



HYDROMECHANICKÉ PROCESY



výstup
vyčiřené
kapaliny

Dělení heterogenních směsí působením odstředivé síly

(přednáška)

Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

(e-mail: Tomas.Jirout@fs.cvut.cz, tel.: 2 2435 2681)



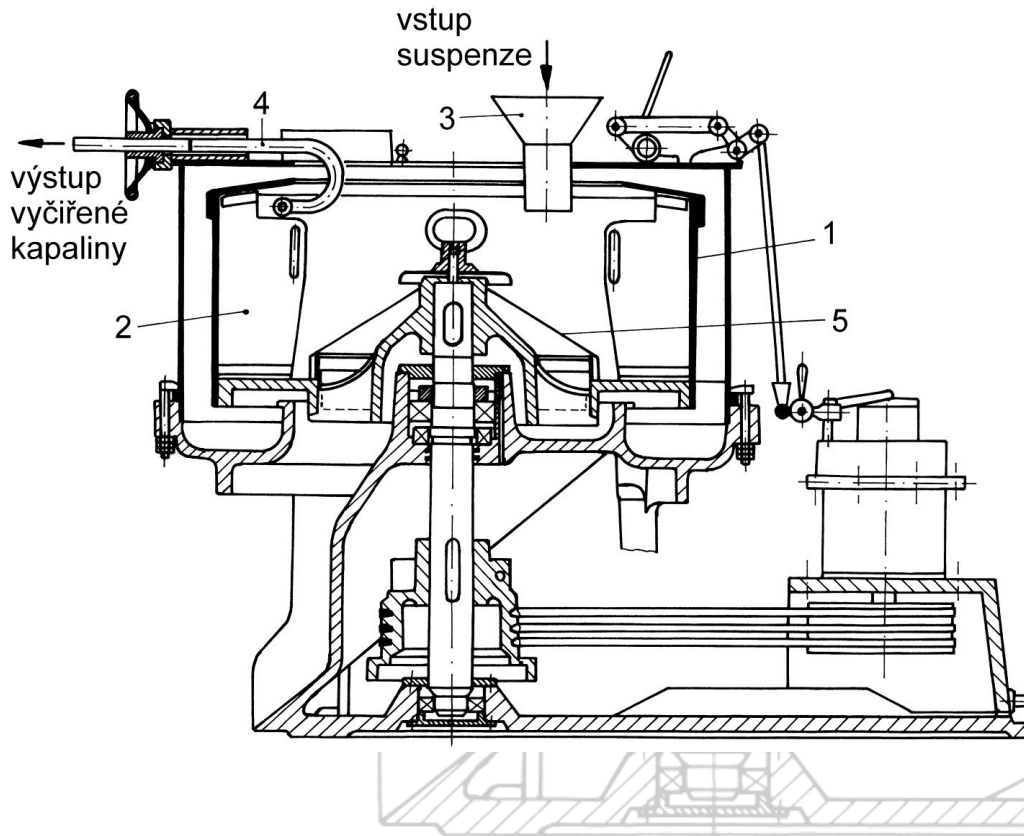
EVROPSKÝ SOCIÁLNÍ FOND
PRAHA & EU:INVESTUJEME DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



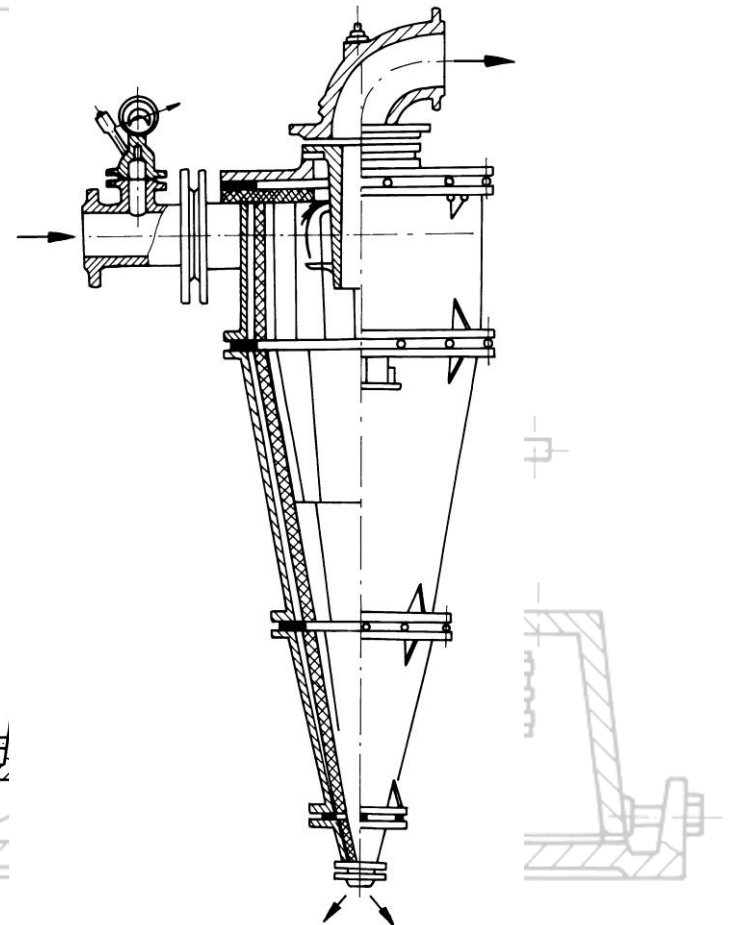
DĚLENÍ HETEROGENNÍCH SMĚSÍ PŮSOBENÍM ODSTŘEDIVÉ SÍLY

výstup
vyčiřené
k

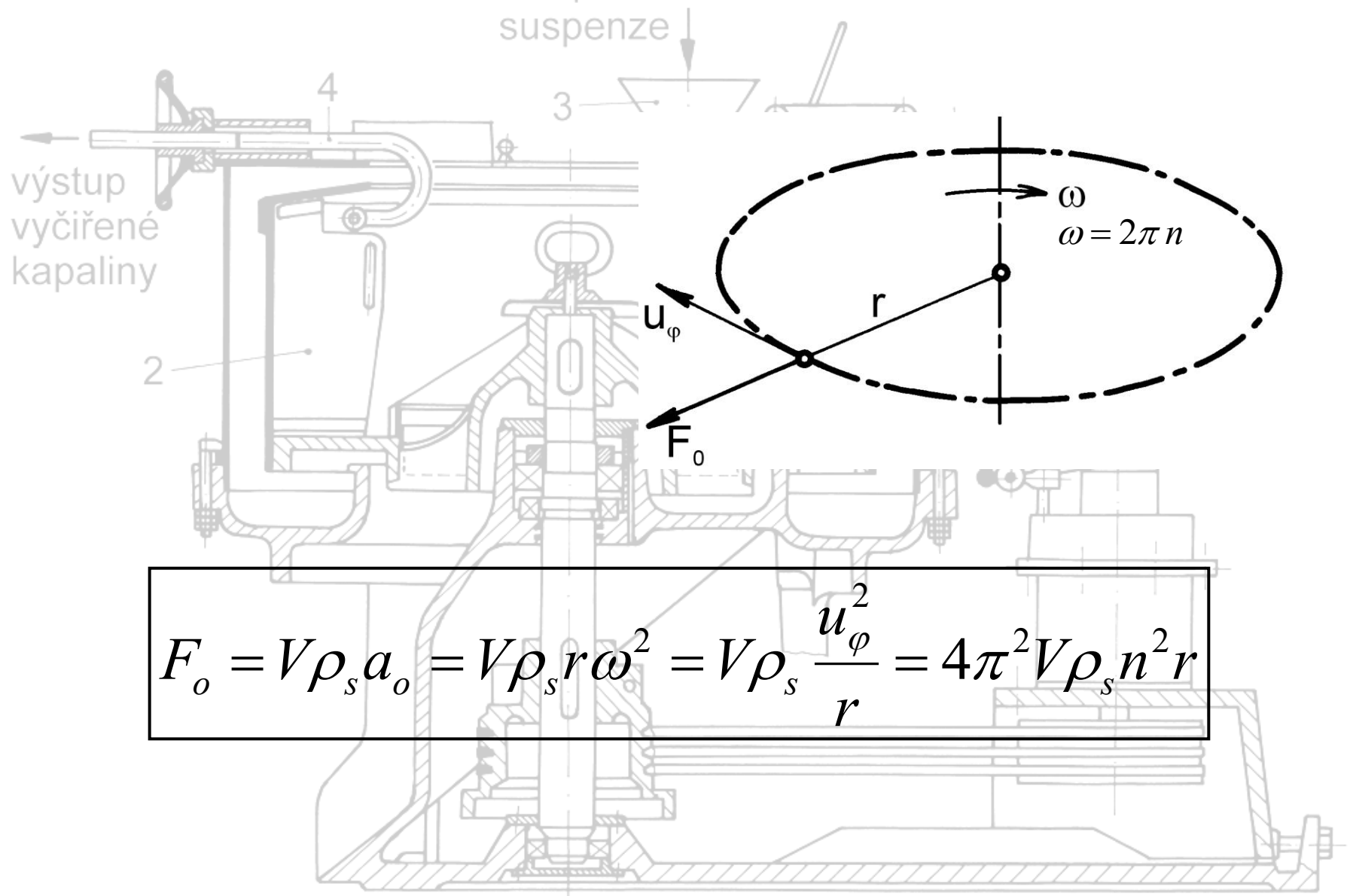
Odstředivky



Vírové odlučovače



Účinek odstředivé síly na hmotnou částici



Kromě odstředivé síly působí na hmotnou částici ještě **vztlak**, vyvolaný odstředivým účinkem na tu část kapaliny hustotě ρ , která rotuje stejnou úhlovou rychlostí jako částice.

$$F_{ov} = 4\pi^2 V \rho n^2 r$$

Účinek **gravitace** na hmotnou částici, jakož i na kapalinu v odstředivce se zpravidla zanedbává. Např. na částici o hmotnosti 1 g působí v bubnu odstředivky s poloměrem $r = 0,5$ m při frekvenci otáčení 1470 min^{-1} odstředivá síla

$$F_o = 4\pi^2 \cdot 0,001 \left(\frac{1470}{60} \right)^2 0,5 = 11,85 \text{ N}.$$

Pro porovnání se vypočítá gravitační síla

$$G = mg = 0,001 \cdot 9,81 = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

a poměr obou sil má tedy hodnotu:

$$K_s = \frac{F_o}{G} = \frac{11,85}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} = 1208$$

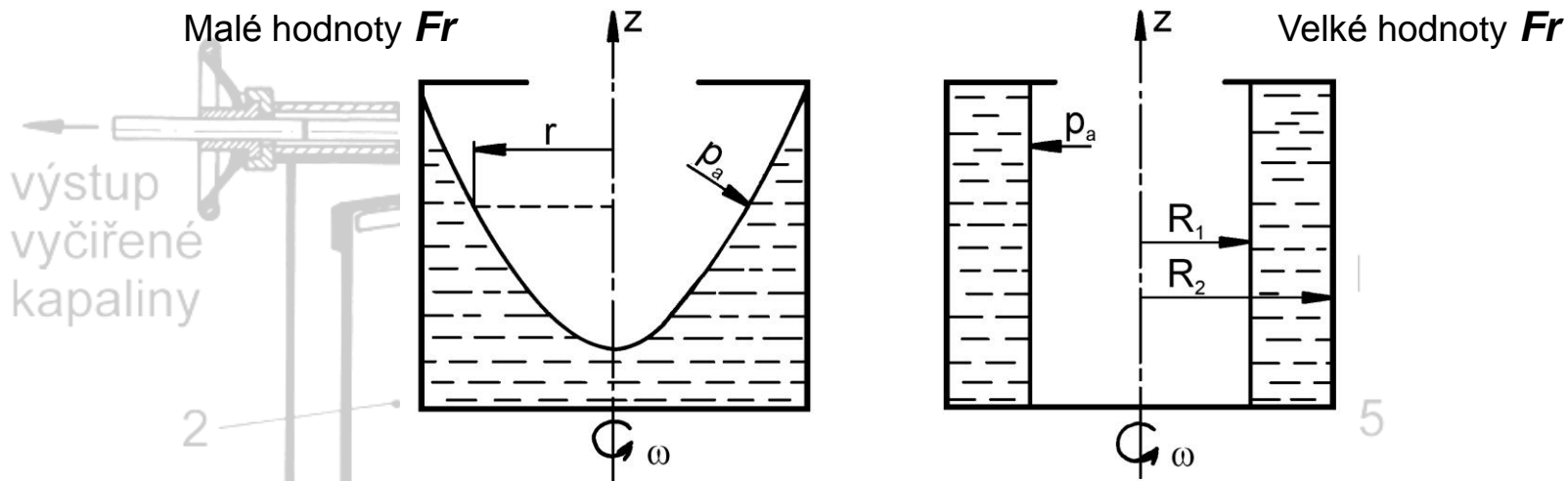
$$K_s = 50 \div 5 \cdot 10^4$$

V praxi se pohybuje tento silový poměr u odstředivek v rozmezí ultraodstředivek dosahuje až hodnoty $1 \cdot 10^6$.

Tento poměr sil, nazývaný také **dělicí faktor**, je roven Froudovu číslu:

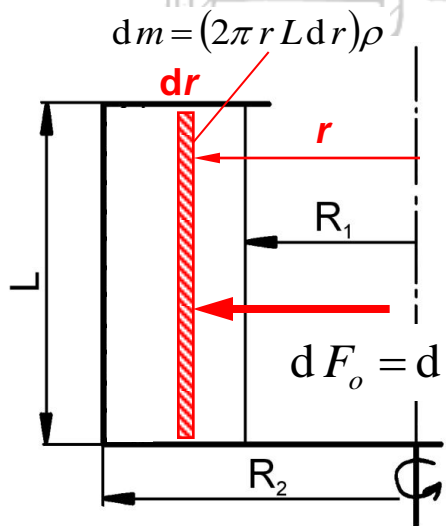
$$\frac{F_o}{G} = \frac{u_\varphi^2}{rg} = Fr$$

Účinek odstředivé síly na kapalinu



výstup
vyčiřené
kapaliny

Tlak působící na rotující kapalinu



$$dp = \frac{dF_o}{S} = \rho \omega^2 r dr \Rightarrow p = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 + const.$$

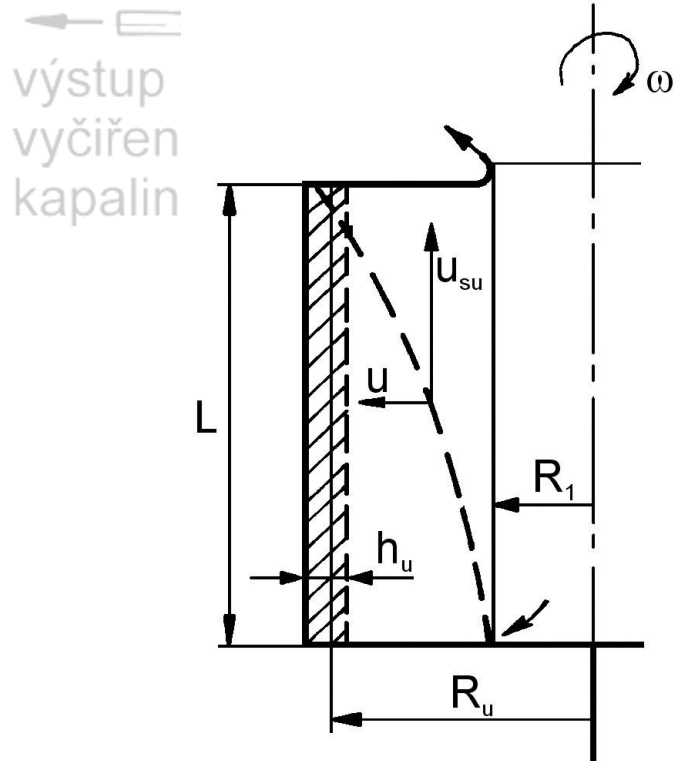
$$S = 2\pi r L$$

Tlak působící na
stěnu bubnu

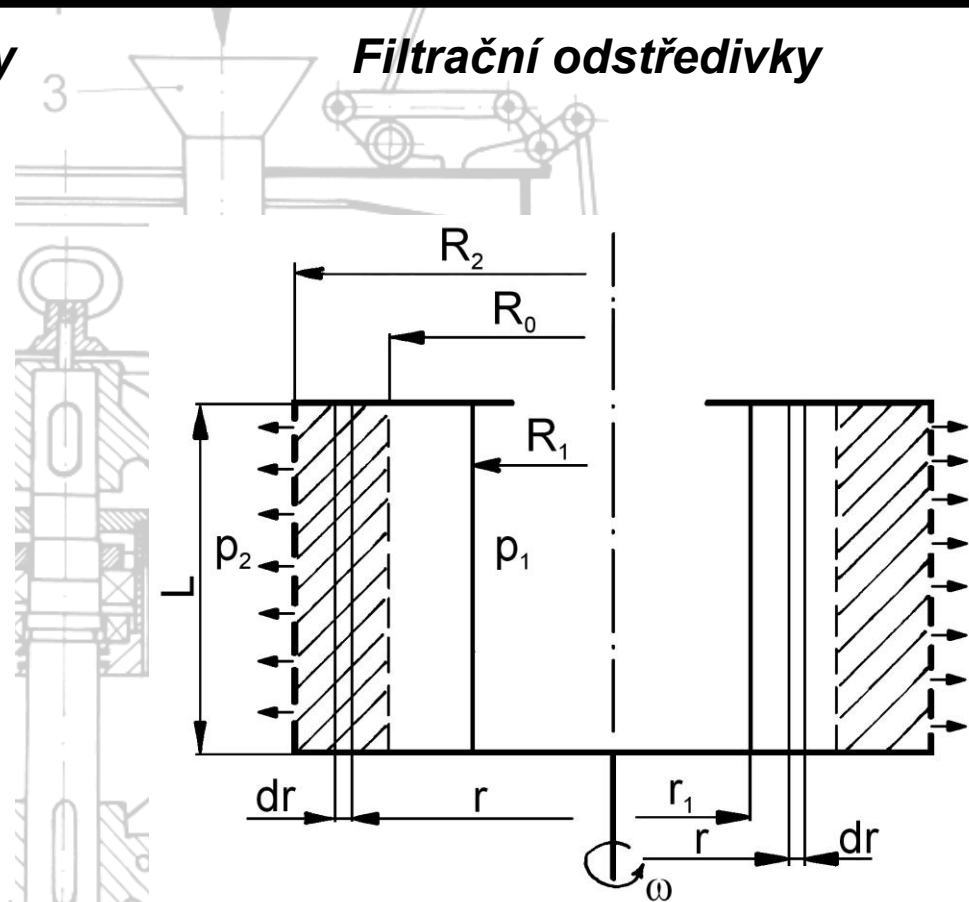
$$p = p_a + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (R_2^2 - R_1^2)$$

ODSTŘEDIVKY

Usazovací odstředivky



Filtrační odstředivky



Podle způsobu práce rozeznáváme odstředivky pracující:

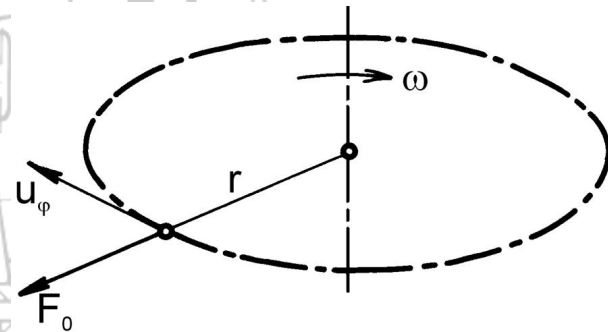
- periodicky
- polokontinuálně
- kontinuálně

Výpočet odstředivek

Rychlost usazování v odstředivkách

Na částici, usazující se v rotující kapalině, působí následující síly:

- odstředivá síla \vec{F}_o
- vztlaková síla v odstředivém poli \vec{F}_{ov}
- Coriolisova síla \vec{F}_c
- tíhová síla \vec{G}
- vztlaková síla v gravitačním poli \vec{F}_{iv}
- odpor prostředí \vec{F}_r
- setrvačná síla \vec{F}_s



Rovnováha sil v radiálním směru

$$F_o - F_{ov} - F_r - F_{sr} = 0 \Rightarrow u = \sqrt{\frac{4 D(\rho_s - \rho)r\omega^2}{3 C_D \rho}}$$

$$F_o = \frac{\pi D^3}{6} \rho_s r \omega^2 \quad F_{ov} = \frac{\pi D^3}{6} \rho r \omega^2 \quad F_r = C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{u^2}{2} \rho$$

$$u = \sqrt{\frac{4 D(\rho_s - \rho)r\omega^2}{3 C_D \rho}}$$

Usazovací rychlost v poli odstředivé síly je možno získat z rovnice pro usazovací rychlost v gravitačním poli nahradíme-li gravitační zrychlení zrychlením odstředivým.

$$g \rightarrow r\omega^2$$

Stokesova oblast:

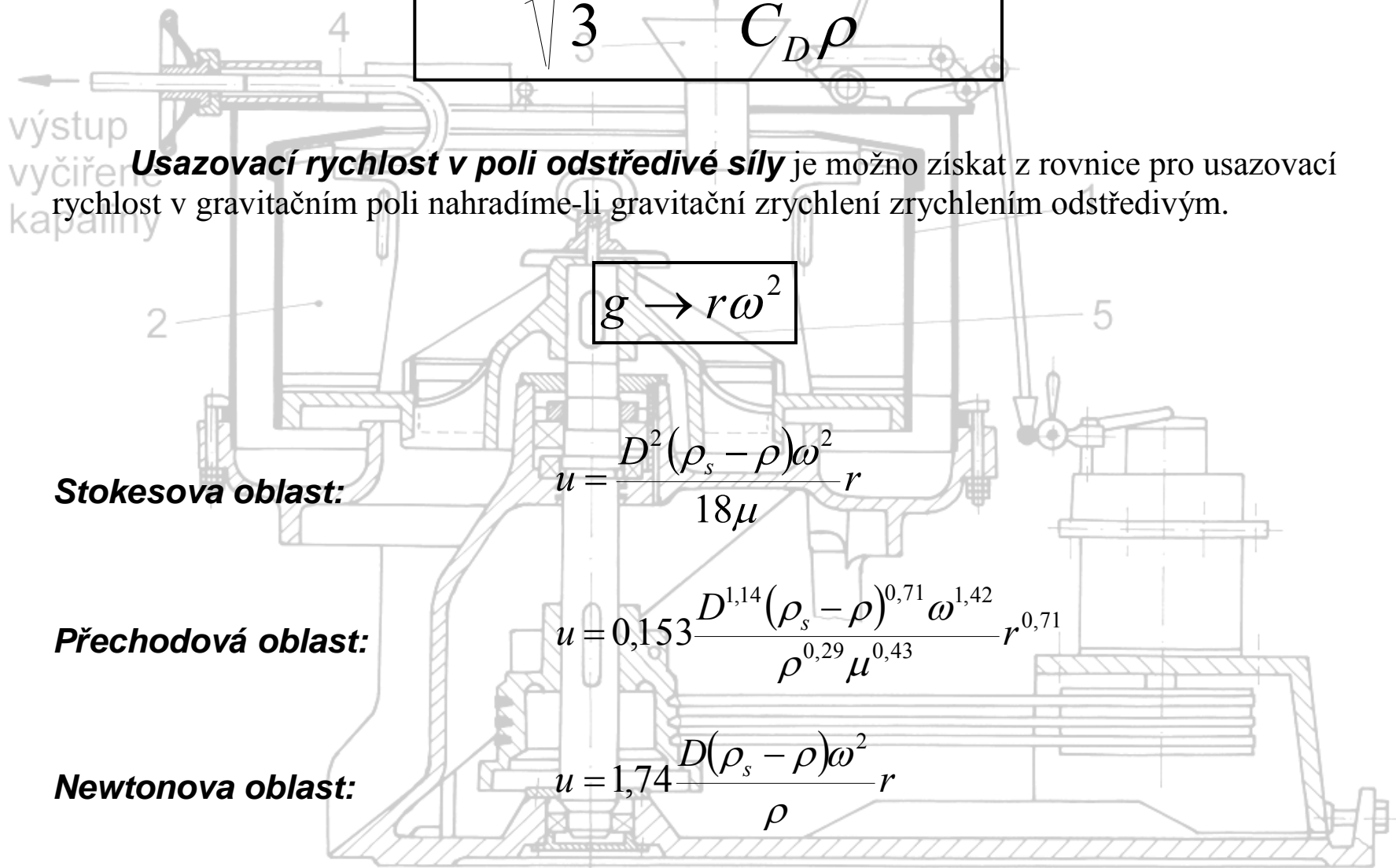
$$u = \frac{D^2(\rho_s - \rho)\omega^2}{18\mu} r$$

Přechodová oblast:

$$u = 0,153 \frac{D^{1,14}(\rho_s - \rho)^{0,71} \omega^{1,42}}{\rho^{0,29} \mu^{0,43}} r^{0,71}$$

Newtonova oblast:

$$u = 1,74 \frac{D(\rho_s - \rho)\omega^2}{\rho} r$$

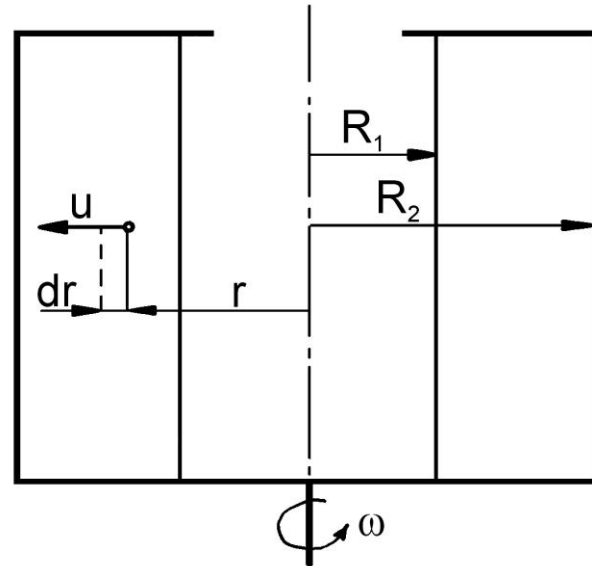


Doba usazování v bubnové odstředivce

$$dr = u dt$$

$$\int_0^t dt = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{u}$$

výstup
vyčiřené
kapaliny



Stokesova oblast:

$$t = \frac{18\mu}{D^2(\rho_s - \rho)\omega^2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{18\mu}{D^2(\rho_s - \rho)\omega^2} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

Přechodová oblast:

$$t = \frac{\rho^{0,29} \mu^{0,43}}{0,153 D^{1,14} (\rho_s - \rho)^{0,71} \omega^{1,42}} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^{0,71}} = 22,5 \frac{\rho^{0,29} \mu^{0,43}}{D^{1,14} (\rho_s - \rho)^{0,71} \omega^{1,42}} (R_2^{0,29} - R_1^{0,29}),$$

Newtonova oblast:

$$t = \frac{1}{1,74} \sqrt{\frac{\rho}{D(\rho_s - \rho)\omega^2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^{1/2}}} = 1,15 \sqrt{\frac{\rho}{D(\rho_s - \rho)\omega^2} (\sqrt{R_2} - \sqrt{R_1})}$$

Objemová výkonnost bubnových odstředivek

Periodicky pracující odstředivka

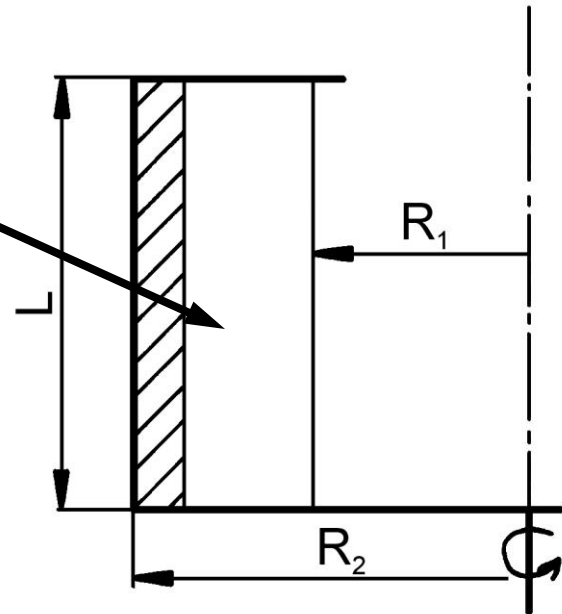
← Doba trvání jedné periody t_p sestává z:

- čistého času na odstředování t
- manipulačního času t_m (plnění, spouštění, vyprazdňování a zastavování)

výstup
vyčiřené
kapaliny

$$V = \pi L (R_2^2 - R_1^2)$$

$$\dot{V}_{stř} = \frac{\pi L (R_2^2 - R_1^2)}{t + t_m}$$



Polokontinuální odstředivka

Doba trvání jedné periody t_p je v tomto případě dána dobou naplnění bubnu odstředivky usazeninou do určité maximální výšky h_u . **Hmotnost usazeniny m_u :**

$$m_u = 2\pi R_u L h_u \rho_u,$$

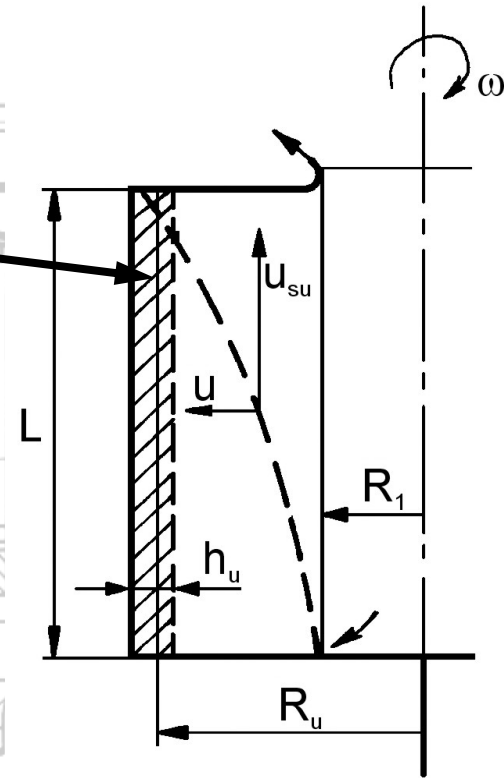
kde R_u je střední poloměr vrstvy usazeniny, L - výška bubnu a ρ_u - hustota usazeniny.

Za předpokladu, že všechna pevná fáze přejde ze suspenze do usazeniny, platí **hmotnostní bilance pevné fáze:**

$$m_u w_u = m_{su} w_{su},$$

kde m_{su} je **hmotnost suspenze zpracované za jednu periodu** a w_{su} resp. w_u - hmotnostní podíl pevné fáze v suspenzi, resp. v usazenině.

$$m_{su} = m_u \frac{w_u}{w_{su}} = 2\pi R_u L h_u \rho_u \frac{w_u}{w_{su}} \quad \text{resp.} \quad V_{su} = 2\pi R_u h_u L \frac{\rho_u}{\rho_{su}} \frac{w_u}{w_{su}}$$



vstup

Maximální dovolený průtok suspenze odstředivkou \dot{V}_{su} . Při jeho výpočtu vyjdeme z podmínky, že **doba zdržení suspenze v bubnu odstředivky t_z se musí rovnat době usazování částic t** :

výstup
vyčiřené
kapaliny

$$t_z = \frac{V}{\dot{V}_{su}} = t \Rightarrow$$

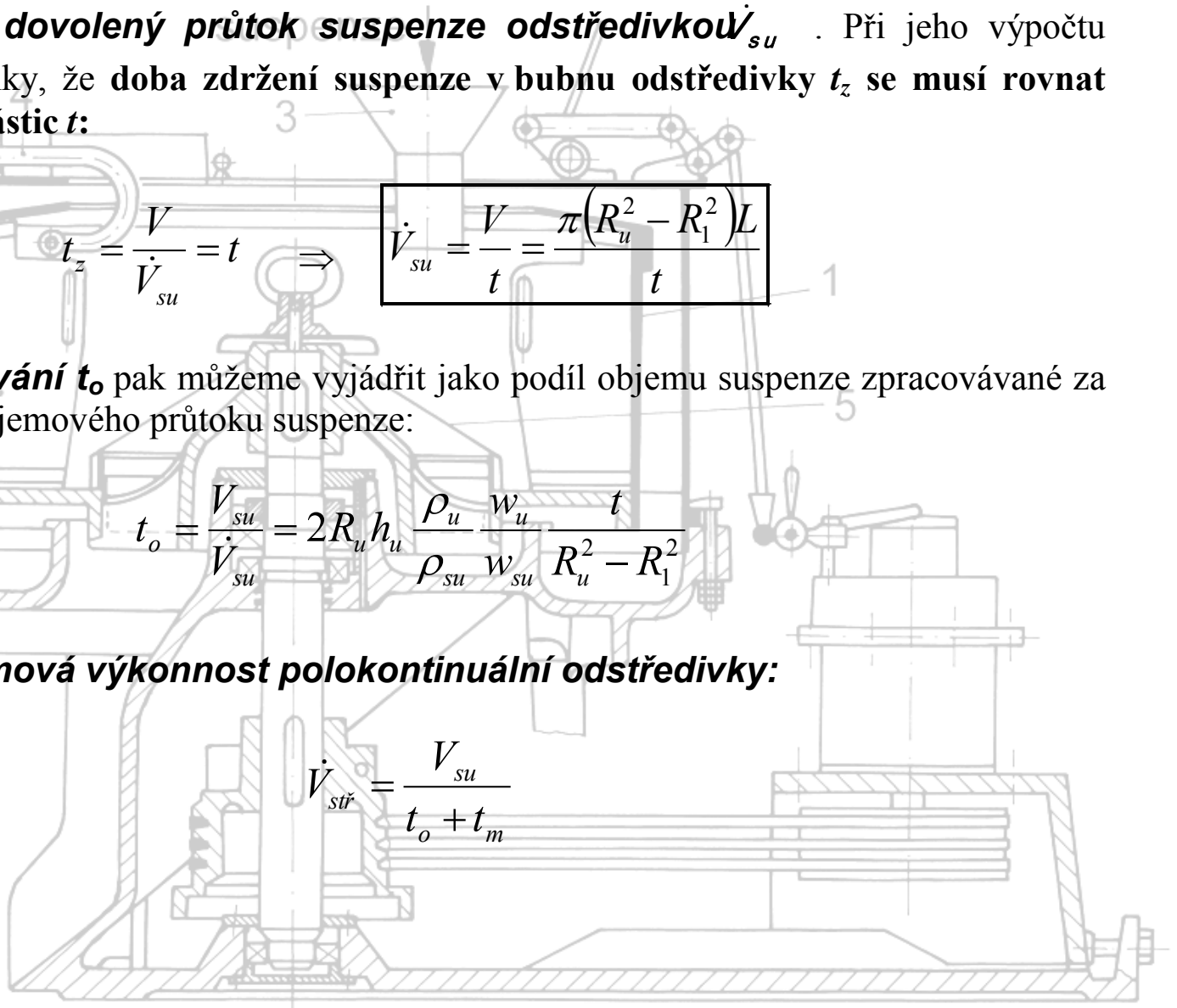
$$\dot{V}_{su} = \frac{V}{t} = \frac{\pi(R_u^2 - R_1^2)L}{t}$$

Dobu odstředování t_o pak můžeme vyjádřit jako podíl objemu suspenze zpracovávané za jednu periodu a objemového průtoku suspenze:

$$t_o = \frac{V_{su}}{\dot{V}_{su}} = 2R_u h_u \frac{\rho_u w_u t}{\rho_{su} w_{su} (R_u^2 - R_1^2)}$$

Průměrná objemová výkonnost polokontinuální odstředivky:

$$\dot{V}_{str} = \frac{V_{su}}{t_o + t_m}$$



Kontinuální odstředivka

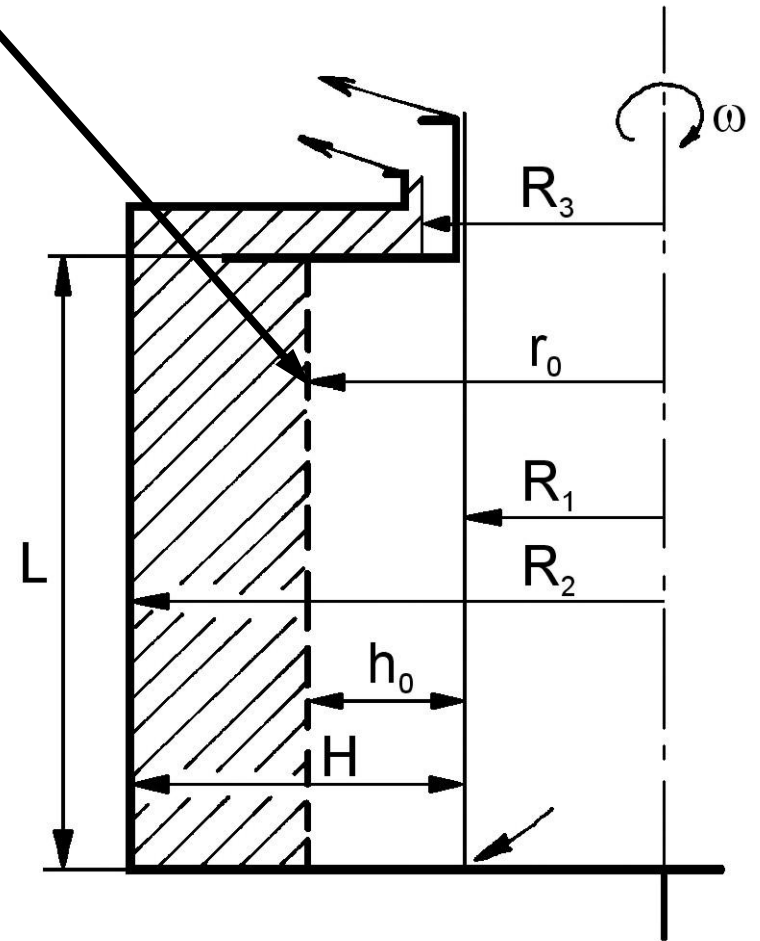
tekutý sediment

Poloměr rozhraní mezi lehkou a těžkou fází:

bilance tlaku na fázovém rozhraní

$$p_a + \frac{1}{2} \omega^2 \rho (r_o^2 - R_1^2) = p_a + \frac{1}{2} \omega^2 \rho_u (r_o^2 - R_3^2)$$

$$r_o = \sqrt{\frac{\rho_u R_3^2 - \rho R_1^2}{\rho_u - \rho}}$$



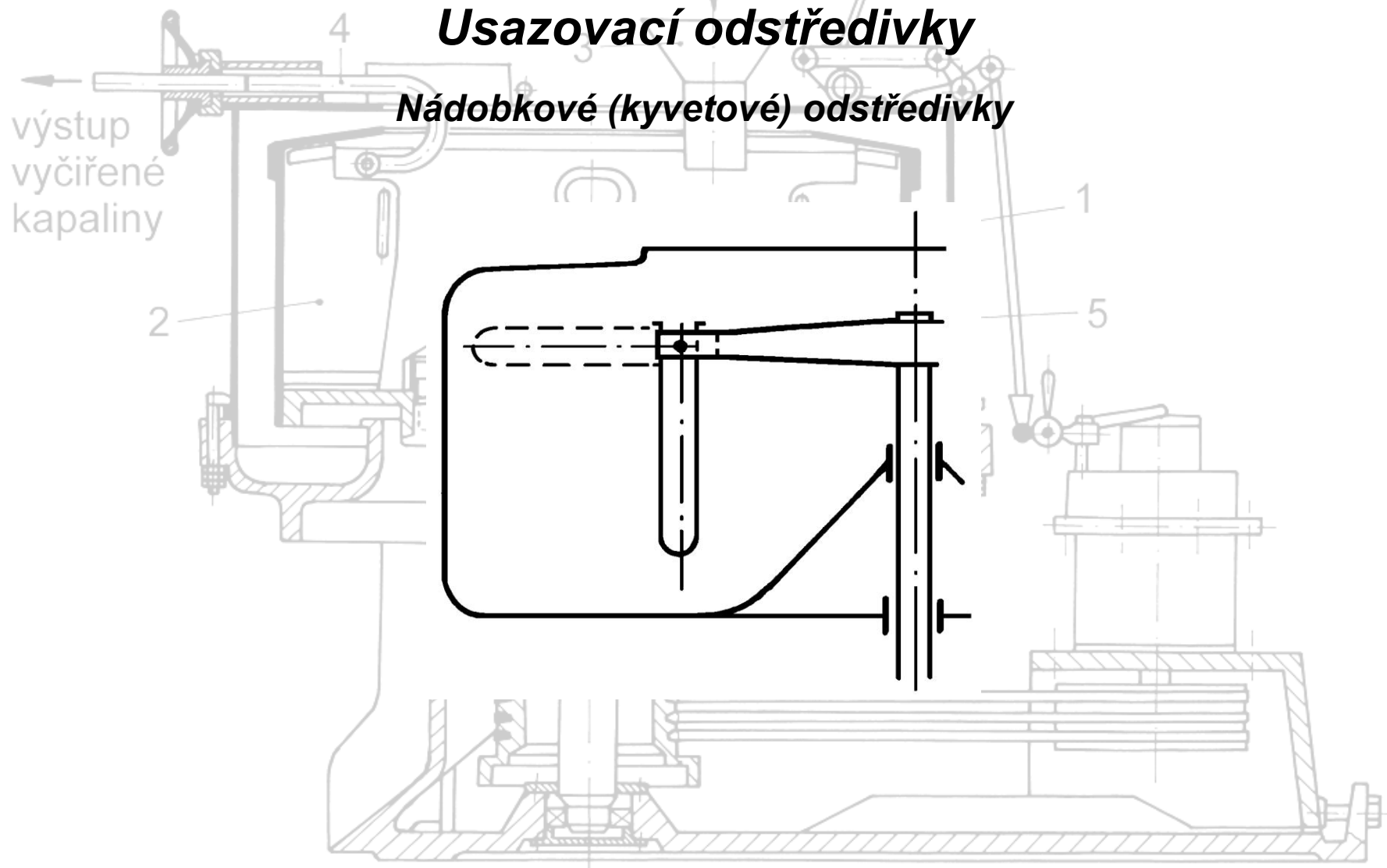
výstup
vyčiřené
kapaliny

vstup
suspenze

Hlavní typy a provedení odstředivek

Usazovací odstředivky

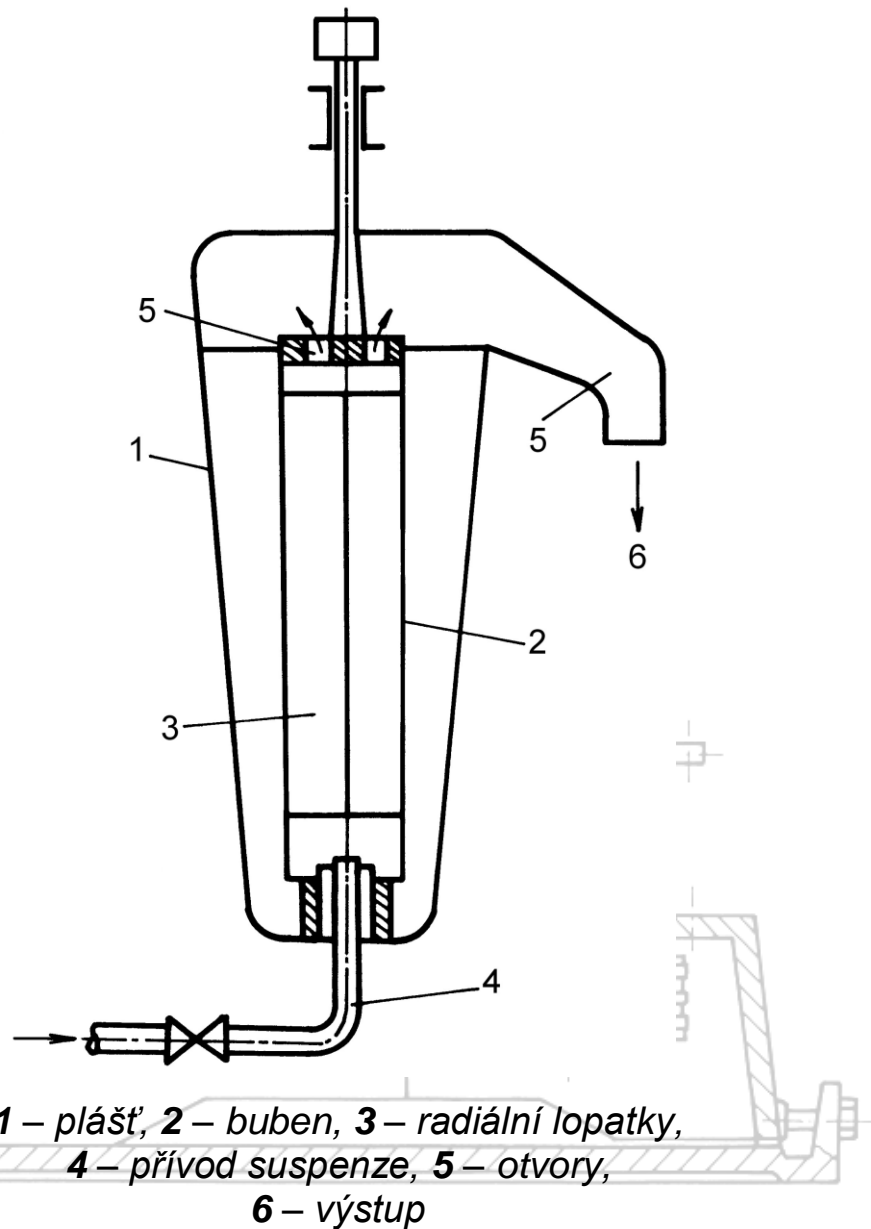
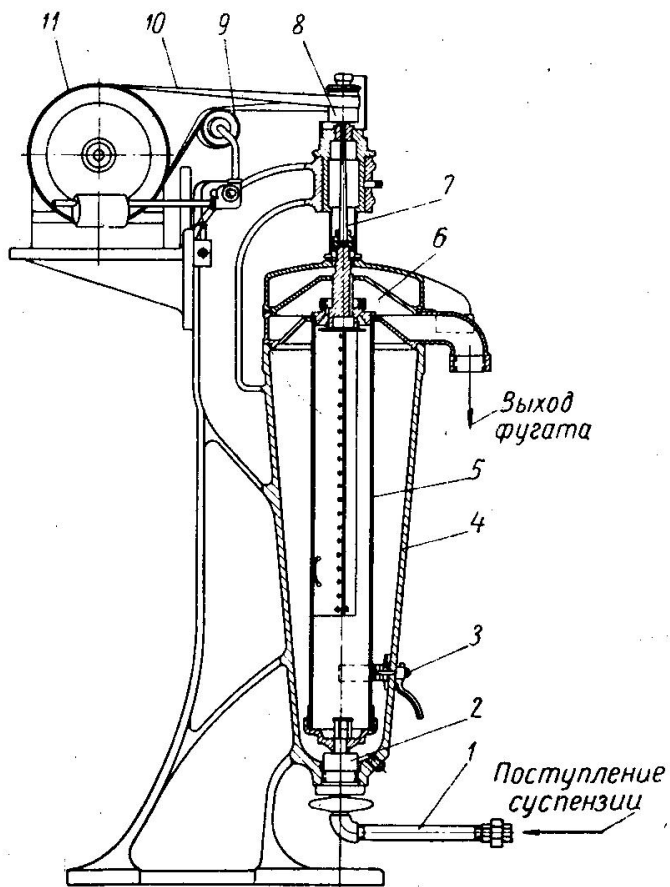
Nádobkové (kyvetové) odstředivky



Trubkové odstředivky

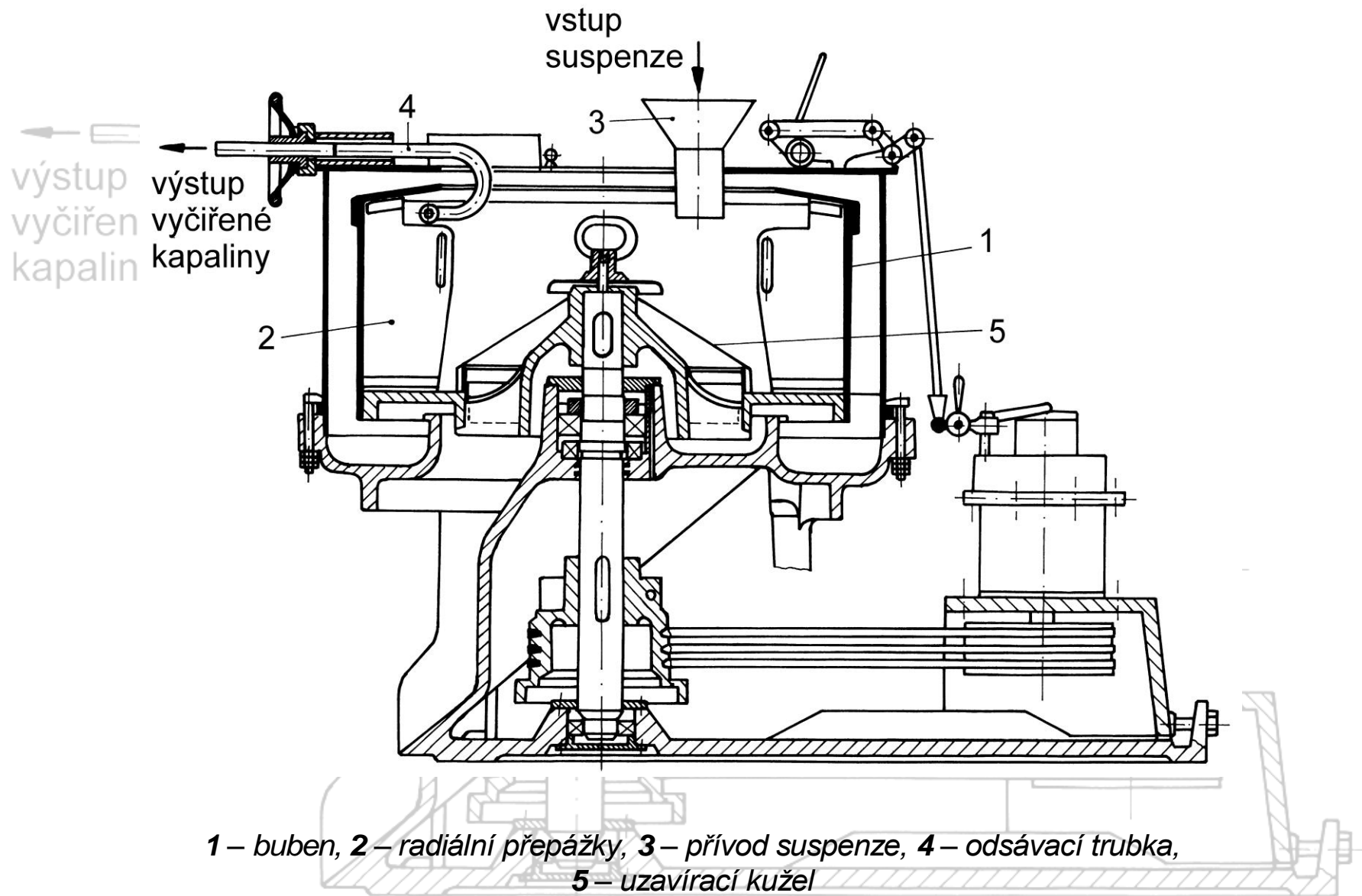
vstup
suspence

←
výstup
vyčiřer
kapalir



1 – plášť, 2 – bubek, 3 – radiální lopatky,
4 – přívod suspenze, 5 – otvory,
6 – výstup

Bubnové odstředivky



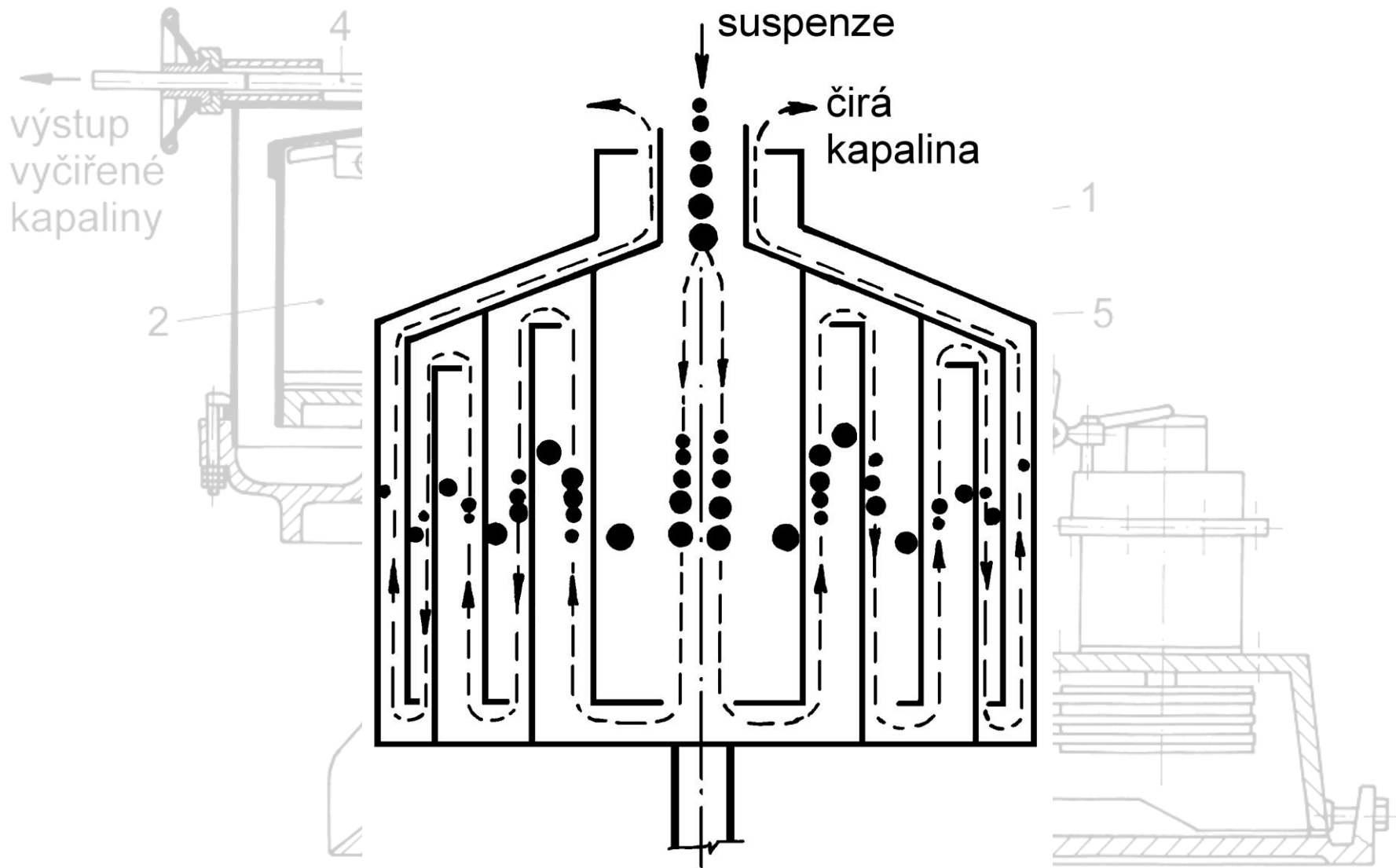
Komorové odstředivky

vstup
suspenze ↓

suspenze

čirá
kapalina

výstup
vyčiřené
kapaliny

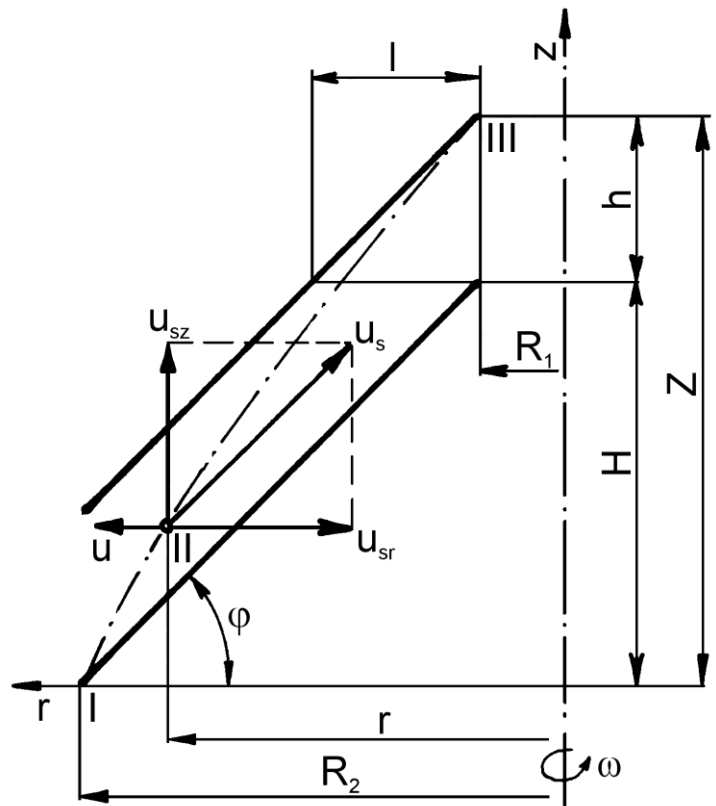
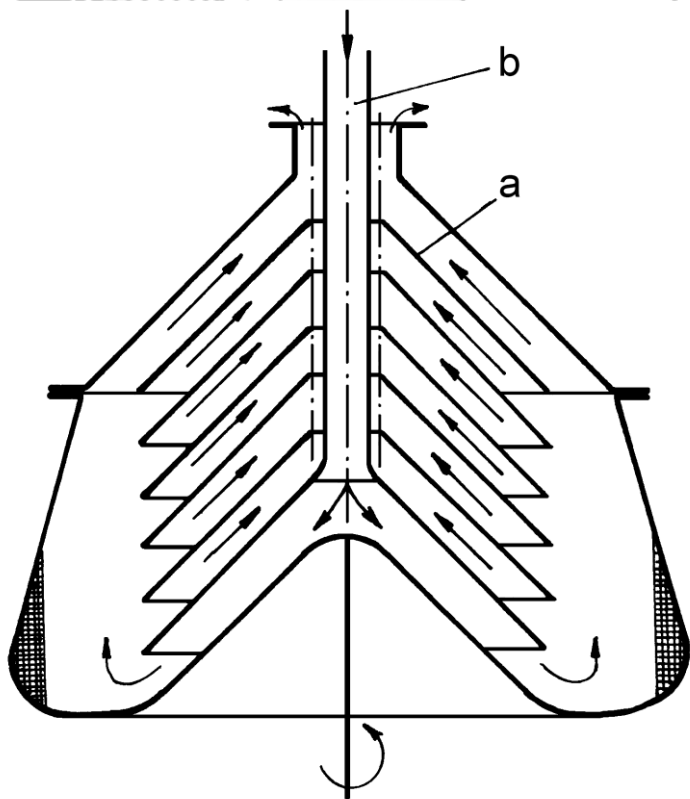


Talířové odstředivky

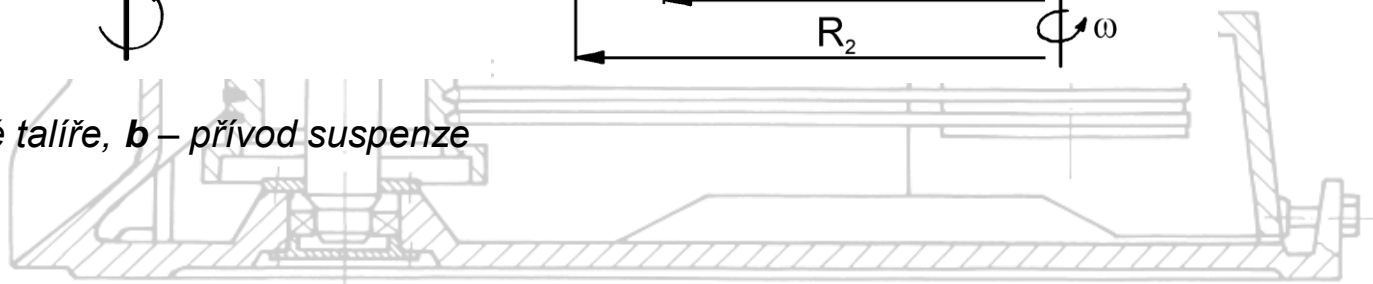
Buben talířové usazovací odstředivky

Dráha částice při usazování v prostoru mezi talíři

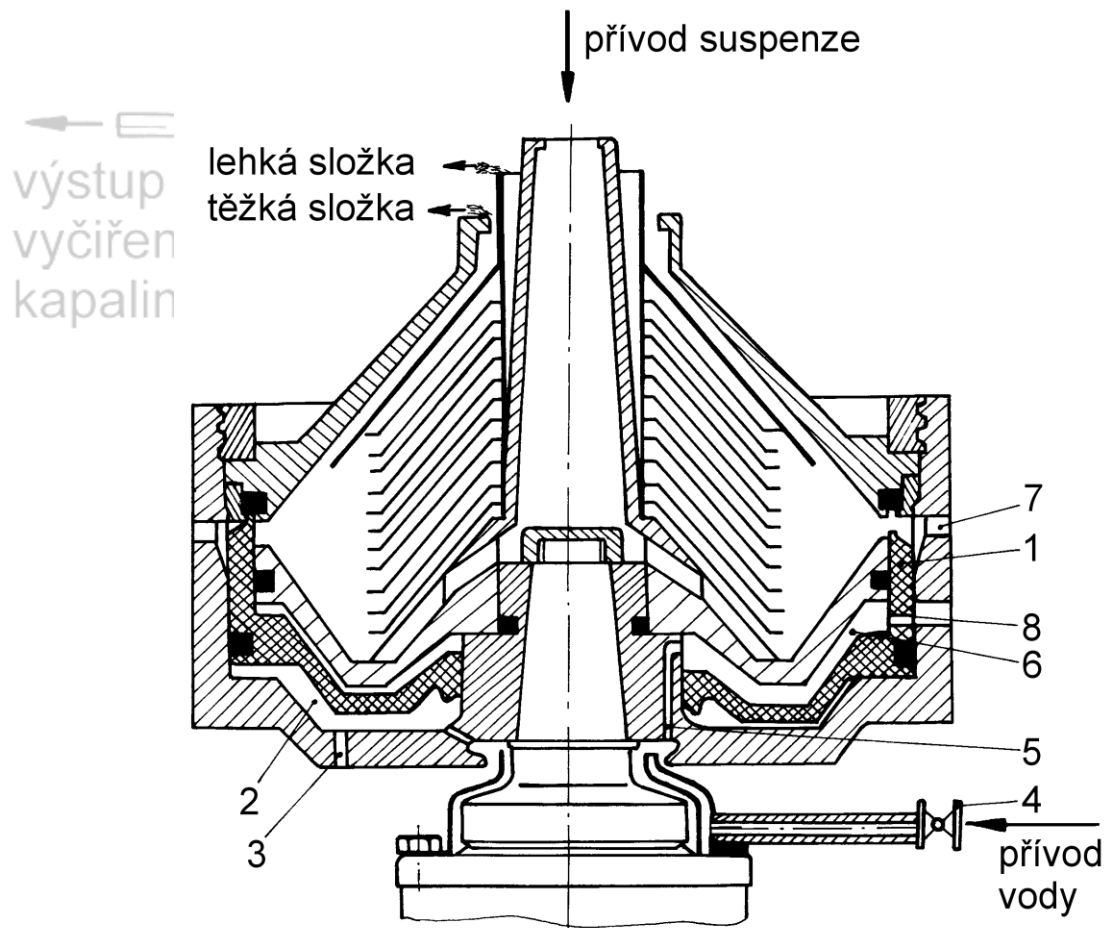
výstup
vyčiřen
kapalin



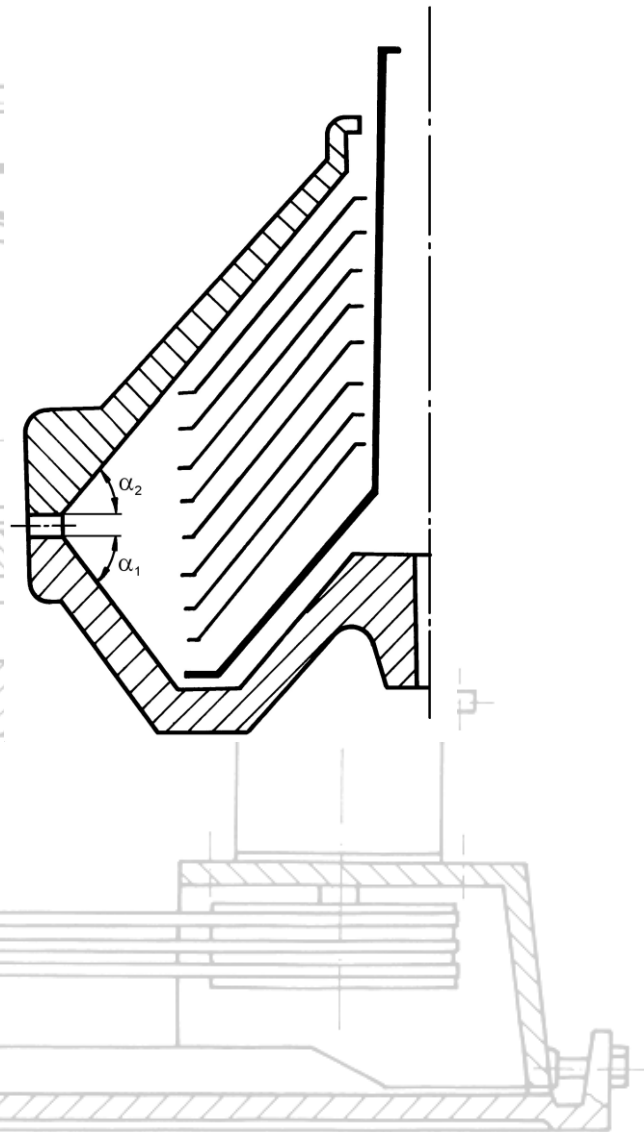
a – kuželové talíře, b – přívod suspenze



Talířová usazovací odstředivka se šoupátkovým odpouštěním kalu



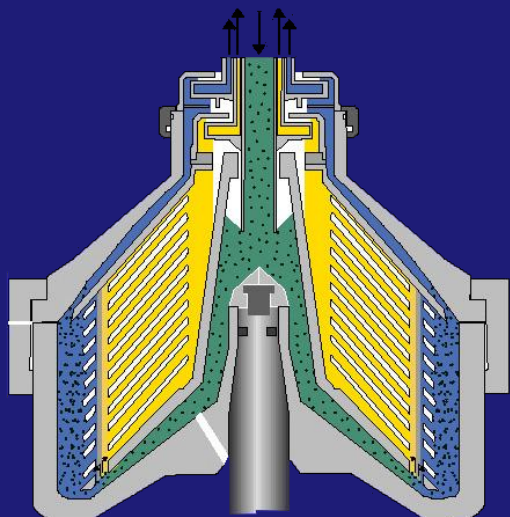
Buben s tryskovým odpouštěním kalu



1 – pístové šoupátko, 2 – prostor pro uzavírací kapalinu, 3 – přepadový otvor, 4 – přívodní kohout, 5 – přívodní kanálek, 6 – prostor pro kapalinu, 7 – otvory pro výstup kalu, 8 – otvor pro výstup ovládací kapaliny

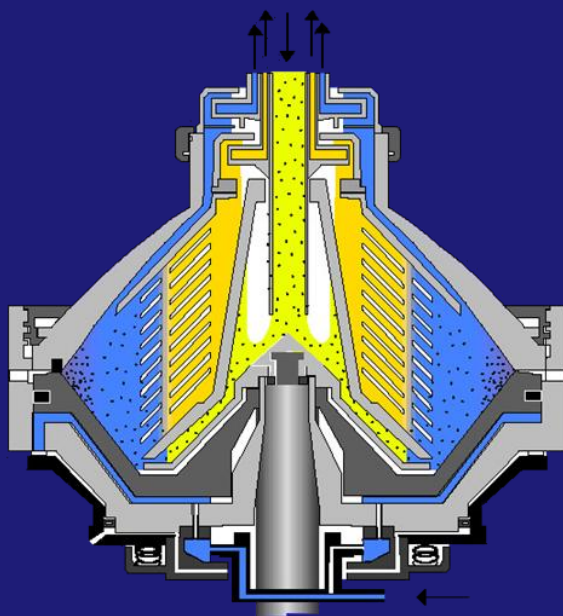
Vysokorychlostní separátor

Manuální



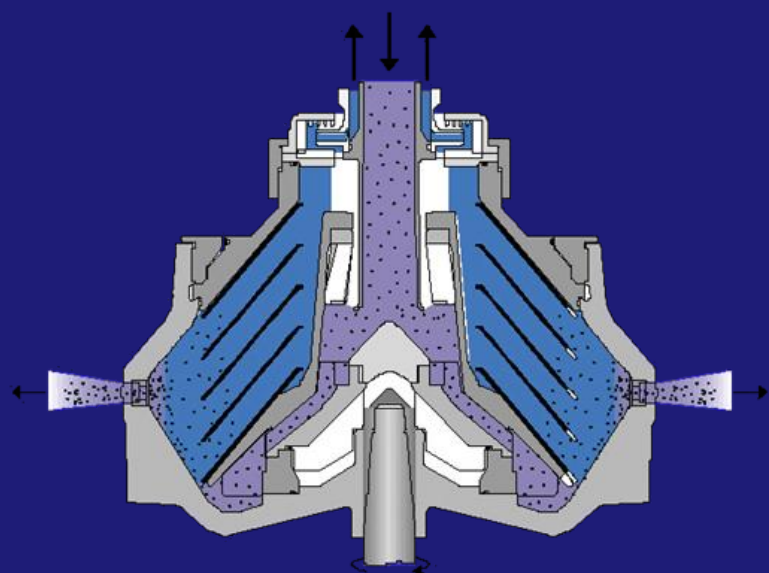
$\leq 0,5\%$ látek v nátku
Pino-plášťový typ

Nesouvislý



0,5 - 10% látek v nátku
Samo-odkalovací typ

Plynulý

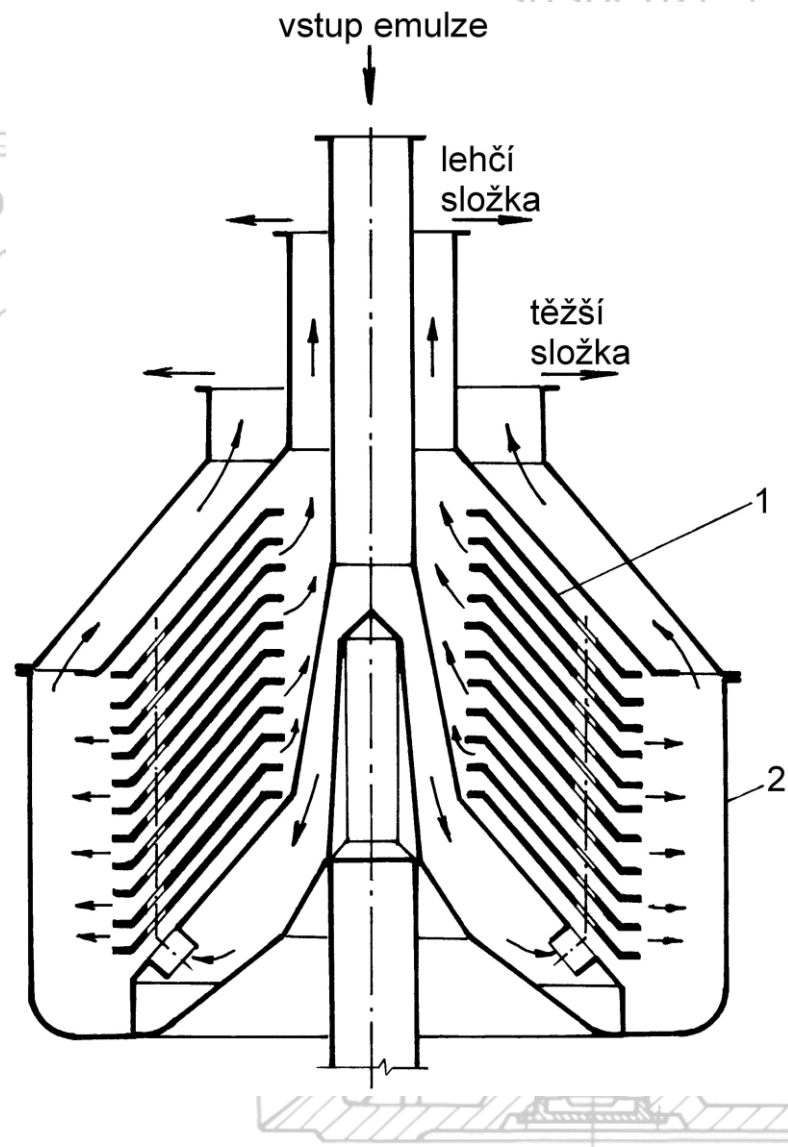


5 - 35% látek v nátku
Tryskový typ

vstup
emulze

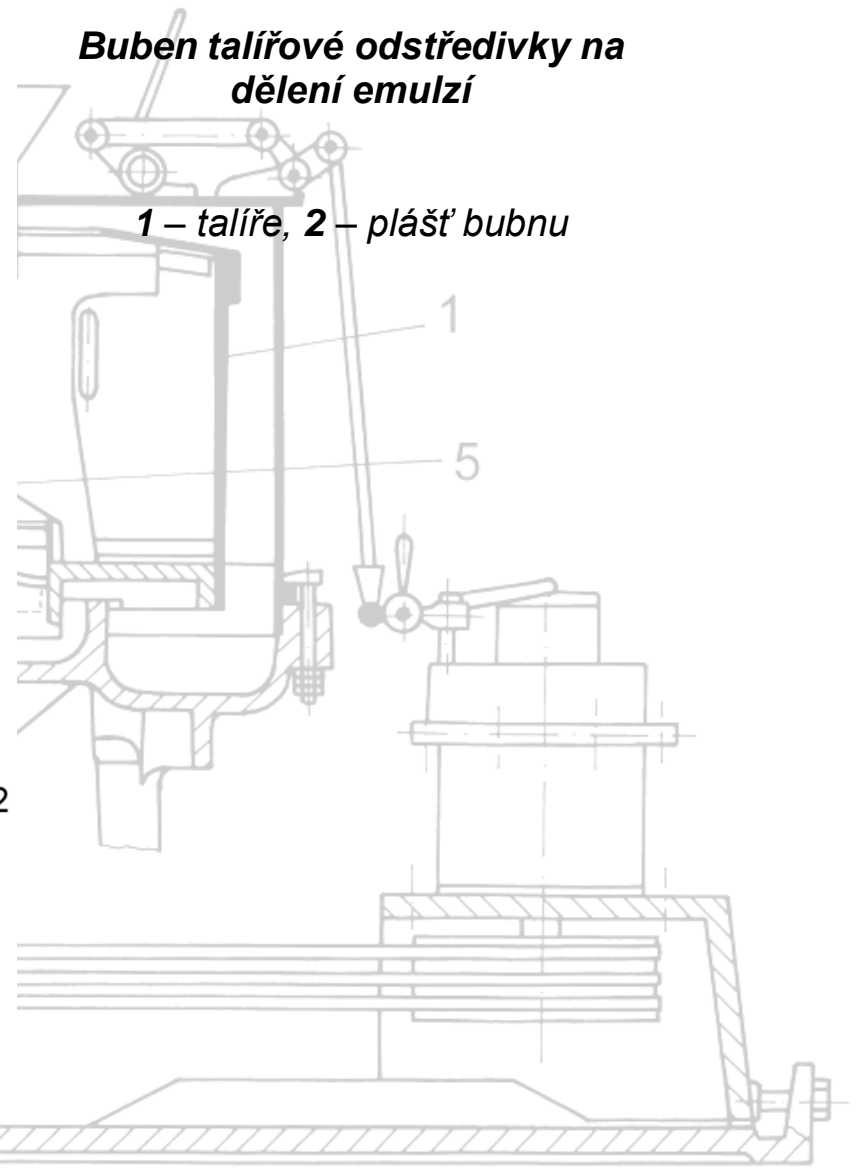
vstup emulze

←
výstup
vyčiřer
kapalir

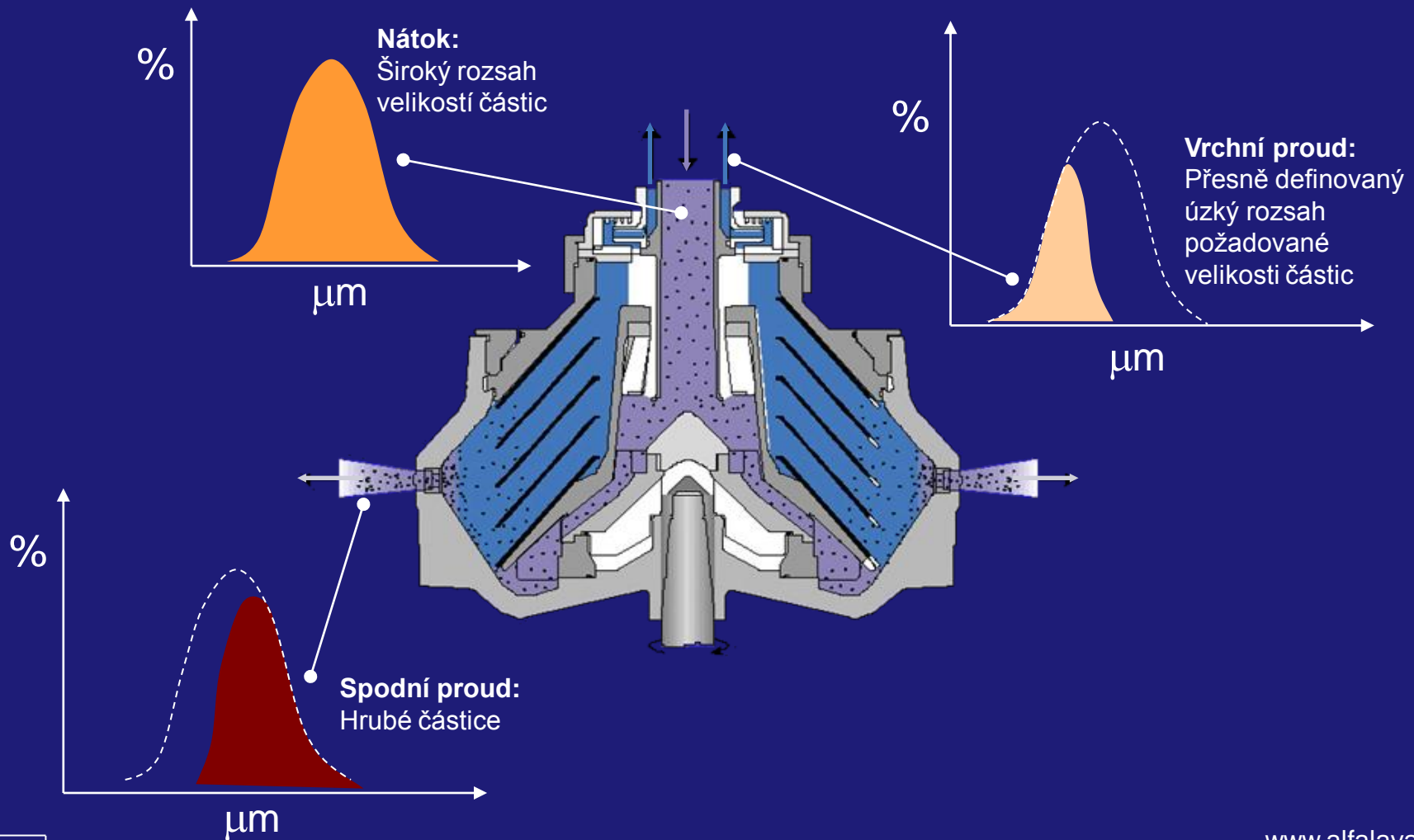


Buben talířové odstředivky na dělení emulzí

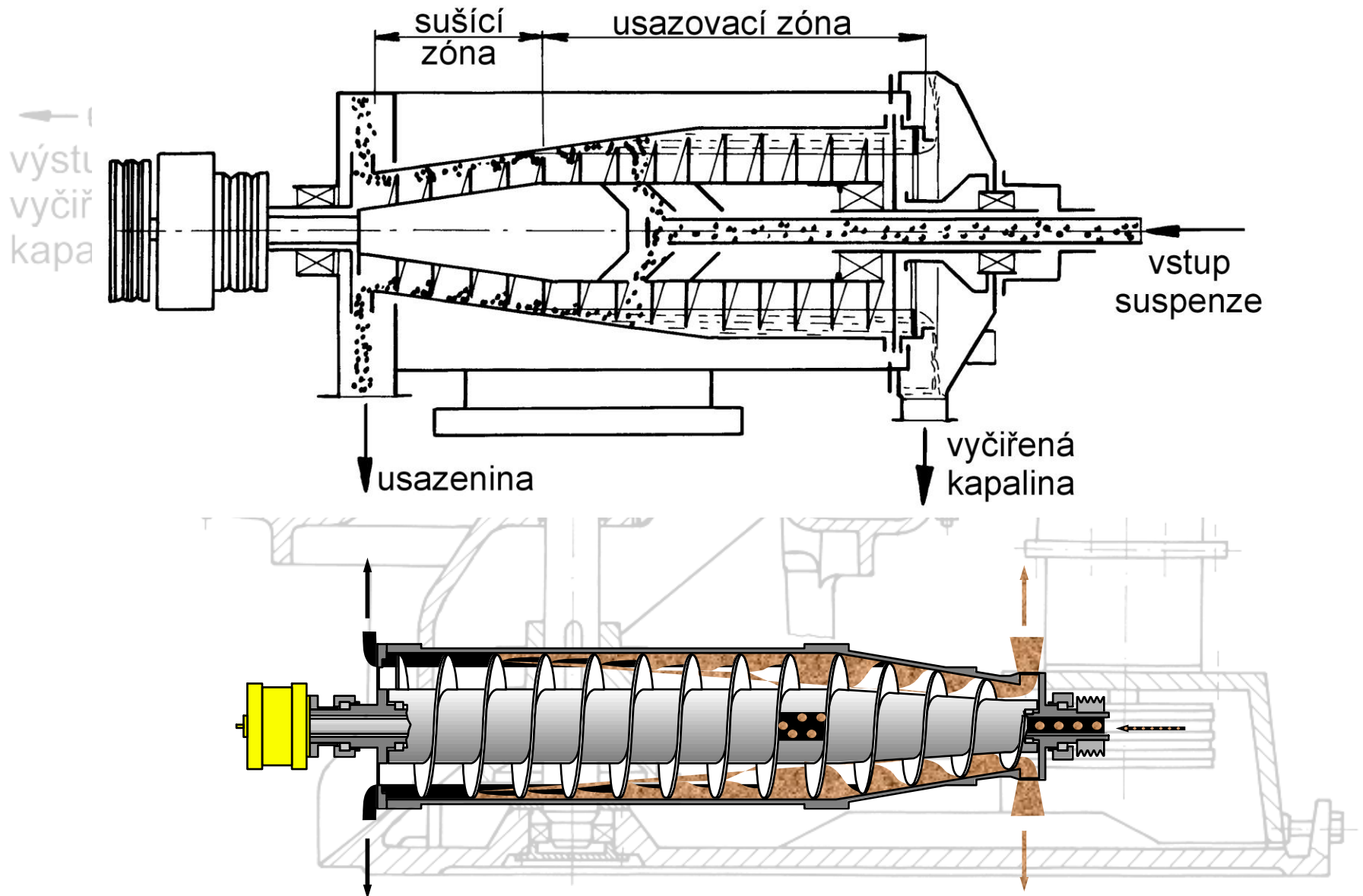
1 – talíře, 2 – plášť bubnu



Vysokorychlostní separátor



Vodorovné usazovací odstředivky se šnekovým vyprazdňováním



Dekantér

DDGS

Šroubová vstupní
zóna dopravníku

360° systém
vyprazdňování koláče

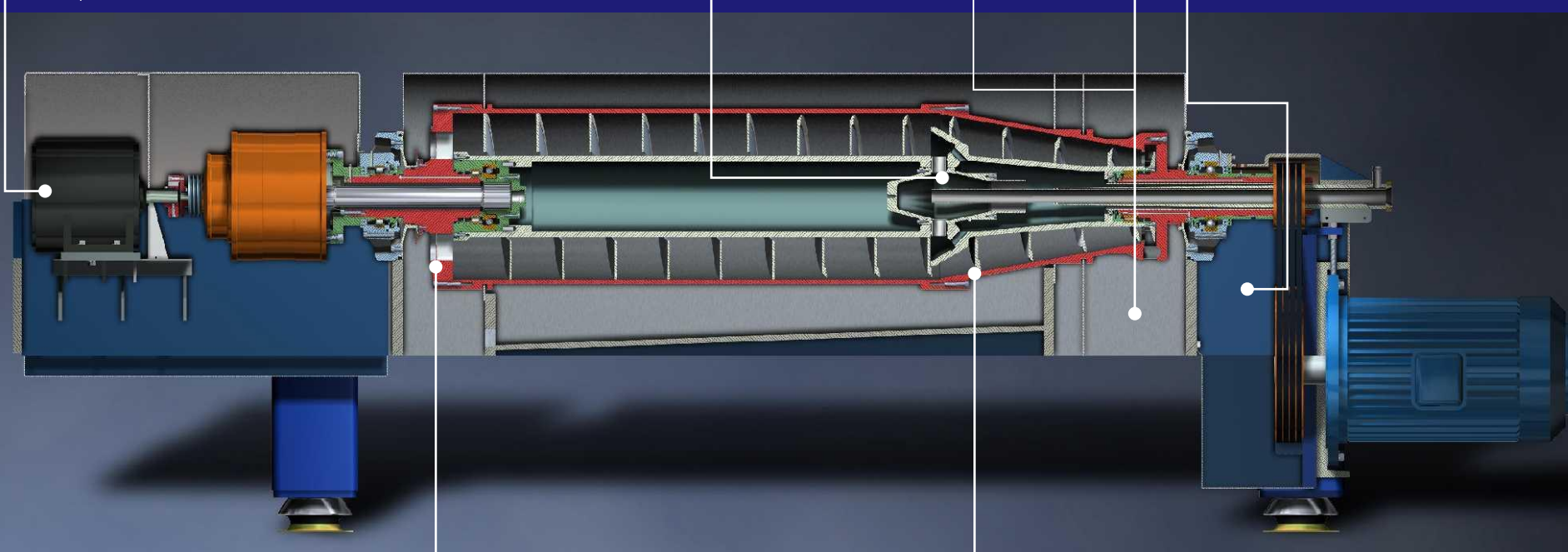
Ochrana výstupní
zóny proti erozi

Jednodílná
konstrukce rámu

Zadní pohon a
řízení

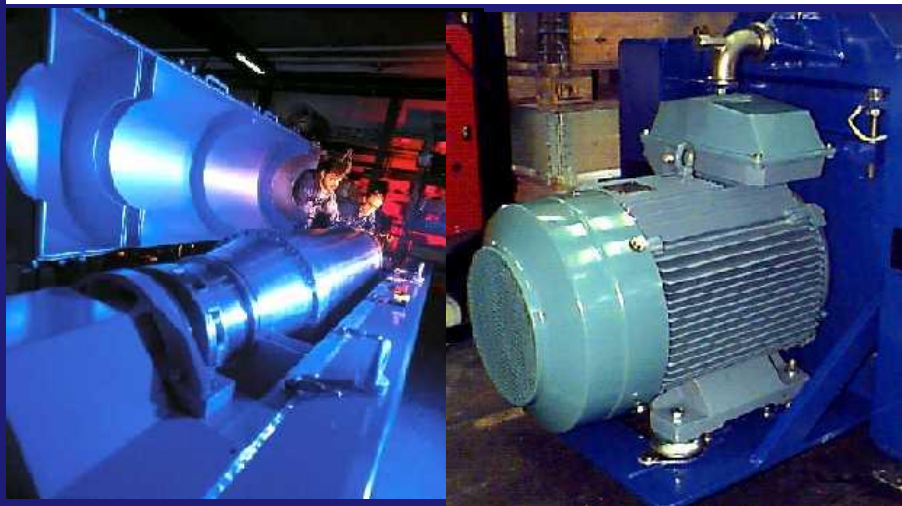
Systém
vyprazdňování
kapaliny

Ochrana lopatek
šnekovnice proti
opotřebení erozí



Vlastnosti dekantéru

Jednodílná konstrukce rámu



Vlastnosti

Hlavní motor a zadní pohon na rámu

Vyprazdňování kapaliny a pevných látek integrované společně s potrubím v rámu

Pružinové výklopné víko

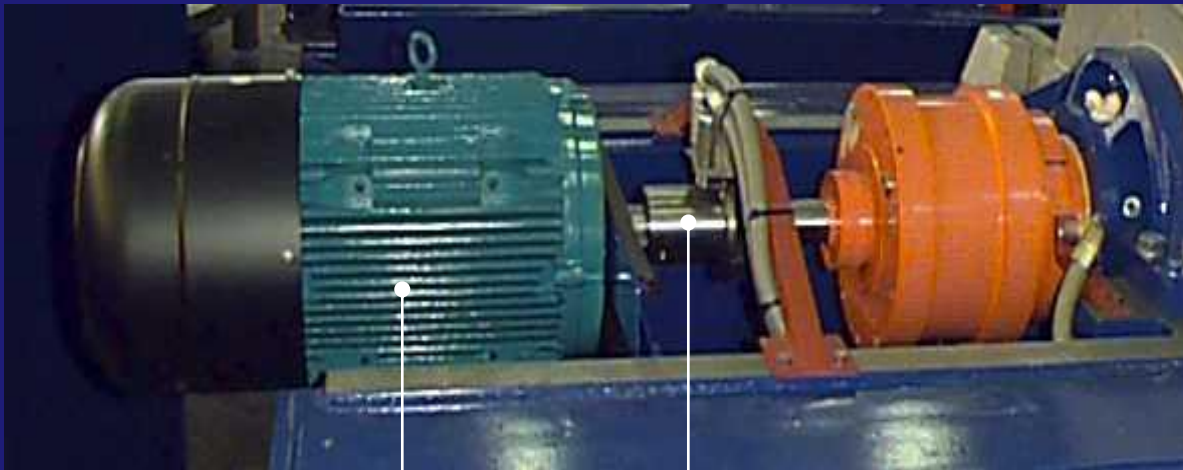
Výhody

Snadná instalace

Víko může být snadno otevřeno do vertikální polohy, což umožňuje rychlý a snadný přístup k rotační sestavě

Vlastnosti dekantéru

System zadního pohonu: Pastorek/Motor zadního pohonu v ose (VFD)



Pohonný motor
pastorku
převodovky

Pružná
spojka

Výhody

Možné řízení frekvenčním měničem (VFD)

Může být použit běžný motor

Zatížení v ose zajišťuje mechanickou spolehlivost

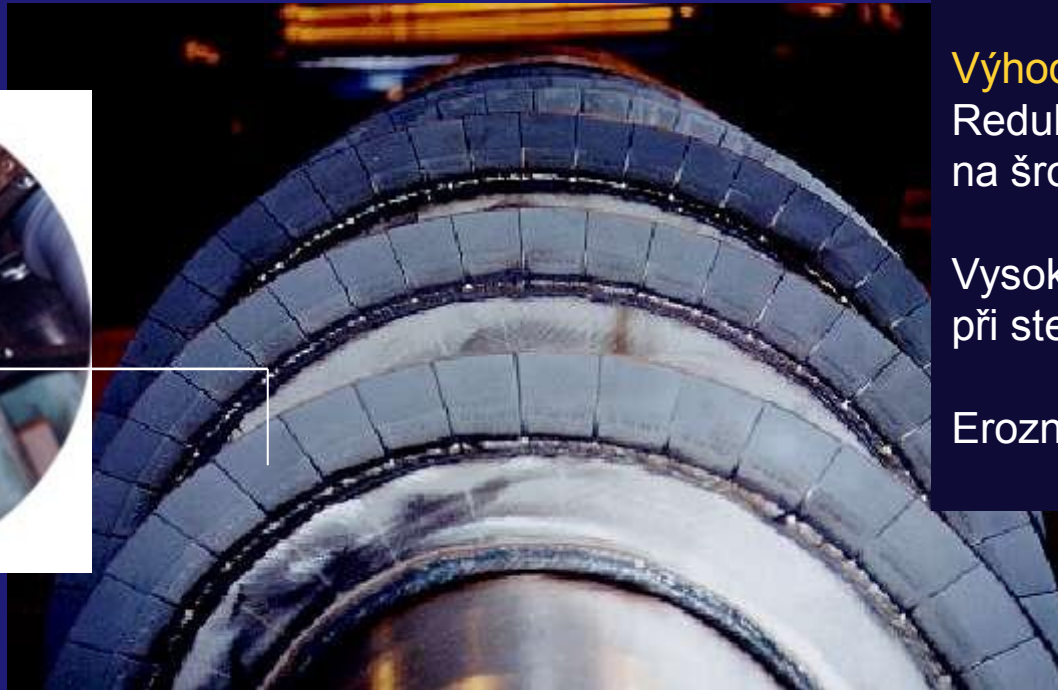
Home ^

Next >

Back <

Vlastnosti dekantéru

Ochrana proti opotřebení šneku: destičky z karbidu wolframu



Výhody

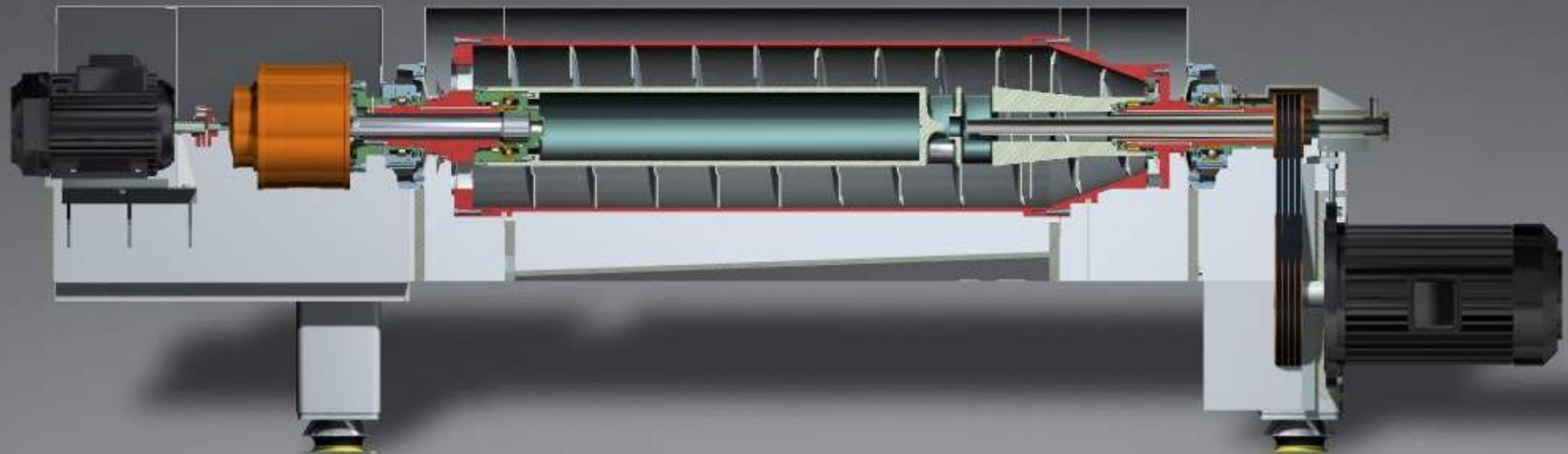
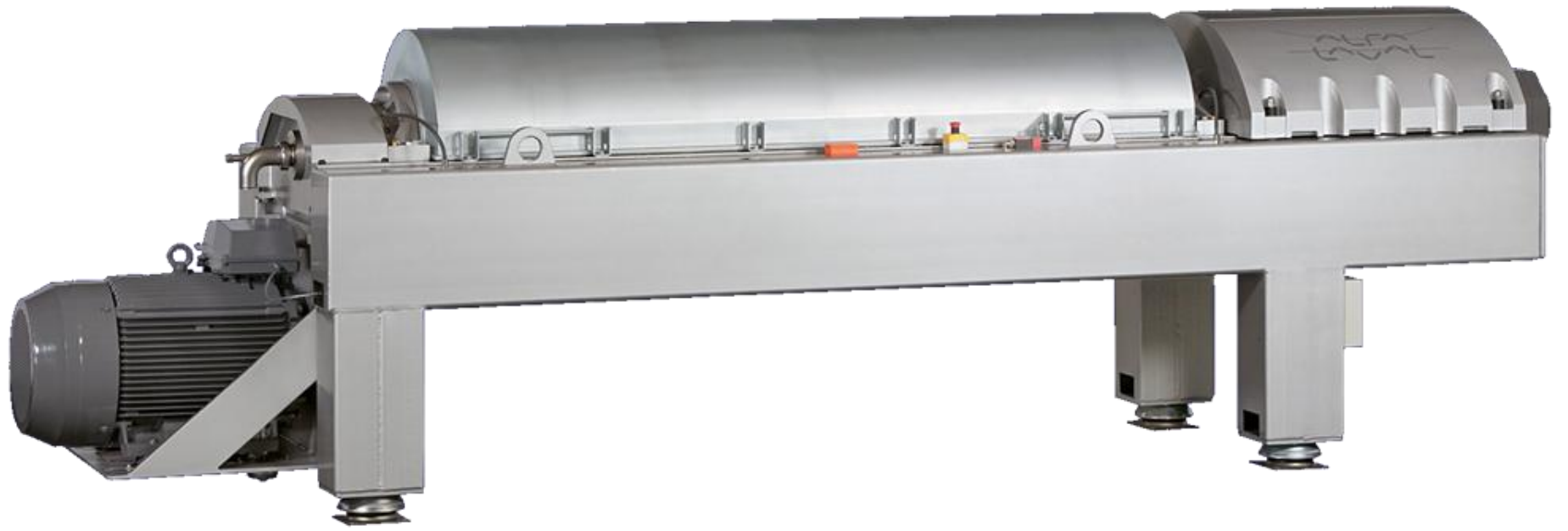
Redukované kroucí síly na šroubovici šneku

Vysoká dopravní kapacita při stejném výkonu motoru

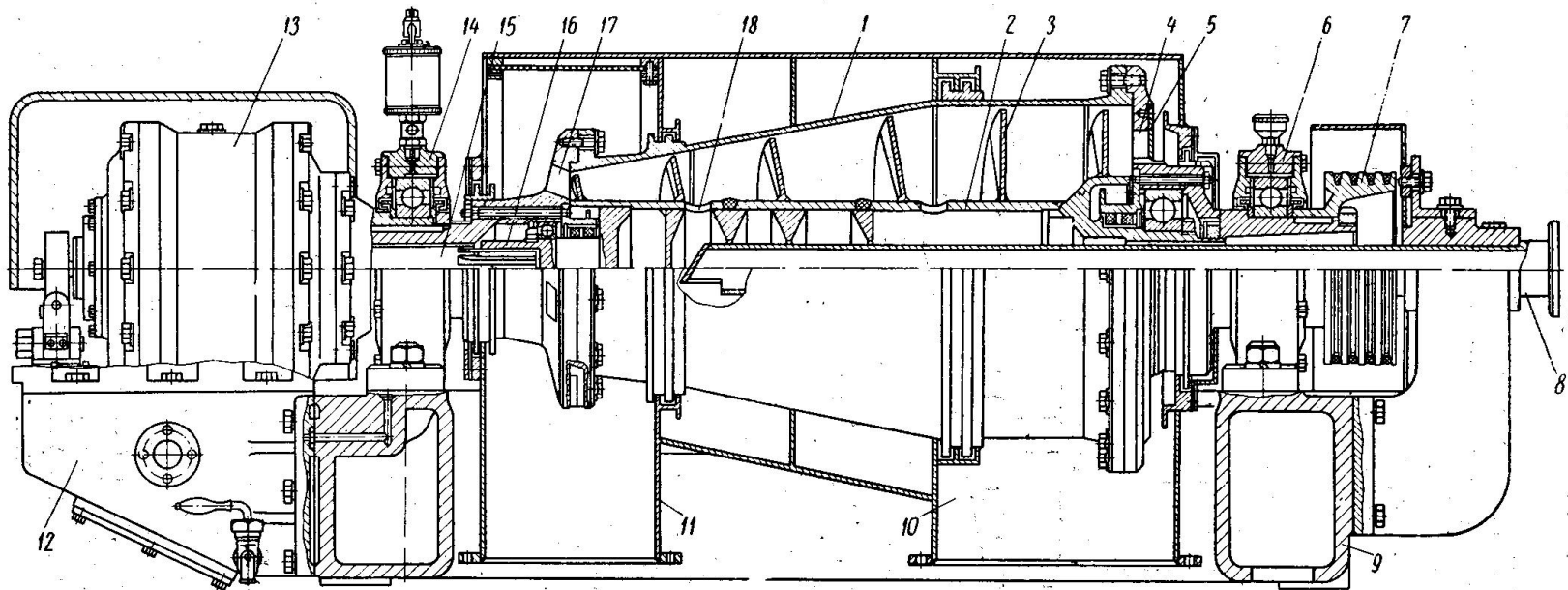
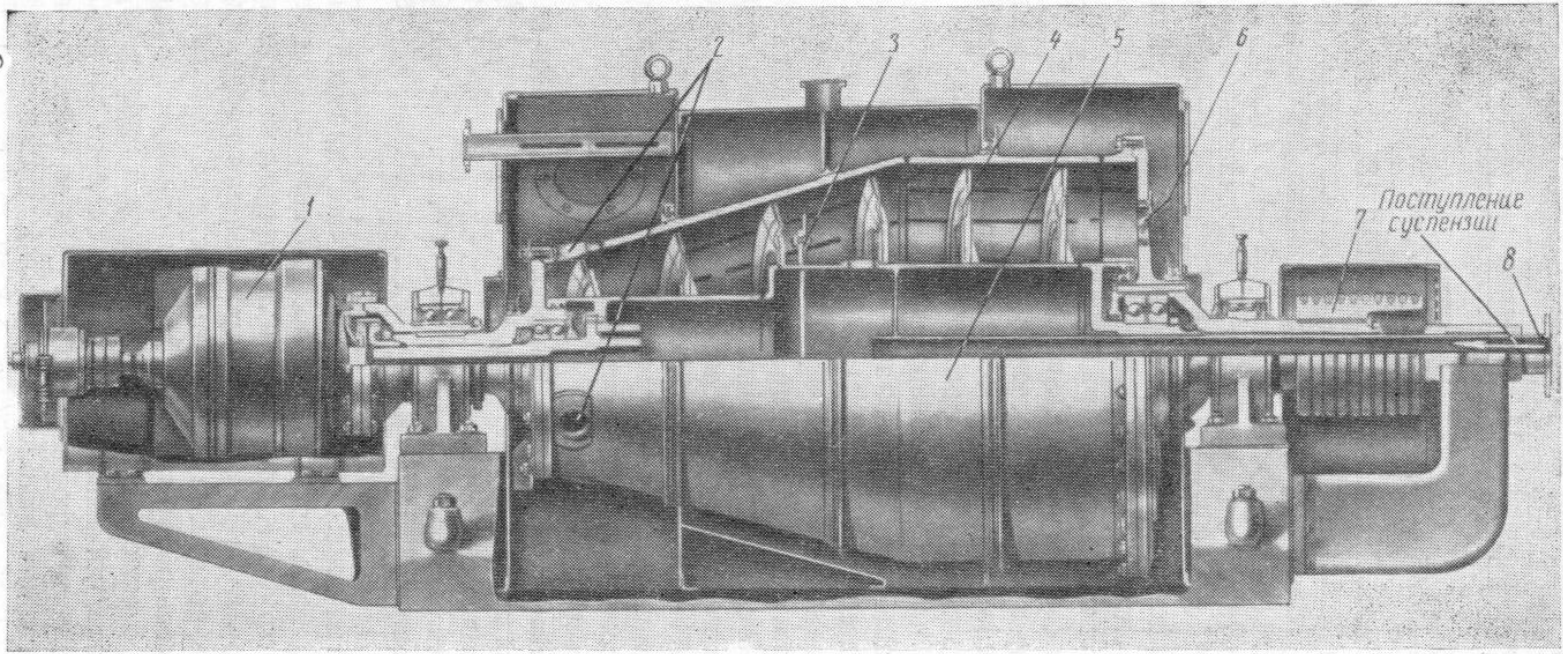
Erozní ochrana „zdarma“

Láme částice během transportování

Navařené na lopatkách šnekového dopravníku

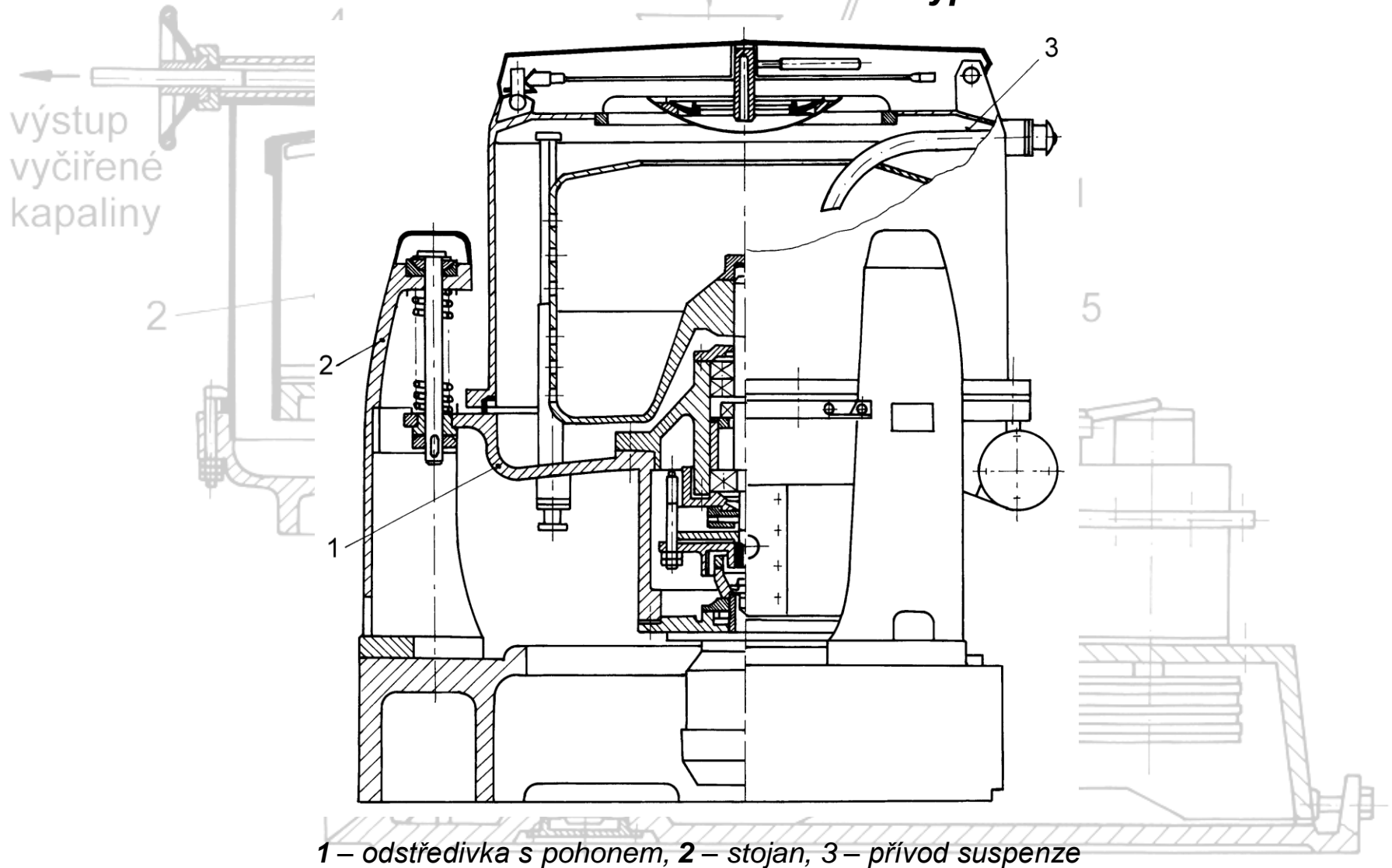


←
výst
vyči
kap

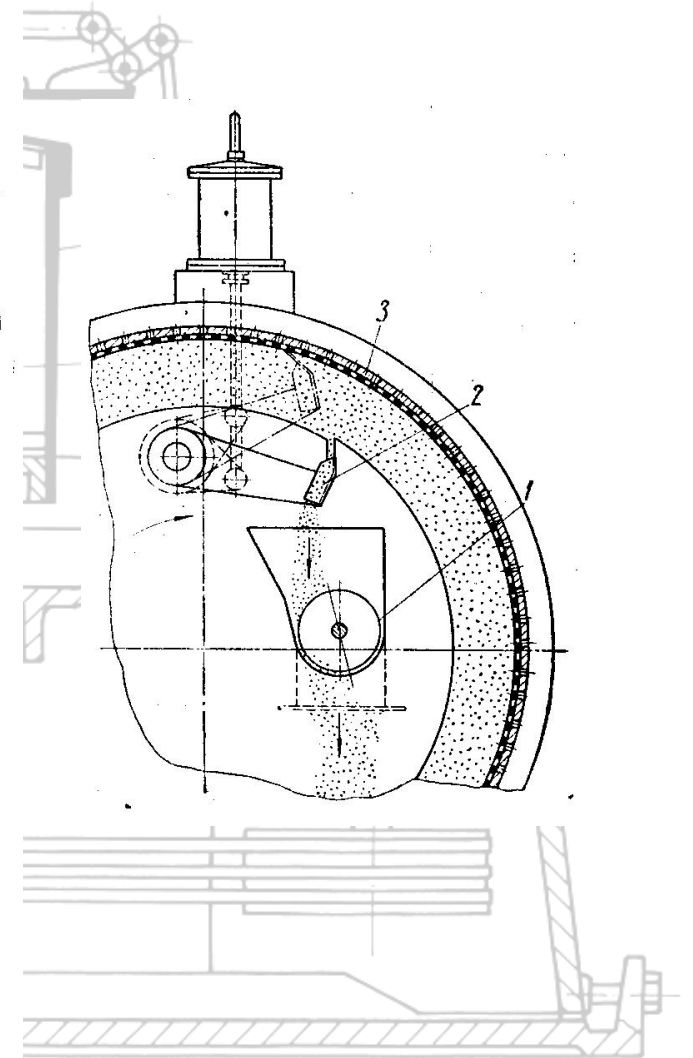
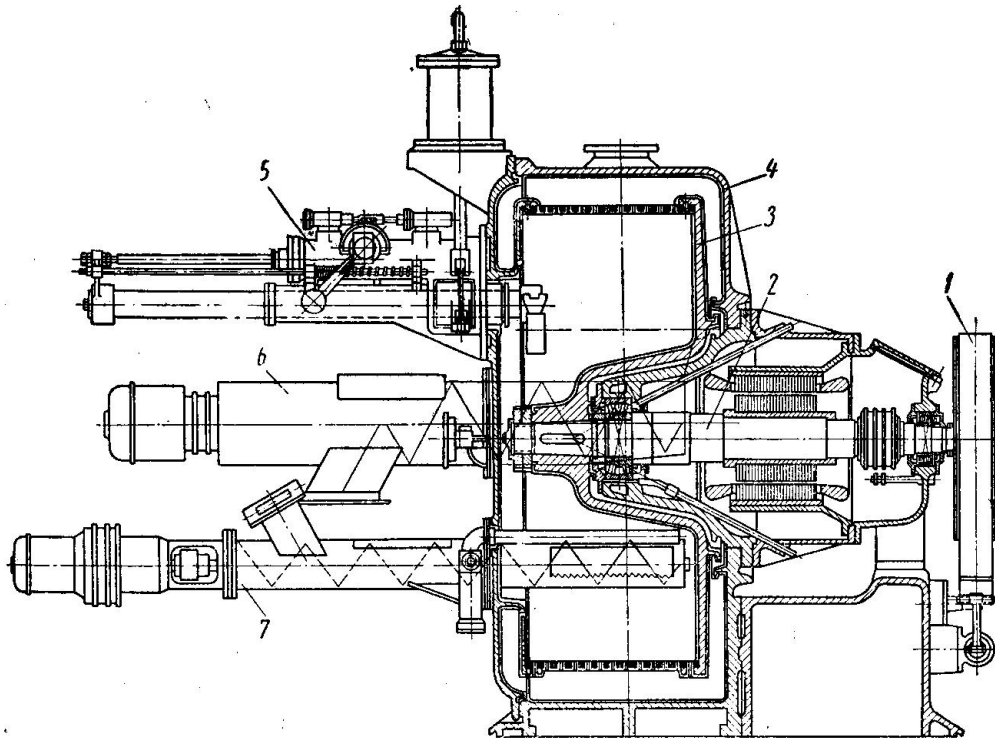
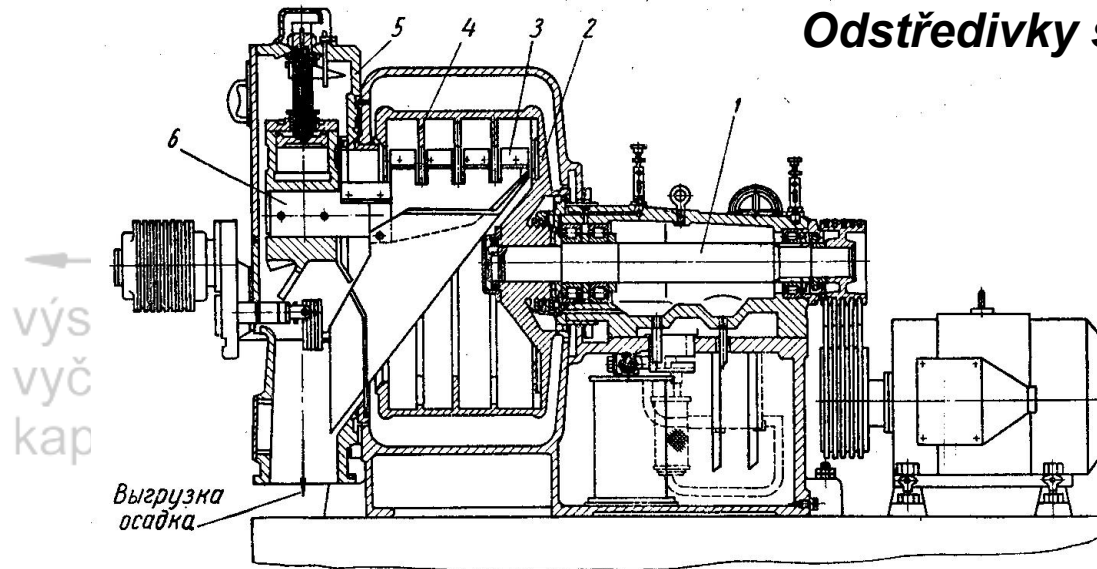


Filtrační odstředivky

Kloubová filtrační odstředivka s horním vyprazdňováním

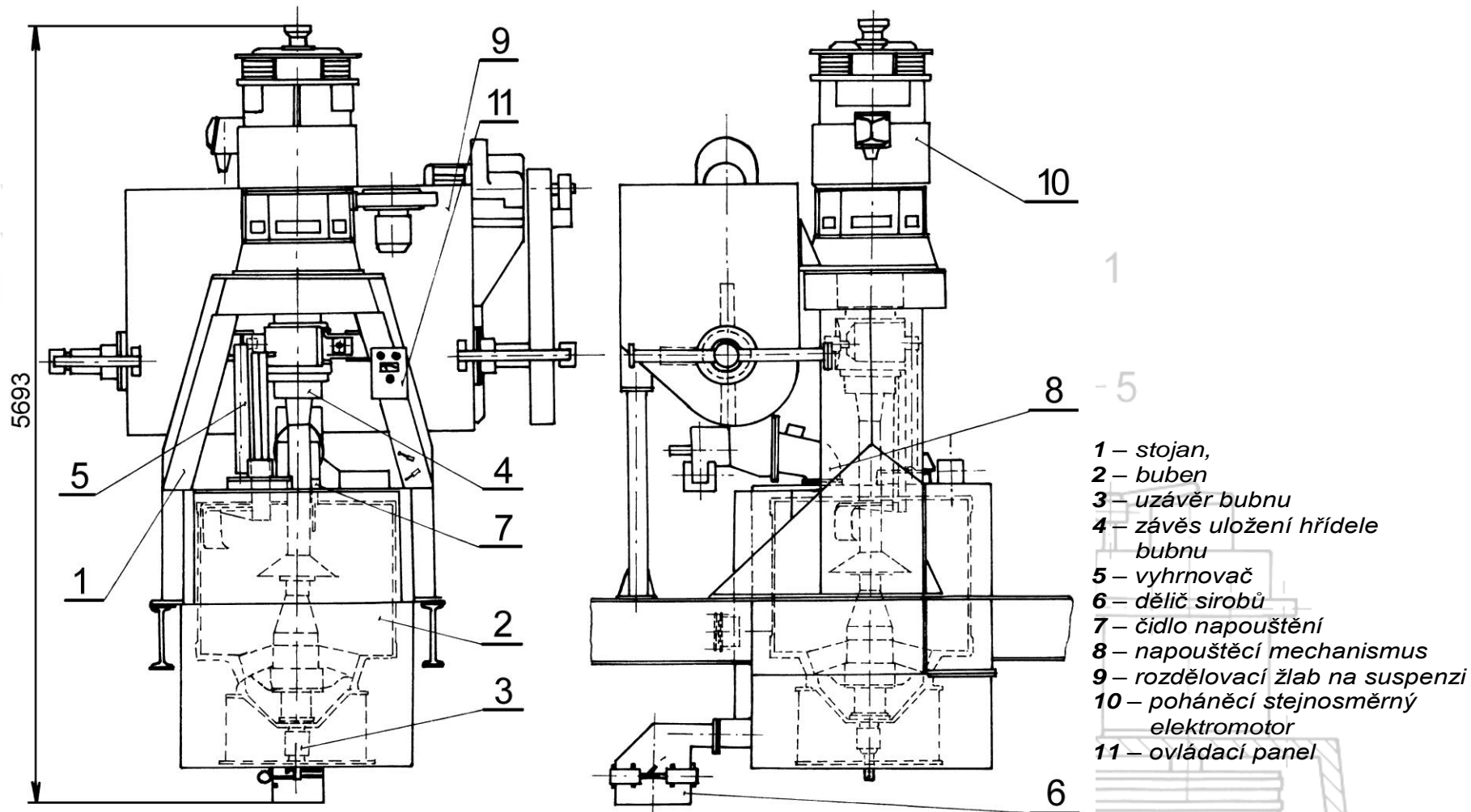


Odštědivky s nožovým vyprazdňováním



Závěsná filtrační odstředivka s dolním vyprazdňováním

ARO 1500 – ZVU Hradec Králové



Pracovní frekvence otáčení je 1200 min^{-1} nebo 1500 min^{-1} , plnicí frekvence otáčení $200 \div 300 \text{ min}^{-1}$, vyhrnovací frekvence otáčení $30 \div 80 \text{ min}^{-1}$, počet pracovních cyklů se pohybuje od 6 do 24 za hodinu. Maximální výkonnost u typu **ARO 1500** s vnitřním průměrem bubnu 1370 mm (s maximální náplní bubnu 1500 kg) je až 790 t cukroviny za den, štítkový výkon poháněcího elektromotoru činí 260 kW. Provoz odstředivky je automaticky programově řízen, při zkoušení cyklu je možné ruční řízení.

Kontinuální filtrační odstředivky

Filtrační odstředivka s pulsačním vyprazdňováním

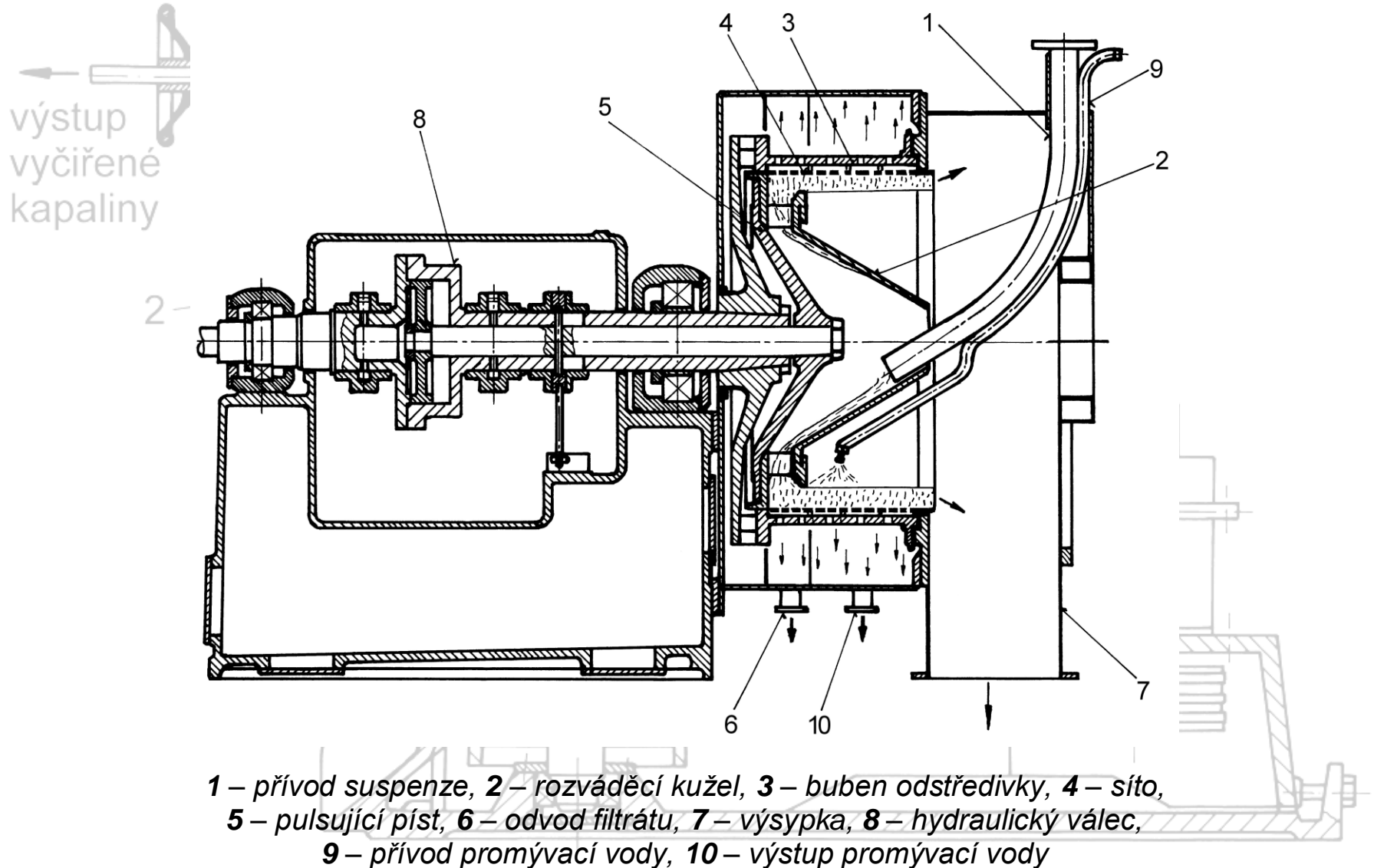
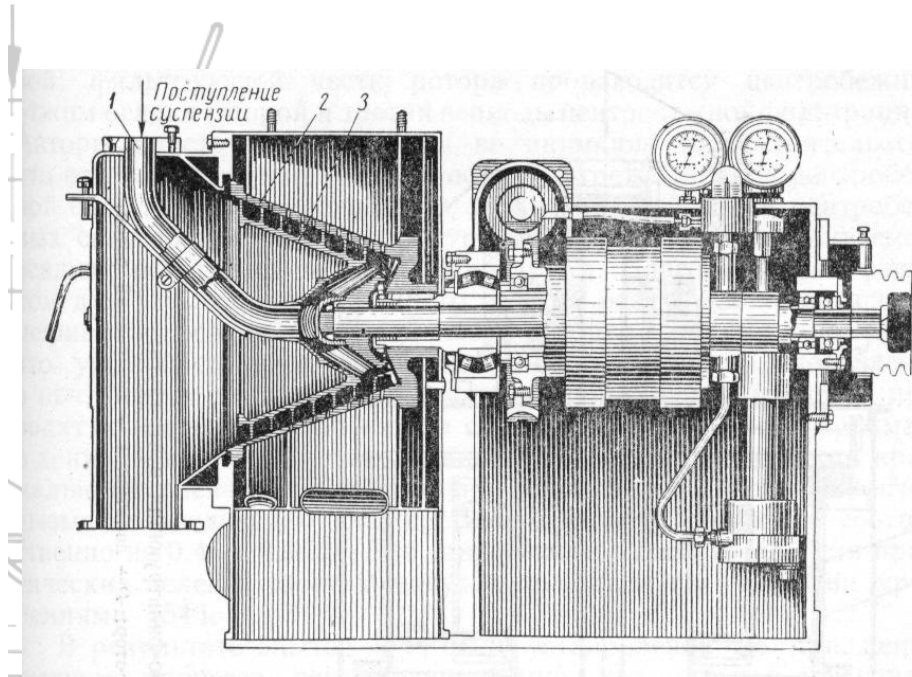
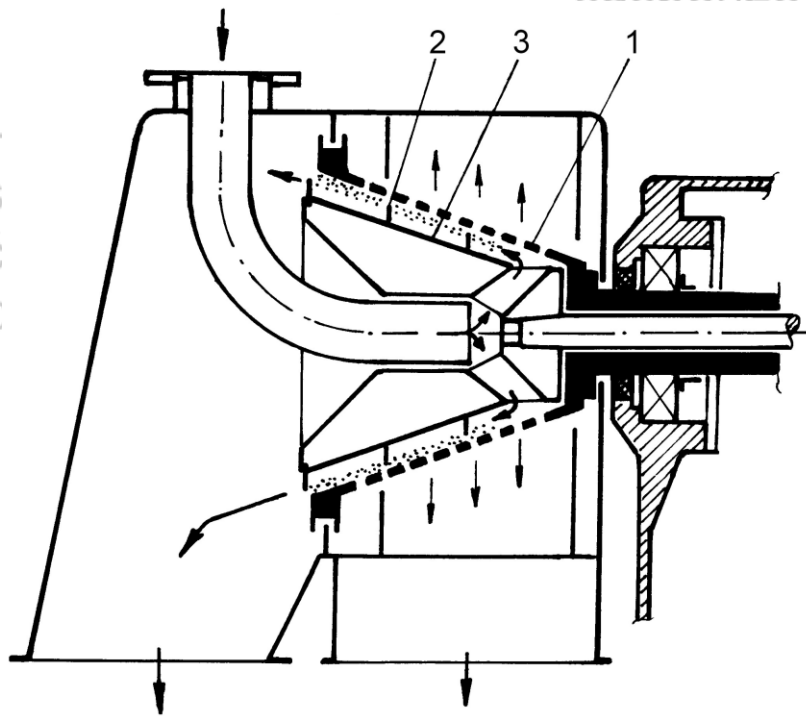


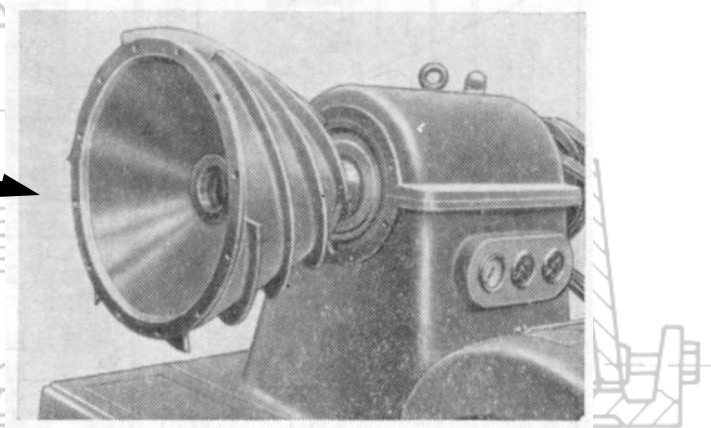
Schéma šnekové filtrační odstředivky

сuspензи

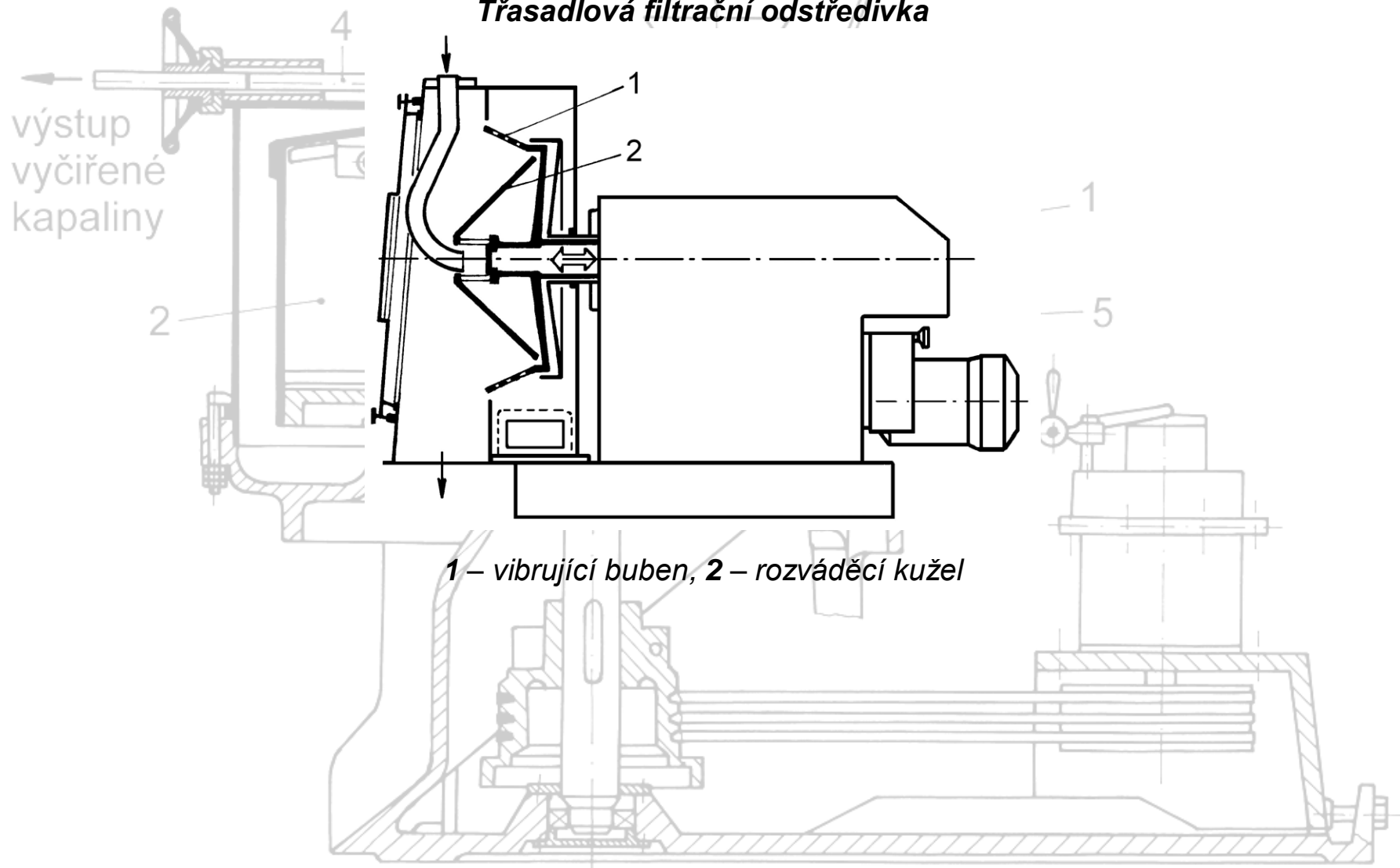
←
vých
vyč
kap



- 1 – buben odstředivky, 2 – šroubové nože,
- 3 – vynášecí buben

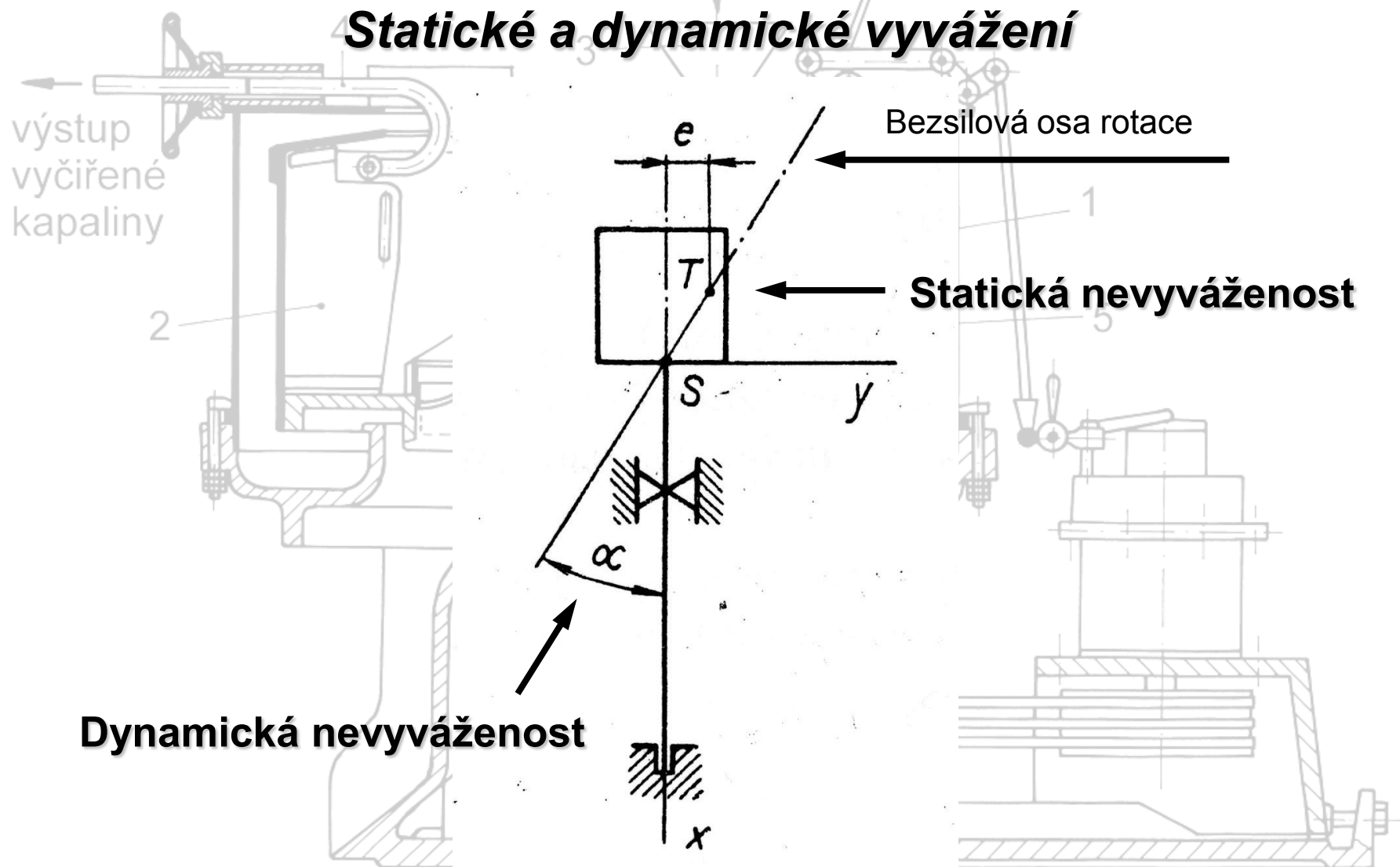


vstup
suspenze ↓
Třasadlová filtrační odstředivka



Kmitání rychloběžných hřídelí

Statické a dynamické vyvážení



Kritické otáčky n_{krit}

Kmitání hřídele může být:

- **ohybové** – vyvolané proměnlivými příčnými silami, např. od nevyvážených rotujících hmot
- **torzní** – způsobené periodicky proměnlivými kroutícími momenty, např. moment tangenciální síly u pístových strojů
- **podélné** – tyto kmity mají obvykle velmi vysokou frekvenci, a proto neohrožují hřídel

Provozní otáčky hřídele:

$$n \neq n_{krit}$$

- podkritický provoz $n \leq 0,85 n_{krit}$
- nadkritický provoz $n \geq 1,25 n_{krit}$

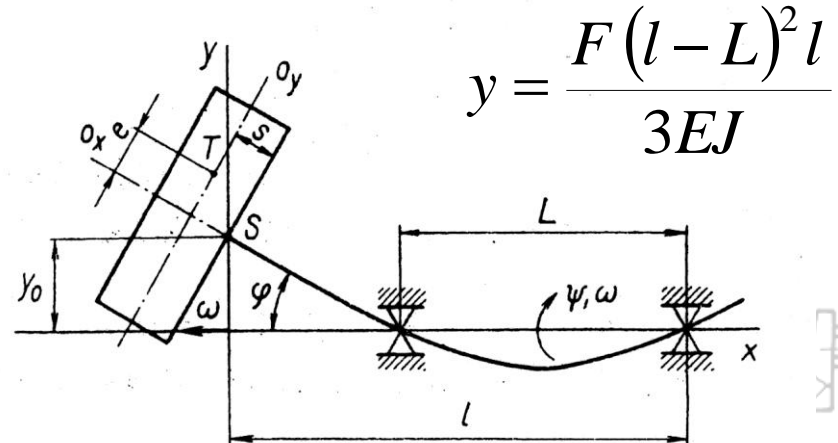
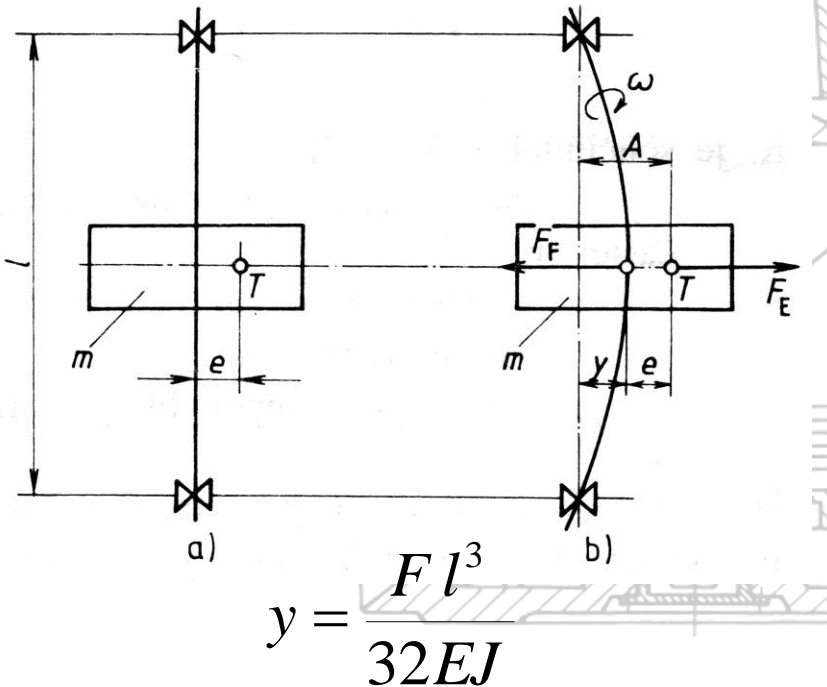
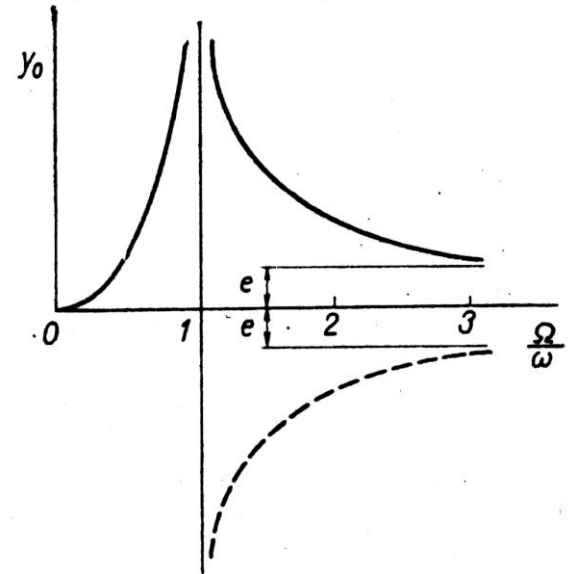


Ohybové kritické otáčky

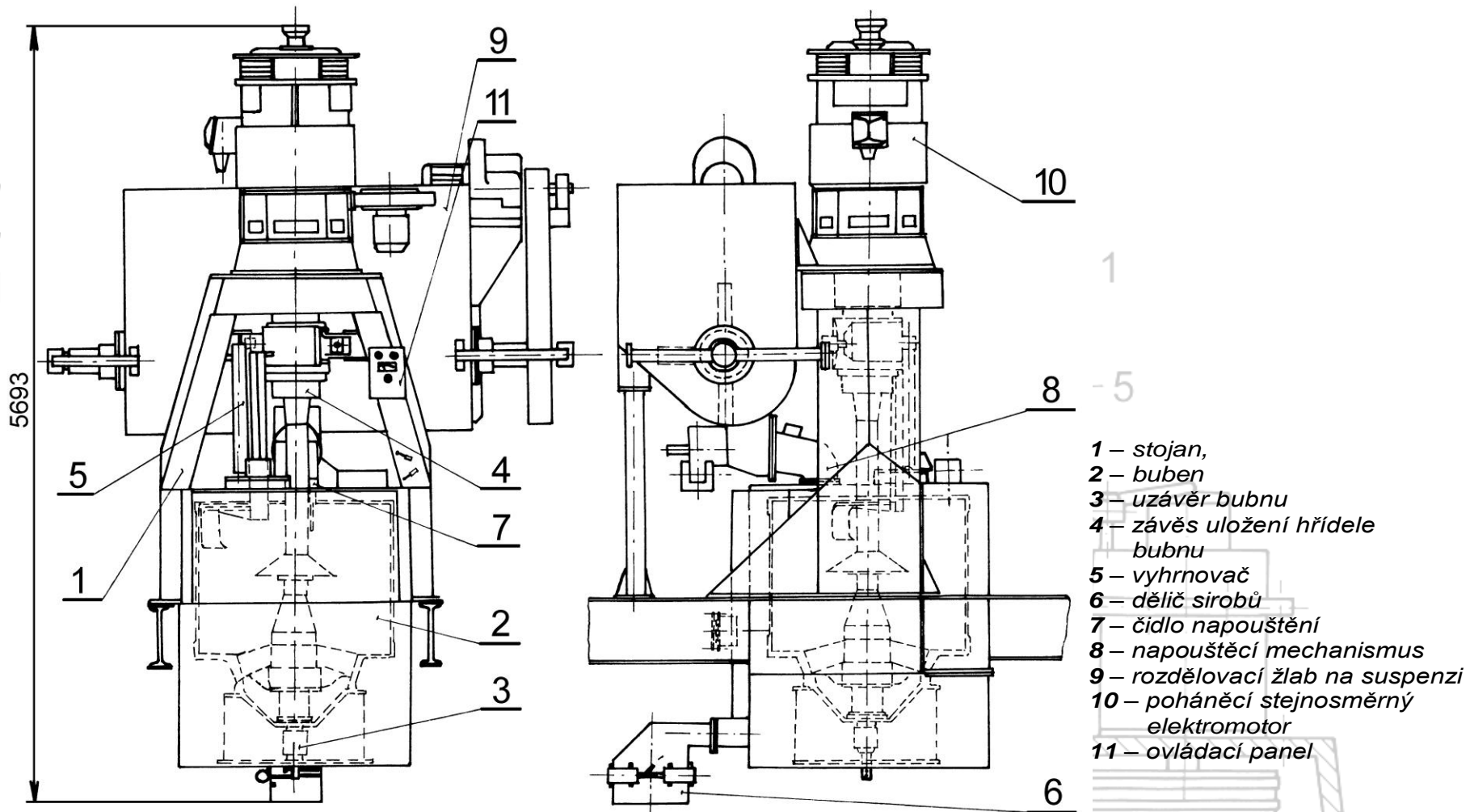
Jednohmotový systém – kotouč hmotnosti m na hladkém nehmotném hřídeli konstantní tuhosti c .

Frekvence vlastních příčných kmitů soustavy:

$$\Omega = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{g}{y}} = \omega_{krit} = 2\pi n_{krit}$$



Příklad: Závěsná filtrační odstředivka s dolním vyprazdňováním
ARO 1500 – ZVU Hradec Králové



Pracovní frekvence otáčení je 1200 min^{-1} nebo 1500 min^{-1} , plnicí frekvence otáčení $200 \div 300 \text{ min}^{-1}$, vyhrnovací frekvence otáčení $30 \div 80 \text{ min}^{-1}$, počet pracovních cyklů se pohybuje od 6 do 24 za hodinu. Maximální výkonnost u typu **ARO 1500** s vnitřním průměrem bubnu 1370 mm (s maximální náplní bubnu 1500 kg) je až 790 t cukroviny za den, štítkový výkon poháněcího elektromotoru činí 260 kW. Provoz odstředivky je automaticky programově řízen, při zkoušení cyklu je možné ruční řízení.

Parametry odstředivky ARO 1500:

- hmotnost bubnu $m_b = 300$ kg
- hmotnost náplně bubnu $m_v = 1500$ kg
- ekvivalentní průměr hřídele $D = 100$ mm
- vyložení hřídele $l - L = 1200$ mm
- vzdálenost mezi ložisky (cca 1/3 vyložení) $L = 400$ mm
- materiál hřídele – konstrukční ocel s modulem pružnosti $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa

Vypočtené hodnoty:

- kvadratický moment průřezu hřídele $J = \pi \cdot D^4/64 = 4,91 \cdot 10^6$ mm⁴
- statický průhyb hřídele od hmoty bubnu $y = 13$ mm
- kritická úhlová rychlost $\omega_{krit} = 27,4$ s⁻¹
- ohybové kritické otáčky hřídele $n_{krit} = 4,4$ s⁻¹ = 262 min⁻¹

$$n \gg n_{krit}$$