

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

VODNÍ A VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Vodní motory 3

Milan Bělík

Vodní turbíny

Akční turbíny (rovnotlaké): $\lambda < 0,5$

- ♦ Peltonova turbína
- ♦ Reiffensteinva turbína
- ♦ turbína Sfindex
- ♦ turbína Swift
- ♦ Segnerova turbína
- ♦ Zuppingerova turbína
- ♦ turbína Turgo
- ♦ Girardova turbína
- ♦ Hänelova turbína
- ♦ Schwamkrugova turbína
- ♦ Bánkiho turbína

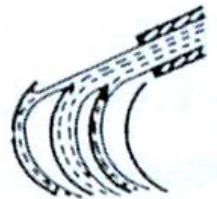
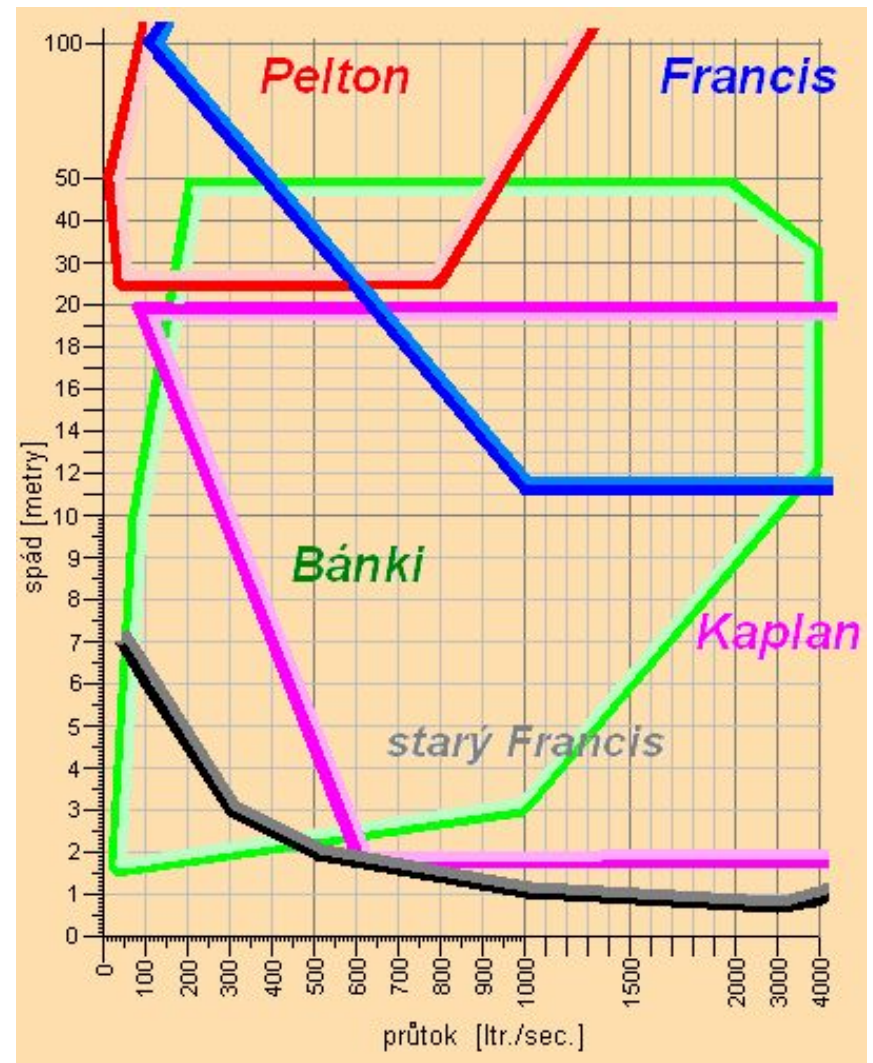
Reakční turbíny (přetlakové): $\lambda \geq 0,5$

- ♦ Kaplanova turbína
- ♦ Thomanova turbína
- ♦ propelerovala turbína
- ♦ Francisova turbína
- ♦ Fourneyronova turbína
- ♦ Jonvalova turbína
- ♦ Henschel-Jonvalova turbína
- ♦ Francis-Reiffensteinva turbína
- ♦ Dériazova turbína

Stupeň reaktivnosti turbíny λ

$$\lambda = 1 - \frac{\alpha \cdot c_0^2}{2 \cdot g \cdot H_t}$$

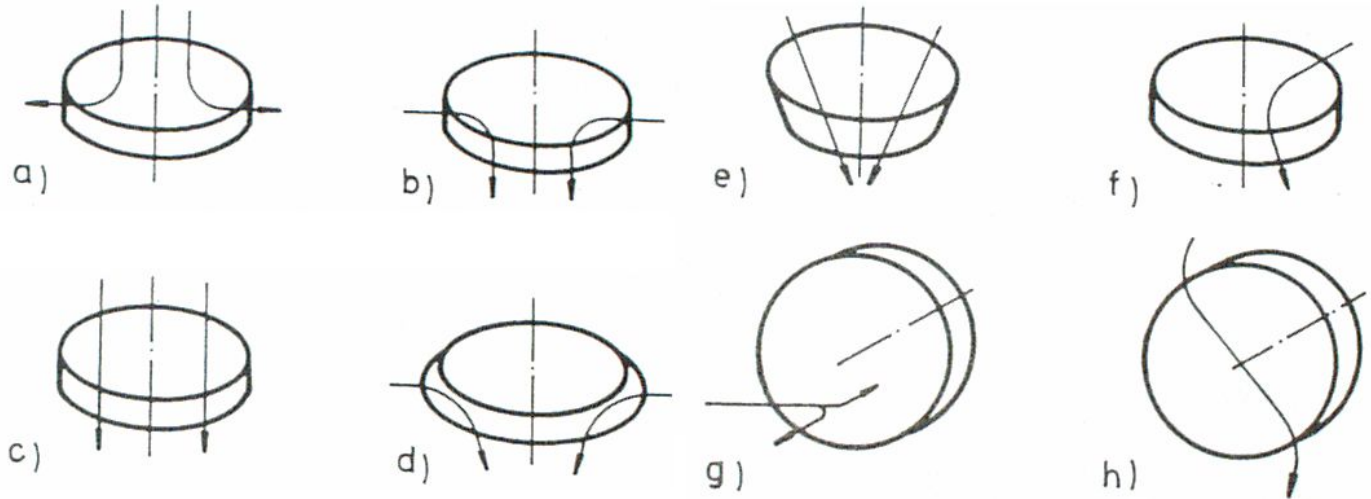
- α – Coriolisovo číslo
 H_t – užitný spád turbíny (m)
 c_0 – střední rychlost vody před vstupní hranou oběžné lopatky turbíny (m.s⁻¹)



Dělení vodních turbín

Proudění oběžným kolem

- centrifugální
 - ◆ Fourneyron
- centripetální
 - ◆ Francis – historický
- axiální
 - ◆ Kaplan, Jonval
- radiálně axiální
 - ◆ Francis - moderní
- diagonální
 - ◆ Dériaz
- se šikmým průtokem
 - ◆ Turgo
- tangenciální
 - ◆ Pelton
- s dvojnásobným průtokem
 - ◆ Bánki, Schneider



Rovnoměrnost průtoku

- plný vtok – po celém obvodu oběžného kola (spirála)
- částečný vtok – dýzou (Pelton)

Poloha hřídele

- vertikální
- horizontální
- šikmý hřídel

Počet oběžných kol

- jednoduché – 1 oběžné kolo
- vícenásobné – více oběžných kol

Smysl rotace oběžného kola

- jednosměrné – pravotočivé, levotočivé
- obousměrné – reverzní turbíny

Instalace vodních turbín

■ spirální

- ♦ betonová: malé spády (MVE)
- ♦ litinová: větší spády
- ♦ svařovaná ocelová: větší spády

■ kašnová: $D_1 < 1$ m, $E < 50$ J/kg (MVE)

- ♦ $B = D_1 + (1,4 \text{ až } 1,6)$
- ♦ symetrická: $c = 0,8 \text{ až } 1,0$ m/s
- ♦ excentrická: $c = 1,0 \text{ až } 1,2$ m/s
- ♦ spirální: $c < 3$ m/s

■ kotlová: $D_1 = 0,5 \text{ až } 1$ m (MVE)

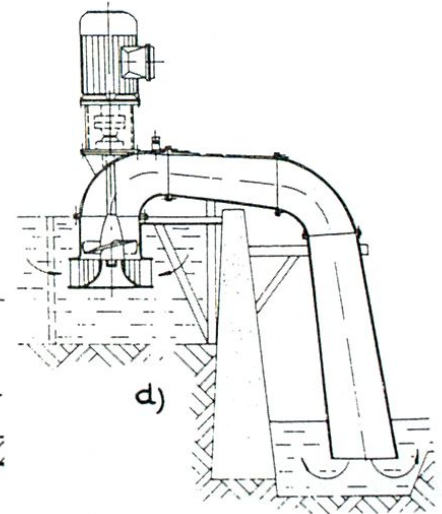
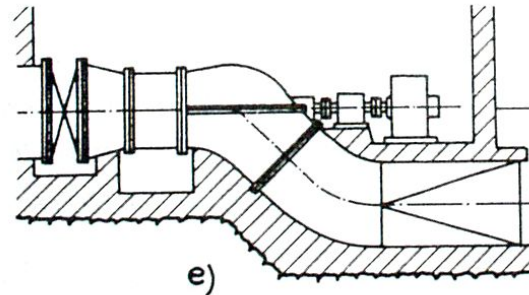
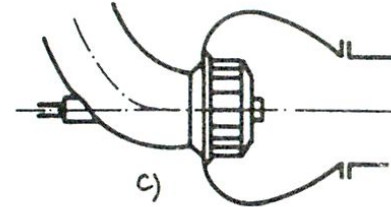
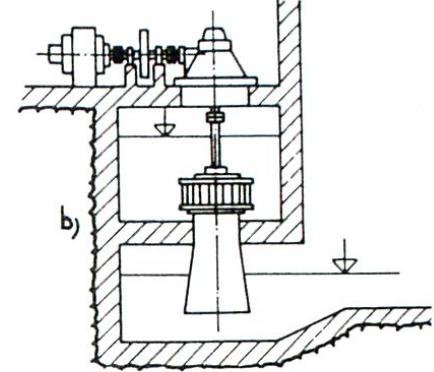
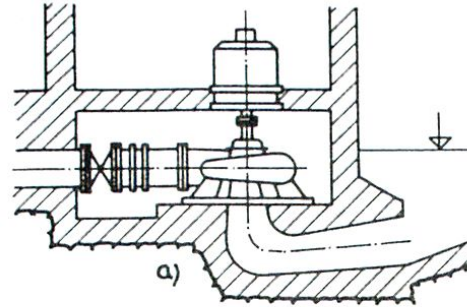
■ násosková: MVE

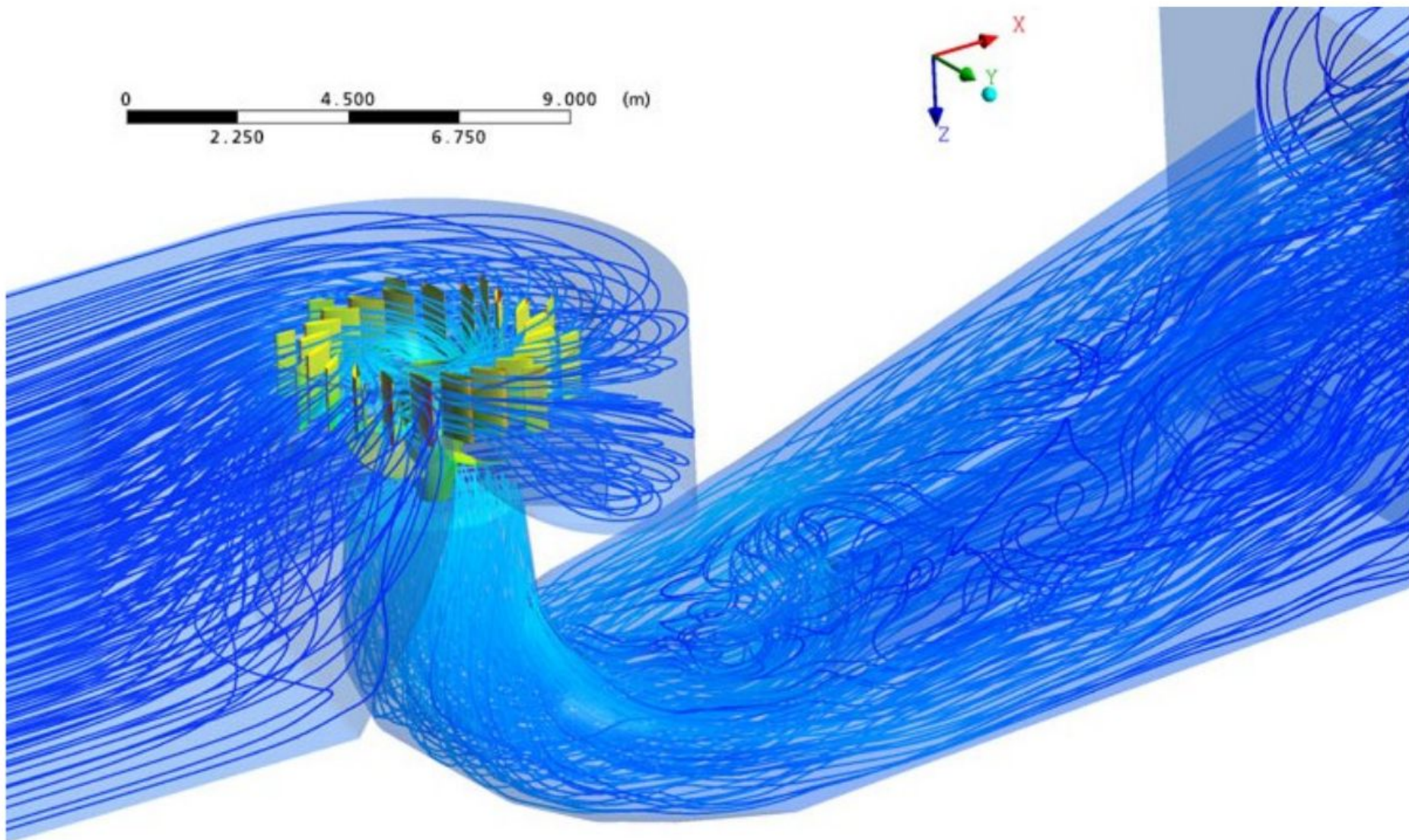
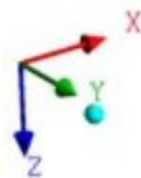
- ♦ litinová
- ♦ svařovaná ocelová

■ přímoproudá: MVE

■ měrná energie turbín

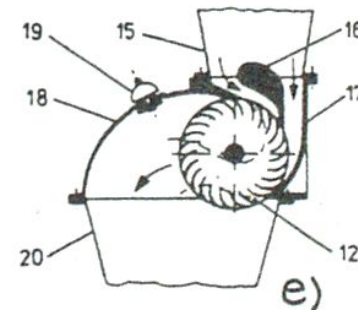
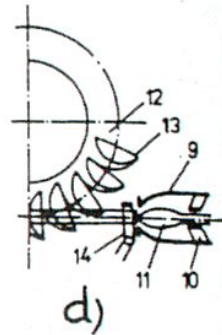
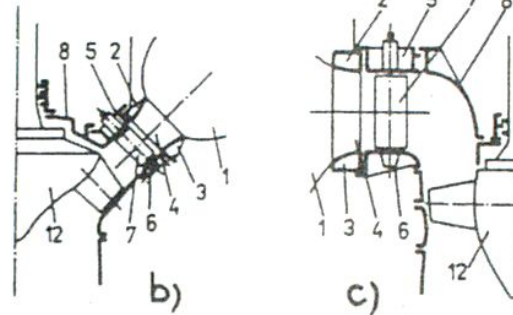
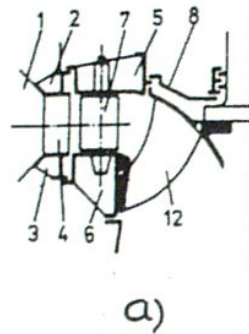
- ♦ nízkotlaké: $E < 200$ J/kg
- ♦ středotlaké: $E < 1000$ J/kg
- ♦ vysokotlaké: $E > 1000$ J/kg

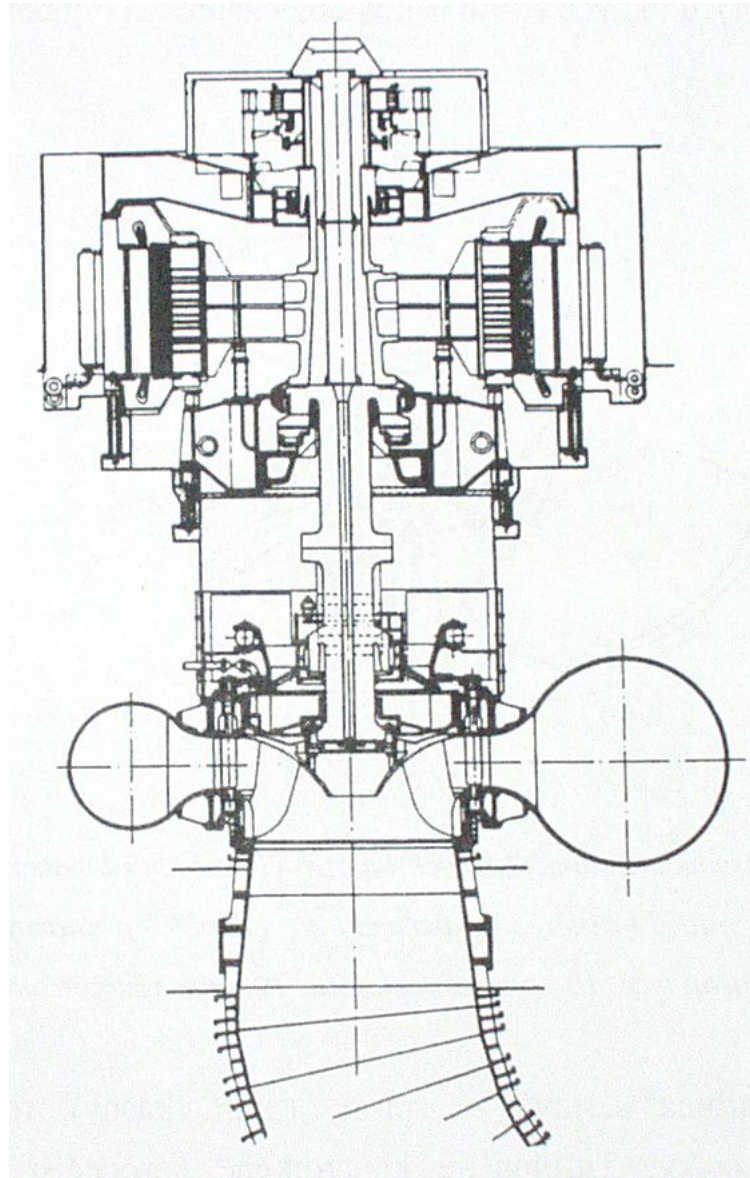


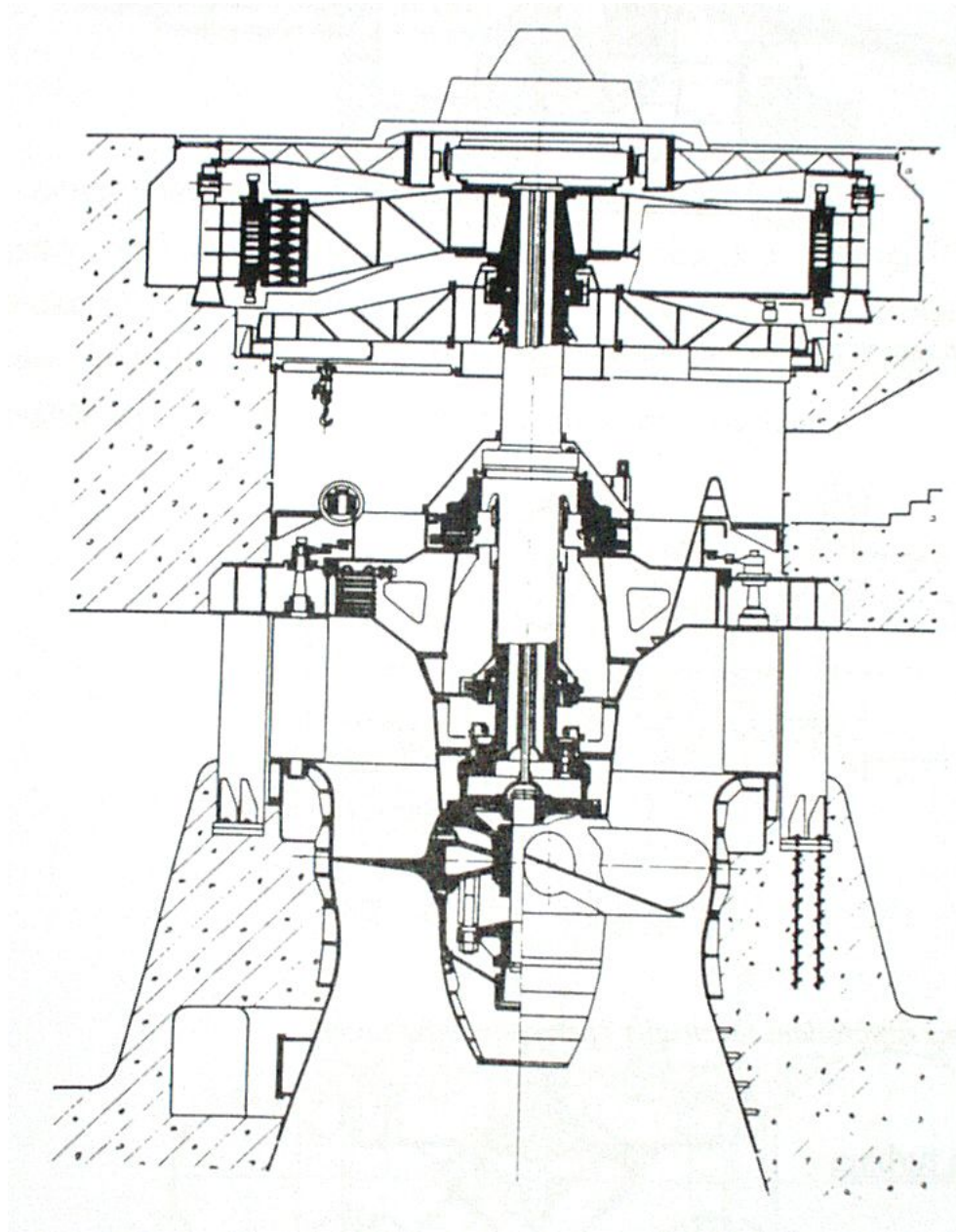


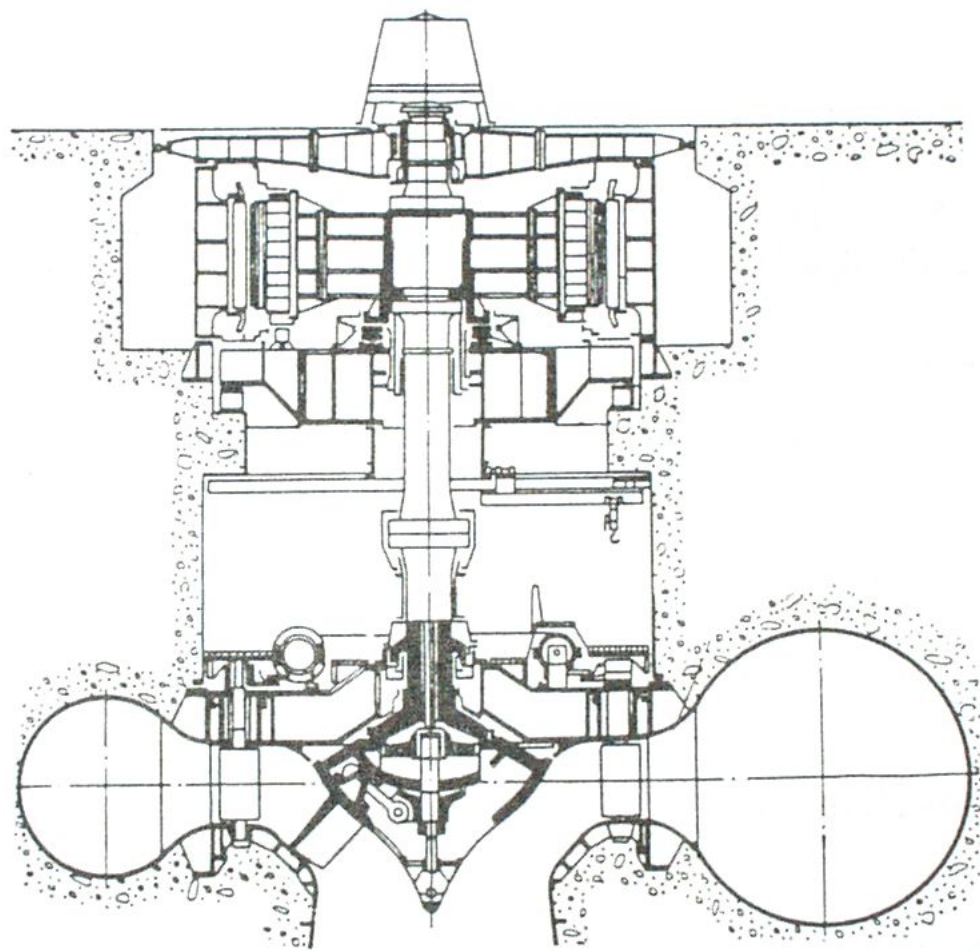
Nejčastěji používané turbíny

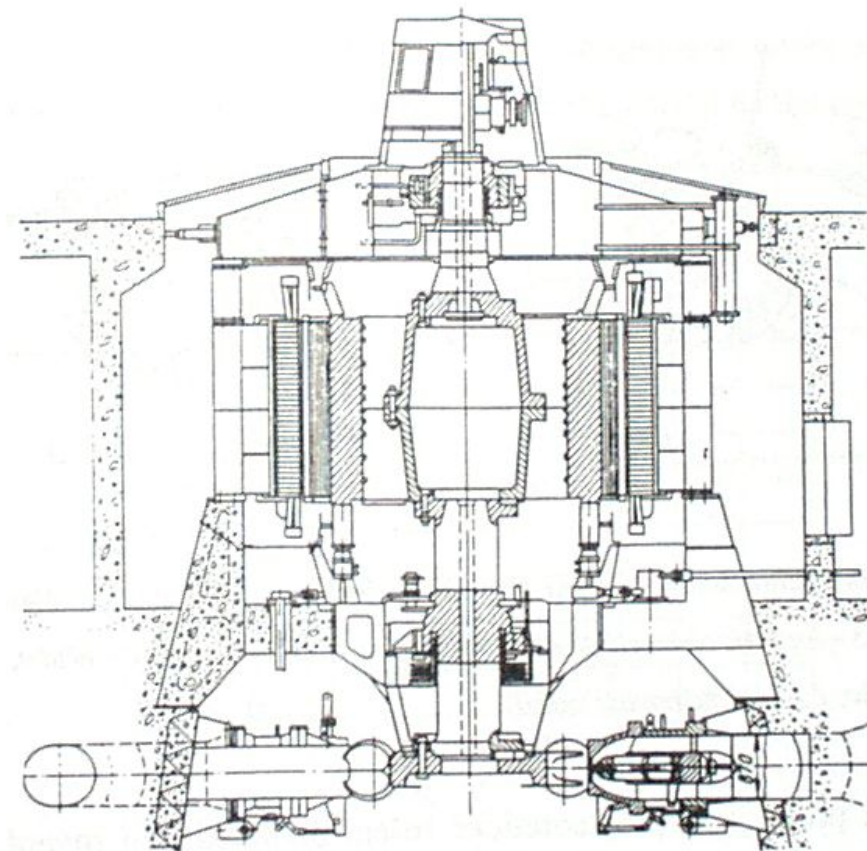
- Francisova turbína
- Dériazova turbína
- Kaplanova turbína
- Peltonova turbína
- Bánkiho turbína

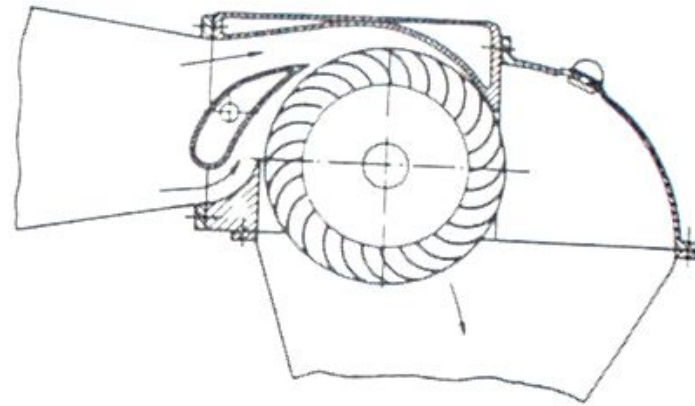
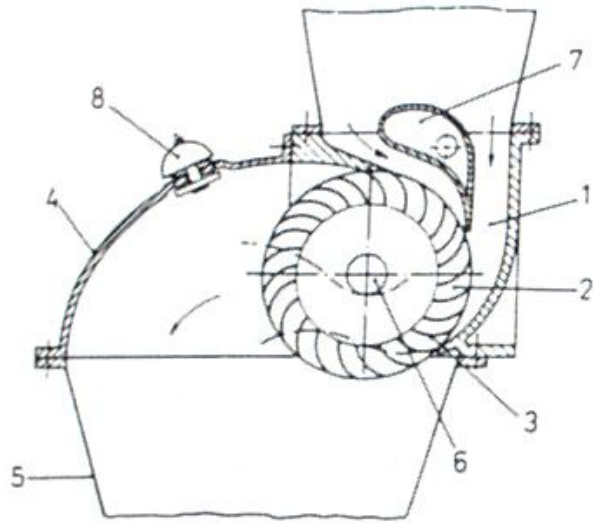












Hlavní parametry turbíny

- **průtok turbínou Q [m^3/s]**

- ◆ jmenovitý průtok – při jmenovitých otáčkách a jmenovité měrné energii

- **měrná energie E [J/kg]**

- ◆ starší veličina „užitný spád“ H [m]
- ◆ energie polohová E_z
- ◆ energie tlaková E_p
- ◆ energie kinetická E_v

$$E = g \cdot H$$

$$E = E_z + E_p + E_v$$

$$E = g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

- **ustálené proudění ideální kapaliny**

- ◆ Bernoulliho rovnice (bez ztrát)

$$E_1 = E_2 = \text{konst}$$

$$E_1 > E_2$$

Energetická bilance turbíny

$$\eta = \eta_Q \cdot \eta_h \cdot \eta_m$$

$$\eta_Q = \frac{Q - Q_z}{Q} = 1 - \frac{Q_z}{Q}$$

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_t} = \frac{E - E_z}{E}$$

$$\eta = \frac{P}{P_h} = \frac{P_h - P_z}{P_h} = 1 - \frac{P_z}{P_h}$$

teoretický výkon $P_t = Q \rho E$

hydraulický výkon $P_h = P_t \eta_Q \eta_h = Q \rho E \eta_Q \eta_h$

mechanický výkon $P = P_h \eta_m = P_t \eta_Q \eta_h \eta_m = P_t \eta$

■ Hybnost kapaliny

$$a = dc/dt$$

$$F = m \cdot dc/dt = m \cdot a$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$F = m/dt \cdot dc$$

$$m/dt = \rho \cdot V/dt = \rho \cdot Q$$

$$F = \rho \cdot Q \cdot \Delta c = \rho \cdot Q \cdot (c_1 - c_2) = F_1 - F_2$$

- **měrná energie díla**

$$E_A - E_B = g \cdot (z_A - z_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho} + \frac{v_A^2 - v_B^2}{2}$$

- **měrná energie turbíny**

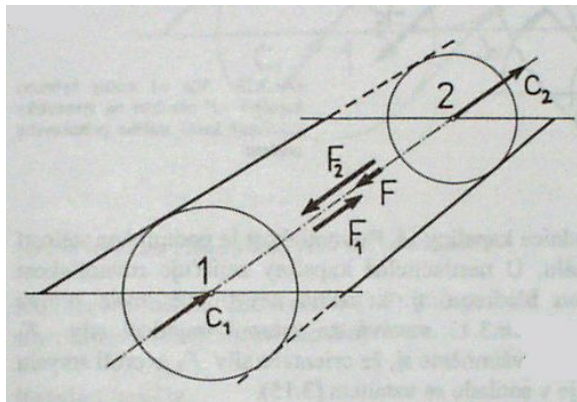
$$E = g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

$$E = g \cdot (z_A - z_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho} + \frac{v_A^2 - v_B^2}{2} - E_d$$

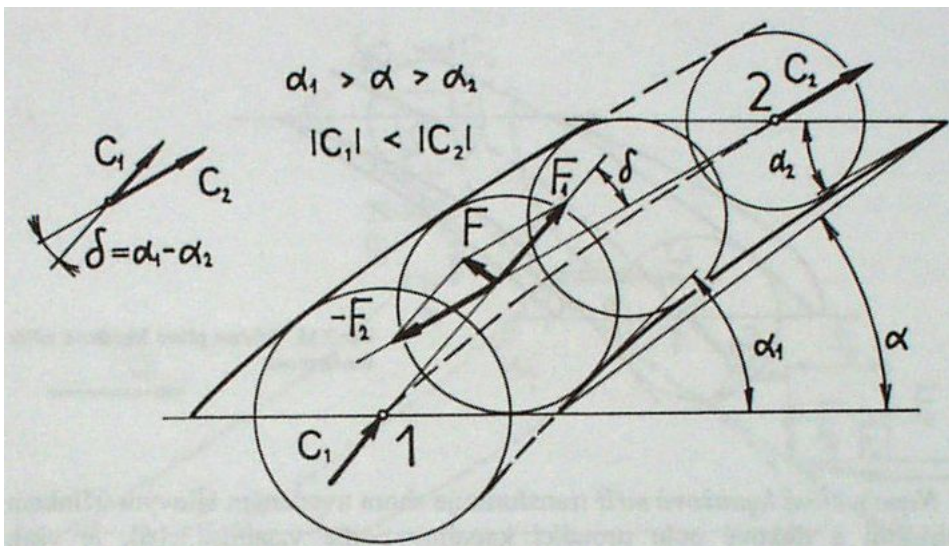
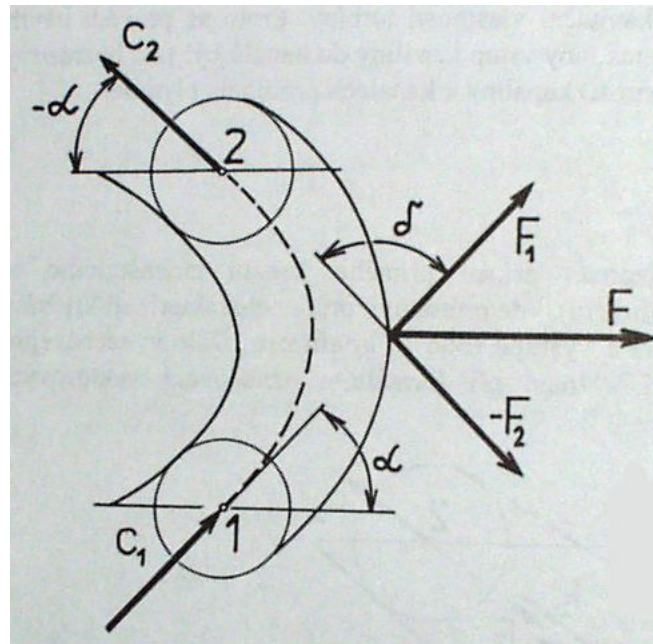
■ Statorový / rotující kanál turbíny

$$0,5 \cdot \Delta c^2 + \Delta p \cdot \rho^{-1} = 0,5 \cdot (c_1^2 - c_2^2) + (p_1 - p_2) \cdot \rho^{-1} = 0$$

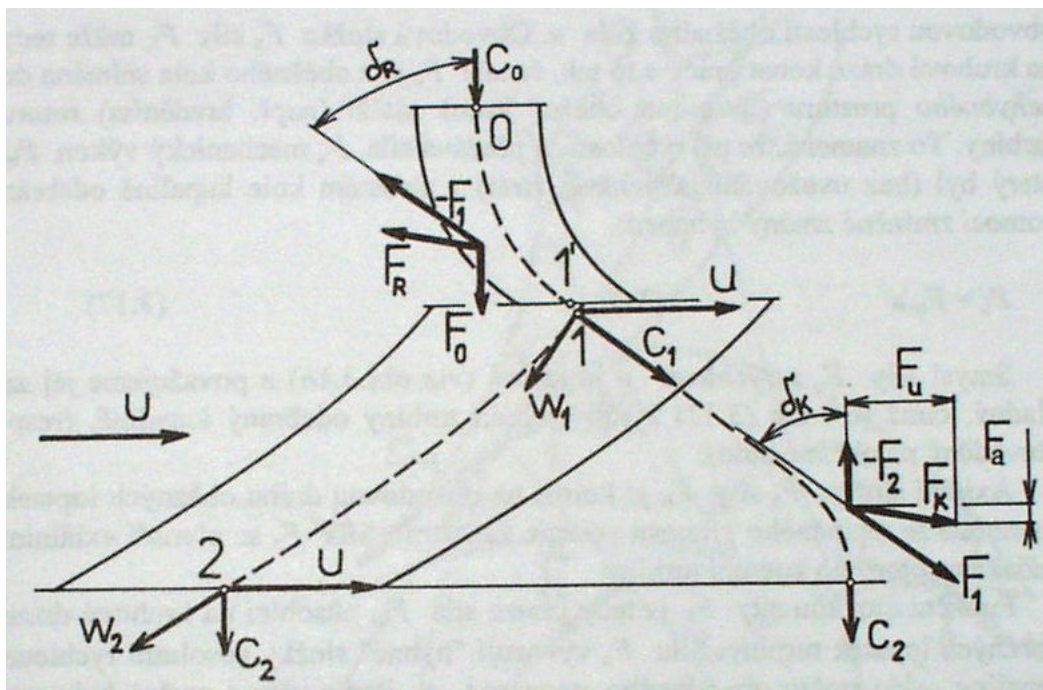
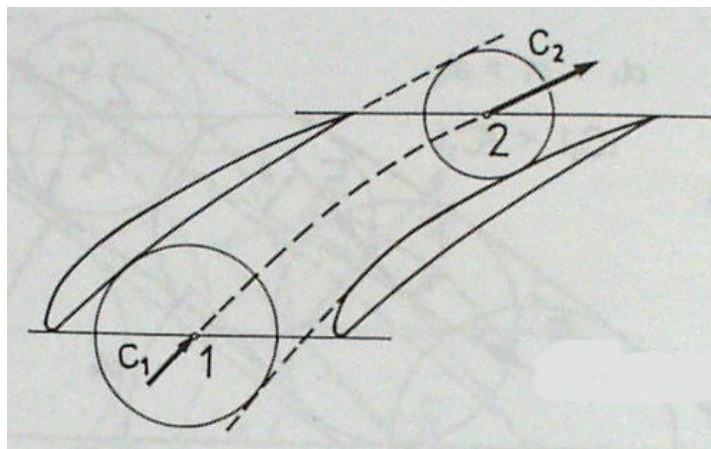
přetlakový kanál



rovnotlaký kanál



■ Lopatková mříž



$$E = g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

■ Průtok turbínou

◆ radiální

$$F_R \cdot r_R = F_K \cdot r_K$$

$$F_K \cdot r_K = F_{u1} \cdot r_1 - F_{u2} \cdot r_2$$

$$F_{u1} = \rho \cdot Q \cdot c_{u1}$$

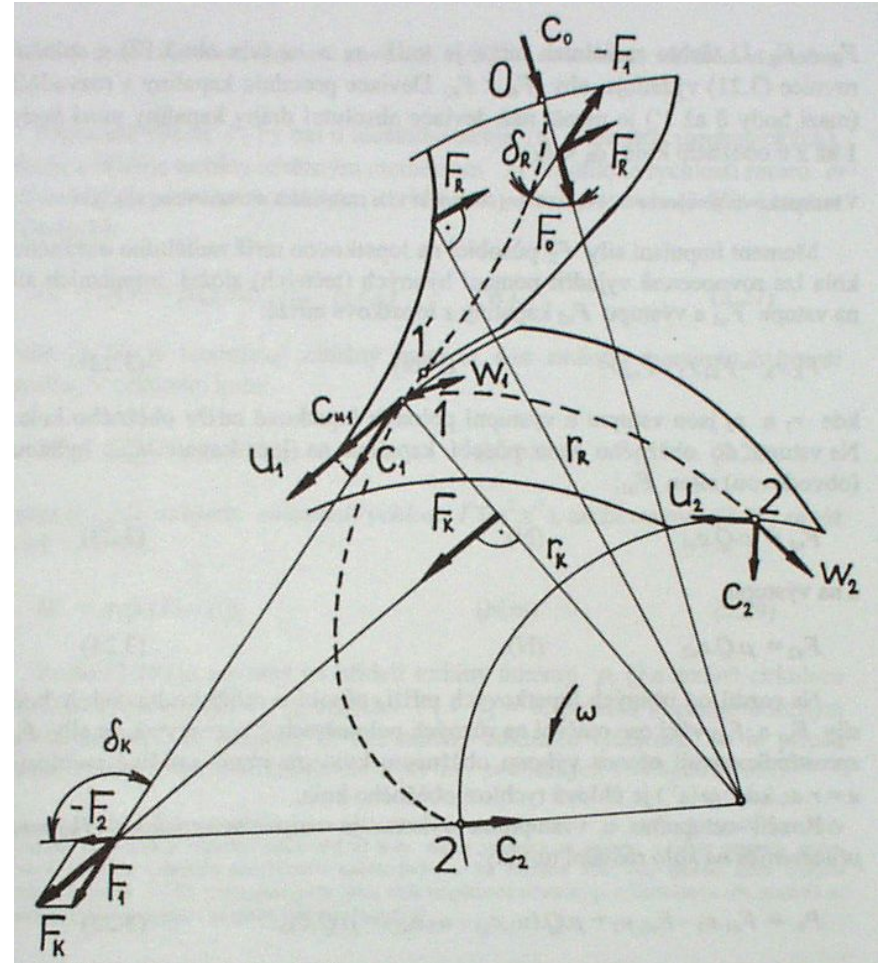
$$F_{u2} = \rho \cdot Q \cdot c_{u2}$$

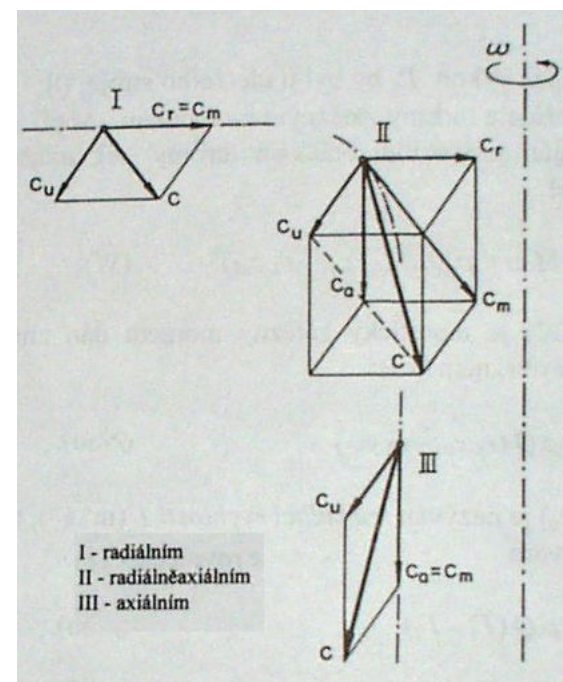
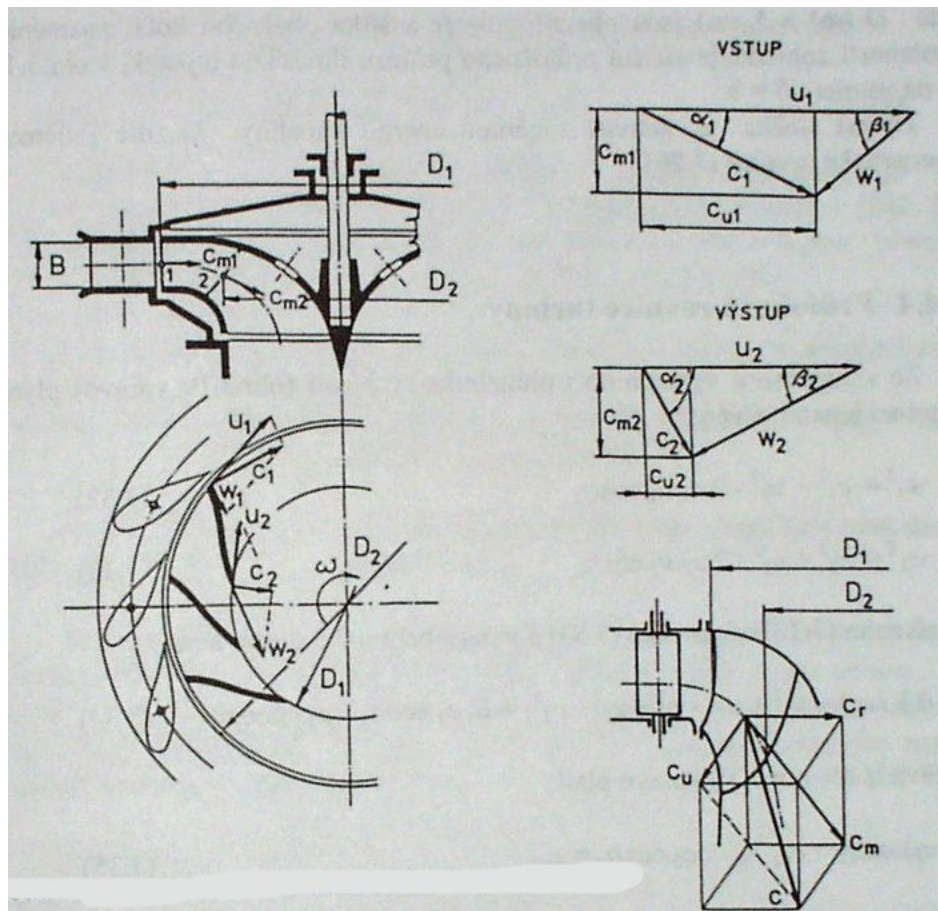
$$P_h = F_{u1} \cdot u_1 - F_{u2} \cdot u_2 = \rho \cdot Q \cdot (u_1 \cdot c_{u1} - u_2 \cdot c_{u2}) = \rho \cdot Q \cdot E_{Kt}$$

$$P_h = M \cdot \omega = \rho \cdot Q \cdot \omega \cdot (r_1 \cdot c_{u1} - r_2 \cdot c_{u2})$$

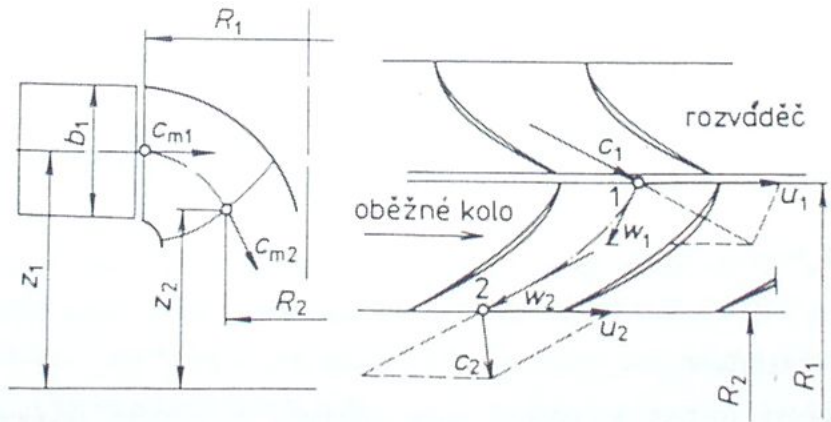
$$M = \rho \cdot Q \cdot (\Gamma_1 - \Gamma_2)$$

◆ axiální



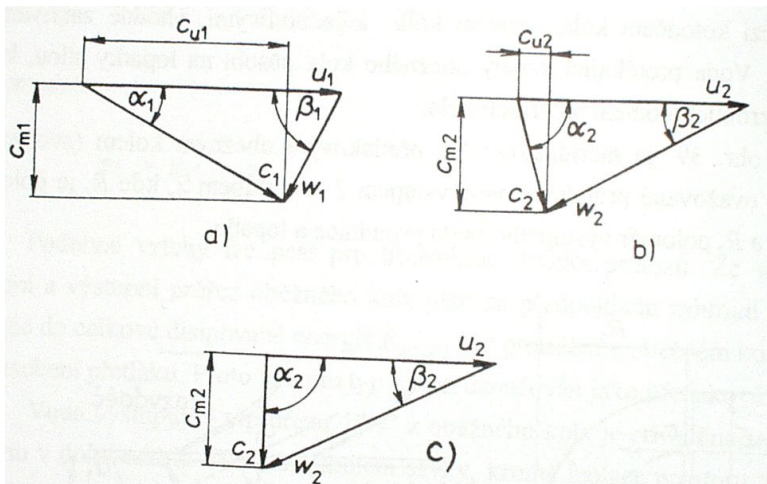


Eulerova průtoková rovnice



$$E \cdot \eta_h = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}$$

$$Q_k = 2\pi R_1 b_1 c_{m1}$$



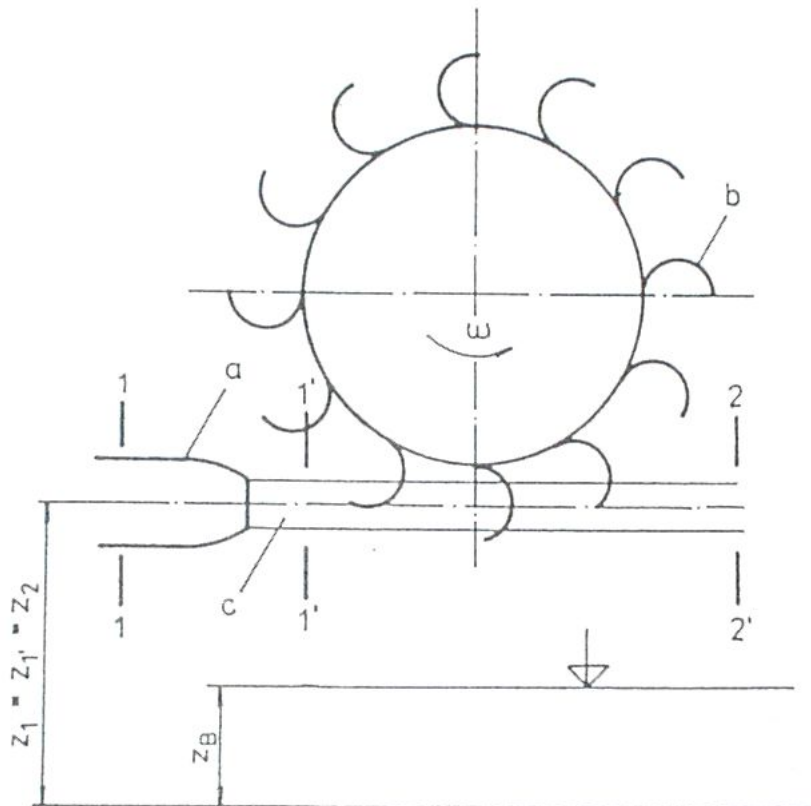
$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2 u_1 c_1 \cos \alpha_1 \quad c_1 \cos \alpha_1 = c_{u1}$$

$$w_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2 u_2 c_2 \cos \alpha_2 \quad c_2 \cos \alpha_2 = c_{u2}$$

$$u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} = \frac{1}{2} (w_2^2 - c_2^2 - u_2^2 - w_1^2 + c_1^2 + u_1^2)$$

$$E \cdot \eta_h = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2}$$

Rovnotlaké turbíny



$$E_1 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2}$$

$$E_{1'} = \frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{v_{1'}^2}{2}$$

$$E_2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

$$E_1 = E_{1'} + E_{d(1-1')} = E_2 + E_{d(1-2)}$$

$$p_1 = p_{1''} + p_b$$

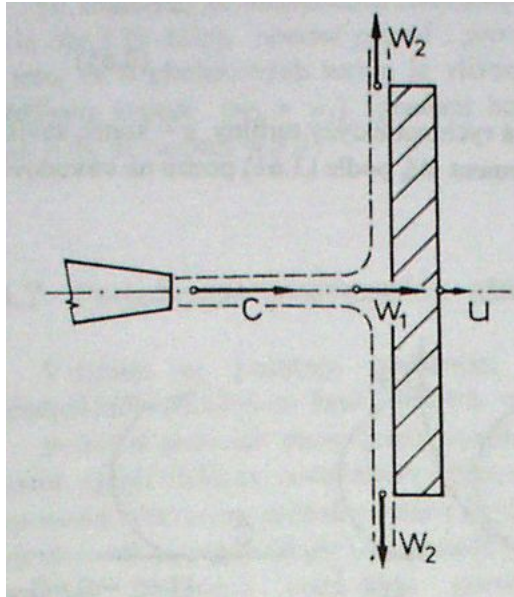
$$p_{1'} = p_2 = p_b$$

$$\frac{p_{1''}}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{v_{1'}^2}{2} + E_{d(1-1')} = \frac{v_2^2}{2} + E_{d(1-2)}$$

$$E = \frac{p_{1''}}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

$$E = 0,5 \cdot c^2$$

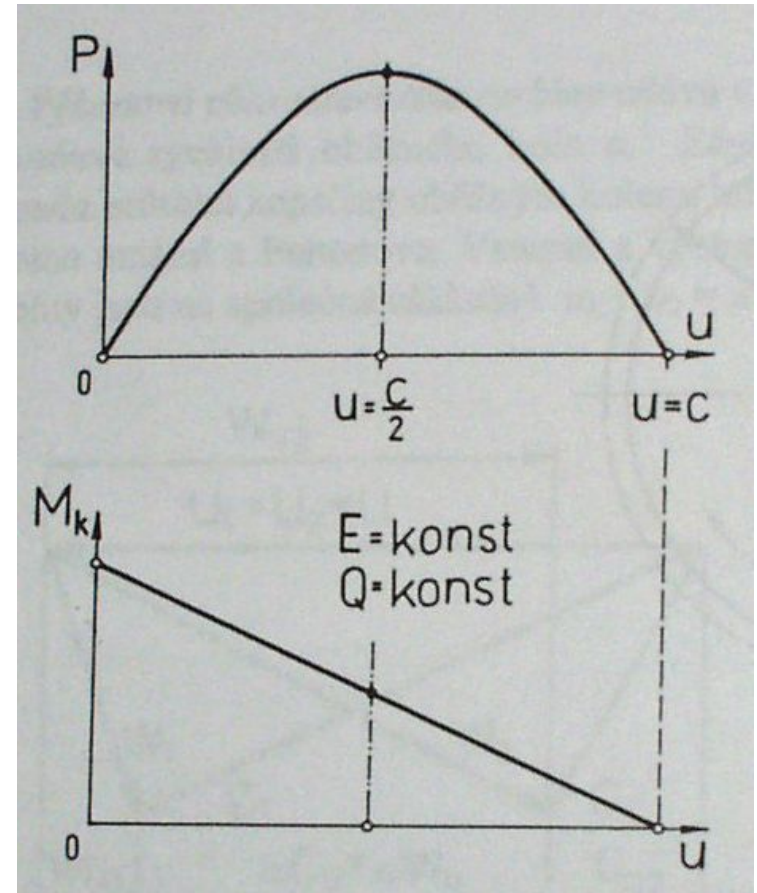
$$P = \rho \cdot Q \cdot u \cdot \Delta w_u$$

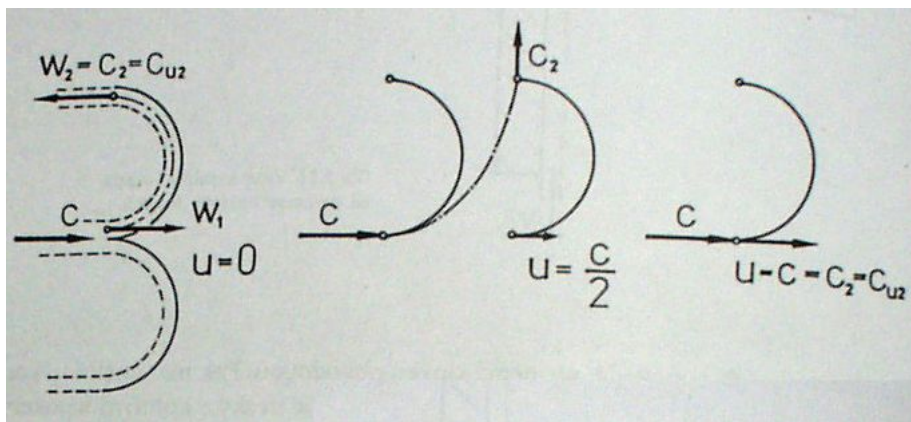


$$P_{\max} = \rho \cdot Q \cdot u \cdot w_1 = \rho \cdot Q \cdot u \cdot (c - u) = \rho \cdot Q \cdot 0,5 \cdot c \cdot (c - 0,5 \cdot c) = \rho \cdot Q \cdot 0,25 \cdot c^2$$

$$\eta_h = 0,25 \cdot c^2 \cdot (0,5 \cdot c^2)^{-1} = 0,5$$

$$M_k = \rho \cdot Q \cdot (r_1 \cdot c_{u1} - r_2 \cdot c_{u2})$$





1) $u = 0$; $c_{u2} = -c$

2) $u = 0,5.c$; $c_{u2} = 0$

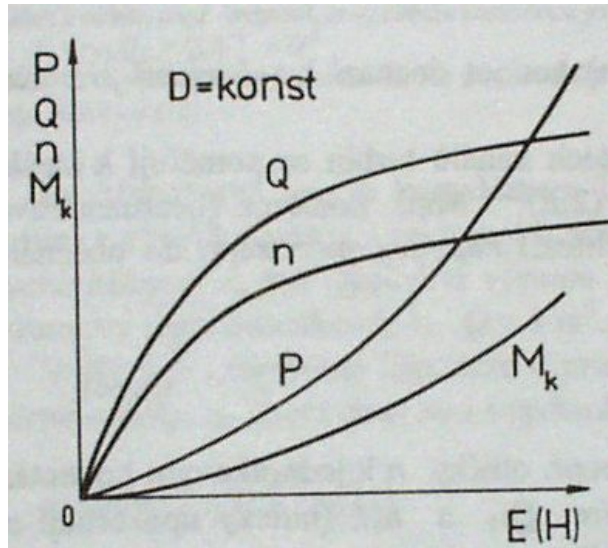
3) $u = c$; $c_{u2} = c$

1) $M_k \sim (c - c_{u2}) = [c - (-c)] = 2.c$

2) $M_k \sim (c - c_{u2}) = c$

3) $M_k \sim (c - c_{u2}) = 0.$

Podobnost provozních stavů



$$c_{1*} = c_1 \cdot (2.E)^{-0,5}$$

$$E.E'^{-1} = (u.u'^{-1})^2 = [D.n.(D'.n')^{-1}]^2 = (D.n.n_{11}^{-1})^2$$

$$n_{11} = D.n.E^{-0,5}$$

$$Q.Q' = (D.D'^{-1})^3 \cdot n.n'^{-1} = Q.Q_{11}^{-1} = D^3 \cdot n.n_{11}^{-1}$$

$$Q_{11} = Q.n_{11} \cdot (D^3.n)^{-1} = Q.(D^2.E^{0,5})^{-1}$$

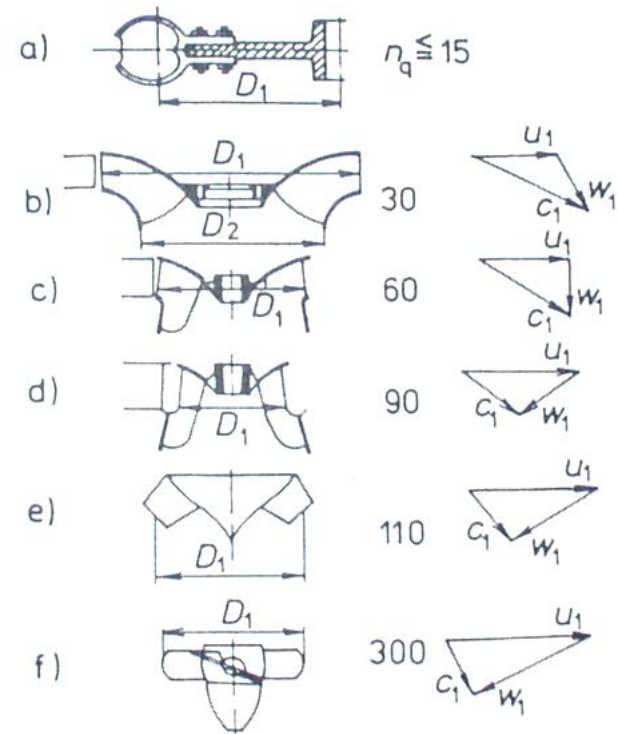
$$n_b = n_{11} \cdot Q_{11}^{0,5} = n.D.E^{-0,5} \cdot [Q.(D^2.E^{0,5})^{-1}]^{0,5} = n.Q^{0,5}.E^{-0,75}$$

Měrné otáčky

$$n_q = 333 n_b = 333 n \frac{Q^{1/2}}{E^{3/4}}$$

$$n_s = 1200 n \frac{Q^{1/2}}{E^{3/4}} \eta^{1/2}$$

Peltonova	4 až 15
Francisova pomaloběžná	25 až 35
normální	35 až 60
rychloběžná	60 až 100
Dériazova	85 až 115
Kaplanova (3 až 10 lopatek)	100 až 310



Podobnost vodních turbín

$$E \eta_h = u_1 c_{u1}, \quad E' \eta'_h = u'_1 c'_{u1}$$

$$E \eta_h = k u_1^2, \quad E' \eta'_h = k u'^2_1$$

$$\frac{u_1}{u'_1} = \frac{n}{n'} = \left(\frac{E}{E'} \right)^{1/2}$$

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{c_{m1}}{c'_{m1}} = \frac{u_1}{u'_1} = \left(\frac{E}{E'} \right)^{1/2}$$

$$\frac{P}{P'} = \frac{Q E}{Q' E'} = \left(\frac{E}{E'} \right)^{3/2}$$

$$\frac{M}{M'} = \frac{P}{P'} \frac{n'}{n} = \frac{E}{E'}$$

Změna rozměrů oběžného kola

$$\pi D_1 n = \pi D'_1 n' , \quad \frac{n}{n'} = \frac{D'_1}{D_1}$$

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{D_1^2}{D'^2_1}$$

Jednotkové parametry

$$n_{1E1D} = \frac{n D_1}{\sqrt{E}} \quad (n_{1H1D} = \frac{n D_1}{\sqrt{H}})$$

$$Q_{1E1D} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{E}} \quad (Q_{1H1D} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}})$$

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} \sqrt[10]{\frac{E_M}{E_D}}$$

Sací roura turbíny

$$p_{2 \min} = p_3 - \Delta p = p_a - \rho \cdot 0,5(c_3^2 - c_4^2) \cdot \eta_S - \rho \cdot g \cdot H_S - \Delta p$$

$$p_{2 \min} \cdot (\rho \cdot g)^{-1} = H_a - H_S - [0,5 \cdot (c_3^2 - c_4^2) \cdot g^{-1}] \cdot \eta_S - \Delta p \cdot (\rho \cdot g)^{-1} > H_w$$

$$H_S \leq H_a - H_w - [0,5 \cdot (c_3^2 - c_4^2) \cdot g^{-1}] \cdot \eta_S - \Delta p \cdot (\rho \cdot g)^{-1}$$

$$H_S \leq H_A - \sigma \cdot H$$

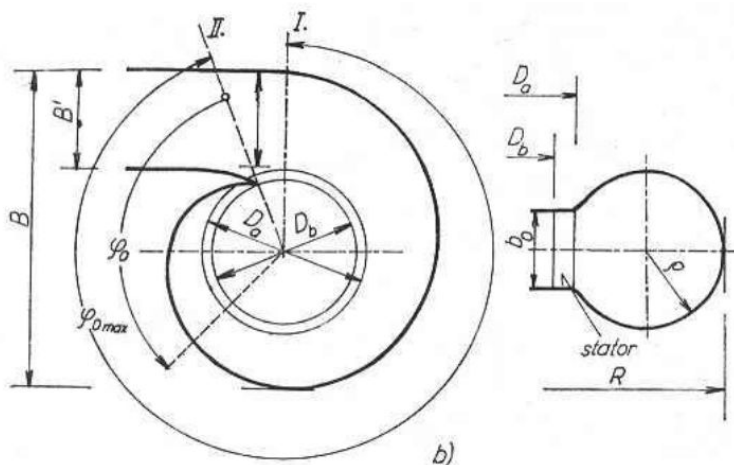
$$H_A = 10 - h \cdot 900^{-1}$$

$n_q \text{ (min}^{-1}\text{)}$	14	28	56	82	112	140	164	192	224
$\sigma_d \text{ (l)}$	0,02	0,05	0,11	0,20	0,35	0,57	0,81	1,45	2,15

Spirála

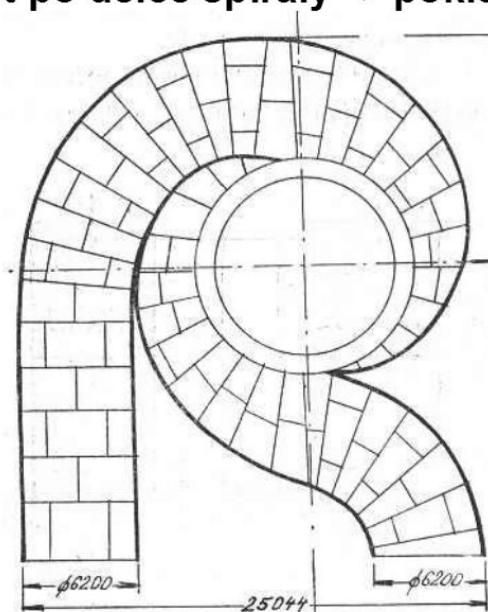
Zajišťuje rovnoměrné rozdělení průtoku do jednotlivých kanálků po obvodu rozváděcího kola.

Odběr části průtoku do jednotlivých kanálků $\Rightarrow$ pokles průtoku po délce spirály. Nezbytná konstantní rychlost po délce spirály $\Rightarrow$ pokles průtočné plochy spirály po její délce.



Jednonátoková spirála

K141 VIN



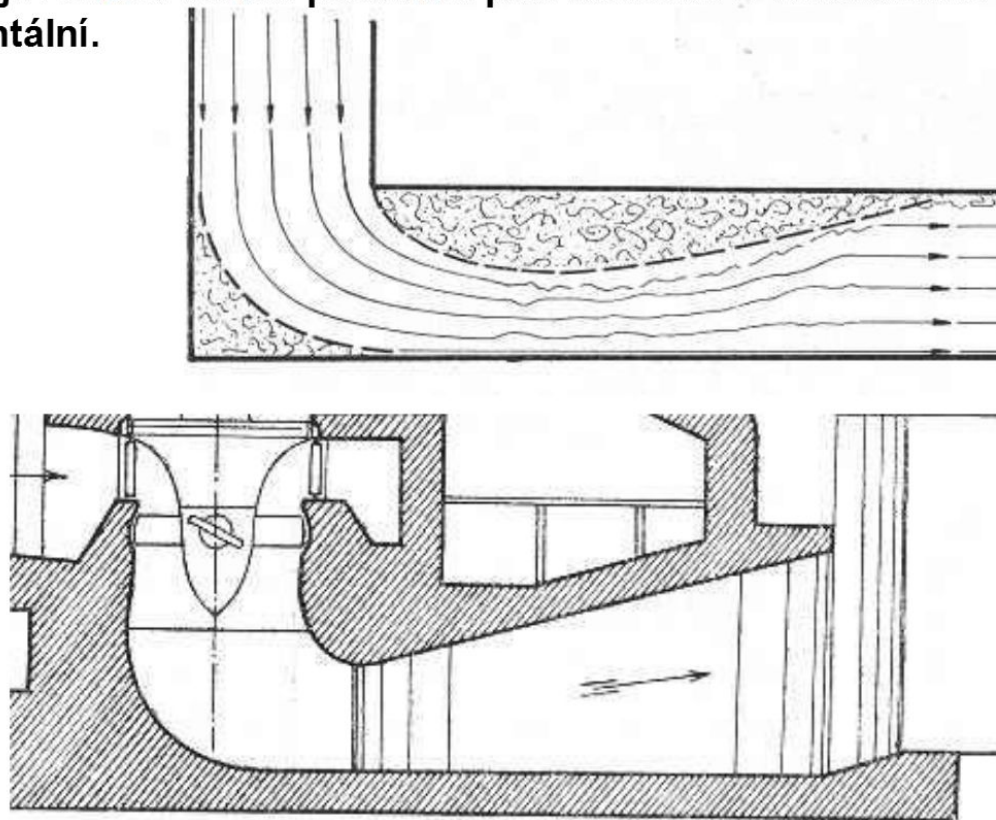
Dvounátoková spirála

Využití vodní energie

25

Savka

Zajišťuje změnu směru proudění pod turbínou z vertikálního na horizontální.



K141 VIN

Využití vodní energie

26