

4. Charakteristiky odstredivého čerpadla a potrubia

V KOCKE

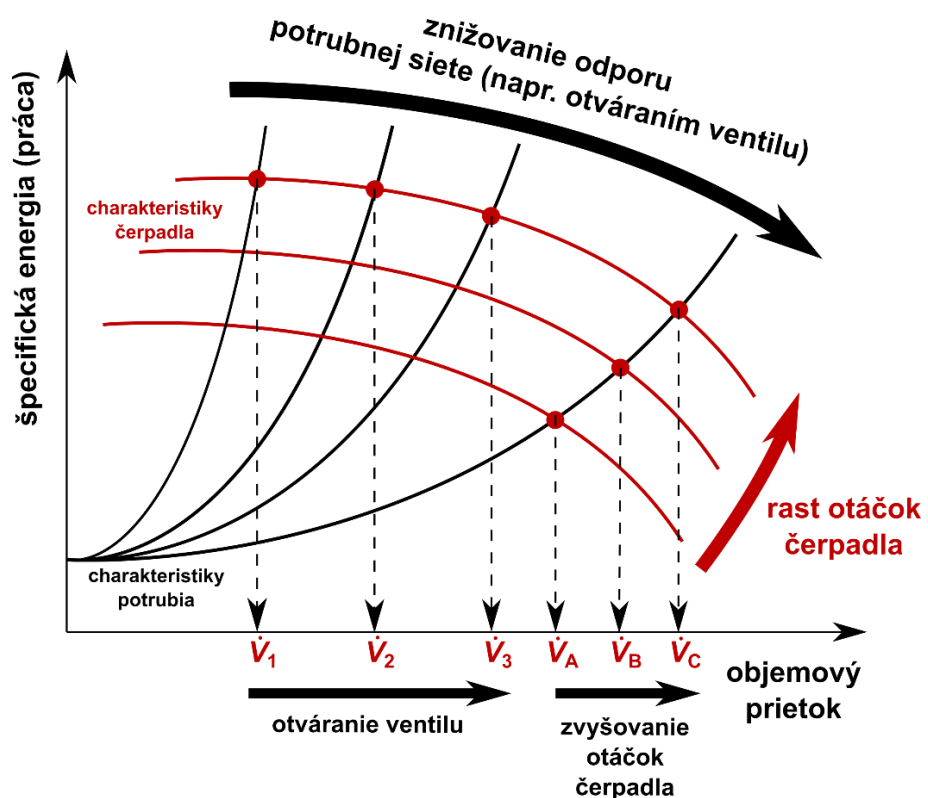
Odstredivé čerpadlá sú najpoužívanejším zariadením na **dopravu tekutín**. V tejto práci sa naučíte ako **navrhnuť dostatočne silné čerpadlo**, aby v danej potrubnej sieti zabezpečilo požadovaný prietok.

Na takýto návrh potrebujete poznať **dve funkcie**, ktorých grafické znázornenie je na **Obr.1**. Sú to **charakteristika čerpadla** (množstvo práce, ktoré tekutine **dáva čerpadlo** pri rôznom prietoku) a **charakteristika potrubia** (množstvo práce, ktoré je **treba tekutine dodať**, aby v danej potrubnej sieti nastal daný prietok). Iba pri **jednom jedinom prietoku** platí, že čerpadlo dodáva presne toľko energie, ktoré potrubie na daný prietok vyžaduje – čiže tento prietok **skutočne nastane**. Je to **priesečník** oboch charakteristík.

Zvýšiť prietok sa dá dvoma spôsobmi. Prvým je **znižovať odpor potrubnej siete**, napríklad otváraním ventilu. Tak doma zvyšujete prietok vody do umývadla otváraním kohútika. Mení sa tým **charakteristika potrubia** v smere naznačenom na **Obr.1**. a prietok sa postupne zvýši z \dot{V}_1 na \dot{V}_3 . Charakteristika čerpadla sa otváraním ventilu **nemení**.

Druhý spôsob spočíva v **zvýšení otáčok čerpadla**. Zmení sa tým **charakteristika čerpadla** v smere naznačenom na **Obr.1**. a prietok sa postupne zvýši z \dot{V}_A na \dot{V}_C . Charakteristika potrubia sa zvyšovaním otáčok čerpadla **nemení**.

Charakteristiky čerpadiel sú známe **od ich výrobcov**, často sú uvedené na ich webových stránkach. Charakteristiku potrubnej siete viete **približne vypočítať** na základe znalosti jej geometrie a materiálov, z ktorých sa skladá (viď str.11). Ak teda od vás raz bude niekto chcieť navrhnuť **dostatočne silné čerpadlo**, aby v danej potrubnej sieti zabezpečilo požadovaný prietok, viete ako na to.



Obr. 1. Charakteristika potrubia a čerpadla

Čo sa vás môže opýtať vyučujúci pred experimentom

- Popíšte jednotlivé časti experimentálnej aparatury.
- Vysvetlite čo budete merať, ako a prečo.
- Akú má konštrukciu odstredivé čerpadlo a aká forma energie sa premieňa na akú?
- Ako sa dá meniť prietok pri použití odstredivého čerpadla?
- Čo je to účinnosť čerpadla, aké hodnoty nadobúda a prečo nie je nikdy 100%-ná?
- Vysvetlite princíp, ako sa dá namerať charakteristika čerpadla.
- Vysvetlite princíp, ako sa dá namerať charakteristika potrubia.
- Ako sa dá približne vypočítať charakteristika potrubia?
- Ako sa dá približne prepočítať charakteristika čerpadla z jedných otáčok na iné?
- Ako sa líši výkon čerpadla a príkon na čerpadlo?
- Je príkon na čerpadlo totožný so spotrebou elektrickej energie zo siete?

CIELE PRÁCE**Čo sa má namerať a vypočítať**

1. Určiť jednoduché **charakteristiky odstredivého čerpadla** pri dvoch rôznych frekvenciách otáčania rotora čerpadla – špecifická práca konaná čerpadlom, výkon čerpadla, účinnosť čerpadla a príkon na čerpadlo v závislosti od objemového prietoku.

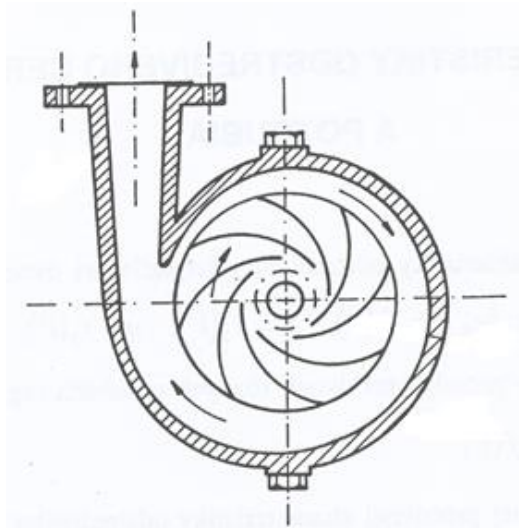
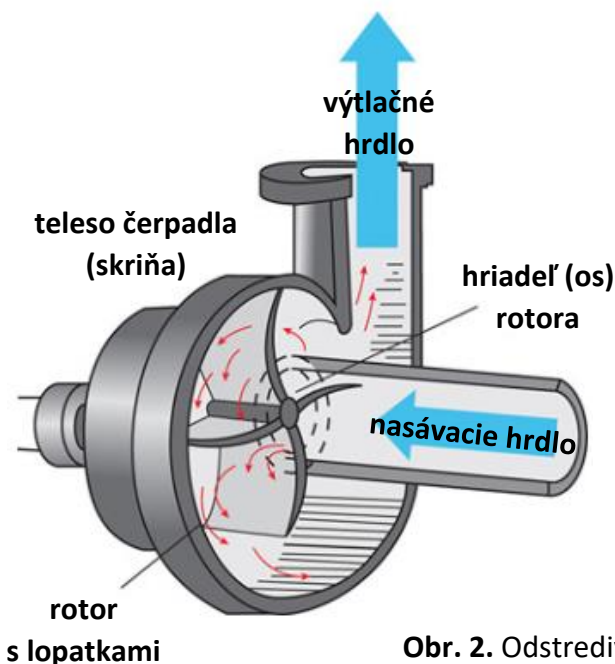
$$(e_w)_\varepsilon = f_1(\dot{V}), N = f_2(\dot{V}), \eta = f_3(\dot{V}), N_p = f_4(\dot{V})$$

2. Určiť **charakteristiky potrubia** pri dvoch rôznych polohách regulačného ventilu vo výtlačnom potrubí – t.j. aké množstvo špecifickej energie (práce) sa musí dodať kvapaline na dosiahnutie daného prietoku.

$$(-e_w) = f(\dot{V})$$

3. Z experimentálne zistenej pracovnej charakteristiky odstredivého čerpadla vypočítať a zobraziť prac. **charakteristiku čerpadla pri inej frekvencii otáčania rotora čerpadla.**

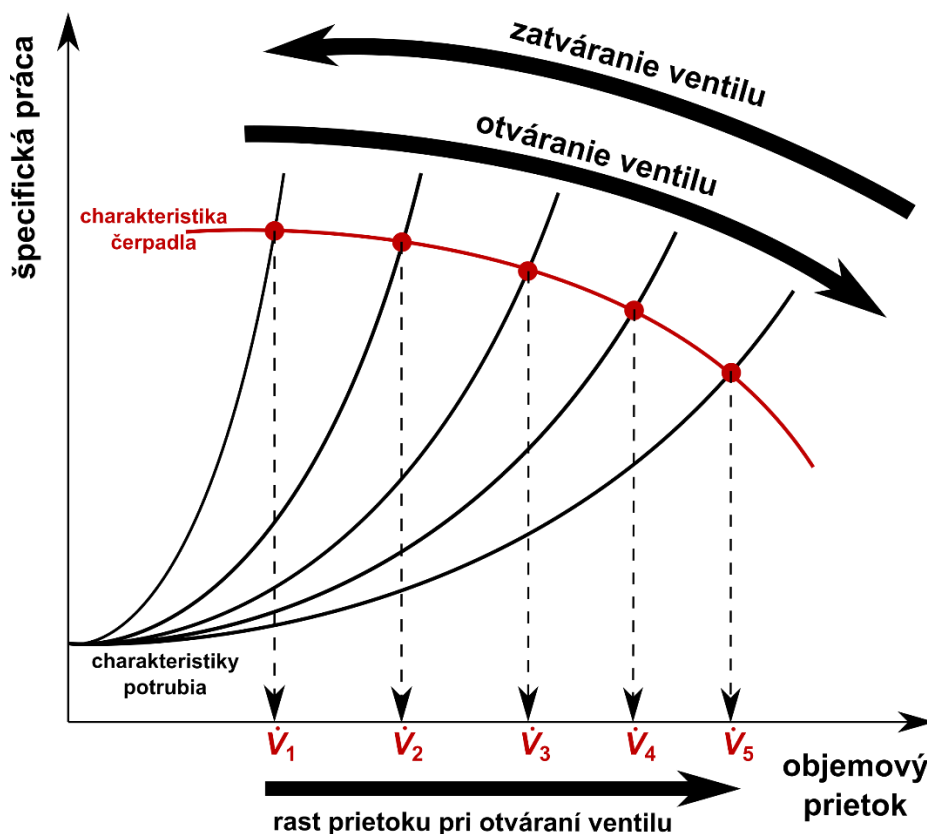
$$(e_w)_\varepsilon = f(\dot{V})_{\text{frekvencia1}} \rightarrow (e_w)_\varepsilon = f(\dot{V})_{\text{frekvencia2}}$$

TEÓRIA**Odstredivé čerpadlo****Obr. 2.** Odstredivé čerpadlo

Odstredivé čerpadlá sú stroje určené na **dopravu kvapalín**. Na **rotačnom hriadeľi** odstredivého čerpadla je upevnené **lopatkové obežné koleso (rotor)**, uložené v nehybnom **telese čerpadla (v skrini)**, **Obr.2**. Ak je voľný priestor v skrini čerpadla vyplnený dopravovanou kvapalinou, tak odstredivou silou, vyvolanou otáčaním rotora, je **kvapalina odstredovaná** z priestoru blízko hriadeľa **smenom k obvodu lopatkového obežného kolesa**. Tým sa v blízkosti rotačnej osi odstredivého čerpadla vytvára **podtlak** a kvapalina sa nasáva **nasávacím hrdlom čerpadla**, umiestnenom kolmo na os rotora. Rýchlosť kvapaliny v mieste výstupu z lopatkového priestoru obežného kolesa je daná vektorovým súčtom radiálnej a obvodovej zložky rýchlosti prúdenia. Pretože po výstupe kvapaliny z obežného kolesa do priestoru telesa čerpadla **vzrastá prietokový prierez** daný konštrukciou čerpadla, zmenší sa rýchlosť prúdenia kvapaliny (podľa rovnice kontinuity) a v dôsledku toho sa (podľa Bernoulliho rovnice) zvýši tlak. V čerpadle teda dochádza k **premene kinetickej energie na tlakovú energiu**, t. j. k **zvýšeniu tlaku čerpanej kvapaliny**.

Ako namerať charakteristiku čerpadla?

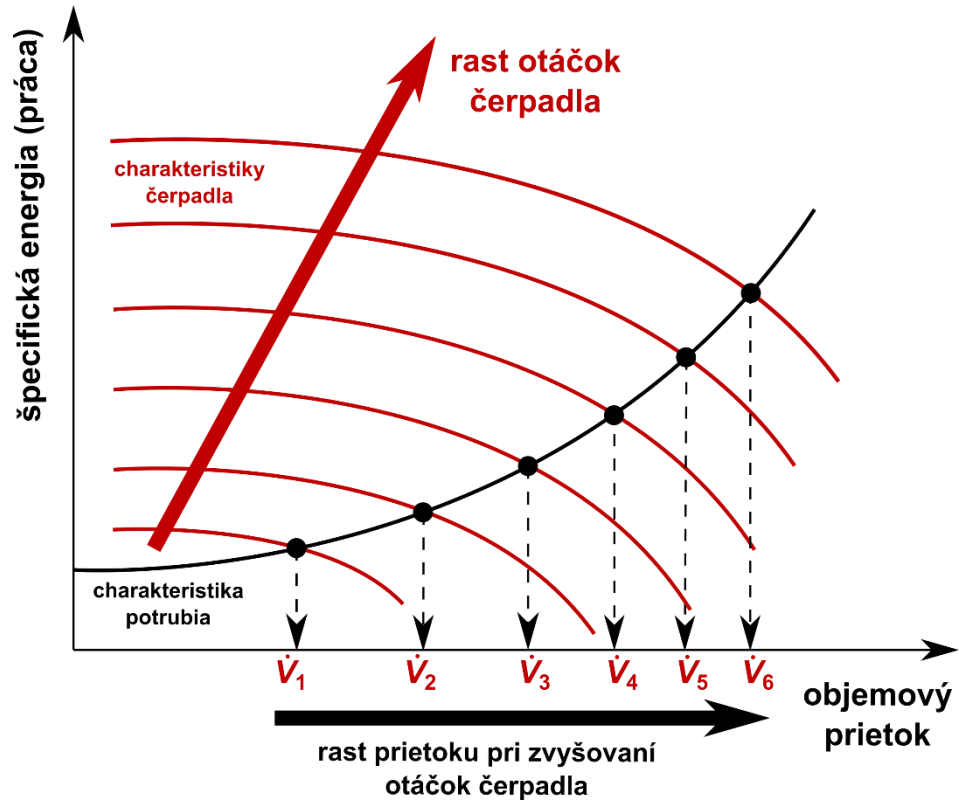
Princíp **experimentálneho získania charakteristiky čerpadla** v tejto práci je naznačený na **Obr.3**. Na čerpadle sa nastaví **určité otáčky**, ktorým zodpovedá **jedna charakteristika čerpadla** (jedna z charakteristík nakreslených červenou na Obr.1.). Aby sa zmerala celá charakteristika čerpadla v určitom rozsahu prietokov, treba namerať **viac jej bodov** (červené body na **Obr.3**). Preto sa **otváraním/škrtením ventilu** mení charakteristika potrubia tak, ako je zobrazené na **Obr.3**. Každému otvoreniu ventilu zodpovedá **iný prietok**. Keďže otváraním/škrtením ventilu sa **nemení charakteristika čerpadla**, merajú sa body pozdĺž nej. Na každý bod treba dve súradnice – **objemový prietok** a **špecifickú prácu** dodávanú čerpadlom prúdiacej tekutine. Pri každom otvorení ventilu sa prietok zmeria **rotametrom**. Špecifická práca sa vypočíta z **rozdielu tlakov pred a za čerpadlom**, pomocou rovnice (1).



Obr.3. Princíp merania charakteristiky čerpadla – postupným otváraním ventilu

Ako namerať charakteristiku potrubia?

Princíp je podobný ako pri predchádzajúcom meraní. Charakteristika potrubia sa **nesmie** teraz **meniť**, preto sa nastaví iba jedno určité **otvorenie ventilu**, ktorému prislúcha jedna z charakteristík potrubia (nakreslené čiernou na Obr.1.). Potom sa **menia otáčky čerpadla**, čím sa menia charakteristiky čerpadla. Zvyšovaním otáčok sa **zvyšuje prietok** a merajú sa body pozdĺž nemennej charakteristiky potrubia, ako je zobrazené na **Obr.4**. Objemový **prietok** i **špecifická práca** konaná čerpadlom (t.j. energia dodávaná tečúcej kvapaline) sa budú merať/počítať rovnako ako v pri predchádzajúcom meraní.

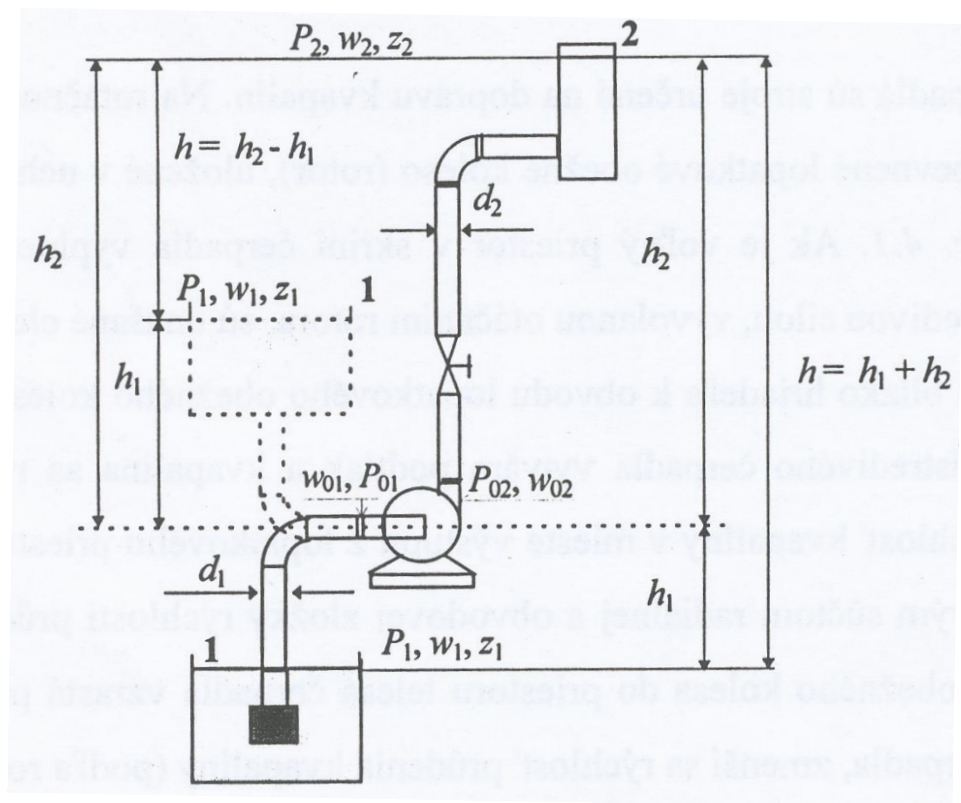


Obr.4. Princíp merania charakteristiky potrubia – zmenou otáčok čerpadla

Parametre práce čerpadla

Základné parametre, ktoré charakterizujú prácu čerpadla, sú:

- objemový prietok kvapaliny \dot{V} , $[m^3 \cdot s^{-1}]$,
- špecifická práca konaná čerpadlom $(e_w)_\epsilon$, $[J \cdot kg^{-1}]$,
- dopravná nasávací výška h_1 , dopravná výtlačná výška h_2 , (Obr.5.), $[m]$,
- celková dopravná výška (geodetická výška) $h = z_2 - z_1$, $[m]$.



Obr.5. Schéma transportného systému s odstredivým čerpadlom
Prerušovaná čiara je označený prípad tzv. zatopeného čerpadla
(t.j. hladina nasávanej kvapaliny je nad úrovňou čerpadla)

Špecifická práca konaná čerpadlom

Rotor čerpadla je poháňaný **elektromotorom**, v ktorom sa najprv **elektrická energia** zo siete mení na **kinetickú energiu**. Následne rotor **tlačí kvapalinu** na steny a von z čerpadla. Vtedy sa **kinetická energia** lopatiek rotora premieňa na **tlakovú energiu** (zvyšuje sa tlak kvapaliny za čerpadlom). **Špecifická práca konaná čerpadlom** je preto úmerná **zvýšeniu tlaku kvapaliny**. Rozdiel tlakov sa meria pomocou **manometrov**, napr. ortuťových, pripojených k nasávaciemu a výtlačnému hrdlu čerpadla, alebo diferencným membránovým manometrom ako je tomu aj v našom prípade. Špecifická práca konaná čerpadlom sa následne vypočíta pomocou rovnice (1). Hydrostatický tlak vznikajúci v dôsledku malého rozdielu výšok meracích miest pred a za čerpadlom je veľmi malý v porovnaní so zmenou tlaku spôsobenou čerpadlom, preto je v nasledujúcej rovnici **zanedbaný**.

$$(e_w)_\varepsilon = Hg = \frac{P_{02} - P_{01}}{\rho} \quad (1)$$

kde H – pracovná výška čerpadla: $H = \frac{(e_w)_\varepsilon}{g}$, m ,

g – gravitačné zrýchlenie, $[m \cdot s^{-2}]$,

P_{01}, P_{02} – tlak v nasávacom, resp. výtlačnom hrdle čerpadla, diferencný manometer zobrazuje už rozdiel tlakov $[Pa]$,

ρ – hustota dopravovanej kvapaliny $[kg \cdot m^{-3}]$.

Výkon čerpadla, príkon a účinnosť čerpadla poháňaného elektromotorom s frekvenčným meničom

Výkon čerpadla priamo úmerne závisí od **špecifickej práce** konanej čerpadlom a **prietoku** podľa rovnice (2). Je to teda miera **skutočného množstva energie odovzdanej prúdiacej kvapaline**.

$$N = \rho \dot{V} (e_w)_{\varepsilon} \quad (2)$$

Príkon na čerpadlo poháňaného elektromotorom s frekvenčným meničom je miera množstva **spotrebovanej energie** pri ich prevádzke.

Výkon čerpadla, N , je vždy **nižší** než **príkon** na čerpadlo, N_p , v dôsledku **strát energie**.

Časť príkonu sa spotrebuje vo frekvenčnom meniči a v elektromotore, kde sa premieňa elektrický prúd na mechanický pohyb. V samotnom čerpadle sa časť energie spotrebuje na prekonanie mechanických strát trením v ložiskách, v prevodoch a v tesneniach čerpadla. Druhá časť je potrebná na prekonanie mechanických strát kvapaliny v čerpadle. **Celková účinnosť čerpadla s frekvenčným meničom** je daná vzťahom (3).

$$\eta = \frac{N}{N_p} = \eta_m \eta_{\varepsilon} \quad (3)$$

Energetická bilancia toku prúdiacej kvapaliny

Rovnica **bilancie mechanickej energie prúdiacej kvapaliny** medzi hladinou v zásobnej nádobe **1** a najvyšším bodom, do ktorého sa kvapalina dopraví **2 (Obr.5.)** je rozšírenou formou známej **Bernoulliho rovnice** bilancie mechanickej energie prúdiacej ideálnej tekutiny:

$$gz_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2\alpha_1} = gz_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2\alpha_2} + e_{dis} + e_w \quad (4)$$

kde z_1, z_2 – geodetická výška, meraná od zvolenej úrovne, $[m]$,

P_1, P_2 – tlak v sústave na úrovni z_1 , resp. z_2 , $[Pa]$,

w_1, w_2 – stredné rýchlosti prúdenia kvapaliny na úrovni z_1 , resp. z_2 , $[m \cdot s^{-1}]$,

α – korekčný súčiniteľ kinetickej energie (tu $\alpha_1 = \alpha_2$),

ρ – hustota dopravovanej kvapaliny, $[kg \cdot m^{-3}]$,

g – gravitačné zrýchlenie, $[m \cdot s^{-2}]$,

e_{dis} – špecifická disipovaná (rozptýlená) energia: $e_{dis} = gh_{dis}$, $[J \cdot kg^{-1}]$,

e_w – špecifická práca konaná prúdiacou kvapalinou: $e_w = gh_w$, $[J \cdot kg^{-1}]$,

h_{dis}, h_w – disipačná (stratová) výška, resp. pracovná výška prúdiacej kvapaliny, $[m]$.

V našej sústave (podľa **Obr.5.**) je prúdenie kvapaliny vyvolané činnosťou čerpadla. Prúdiaca **kvapalina** teda prácu nekoná, ale naopak, **od čerpadla ju prijíma**. **Špecifická práca konaná prúdiacou kvapalinou** bude teda **záporná** a podľa (4) je daná súčtom (5).

$$(-e_w) = g(-h_w) = g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2\alpha} + gh_{dis} \quad (5)$$

Približný výpočet charakteristiky potrubia

Tvar **charakteristiky potrubia** v podobe funkcie $(-e_w) = f(\dot{V})$ možno odvodiť z **Bernoulliho rovnice** (5). Za predpokladu **nemenného priemeru** potrubia $d_1 = d_2 \equiv d$ (a z toho vyplývajúcej rovnosti rýchlostí $w_1 = w_2$) úpravou rovnice (5) dostaneme kvadratickú funkciu v tvare (7).

$$(-e_w) = A + B\dot{V}^2 \quad (6)$$

$$\text{kde } A = g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} \quad (7)$$

$$B = \left(\Sigma \frac{\lambda}{d} L + \Sigma \xi \right) \frac{8}{\pi^2 d^4} \quad (8)$$

V rovniciach (6) – (8): d je vnútorný priemer potrubia, L je dĺžka potrubia, λ je súčiniteľ trenia, ξ je súčiniteľ miestneho odporu. Hodnota A je pre daný systém **konštantná**, pretože geometria potrubného systému je nemenná a oba tlaky sú atmosférické. Hodnota B je tiež **približne konštantná** (súčiniteľ trenia pri turbulentnom prúdení so zvyšujúcim sa prietokom iba mierne klesá).

Hodnoty parametrov A a B sa dajú vypočítať zo znalosti **geometrie potrubného systému** ($z_1, z_2, L, d, \Sigma \xi, A$), **použitých materiálov** (λ), a **vlastností tekutiny** (ρ, η). Charakteristika potrubia (6) sa preto dá **približne vypočítať**. V tejto práci sa však určuje **experimentálne**, princípom uvedeným na **Obr.4**. Vypočíta sa len množstvo dodávanej práce prislúchajúcej nulovému prietoku, t.j. parameter A , pretože je to ťažké namerať.

Ako je uvedené na **Obr.1.**, prietok sa dá **regulovať** otváraním ventilu a zmenou otáčok čerpadla. **Otváranie ventilu** spôsobí zníženie jeho súčiniteľa miestneho odporu, ξ . To má za následok zníženie hodnoty parametra B a **zvýšenie prietoku** podľa rovnice (6). **Zvyšovanie otáčok čerpadla** zvyšuje množstvo práce dodávanej prúdiacej tekutine (pravá strana rovnice (6)) a tým opäť **zvyšuje prietok** \dot{V} .

Prepočet jednoduchých charakteristík odstredivého čerpadiel

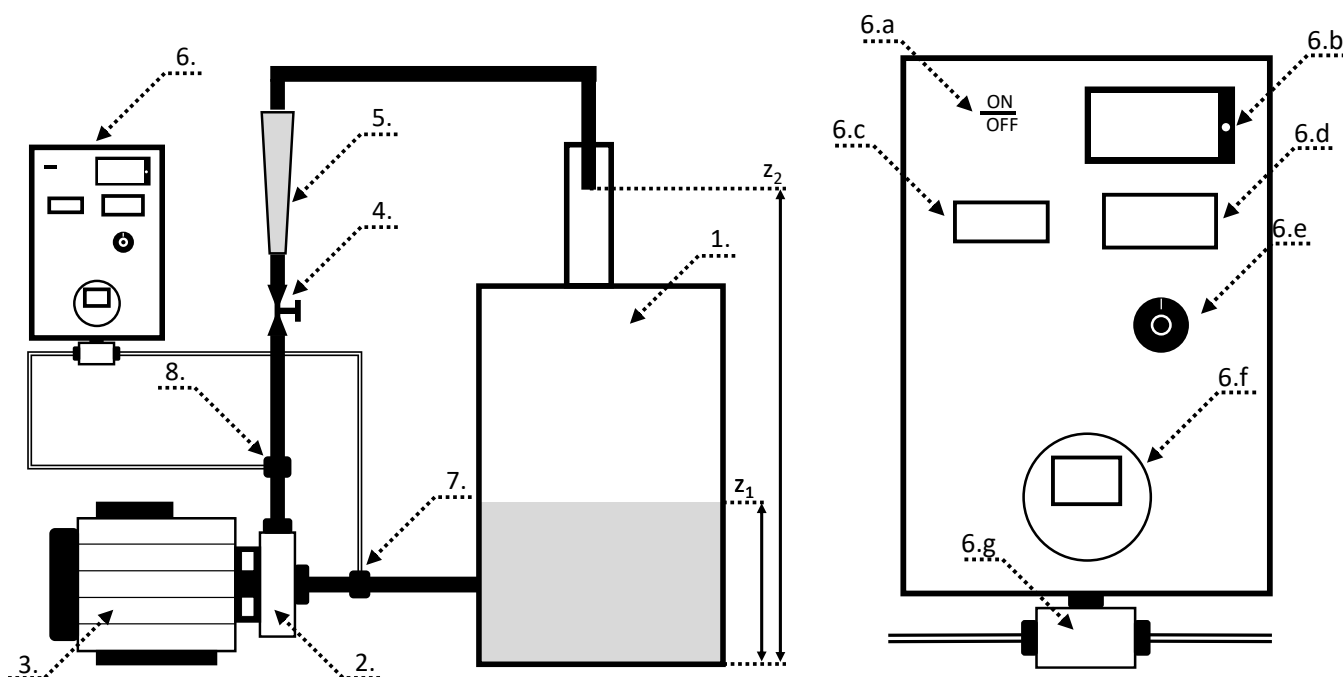
Výrobca čerpadiel zvyčajne prikľadá k čerpadlám jednoduché charakteristiky čerpadla pre prípad **dopravy vody** a platné pre **jednu frekvenciu otáčania rotora čerpadla**. V praxi často treba poznať tieto charakteristiky pri **inej frekvencii otáčania**. Za pomoci **teórie podobnosti** možno dokázať, že pre to isté čerpadlo a pre tú istú dopravovanú kvapalinu platia vzťahy (9).

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\sqrt{(e_{w1})_e}}{\sqrt{(e_{w2})_e}} = \frac{\sqrt[3]{N_1}}{\sqrt[3]{N_2}} = \frac{\sqrt[3]{N_{p1}}}{\sqrt[3]{N_{p2}}} \quad (9)$$

ZADANIE *Zadanie práce*

1. Namerajte a graficky znázorníte **jednoduché charakteristiky odstredivého čerpadla**:
 $(e_W)_\zeta = f_1(\dot{V})$, $N = f_2(\dot{V})$, $\eta = f_3(\dot{V})$, $N_P = f_4(\dot{V})$ pri 60 % a 80 % maximálneho výkonu čerpadla.
2. Vypočítajte tvar charakteristiky $(e_W)_\zeta = f_1(\dot{V})$, $N_P = f_4(\dot{V})$, čerpadla pri% maximálneho výkonu čerpadla na základe charakteristiky čerpadla **zistenej pri 60 alebo 80% maximálneho výkonu čerpadla**.
3. Namerajte **charakteristiku potrubia**, ak regulačný ventil otočíme o:
a) uhol $4.\pi$ b) uhol $2.\pi$.
4. Namerané charakteristiky potrubia pri obidvoch predpísaných polohách regulačného ventilu vyneste do **grafu**, v ktorom sú zakreslené charakteristiky čerpadla $(e_W)_\zeta = f_1(\dot{V})$ pri $f_{(1)}$, $f_{(2)}$ a $f_{(3)}$. Z grafu odčítané hodnoty $(e_W)_\zeta$ a (\dot{V}) uveďte vo forme tabuľky.

EXPERIMENT *Opis zariadenia*



Obr.7. Schéma zariadenia k práci č. 4.

1. - zásobná nádrž, 2. - odstredivé čerpadlo, 3. - elektromotor, 4. - ventil, 5. - rotameter,
6. - ovládací panel, 7. - odber tlaku na sacom potrubí, 8. - odber tlaku na výtlačnom potrubí, 6.a - hlavný vypínač, 6.b - wattmeter, 6.c - zobrazovací display % otáčok, 6.d - zobrazovací display teploty vody v nádrži, 6.e - potenciometer regulácie otáčok čerpadla, 6.f - zobrazovací display diferenčného manometra, 6.g - membránový diferenčný manometer.

Schéma zariadenia na meranie charakteristiky odstredivého čerpadla a potrubia je na **Obr.7**. Toto zariadenie sa skladá zo **zásobnej nádrže 1**, **čerpadla 2**, **výtlačného potrubia** a z **meracích prístrojov**. Čerpadlo je poháňané **elektromotorom 3** na trojfázový striedavý prúd s regulovateľnou frekvenciou otáčok. **Wattmeter 6.b** udáva aktuálny príkon pri prevádzke zariadenia na čerpanie tekutiny. Na frekvenčnom meniči **6.f** sa **otočným ovládačom nastavuje percento maximálnych otáčok**. Počet otáčok elektromotora pri jeho 100 % je uvedený v dokumentácii k laboratórnej práci. Otvory umiestnené v nasávacom a výtlačnom hrdle čerpadla sú na meranie tlakového rozdielu, z ktorého sa určí špecifická práca konaná čerpadlom, resp. pracovná výška čerpadla.

Pracovný postup

Podľa dokumentácie priloženej k práci skontrolujeme **úplnosť** zariadenia a príslušenstva. Oboznámime sa so zariadením podľa časti *Opis zariadenia*. Od vedúceho cvičenia si vyžiadame zadanie na prácu a súhlas na začatie merania **pred akoukoľvek manipuláciou so zariadením**.

Určenie jednoduchých charakteristík čerpadla

- Skontrolujeme, či na otočnom regulátore frekvenčného meniča je nastavená nulová hodnota. Hlavný vypínač dáme do polohy ON. Otočným regulátorom frekvenčného meniča nastavíme prvú požadovanú hodnotu **frekvencie otáčania**. Otvoríme naplno ventil 4.. Určíme **maximálny prietok** vody. Vypočítame **prírastok** $\Delta\dot{V}$ medzi jednotlivými meraniami. (Pri určovaní $\Delta\dot{V}$ vychádzame z toho, že potrebujeme urobiť 10 meraní.) Teplotu vody odčítame na začiatku a na konci merania.
- Pri každom prietoku odčítame hodnoty z **wattmetra** a **diferenčného manometra**.
- Pre **druhú frekvenciu** otáčania zopakujeme celé meranie.

Určenie charakteristiky potrubia

Na určenie **prvého bodu** charakteristiky potrubia (pre $\dot{V} = 0$) stačí poznať hodnotu A z rovnice (7). Pre náš systém platí, že $A = (z_2 - z_1)g$, lebo $P_1 = P_2$.

Pri určovaní súradníc **d ďalších bodov** charakteristiky potrubia (v našom prípade štyroch) postupujeme takto:

- **Ventilom 4.** otočíme o uhol určený v zadaní.
- Zmeriame **prietok vody** na rotometri a údaj na **diferenčnom manometri** pri: **50, 60, 70 a 80% max. otáčok**.
- Meranie zopakujeme pri **druhej polohe** regulačného ventilu 4.

Zmeriame **teplotu vody**.

Výsledky všetkých meraní zaznamenávame do tabuliek podľa vzoru **Tab.1.**, resp. **Tab.2.** Potrebujeme po dve tabuľky každého typu.

Spracovanie nameraných údajov

Namerané hodnoty spracujeme podľa pokynov **uvedených v zadaní práce** a teoretickom úvode. Niektoré výsledky výpočtov zaznamenávame do tabuliek podľa vzoru **Tab.3.**

Upozornenie. Pri zobrazovaní jednoduchých charakteristík čerpadla $(e_w)_\varepsilon = f_1(\dot{V})$, $N = f_2(\dot{V})$, $\eta = f_3(\dot{V})$, $N_p = f_4(\dot{V})$ na jeden graf treba vyniesť **tri ypsilonové súradnice** s označením každej súradnice (N_p a N majú rovnakú jednotku). Body pre jednotlivé závislosti označujeme rôznymi výraznými znakmi napr.: \blacklozenge , \bullet a pod. Každý graf musí mať označenie - hlavičku napísanú paličkovým písmom. V protokole sa uvedie výpočet dvoch hodnôt $(e_w)_\varepsilon$, N_p , N , η – pre **každú frekvenciu** jednu hodnotu. Ostatné výpočty zapíšeme do prehľadných tabuliek.

Tab.1. – Záznam nameraných hodnôt pre charakteristiky čerpadla

$t_{H_2O,1} =$		$^{\circ}\text{C}$		$t_{H_2O,2} =$		$^{\circ}\text{C}$	
$f =$						min^{-1}	
n	\dot{V}	$p_{01} - p_{02}$		N_p			
	$[\text{l}\cdot\text{h}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$		$[\text{W}]$			
1							
..							
20							

Tab.2. – Záznam o meraniach a výpočtoch pri určovaní charakteristík potrubia

$t_{H_2O,1} =$		$^{\circ}\text{C}$		$t_{H_2O,2} =$		$^{\circ}\text{C}$		$t =$		$^{\circ}\text{C}$	
$z_1 =$			m			$z_2 =$			m		
$z_2 - z_1 =$			m								
n	f	\dot{V}	\dot{V}	$p_{01} - p_{02}$	$(-e_w)$						
	$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{l}\cdot\text{h}^{-1}]$	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$						
Otvorenie ventilu o uhol π											
1											
...											
4											

Tab.3. – Tabuľka výpočtov charakteristík čerpadla

$\bar{t}_{H_2O} =$		$^{\circ}\text{C}$		$\rho_{H_2O} =$		$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		$n =$		min^{-1}			
n	\dot{V}	$p_{01} - p_{02}$	H	$(e_w)_c$	N	N_p	η						
	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{m}]$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\%]$						
1													
...													
20													