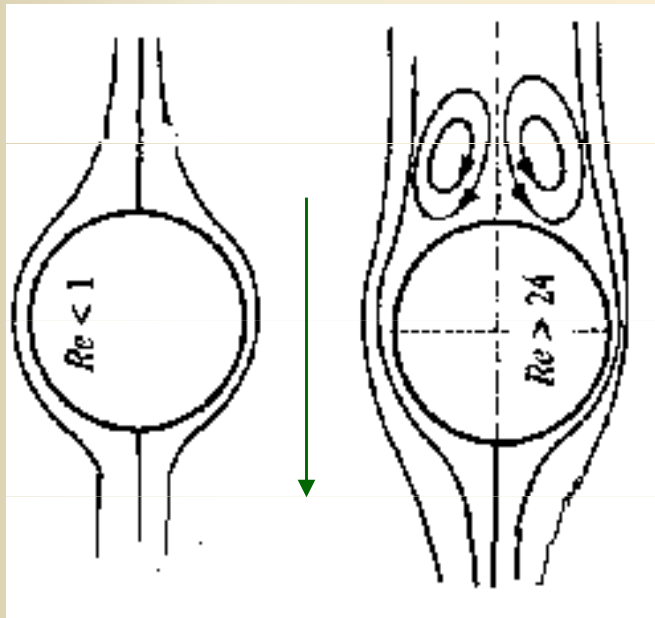


5. prednáška

Usadzovanie tuhých častíc v gravitačnom a v odstredivom poli

Usadzovanie tuhej častice v tekutine

- Pohyb tuhej častice v nehybnej tekutine
- Vytesňovanie tekutiny → tok tekutiny do priestoru za časticu → **obtekanie častice tekutinou**
- Sily trenia brániace pohybu kvapalnej a tuhej fázy ↔ odpor proti obtekaníu
- Zjednodušenie – 1 častica guľového tvaru v nehybnej tekutine



Tok v okolí guľovej častice

$$Re_c = \frac{d_c v_c \rho}{\mu}$$

Charakter toku

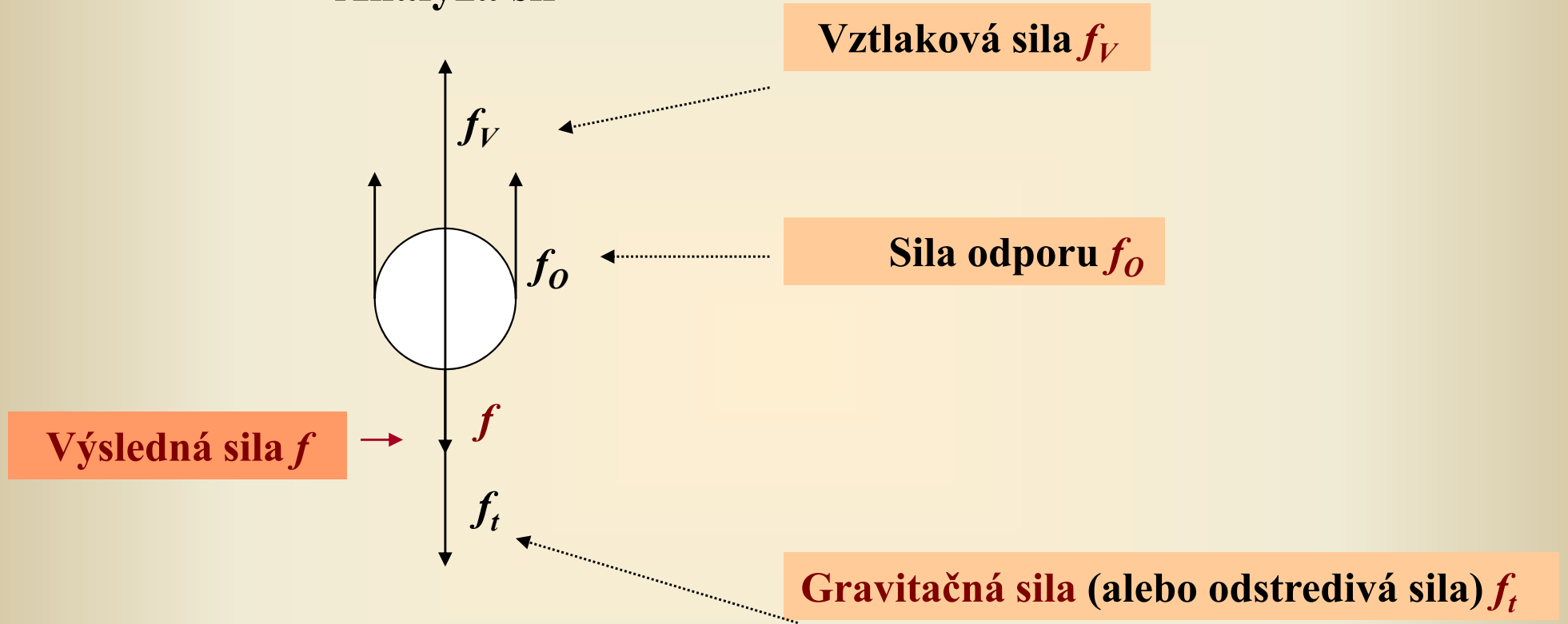
(pri obtekaní tuhej častice)

$Re_c < 1$ Laminárny tok

$Re_c > 24$ Turbulentný tok (úplav)

Rovnováha síl pri páde guľovej častice v tekutine

Analýza síl



Fáza 1.

Rastie pádová rýchlosť častice –
rastie aj odpor prostredia ⇒

Fáza 2.

Ustáli sa konštantná
rýchlosť pádu častice v_c

$$f_t d\tau - f_v d\tau - f_o d\tau = d(m_c v_c)$$

Zmena hybnosti častice

$$f_t - f_v - f_o = 0$$

$$f_t = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g$$

$$f_v = \frac{\pi d^3}{6} \rho g$$

Sila odporu

Sila odporu

$$f_o = 3\pi\mu d_c v_c$$

Stokesov vzťah (teoretický charakter)

$$f_o = \zeta \frac{\rho v_c^2}{2} \frac{\pi d_c^2}{4}$$

Newtonov vzťah (empirický charakter)

Definičný vzťah pre súčiniteľ odporu ζ

Súčiniteľ odporu ζ

ϕ - sférický faktor pre
negul'ové častice

$$\zeta = f(Re_c, \phi)$$

$$Re_c = \frac{d_c v_c \rho}{\mu}$$

Súčiniteľ odporu ζ pre častice guľoviteto tvaru

$$3\pi\mu d_c v_c = \zeta \frac{\rho v_c^2}{2} \frac{\pi d_c^2}{4}$$

A- laminárna oblasť: $10^{-4} < Re_c < 0.2$

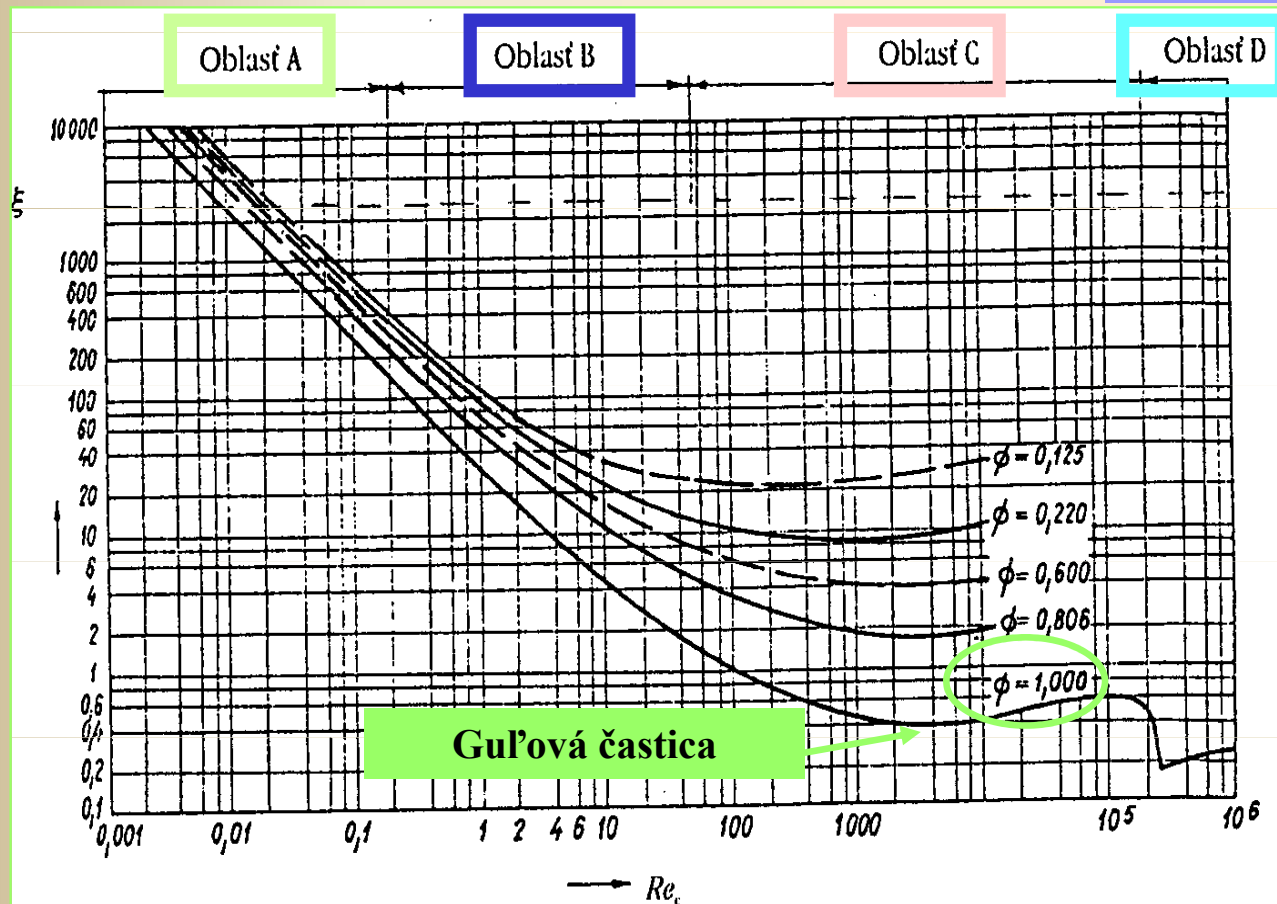
$$\zeta = \frac{24}{Re_c}$$

B- prechodná oblasť: $0.2 < Re_c < 500$ (1000)

Rôzne empirické závislosti

$$\zeta = \frac{24}{Re_c} (1 + 0.15 Re_c^{0.687})$$

$$\zeta = 18.5 Re_c^{-0.6}$$



C- turbulentná oblasť:

$Re_c > 500$ (20 000)

$$\zeta = 0.44$$

D- vysoko-turbulentná oblasť:

$Re_c > 2 \cdot 10^5$

$$\zeta \approx 0.10$$

! Významné zmenšenie odporu – odtrhnutie medznej vrstvy

$$f_i - f_v - f_o = 0$$

$$\frac{\pi d_c^3}{6} (\rho_c - \rho) g = \zeta \frac{\rho}{2} \frac{v_c^2}{4} \frac{\pi d_c^2}{4}$$

Rýchlosť usadzovania – pádová rýchlosť častíc

$$v_c = \sqrt{\frac{4 d_c (\rho_c - \rho) g}{3 \rho \zeta}}$$

Po dosadení $\zeta \Rightarrow$ rôzne tvary vzťahov pre v_c ,
napr. Laminárny charakter usadzovania

$$v_c = \frac{(\rho_c - \rho) g d_c^2}{18 \mu}$$

? Výpočet rýchlosti
usadzovania

Iteračný výpočet, nakoľko nie je známa hodnota Re_c ,
 \Rightarrow ľubovoľný vzťah, a overenie správnosti voľby

Výpočet z účelovo
upravených
vzťahov

Charakter usadzovania:	Rozsah Re_c	Rozsah Ar	$\xi = f(Re)$	$Re_c = f(Ar)$
Laminárny (Stokesovo)	$Re \leq 0,2$	$Ar \leq 3,6$	$\xi = 24 / Re_c$	$Re_c = Ar / 18$
přechodový	$0,2 \leq Re \leq 500$	$3,6 \leq Ar \leq 84000$	$\xi = 18,5 Re_c^{0,6}$	$Re_c^{0,7} = (Ar/13,9)^{0,5}$
turbulentní (Newtonovo)	$Re \geq 500$	$Ar \geq 84000$	$\xi = 0,44$	$Re_c = 1,73 \cdot Ar^{0,5}$

Archimedovo kritérium

$$Ar = \frac{d_c^3 (\rho_c - \rho) \rho g}{\mu^2}$$

Výpočet rýchlosti usadzovania

Výpočet z účelovo upravených vzťahov

$$\zeta \frac{Re_c^2}{2} = \frac{2}{3} Ar$$

$$Ar = \frac{d_c^3 (\rho_c - \rho) \rho g}{\mu^2}$$

Archimedovo
kritérium

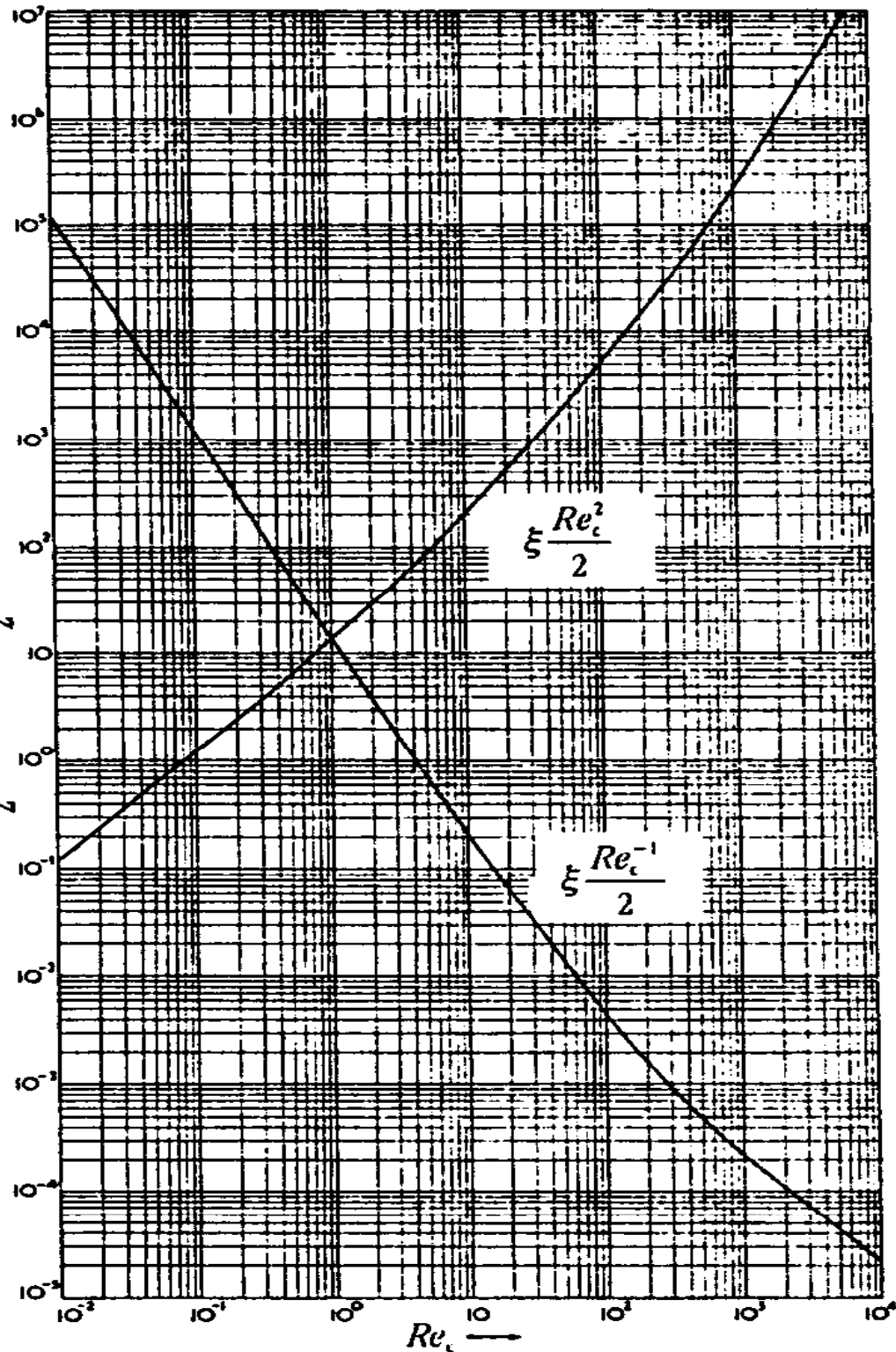
Z grafickej závislosti:

$$\zeta \frac{Re_c^2}{2} = f(Re_c)$$

Re_c

v_c

$\zeta \frac{Re_c^2}{2}$ alebo $\zeta \frac{Re_c^{-1}}{2}$



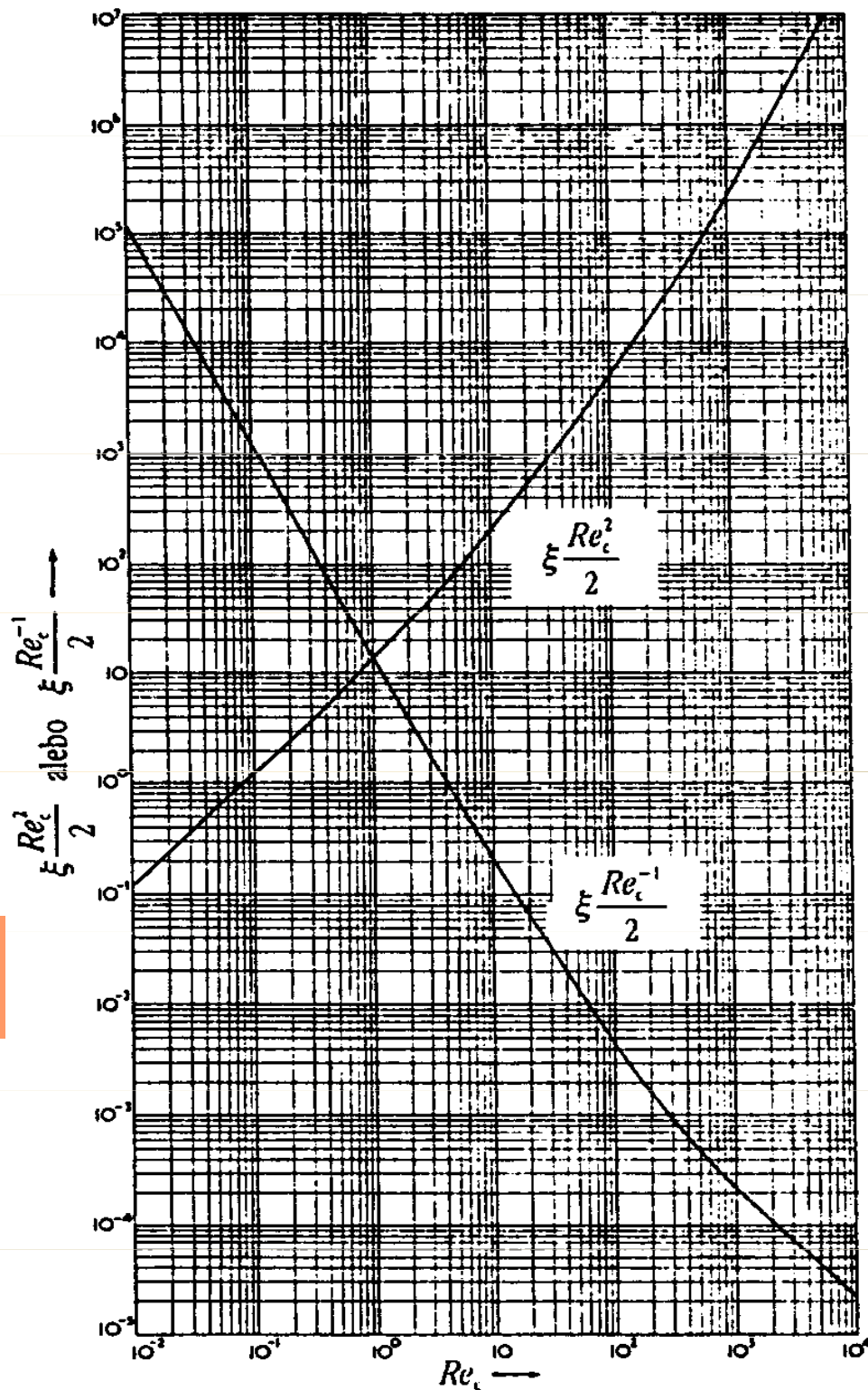
Výpočet priemeru tuhej častíc z rýchlosti usadzovania

$$\zeta \frac{Re_c^{-1}}{2} = \frac{2 \mu g (\rho_c - \rho)}{3 v_c^3 \rho^2} = \frac{2}{3} Ly^{-1}$$

Ljaščenkovo kritérium

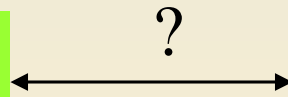
Z grafickej závislosti:

$$\zeta \frac{Re_c^{-1}}{2} = f(Re_c) \longrightarrow Re_c \longrightarrow d_c$$



POZNÁMKA: Charakter usadzovania – posúdenie podľa priemeru

**Charakter
obtekania**



**Veľkosť
častíc**

Laminárne usadzovanie

$$v_c = \frac{(\rho_c - \rho)gd_c^2}{18\mu}$$

Pre hranicu laminárneho usadzovania $Re_c=0.2$ až 0.4

$$Re_c = \frac{d_c v_c \rho}{\mu}$$

Rýchlosť usadzovania z Re_c

$$\frac{(\rho_c - \rho)gd_c^2}{18\mu} < \frac{0.4\mu}{d_c\rho}$$

$$d_c < 1.93\sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\rho(\rho_c - \rho)g}}$$

**⇒ hranica veľkosti častíc -
zaručene laminárne usadzovanie**

Poznámka:
**Analógia pre
turbulentné
usadzovanie**

Usadzovanie neguľových častíc

d_{ec}

Ekvivalentný priemer

$$d_{ec} = \sqrt[3]{\frac{6V_c}{\pi}}$$



Priemer gule s objemom rovnajúcim sa objemu danej neguľovej častice V_c

ϕ

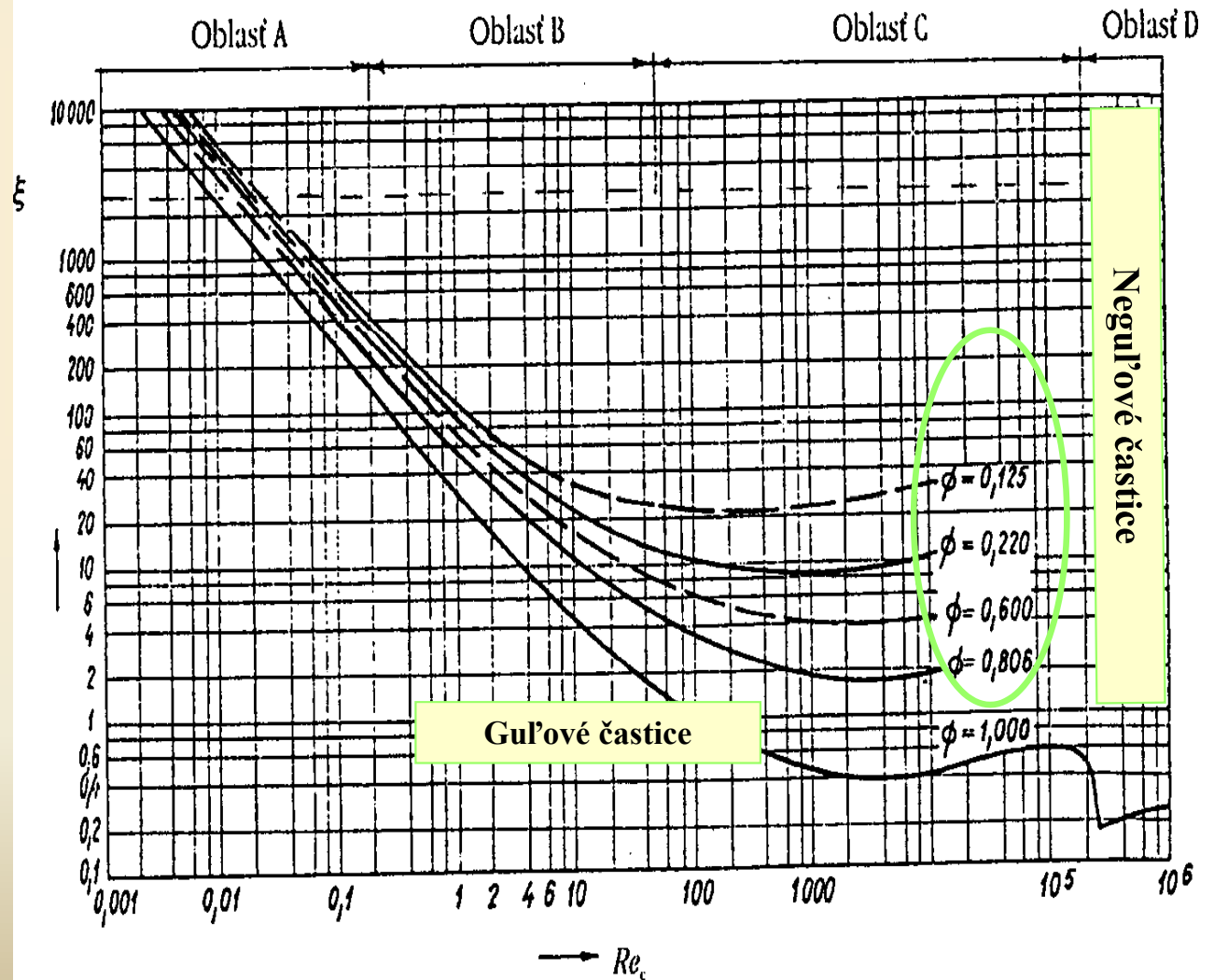
Tvarový faktor - sféricita

$$\phi = \frac{A_g}{A_c}$$

Tvarový faktor ϕ pre častice rôznych tvarov

Guľa:	1.
Kocka:	0.806
Hranol ($a.a.2a$):	0.767

Súčiniteľ odporu ξ pre častice neguľového tvaru



Usadzovanie častíc v suspenzii

$$\varepsilon = 1 - x_V$$

ε - medzerovitosť

x_V - objemová koncentrácia pevnej fázy v suspenzii

$$\varepsilon < 0.99$$

Rušené usadzovanie

$$\varepsilon > 0.99$$

Nerušené usadzovanie

Súbor častíc – vyššia koncentrácia, šírka rozdelenia veľkosti

Vzájomné pôsobenie - zväčšenie odporu!

Zníženie rýchlosti usadzovania – **zbrzdené** usadzovanie

Výpočet rýchlosti usadzovania suspenzie v_C ! - empiria

- výška suspenzie
- priemer nádoby
- objemová koncentrácia častíc
- medzerovitosť...

Pre väčšinu priemyselných suspenzií je rýchlosť usadzovania

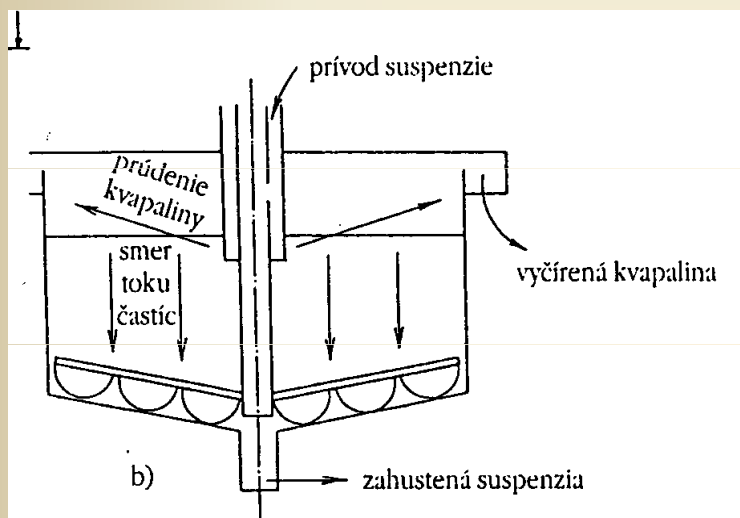
$$v = 0.5v_C$$

v_C - 1 častice

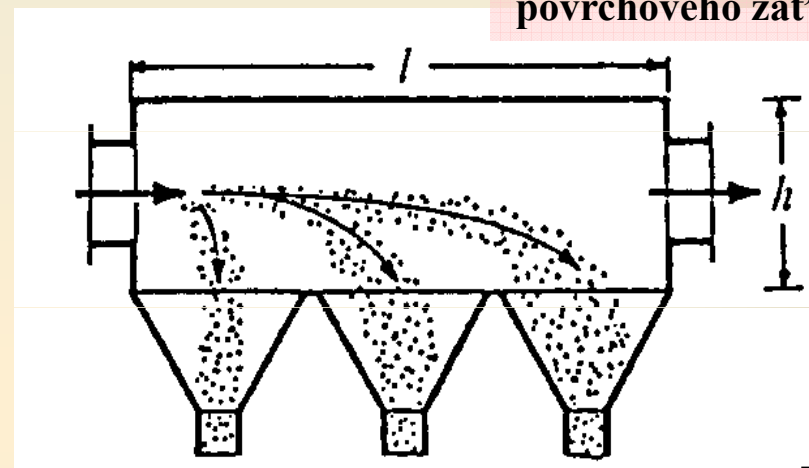
Usadzovanie tuhej častice v tekutine

Priemyselné zariadenia

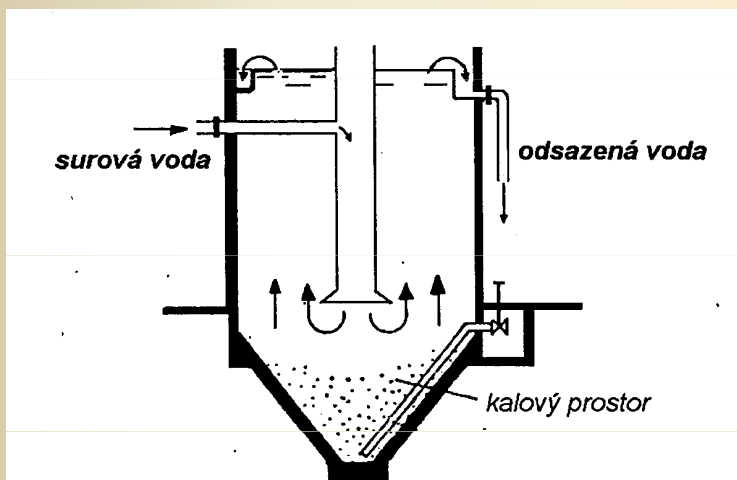
Kontinuálne zariadenia



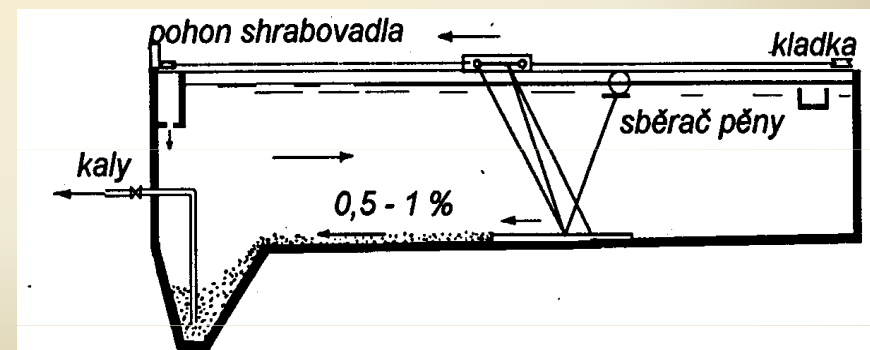
Dorrov hrabľový usadzovač



Rmutnica



Usadzovacia nádrž s vertikálnym prietokom

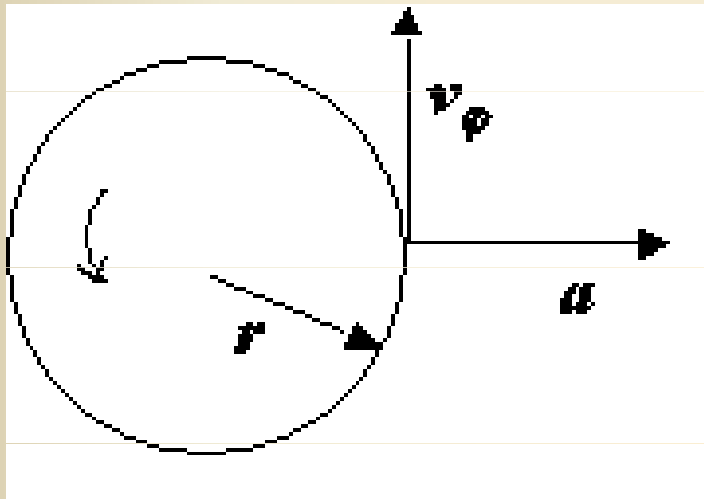


Horizontálna usadzovacia nádrž

Odstred'ovanie

Pre usadzovanie v poli odstredivých síl platia rovnaké zákonitosti ako pri usadzovaní v gravitačnom poli

Namiesto gravitačného zrýchlenia g dosadzujeme odstredivé zrýchlenie a !



ω - uhlová rýchlosť

a - odstredivé zrýchlenie

r - polomer rotácie

$v_\phi = (\omega \cdot r)$ - obvodová rýchlosť

f - frekvencia (otáčky za sek.)

Archimedovo kritérium

$$Ar = \frac{d_c^3 (\rho_c - \rho) \rho a}{\mu^2}$$

$$a = \omega^2 r = (2\pi f)^2 r$$

Froudovo kritérium – pomer odstredivého zrýchlenia a ku gravitačnému zrýchleniu g

$$Fr = \frac{\omega^2 r}{g}$$

Väčšie
zrýchlenie $a \gg g$



Rýchlejšie
usadzovanie

Odstred'ovanie

Aplikácie:

Laminárne usadzovanie

$$v_c = \frac{(\rho_c - \rho)gd_c^2}{18\mu}$$

Rýchlosť pohybu častíc v odstredivom poli pre laminárne podmienky

$$v_{c,odst} = \frac{(\rho_c - \rho)ad_c^2}{18\mu}$$

Porovnanie rýchlostí usadzovania v_c pri laminárnom a turbulentnom charaktere toku

Priemyselné zariadenia

Usadzovacie odstredivky

Filtračné odstredivky

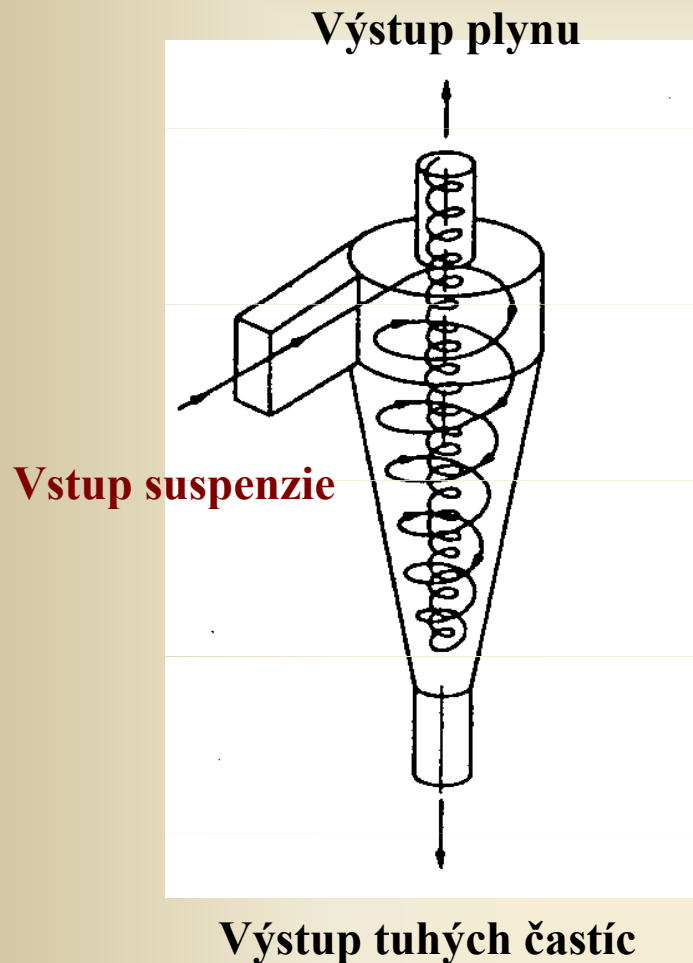
Separačné odstredivky

Faktor oddeľovania

$$f_{odel.} = \frac{a}{g} = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{(2\pi f)^2 r}{g}$$

⇒ Odstredivky s väčším počtom otáčok, „menší“ priemer bubna

Oddel'ovanie tuhých častíc v cyklóne

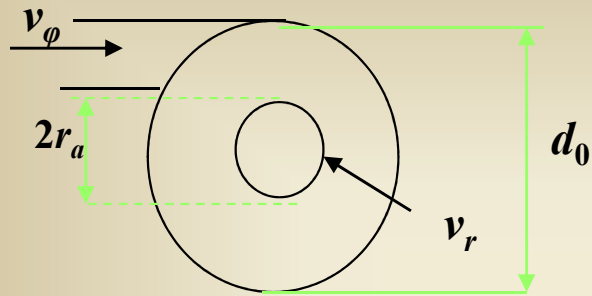


- Odstredivá sila môže byť až 2500 násobok gravitačnej sily
- Používa sa na separáciu malých tuhých častíc z plynu (tuhé častice z kvapalín – hydrocyklóny)

• **Pohyb plynu** - vstup tangenciálne do hornej uzavretej časti cyklónu (rotačný pohyb). Smer prúdenia plynu - po špirále smerom nadol až do kónusu - zmena smeru plynu nahor po zmenšenom polomere špirály. Výstup plynu cez rúrku v hornej časti

• **Pohyb tuhých častíc** - rôzne častice - rôzne dráhy . Veľké častice - prevláda odstredivá sila, po náraze častice padajú do dolnej časti. Malé častice - prevláda dotredivá sila - unášanie plynom. Časť častíc - rovnováha odstredivej a dostredivej sily, častice rotujú s rôznym pomerom rotácie.

Vzt'ah medzi priemerom častice a polomerom dráhy rotácie



$$f_t - f_V \xrightarrow{0} - f_o = 0$$

a – odstredivé zrýchlenie
 $a = \omega^2 r$

Odstredivá sila

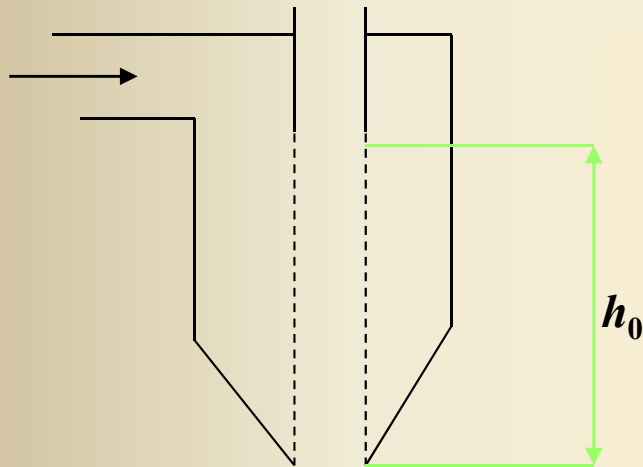
$$f_c = \frac{\pi d_c^3}{6} \rho_c \frac{v_\phi^2}{r}$$

Dostredivá sila

$$f_o = 3\pi\mu d_c v_r$$

$$v_\phi = f(\dot{V}) = \frac{\dot{V}}{S_0} \sqrt{\frac{d_0}{2r}}$$

$$v_r = f(\dot{V}) = \frac{\dot{V}}{2\pi r h_0}$$



$$d_c = \sqrt{\frac{18 S_0^2 r \mu}{\pi d_0 h_0 V \rho_c}}$$

v_ϕ - tangenciálna zložka rýchlosti
 = $(\omega \cdot r)$ – obvodová rýchlosť

v_r - radiálna zložka rýchlosti

d_0 – priemer cyklónu

r – polomer rotácie častice

S_0 – plocha vstupného otvoru

h_0 – výška aktívnej časti cyklónu

r_a - polomer centrálnej rúrky pre výstup plynu

Vzťah medzi priemerom častice a polomerom dráhy rotácie

Pre $r=0.4 r_a$ d_c je polomer najmenších častíc, ktoré je cyklón schopný oddeliť