29	0,85	0,85
Biodegalai	0,28	0,72	0,72	2,25
<b>Iš viso:</b>	<b>9,2024</b>	<b>11,72</b>	<b>14,3</b>	<b>21,29</b>

Pastaba. TWh = 10<sup>9</sup> kWh.

Taigi Lietuvoje didžiąją dalį naudojamų ir perspektyvoje galimų naudoti atsinaujinančių energijos išteklių sudaro biomasė, t.y. mediena, šiaudai, biodegalai ir kt. Antrąją, nors ir gerokai mažesnę poziciją, užima vandens arba hidroenergija. Perspektyvoje panašią kaip ir vandens energijos poziciją turėtų užimti saulės, vėjo ir geoterminė energijos, kurios šiuo metu dar nenaudojamos (saulės energija) arba naudojamos labai mažai.

## 1.2. Hidroenergetikos reikšmė bendroje energijos šaltinių struktūroje

Norint naudoti vandens išteklius energetikai, reikia dviejų pagrindinių parametru, t.y. tam tikro vandens debito Q ir vienokiu ar kitokiu būdu sudaryto ir sukoncentruoto tam tikroje vietoje slėgio aukščio H. Taigi nuo šių dviejų parametru iš esmės priklauso galimybė vandens šaltinį (upę, tvenkinį) panaudoti energetikai.

Skirtingų pasaulio šalių ir valstybių vandens išteklių naudojimas energetikai labai nevienodas. Valstybės, kuriomis teka vandeningos upės ir kurių kalnuotas reljefas, paprastai turi daug hidroenergetinių išteklių, ir atvirkščiai – tos, kurių reljefas lygus, o upės ne tokios vandeningos, hidroenergetinių išteklių turi mažai. Todėl hidroenergetikos reikšmė bendroje energijos šaltinių struktūroje skirtingose šalyse ir valstybėse yra labai nevienoda. Pvz., Norvegija net daugiau kaip 99 % visos reikalingos elektros energijos pasigamina hidroelektrinėse, Anglija – tik apie 3 %. Pasaulyje bendra hidroelektrinių galia yra apie 740 GW ir jos kasmet pagamina apie 2770 TWh arba apie 19 % visos reikalingos elektros energijos. Europos Sąjungoje hidroelektrinės pagamina apie 11 % visos elektros energijos (Novak et al., 2007).

Lietuvoje 2006 m. visos HE (be Kruonio HAE) pagamino 3,5 % visos pagamintos elektros energijos (www.ukmin.lt).

### 1.3. Pasaulio ir Lietuvos hidroenergetiniai ištekliai

Tam tikros teritorijos paviršiaus nuotėkio energiją įprasta vadinti *hidroenergetiniais ištekliais*, kurie savo ruožtu skirstomi į potencinius ir kinetinius. Vandens masėje sukaupta energija vadinama potencine, o tekančio vandens energija – kinetine (Jablonskis ir Lasinskas, 1962).

Paprastai potenciniai hidroenergetiniai ištekliai apskaičiuojami pagal upės vidutinį daugiamečių debitą ir jos kritimo aukštį, t.y. aukščių skirtumą tarp jos ištakų ir žiočių. Hidroenergetiniai ištekliai išreiškiami galios arba galimos pagaminti energijos vienetais, t.y. vatais (W), kilovatais (1 kW = 10<sup>3</sup> W), megavatais (1MW = 10<sup>6</sup> W) arba vatvalandėmis (Wh), kilovatvalandėmis (1 kWh = 10<sup>3</sup> Wh), megavatvalandėmis (1 MWh = 10<sup>6</sup> Wh), gigavatvalandėmis (1 GWh = 10<sup>9</sup> Wh), teravatvalandėmis (1 TWh = 10<sup>12</sup> Wh) ir t.t.

Kai kurių žemynų hidroenergetiniai ištekliai skaičiuojami šimtais tūkstančių MW, o pasaulio – milijonais MW. Pasaulio žemynų hidroenergetiniai ištekliai pateikiami 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Pasaulio hidroenergetiniai ištekliai (Warnick, 1984)

Žemynas, šalis	Hidroenergetiniai ištekliai MW	% nuo bendrų išteklių
Azija	610100	28
Pietų Amerika	431900	20
Afrika	358300	16
Šiaurės Amerika	356400	16
Buvusi SSSR	250000	11
Europa	163000	7
Okeanija	45000	2
<b>Pasaulyje</b>	<b>2194700</b>	<b>100</b>

Lietuvos upių hidroenergetiniai ištekliai vertinti ne vieną kartą. Pirmasis šio darbo ėmėsi žymus Lietuvos hidrologas prof. S.Kolupaila (1892-1964). Įvairiu laiku apskaičiuoti Lietuvos upių hidroenergetiniai ištekliai pateikiami 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Lietuvos upių hidroenergetiniai ištekliai, apskaičiuoti įvairiais metais (Jablonskis ir kt., 1996)

Autorius ir šaltinis	Metai	Galia tūkst. kW	Pastabos
S.Kolupaila	1922	300	Vidutinė AJ
		160	Minimali AJ
		750	Maksimali AJ
S.Kolupaila	1929	240	AJ
S.Kolupaila	1939	267,4	6 mėn. trukmės
		195,7	9 mėn. trukmės
	1946	56	Paimta iš TSRS mažųjų upių hidroenergijos duomenų
Hidroenergoprojekt	1950	118,6	Lietuvos mažosios upės

Autorius ir šaltinis	Metai	Galia tūkst. kW	Pastabos
Fizikos-technikos institutas	1952	280	119 upių (be Nemuno ir Neris) potencinė galia
M.Lasinskas	1953	260	Mažosios upės
J.Jablonskis	1962	582,0	378 upių, kurių $F \geq 50 \text{ km}^2$ , potencinė galia
M.Lasinskas		25	Smulkūs upeliai
		78	Žemės paviršiaus šlaitai
Lietuvos energetikos institutas	1994	585,1	Pateikiama 477 upių, kurių $F \geq 50 \text{ km}^2$ , potencinė galia šalies teritorijos ribose

Palyginti tarpusavyje 1.3 lentelės duomenis sunku, nes šie, ypač ankstyvieji, tyrimai buvo atlikti turint negausią medžiagą apie upių nuotėkį bei apėmė skirtingą upių skaičių. Be to, skyrėsi ir skaičiavimo metodikos. Žinoma, tiksliausi paskutiniųjų tyrimų rezultatai. Taigi Lietuvos upių hidroenergetiniai ištekliai yra 585,1 tūkst. kW arba 585,1 MW. Palyginimui galima pasakyti, kad Kauno HE galia yra 100,8 MW, taigi visus Lietuvos hidroenergetinius išteklius galėtų išnaudoti maždaug šešios Kauno hidroelektrinės.

Lietuvoje yra tik 2 upės (Nemunas ir Neris), kurių kiekvienos hidroenergetiniai ištekliai didesni nei 100 tūkst. kW (didelė energetinė vertė), 40 upių – tarp 100 ir 1 tūkst. kW (vidutinė vertė) ir 430 upių – mažiau nei 1 tūkst. kW (maža vertė). Nemunas ir Neris yra didžiosios, o visos kitos upės – mažosios hidroenergetikos šaltiniai.

Įvairios hidroenergetinės vertės upių galia ir galimos pagaminti energijos kiekiai pateikiami 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Įvairios hidroenergetinės vertės upių galia P ir energija E (Burneikis ir Jablonskis, 1998)

Hidroenergetinė vertė	Upių skaičius	Galia kW	% nuo bendros galios	Energija mln.kWh		
				teorinė	reali	% nuo bendros realios energijos
1. Didelė						
Nemunas	1	239751	41,0	2101	1471*	55,6
Neris	1	106423	18,2	933	653*	24,7
Abi drauge:	2	346174	59,2	3034	2124*	80,3
2. Vidutinė	40	164815	28,2	1445	361**	13,6
3. Maža	430	74115	12,6	650	162**	6,1
<b>Iš viso:</b>	<b>472</b>	<b>585104</b>	<b>100</b>	<b>5129</b>	<b>2647</b>	<b>100</b>

\* Realinė energija imta 0,70 teorinės.

\*\* Realinė energija imta 0,25 teorinės.

Taigi vidutinės ir mažos hidroenergetinės vertės upių, kurios gali būti panaudotos mažosios hidroenergetikos plėtrai, teorinė hidrogalia yra 238,9 tūkst. kW, arba 40,8 % visu šalies upių hidrogalios potencialo.

Realinė arba techniškai galima panaudoti hidroenergija yra mažesnė nei teorinė potencinė hidroenergija. Manoma, kad mažesnių upių teorinės hidroenergijos galima panaudoti tik 25 %, didesnių – daugiau, o kiek – priklauso nuo konkrečių sąlygų. Kauno HE

duomenimis šis santykis yra 0,70. Šiuo santykiu remtasi apskaičiuojant Nemuno ir Neries realią hidroenergjia. Visų šalies teritorija arba valstybės siena tekančių upių (pastarųjų imta pusė hidroenergjios) realūs hidroenergjios ištekliai yra 2,65 mlrd.kWh.

Taigi optimistiškai realūs hidroenergjios ištekliai sudaro daugiau nei pusę teorinių potencinių išteklų. Juos palyginus su Lietuvoje gaminama elektros energija (2006 m. pagaminta 11,4 mlrd. kWh), gaunama, kad visos hidroelektrinės galėtų pagaminti apie 23 % visos šaliai reikalingos elektros energijos.

2006 m. Lietuvoje pagaminta 11,4 mlrd.kWh elektros energijos. Visose hidroelektrinėse (su Kruonio HAE) pagaminta 7,0 %, iš jų Kauno HE - 3,0 %, o mažosiose HE - 0,5 % elektros energijos. Taigi 2006 m. panaudota apie 15 % realių hidroenergetinių išteklų, o tai rodo, kad hidroenergetikai plėtoti yra labai didelis rezervas (www.le.lt).

#### **1.4. Hidroenergetikos vystymosi istorija**

Vanduo kaip energijos šaltinis naudotas jau gilioje senovėje. Istorikai teigia, kad vandens malūnų buvo senovės Rytų šalyse, antikinėje Graikijoje ir Romos imperijoje (Lietuvos..., 1982). Apie vandens malūnus žinojo ir baltų gentys.

Didžiulį vaidmenį vandens energijos panaudojime atliko vandens ratas, t.y. paprasčiausias hidraulinis variklis, vandens tėkmės energiją verčiantis mechanine energija. Į vandens ratą vanduo galėjo būti tiekiamas iš viršaus, per rato vidurį ir rato apačioje. Priklausomai nuo vandens tiekimo kito naudingumo koeficientas, nors apskritai, vandens ratų jis buvo labai mažas, t.y. apie 0,3 – 0,5. Todėl kartu su technikos plėtra atsirado tobulesnių hidraulinių variklių poreikis. 1750 m. vokiečių mokslininkas J. Zėgneris (Johann Andreas von Segner 1704–1777) pagamino pirmąją aktyvinę hidraulinę turbiną, o šveicarų fizikas L. Oileris (Leonhard Euler 1707–1783) 1751 m. išdėstė hidraulinės turbino teorijos pagrindus. 1827 m. prancūzas B. Fiurneironas (Benoît Fourneyron 1802–1867) išrado pirmąją reaktyvinę turbiną.

Pirmosios hidroelektrinės buvo pastatytos 1876–1881 m. Vokietijoje (Laufene) ir Anglijoje (Greisaide), tačiau jų galia tesiekė vos kelis šimtus vatų.

Pirmosios rašytinės žinios apie Lietuvos hidroenergetiką yra iš XIV a. Didieji Lietuvos kunigaikščiai savo raštuose mini upes, ežerus, tvenkinius ir malūnus. Yra žinių, jog 1256 m. Klaipėdos krašte prie Danės buvo pastatytas vandens malūnas. 1841 m. statistikos žiniose pateikta, kad Lietuvos gubernijoje buvo 532 hidrojėgainės ir 161 vėjo malūnas. 1843 m. Lietuvos gubernija buvo padalinta į Vilniaus ir Kauno gubernijas. Kauno gubernijos statistikoje paskelbta, kad 1861 m. čia buvo 234 vandens, 155 vėjo, 36 gyvulių jėgos ir tik 1 (Kaune) garo varomos jėgainės. Kauno apskrityje buvo 51 vandens malūnas ant Dubysos, Šušvės, Karklės, Varpės ir kt. upių.

1900 m. Lietuvoje Sukončiuose (Virvyčios upė) buvo pradėta naudoti vandens energija elektrai gaminti (generatorių suko vandens ratas). Ši elektrinė vėliau buvo ne kartą rekonstruota, tebeveikia ir dabar. 1910 m. pastatyta pirmoji hidroelektrinė Anykščiuose. 1922 m. pastatyta 140 kW galios Tauragės HE prie Jūros upės, 1924 m. – 150 kW Stonaičių HE prie Minijos, 1935 m. – 120 kW Kalvarijos HE prie Šešupės ir kt.

1935 m. iš 309 elektrą gaminusių elektrinių 96 buvo hidroelektrinės ir mišrios hidrojėgainės, kuriose buvo įrengti 1432,2 kW bendros galios 102 hidroagregatai. Visi jie pagamino tik 835,6 tūkst. kWh elektros energijos, kas tesudarė apie 2,5 % (panašiai kaip ir dabar) Lietuvoje pagamintos elektros energijos kiekio (33,3 mln. kWh).

Pokario laikotarpiu buvo statomos arba rekonstruojamos iš malūnų hidroelektrinės. 1958 m. Lietuvoje veikė 104 mažosios HE, kurių bendra galia buvo 8760 kW, jos gamino 19 mln. kWh elektros energijos per metus. 1955 m. pradėta, o 1960 m. baigta statyti didžiausia Lietuvoje Kauno HE. Po 1958 m. pastatytos Aukštadvario, Bagdononių, Antalieptės, Motiejūnų, Godingos, Padysnio, rekonstruotos Sukončių ir Dovinės mažosios HE.

Nuo 1954 m. leista elektrifikuoti kaimo vietas iš valstybinių elektros tinklų, todėl buvo atsisakyta vietinių mažųjų HE kaip neefektyvių. 1961 m. pastatyta paskutinė Godingos 800 kW galios derivacinė HE. 1959 m. pradėtos ir 1982 m. baigtos likviduoti mažosios HE. Iki nepriklausomybės atkūrimo 1990 m., be Kauno HE, Lietuvoje dar buvo likę 12 veikiančių mažųjų HE (Burneikis ir Jablonskis, 1998; Jablonskis ir kt., 1996; Kustienė ir Poška, 1997).

Po 1990 m. vėl buvo sugrįžta prie mažųjų HE statybos. 1996 m. prie Varduvos upės atstatyta Renavo HE, prie esamo tvenkinio pastatyta Juodeikių HE, 1998 m. baigta Sukončių HE (Virvyčios upė) rekonstrukcija ir kt. Dauguma mažųjų HE pastatyta prie esamų tvenkinių ir daugumos jų galia yra apie keli šimtai kW. Hidroelektrinių, kurių instaliuota galia yra per 1000 kW (be Kauno HE), šiuo metu Lietuvoje yra 5: Kavarsko HE – 1000 kW, Angirių HE – 1300 kW, Juodeikių HE – 1018 kW, Balskų HE – 2914 kW, Antalieptės HE – 3220 kW. 2007 m. pradžioje Lietuvoje veikė 82 mažosios HE, kurių bendra instaliuota galia buvo 25,3 tūkst. kW.

Per 2006 m. visos mažosios HE pagamino 61,2 GWh elektros energijos, Kauno HE - 337 GWh, o iš viso Lietuvoje buvo pagaminta 11410 GWh. Taigi, dabar hidroenergetika bendroje elektros energijos gamyboje sudaro apie 3,5 % ir panaudojama apie 15 % (nuo 2647 GWh) realių hidroenergetinių išteklių ([www.avei.lt](http://www.avei.lt)).



## 2. HIDROENERGETIKOS PAGRINDAI

### 2.1. Bendras supratimas apie vandens energiją

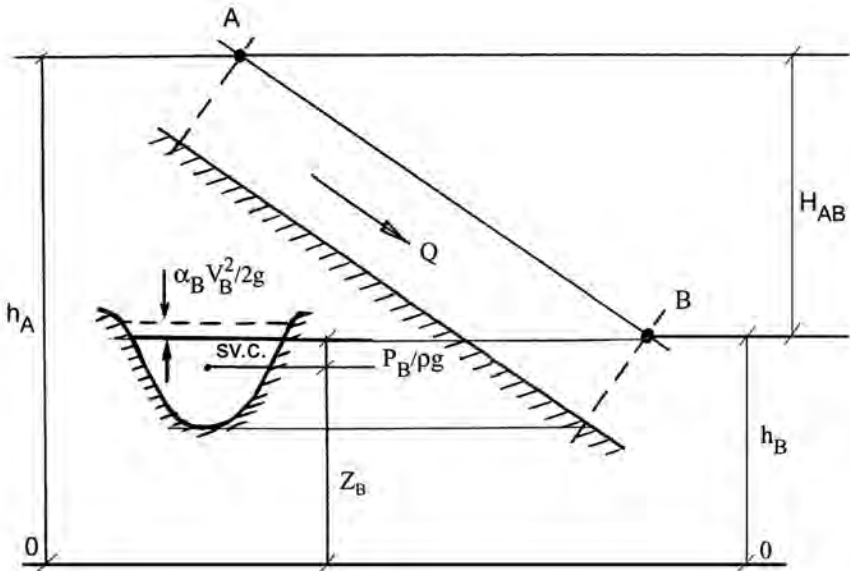
Dėl saulės energijos ir žemės traukos jėgos vanduo žemės paviršiuje visą laiką juda. Išgaravęs iš vandenynų ir jūrų, vanduo, garo pavidalu, oro srovių pernešamas į sausumą ir čia lietaus, sniego ar ledu formose vėl iškrenta į žemės paviršių. Dalis kritulių vėl išgaruoja, dalis susigeria į gilesnius žemės sluoksnius, dalis nuteka žemės paviršiumi į griovelius, griovius, upelius, upes, į jūras ir vandenynus. Procesas nuolat kartojasi ir taip vyksta vandens apytaka.

Sausumos paviršius visada aukštesnis už jūrų ar vandenynų lygį, todėl ir vanduo, tekėdamas jos paviršiumi, kaip ir kiekvienas kitas pakeltas daiktas, veikiamas žemės traukos jėgos, turi potencinę energiją. Potencinė energija yra sukaupta didelėse vandens masėse.

Kita vandens energijos rūšis yra kinetinė energija, kuri pasireiškia vandeniui tekant. Dalis šios energijos eikvojama vandens masę bei nešmenis pernešant žemyn, nugalint vagos krantų bei dugno trintį, keičiant vagos profilį ir kt. Visa tai dažnai yra nenaudingas ir net žalingas darbas. Tačiau tinkamai suvaldyta vandens tėkmė gali atlikti naudingą darbą. Kol vanduo teka vien žemės paviršiumi, jo atliekamas darbas yra nežymus. Todėl tik didesnėse vagose, sudarius slėgio aukštį, t.y. vandens lygių aukščių skirtumą, vanduo gali būti panaudotas hidroenergetikos tikslams.

### 2.2. Vandens srauto energija ir galia

Tam tikro upės ruožo energijai ir galiai nustatyti naudojamas pagrindinis hidrodinamikos dėsnis – Bernulio lygtis. Tam tikslui sudaroma supaprastinta nagrinėjamo upės ruožo schema (2.1 pav.).



2.1 pav. Upės ruožo schema

Nagrinėjame upės ruožo pažymimi du pjūviai – A ir B ir išskiriama upės atkarpa AB. Upės atkarpos AB energijai ir tėkmės galiai nustatyti rašoma Bernulio lygtis lyginamajai energijai, t.y. energijai tos vandens masės, kurios svoris lygus 1 N (niutonui).

Šiai atkarpai Bernulio lygtį galima parašyti taip:

$$z_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{\alpha_B v_B^2}{2g} + e_{AB}, \quad (2.1)$$

čia  $z_A$  ir  $z_B$  - pjūvių A ir B svorio centrų atstumas nuo palyginimo plokštumos m;

$p_A$  ir  $p_B$  - slėgis pjūvių A ir B svorio centruose Pa;

$\rho$  - vandens tankis kg/m<sup>3</sup>;

$v_A$  ir  $v_B$  - vidutinis vandens greitis pjūviuose A ir B m/s;

$g$  - laisvo kritimo pagreitis m/s<sup>2</sup>;

$\alpha_A$  ir  $\alpha_B$  - Koriolio koeficientas, įvertinantis netolygų greičių pasiskirstymą pjūviuose A ir B.

Energetine prasme dydžiai  $z$  įvertina lyginamąją padėties potencinę energiją,

$\frac{p}{\rho g}$  - lyginamąją slėgio energiją, o  $z + \frac{p}{\rho g} = e$  yra lyginamoji suminė potencinė

energija, pastovi visiems pjūvio taškams, nes tiek, kiek padidėja  $z$ , tiek sumažėja  $\frac{p}{\rho g}$ .

Todėl vandens paviršiui  $\frac{p}{\rho g} = 0$ , o  $z = h$ .

Dydis  $\frac{\alpha v^2}{2g}$  - pjūvio lyginamoji kinetinė energija.

Taigi (2.1) lygtį galima perrašyti taip:

$$h_A + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} = h_B + \frac{\alpha_B v_B^2}{2g} + e_{AB}. \quad (2.2)$$

Tada

$$e_{AB} = h_A - h_B + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} - \frac{\alpha_B v_B^2}{2g}. \quad (2.3)$$

Kinetinių energijų skirtumas gamtinėmis sąlygomis paprastai yra nedidelis ir į jį galima neatsižvelgti. Tada

$$e_{AB} = h_A - h_B = H_{AB}, \quad (2.4)$$

čia  $H_{AB}$  – upės atkarpos AB vandens lygių skirtumas.

Norint nustatyti pilną tėkmės energiją, būtina įvertinti tėkmės vandeningumą, kuri apibūdina vandens debitas  $Q$ ,  $m^3/s$ . Per tam tikrą laiko tarpą  $t$  atkarpoje AB per pjūvį A pratekės vandens tūris  $V = Q \cdot t$  ir toks pat vandens tūris pratekės per pjūvį B. Šio vandens tūrio svoris yra  $G = Qt\rho g$ , o pilna energija, išreikšta džauliais (J), išsiskyrusi atkarpoje AB, yra:

$$e_{AB} = h_A - h_B = H_{AB} . \quad (2.5)$$

Galia yra energija per laiko vienetą:

$$P_{AB} = \frac{E_{AB}}{t} = \frac{H_{AB} Q \rho g t}{t} = H_{AB} Q \rho g \text{ W}. \quad (2.6)$$

Vatas yra labai mažas galios vienetas, todėl energetikoje naudojami stambesni galios vienetai – kilovatai ( $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ ) ir megavatai ( $1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW} = 10^6 \text{ W}$ ).

Išreiškus  $P_{AB}$  kilovatais ir įstačius  $g$  ir  $\rho$  skaitines reikšmes, švariam vandeniui gaunama tokia galios formulė:

$$P_{AB} = 1000 \cdot 9,81 \cdot Q H_{AB} \text{ W}, \quad (2.7)$$

arba

$$P_{AB} = 9,81 \cdot Q H_{AB} \text{ kW}. \quad (2.8)$$

Taigi, nagrinėjamo upės ruožo teorinė galia priklauso nuo dviejų pagrindinių parametru – upės debito ir slėgio aukščio.

### 2.3. Energijos išdirbis

Hidroelektrinės produkcija yra jos pagamintas tam tikras elektros energijos kiekis, kitaip dar vadinamas energijos išdirbiu. Hidroelektrinės išdirbis arba pagamintos elektros energijos kiekis apskaičiuojamas taip:

$$E = P \cdot t \text{ kWh}, \quad (2.9)$$

čia  $P$  – vidutinė hidroelektrinės galia, kW;

$t$  - laikas, kai hidroelektrinė dirba tokia galia, valandomis.

Taigi viena kilovatvalandė ( $1 \text{ kWh}$ ) yra toks energijos kiekis, kurį pagamina  $1 \text{ kW}$  galios variklis per  $1$  valandą. Paprastai skaičiuojama hidroelektrinės pagaminta energija per parą, mėnesį, metus arba kiek iš viso HE pagamino energijos. HE pagaminta elektros energija per parą apskaičiuojama taip:

$$E_p = P_{vid.p.} \cdot t_p, \quad (2.10)$$

čia  $P_{vid.p.}$  - paros vidutinė HE galia kW;  
 $t_p$  - paros valandų skaičius,  $t_p = 24$  val.

Mėnesio, metų ar kurio nors kito laikotarpio HE pagaminta elektros energija lygi per atskiras paras pagamintos energijos sumai. Žinant per atitinkamą laikotarpį HE pagamintos elektros energijos kiekį, galima apskaičiuoti, kokia vidutine galia tuo laikotarpiu dirbo hidroelektrinė.

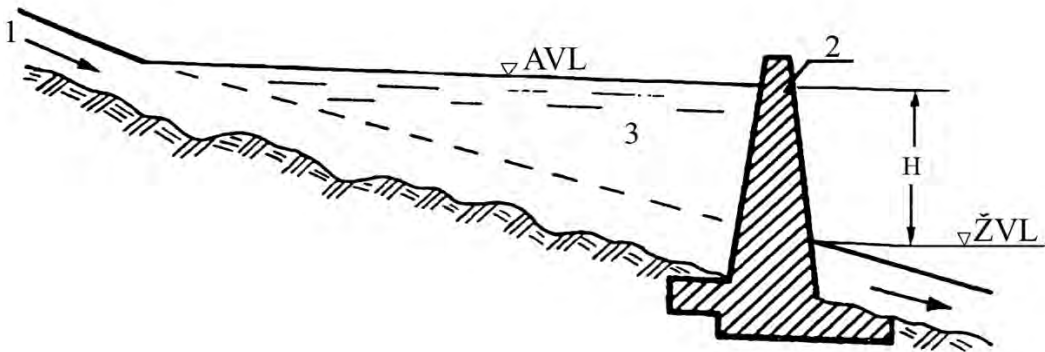
#### 2.4. Slėgio aukščio sudarymo būdai

Slėgio aukštis yra dviejų upės ruožo taškų aukščių skirtumas, kuris beveik per visą upės ilgį būna vienodas, tačiau toks slėgio aukštis hidroenergetikai netinkamas. Reikia dirbtinai sukcentruoti slėgio aukštį vienoje vietoje.

Yra du pagrindiniai slėgio aukščio sudarymo būdai:

- 1) užtvankinis;
- 2) derivacinis.

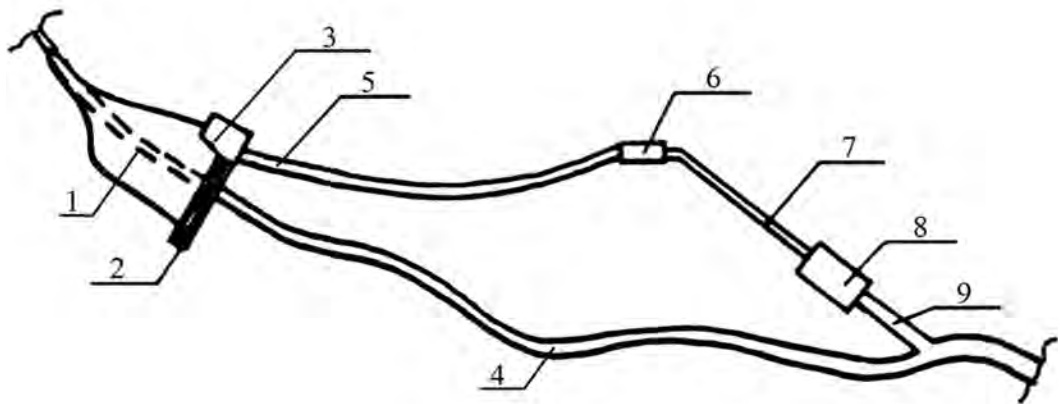
Užtvankinio būdo esmė yra ta, kad upės vagoje pastačius užtvanką, slėgio aukštis  $H$  sukcentruojamas vienoje vietoje (2.2 pav.).



2.2 pav. Slėgio aukščio sudarymo užtvanka schema: 1 – upės vaga; 2 – užtvanka; 3 – tvenkinys; AVL – aukštutinio bjefo vandens lygis; ŽVL – žemutinio bjefo vandens lygis

Šiuo atveju slėgio aukštis yra lygus aukštutinio ir žemutinio bjefo vandens lygių skirtumui. Tokiu būdu slėgio aukštis Lietuvoje sudarytas Kauno, Angirių, Kavarsko ir daugelyje kitų mažesnių hidroelektrinių.

Kalvotose vietose, kur kai kurių upių ruožų nuolydžiai yra dideli arba upės vaga daro dideles kilpas, paprastai taikomas derivacinis slėgio aukščio sudarymo būdas (2.3 pav.).



2.3 pav. Slėgio aukščio sudarymo derivacija schema: 1 – tvenkinys; 2 – užtvanka; 3 – vandens ėmimo įrenginiai; 4 – upės vaga; 5 – derivacinis kanalas; 6 – slėginis baseinas (atviros derivacijos sujungimas su uždara); 7 – slėginiai vamzdžiai; 8 – HE pastatas; 9 – vandens nuvedimo kanalas

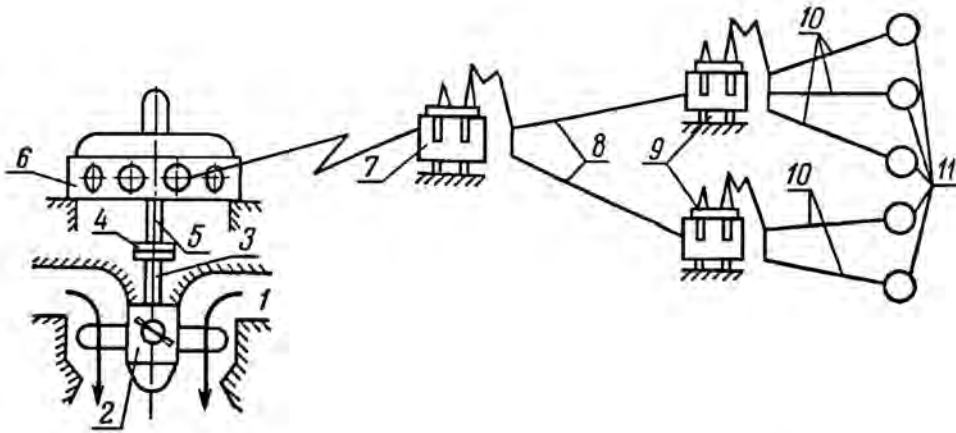
Ruožų ar kilpų pradžioje statomi maži tvenkiniai, iš kurių vanduo imamas į minimaus nuolydžio derivacinius kanalus. (Derivacija – pranc. *dériver* – vesti, atvesti). Tokiais kanalais vanduo atvedamas iki įrenginio, vadinamo slėginiu baseinu, jungiančio kanalą su slėginiais vamzdžiais. Per slėginius vamzdžius vanduo patenka į HE pastate sumontuotas turbinas, o iš jų išėjęs vėl nuvedamas į upę. Tokiu būdu Lietuvoje slėgio aukštis sudarytas Antalieptės, Gondingos, Aukštadvario hidroelektrinėse.

Be šių dviejų pagrindinių slėgio aukščio sudarymo būdų dar gali būti mišrus slėgio aukščio sudarymo būdas, t.y. kai slėgio aukštis sukonzentruojamas ir užtvankos, ir derivacijos dėka.

## 2.5. Hidroelektrinės darbo principas, jos galia

Hidroelektrinė yra kompleksas įrenginių, kurie vandens energiją verčia į elektros energiją. Pagrindinis įrenginys, verčiantis vandens energiją į mechaninę sukimosi energiją, yra hidraulinė turbina. Vanduo, tekėdamas per turbinos darbo ratą iš aukštesnio lygio į žemesnį, priverčia jį sukintis (2.4 pav.). Kartu su darbo ratu sukasi turbinos velenas, prie kurio jungiamas hidrogeneratorius, o šis jau gamina elektros energiją. Hidroturbina ir hidrogeneratorius, sujungti bendru vėliu, sudaro hidroagregatą.

Norint perduoti pagamintą elektros energiją dideliais atstumais su mažiausiais nuostoliais, statomi elektros srovės įtampą aukštinantys transformatoriai ir aukštos įtampos elektros linijos. Aukštos įtampos linijų gale elektros srovės įtampa žeminančiais transformatoriais vėl pažeminama ir žemos įtampos skirstomaisiais tinklais elektros srovė tiekama vartotojams (2.4 pav.).



2.4 pav. Vandens energijos transformavimo į elektros energiją schema: 1 – vandens tekėjimo per turbinos darbo ratą kryptis; 2 – turbinos darbo ratas; 3 – turbinos velenas; 4 – turbinos ir generatoriaus velenų jungiamoji mova; 5 – generatoriaus velenas; 6 – generatorius; 7 – aukštinantis įtampą transformatorius; 8 – aukštos įtampos elektros perdavimo linijos; 9 – žeminantys įtampą transformatoriai; 10 – žemos įtampos elektros skirstomieji tinklai; 11 – elektros energijos vartotojai

Vandens energijos virsmo į elektros energiją procese tam tikra jos dalis virsta energijos nuostoliais. Pirmiausia vandeniui tekant vandens atvedimo ir nuvedimo įrenginiais bei per turbinas susidaro kelio ir vietiniai hidrauliniai nuostoliai. Sukantis turbinoms ir generatoriams susidaro trinties jėgos, kurioms nugalėti taip pat prarandama dalis energijos. Transformatoriuose ir elektros perdavimo linijose susidaro šilumos nuostoliai. Be to, dėl netolygaus nuotėkio pasiskirstymo per metus ne visą upės debitą galima panaudoti energetikai. Taigi hidroelektrinės galia visada yra mažesnė negu teorinė, t.y. apskaičiuota pagal (2.8) formulę.

Realią HE galią galima apskaičiuoti taip:

$$P_{HE} = 9,81 Q_{sk} H_{sk} \eta \text{ kW}, \quad (2.11)$$

$$\eta = \eta_t \eta_g \eta_p, \quad (2.12)$$

čia  $Q_{sk}$  - skaičiuojamasis debitas, nustatomas vandens ūkio, energetiniais bei ekonominiais skaičiavimais  $m^3/s$ ;

$H_{sk}$  - slėgio aukštis, įvertinus slėgio aukščio nuostolius m;

$\eta$  - hidroagregato naudingumo koeficientas;

$\eta_t$  - hidraulinės turbinos naudingumo koeficientas;

$\eta_g$  - hidrogenatoriaus naudingumo koeficientas;

$\eta_p$  - sūkių perdavimo mechanizmo naudingumo koeficientas.

$$H_{sk} = H - h_w \text{ m,} \quad (2.13)$$

čia  $H$  – slėgio aukštis, t.y. vandens lygių tarp aukšutinio ir žemutinio bjeftų skirtumas, m;

$h_w$  - slėgio aukščio nuostolių suma vandens atvedimo prie turbinų ir nuvedimo nuo jų įrenginiuose m.

## 2.6. Hidroelektrinių klasifikacija

Priklausomai nuo skirtingų gamtinių sąlygų, slėgio aukščio sudarymo būdų, instaliuotos (įrengtos) galios, HE paskirties energetinėje sistemoje ir vandens ūkio komplekse, hidroįrenginių konstrukcijos ir sudėties bei kitų aplinkybių, hidroelektrinės yra labai įvairios. Tokių pačių HE paprastai nepasitaiko. Tačiau vis dėlto patogu turėti hidroelektrinių klasifikaciją, atspindinčią tam tikru požiūriu bendrus požymius (Hidrotechninė..., 2000).

*Pagal skirtingos kilmės vandens energijos naudojimą* hidroelektrinės gali būti:

- 1) hidroelektrinės, naudojančios upių vandens energiją;
- 2) hidroakumuliacinės elektrinės, naudojančios siurbliais pakelto vandens energiją;
- 3) potvynių–atoslūgių hidroelektrinės, naudojančios jūrų bei vandenynų užutėkiuose dėl mėnulio traukos vykstančių potvynių–atoslūgių energiją;
- 4) hidroelektrinės, naudojančios jūrų bei vandenynų bangų energiją ([www.energy-portal.eu](http://www.energy-portal.eu)).

*Pagal slėgio aukščio sudarymo būdą* hidroelektrinės skirstomos į:

- 1) užtvankines;
- 2) derivacines;
- 3) mišrias.

*Priklausomai nuo slėgio aukščio dydžio* užtvankinės HE skirstomos į:

- 1) vagines;
- 2) priužtvankines.

Derivacinės HE *priklausomai nuo atvedančiosios derivacijos* skirstomos į:

- 1) hidroelektrines su beslėge derivacija;
- 2) hidroelektrines su slėgine derivacija.

Abiem atvejais nuvedančioji derivacija gali būti beslėgė ir slėginė.

*Pagal įrengtą galią* HE klasifikuojamos taip:

- 1) piko – iki 50 kW;
- 2) mikro – 50...500 kW;
- 3) mini – 500...2000 kW;
- 4) maža – 2000...10000 kW;
- 5) didelė – daugiau 10000 kW.

Lietuvoje mažąsias HE *pagal slėgio aukštį* rekomenduojama klasifikuoti taip:

- 1) mažo slėgio aukščio – iki 10 m;
- 2) vidutinio slėgio aukščio – 10...20 m;
- 3) didelio slėgio aukščio – daugiau kaip 20 m.

**Vagine** vadinama tokia HE, kurios mašinų pastatas yra užtvankoje ir kartu su ja pakelia vandens lygį ir atlaiko jo slėgį. Vaginės HE gali būti statomos esant slėgio aukščiu iki 20...30 m. Tokia yra Kauno HE ir daugelis kitų.

**Prieužtvankinė HE** yra tokia, kurios mašinų pastatas nelaiko vandens slėgio ir stovi žemutiniame bjeffe prie užtvankos. Vanduo į turbinas teka vamzdžiais, įrengtais užtvankoje. Tokios HE paprastai statomos esant slėgio aukščiams didesniems kaip 30...40 m.

**Hidroakumuliacinės** elektrinės įrengimo principas toks: skirtinguose aukščiuose įrengiami du vandens baseinai: žemutinis ir aukštutinis. Mažo elektros energijos naudojimo valandomis vanduo siurbliais pumpuojamas į aukštutinį baseiną, o kai elektros energijos reikia daug, iš aukštutinio baseino slėginiais vamzdžiais teka į žemutinį baseiną per dvigubo veikimo hidroagregatus ir gamina elektros energiją. Praktiškai nakties metu hidroakumuliacinė elektrinė veikia kaip siurblinė, o didelio elektros energijos poreikio valandomis – kaip hidroelektrinė. Lietuvoje tokia yra Kruonio HAE.

**Potvynių–atoslūgių HE.** Jūrose ir vandenynuose dėl Saulės ir Mėnulio tarpusavio traukos vandens lygiai svyruoja: pakyla arba nuslūgsta. Tokie pakilimai ir nuslūgimai būna ypač žymūs pakrančių įlankose. Taigi jie ir išnaudojami potvynių–atoslūgių HE įrengti.

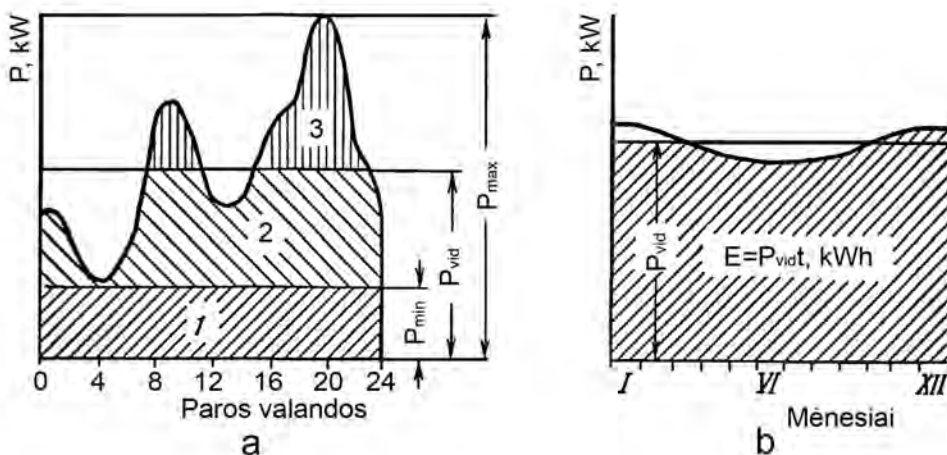
## 2.7. Elektros energijos vartotojai ir energijos poreikio grafikai

Elektros energijos vartotojai yra gyventojai ir iš esmės visos ūkio šakos.

Pagal elektros energijos vartojimo pobūdį visi vartotojai gali būti suskirstyti į tris kategorijas:

- 1) nuolatiniai vartotojai, kurių poreikis elektros energijai per metus nesikeičia, pvz., dauguma pramonės įmonių;
- 2) vartotojai, kurių poreikis elektros energijai keičiasi priklausomai nuo metų sezono, pvz., elektros poreikis apšvietimui;
- 3) sezoniniai vartotojai, kurių poreikis elektros energijai padidėja tik tam tikru laiku, pvz., žemės ūkio gamybinių procesų elektrifikacija.

Bendras elektros energijos poreikis paprastai yra nepastovus tiek per parą, tiek per metus. Priklausomybė tarp elektros energijos poreikio ir laiko paprastai išreiškiama grafiškai (2.5 pav.).



2.5 pav. Elektros energijos poreikio grafikai: a – paros; b – metų; 1 – bazinė grafiko dalis; 2 – puspičio dalis; 3 – piko dalis



Priklausomai nuo laiko trukmės, per kurią analizuojamas poreikio svyravimas, sudaromi paros (2.5 pav., a) ir metų (2.5 pav., b) energijos poreikio grafikai.

Paros energijos poreikio grafikas dažniausiai turi du maksimumus – rytinį ir vakarinį bei du minimumus – naktinį ir dieninį. Tai lemia darbo režimas pramonės įmonėse ir žemės ūkyje bei natūrali dienos šviesa.

Metų energijos poreikio grafikai sudaromi pagal vidutinius arba maksimalius mėnesių poreikio grafikus.

Paros energijos poreikio grafikuose galima išskirti tris būdingas dalis:

- 1) bazinę, esančią žemiau minimalaus poreikio linijos, nekintančią per parą;
- 2) puspio, esančią tarp minimalaus ir vidutinio paros poreikio linijų;
- 3) pikinę, esančią aukščiau vidutinio paros poreikio linijos.

Iš 2.5 pav. matyti, kad, norint patenkinti energijos poreikį, elektrinių galia turi būti kintama. Dėl to tikslinga įvairias elektrines (atominės, šiluminės, hidroelektrinės, hidroakumuliacinės) sujungti į vieningą sistemą, kurioje vienos jų galėtų dirbti pastoviai, tenkindamos pastovius energijos poreikius, kitos – piko poreikius. Hidroelektrinės ir hidroakumuliacinės elektrinės kaip tik geriausiai tinka piko poreikiams tenkinti, nes jas paleisti ir sustabdyti galima per labai trumpą laiką.

## 2.8. Energetinė sistema

Dėl racionalesnio kuro ir hidroenergetinių išteklių naudojimo, geresnio vartotojų aprūpinimo elektros energija įvairios elektrinės vienos su kitomis jungiamos elektros perdavimo linijomis. Visos elektrinės, dirbančios vieningame elektros energijos tiekimo ir paskirstymo tinkle, kartu su transformatoriais ir pagalbinais įrenginiais sudaro **energetinę sistemą**. Energetinė sistema sudaro galimybę maksimaliai išnaudoti esamų elektrinių galias, geriau paskirstyti energetinius išteklius, pagerinti elektros energijos kokybę išlaikant pastovią įtampą ir srovės dažnį. Sudarius dideles energetines sistemas atsiranda galimybė statyti elektrines prie pigių energijos šaltinių, o pagamintą energiją tiekti dideliais atstumais.

Lietuvos elektros energetinė sistema buvo sukurta ne vien tik Lietuvos, kaip savarankiškos valstybės, reikmėms tenkinti, o kaip didelės SSSR Šiaurės vakarų jungtinės energetinės sistemos nedidelė neatskiriama dalis, skirta to didelio regiono reikmėms tenkinti (Lietuvos..., 1992). 1991 m. Lietuvos, Latvijos ir Estijos energetinės sistemos sukūrė atskirą Baltijos energetinių sistemų susivienijimą, kuris ateityje numato prisijungti prie Vakarų Europos jungtinės energetinės sistemos. Tačiau tam būtina pastatyti aukštos įtampos elektros perdavimo linijas (elektros tiltus) į Lenkiją ir į Švediją.

## **3. VANDENS ŪKIO IR ENERGETINIAI SKAIČIAVIMAI**

### **3.1. Vandens išteklių kompleksinis naudojimas**

Europos Sąjungoje (ES) 2000 m. priimta Bendroji vandens politikos direktyva 2000/60 EC, kitų ES direktyvų reikalavimai ir nacionaliniai poreikiai sąlygojo vandens išteklių valdymo reformą pereinant prie baseininio valdymo. Pagrindiniai reformos tikslai yra:

- 1) visų vandenu geros būklės užtikrinimas;
- 2) vartotojų poreikių tenkinimas nepakenkiant vandenu būklei (subalansuotas naudojimas);
- 3) apsauga nuo potvynių, sausrų ir kitokio žalingo vandens poveikio.

Vienos pagrindinių privalomų priemonių yra:

- 1) užtikrinti, kad gamtinis upės baseinas būtų vertinamas kaip mažiausias vandens ekosistemos elementas (baseininis valdymas);
- 2) subalansuotai valdyti vandens naudojimą, siekiant ilgalaikės vandens išteklių apsaugos;
- 3) kitos priemonės.

Lietuvoje, siekiant įgyvendinti užsibrėžtus tikslus, priimta nauja Vandens įstatymo redakcija, Aplinkos ministerijos įsakymu sudaryti keturi upių baseinų rajonai (UBR): Nemuno, Ventos, Mūšos–Nemunėlio ir Dauguvos intakų.

Planuojant atskirų upių baseinų vandens išteklių naudojimą ir apsaugą, labai svarbu kad ištekliai būtų naudojami kompleksiskai, t.y. tie patys vandens telkiniai tenkintų kuo didesnio naudotojų skaičiaus poreikius. Naudojant vandens išteklius kompleksiskai gaunama maksimali nauda ir greičiausiai atsiperka investicijos, įdėtos vandens telkiniui įrengti (pvz., tvenkiniui) arba jam sutvarkyti.

Vandens naudotojai, besinaudojantys to paties telkinio ištekliais, vadinami vandens komplekso dalyviais. Jiems vanduo gali būti reikalingas drėkinimui, vandentiekai, hidroenergetikai, rekreacijai ir kt. Dažnai atskirų vandens komplekso dalyvių poreikiai vandens kiekiui ir kokybei būna labai skirtingi, todėl labai svarbu vandens išteklius valdyti kompleksiskai. Kompleksinis valdymas turėtų užtikrinti, kad vandens išteklių naudojimo plėtra remtųsi ekonominiu, aplinkosauginiu ir socialiniu įvertinimu, konfliktai tarp interesų grupių būtų sprendžiami tarpusavio sutarimu (konsensusu). Plečiant vandens naudojimo galimybes, ieškant pusiausvyros tarp išsaugojimo ir plėtros, vanduo turi būti akcentuojamas kaip ekonominė ir socialinė gėrybė (Kompleksinis..., Nr.4).

### **3.2. Hidroelektrinės veikimo sąlygos kompleksinės paskirties hidromazge**

Hidroelektrinės darbas kompleksinės paskirties hidromazge daug sudėtingesnis negu vien tik hidroenergetinės paskirties hidromazge, nes tenka derintis prie nuolat besikeičiančių vandens lygių ir debitų režimų, priklausančių tiek nuo gamtinių sąlygų, tiek nuo komplekso dalyvių poreikių.

Priklausomai nuo topografinių ir hidrologinių sąlygų hidroelektrinių slėgio aukštis Lietuvoje gali kisti nuo kelių iki keliasdešimties metrų ir debitas – nuo keliasdešimties l/s iki kelių šimtų ir net tūkstančių m<sup>3</sup>/s. HE slėgio aukščiai ir debitai per metus taip pat

nepastovūs. Paprastai per 1–2,5 mėnesio skaičiuojamuoju upės skerspjūviu prateka didžioji dalis nuotėkio, o kitiems 10–11 mėnesių tenka mažiau nei pusė viso metinio nuotėkio.

Priklausomai nuo pratekančio per HE debito, keičiasi vandens lygiai aukštutiniame ir ypač žemutiniame bjeuose, kartu keičiasi ir HE slėgio aukštis. HE debito kaita priklauso ne tik nuo hidrologinių sąlygų, bet ir nuo kitų vandens naudotojų, naudojančių vandenį iš to paties tvenkinio. Visos minėtos sąlygos lemia kiekvienos HE skirtingų hidrotechnikos statinių ir įrenginių kompleksą bei jų komponavimą.

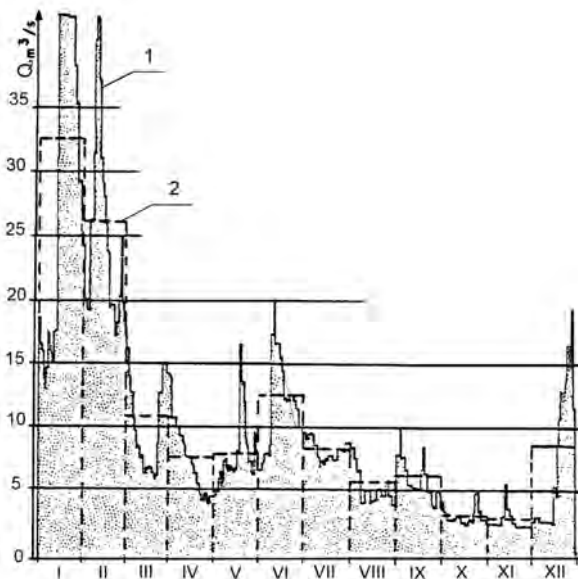
Geriau ir ekonomiškiau išnaudojami vandens ištekliai reguliuojant upės nuotėkį.

Kompleksinės paskirties hidromazgo vandens ūkio ir energetinių skaičiavimų pagrindiniai uždaviniai yra šie:

- 1) vandens ūkio komplekso dalyvių sąrašo ir jų vandens poreikio nustatymas;
- 2) nuotėkio reguliavimo būdo parinkimas, būdingų vandens lygių tvenkinyje (NPL, AVL, ŽVL) nustatymas, užliejamų žemių ploto nustatymas;
- 3) racionalaus nuotėkio paskirstymo tarp komplekso dalyvių nustatymas;
- 4) pagrindinių HE parametrų (slėgio aukščio, debito, įrengtos galios) ir kitų komplekso dalyvių parametrų (debitų, vandens lygių aukštutiniame ir žemutiniame bjeuose ir kt.) nustatymas;
- 5) ekonominio efektyvumo ir techninių-ekonominių rodiklių nustatymas visam vandens ūkio kompleksui ir atskiroms ūkio šakoms.

### 3.3. Vandens ūkio skaičiavimų tikslas ir uždaviniai

Hidroelektrinės projektavimas yra pakankamai sudėtingas darbas, ir norint jį atlikti, reikia turėti vietovės topografinę, geologinę ir hidrogeologinę medžiagą, hidrologinių ir meteorologinių stebėjimų duomenis ir kt.



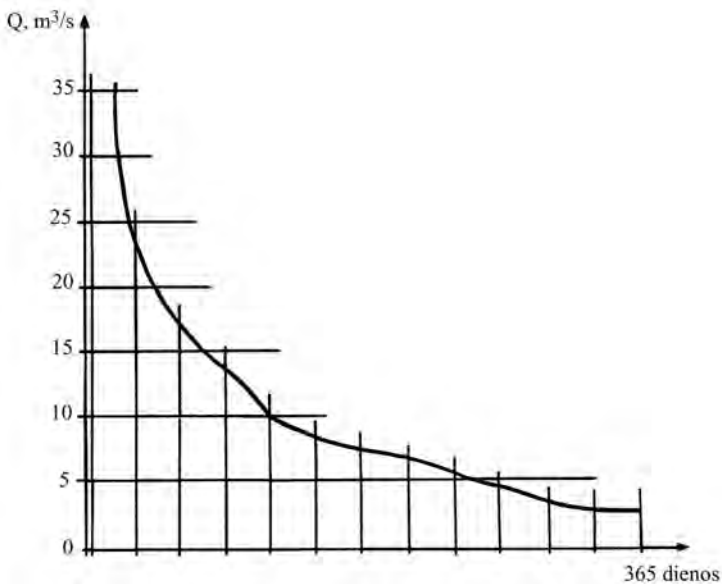
3.1 pav. Debito priklausomybės nuo laiko grafikas (hidrografas): 1 – paros vidutiniai debitai; 2 – mėnesio vidutiniai debitai

Pagal vietovės topografinę medžiagą parenkama hidromazgo vieta, projektiškai aukštesnio ir žemesnio bjeftų vandens lygiai, nustatomas užliejamų žemių plotas, sudaromas tvenkinio vandens paviršiaus ploto ir tūrio charakteristikos. Geologinė ir hidrogeologinė medžiaga reikalinga parenkant hidrotechnikos statinių tipą ir konstrukcijas, kovos su filtracija priemonės, apsaugos nuo tvenkinio krantų erozijos priemonės ir kt. Pagal meteorologinius duomenis nustatoma vyraujanti vėjo kryptis ir jo stiprumas, ižo ir ledo susidarymo bei jo ištirpimo laikas. Žinant ekstremalių meteorologinių parametru duomenis, galima patikslinti hidrotechnikos statinių parametrus.

Projektuojant hidroelektrinę labai svarbu turėti kuo išsamesnius hidrologinių stebėjimų duomenis. Pagal juos nustatomas natūralus upės režimas, būdingi debitai ir nuotėkio tūriai, nuotėkio reguliavimo būdas ir kt. (Gailiušis ir kt., 2001; Jablonskis ir Lasinskas, 1962).

Natūralus upės režimas paprastai išreiškiamas grafiškai sudarant debito priklausomybės nuo laiko grafiką (hidrografą)  $Q = f(t)$  (3.1 pav) (Les petits aménagements hydroélectriques...).

Turint hidrografą galima sudaryti debitų trukmių kreivę (3.2 pav.), kuri parodo kiek dienų per metus būna vienoks ar kitoks debitas.



3.2 pav. Debitų trukmių kreivė

Upės debitų kaita per metus turi esminę įtaką nustatant instaliuotą (įrengtą) hidroelektrinės galią. Geriau išnaudoti upės nuotėkį hidroenergetikai galima įrengiant nuotėkio reguliavimo tvenkinį. Iš kitos pusės tvenkinyje susidaro papildomi vandens nuostoliai dėl filtracijos ir išgaravimo iš tvenkinio, dėl ledo susidarymo ir kt. Tvenkinio vandens ūkio skaičiavimais nustatomi vandens nuostoliai iš tvenkinio, vandens naudojimas kitoms ūkio šakoms, vandens ėmimas iš tvenkinio ir jo kaupimas jame bei vandens lygiai tvenkinyje skaičiuojamojo laikotarpio pradžioje ir pabaigoje. Turint šių skaičiavimų duomenis galima nustatyti, kokį upės nuotėkį ir koku laikotarpiu galima bus naudoti hidroenergetikai (Jablonskis ir kt., 1996).

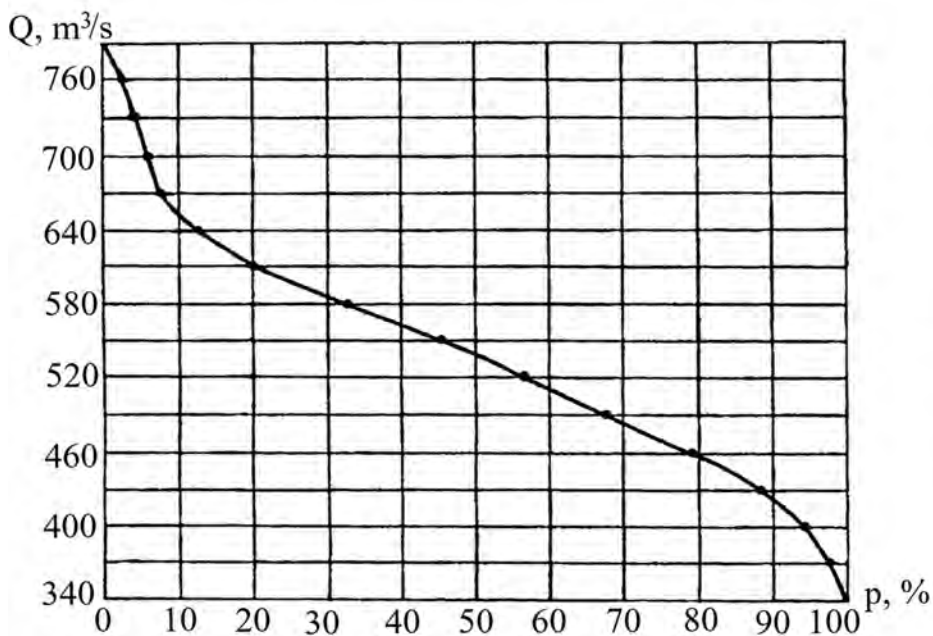
Taigi galutinis vandens ūkio skaičiavimų tikslas yra nustatyti upės nuotėkio dalį, galimą naudoti hidroenergetikai. Šiam tikslui pasiekti reikia išspręsti visus arba daugumą anksčiau minėtų uždavinių.

### 3.4. Skaičiuojamoji tikimybė

Paprastai tikimybė išreiškiama santykiniais dydžiais arba procentais, o grafiškai – tikimybės kreivėmis (3.3 pav.), pvz.,

$$Q = f(p), \quad (3.1)$$

čia  $Q$  – ieškomasis dydis, šiuo atveju debitas  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $p$  – procentai.



3.3 pav. Nemuno ties Smalininkais vidutinių metinių debitų empirinė (faktinė) tikimybės kreivė (Poška ir Punys, 1996)

Tikimybės kreivė sudaroma pagal stebėjimo duomenų eilę. Tikimybės kreivė tuo tikslesnė, kuo stebėjimų eilė ilgesnė.

Projektuojant HE labai svarbus parametras yra upės nuotėkis arba upės baseino vandens ištekliai, t.y. upės nuotėkio tūris per metus. Vandens ištekliai daugiamečiame laikotarpyje nėra pastovūs. Todėl projektuojant hidroelektrinę upės vandens ištekliai nustatomi vidutinio vandeningumo 50 % tikimybės metams, sausiams 90 % ir vandeningiems 10 % tikimybės metams. Skaičiuojamasis HE debitas parenkamas artimas 50 % tikimybės metų vidutiniam debitui. Galimas HE išdirbis apskaičiuojamas sausų, vidutinio vandeningumo ir vandeningų metų.

Hidromazgo hidrotechnikos statinių skaičiuojamą tikimybę lemia avariijų ir naudojimo sutrikimų galimi padariniai. Pagal juos hidrotechnikos statiniai skirstomi į keturias pasekmių klases: CC1 (paprasčiausia), CC2, CC3 ir CC4 (svarbiausia). Labai svarbūs CC4 klasės hidrotechnikos statiniai projektuojami 0,1 % tikimybės maksimaliam debitui praleisti, o paprasčiausi CC1 klasės – 5 % tikimybės (Statybos..., 2004).

Hidromazgas turi praleisti ne tik maksimalius debitus, bet užtikrinti galimybę ir gamtosauginiam debitui praleisti. Tuo atveju, kada HE nedirba, į žemutinį bjefą būtina praleisti gamtosauginį debitą, kuris yra lygus vasaros-rudens nuosėkio (V-X mėn.) 80 arba 95 % tikimybės 30 sausiausių dienų iš eilės vidutiniam debitui (Gamtosauginio..., 2005).

Taigi skaičiuojamoji tikimybė atskiriems hidromazgo statiniams yra skirtinga.

### **3.5. Hidroelektrinių pagrindiniai hidrotechniniai ir energetiniai parametrai**

Hidroelektrinė yra vienas iš labai svarbių hidromazgo elementų. Užtvankinių HE hidromazgą paprastai sudaro užtvanka, vandens pertekliaus pralaida, vandens ėmimo, vandens privedimo prie turbinų ir jo nuvedimo įrenginiai, hidroelektrinės pastatas, nuotėkio reguliavimo tvenkinys, gali būti nešmenų sėsdintuvas, vandens ėmimo įrenginiai kitiems vartotojams ir kt. Derivacinių arba mišrių HE hidromazge be minėtų hidrotechnikos statinių dar būna derivaciniai kanalai arba tuneliai, atviros ir uždarnos derivacijos sujungimo elementai (slėginiai baseinai), slėginiai vamzdiniai, išlyginamieji rezervuarai ir kt.

Pagrindiniai hidromazgo parametrai yra normalusis patvankos lygis (NPL) aukštutiniame bjefe ir naudingas tvenkinio tūris ( $V_n$ ). Taip pat dažnai prie pagrindinių parametru priskiriamas forsuočiasis patvankos lygis (FPL), ypač kai tvenkinys naudojamas gyvenviečių apsaugai nuo potvynių.

Nuo šių pagrindinių parametru priklauso hidromazgo vieta, hidrotechnikos statinių sudėtis ir jų išdėstymas plane, užliejamų žemių plotas ir kt.

Projektuojant naują hidromazgą, NPL nustatomas atsižvelgiant į aplinkosaugos reikalavimus ir ekonominių pagrįstumą.

Projektuojant HE prie esamo tvenkinio, paprastai minėti pagrindiniai parametrai jau yra žinomi.

Hidroelektrinės pagrindiniai energetiniai parametrai yra įrengta galia ir energijos išdirbis (galimas pagaminti energijos kiekis). Įrengta galia priklauso nuo galimo praleisti per HE turbinas debito ir slėgio aukščio. Savo ruožtu tiek debitas, tiek slėgio aukštis priklauso nuo pagrindinių hidromazgo parametru, t.y. nuo NPL ir  $V_n$ . HE energijos išdirbis priklauso nuo to, kiek laiko HE gali dirbti su vienokiu ar kitokiu debitui, kuris savo ruožtu priklauso nuo natūralaus upės nuotėkio ir tvenkinio reguliavimo galimybių, t.y. naudingo tvenkinio tūrio.

### **3.7. Hidroelektrinės energetiniai parametrai esant nuotėkio reguliavimui ir be jo**

Hidroelektrinės dirba su nereguliuojamu nuotėkiu ten, kur nėra galimybės įrengti nuotėkio reguliavimo tvenkinį, pvz., prie derivacinių HE. Be to, ir esant tvenkiniui, jeigu jo naudingas tūris labai mažas arba dėl kokių nors priežasčių negalima keisti vandens lygio aukštutiniame bjefe, HE taip pat dirba su nereguliuojamu nuotėkiu. Jeigu upės nuotėkis nereguliuojamas, HE debitai nustatomi pagal vidutinio vandeningumo metų hidrografą.

Kaip žinoma, HE slėgio aukštis yra aukščių skirtumas tarp aukštinio ir žemutinio bjeftų vandens lygių. Vandens lygiai aukštutiniame bjeftu kinta tarp forsuoto patvankos lygio (FPL) ir minimalaus vandens lygio (MinPL) tvenkinyje, o žemutiniame – priklauso nuo per turbinas ir potvynio pralaidas pratekančių debitų. Vandens lygiai žemutiniame bjeftu nustatomi pagal debitų kreives ( $Q=f(\dot{ZVL})$ ), sudarytas natūraliam upės nuotėkiui.

Žinant HE debitus ir slėgio aukščius pagal (2.11) ir (2.10) formules apskaičiuojama galia ir energijos išdirbis.

Esant nuotėkio reguliavimo tvenkiniui labai svarbią reikšmę turi naudingas tvenkinio tūris  $V_n$ , nuo kurio priklauso nuotėkio išlyginimo galimybės. Esant sezoniniam nuotėkio reguliavimui iš esmės visą upės nuotėkį galima panaudoti hidroenergetikai, nes tvenkinyje kaupiamas potvynių vanduo, kurį galima panaudoti esant minimaliems debิตams. Esant paros nuotėkio reguliavimui, galimybės sukaupti visą potvynių vandenį gerokai sumažėja.

Pagrindiniai HE energetiniai parametrai, t.y. galia ir energijos išdirbis, esant nuotėkio reguliavimui, apskaičiuojami analogiškai kaip ir nesant nuotėkio reguliavimo, skiriasi tik HE debitų ir slėgio aukščių nustatymas.

### **3.7. Įrengtos hidroelektrinės galios nustatymo principai**

Įrengta arba instaliuota HE galia yra suminė visų hidroagregatų galia dirbant jiems su aukščiausiu naudingumo koeficientu. Ji nustatoma pagal energetinius-ekonominius skaičiavimus, kuriais remiantis parenkamas hidroagregatų skaičius. Įrengus daugiau hidroagregatų galima efektyviau išnaudoti upės nuotėkį, tačiau didesnis agregatų skaičius brangina HE statybą. HE agregatų skaičius ir jų galia priklauso nuo nuotėkio reguliavimo galimybių, nuo to, ar HE dirba izoliuotai, ar energetinėje sistemoje, nuo to, ar gamtosauginis debitas bus praleidžiamas per turbinas ar specialius praleidimo įrenginius, nuo to, ar HE dirbs bazinės ar pikinės energijos poreikiui ir kt.

Lietuvoje, stengiantis gaminti daugiau elektros energijos iš atsinaujinančių energijos šaltinių („žaliosios“ energijos), mažosios HE paprastai dirba tokiu režimu, kad kuo geriau būtų išnaudojamas upių nuotėkis. Dėl to mažosiose hidroelektrinėse tikslinga įrengti daugiau hidroagregatų, kad galėtų panaudoti netolygiai per meus pasiskirstantį nuotėkį. Be to, hidroelektrinėje tikslinga įrengti vieną hidroagregatą, galintį praleisti gamtosauginį debitą, nes tada net ir maži upės debita galėtų būti panaudoti energetikai.

## 4. HIDROTURBINOS

### 4.1. Hidroturbinų tipai

Hidrauline turbina (gr. *hydor* – vanduo; lot. *turbo* – sūkurys) vadinamas variklis, verčiantis vandens energiją mechanine sukimosi energija.

Pagal tai, kokią vandens energiją naudoja hidroturbinos (toliau – tiesiog turbinos), jos skirstomos į dvi grupes: **aktyvines** ir **reaktyvines**. Aktyvinės turbinos naudoja tikrai vandens tėkmės greičio, t.y. kinetinę energiją, o reaktyvinės – vandens slėgio ir greičio, t.y. potencinę ir kinetinę energijas.

Turbinų sukimosi ašis gali būti vertikali, horizontali arba pasvirusi.

Turbinos galia randama pagal šią formulę:

$$P_t = 9,81Q_t H \eta_t, \quad (4.1)$$

čia  $P_t$  - turbinos galia kW;  
 $Q_t$  - turbinos debitas m<sup>3</sup>/s;  
 $H$  – slėgio aukštis m;  
 $\eta_t$  - turbinos naudingumo koeficientas.

Mažų turbinų, dirbančių optimaliu režimu, naudingumo koeficientas  $\eta_t$  lygus 0,88–0,90.

Kaip matyti iš (4.1) formulės, turbinos galia priklauso nuo turbinos debito  $Q_t$  ir slėgio aukščio  $H$ , kurių tarpusavio derinys gali būti labai įvairus. Turbinų galia esti taip pat labai įvairi ir kinta nuo kelių iki kelių šimtų tūkstančių kilovatų. Be to, tą pačią galią gali turėti turbina, praleidžianti didelį debitą  $Q_t$ , esant mažam slėgio aukščiui  $H$ , ir praleidžianti mažą debitą  $Q_t$ , esant dideliame slėgio aukščiui  $H$ .

Pagrindiniai turbinų parametrai yra:  $H$  – slėgio aukštis,  $P_t$  – turbinos galia,  $\eta_t$  - turbinos naudingumo koeficientas,  $D_1$  – darbo rato skersmuo,  $n$  – sukimosi dažnis (sūkių skaičius per minutę),  $n_s$  – greitaigumo koeficientas.

Visos turbinos skirstomos į mažo, vidutinio ir didelio slėgio aukščio. Mažo slėgio aukščio turbinų  $H \leq 25$  m, vidutinio -  $H = 25 - 80$  m, didelio -  $H > 80$  m. Taip pat turbinos skirstomos į mažas, vidutines ir dideles. Mažų  $D_1 \leq 1,2$  m, esant mažam, ir  $D_1 \leq 0,5$  m, esant dideliame slėgio aukščiui, o  $P_t \leq 1000$  kW. Vidutinių  $D_1 \leq 2,5$  m, esant mažam, ir  $D_1 \leq 1,6$  m, esant dideliame slėgio aukščiui, o  $P_t \leq 15000$  kW. Didelių turbinų  $D_1$  ir  $P_t$  yra didesni nei vidutinių.

Turbinos sukimosi dažnis nustatomas pagal šią formulę:

$$n = \frac{60u}{\pi D_1} \text{ sūk./min.}, \quad (4.2)$$

čia  $u$  – linijinis darbo rato sukimosi greitis m/s;

$D_1$  – darbo rato skersmuo m;

$\pi$  - skaičius, lygus 3,14.



Savo ruožtu darbo rato linijinis sukimosi greitis yra lygus vandens srauto greičiui  $v$ , kurį lemia slėgio aukštis:

$$u = v = \varphi \sqrt{2gH} \text{ m/s}, \quad (4.3)$$

čia  $\varphi$  - greičio koeficientas, apibūdinantis vandens pratekėjimo per turbiną sąlygas;  
 $g$  – gravitacinis pagreitis, lygus  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;  
 $H$  – HE slėgio aukštis m.

Esant dideliems slėgio aukščiams, kai  $v$  ir  $u$  dideli, turbina gali išvystyti labai didelį sukimosi dažnį, kuris gali būti neleistinas generatoriui. Todėl reikia riboti turbinos sukimosi dažnį parenkant atitinkamo tipo turbinas. Dydis, leidžiantis skirti turbinas vienas nuo kitų ir teisingai parinkti jų sukimosi dažnį, yra greitaeigumo koeficientas.

## 4.2. Turbinų greitaeigumo koeficientas

Turbinų hidraulinės savybės apibūdinamos taip vadinamu greitaeigumo koeficientu. **Greitaeigumo koeficientas**  $n_s$  (arba specifinis greitis) apibūdina turbinos sukimosi dažnį, esant atitinkamam slėgio aukščiui ir galiai. Jis apskaičiuojamas pagal formulę (Fraenkel et al., 1991):

$$n_s = \frac{n\sqrt{P_t}}{H^4\sqrt{H}}, \quad (4.4)$$

čia  $n$  – turbinos sukimosi dažnis sūk./min.;  
 $P_t$  – turbinos galia kW;  
 $H$  – slėgio aukštis m.

Iš (4.4) formulės matyti, kad, esant  $P_t = 1 \text{ kW}$  ir  $H = 1 \text{ m}$ , greitaeigumo koeficientas lygus turbinos sukimosi dažniui ( $n_s = n$ ). Taigi, turbinos greitaeigumo koeficientas kinta priklausomai nuo jos sukimosi dažnio, galios ir slėgio aukščio. Paprastai greitaeigumo koeficientas nustatomas normaliam turbinos sukimosi dažniui, nominaliai galiai ir skaičiuojamajam slėgio aukščiui.

Esant tai pačiai turbinos galiai ir tam pačiam slėgio aukščiui didesnis greitaeigumo koeficientas bus mažesnių matmenų turbinos, taigi ir pigesnės. Didinti turbinos greitaeigumą galima didinant jos sukimosi dažnį  $n$  arba debitą  $Q_p$ , nes didėjant debitui  $Q_p$  didėja ir turbinos galia  $P_t$ .

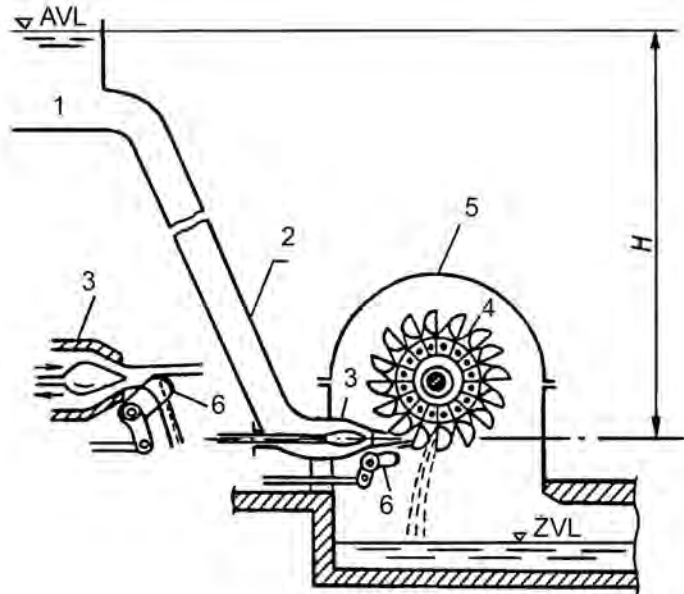
Naudojant skirtingo greitaeigumo turbinas, galima suderinti turbinos ir generatoriaus sukimosi dažnį, nes esant dideliems slėgio aukščiams normalų sukimosi dažnį išvysto lėtaeigės turbinos, o esant mažiems slėgio aukščiams, priešingai – greitaeigės turbinos.

## 4.3. Aktyvinės turbinos

Kaip jau minėta 4.1 skyrelyje, aktyvinės turbinos naudoja tik vandens tėkmės greičio energiją, todėl labai svarbu, kad vandens čiuurkšlė į turbinos darbo ratą patektų kuo didesniu greičiu, t.y. su kuo didesne kinetine energija. Aktyvinių turbinų pirmtakai buvo vandens ratai, kuriuos patobulinus buvo sukurtos aktyvinės turbinos.

Plačiausiai taikomos kaušinės aktyvinės turbinos, kurios pagal išradėjo pavardę dar vadinamos **Peltono turbinomis**. Jas 1884 m. išrado amerikiečių inžinierius Peltonas (Lester Pelton) (Warnick, 1984).

Kaušinę turbiną sudaro dvi pagrindinės dalys: darbo ratas ir slėginio vamzdžio antgalis (tūta) (4.1 pav.). Turbinos darbo ratas sudarytas iš stebulės ir tolygiai išdėstytų kaušų (4.2 pav.).



4.1 pav. Aktyvinės turbinos schema: 1 – vandens telkinys; 2 – slėginis vamzdis; 3 – slėginio vamzdžio antgalis su debito reguliavimo adata; 4 – turbinos darbo ratas; 5 – turbinos gaubtas; 6 – reflektorius (čiurkšlės nukreiptuvas)



4.2 pav. Kaušinės turbinos darbo ratas

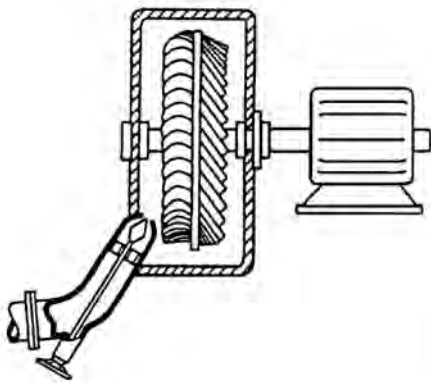
Kad vandens čiurkšlė į kaušą patektų švelniai (be smūgio), jis daromas iš dviejų dalių, perskirtų aštria briauna. Čiurkšlė, atsimušusi į kaušą, perduoda jam savo greičio energiją ir priverčia darbo ratą sukintis. Kaušų paprastai yra daug (14-60). Kad čiurkšlė atsimuštų į kaušo aštriąją briauną, o ne į kraštą, kauše daroma išėma.

Slėginio vamzdžio antgalio paskirtis – nukreipti vandens čiurkšlę į turbinos darbo ratą (kaušus) ir reguliuoti tiekiamą debitą, kartu ir turbinos galią. Antgalį sudaro kūginis vamzdžio susiaurėjimas (kūginė tūta) ir debito reguliavimo adata (4.1 pav.), kurios padėtis reguliavimo mechanizmu gali būti keičiama. Judant adatai išilgai tūtos, keičiasi čiurkšlės ištekėjimo angos skersplotis ir kartu debitas bei turbinos galia. Visiškai uždarius ištekėjimo angą, turbina nustoja sukintis. Kad vamzdyje nesusidarytų pavojingas hidraulinis smūgis, adata ištekėjimo angą uždaro iš lėto, o staigiam debito sumažinimui įrengiamas reflektorius (čiurkšlės nukreiptuvas).

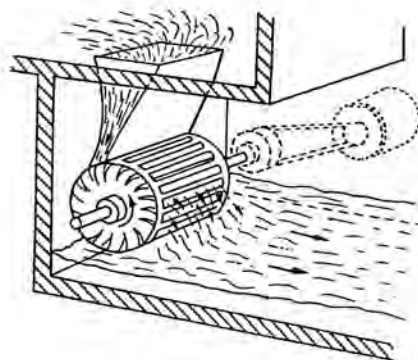
Kad vandens pūslai netikėtų į mašinų salę, turbinos darbo ratas uždengiamas gaubtu (4.1 pav.).

Mažos ir vidutinės kaušinės turbinos paprastai įrengiamos ant horizontalaus veleno, o didelės – ant vertikalaus. Horizontalios turbinos ant to paties veleno gali turėti vieną arba du darbo ratus. Vanduo į darbo ratą gali būti tiekiamas viena arba keliomis (2–4) čiurkšlėmis. Čiurkšlės pagal darbo rato perimetrą išdėstomos tolygiai.

Aktyvinėms turbinoms dar priklauso Turgo ir Banki–Mičelo turbinos (Fraenkel et al., 1991; Layman's..., ESHA).



4.3 pav. Turgo turbina



4.4 pav. Banki–Mičelo turbina

**Turgo** turbinos buvo išrastos 1920 metais Anglijoje. Iš esmės nuo Peltono tipo turbinų jos skiriasi tuo, kad kaušai yra paprastesnės konstrukcijos ir vanduo į juos tiekiamas iš šono maždaug 20° kampu (4.3 pav.). Vandens debitas reguliuojamas analogiškai kaip ir Peltono tipo turbinose.

**Skersasrautės** arba dvikartės aktyvinės turbinos išrastos 20 a. pradžioje. Šių turbinų principinę schemą 1903 m. pasiūlė austrų inžinierius Mičelas (Anthony Michell), o toliau jas tobulino vengras Banki (Donat Banki) ir vokiečių Osbergeris (Fritz Ossberger). Išradėjų garbei jos vadinamos Banki–Mičelo arba Osbergerio turbinomis.

Skersasraučiu turbinų darbo ratas panašus į vandens ratą, tik be vidinio cilindro, todėl vanduo, praėjęs tarp menčių, patenka į darbo rato vidų ir, išeidamas iš jo, pakartotinai (antrą kartą) praeina tarp menčių, dar kartą atiduodamas savo energiją (4.4 pav.). Vandens srautas, pirmą kartą praeidamas per darbo rato mentes, atiduoda apie 83 % savo energijos, o antrą kartą – apie 17 %.

Banki–Mičelo turbinų privalumas yra galimybė plačiose ribose keisti darbo rato skersmenį ir sukimosi dažnį nepriklausomai nuo debito, nes debito pralaidumą iš esmės lemia darbo rato plotis (Giesecke, Mosonyi, 1998).

1991 m. čekų verslininkas Miroslavas Cinkas (Miroslav Cink) gavo apdovanojimą už pasiūlymą patobulinti Banki–Mičelo turbiną įrengiant jai čiulpvamzdį. Šis patobulinimas leido geriau išnaudoti slėgio aukštį ir padidinti turbinos naudingumo koeficientą iki 91 %. Šios patobulintos turbinos vadinamos Cink–Banki turbinomis. Tiek šias, tiek ir kitokias turbinas mažoms iki 2000 kW galios hidroelektrinėms gamina čekų firma CINK–HYDRO–ENERGY ([www.cink-hydro-energy.com/cz](http://www.cink-hydro-energy.com/cz)).

Aktyvinių turbinų, naudojamų mažose hidroelektrinėse, pagrindiniai parametrai pateikiami 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Aktyvinių turbinų pagrindiniai parametrai (Les petits aménagements...)

Turbinų tipas	Slėgio aukštis m	Debitas m <sup>3</sup> /s	Galia kW	Greitaeigumo koeficientas $n_s$	Naudingumo koeficientas $\eta$ %
Peltono	50–1000	0,05–7,0	50–60000	10–60	84–88
Turgo	15–300	0,05–5,0	10–10000	20–70	79–84
Banki–Mičelo	2–200	0,04–12,0	1–2000	20–80	78–82

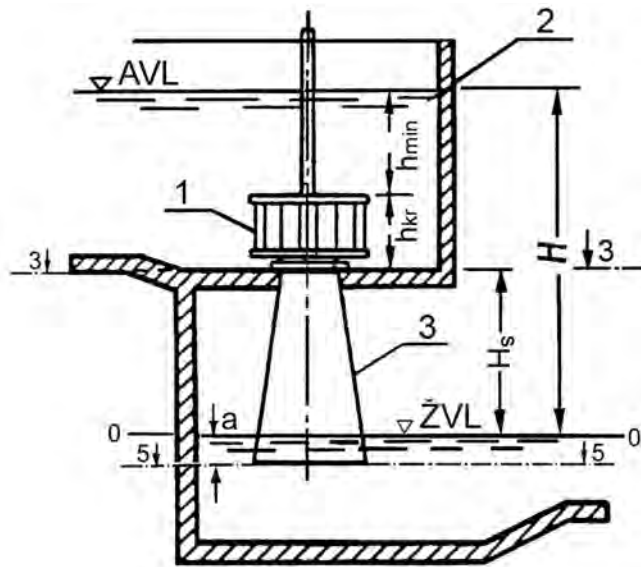
4.1 lentelėje pateiktų parametų ribos nėra griežtos ir jos gali būti mažesnės ar didesnės už nurodytąsias priklausomai nuo konstruktorių sugebėjimų, technikos išsivystymo lygio ir kt. Be to, skirtinguose literatūros šaltiniuose pateikiamos parametų ribos ne visada sutampa su pateiktomis 4.1 lentelėje.

#### 4.4. Reaktyvinės turbinos

Reaktyvinių turbinų, skirtingai nuo aktyvinių, visas darbo ratas panardintas vandenyje, todėl vandens tėkmė savo energiją perduoda visoms mentėms iš karto.

Reaktyvinės turbinos svarbiausi elementai yra darbo ratas, kreipratis, turbinos kamera ir čiulpvamzdis (4.5 pav.).

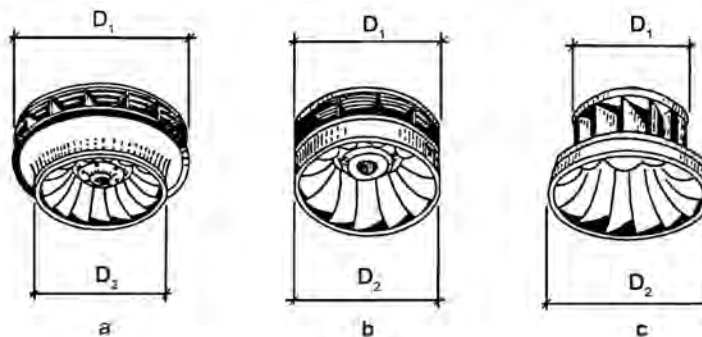
Pagal darbo rato konstrukciją visos reaktyvinės turbinos skirstomos į 3 tipus: Frenzio (radialines arba spindulines ašines), propelerines ir Kaplano (ašines).



4.5 pav. Vertikalios reaktyvinės turbinos schema: 1 – kreipratis su jo viduje esančiu darbo ratu; 2 – turbinos kamera; 3 - čiulpvamzdis

#### 4.4.1. Frensio turbinos

Jų darbo ratas sudarytas iš dviejų žiedų, tarp kurių įtvirtinta nuo 9 iki 21 dvigubai išlenktų menčių (4.6 pav.). Mažesnis skaičius menčių būna greitaeigių turbinų, naudojamų mažiems slėgio aukščiams, didesnis – lėtaeigių – naudojamų dideliems slėgio aukščiams. Vanduo darbo rate keičia tekėjimo kryptį: įteka spindulio, o išteka ašies kryptimi. Pirmąsias šio tipo turbinas 1847-1849 m. sukonstravo amerikiečių hidrotechnikas Frensis (James B. Francis), vėliau jų konstrukciją tobulino kiti tyrinėtojai. Išradėjo garbei jos vadinamos Frensio turbinomis.



4.6 pav. Frensio turbinų darbo ratai: a – lėtaeigės; b – vidutinio greitaeigumo; c – greitaeigės

Frensio turbinų taikymo ribos labai plačios. Jos gali būti naudojamos slėgio aukščiams nuo 10 iki 500 m ir vienos turbinos galia gali kisti nuo keletos iki kelių šimtų tūkstančių kW.

Kaip jau minėta, Frenzio tipo turbinos yra lėtaeigės, vidutinio greitaigumo ir greitaeigės. Greitaigumas priklauso nuo įėjimo į darbo ratą ( $D_1$ ) ir išėjimo iš jo ( $D_2$ ) skersmenų santykio (4.6 pav.).

Lėtaeigių turbinų  $D_1 > D_2$ ,  $n_s = 70 - 125$ ,  $H = 100 - 500$  m.

Vidutinio greitaigumo turbinų  $D_1 = D_2$ ,  $n_s = 125 - 200$ ,  $H = 50 - 100$  m.

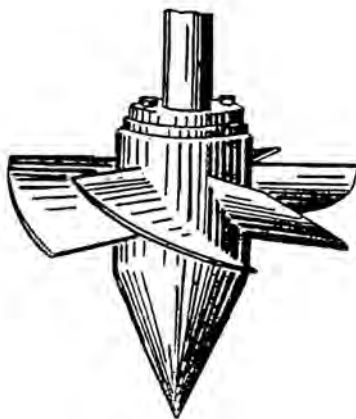
Greitaeigių turbinų  $D_1 < D_2$ ,  $n_s = 200 - 350$ ,  $H < 50$  m.

Būtinai minimalus debitas –  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Laisvos eigos debitas tesudaro 10–12 % optimalaus turbinos debito.

Frenzio tipo turbinos gali būti vertikalios ir horizontalios. Jas rekomenduotina įrengti mažose hidroelektrinėse, nes palyginti paprasta jų konstrukcija, jos patikimos ir ilgaamžės.

#### 4.4.2. Propelerinės turbinos

Jų darbo ratą sudaro aptaki stebulė, prie kurios pritvirtintos mentės (4.7 pav.). Menčių gali būti nuo 3 iki 8, tai priklauso nuo slėgio aukščio.



4.7 pav. Propelerinės turbinos darbo ratas

Propelerinės turbinos yra greitaeigės. Jų greitaigumo koeficientas  $n_s = 300 - 800$ . Mažose hidroelektrinėse jos naudojamos, kai slėgio aukštis yra nuo 1 iki 30 m. Laisvos eigos debitas siekia 22–45 % optimalaus turbinos debito.

Propelerinės turbinos yra paprastos konstrukcijos, nesunkiai įrengiamos, tačiau jų naudingumo koeficientas yra didelis tik tuomet, kai jos dirba optimalia galia. Esant kitokiai galiai, turbinos naudingumo koeficientas gerokai sumažėja. Tai yra didžiausias jų trūkumas.

#### 4.4.3. Kaplano turbinos

Jų darbo ratai labai panašūs į propelerinių turbinų darbo ratus, tik mentės prie stebulės pritvirtintos taip, kad gali sukis apie savo ašį, statmeną turbinos ašiai. Šis patobulinimas sudarė sąlygas išvengti didžiausio propelerinių turbinų trūkumo – staigaus naudingumo ko-

eficiento sumažėjimo pasikeitus turbinos galiai. Šias turbinas sukonstravo čekų inžinierius Kaplanas (Viktor Kaplan 1876–1934 m.), kurio garbei jos taip ir vadinamos.

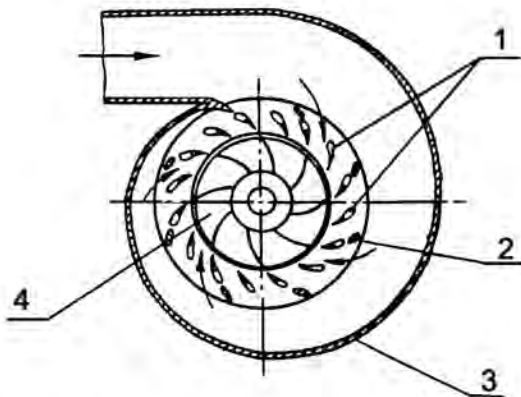
Kaplano turbinos, kaip ir propelerinės, yra greitaeigės. Jų greitaeigumo koeficientas  $n_s = 350 - 1200$ . Mažose hidroelektrinėse jos taikomos analogiškiems slėgio aukščiams (1–30 m) kaip ir propelerinės. Laisvos eigos debitas šioms turbinoms sudaro tik 5–8 % nuo optimalaus.

Tiek propelerinės, tiek Kaplano turbinos dar vadinamos ašinėmis reaktyvinėmis turbinomis. Jos gali turėti vertikalų, horizontalų arba pasvirusį veleną.

Žemo slėgio mažose hidroelektrinėse ašinės turbinos gali būti įrengiamos tiesiog vamzdyje.

#### 4.5. Reaktyvinių turbinų kreipračiai

Kreipračių paskirtis yra nukreipti vandens srautą į darbo ratą ir reguliuoti per turbiną praleidžiamą debitą, kartu ir turbinos galią, bei sustabdyti turbiną visiškai nutraukiant vandens srovę. Kreipratį sudaro aptakios formos mentės, tolygiai išdėstytos tarp dviejų atraminių žiedų (4.8 pav.). Pasukant reguliuojamąjį žiedą, visos mentės pasisuka apie savo ašį vienodu kampu ir sumažina arba padidina tėkmės skersplotį, kartu ir vandens debitą.



4.8 pav. Frenzio turbinos metalinė spiralinė kamera ir kreipratis: 1 – kreipračio mentės; 2 – kreipračio statoriaus mentės; 3 – metalinė spiralinė kamera; 4 – turbinos darbo ratas

Kreipračio menčių skaičius priklauso nuo turbinos matmenų. Kai turbinos darbo rato skersmuo  $D_1 < 2,5$  m, menčių yra 12, kai  $D_1 < 8,5$  m – 24, kai  $D_1 > 8,5$  m – 32.

Dažnai prieš turbinos kreipratį dar įrengiamas statorius su aptakiomis mentėmis (4.8 pav.), kurių paprastai yra du kartus mažiau negu kreipračio menčių.

#### 4.6. Turbinų kameros

Jų reikia, kad vanduo patektų į turbinos kreipratį ir tolygiai pasiskirstytų pagal jo perimetrą. Turbinų kameros gali būti atviros ir uždaros.

Atviros turbinų kameros įrengiamos, kai slėgio aukščiai maži, ne didesni kaip 8–10 m (žr. 4.5 pav.). Atvira kamera dažniausiai yra stačiakampio formos. Jos matmenys priklauso

nuo turbinos darbo rato skersmens  $D_1$ . Kai turbinos yra vertikalios, kameros ilgis ir plotis dažniausiai vienodas ir lygus  $(3-4) D_1$ ,  $h_{\min} \geq (0,9 - 1,0) D_1$ ,  $h_{kr} = (0,6 - 0,75) D_1$ .

Atviros stačiakampio formos turbinų kameros pasižymi konstrukcijos paprastumu ir pakankamai geromis hidraulinėmis savybėmis.

Uždaros turbinų kameros gali būti betoninės, gelžbetoninės ir metalinės.

Betoninės arba gelžbetoninės spiralinės kameros tinka tik vertikalioms turbinoms, kai slėgio aukščiai yra nuo 4 iki 40 m ir  $D_1 > 1,6$  m.

Horizontalių turbinų kapsuliniams agregatams įrengiamos tiesios betoninės cilindrinės arba kūgiškos turbinų kameros.

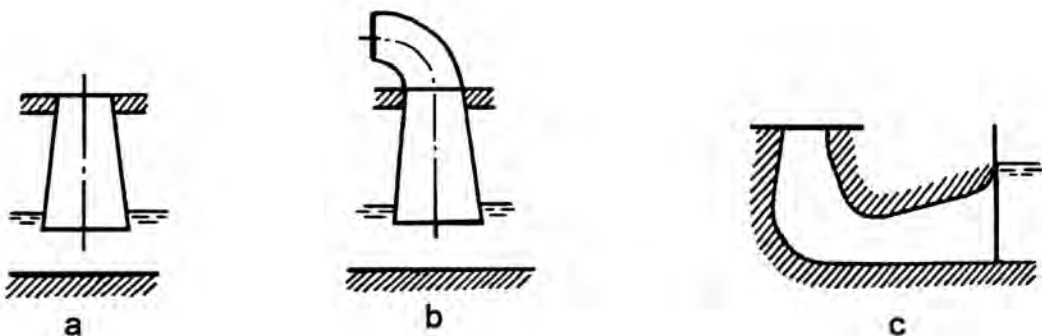
Metalinės spiralinės kameros (žr. 4.8 pav.) naudojamos, kai slėgio aukščiai siekia nuo 15 iki 350 m ir daugiau. Tokios kameros paprastai įrengiamos vertikalioms ir horizontalioms Frenzio turbinoms kurių skersmuo ne didesnis kaip 1 m. Metalinės kameros skerspjūvio forma dažniausiai yra apvali. Skaičiavimai pagrįsti pastovaus vandens tėkmės greičio išlaikymu skirtinguose kameros skerspjūviuose.

#### 4.7. Čiulpvamzdžiai

Jų reikia, kad vanduo nuo turbinos darbo rato į žemutinį bjefą nutekėtų patiriant mažiausius energijos nuostolius.

Reaktyvinėse turbinose vanduo iš darbo rato išteka dideliu greičiu. Ištekėjimo iš darbo rato greitis, kartu ir kinetinė energija, yra tuo didesni, kuo turbina greitaeigsnė ir kuo didesnis slėgio aukštis. Žemo slėgio hidroelektrinėse vandens ištekėjimo greitis siekia 3–10 m/s, aukšto slėgio – 8–12 m/s ir daugiau. Frenzio turbinose lyginamoji kinetinė energija ties ištekėjimu iš darbo rato siekia 2–14 %, greitaeigėse Kaplano turbinose – 16–50 %, o labai didelio našumo horizontaliose Kaplano turbinose – net 75 % hidroelektrinės slėgio aukščio. Daug šios energijos išnaudoti padeda platėjančios formos čiulpvamzdžiai, nes jie sumažina vandens ištekėjimo greitį, o kartu sumažėja ir kinetinė energija. Optimaliomis laikomos sąlygos, kai energijos nuostoliai sudaro ne daugiau kaip 0,5–2,5 % viso slėgio aukščio, t.y.  $h_w = (0,005 - 0,025)H$ .

Reaktyvinėse turbinose naudojami tiesūs ir su alkūne kūgiški bei lenkti platėjantys čiulpvamzdžiai (4.9 pav.).



4.9 pav. Čiulpvamzdžiai: a – tiesus kūgiškas; b – kūgiškas su alkūne; c – lenktas platėjantis



Tiesūs kūgiški čiuļpvamzdžiai (4.5 pav., 4.9 pav., a) yra paprastos konstrukcijos ir tinkami energetiniu požiūriu. Jie naudojami vertikalioms Frenzio turbinoms, kurių darbo rato skersmuo  $D_1 < 2$  m, ir propelerinėms bei Kaplano turbinoms, kurių  $D_1 < 1,6$  m. Čiuļpvamzdžių ilgis paprastai yra ne didesnis kaip 4–5 m.

Tiesūs kūgiški čiuļpvamzdžiai tinka ir horizontalioms Kaplano bei propelerinėms turbinoms, tik tuo atveju jie taip pat turi būti horizontalūs.

Čiuļpvamzdžiai su alkūne (4.9 pav., b) įrengiami horizontalioms Frenzio turbinoms, kurių  $D_1 < 0,84$  m. Už alkūnės eina tiesus kūgiškas čiuļpvamzdis.

Kad vandens čiuļrklė neatitrūktų nuo čiuļpvamzdžio sienelių, kūgiškumo kampas daromas 8–18°: mažesnis – ilgiems, didesnis – trumpiems čiuļpvamzdžiams. Čiuļpvamzdžio galas turi būti panardintas po vandeniu ne mažiau kaip 0,3–0,5 m.

Lenkti platėjantys čiuļpvamzdžiai (4.9 pav., c) tinka vertikalioms propelerinėms ir Kaplano turbinoms, kurių  $D_1 > 1,6$  m, ir Frenzio turbinoms, kurių  $D_1 > 2$  m (Потапов и др....1972).

#### 4.8. Čiuļpimo aukštis ir kavitacija

Čiuļpvamzdžiai hidroelektrinėse turi didelę energetinę ir ekonominę reikšmę, nes jų dėka galima sumažinti bent dalį prarandamos energijos, apie kurią rašyta 4.7 skyrelyje. Šį teiginį galima įrodyti pritaikius Bernulio lygtį pjūviams 3–3 ir 5–5, t.y. įtekėjimo į čiuļpvamzdį ir ištekėjimo iš jo pjūviams (žr. 4.5 pav.).

Palyginimo plokštuma 0–0 pasirenkama sutapatinta su žemutinio bjefo vandens lygiu (ŽVL). Pjūviams 3–3 ir 5–5 rašoma Bernulio lygtis:

$$H_s + \frac{P_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} = -a + \frac{P_5}{\rho g} + \frac{\alpha_5 v_5^2}{2g} + h_w, \quad (4.5)$$

čia  $H_s$  ir  $a$  – pjūvių 3–3 ir 5–5 padėties aukštis palyginimo plokštumos atžvilgiu m;

$\frac{P_3}{\rho g}$  ir  $\frac{P_5}{\rho g}$  – tų pačių pjūvių slėgio aukštis m;

$\frac{\alpha_3 v_3^2}{2g}$  ir  $\frac{\alpha_5 v_5^2}{2g}$  – tų pačių pjūvių greičio aukštis m;

$h_w$  – hidrauliniai kelio ir vietiniai nuostoliai, susidarantys vandeniui tekant čiuļpvamzdžiu m.

Slėgio aukštį pjūvyje 5–5 galima išreikšti taip:

$$\frac{P_5}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} + a, \quad (4.6)$$

čia  $\frac{P_a}{\rho g}$  – atmosferinis slėgio aukštis m.

Irašius šią reikšmę į (4.5) formulę, gaunama:

$$H_s + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} = -a + \frac{p_a}{\rho g} + a + \frac{\alpha_5 v_5^2}{2g} + h_w. \quad (4.7)$$

(4.7) lygties narius galima pertvarkyti taip:

$$\frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_3}{\rho g} = H_s + \frac{\alpha_3 v_3^2 - \alpha_5 v_5^2}{2g} - h_w. \quad (4.8)$$

(4.8) formulė rodo, kad čiuplvamzdžio pradžioje susidaro vakuumas, kurio dydis, išreiškus vandens stulpo aukščiu, yra lygus:

$$H_{vak.} = H_s + \frac{\alpha_3 v_3^2 - \alpha_5 v_5^2}{2g} - h_w. \quad (4.9)$$

Norint geriau išnaudoti slėgio aukštį, reikia kiek galima mažinti greitį  $v_5$ , t.y. čiuplvamzdžio gale. Optimaliomis laikomos sąlygos, kada slėgio aukščio nuostoliai ištekant iš čiuplvamzdžio yra ne didesni kaip 0,5–2,5 % nuo viso slėgio aukščio, t.y.

$$h_{wišt.} = \frac{\alpha_5 v_5^2}{2g} \leq (0,005 \dots 0,025) H. \quad (4.10)$$

Čiuplvamzdžio ilgį riboja leistinas čiuplpimo aukštis, o savo ruožtu leistiną čiuplpimo aukštį – *kavitacija* – toks reiškinys, kada prasideda šaltas vandens virimas. Žinoma, kad vanduo gali užvirti ne tik 100<sup>o</sup> C temperatūroje: kuo mažesnis slėgis, tuo žemesnė virimo temperatūra. Susidarius turbinos darbo rate dideliame vakuumui, šaltas vanduo pradeda virti, t.y. iš vandens išsiskiria garų burbuliukai. Vandeniui kartu su garų burbuliukais patekus į didesnio slėgio zoną, garai kondensuojasi ir atsiranda tuštumos, kurias akimirksniu užpildo vanduo. Šis procesas toks staigus, kad tose vietose susidaro hidraulinis smūgis, kurio metu slėgis pakyla iki kelių dešimčių ar net šimtų MPa. Kai tuštumos liečiasi su metalo ar betono paviršiumi, jie nuo smūgių ardomi mechaniškai.

Atsiradus kavitacijai, turbina dirba triukšmingai, kinta jos naudingumo koeficientas ir per keletą mėnesių gali pasidaryti nebetinkama eksploatuoti.

Reaktyvinėse turbinose kavitacijos reiškinį atsiradimą sąlygoja turbinos darbo rato padėtis žemutinio bjefo vandens lygio atžvilgiu. Toks turbinos darbo rato aukštis virš žemutinio bjefo vandens lygio, kai dar nevyksta kavitacija, vadinamas leistinu čiuplpimo aukščiu. Jis nustatomas pagal formulę (Гончаров, 1972) :

$$H_s = H_a - \delta H \text{ m}, \quad (4.11)$$

čia  $H_a$  – atmosferinis slėgis, išreikštas vandens stulpo aukščiu.  $H_a \approx 10$  m.;  
 $\delta$  – kavitacijos koeficientas;  
 $H$  – HE slėgio aukštis m.

Kavitacijos koeficientas  $\delta$  priklauso nuo turbinos tipo ir jos greitaeigumo. Pavyzdžiui, lėtaeigių Frensiu turbinų  $\delta = 0,036$ , greitaeigių Kaplano turbinų  $\delta = 0,835$ .

Čiulpimo aukštis, apskaičiuotas pagal (4.11) formulę, gali būti teigiamas arba neigiamas. Neigiamas čiulpimo aukštis rodo, kad turbinos darbo ratą reikia įrengti žemiau žemutinio bjefo vandens lygio.

#### 4.9. Turbinų panašumo dėsniai

Detaliai tirti turbinas natūralioje aplinkoje yra sudėtinga, o dažnai – visai neįmanoma, todėl paprastai jų tyrimai atliekami laboratorijose su mažomis turbinomis, vadinamomis modeliais. Modelio parametrus perskaičiuoti į realios turbinos parametrus galima tik tuomet, kai abi turbinos ir jų darbo režimai yra panašūs. Dėl to turbina ir jos modelis turi būti geometriškai, kinematiškai ir dinamiškai panašūs.

Geometriškai panašių turbinų atitinkami linijiniai matmenys yra proporcingi, kinematiškai – greičiai proporcingi, o jų vektoriai turi tą pačią kryptį, dinamiškai – kai Reinoldso  $Re$ , Frudo  $Fr$  ar kiti dinaminio panašumo kriterijai yra lygūs.

Panašių turbinų parametrai  $H$ ,  $Q$ ,  $P$ ,  $D_1$  ir  $n$  vieni su kitais susieti griežtomis priklausomybėmis, kuriomis naudojantis galima:

- 1) nustatyti turbinos parametrus pasikeitus slėgio aukščiui;
- 2) rasti vienos turbinos parametrus pagal kitos panašios turbinos parametrus esant vienodiems ir skirtingiems slėgio aukščiams.

**Pirmiausia nagrinėjamas atvejis**, kaip keičiasi turbinos parametrai  $n$ ,  $Q$  ir  $P$  keičiantis slėgio aukščiui nuo  $H_1$  iki  $H_2$ , t.y.  $D_1 = const$ , o  $H_1 \neq H_2$ .

Pagal sąlygas, pasirinktas konstruojant turbinas, vandens ištekėjimo į darbo ratą greitis  $v$ , turbinos sukimosi linijinis greitis  $u$  ir sukimosi dažnis  $n$  yra proporcingi laisvo ištekėjimo iš turbinos darbo rato greičiui  $v_l$ . Laisvo ištekėjimo greitį  $v_l$  galima apskaičiuoti pagal (4.3) formulę, t.y.

$$v_l = \varphi \sqrt{2gH}.$$

Pakitus slėgio aukščiui iš  $H_1$  į  $H_2$  pakinta ir laisvo ištekėjimo greitis. Taigi galima parašyti tokią priklausomybę:

$$\frac{v_{l_1}}{v_{l_2}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\varphi \sqrt{2gH_1}}{\varphi \sqrt{2gH_2}} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}}. \quad (4.12)$$

Iš (4.12) formulės galima išreikšti  $n_2$ :

$$n_2 = n_1 \frac{\sqrt{H_2}}{\sqrt{H_1}}. \quad (4.13)$$

Esant tam pačiam kreipračio atidarymui, keičiantis vandens greičiui nuo  $v_1$  iki  $v_2$ , tiesiog proporcingai kinta ir debitas, nes  $Q_1 = \omega v_1$  ir  $Q_2 = \omega v_2$ . Tada pagal (4.12) formulę galima parašyti tokią priklausomybę:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}}. \quad (4.14)$$

Iš čia:

$$Q_2 = Q_1 \frac{\sqrt{H_2}}{\sqrt{H_1}}. \quad (4.15)$$

Pakitus slėgio aukščiui ir debitui, kinta ir galia:

$$P_1 = 9,81Q_1 \cdot H_1 \cdot \eta ;$$

$$P_2 = 9,81Q_2 \cdot H_2 \cdot \eta ;$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1 H_1}{Q_2 H_2}. \quad (4.16)$$

Ištačius iš (4.14) formulės  $Q$  reikšmes gaunama:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{H_1}{H_2} \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}}. \quad (4.17)$$

Iš (4.17) formulės turbinos galia, esant slėgio aukščiui  $H_2$ , yra apskaičiuojama taip:

$$P_2 = P_1 \frac{H_2 \sqrt{H_2}}{H_1 \sqrt{H_1}}. \quad (4.18)$$

**Kitas nagrinėjamas atvejis** yra dvi panašios, bet skirtingų skersmenų turbinos, dirbančios esant pastoviam slėgio aukščiui, t.y.  $D_m \neq D_d$ , o  $H = const$ . Atitinkamai su indeksu  $m$  ir  $d$  žymimi ir kiti parametrai.

Remiantis (4.12) formule galima parašyti:

$$\frac{u_m}{u_d} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H}} \text{ arba } u_m = u_d = u. \quad (4.19)$$

$$u = \frac{\pi D_m n_m}{60} = \frac{\pi D_d n_d}{60} . \quad (4.20)$$

Iš čia

$$D_m \cdot n_m = D_d \cdot n_d \text{ arba } \frac{n_m}{n_d} = \frac{D_d}{D_m} . \quad (4.21)$$

Iš (4.21) formulės galima išreikšti  $n_d$  :

$$n_d = n_m \frac{D_m}{D_d} . \quad (4.22)$$

Esant vienodam vandens įtekėjimo į turbinos darbo ratą greičiui  $v$ , ir tam pačiam slėgio aukščiui  $H$ , debitas, patenkantis į turbiną, yra proporcingas įtekėjimo skerspločiui. Pažymėjus įtekėjimo angos aukštį raide  $b$ , galima rasti kreipračio plotų santykį  $a$ :

$$a = \frac{b_m \pi D_m}{b_d \pi D_d} = \frac{b_m D_m}{b_d D_d} . \quad (4.23)$$

Dažniausiai įtekėjimo angų aukščiai  $b$  išreiškiami kaip tam tikra dalis  $k$  nuo darbo rato skersmens, t.y.:

$$b_m = kD_m \text{ ir } b_d = kD_d . \quad (4.24)$$

Įstačius šias reikšmes į (4.23) formulę, gaunama:

$$a = \frac{kD_m D_m}{kD_d D_d} = \frac{D_m^2}{D_d^2} . \quad (4.25)$$

$$Q = \omega \cdot v; \quad v = const. \quad \omega_m = b_m \cdot \pi D_m; \quad \omega_d = b_d \cdot \pi D_d;$$

$$Q_m = b_m \cdot \pi D_m \cdot v; \quad Q_d = b_d \cdot \pi D_d \cdot v;$$

$$\frac{Q_m}{Q_d} = \frac{b_m \pi D_m v}{b_d \pi D_d v} = a = \frac{D_m^2}{D_d^2} . \quad (4.26)$$

$$Q_d = Q_m \frac{D_d^2}{D_m^2}. \quad (4.27)$$

Tarkim, kad abiejų turbinų naudingumo koeficientai yra lygūs, tai panašiu, bet skirtingo skersmens turbinų ryšys, kai  $H = const.$ , yra toks:

$$\frac{P_m}{P_d} = \frac{9,81Q_m H \eta}{9,81Q_d H \eta} = \frac{Q_m}{Q_d} = \frac{D_m^2}{D_d^2}. \quad (4.28)$$

Iš čia

$$P_d = P_m \frac{D_d^2}{D_m^2}. \quad (4.29)$$

**Iš tikrųjų dažniausiai** reikia žinoti panašiu, bet nevienodo dydžio turbinų parametrus esant skirtingiems slėgio aukščiams, t.y.  $D_m \neq D_d$  ir  $H \neq const.$  Tada panašumo lygtys yra tokios:

$$\frac{n_m}{n_d} = \frac{\sqrt{H_1} D_d}{\sqrt{H_2} D_m}; \quad (4.30)$$

$$\frac{Q_m}{Q_d} = \frac{\sqrt{H_1} D_m^2}{\sqrt{H_2} D_d^2}; \quad (4.31)$$

$$\frac{P_m}{P_d} = \frac{H_1 \sqrt{H_1} D_m^2}{H_2 \sqrt{H_2} D_d^2}. \quad (4.32)$$

**Paprastai turbinų laboratoriniai bandymai** atliekami su mažomis turbinomis ir esant mažiems slėgio aukščiams. Turbinų modeliai gaminami įvairių skersmenų ir bandomi esant įvairiems slėgio aukščiams. Kad būtų patogiau, gautus modelių parametrus įprasta perskaičiuoti į 1 m slėgio aukštį ir 1 m darbo rato skersmenį. Taigi tas sukimosi dažnis, debitas ir galia, kurią išvystytų turbina, esant slėgio aukščiui  $H = 1$  m ir darbo rato skersmeniui  $D = 1$  m, yra vadinama sąlyginiu sukimosi dažniu, debitu ir galia.

Koks yra ryšys tarp tirtos ir sąlyginės turbinų parametrų galima nustatyti pasinaudojant (4.30–4.32) formulėmis.

Tarkim, kad mažoji turbina yra duotoji, o didžioji – sąlyginė, tada:

$$n_m = n, \quad n_d = n'_1,$$

$$Q_m = Q, \quad Q_d = Q'_1,$$

$$P_m = P, \quad P_d = P'_1,$$

$$H_1 = H; \quad D_d = 1 \text{ m},$$

$$D_m = D; \quad H_2 = 1 \text{ m}.$$

Ištačius šias reikšmes į (4.30–4.32) formules, gaunama:

$$\frac{n}{n'_1} = \frac{\sqrt{H}}{D}; \quad n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D}, \quad (4.33)$$

$$\frac{Q}{Q'_1} = \sqrt{H} D^2; \quad Q = Q'_1 \sqrt{H} D^2, \quad (4.34)$$

$$\frac{P}{P'_1} = H \sqrt{H} D^2; \quad P = P'_1 H \sqrt{H} D^2. \quad (4.35)$$

(4.33–4.35) ir yra pagrindinės turbinų panašumo lygtys.

Išvedant panašumo lygtis buvo laikomasi tos nuostatos, kad panašių turbinų yra vienodi naudingumo koeficientai, tačiau iš tikrųjų taip nėra. Panašiai kaip ir kanaluose ar vamzdžiuose, esant pastoviam greičiui, hidrauliniai nuostoliai mažėja, didėjant kanalo ar vamzdžio skerspločiui, taip ir turbinose, didėjant turbinos matmenims, energijos nuostoliai mažėja. Mažėjant nuostoliams didėja turbinos naudingumo koeficientas. Apskaičiuoti didesniosios turbinos maksimalų naudingumo koeficientą  $\eta_{T \max}$ , žinant mažesniosios arba modelio naudingumo koeficientą  $\eta_{M \max}$ , galima pagal tokią formulę (Потапов ..., 1972; Гончаров, 1972):

$$\eta_{T \max} = 1 - (1 - \eta_{M \max})^5 \sqrt{\frac{D_M}{D_T}}, \quad (4.36)$$

čia  $D_M$  – modelio darbo rato skersmuo;  
 $D_T$  – didesniosios turbinos darbo rato skersmuo;

$\eta_{M \max}$  - modelio maksimalus naudingumo koeficientas;  
 $\eta_{T \max}$  - turbinos maksimalus naudingumo koeficientas.

Kitos naudingumo koeficiento reikšmės apskaičiuojamos pagal šią tiesioginę priklausomybę:

$$\eta_T = \eta_M \frac{\eta_{T \max}}{\eta_{M \max}} . \quad (4.37)$$

Naudingumo koeficientus perskaičiuoti taip pat galima naudojantis naudingumo koeficiento perskaičiavimo grafikais.

#### 4.10. Turbinų charakteristikos

Pagrindinių turbinos parametrų tarpusavio priklausomybė, išreikšta grafiškai, vadinama charakteristikomis. Pagrindinės turbinų charakteristikos yra tokios:

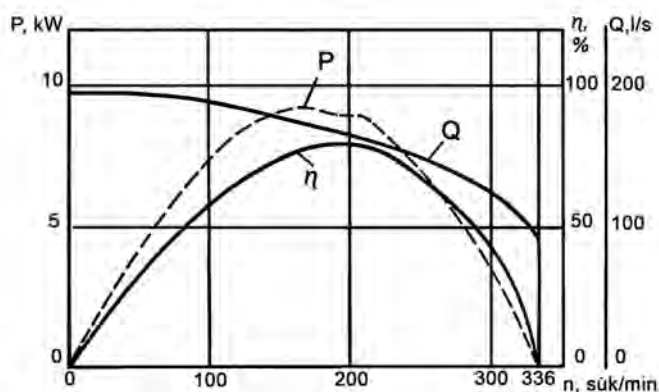
- 1) sukimosi dažnio;
- 2) universalioji;
- 3) darbo;
- 4) eksploatacinė.

**Sukimosi dažnio charakteristika** rodo turbinos naudingumo koeficiento, debito ir galios priklausomybę nuo jos sukimosi dažnio, esant pastoviam slėgio aukščiui  $H$  ir pastoviam kreipračio atidarymui  $a$  (4.10 pav.), t.y.:

$$\eta = f_1(n, a) ; \quad (4.38)$$

$$Q = f_2(n, a) ; \quad (4.39)$$

$$P = f_3(n, a) . \quad (4.40)$$

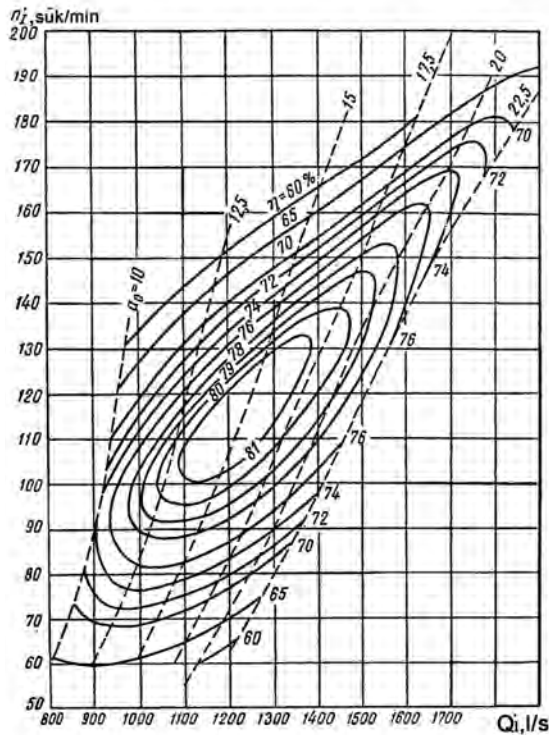


4.10 pav. Turbinos sukimosi dažnio charakteristika



**Universioji charakteristika** išreiškia turbinos naudingumo koeficiento priklausomybę nuo sąlyginio debito ir sąlyginio sukimosi dažnio, esant pastoviam slėgio aukščiui  $H$  (4.11 pav.), t.y.:

$$\eta_M = f(Q'_l, n'_l). \quad (4.41)$$



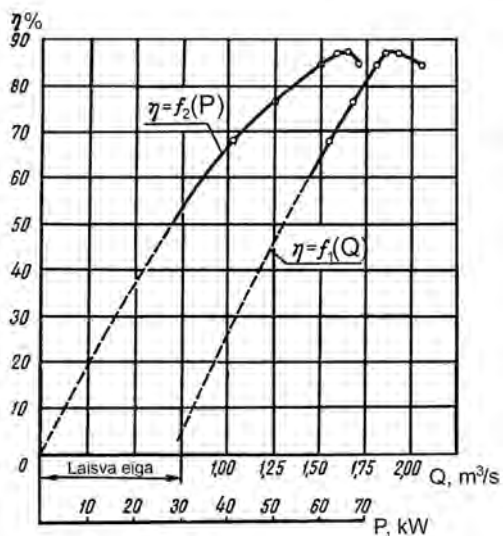
4.11 pav. Turbinos universioji charakteristika

**Darbo charakteristika** rodo turbinos naudingumo koeficiento priklausomybę nuo debito arba galios esant pastoviam sukimosi dažniui  $n$ , t.y.:

$$\eta = f_1(Q); \quad (4.42)$$

$$\eta = f_2(P). \quad (4.43)$$

Darbo charakteristika (4.12 pav.) sudaroma naudojantis universaliąja charakteristika.

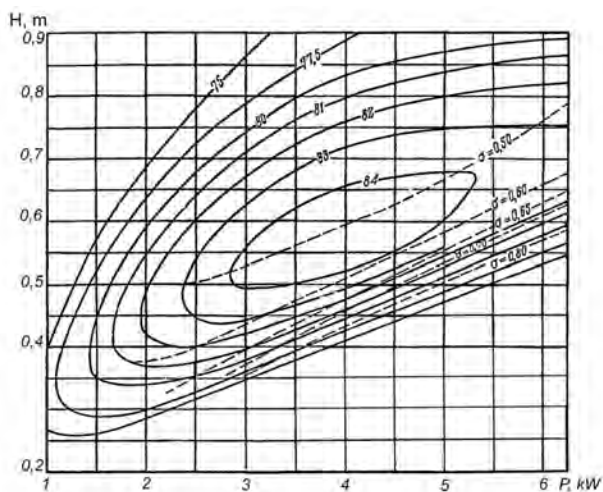


4.12 pav. Turbinos darbo charakteristika

**Ekspluatacinė charakteristika** ypač reikalinga eksploatuojant hidroelektrinę, nes ji rodo turbinos naudingumo koeficiento priklausomybę nuo debito arba galios esant pastoviam sukimosi dažniui  $n$  ir kintančiam slėgio aukščiui  $H$  (4.13 pav.), t.y.:

$$\eta = f_1(Q, H), \quad (4.44)$$

$$\eta = f_2(P, H). \quad (4.45)$$



4.13 pav. Turbinos eksploatacinė charakteristika

#### 4.11. Turbinų tipo ir agregatų skaičiaus parinkimas

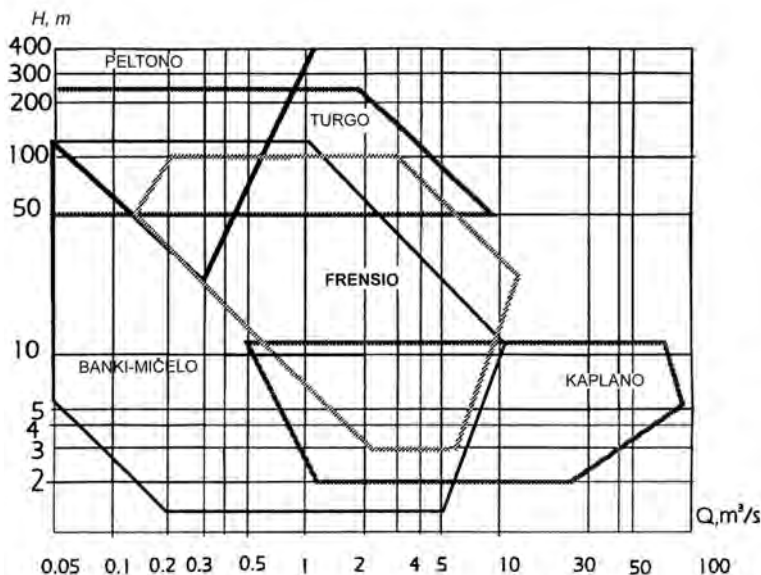
Pagal atliktus vandens ūkio ir energetinius skaičiavimus nustatoma hidroelektrinės galia. Apskaičiavus hidroelektrinės galią, vidutinį, maksimalų ir minimalų slėgio aukštį bei skaičiuojamąjį ir minimalų debitą, parenkamos turbina. Turbina su generatoriumi ir sūkių perdavimo mechanizmu sudaro hidroagregatą. Hidroagregatų skaičius parenkamas vadovaujantis tokiais samprotavimais:

- 1) didinant agregatų skaičių, brangsta hidroelektrinės statyba, bet kartu didėja elektros energijos tiekimo vartotojams patikimumas. Kai agregatų pakankamai daug, jie gali dirbti su aukščiausiu naudingumo koeficientu;
- 2) agregatų skaičius priklauso nuo turbinų tipo. Kaplano, kaušinėms ir lėtaeigėms Frenzio turbinoms agregatų gali būti ir mažiau, o greitaeigėms Frenzio ir ypač propelerinėms – daugiau, tik tuomet jos dirbs optimaliai;
- 3) greitaeigių turbinų sukimosi dažnis didesnis, todėl ir pačios turbina, ir generatoriai yra mažesni, taigi reikia ir mažesnio HE pastato. Tačiau, didėjant greitaeigumui, didėja kavitacijos koeficientas, mažėja leistinas čiulpimo aukštis, todėl turbinas reikia įrengti žemiau žemutinio bjefo vandens lygio, o tai brangina HE statybą;
- 4) agregatų skaičius taip pat priklauso ir nuo to, ar HE dirba izoliuotai, ar energetinėje sistemoje. Izoliuotai HE reikia daugiau agregatų, o dirbančiai energetinėje sistemoje – gali būti ir vienas.

Mažose hidroelektrinėse dažniausiai įrengiami 1–3 agregatai. Kiek įrengti agregatų, galutinai turėtų lemti ekonominiai skaičiavimai, atlikti keletui variantų.

Nustačius agregatų skaičių, apskaičiuojama vieno agregato galia. Toje pačioje HE dažniausiai projektuojami vienodos galios agregatai.

Žinant turbina galią ir skaičiuojamąjį slėgio aukštį, pagal turbinų parinkimo grafiką (4.14 pav.) parenkamas turbina tipas.

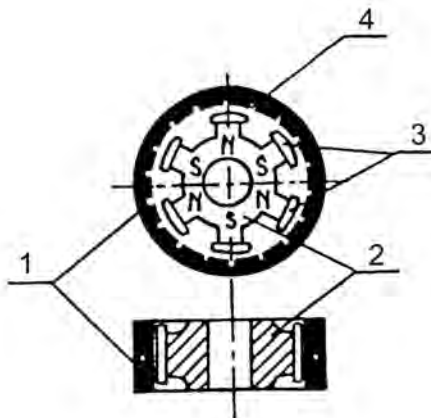


4.14 pav. Turbinų parinkimo grafikas

Svarbiausi turbinos parametrai – darbo rato skersmuo  $D$  ir sukimosi dažnis  $n$  – nustatomi pagal turbinų parinkimo grafikus, kurie sudaryti atskirai kiekvienam turbinų tipui. Parinktai turbinai apskaičiuojami arba pagal grafikus nustatomi maksimalus ir minimalus debitai, leistinas čiulpimo aukštis, turbinos kameros ir čiulpvamzdžio matmenys.

#### 4.12. Hidrogeneratoriai

Turbinų mechaninei sukimosi energijai paversti elektros energija mažose hidroelektrinėse dažniausiai naudojami kintamosios srovės trifaziai sinchroniniai generatoriai. Sinchroninį generatorių sudaro dvi pagrindinės dalys: statorius ir rotorius (4.15 pav.).



4.15 pav. Hidrogeneratoriaus schema: 1 – statorius; 2 – rotorius; 3 – rotoriaus poliai; 4 – grioveliai apvijoms

Statorius yra nejudama generatoriaus dalis, susidedanti iš korpuso ir šerdies. Generatoriaus korpusas gali būti ketinis arba plieninis, o didesnės galios generatorių – suvirintas iš atskirų dalių.

Statoriaus šerdis (magnetolaidis) gaminama iš lakštinio elektrotechninio 0,5 arba 0,35 mm storio plieno. Iš lakštų šampuojami žiedai, kurie iš abiejų pusių izoliuojami laku. Šerdies lakštuose padarytos išpjovos sudaro griovelius, į kuriuos sudedamos apvijos. Statoriaus apvija daroma iš sekcijų, paprastai pagamintų iš varinių apvalaus arba stačiakampio skerspjūvio laidų. Apvijos ričių skaičius parenkamas ir jos išdėstomos statoriuje taip, kad magnetinio lauko polių porų skaičius būtų toks pat kaip ir rotoriaus.

Rotorius yra kartu su vėlu besisukanti generatoriaus dalis. Jis sudarytas iš cilindro, prie kurio pritvirtintos polių šerdys su ritėmis. Rotoriaus poliai, išdėstyti greta vienas kito, sudaro ištisinį išorinį cilindrinį paviršių.

Pagrindiniai hidrogeneratorių parametrai yra galia, įtampa, sukimosi dažnis, naudingumo koeficientas, galios koeficientas  $\cos\varphi$  ir kintamosios srovės dažnis.

Skaičiuojama remiantis pilnaja (tariamąja), aktyviaja ir reaktyviaja generatoriaus galia.

Pilnoji generatoriaus galia matuojama kVA (kilovoltamperais) ir apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$S_g = \sqrt{3}UI, \quad (4.46)$$

čia  $\sqrt{3}$  - koeficientas, apibūdinantis trifazę sistemą;

$U$  – linijinė generatoriaus įtampa kV;

$I$  – generatoriaus apkrovos srovė A.

Aktyvioji (nominali) generatoriaus galia matuojama kilovatais ir apskaičiuojama taip:

$$P_g = S_g \cos \varphi. \quad (4.47)$$

Reaktyvioji generatoriaus galia matuojama reaktyviaisiais kilovoltamperais (kVAr) ir apskaičiuojama taip:

$$Q_g = S_g \sin \varphi. \quad (4.48)$$

Formulėse (4.47) ir (4.48)  $\varphi$  yra kampas tarp srovės ir įtampos vektorių, o  $\cos \varphi$  – galios koeficientas; nedidelių generatorių jis yra 0,8–0,85.

Verčiant turbinos mechaninę energiją elektros energija, generatoriuje susidaro energijos nuostoliai, kuriuos įvertina generatoriaus naudingumo koeficientas. Nedidelių generatorių naudingumo koeficientas  $\eta_g = 0,9 - 0,95$ . Taigi aktyvioji (nominali) generatoriaus galia būna truputį mažesnė negu turbinos ir lygi:

$$P_g = P_t \eta_g, \quad (4.49)$$

čia  $P_t$  – hidroturbinos galia;

$\eta_g$  - hidrogenatoriaus naudingumo koeficientas.

Žemos įtampos – 400, 660 V generatoriai gaminami nedidelės (iki 2500 kW) galios.

Kintamosios srovės dažnis  $f$  Hz (hercais) priklauso nuo generatoriaus sukimosi dažnio ir polių porų skaičiaus:

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (4.50)$$

čia  $p$  – generatoriaus polių porų skaičius;

$n$  – generatoriaus sinchroninis sukimosi dažnis (sūk./min).

Lietuvoje standartinis kintamosios srovės dažnis  $f = 50$  Hz. Jį atitinkantis polių porų skaičius ir generatoriaus sukimosi dažnis yra tokie (Masiokas, 1989):

$p$	2	3	4	5	7	8	10	12	14	16
$n$ (sūk./min)	1500	1000	750	500	428,6	375	300	250	214	187,5
$p$	18	20	22	24	30	36	40	44	48	
$n$ (sūk./min)	167	150	136,4	125	100	83,3	75	68,1	62,5	

Pagal veleno padėtį hidrogenatoriai gali būti vertikalūs ir horizontalūs. Mažose HE dažniau naudojami horizontalūs generatoriai.

Norint įjungti mažą hidroelektrinę į pakankamai galingą energetinę sistemą, hidroelektrinėje galima įrengti kintamosios srovės asinchroninius generatorius, kurie, palyginti su sinchroniniais, yra paprastesni, pigesni, atsparesni, patikimai dirba.

Tos pačios galios generatoriaus matmenys, kartu ir kaina, tuo mažesni, kuo didesniu dažniu jis sukasi. Todėl, kai generatorius su turbina jungiami vienu velenu, tikslingiau pasirinkti greitaeigės propelerines ar Kaplano turbinas, kurių, esant tam pačiam slėgio aukščiui, kur kas didesnis sukimosi dažnis negu Frenzio turbinų.

Hidrogenatoriai parenkami pagal reikalingą aktyviąją (nominalią) galią  $P_g$  ir sukimosi dažnį  $n$ . Jeigu kataloge nėra reikiamos galios generatoriaus, galima parinkti šiek tiek didesnės galios (iki 10 %) generatorių.

Galutinai hidrogenatoriai parenkami išnagrinėjus keletą projektuojamos hidroelektrinės variantų su skirtingomis turbinomis. Svarbiausias kriterijus – ekonomiškumas.

Kai generatoriaus ir turbino sukimosi dažnis nesutampa arba norima pakeisti sukimosi ašį iš horizontalios į vertikalią ar atvirkščiai, generatorių su turbina reikia jungti ne tiesiogiai, o per pavarą. Mažosiose HE dažniausiai naudojamos diržinės arba krumpliaratinės pavaros. Diržinė pavara gali būti su plokščiu arba pleištinu diržu.

Pavaros parenkamos pagal agregato galią, turbino ir generatoriaus tarpusavio velenų padėtį, taip pat pagal perdavimo skaičių.

Hidroelektrinės elektrinei įrangai, be generatorių, dar priskiriami jėgos transformatoriai, kontrolės ir matavimo prietaisai bei automatizacijos priemonės.

#### **4.13. Turbinų reguliavimas**

Turbino galia turi atitikti generatoriaus apkrovą, kuri nėra pastovi ir priklauso nuo elektros energijos poreikio. Pavyzdžiui, sumažėjus elektros energijos poreikiui, sumažėja ir generatoriaus apkrova ir turbina kartu su generatoriumi ima suktis greičiau. Pasikeitus sukimosi dažniui, kinta kintamosios srovės dažnis ir blogėja gaminamos elektros energijos kokybė. Norint to išvengti, būtina reguliuoti turbinų galią. Taigi, reguliuojant turbinų galią, svarbiausia yra palaikyti hidroagregato pusiausvyrą pasikeitus generatoriaus apkrovai. Tai atliekama keičiant kreipračio menčių atidarymą ir kartu per turbiną praleidžiamą debitą.

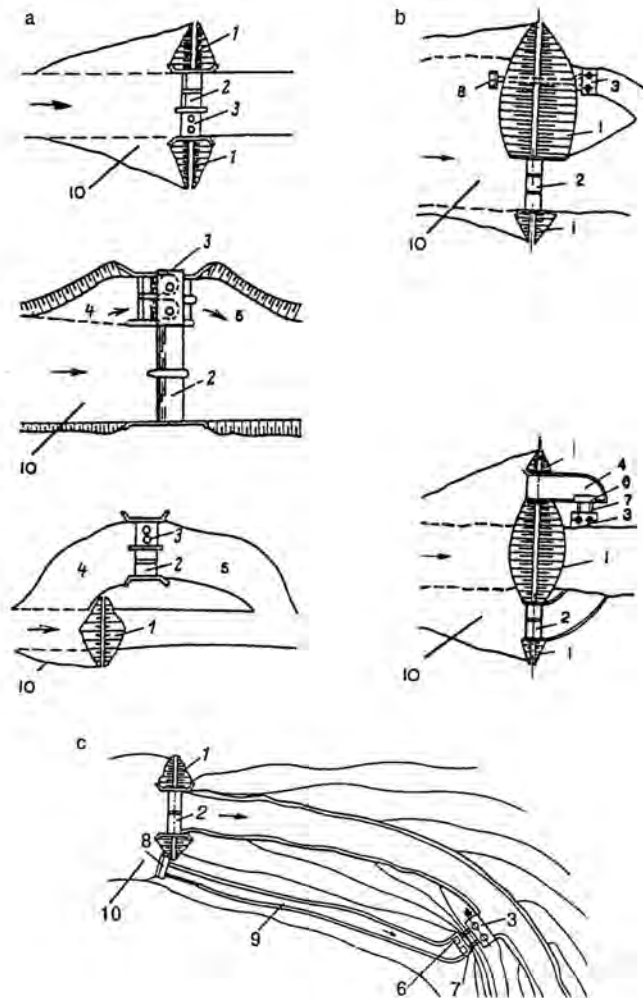
Turbino reguliuojamos dažniausiai automatiniais reguliatoriais. Jais galima paleisti agregatą, keisti turbino galią keičiant kreipračio menčių atidarymą, avarijos atveju greitai sustabdyti turbiną. Regulatoriai yra elektriniai arba hidrauliniai.

Mažose hidroelektrinėse dažnai įrengiami paprastesnės konstrukcijos reguliatoriai arba jie iš viso neįrengiami, t.y. turbino esti su nereguliuojamais kreipračiais bei pastoviai pritvirtintomis darbo rato mentėmis. Agregatai be reguliatorių gali dirbti tik energetinėje sistemoje arba tiekti energiją vartotojui per lygintuvus ir dažnio keitiklius, kuriais gaunamas norimas srovės dažnis.

## 5. HIDROELEKTRINIŲ STATINIAI

### 5.1. Užtvankinių ir derivacinių hidroelektrinių komponavimo schemas ir pagrindiniai hidrotechnikos statiniai

Hidroelektrinės hidromazgą sudaro ne tik pati hidroelektrinė, bet ir visi kiti pagrindiniai ir pagalbiniai hidrotechnikos statiniai bei įvairūs kitos paskirties statiniai, pvz., administraciniai, komunaliniai ir kt. Visų statinių išdėstymas plane vadinamas hidromazgo komponavimu. Savaime suprantama, kad vienaip statiniai išdėstomi projektuojant užtvankines HE, kitaip – derivacines arba mišrias. Keletas užtvankinių ir derivacinių HE komponavimo schemų pateikta 5.1 pav. (Jablonskis ir kt., 1996).



5.1 pav. Hidroelektrinės hidromazgo komponavimo schemas: a – užtvankinės; b – prieužtvankinės; c – derivacinės; 1 – užtvanka; 2 – vandens potvynių pralaida; 3 – hidroelektrinės pastatas; 4 – atvedimo kanalas; 5 – nuvedimo kanalas; 6 – slėginis baseinas; 7 – slėginiai vamzdžiai; 8 – vandens imtuvas; 9 – derivacinis kanalas; 10 – tvenkinys

Užtvankinių HE hidromazgo pagrindiniai hidrotechnikos statiniai yra užtvanka, vandens pertekliaus pralaida ir hidroelektrinės pastatas. Vaginių hidroelektrinių HE pastatai paprastai sudaro užtvankos dalį ir, kaip ir užtvanka, atlaiko aukštesnio bjefo hidrostatinį vandens slėgį, todėl turi būti pakankamai tvirti. Be to, turi būti ypač gera hidroizoliacija, kad per pastato sienas nesifiltruotų vanduo.

Prieužtvankinėse HE vandens slėgį atlaiko tik užtvanka, o HE pastatas statomas žemutiniame bjefe prie užtvankos, atvedant į jį vandenį vamzdžiais arba dalį vandens – kanalu, dalį – vamzdžiais (5.1 pav.).

Pagalbiniai hidrotechnikos statiniai užtvankinių HE hidromazguose yra laivybos šliuzai, žuvitakiai, kitų naudotojų vandens ėmimo įrenginiai ir kt. Be to, HE hidromazge gali būti įvairių civilinių statinių: kelių, tiltų, administracinių pastatų, vandentiekio ir kanalizacijos statinių ir kt.

Derivacinės HE turi du hidromazgus: aukštesnį ir žemutinį. Aukštesnis hidromazgas dar vadinamas galviniu, jis reguliuoja vandens tiekimą į derivacinį kanalą ir praleidžia potvynių vandenį. Žemutiniame hidromazge statomas HE pastatas su vandens atvedimo ir nuvedimo įrenginiais. Aukštesnį ir žemutinį hidromazgus jungia derivacinis kanalas arba tunelis beslėgės derivacijos atveju ir slėginis vamzdynas – slėginės derivacijos atveju (5.1 pav.).

Hidrotechninių statinių tipas ir konstrukcija priklauso nuo HE slėgio aukščio, skaičiuojamųjų maksimalių potvynių debitų, nuo hidroagregatų dydžio ir skaičiaus, hidromazgo vietos, topografinių, geologinių ir hidrogeologinių sąlygų ir kt. Detaliai hidrotechnikos statinių konstrukciją, jų projektavimo ir statybos klausimus nagrinėja Hidrotechnikos statinių dalykas.

## 5.2. Hidroelektrinių pastatai

Hidroelektrinės pastato paskirtis yra talpinti hidroagregatus su pagalbiniais mechaniniais ir elektriniais įrenginiais. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys HE pastatų tipą, konstrukciją bei matmenis, yra slėgio aukščio sudarymo būdas, hidroelektrinės pastato vieta hidromazge ir turbinų konstrukcija.

Pagal slėgio aukščio sudarymo būdą HE pastatai skirstomi į slėginius, įrengtus užtvankose ir perimančius aukštesnio bjefo hidrostatinį slėgį, ir neslėginius, pastatytus šalia užtvankų bei derivacijos pabaigoje.

Vienokie HE pastatai projektuojami įrengiant juose reaktyvines turbinas, kitokie – aktyvines.

Hidroelektrinių pastatuose skiriamos povandeninė ir viršvandeninė dalys. Jas paprastai skiria viršutinės dalies grindys. Povandeninėje pastato dalyje paprastai praeina visi vandentakiai, montuojamos turbinos, o kartais ir visas kapsulinis hidroagregatas. Viršvandeninėje pastato dalyje montuojami generatoriai, turbinų regulatoriai ir kiti hidroagregatus aptarnaujantys mechaniniai ir elektriniai įrenginiai. Patalpa, kurioje yra pagrindiniai įrenginiai, vadinama mašinų sale. Joje paprastai paliekama vietos montavimo aikštelei, prie kurios įrengiamas kranas, kad galima būtų mechanizmus pakelti, transportuoti ir remontuoti. Didesnėse HE valdymo pultas, elektriniai paskirstymo įrenginiai, alyvos, suspausto oro ir kiti įrenginiai statomi atskirose pastato patalpose, o mažesnėse HE jie talpinami mašinų salės pakraščiuose.

HE pastatų konstrukcija labai priklauso nuo turbinų tipo. Pastatų su reaktyvinėmis turbinomis povandeninėje dalyje įrengiamos turbinų kameros, čiuulpvamzdžiai, tuo tarpu



pastatų su aktyvinėmis turbinomis povandeninė dalis daug paprastesnė, nes čia nereikia įrengti turbinų kamerų bei čiulpvamzdžių.

Mažosios HE povandeninė pastato dalis dažniausiai statoma iš betono ir gelžbetonio, nors kartais gali būti naudojamos ir kitokios statybinės medžiagos (medis, akmuo). Viršvandeninė pastato dalis statoma kaip ir kiti pramoniniai pastatai.

### **5.3. Mažųjų hidroelektrinių projektavimo ypatumai**

1990 m. atkūrus nepriklausomybę Lietuvoje prasidėjo ir mažosios hidroenergetikos atgimimas, nes pokario laikotarpiu (iki 1961 m.) daugelis pastatytų mažųjų HE iki 1982 m. buvo likviduotos. 1990 m. Lietuvoje buvo likę tik 12 veikiančių mažųjų HE. 2007 m. pradžioje Lietuvoje jau veikė per 80 mažųjų HE. Dauguma jų pastatytos prie esamų tvenkinių panaudojant privatų kapitalą.

Lietuvoje įrengta daugiau kaip 400 tvenkinių, kurių vandens paviršiaus plotas didesnis kaip 5 ha, ir dar apie 700 mažesnių. Kadangi pagrindiniai hidrotechnikos statiniai sudaro apie pusę HE statybos kainos (Jablonskis ir kt., 1996), be to, nereikia naujai tvenkti upės, mažąsias HE tikslinga projektuoti prie esamų tvenkinių. Projektuojant HE prie esamo tvenkinio iš karto jau žinomas vienas pagrindinių HE parametrų – slėgio aukštis. Taip pat dažniausiai yra žinomi ir upės debitai, ypač maksimalūs, nes hidrologiniai skaičiavimai paprastai atliekami projektuojant užtvanką ir vandens pertekliaus pralaidą. Taigi projektuojant mažąją HE reikia parinkti tik skaičiuojamąjį debitą, nustatyti įrengtą (instaliuotą) HE galią ir galimą energijos išdirbį.

Kadangi hidroelektrinės komponavimo schema priklauso nuo topografinių, geologinių ir kt. sąlygų, todėl kiekviena HE, nors ir pakankamai maža, projektuojama individualiai. Projektuotojas turi turėti pakankamai žinių apie hidrologiją, hidrogeologiją, hidromašinas, aplinkos apsaugą ir kitokių, todėl net ir mažosios HE projektavimą geriausia patikėti specialistams, turintiems tokių statinių projektavimo patirtį. Parengtą HE projektą reikia suderinti su atitinkamomis institucijomis, tarp jų ir aplinkosaugos. Suderinus projektą reikia gauti statybos leidimą ir tada galima pradėti HE statybos darbus, kuriuos taip pat tikslinga patikėti specialistams. Pastatyta HE turi būti perduota eksploatacijon ir tik tada ji gali gaminti ir perduoti pagamintą elektros energiją (Mažųjų HE..., 2001).

### **5.4. Hidroelektrinių eksploatacija**

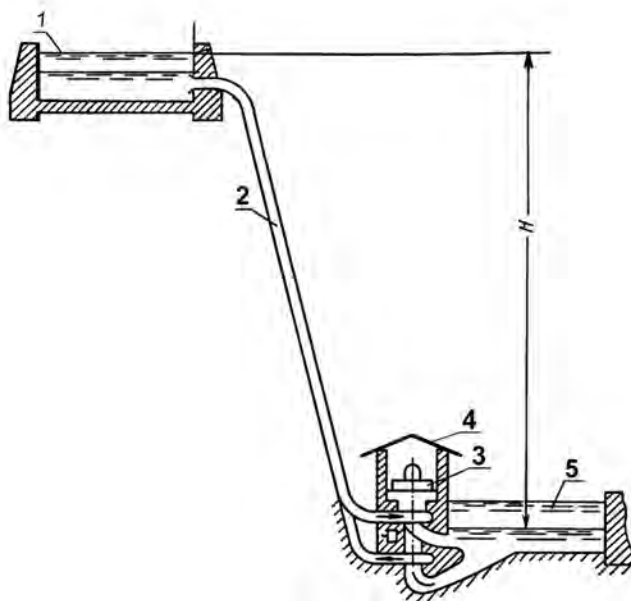
Eksploatuojant hidroelektrinę, svarbiausia parinkti jos darbo režimą taip, kad kaip galima geriau būtų išnaudoti vandens ištekliai ir gauta didžiausia ekonominė nauda, žinoma, nepažeidžiant aplinkosaugos reikalavimų. Be to, HE eksploatacijai priklauso ir tinkama hidrotechnikos statinių priežiūra, hidroenergetinių įrenginių patikimas darbas.

Svarbiausias veiksnys, apibūdinantis HE eksploataavimo ypatumus, yra jos galios ir energijos išdirbio priklausomybė nuo besikeičiančių gamtinių sąlygų, pirmiausia hidrologinių. Kadangi hidrologinės sąlygos visą laiką keičiasi, nustatyti HE darbo režimą iš anksto ilgam eksploatacijos laikotarpiui neįmanoma. Jį būtina nuolat koreguoti. Vienoks jis, kai HE dirba energetinėje sistemoje, ir kitoks – kai izoliuotai. Energetinėje sistemoje dirbančios HE paprastai dengia energijos poreikio pikus, o izoliuotų HE darbo režimas turi būti toks, kad normaliai aprūpintų elektros energija vartotojus.

Hidroelektrinės hidrotechnikos statinius ir hidroenergetinius bei pagalbinus įrenginius būtina reguliariai prižiūrėti ir prireikus remontuoti.

### 5.5. Hidroakumuliacinės elektrinės

Hidroakumuliacinė elektrinė (HAE) yra sudėtingas inžinerinis hidrotechnikos kompleksas, turintis dvi vandens saugyklas – aukštutinį ir žemutinį baseinus (5.2 pav.).



5.2 pav. Hidroakumuliacinės elektrinės schema: 1 – aukštutinis baseinas; 2 – slėginis vamzdis; 3 – hidroagregatas; 4 – HAE pastatas; 5 – žemutinis baseinas

Kai energetinės sistemos apkrova maža ir yra daug pigios perteklinės energijos, HAE agregatai, įjungti siurblio režimu, kelia vandenį iš žemutinio baseino į aukštutinį, taip sukaupdami (akumuliuodami) vandens potencinę energiją. Esant sistemoje energijos poreikiui, vanduo iš aukštutinio baseino per turbinas leidžiamas į žemutinį baseiną ir HAE gamina elektros energiją, t.y. HAE dirba kaip įprasta hidroelektrinė.

Taigi energetinėje sistemoje hidroakumuliacinė elektrinė atlieka dvi pagrindines funkcijas:

- 1) išlygina sistemos apkrovos netolygumus, kartu reguliuoja įtampą ir dažnį, t.y. gerina elektros energijos kokybę;
- 2) užtikrina greitą rezervinę galią, nes HAE agregatai visu pajėgumu į tinklą gali įsijungti greičiau nei per 2 minutes. Todėl įprastinėmis sąlygomis dalis HAE agregatų yra rezerve, pasiruošę automatiškai pradėti veikti nuo energetinės sistemos priešavarinės automatikos ir operatyviai kompensuoti galios deficitą.

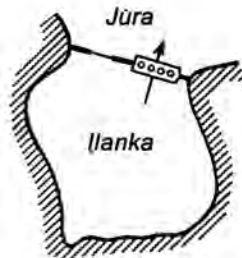
Lietuvoje veikia Kruonio HAE. Jos projektinė galia buvo 1600 MW, t.y. 8 hidroagregatai po 200 MW kiekvienas. Dabar įrengti 4 hidroagregatai po 225 MW, bendra galia 900 MW. Kruonio HAE pagrindinė paskirtis – greitas energetinės sistemos galios rezervas ir sistemos paros apkrovų netolygumų reguliavimas.

## 5.6. Potvynių–atoslūgių elektrinės

Saulės ir Mėnulio tarpusavio trauka pasauliniame vandenyne sukelia potvynius ir atoslūgius. Kas 6 val. 12 min. vandens pakilimą keičia vandens atoslūgis, t.y. maždaug 4 kartus per parą. Vandens lygio svyravimo amplitudė nėra pastovi laiko atžvilgiu ir priklauso nuo Saulės ir Mėnulio tarpusavio padėties. Be to, svyravimo amplitudė priklauso nuo vietovės geografinės padėties, kranto linijos formos, gylio, dugno reljefo ir kt. Didžiausi tokie potvyniai–atoslūgiai pasaulyje esti Šiaurės Amerikoje Fandžio (Fundy) įlankoje – 19,6 m, Anglijoje Severno (Sewern) upės žiotyse – 16,3 m, Prancūzijoje prie Granvilio (Granville) – 14,7 m, Ochotsko jūros Penžino įlankoje – 11 m, Baltosios jūros Mezeno įlankoje – 10 m ir kt. (Губин и др., 1972).

Potvynių–atoslūgių elektrinių statybai reikia palankių topografinių sąlygų, t.y. pakankamai didelės jūros įlankos su kuo trumpesniu vandens pratekėjimo frontu. Deja, tokių vietų pasaulyje nėra daug. Lietuvoje apskritai tokia elektrinė negali būti pastatyta, nes Baltijos jūroje tokie potvyniai–atoslūgiai labai maži.

Potvynių–atoslūgių elektrinės principinė schema pateikta 5.3 paveiksle.



5.3 pav. Potvynių–atoslūgių elektrinės schema

Jūros įlanka nuo jūros atitveriamą užtvanka, kurioje gali būti įrengta pakankamai daug hidroagregatų. Vieni hidroagregatai gali praleisti vandenį į įlanką, kiti – iš įlankos. Kylant vandens lygiui jūroje dirba vieni agregatai, o slūgstant – kiti (žinoma, jeigu įlankoje vandens lygis bus aukštesnis negu jūroje). Ir taip per parą kartojasi 4 kartus. Be abejo, yra laikotarpiai, kai jūros ir įlankos vandens lygiai yra vienodi, t.y. nėra slėgio aukščio, ir tada hidroagregatai nesisuka. Taigi potvynių–atoslūgių elektrinių darbo režimas yra cikliškas, t.y. tam tikrais paros laikotarpiais jos veikia, tam tikrais – neveikia.

## 6. HIDROELEKTRINIŲ TECHNINIAI EKONOMINIAI RODIKLIAI

Kaip jau minėta, hidroenergetiniai išteklių priklauso atsinaujinantiems energijos šaltiniams ir jų naudojimas yra skatinamas. Tačiau hidroelektrinių statyba, ypač tam tikslui statant naujas užtvankas, padaro ir daug blogo (sutrikdomas natūralus upės hidrologinis režimas, užliejamos žemės, pasikeičia upės ekosistema ir kt.). Todėl galutinis sprendimas, statyti HE ar ne, turi būti priimamas gerai išnagrinėjus visus plusus ir minusus ekologiniu, ekonominiu, socialiniu ir kitokiais aspektais.

Svarbiausi HE ekonominiai rodikliai yra statybos kaina, vienos kilovatvalandės savikaina ir HE statybos išlaidų atsipirkimo laikas (Vyčius ir Kustienė, 2007).

Apytikriai HE statybos kaina nustatoma taip:

$$K = P \cdot k \text{ Lt}, \quad (6.1)$$

čia  $P$  – įrengta (instaliuota) HE galia kW;

$k$  – vieno kW įrengimo kaina Lt.

Įrengta (instaliuota) galia yra lygi visų hidroelektrinėje įrengtų agregatų optimaliai suminei galiai.

Vieno kW įrengimo kaina Lietuvoje kinta nuo 4000 iki 12000 Lt (Burneikis ir Jablonskis, 1998; Mažųjų HE..., 2001).

Vienos kilovatvalandės (1 kWh) savikaina nustatoma taip:

$$S = \frac{I}{E} \text{ Lt/kWh}, \quad (6.2)$$

čia  $I$  – HE eksploatacijos išlaidos per metus Lt;

$E$  – HE elektros energijos gamyba kilovatvalandėmis per metus.

HE eksploatacijos išlaidos susideda iš atskaitymų kapitaliniam ir einamajam remontui, išlaidų medžiagoms, reikalingoms HE eksploatacijai, įsigyti, darbo užmokesčio aptarnaujančiam personalui ir kt.

HE statybos išlaidų atsipirkimo laikas nustatomas taip:

$$T = \frac{K}{G} \text{ metai}, \quad (6.3)$$

čia  $K$  – HE statybos kaina, apskaičiuota pagal (6.1) formulę arba sąmatą, sudarytą projektuojant HE Lt;

$G$  – grynosios metinės pajamos (netto) Lt.

Grynosios metinės pajamos  $G$  gaunamos iš bendrųjų pajamų  $B$ , gautų pardavus elektros energiją, atėmus eksploatacijos išlaidas  $I$ . Bendrosios pajamos nustatomos taip:

$$B = E \cdot a \text{ Lt}, \quad (6.4)$$

čia  $E$  – HE elektros energijos išdirbis per metus kWh;  
 $a$  – kaina, kuri mokama už vieną pagamintą kilovatvalandę, Lt.

Taigi

$$G = B - I \text{ Lt.} \quad (6.5)$$

Hidroelektrinės ekonominiai skaičiavimai paprastai atliekami vidutinio vandenin-gumo metams.

Normatyvinis mažosios HE atsipirkimo laikas yra apie 10 metų. Taigi, jeigu apskaičiuotas atsipirkimo laikas yra mažiau kaip 10 metų, ekonominiu požiūriu HE statyti tikslinga, o jeigu gerokai daugiau – netikslinga.

## LITERATŪRA

1. Aplinkos būklė 2002, 2003. Vilnius.
2. Burneikis J., Jablonskis J., 1998. Mažosios hidroenergetikos panaudojimo galimybės Lietuvoje. Kaunas.
3. Fraenkel P., Paish O., Bokalders V., Harvey A., Brown A., Edwards R., 1991. Micro-hydro power. A guide for development workers. Intermediate Technology Publications in association with the Stockholm Environment Institute.
4. Gailiušis B., Jablonskis J., Kovalenkoviėnė M., 2001. Lietuvos upės. Hidrografija ir nuotėkis. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas.
5. Gamtosauginio vandens debito apskaičiavimo tvarkos aprašas, 2005. LR aplinkos ministro 2005 m. liepos 29 d. įsakymas Nr. D1-382. Valstybės žinios Nr. 94-3508.
6. Giesecke J., Mosonyi E., 1998. Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. Berlin: Springer.
7. Hidrotechninė statyba, 2000. Metodiniai patarimai. Akademija.
8. Jablonskis J., Lasinskas M., 1962. Lietuvos TSR upių kadastras. III dalis. (Debitai, nuolydžiai, galingumai). Vilnius: Valstybinė politinės ir mokslinės literatūros leidykla.
9. Jablonskis J., Punys P., Šavelskis V., Tautvydas A., 1996. Lietuvos mažosios hidroenergetikos žinynas. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas.
10. Kompleksinis vandens išteklių valdymas, Nr. 4. Pasaulinė vandens bendrija. Techninio komiteto pagrindiniai dokumentai Nr. 4.
11. Kustienė R., Poška A., 1997. Mažoji hidroenergetika. Kaunas: Ūkininko patarėjas.
12. Layman's guidebook on how to develop a small hydropower site. Part I, II. Editor: ESHA.
13. Les petits aménagements hydroélectriques. Guide pour la conception la réalisation la mise en service et l'exploitation. Société hydrotechnique de France.
14. Lietuvos energetika, 1982. I (iki 1940 m.). Vilnius: Mokslas.
15. Lietuvos energetika, 1992. II (1940-1990 m.). Vilnius: Mokslas.
16. Masiokas S., 1989. Elektrotechnika. Vilnius: Mokslas.
17. Mažųjų HE statybos ir projektavimo praktika Lietuvoje, 2001. Kaunas: AB Hidroprojektas.
18. Novak P., Moffat A.I.B., Nalluri C., Narayanan R., 2007. Hydraulic structures. Fourth edition. London and New York: Taylor and Francis.
19. Poška A., Punys P., 1996. Inžinerinė hidrologija. Kaunas.
20. Renewable energy in Europe, 2004. Building markets and capacity. European renewable energy council (EREC). London: James and James Ltd.
21. Statybos techninis reglamentas STR 2.02.06:2004. Hidrotechnikos statiniai. Pagrindinės nuostatos. LR aplinkos ministro 2004 m. spalio 18 d. įsakymas Nr. D1-538. Valstybės žinios Nr. 154-5624.
22. Vyčius J., Kustienė R., 2007. Hidraulinės mašinos ir hidroelektrinės. Metodiniai patarimai. Akademija.

23. Warnick C.C., 1984. Hydropower engineering. Printed in the United States of America.
24. [www.avei.lt](http://www.avei.lt)
25. [www.cink-hydro-energy.com/cz](http://www.cink-hydro-energy.com/cz)
26. [www.energyportal.eu](http://www.energyportal.eu)
27. [www.le.lt](http://www.le.lt)
28. [www.ukmin.lt](http://www.ukmin.lt)
29. Гончаров А.Н., 1972. Гидроэнергетическое оборудование гидроэлектростанций и его монтаж. Москва: Энергия.
30. Губин Ф.Ф. и др., 1972. Гидроэлектрические станции. Москва: Энергия.
31. Потапов В.М., Ткаченко П.Е., Юшмаков О.Л., 1972. Использование водной энергии. Москва: Колос.





Tiražas 250 vnt.  
Spausdino UAB „Ardiva“  
Jonavos g. 254, LT-44132, Kaunas,  
Tel.: (8-37) 36 34 01; Faks.: (8-37) 33 47 34;  
El. p.: [info@ardiva.lt](mailto:info@ardiva.lt); [www.ardiva.lt](http://www.ardiva.lt).