

HYDROMECHANICKÉ PROCESY

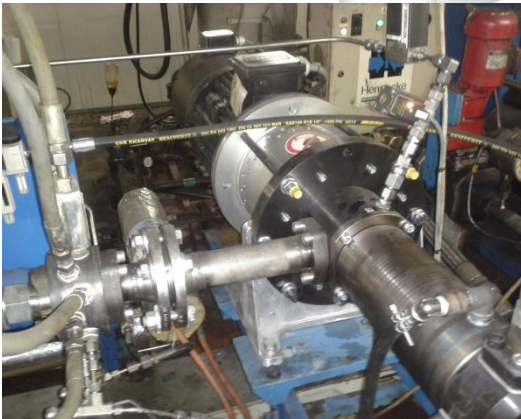
Míchání v kapalném prostředí (přednáška)

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

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

Účel a způsob míchání

- **Intenzifikace procesů v míchané vsádce** $\dot{m} = \beta S \Delta \rho_A$
 - intenzifikace přestupu tepla – zařízení pro ohřev a chlazení látek
 - intenzifikace přestupu hmoty – rozpouštěcí nádrže, krystalizátory
 - reaktory – polymerizace, výroba chemických látek, katalytické reakce
 - bioreaktory – fermentory při výrobě biopaliv, potravinářský průmysl, farmacie

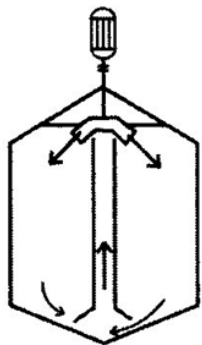
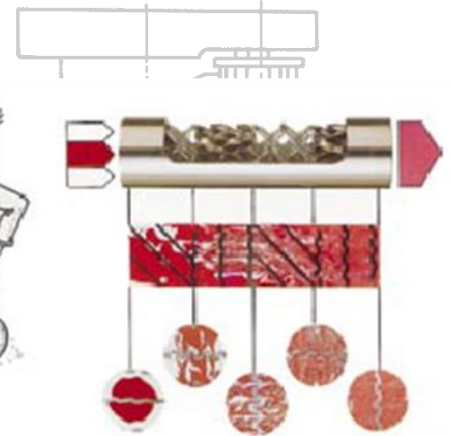


○ **Příprava směsí požadovaných vlastností**

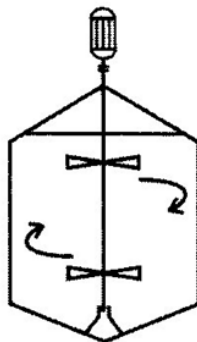
- homogenizační nádrže – mísitelné kapaliny (nápoje), kalové nádrže
- příprava suspenzí – rozplavovací nádrže na mletý vápenec a vápenný hydrát
- dispergace a příprava emulzí – výroba barviv
- dispergace pevné fáze – příprava částicových nanokompozitů

Způsoby míchání

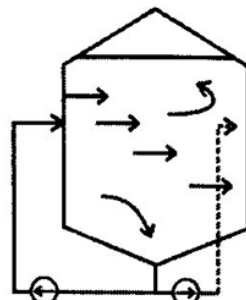
- **mechanické míchání** (rotační, vibrační)
- hydraulické míchání
- pneumatické míchání
- **míchání v potrubí**
(turbulentní proudění, statické směšovače)



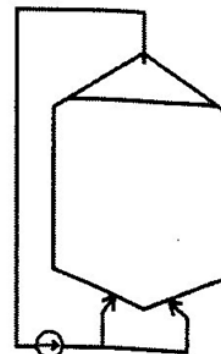
A



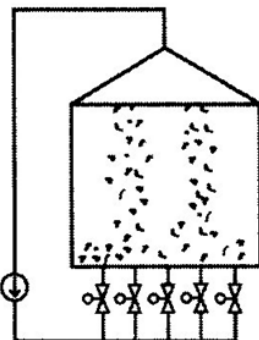
B



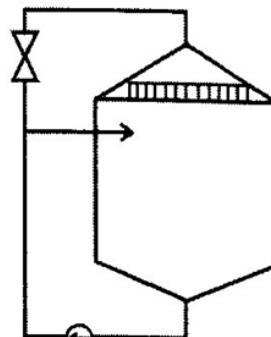
C



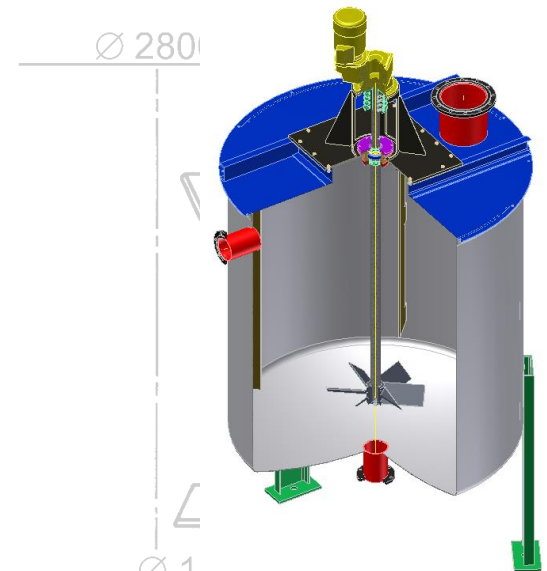
D



E

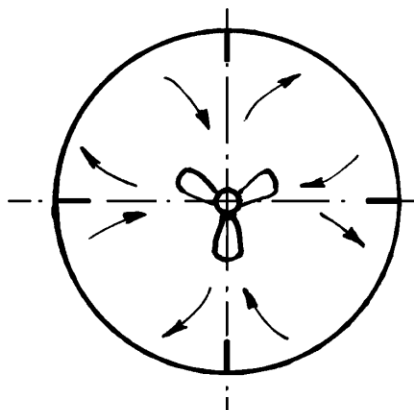
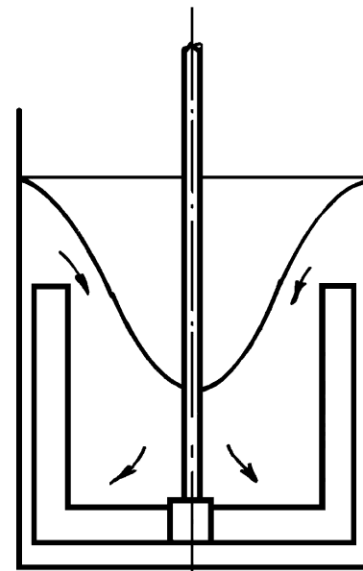
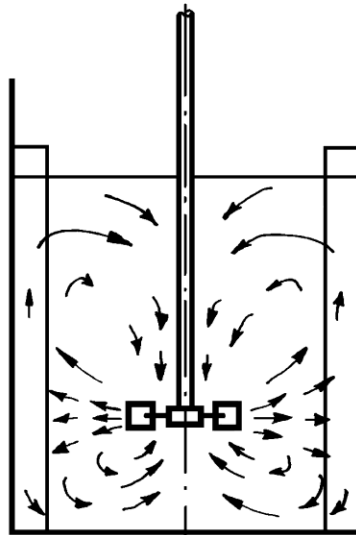
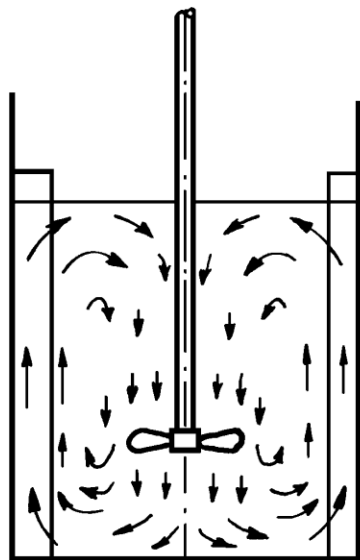


F

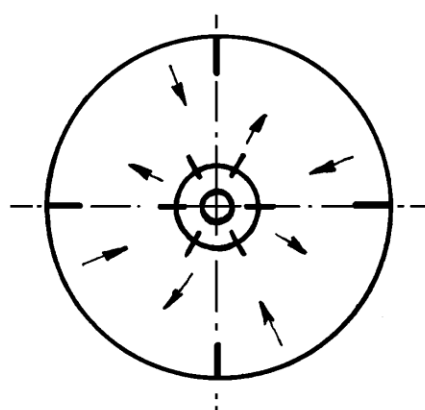


- A – míchání mechanické turbínové
B – míchání mechanické lopatkové
C – hydraulické míchání
D – pneumatické míchání s pevnými vstupy
E – programově řízené pneumatické míchání
F – hydraulické míchání s odpěňovací sprchou

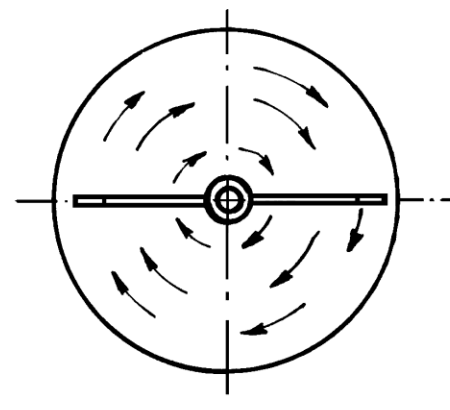
Proudění v nádobách s rotačními míchadly



a)



b)



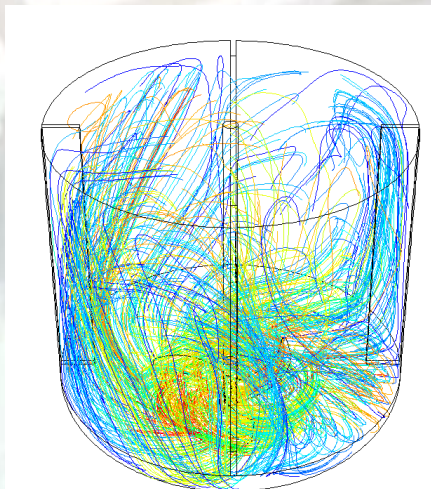
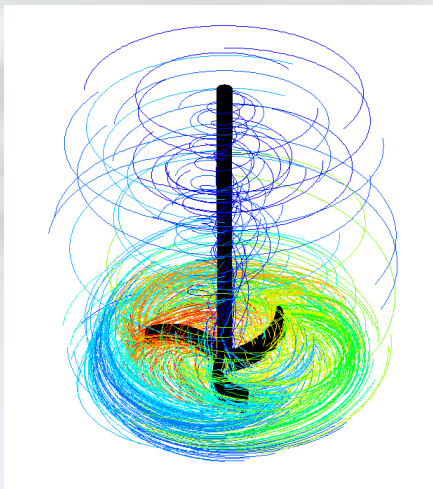
c)

a – axiální proudění, nádoba s narážkami, b – radiální proudění, nádoba s narážkami, c – tangenciální proudění, nádoba bez narážek

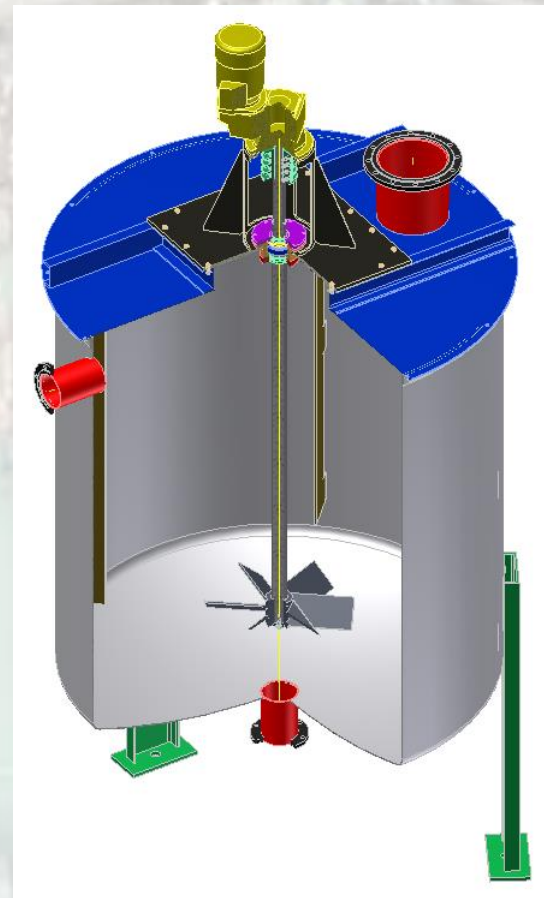
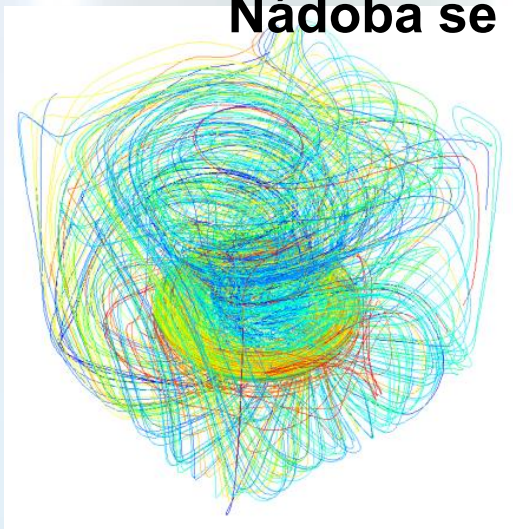
Proudění v míchané vsádce



Charakter toku v míchané vsádce – vliv použití narážek

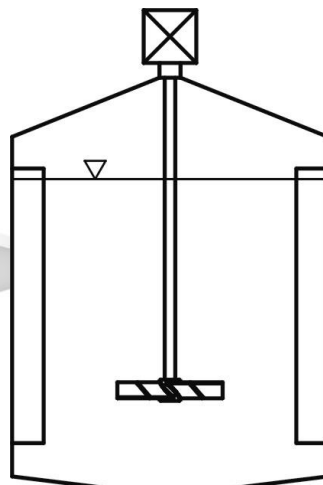
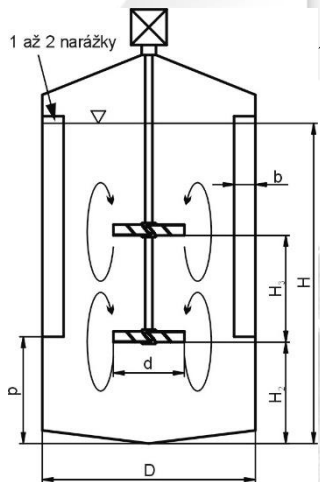
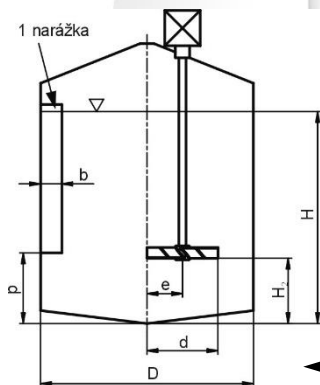


Nádoba se čtvercovým půdorysem

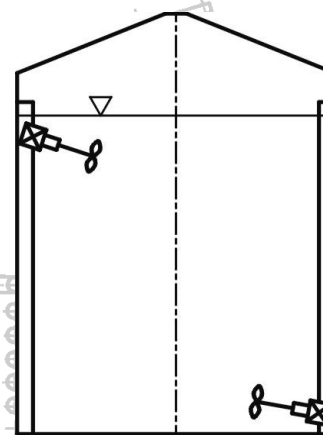


Konstrukční provedení míchacích zařízení

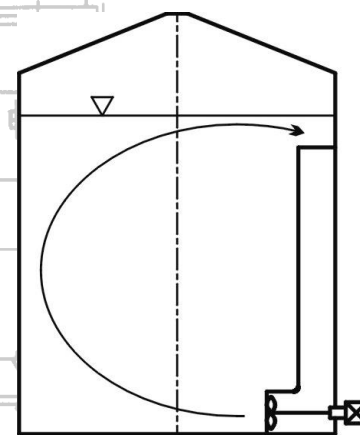
Uspořádání míchacích zařízení s mechanickými míchadly



A

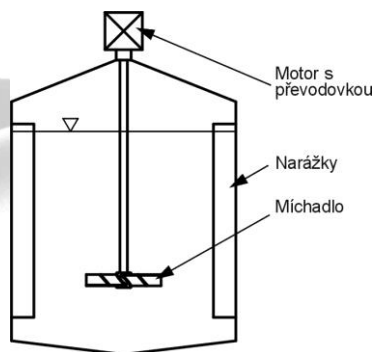


B

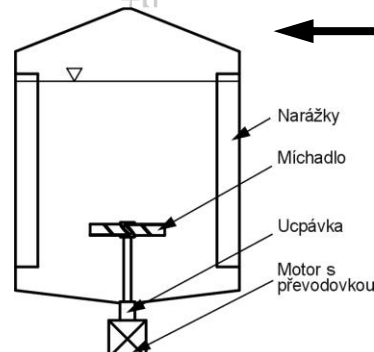


C

A – Centrally placed impeller in baffled vessel, B – Side-entrting propeller, C – Agitator with draught tube



A



B

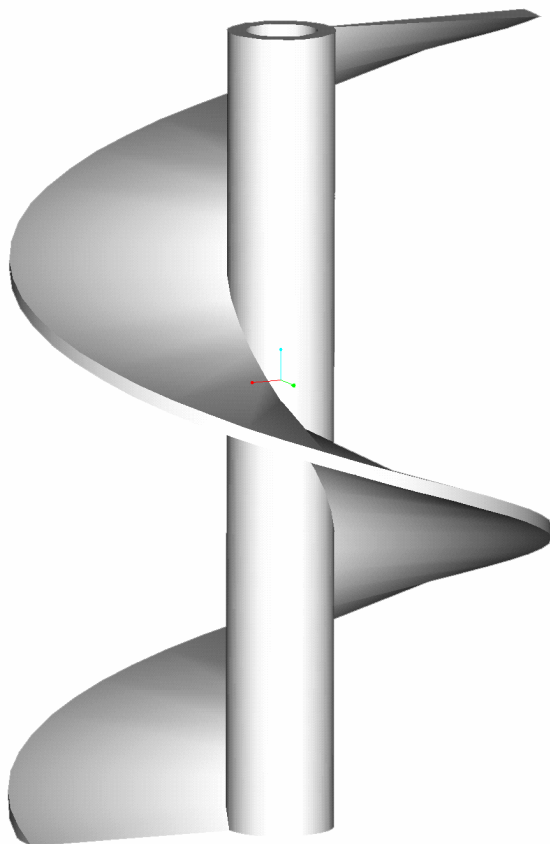
Mechanická ucpávka



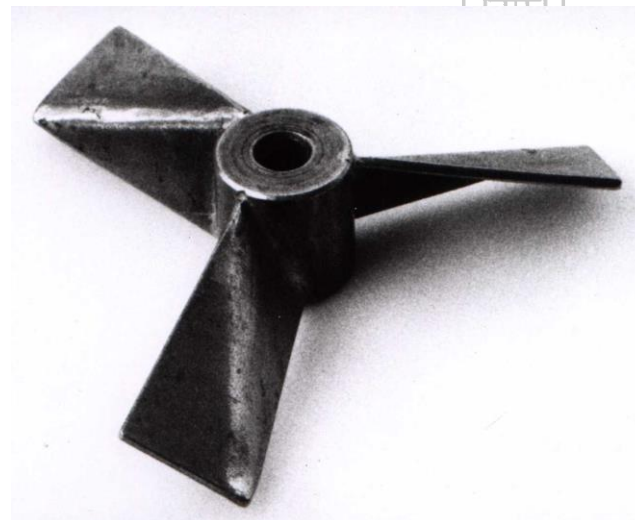
A – Equipment with a drive at the top, B – Equipment with a drive at the bottom

Hlavní typy rotačních míchadel

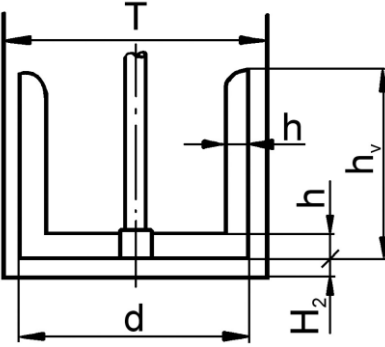
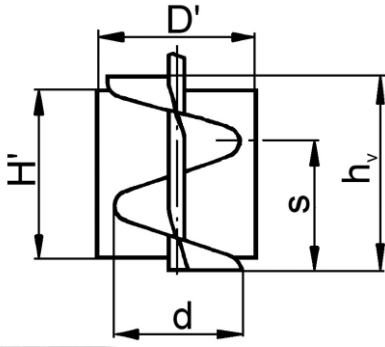
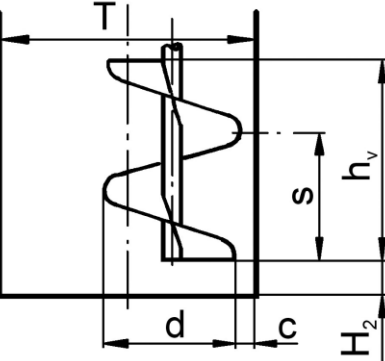
Pomaloběžná míchadla

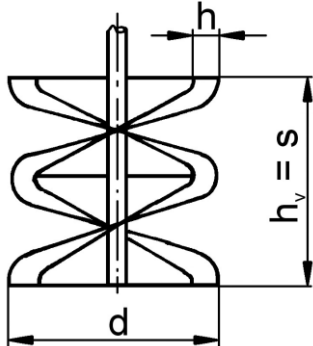
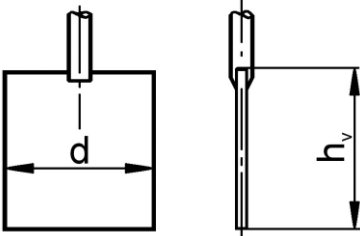
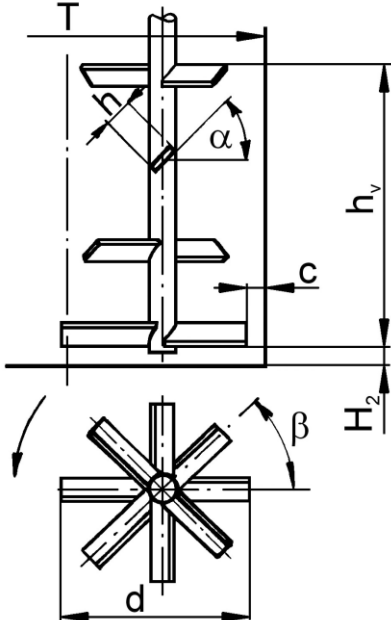


Rychloběžná míchadla

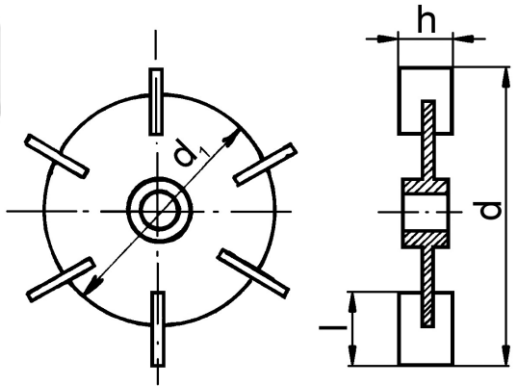
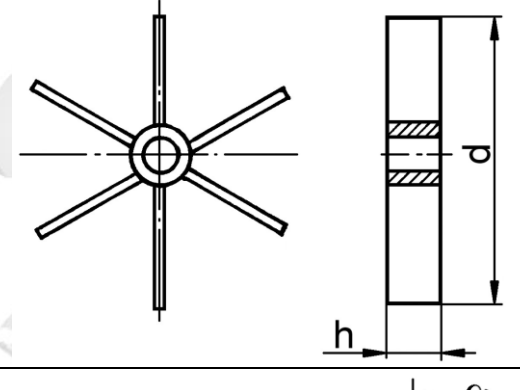
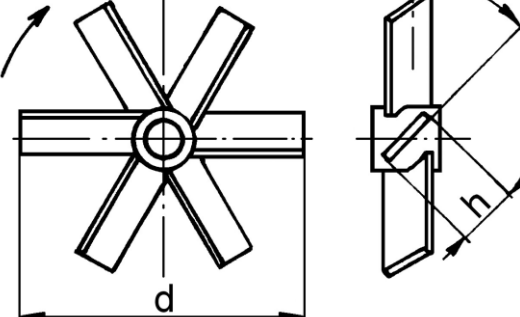


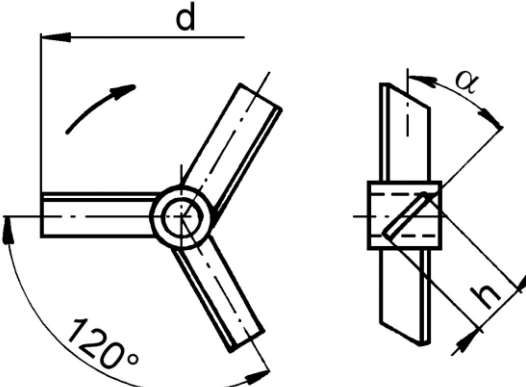
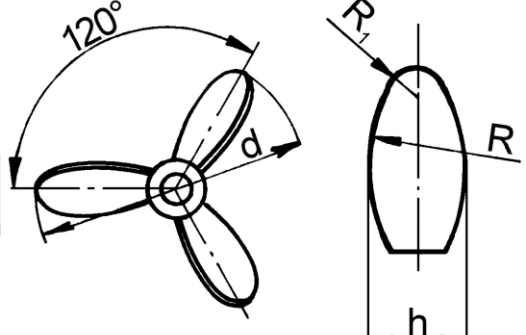
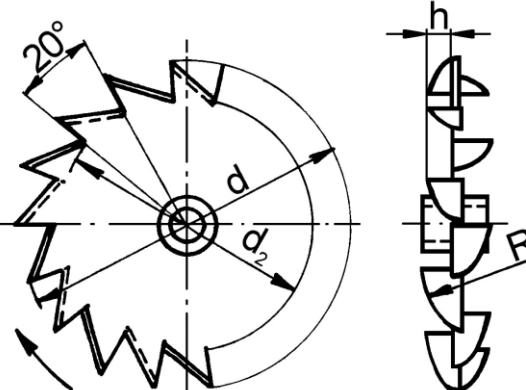
Hlavní typy pomaloběžných míchadel

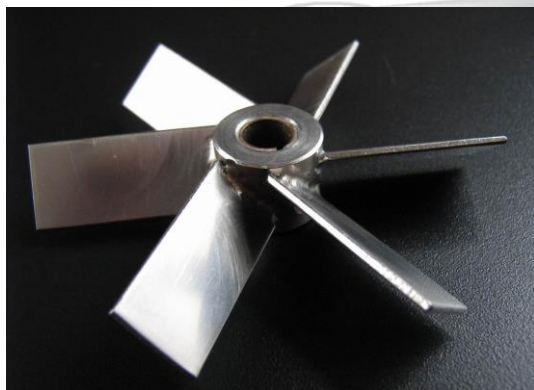
Typ	Schéma	Název rozměrová norma	T/d	Geometrické parametry
1		Kotvové míchadlo CVS 69 1014	1,11	$h_v / d = 0,8$ $h / d = 0,12$ $H_2 / d = 0,055$
2		Šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem CVS 69 1028	2	$h_v / d = 1,5$ $s / d = 1$ $D' / d = 1,1$ $H' / D' = 1,15$
3		Šroubové míchadlo v excentrickém uspořádání	2	$h_v / d = 1,5$ $H_2 / d = 0,25$ $s / d = 1$ $c / T = 0,02$

Typ	Schéma	Název rozměrová norma	T/d	Geometrické parametry
4		Pásové míchadlo CVS 69 1029	1,05	$h_v / d = 1$ $s / d = 1$ $h / d = 0,1$
5		Listové míchadlo CVS 69 1016	2	$h / d = 1$
6		Čtyřnásobné lopatkové míchadlo v excentrickém uspořádání	2	$h / d = 0,2$ $h_v / d = 1,65$ $\alpha = 45^\circ$ $\beta = 45^\circ$ $c / T = 0,02$ $H_2 / d = 0,175$

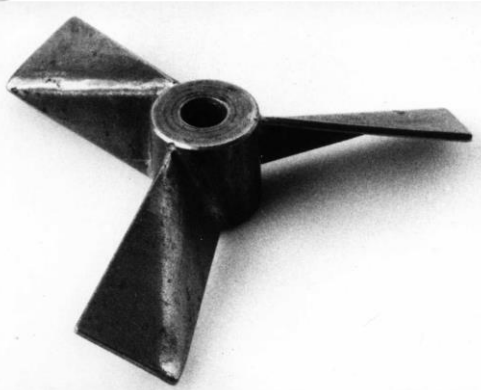
Hlavní typy rychloběžných míchadel

Typ	Schéma	Název rozměrová norma	T/d	Geometrické parametry
1		Turbinové míchadlo s dělicím kotoučem CVS 69 1021	3 ÷ 4	$h/d = 0,2$ $1/d = 0,25$ $d_1/d = 0,75$ 6 lopatek
2		Turbinové míchadlo bez dělicího kotouče	3 ÷ 4	$h/d = 0,2$ 6 lopatek
3		Šestilopátkové míchadlo se šikmými lopatkami CVS 69 1020	3 ÷ 4	$h/d = 0,20$ $\alpha = 45^\circ$

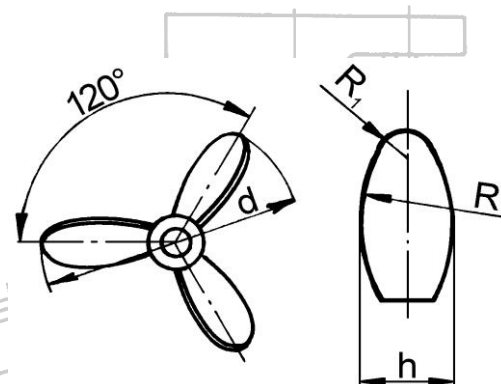
Typ	Schéma	Název rozměrová norma	T/d	Geometrické parametry
4		Třílopatkové míchadlo se šikmými lopatkami CVS 69 1025.3	3 ÷ 4	$h/d = 0,2$ $\alpha = 45^\circ$
5		Vrtulové míchadlo s konstantním stoupáním šroubovice CVS 69 1019	3 ÷ 4	$s/d = 1$ $h/d = 0,22$ $R/d = 0,4$ $R_1/R = 0,16$
6		Zubové míchadlo CVS 69 1038.1, .2	2 ÷ 4	provedení 1 $h/d = 0,1$ $d_2/d = 0,8$ provedení 2 $h/d = 0,075$ $d_2/d = 0,85$



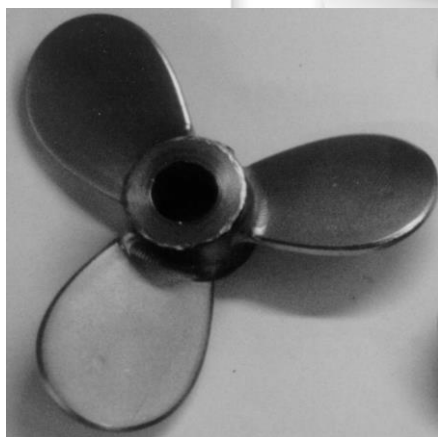
A



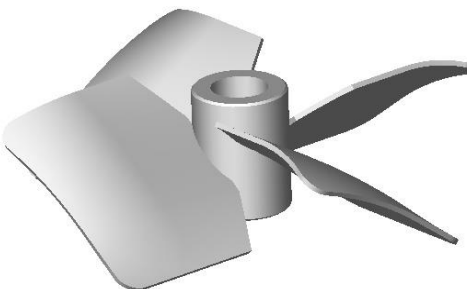
B



C



D



E



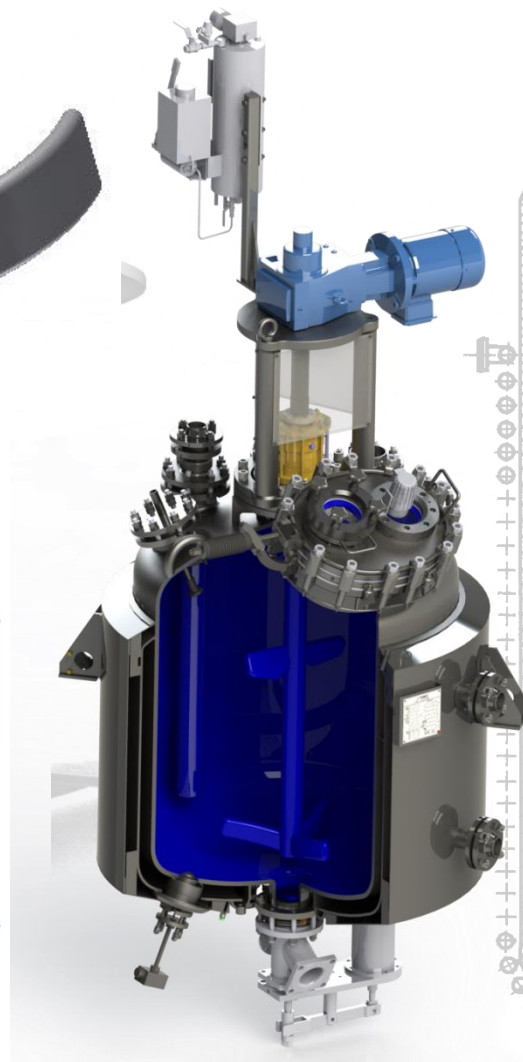
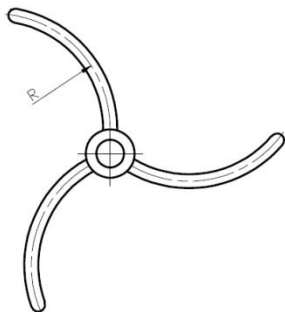
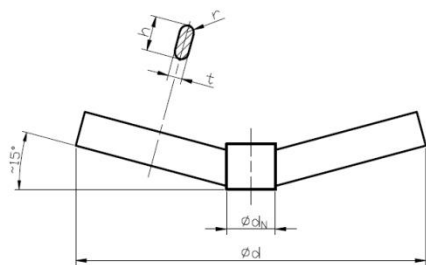
F

Axiální míchadla užívaná ve fermentorech

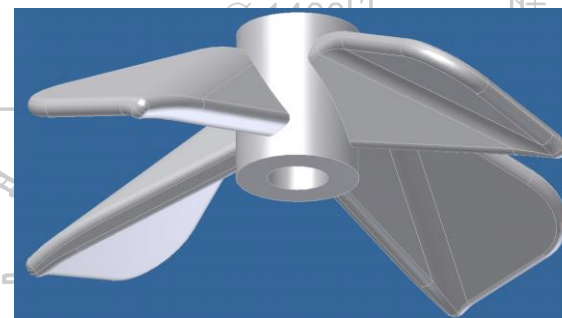
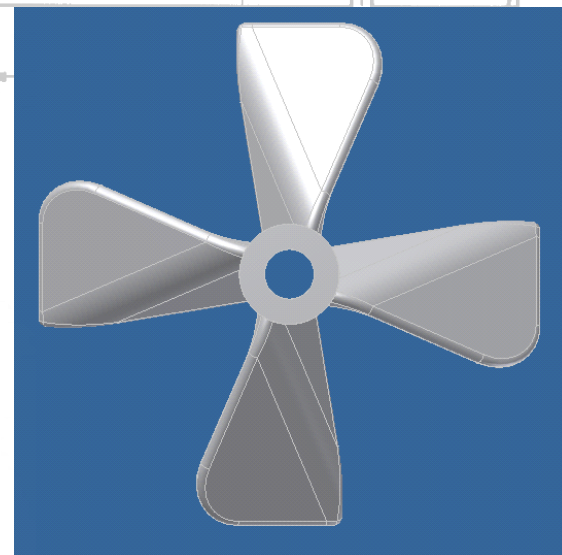
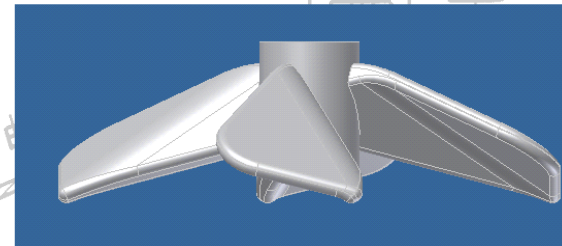
A – šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° , B – třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami s tvarem lopatek dle CVS 69 1043, C – vrtulové míchadlo dle CVS 69 1019, D – vrtulové míchadlo EKATO, E – míchadlo LIGHTNIN A315, F – míchadlo Techmix TX335

Míchadla pro smaltované aparáty

Radiální míchadla

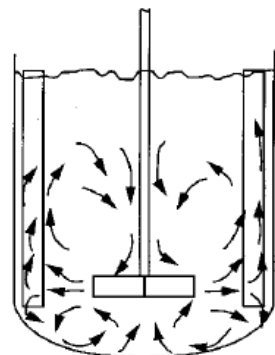


Axiální míchadla

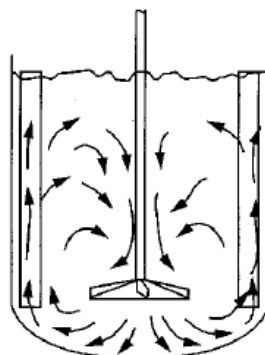


Proudění v míchané vsádce

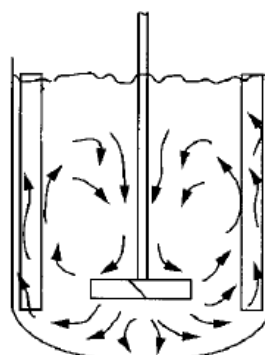
- Primárním účinkem mechanického míchadla je proudění a cirkulace míchané vsádky v nádobě.
- Rozložení rychlosti a tlaku v míchané vsádce $\Rightarrow$ **Navier-Stokesovy rovnice**
- Praktický výpočet proudění a cirkulace míchané vsádky
 $\Rightarrow$ **čerpací výkonnost míchadla**



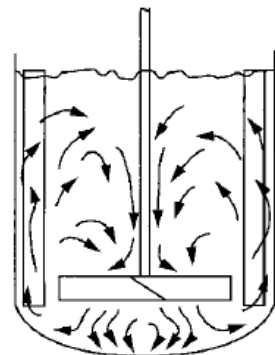
(a) FBT



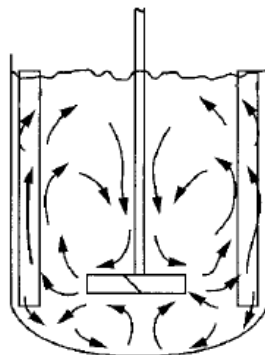
(b) Hydrofoil



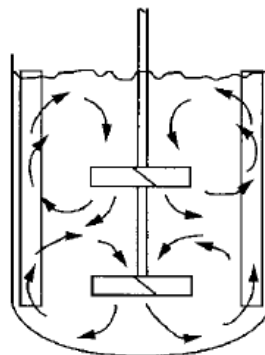
(c) PBT



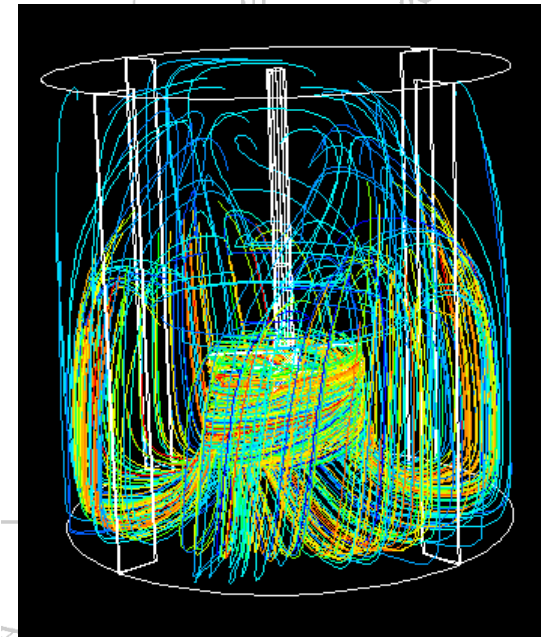
(d) PBT Large D



(e) PBT High μ



(f) Two PBT's



Proudění v míchané vsádce



Rychlostní pole v míchané vsádce

Rovnice kontinuity: $\nabla \cdot \vec{u} = 0$

Navier-Stokesova rovnice: $\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}$

⇒ **Inspekční analýza**



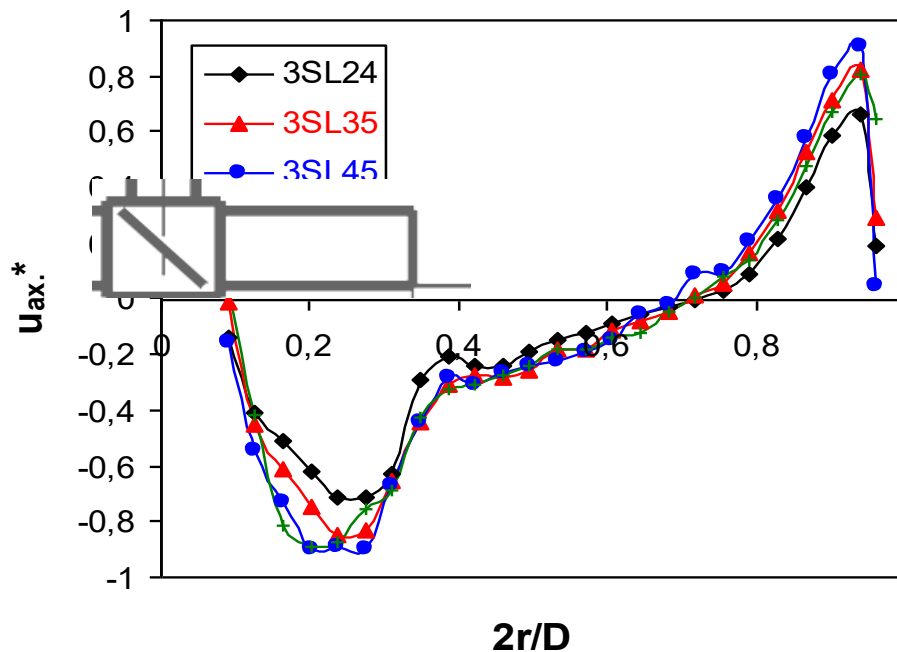
$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*, t^*, Re)$$

$$p^* = f_2(\vec{x}^*, t^*, Re)$$

Pro časově střední hodnoty

$$\tilde{\vec{u}}^* = f_1(\vec{x}^*, Re)$$

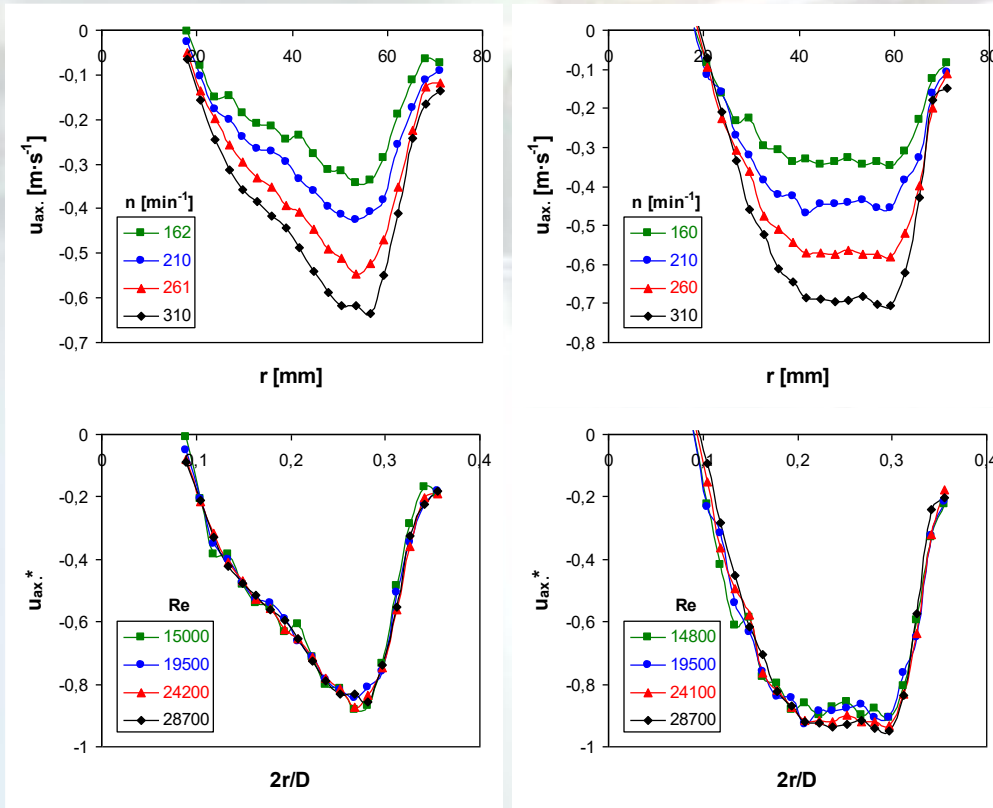
$$\tilde{p}^* = f_2(\vec{x}^*, Re)$$



Proudění v míchané vsádce



Pro velké hodnoty Reynoldsova čísla – **Turbulentní proudění**



$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*)$$

$$\tilde{p}^* = f_2(\vec{x}^*)$$

Malé hodnoty Reynoldsova čísla – **Plouživě proudění**

$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*)$$

$$p^+ = f_2(\vec{x}^*)$$

Čerpací účinky míchadel



Čerpací výkonnost míchadla:
$$Q_P = \frac{1}{2} \int_S \left[\text{Sign}(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \vec{n}) + 1 \right] \tilde{\mathbf{u}} \cdot \vec{n} \, dS$$

Rovnice kontinuity: $\nabla \cdot \vec{u} = 0$

Navier-Stokesova rovnice:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

⇒ Inspekční analýza



Bezrozměrná čerpací výkonnost – průtokové číslo

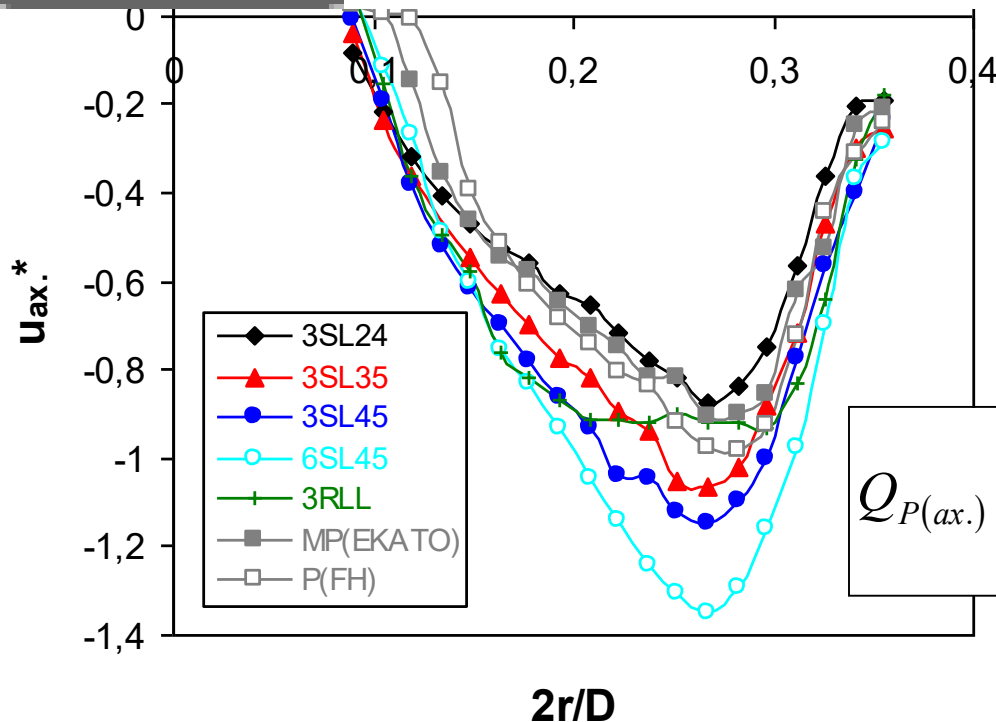
$$N_{QP} = \frac{Q_P}{nd^3} = f(Re)$$

Pro velké hodnoty Reynoldsova čísla – **Turbulentní proudění**

$$N_{QP} = \frac{Q_P}{nd^3} = \text{konst.}$$

Analogický závěr platí pro oblast **plouživého proudění**.

Čerpací účinky míchadel



$$\dot{V} = \int_S \vec{u} \cdot \vec{n} dS$$

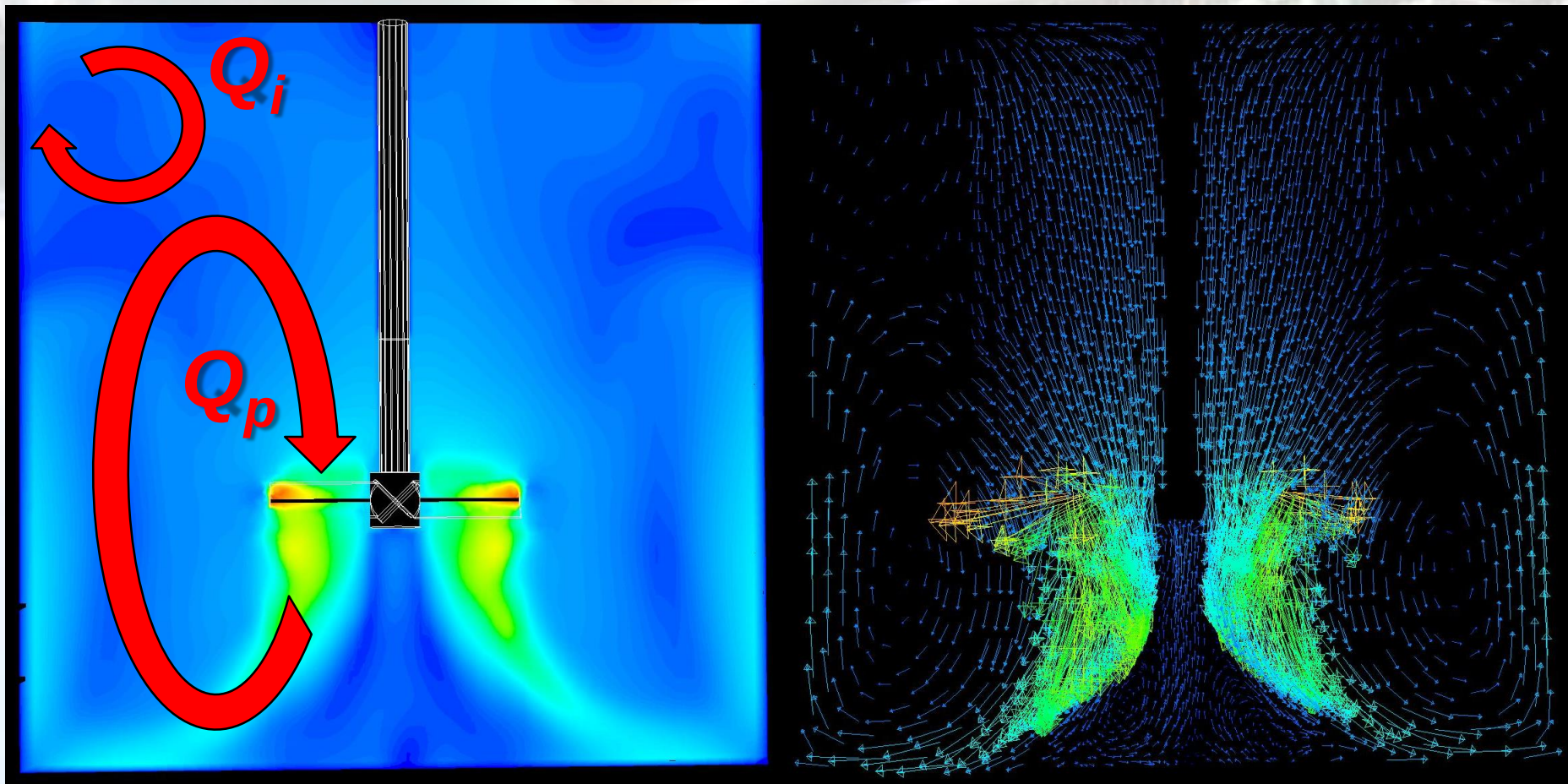
$$N_{Q_p} = \frac{Q_P}{nd^3} = f(Re)$$

$$Q_{P(ax.)} = \int_{S(ax.)} u_{ax.} dS_{(ax.)} = 2\pi \int_0^{d/2} u_{ax.}(r) r dr$$

Cirkulační účinky míchadel



Úhrnný objemový průtok míchané vsádky $Q_T = Q_P + Q_i$



Bezrozměrný úhrnný průtok

$$N_{QT} = N_{QP} + N_{Qi}$$

Příkon rotačních míchadel

Příkon na hřídeli míchadla

$$P = \int_{S_m} \vec{u} \cdot d\vec{F} = \int_{S_m} \vec{u} \cdot \vec{\sigma} \cdot \vec{n} dS = \int_{S_m} \vec{u} \cdot \left\{ -p\vec{\delta} + \mu \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right\} \cdot \vec{n} dS$$

⇒ Inspekční analýza

Bezrozměrný příkon na hřídeli míchadla – **příkonové číslo**

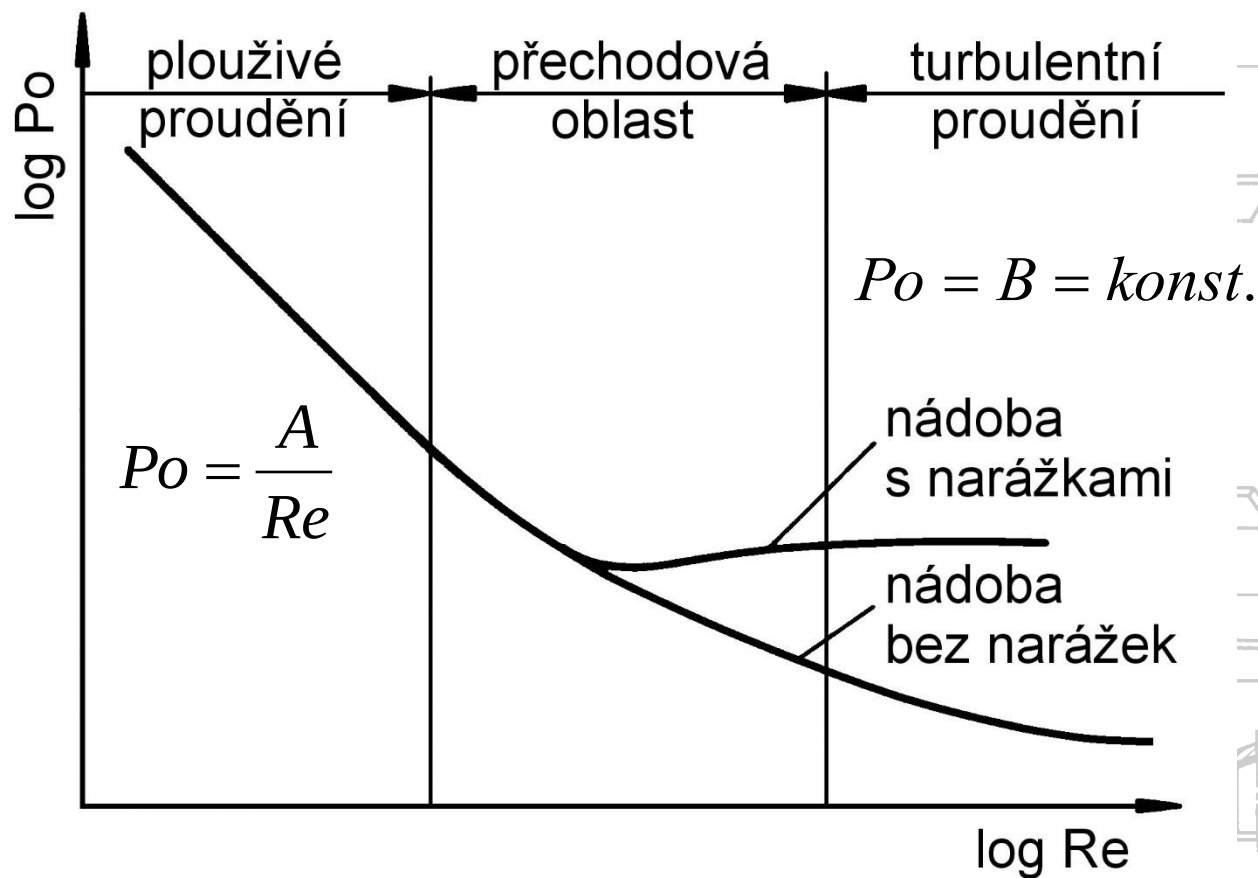
$$Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = f(Re) \text{ v turbulentní oblasti proudění} \quad Po = \text{konst.}$$

Příkonová charakteristika

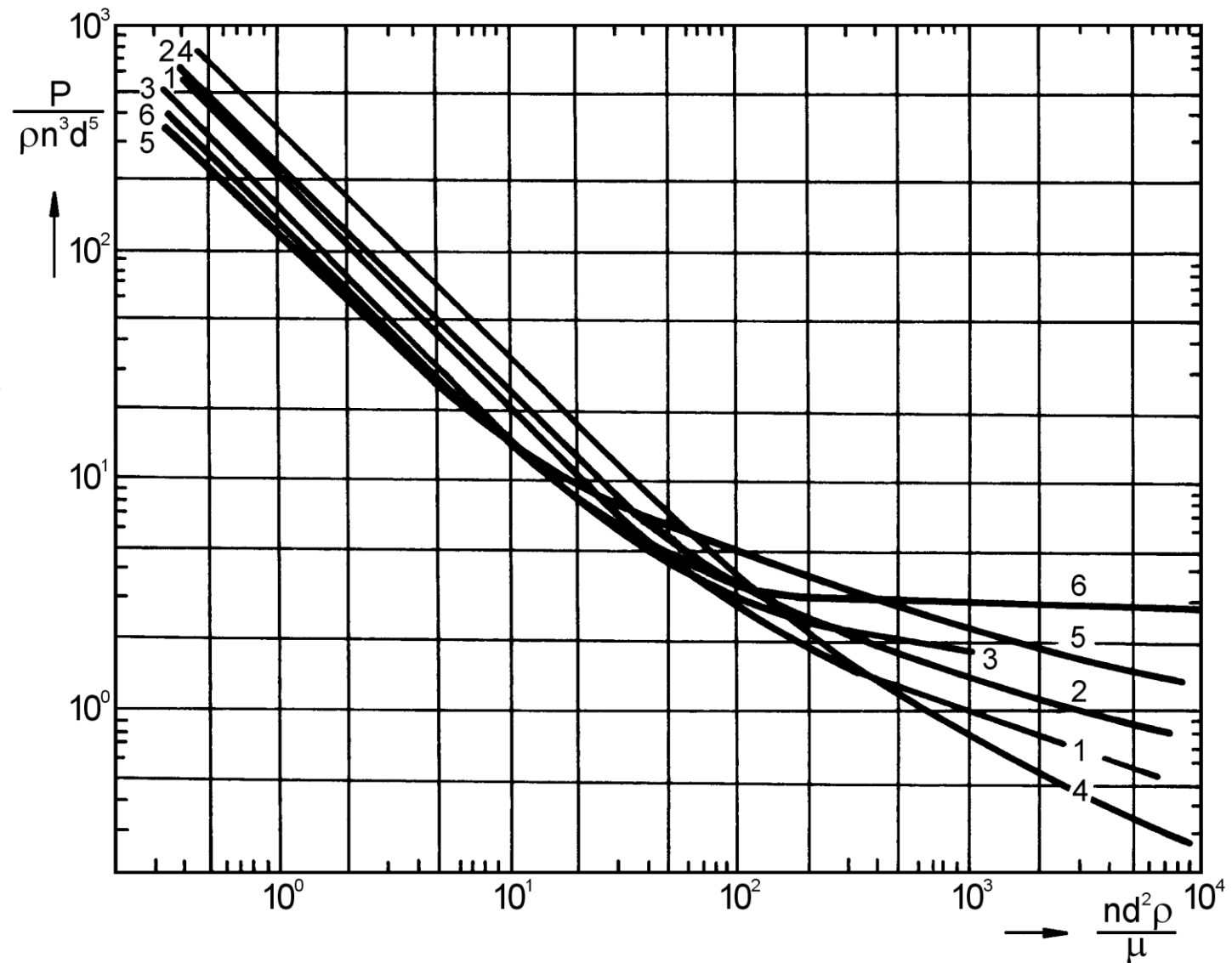
$$Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$$

$$Po = f(Re)$$

$$Re = \frac{nd^2 \rho}{\mu}$$

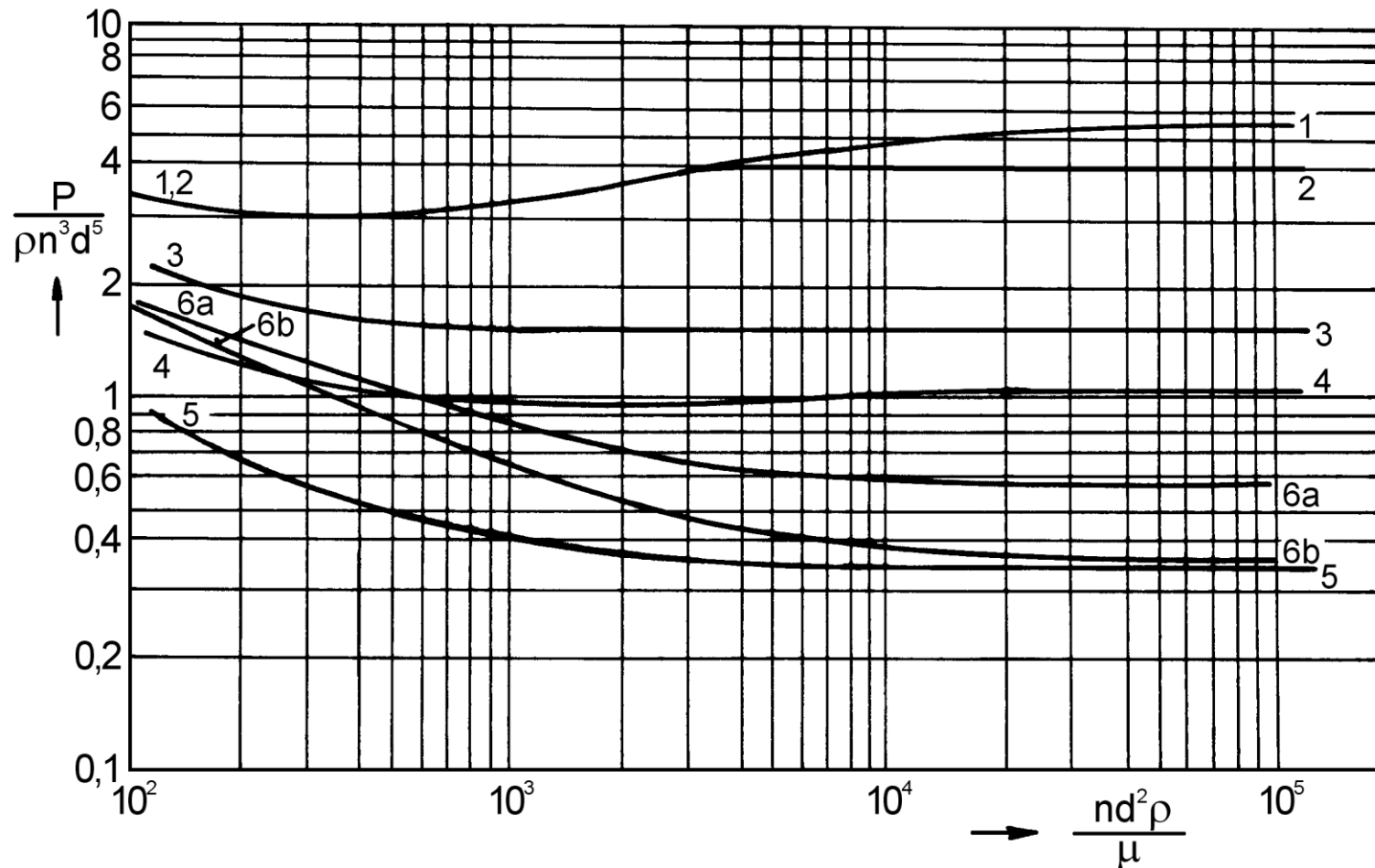


Příkonové charakteristiky některých typů pomaloběžných míchadel



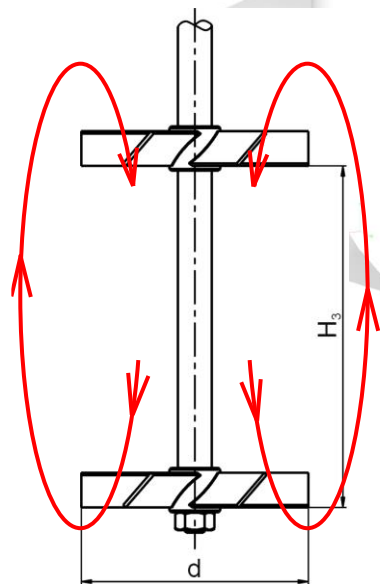
1 – kotvové míchadlo (CVS 69 1014), **2** – šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem (CVS 69 1028), **3** – šroubové míchadlo umístěné excentricky, **4** – pásové míchadlo (CVS 69 1029), **5** – listové míchadlo (CVS 60 1016), **6** – čtyřnásobné lopatkové míchadlo umístěné excentricky

Příkonové charakteristiky některých typů rychloběžných míchadel při míchání v nádobách s narážkami

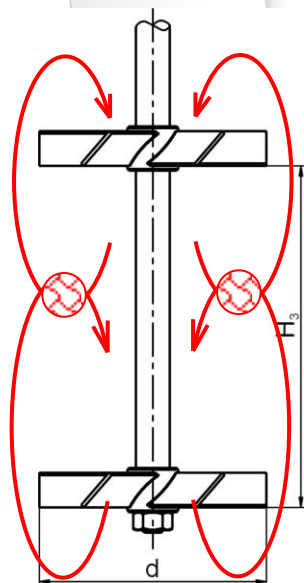


- 1** – turbínové míchadlo (CVS 69 1021), **2** – turbínové míchadlo bez dělicího kotouče,
3 – šestilopátkové míchadlo (CVS 69 1020),
4 – třílopatkové míchadlo (CVS 69 1025.3), **5** – vrtulové míchadlo (CVS 60 1019),
6a,b – zubová míchadla (CVS 69 1038.1.2)

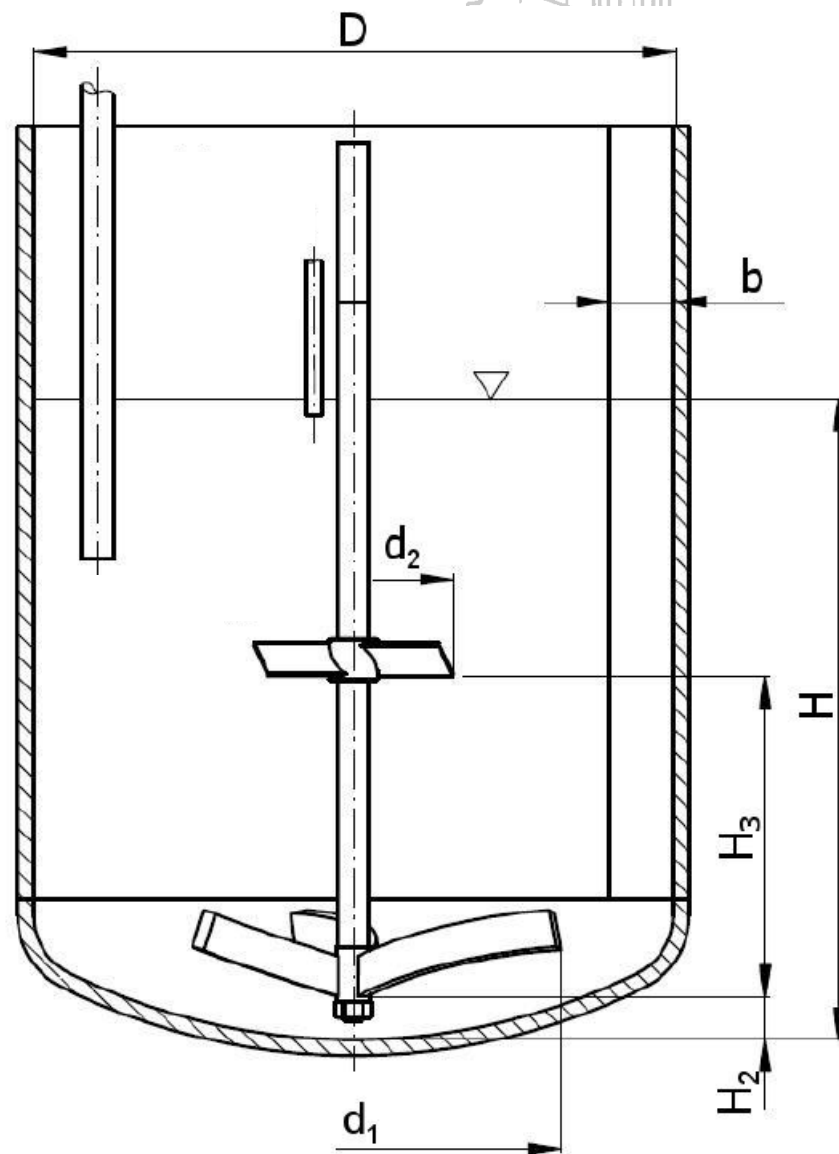
Příkon etážových míchadel



?



$$P = \sum P_i$$



Homogenizace



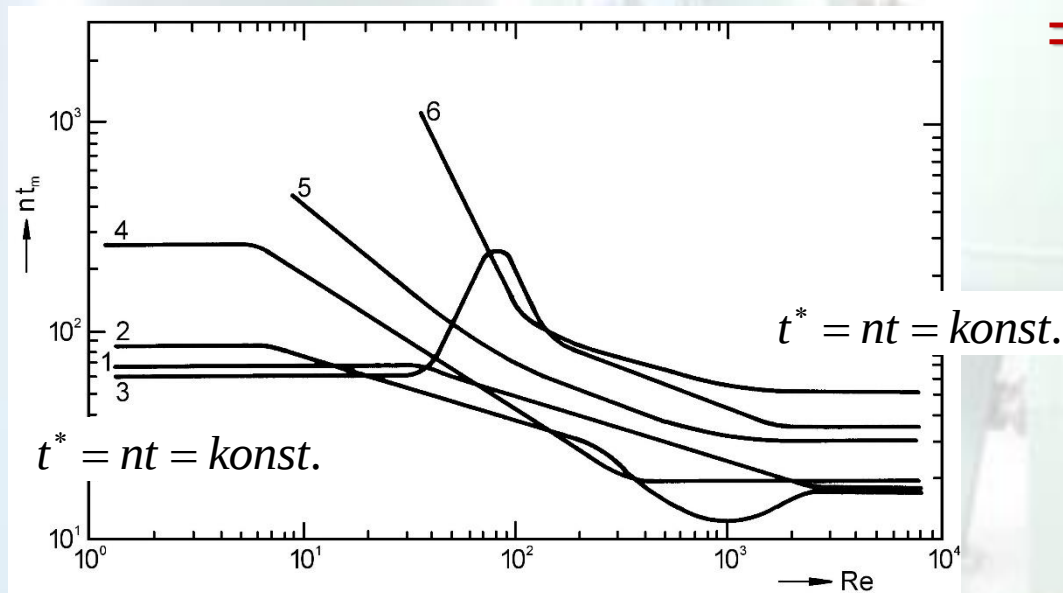
Homogenizace v míchané vsádce:



- vlivem recirkulačního proudění
- vlivem turbulentního proudění
- vlivem molekulární difúze

Doba homogenizace pro dosažení požadované homogenity

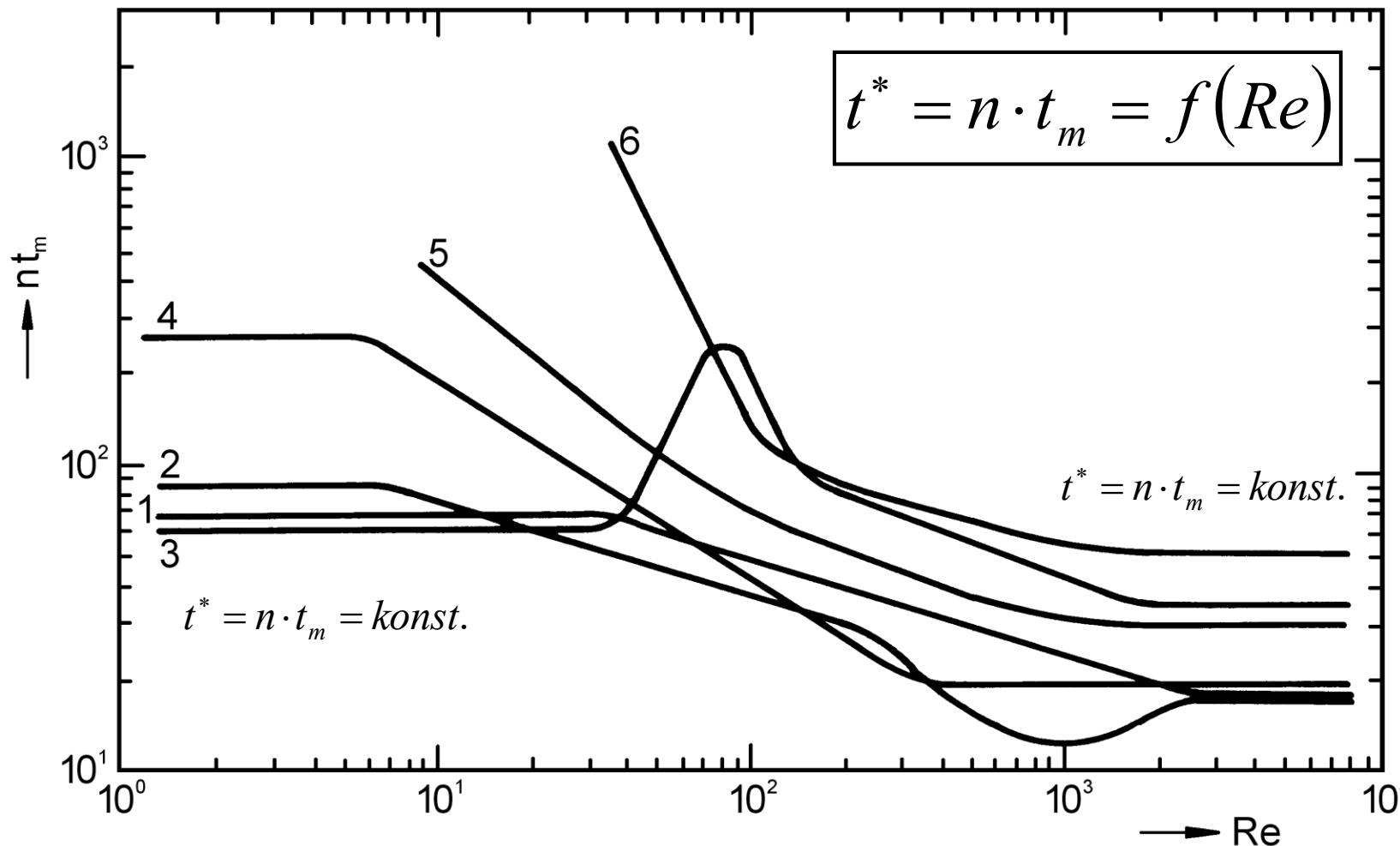
Rovnice přenosu hmoty: $\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho_A = 0$



⇒ Inspekční analýza



$$nt = f(Re)$$



1 – šroubové míchadlo (CVS 69 1028), **2** – šroubové míchadlo umístěné excentricky,
3 – pásové míchadlo (CVS 69 1029), **4** – čtyřnásobné lopátkové míchadlo umístěné
 excentricky, **5** – kotvové míchadlo (CVS 69 1014), **6** – turbínové míchadlo (CVS 69
 1021)

Homogenizace

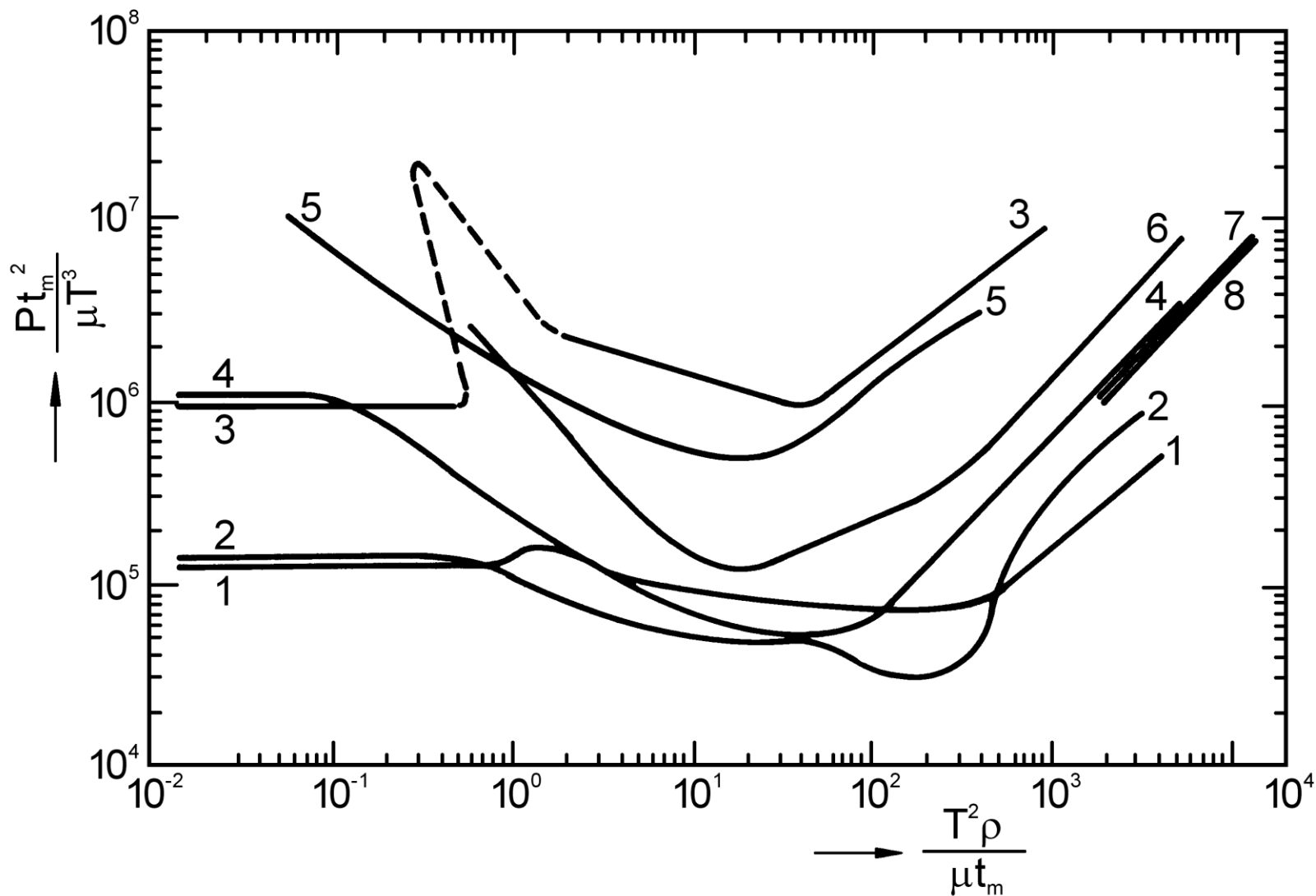


Počet cirkulací míchané vsádky potřebných pro dosažení požadovaného stupně homogenity → **cirkulační proudění**

$$t = it_c \quad \xrightarrow{N_{QT}} \quad i = \frac{4}{\pi} (nt) N_{QT} \left(\frac{d}{D} \right)^3 = 3 \div 4$$

Bezrozměrná energie potřebná pro dosažení požadovaného stupně homogenity

$$E = P \cdot t \quad \xrightarrow{Po} \quad E = \frac{P t^3}{\rho D^5} = Po (nt)^3 \left(\frac{d}{D} \right)^5$$



1 – šroubové míchadlo (CVS 69 1028), 2 – šroubové míchadlo umístěné excentricky,
 3 – pásové míchadlo (CVS 69 1029), 4 – čtyřnásobné lopátkové míchadlo umístěné
 excentricky, 5 – kotvové míchadlo (CVS 69 1014), 6 – turbínové míchadlo (CVS 69
 1021), 7 – šestilopátkové míchadlo (CVS 69 1020), 8 – třílopatkové míchadlo (CVS
 69 1025.3)

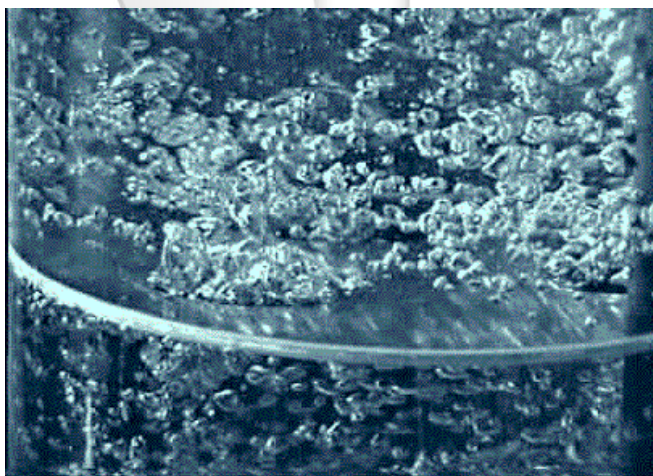
Míchání heterogenních soustav

Heterogenní systémy:

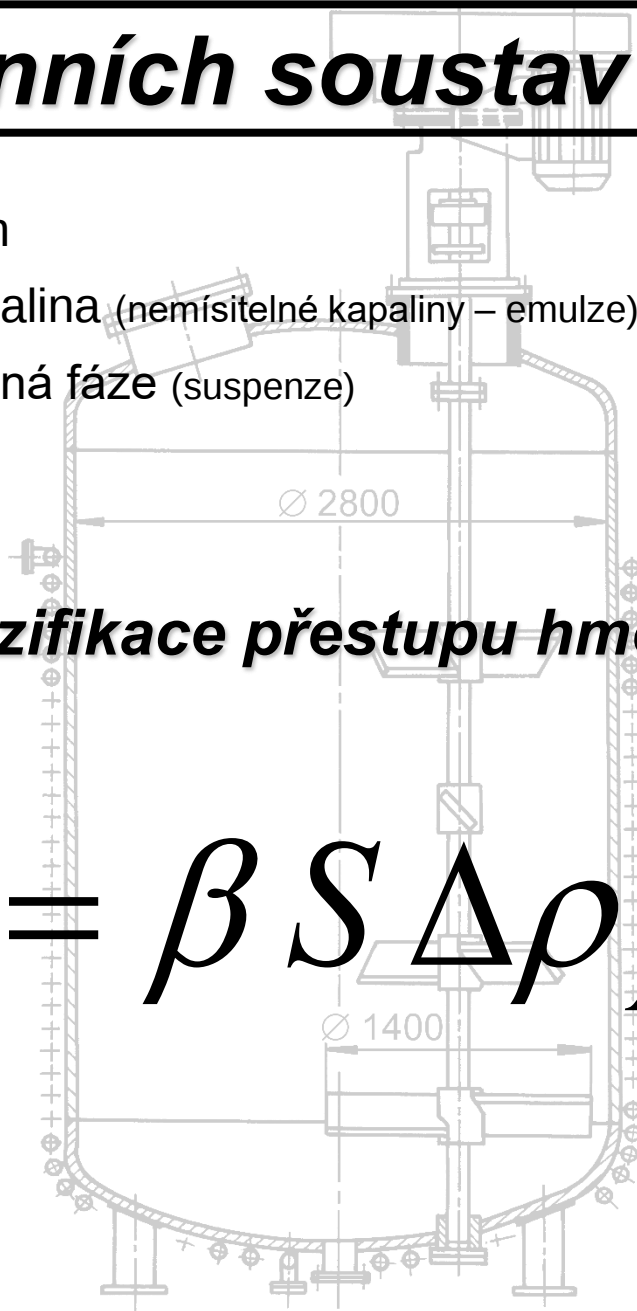
- kapalina – plyn
- kapalina – kapalina (nemísitelné kapaliny – emulze)
- kapalina – pevná fáze (suspenze)

Účel míchaní heterogenních systémů

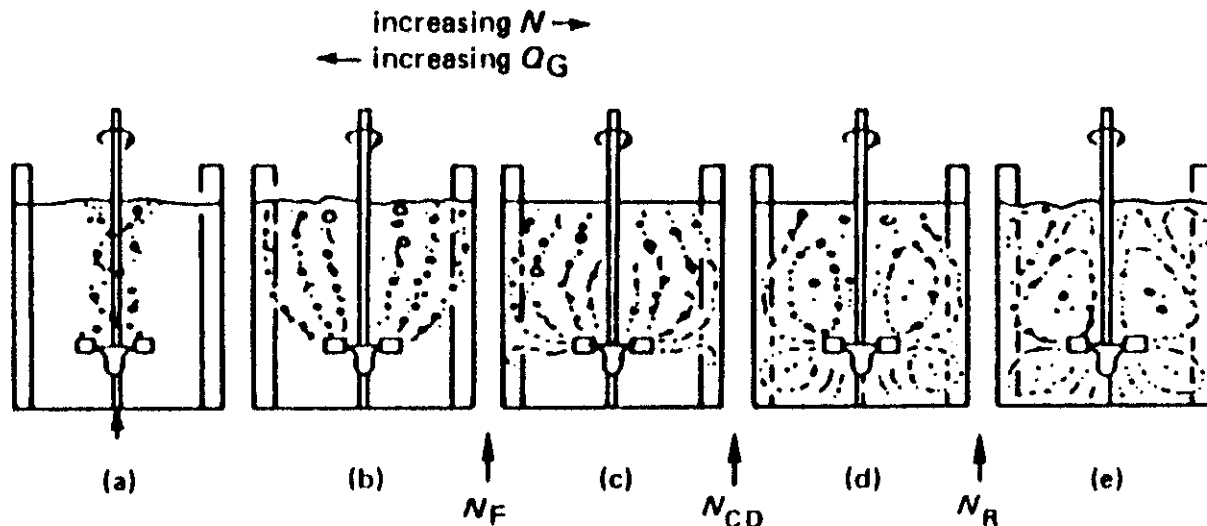
→ **Intenzifikace přestupu hmoty**



$$\dot{m} = \beta S \Delta \rho_A$$



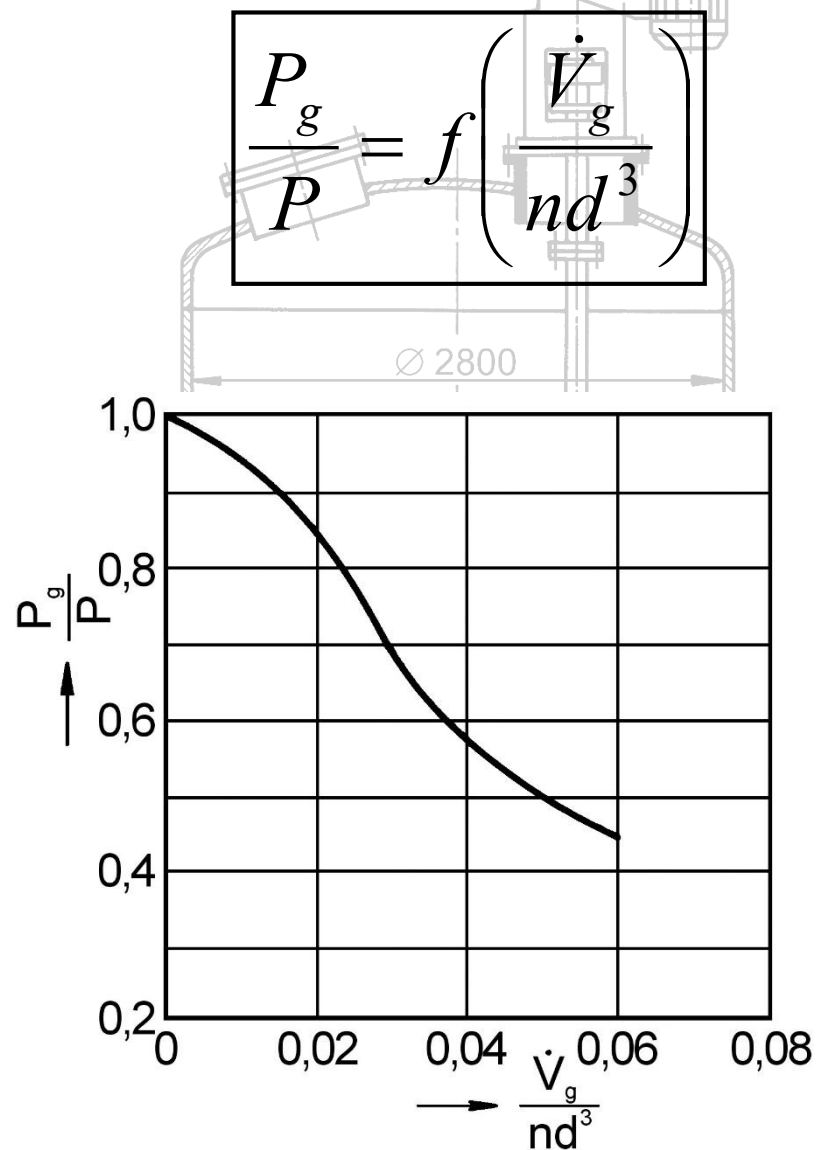
Míchání soustav kapalina – plyn



- **Zahlcení míchadla** $\frac{\dot{V}_g}{nd^3} \approx 16,6 Fr \left(\frac{d}{T} \right)^{3,4}$
- **Doporučené vzdušnění reaktorů** $\rightarrow VVM = 1 \div 1,5$
 (volumetric flow of gas per liquid volume per minute)
- **Velikost bublin dispergovaného plynu** $\rightarrow d_b \approx (P/V)^{-0,4}$

např. systém voda – vzduch: $d_b = 4,15 \frac{\sigma^{0,6} c_v^{0,5}}{\rho^{0,2} (P/V)^{0,4}} + 9 \cdot 10^{-4}$

Příkon míchadla při míchání soustav kapalina – plyn



Míchání soustav kapalina – kapalina

(nemísitelné kapaliny, příprava emulzí a disperzí)

Velikost částic dispergované fáze → rovnováha dynamických a povrchových sil

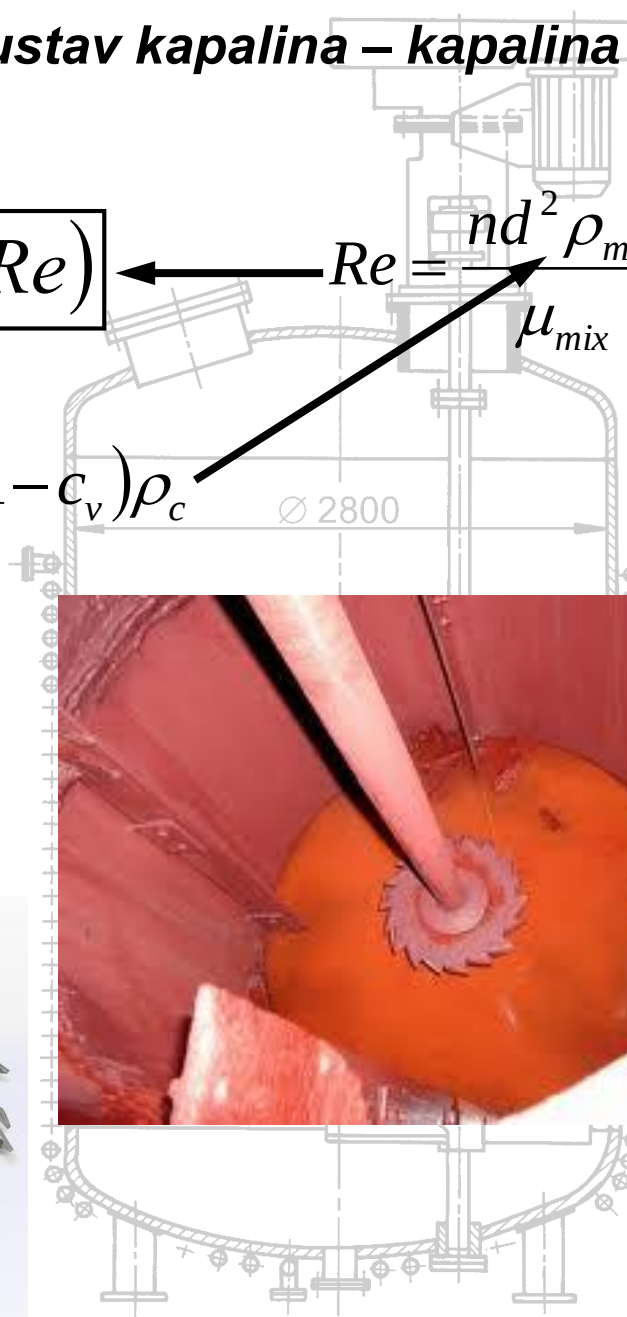
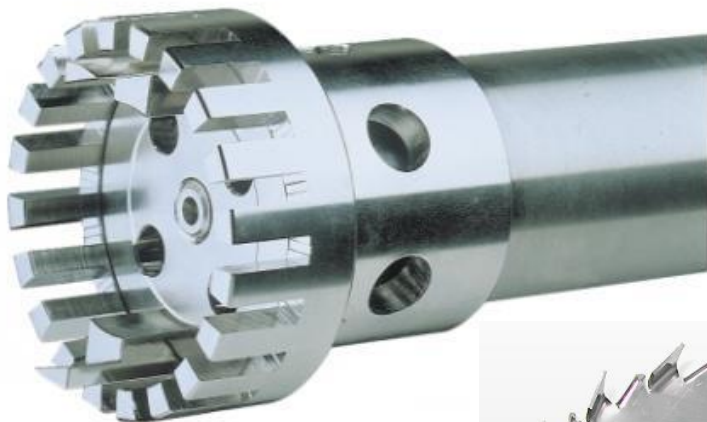


$$d_{32} \approx \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{3/5} \varepsilon^{-2/5}$$
$$We = \frac{n^2 d^3 \rho_c}{\sigma}$$
$$\frac{d_{32}}{d} \approx We^{-3/5}$$

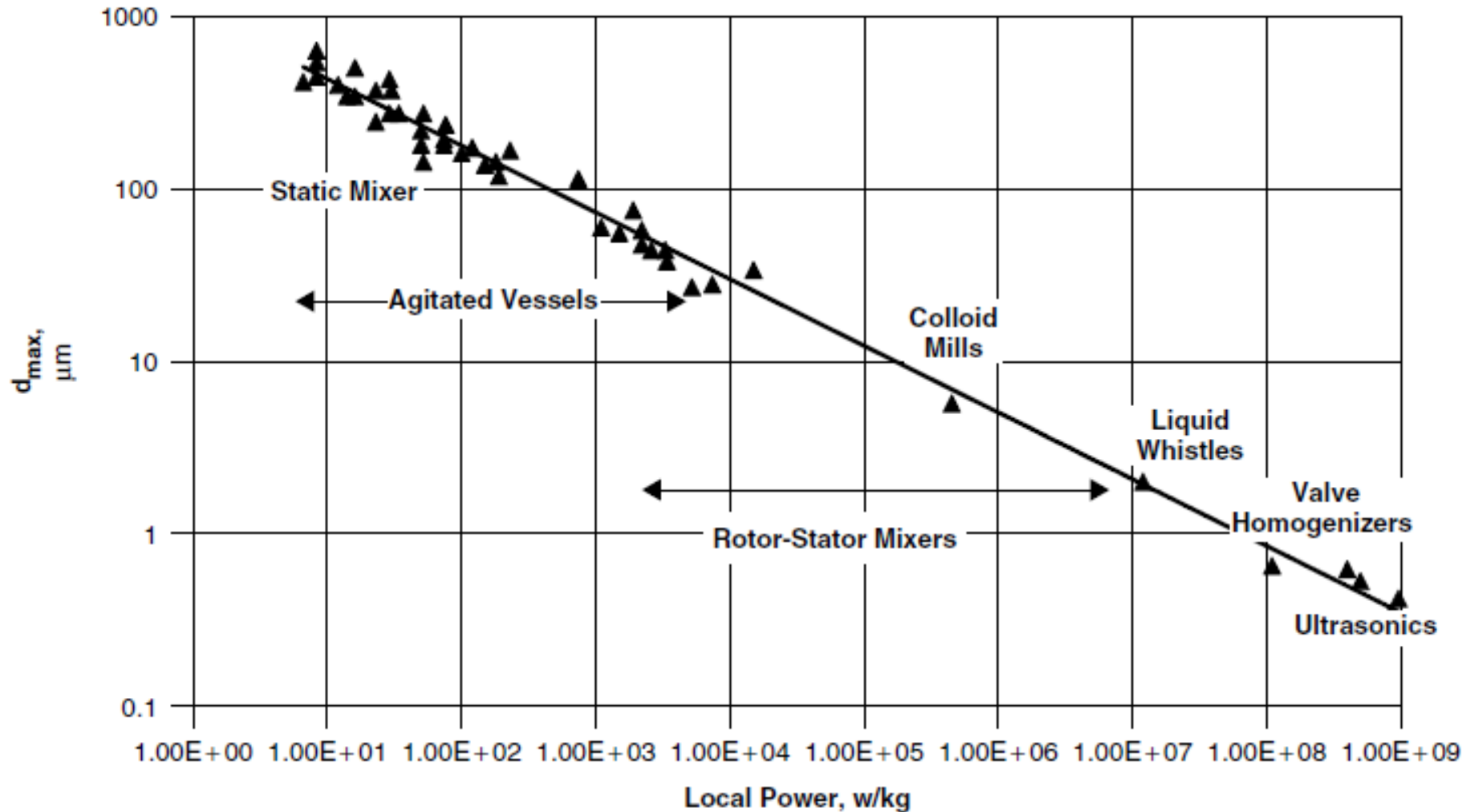
Příkon míchadla při míchání soustav kapalina – kapalina

$$Po = \frac{P}{\rho_{mix} n^3 d^5} \longrightarrow \boxed{Po = f(Re)} \longleftarrow Re = \frac{nd^2 \rho_{mix}}{\mu_{mix}}$$

$$\rho_{mix} = c_v \rho_d + (1 - c_v) \rho_c$$



Limits of dispergation technology and equipment



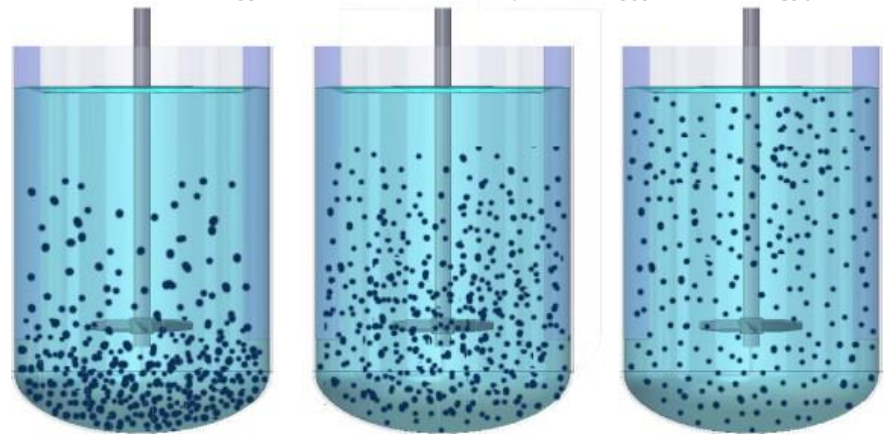
Míchání systémů kapalina – pevná fáze

Míchání suspenzí:

- suspenze částic těžších než kapalina
- suspenze částic lehčích než kapalina
- heterogenní suspenze
- jemnozrnné koncentrované suspenze

Projekční parametry:

- frekvence otáčení míchadla potřebná pro suspendaci částic
- frekvence otáčení míchadla potřebná pro vytvoření homogenní suspenze a cirkulaci míchané vsádky
- příkon potřebný pro suspendaci pevné fáze



Suspendace



Suspendace částic – průběh suspendace, vznos

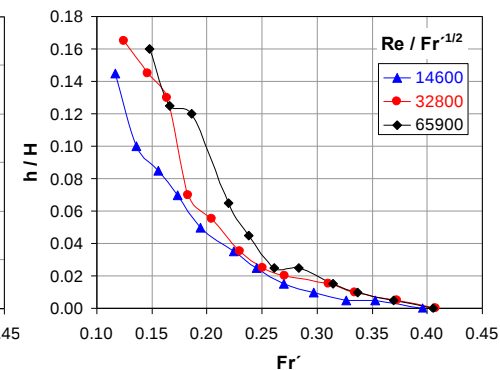
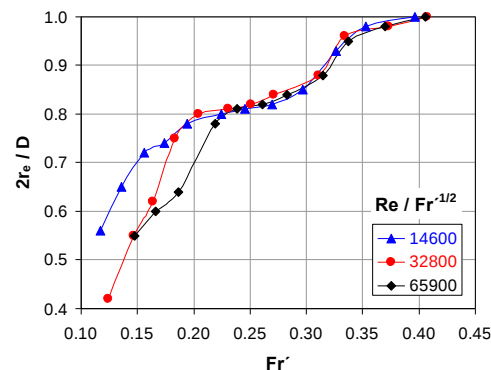
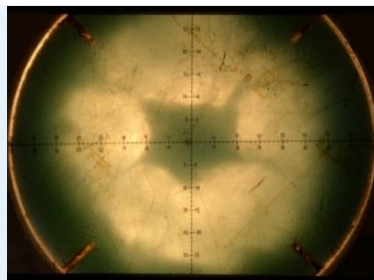
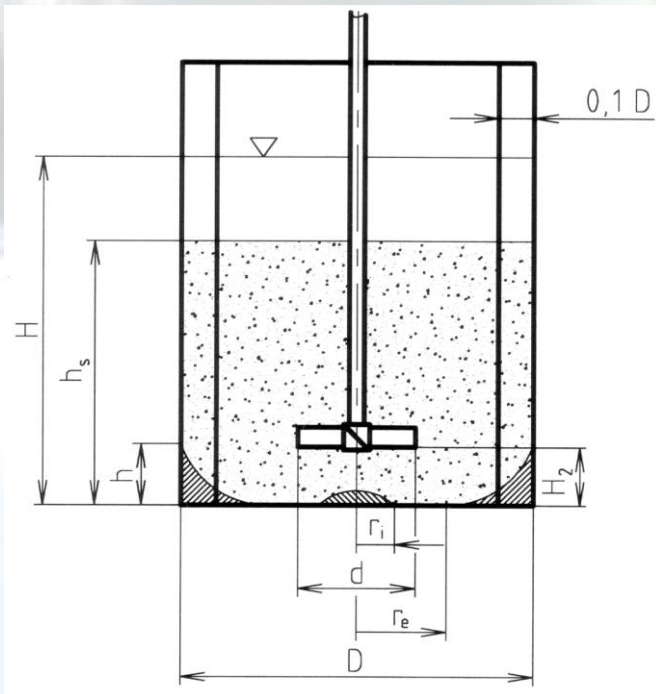
Bilance sil působících na částice:

$$V_p \Delta \rho \vec{g} = - \int_{S_p} \vec{n} p \, dS_p + \int_{S_p} \mu \vec{n} \cdot [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \, dS_p$$



⇒ Inspekční analýza

$$\frac{2r_i}{D}, \frac{2r_e}{D}, \frac{h}{H}, \frac{h_s}{H} = f \left(Fr', Re, \frac{d_p}{D}, c_v \right)$$



Suspendace

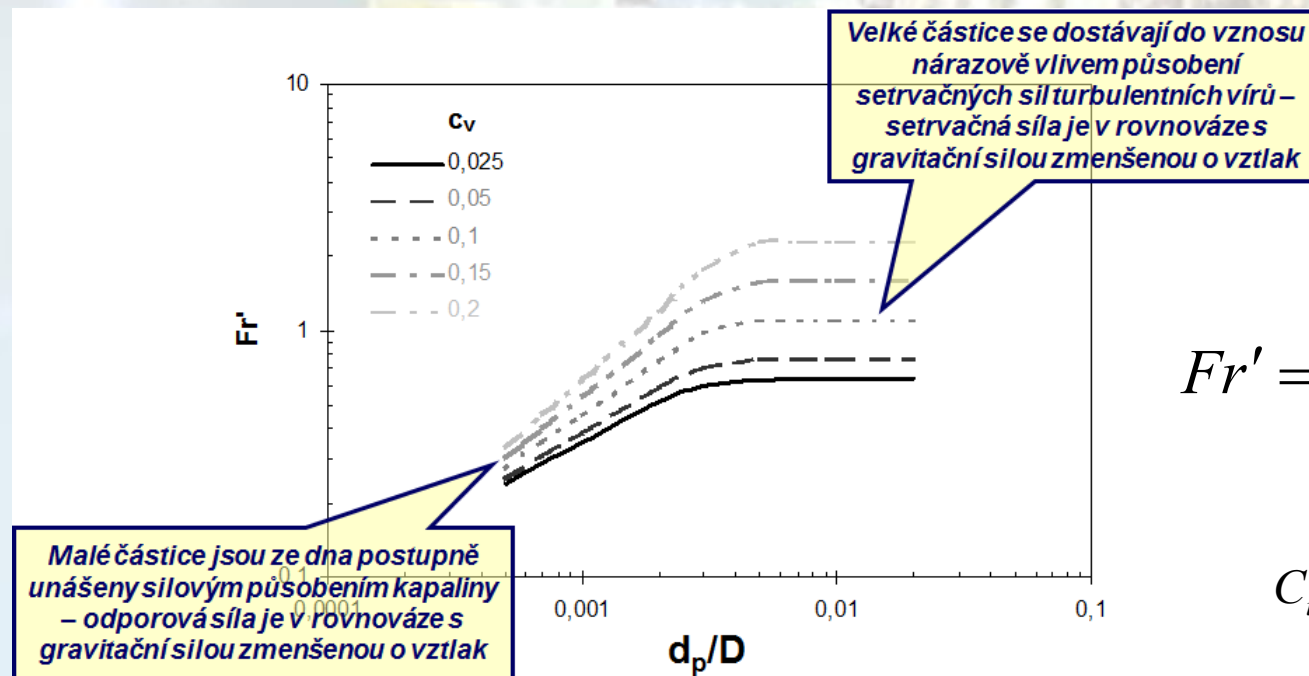


Vznos pevné fáze

Frekvence otáčení míchadla potřebná pro suspendaci částic

⇒ **Inspekční analýza**

$$Fr' = \frac{\rho n_{cr}^2 d}{g \Delta \rho} = f \left(Re, \frac{d_p}{D}, c_v \right)$$



$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_i c_v$$

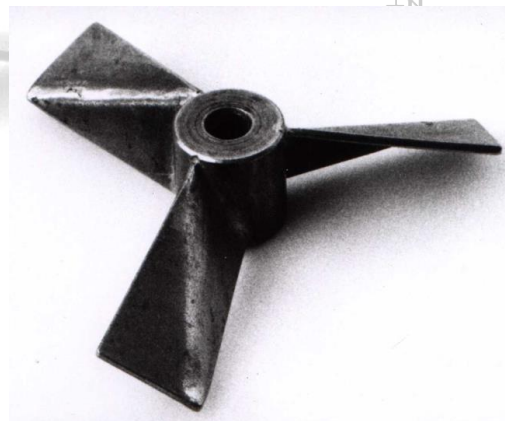
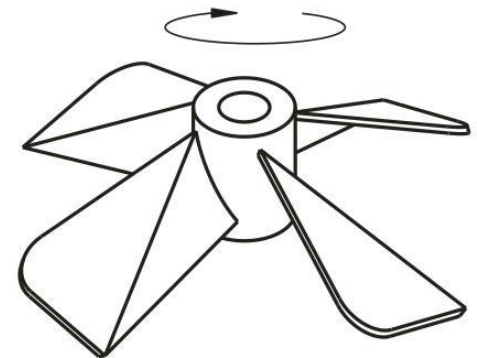
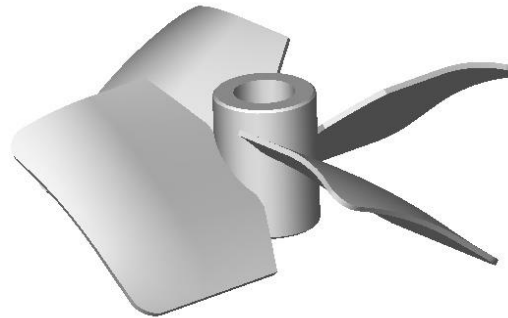
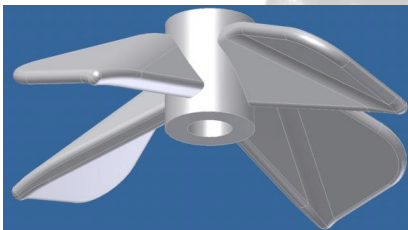
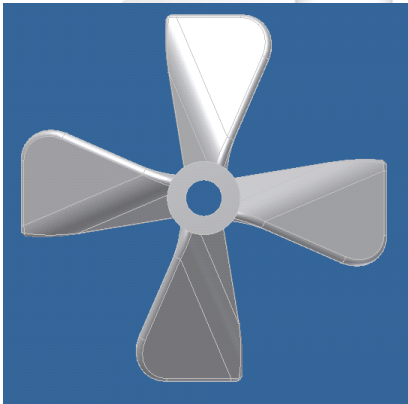
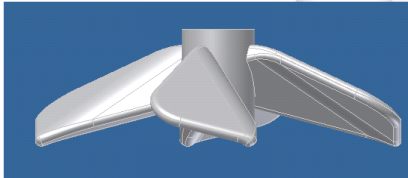
$$Fr' = C_i \left(\frac{d_p}{D} \right)^{\gamma_i}$$

$$C_i = A_i \exp(B_i c_v)$$

Příkon míchadla při míchání suspenzí

$$Po = \frac{P}{\rho_{su} n^3 d^5} \longrightarrow \boxed{Po = f(Re)} \longleftarrow Re = \frac{nd^2 \rho_{su}}{\mu}$$

$$\rho_{su} = c_v \rho_s + (1 - c_v) \rho$$



Míchání nenewtonských látek

Vznik míchané kaverny

- vzniká u viskoplastických látek a v plouživé a laminární oblasti u mocninových kapalin (pseudokaverna)

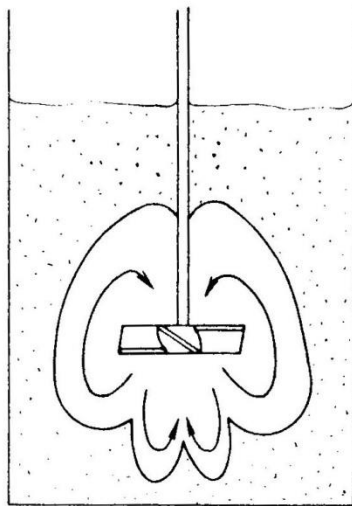


Fig. 2. Shape of the agitated nucleus in the mixing of a pseudoplastic suspension with indication of the direction of the circulating flow for an axial agitator pumping downward.

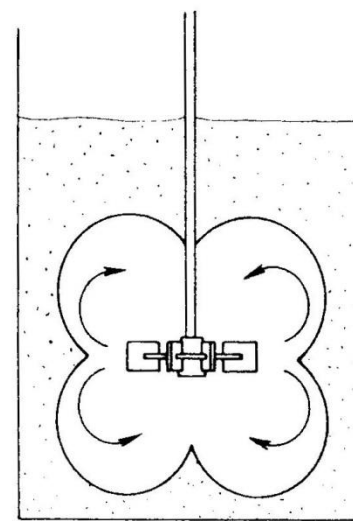


Fig. 1. Shape of the agitated nucleus in the mixing of a pseudoplastic suspension by a radial mixer with indication of the direction of the circulating flow.

- rozměry kaverny musí být takové, aby bylo dosaženo promíchávání v celém objemu nádoby (např. Wichterle, Wein)

$$Re_{mk} = \left(\frac{T}{ad} \right)^2$$

Proudění mocninové kapaliny

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

$$\vec{\tau} = 2K \left| \sqrt{2(\vec{\Delta} : \vec{\Delta})} \right|^{m-1} \vec{\Delta}$$

$$\vec{u}^* = \vec{u}^*(\vec{x}^*, m, Re_m)$$

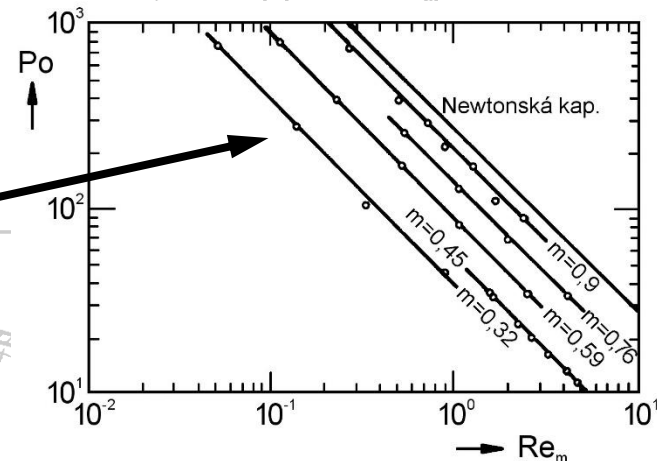
$$\tilde{p}^+ = \tilde{p}^+(\vec{x}^*, m, Re_m)$$

Příkon při míchání nenevtonských kapalin (mocninová)

$$P = \int_{S_m} \vec{u} \cdot \left[2K \left| \sqrt{2(\vec{\Delta} : \vec{\Delta})} \right|^{m-1} \vec{\Delta} - p \vec{\delta} \right] \cdot \vec{n} dS^*$$

$$Re_m = \frac{n^{2-m} d^2 \rho}{K}$$

$$\frac{P}{K n^{m+1} d^3} = f(m, Re_m) \Rightarrow Po = \frac{C(m)}{Re_m}$$



Metzner – Otto

$$Po = \frac{P}{\rho_{su} n^3 d^5}$$

$$Po = f(Re)$$

$$Re = \frac{nd^2 \rho}{\mu_{ef}}$$

$$\mu_{ef} = K \dot{\gamma}_{ef}^{m-1} = K(k \cdot n)^{m-1}$$

$$\dot{\gamma}_{ef} = k \cdot n$$

Typ míchadla	Číslo normy	T/d	H ₂ /d	k	Poznámka
kotvové	CVS 69 1014	1,11	0,05	15,8	
šroubové s usměrňovací m válcem	CVS 69 1028	2,00	0,025	16,8	
šroubové excentrické		2,00	0,025	15,5	c/D = 0,02
pásové	CVS 69 1029	1,05	0,0025	36,7	
šestilopátkové	CVS 69 1020	4	1	9,0	4 narážky
turbínové s dělicím kotoučem	CVS 69 1021	3,3	1	9,9	4 narážky
třílopatkové	CVS 69 1025.3	4	1	9	4 narážky
zubové	CVS 69 1038.1.2	3,7	1	11,5	4 narážky

Návrh a konstrukce míchacích zařízení s rotačním míchadlem

Postup při stanovování hlavních parametrů míchacího zařízení

- Pro zadaný objem kapaliny určíme hlavní rozměry nádoby, obvykle volíme výšku hladiny rovnou průměru nádoby, tj. $H = T$.
- Podle fyzikálních vlastností kapaliny (nejdůležitější je viskozita) a účelu míchání zvolíme vhodný typ míchadla.
- Průměr zvoleného míchadla určíme tak, aby poměr průměru nádoby k průměru míchadla, tj. T/d , byl pro daný typ míchadla v doporučených.
- Frekvence otáčení míchadla závisí na účelu míchání, popř. na dalších technologických požadavcích. Tak např. míchadlo pro suspendaci pevné fáze musí mít frekvenci otáčení větší než je frekvence otáčení, dostačující k dosažení stavu vznosu. Někdy je maximální dovolená hodnota frekvence otáčení míchadla omezena technologickými podmínkami, např. požadavkem, aby nedocházelo k poškození mikroorganismů při fermentaci, k rozbíjení krystalů při krystalizaci apod.

V některých případech mohou pro orientační určení frekvence otáčení posloužit doporučené hodnoty **specifického příkonu** ($\varepsilon = P/V$), který se např. u standardních míchacích zařízení s **rychloběžnými míchadly** pohybuje v rozmezí od 150 do 590 W·m⁻³. U zařízení s **pomaloběžnými míchadly** se hodnota P/V pohybuje v rozsahu od 600 do 1500 W·m⁻³.

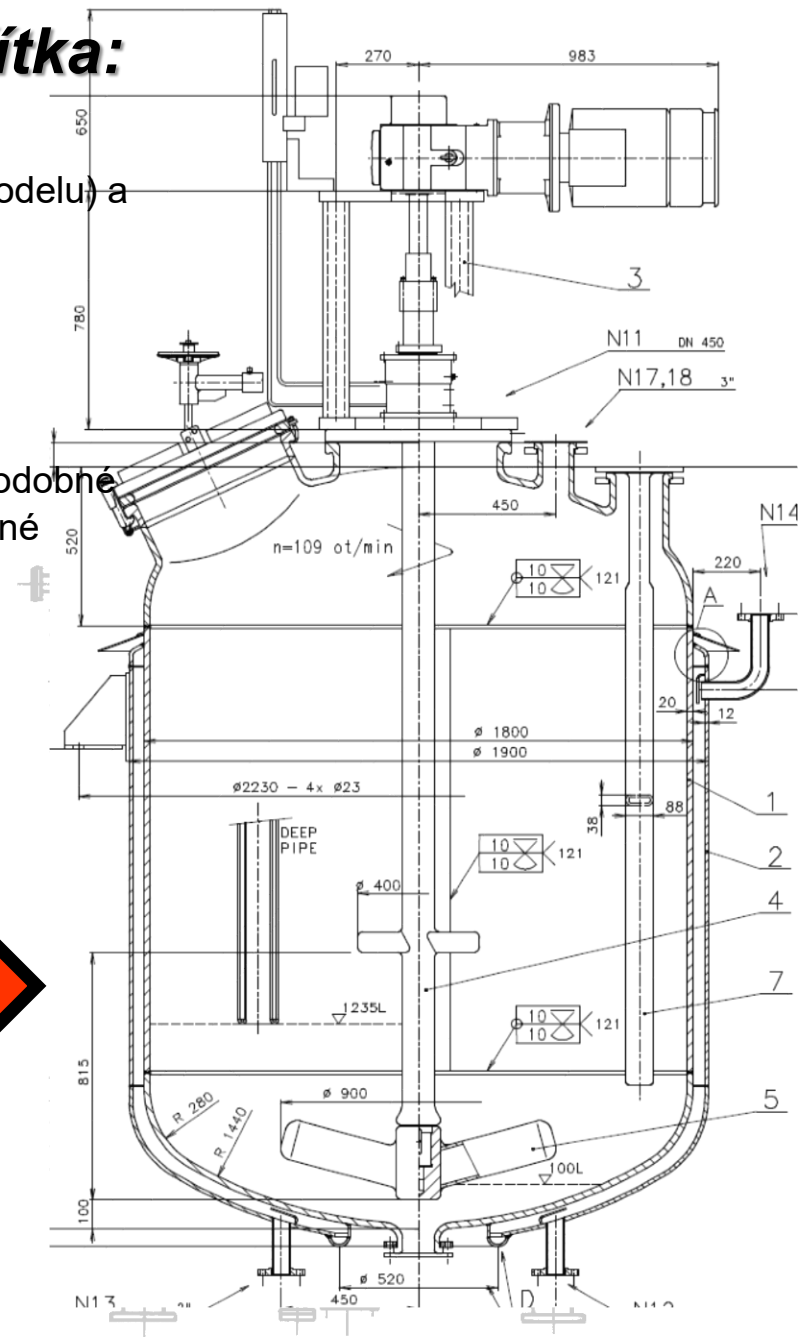
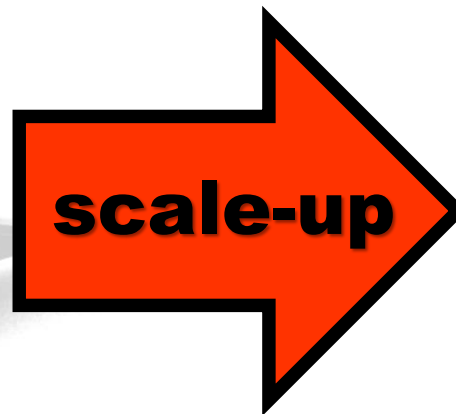
Podmínky pro zvětšování měřítka:

• Geometrická podobnost

- tvar, rozměry, konfigurace modelového zařízení (modelu) a provozního zařízení (díla) jsou si podobné
- geometrickou podobnost lze vyjádřit poměrem nejdůležitějších geometrických parametrů zařízení

• Podobnost fyzikálních jevů

- fyzikální děje probíhající na modelu a díle jsou si podobné
- fyzikální děje jsou si podobné, pokud jsou si podobné všechny veličiny, které daný jev charakterizují

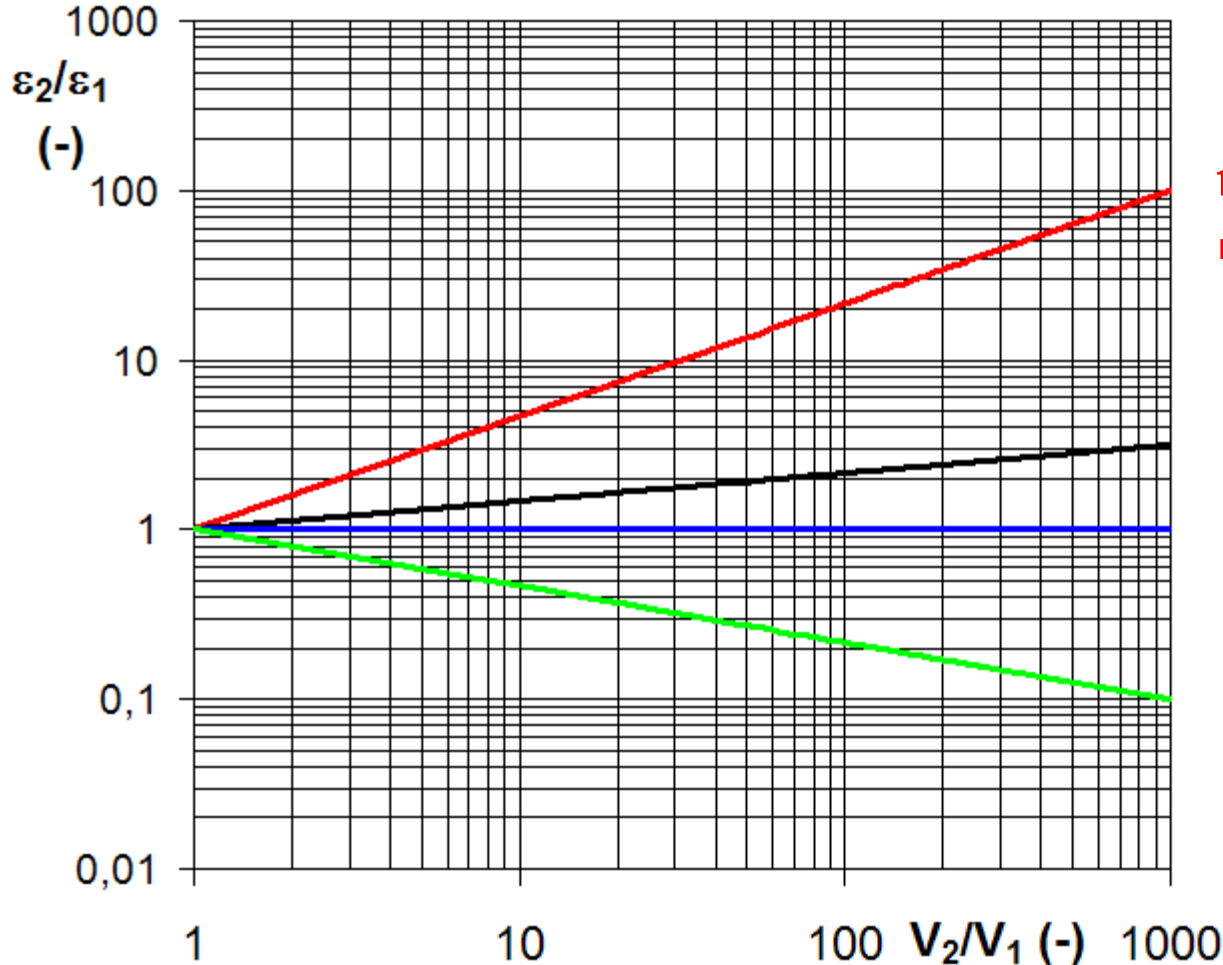
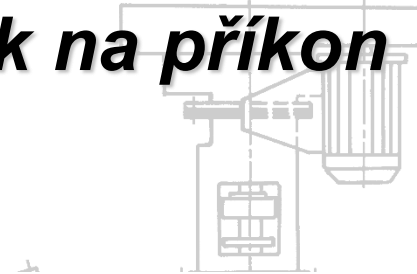
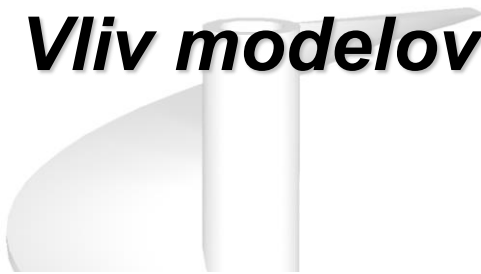


Modelovací kritérium pro výpočet otáček míchadla v mechanicky míchaných zařízeních

$$n \cdot d^{\kappa} = \text{konst.}$$

homogenizace	$n = \text{konst.}$	$n \cdot d^0 = \text{konst.}$
přenos tepla	$\alpha = \text{konst.}$	$n \cdot d^{2/3} = \text{konst.}$
suspendace	$Fr' = \text{konst.}$	$n \cdot d^{1/2} = \text{konst.}$
	$\div$	$\div$
	$n \cdot d = \text{konst.}$	$n \cdot d^1 = \text{konst.}$
dispergace	$d_K = \text{konst.}$	$n \cdot d^{2/3} = \text{konst.}$
přenos hmoty v g – l systému ^{*2}	$k_L a = \text{konst.}$	$n \cdot d^{2/3} = \text{konst.}$
	¹ Turbulentní oblast. ² pro dané množství plynu	
Většina procesů		
měrný příkon	$P/V = \text{konst.}$	$n \cdot d^{2/3} = \text{konst.}$

Vliv modelovacích podmínek na příkon míchadla



$\kappa = 0$ ($n = \text{konst.}$)

např. konstantní doba homogenizace

$\kappa = 1/2$ ($Fr' = \text{konst.}$)

např. středový vír, suspendace

$\kappa = 2/3$ ($\epsilon = P/V = \text{konst.}$)

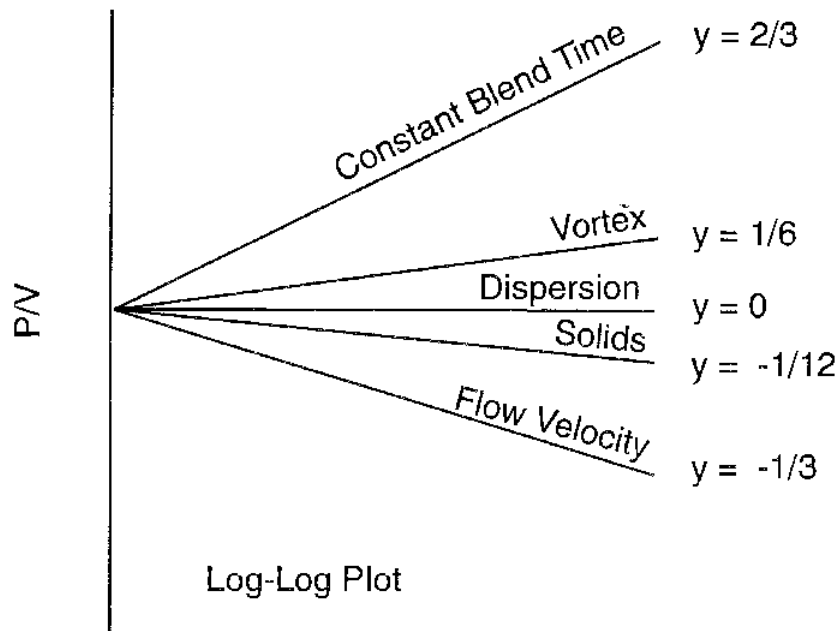
např. dispergace, většina procesů

$\kappa = 1$ ($u_{\text{tip}} \sim n \cdot d = \text{konst.}$)

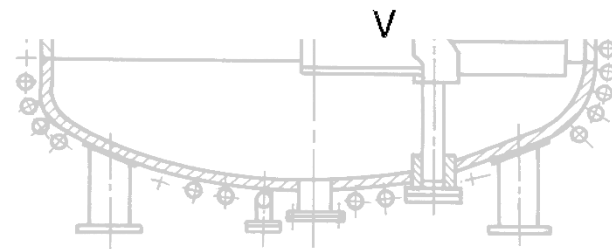
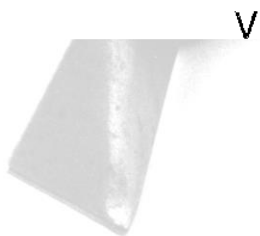
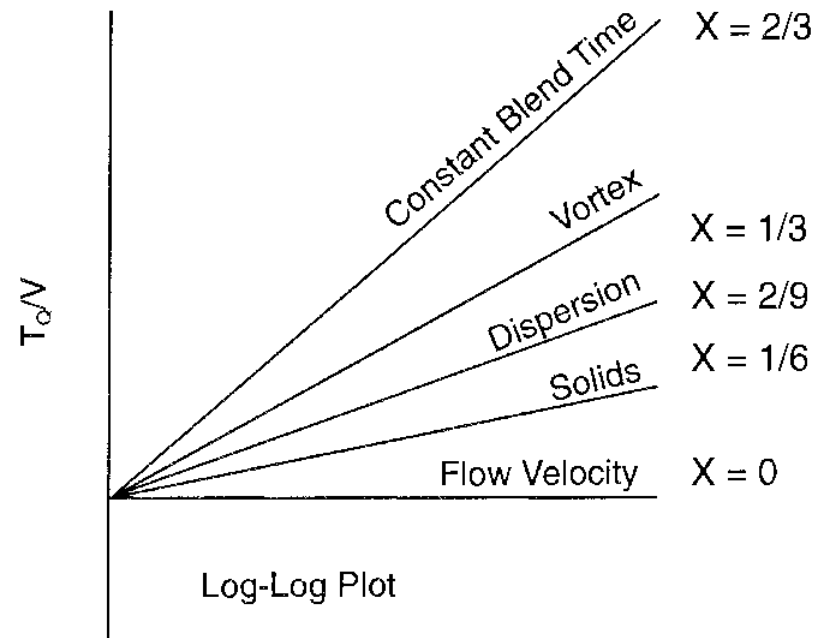
např. bioreaktory, suspendace

Vliv modelovacích podmínek na příkon a krouticí moment na hřídeli míchadla

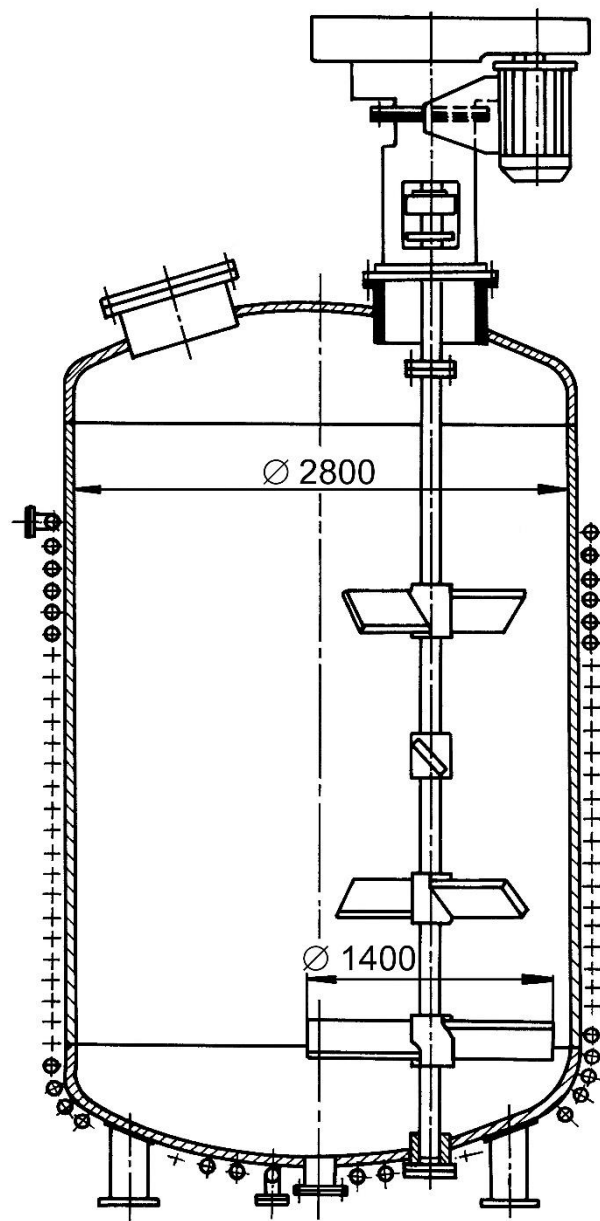
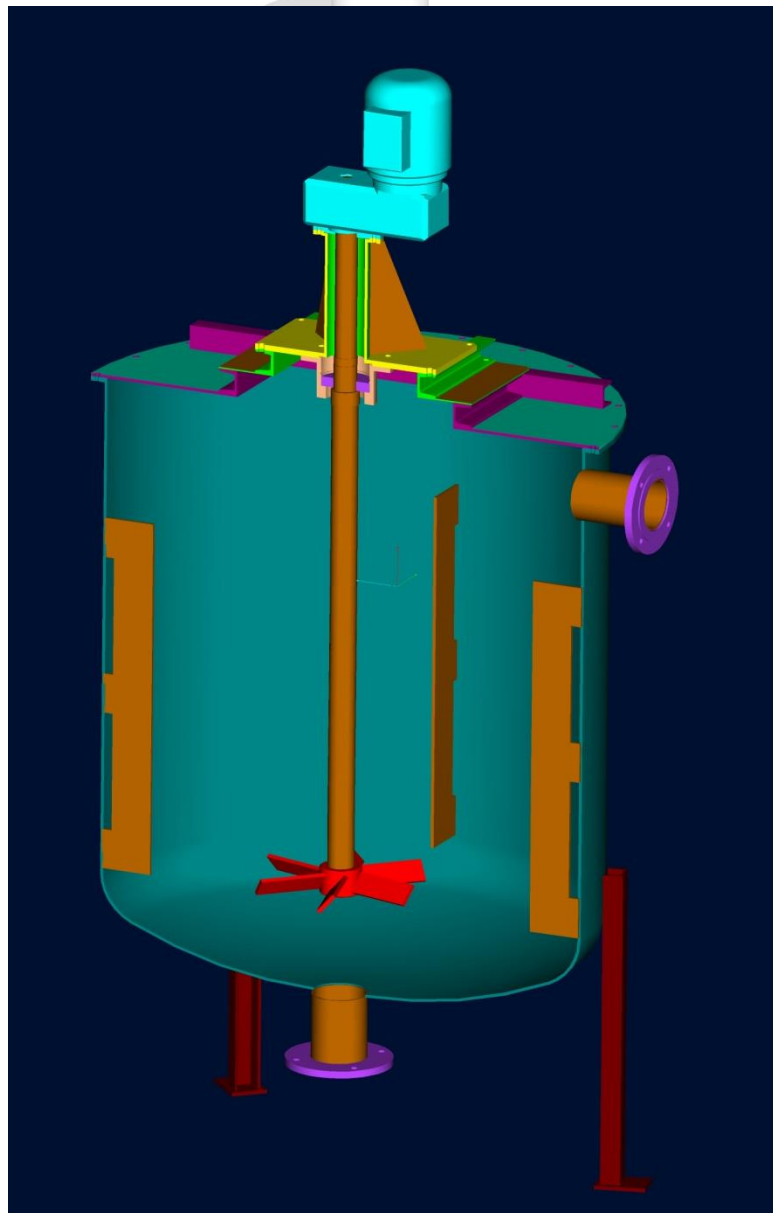
$$P/V = \text{Constant } V^y$$



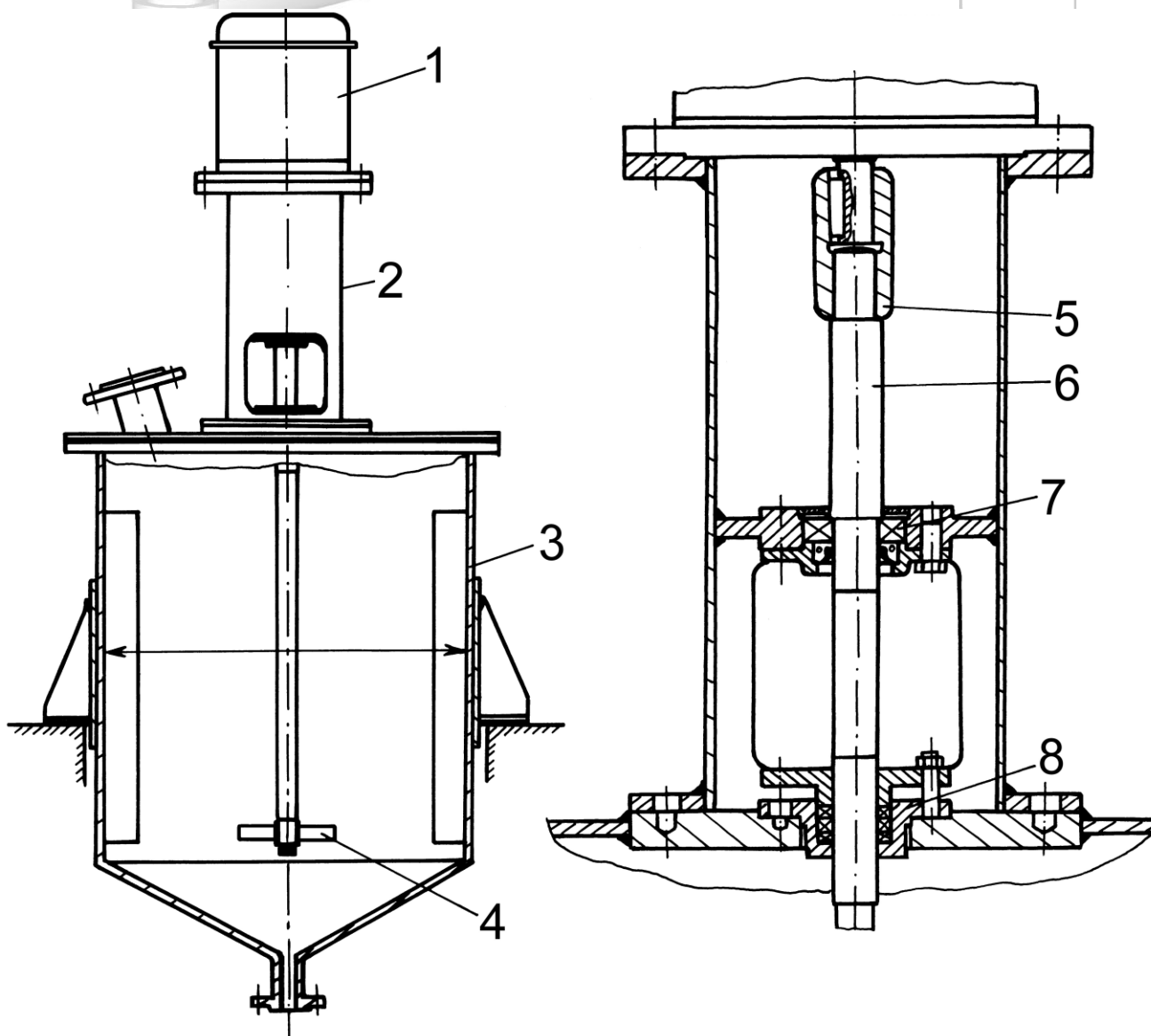
$$T_Q/V = K_T V^X$$



Provedení míchacích zařízení s rotačním míchadlem

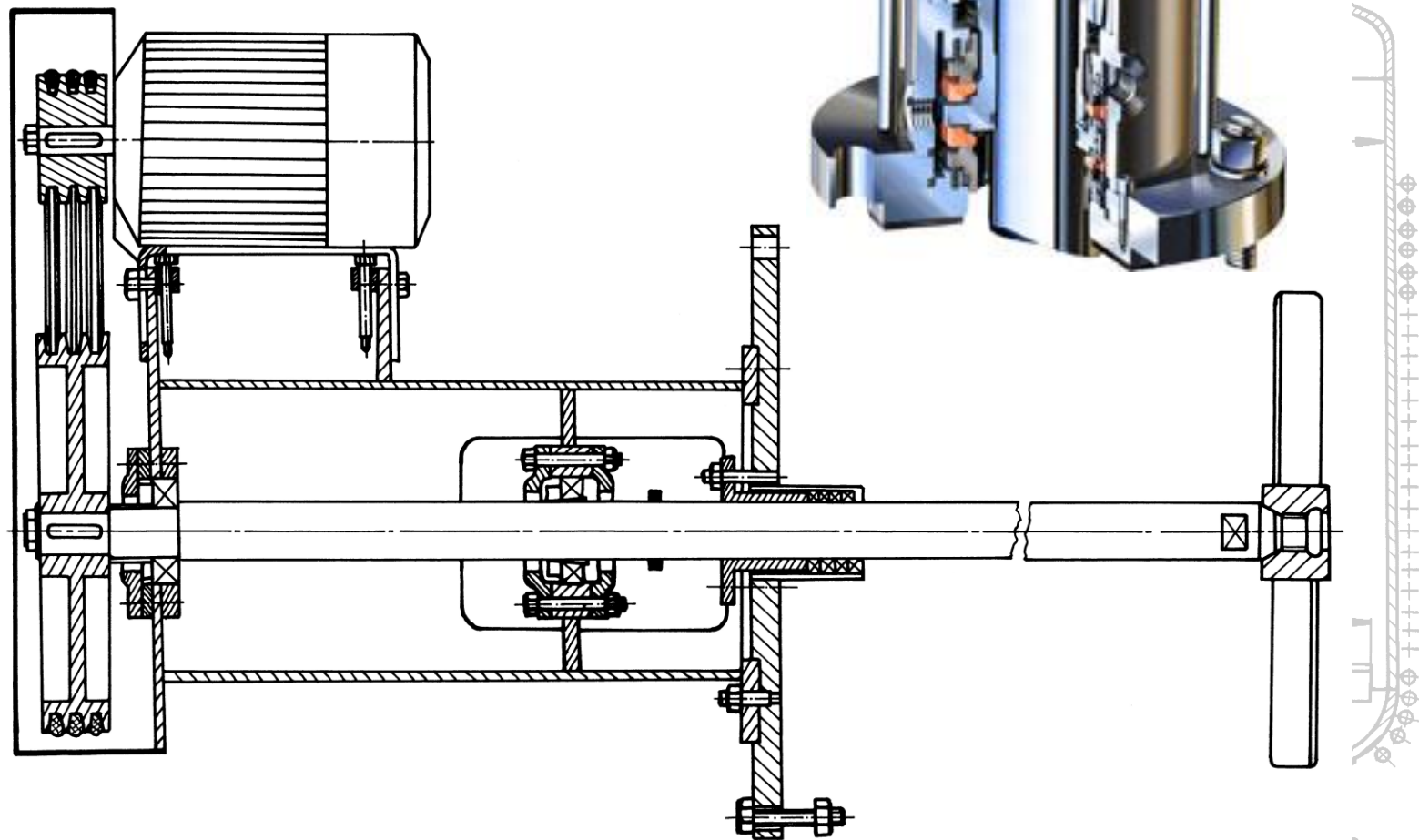


Míchací zařízení s přímým pohonem elektromotorem



*1 – elektromotor, 2 – ložiskové těleso hřídele, 3 – nádoba, 4 – míchadlo,
5 – pevná spojka, 6 – hřídel, 7 – ložisko, 8 - ucpávka*

Horizontální míchací ústrojí s převodem klínovými řemeny



Opotřebení rotačních míchadel



Vliv materiálu lopatek míchadla na jejich erozivní opotřebení



Al 99,8 (HV 34)



Al 99,5 (HV 40)



CuZn37 (HV 74)



C10E (HV 112)



X5CrNi18-10 (HV 194)

Ukázka lopatek míchadla vyrobených z jednotlivých testovaných materiálů po 20ti hodinovém opotřebení.