

HYDROMECHANICKÉ PROCESY

Doprava tekutin *Čerpadla a kompresory* (přednáška)

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

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

ČERPADLA

3

Základy teorie čerpadel

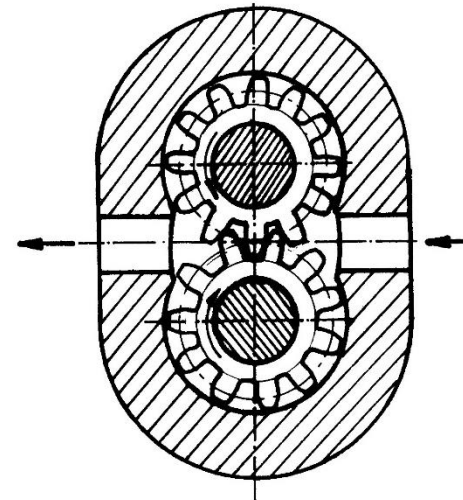
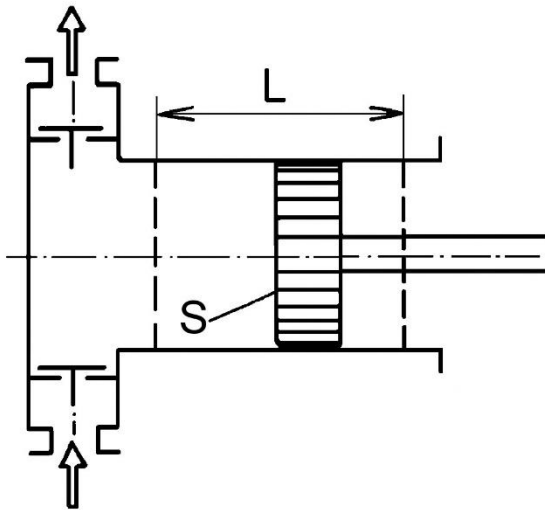
Základní rozdělení čerpadel

Hydrostatická čerpadla:

- vratný posuvný pohyb (pístová, plunžrová)
- rotační pohyb (zubová, lamelová)

Pístové čerpadlo

Zubové čerpadlo



Hydrodynamická čerpadla: • radiální oběžné kolo (odstředivá)

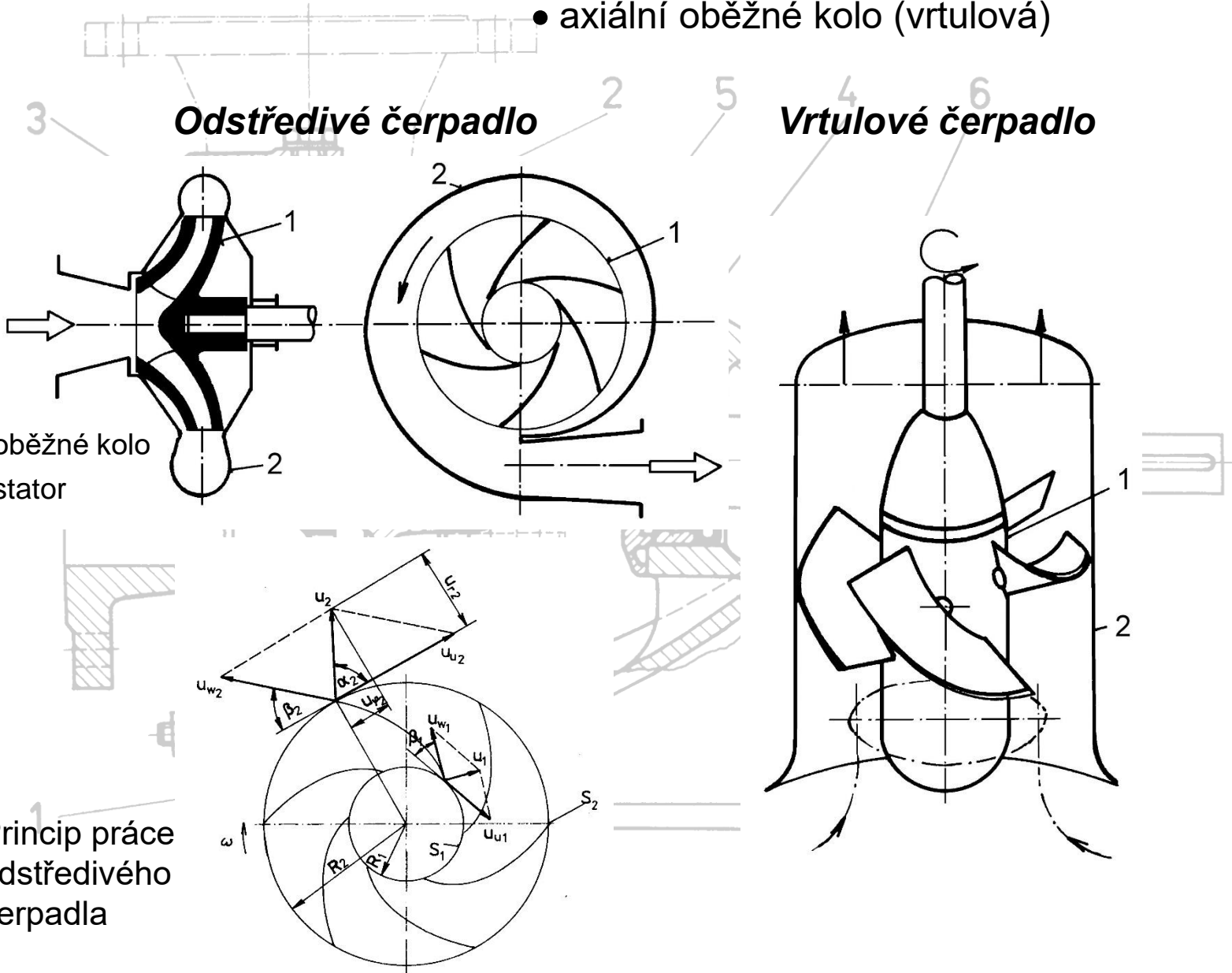
- axiální oběžné kolo (vrtulová)

Odstředivé čerpadlo

Vrtulové čerpadlo

1 – oběžné kolo
2 – stator

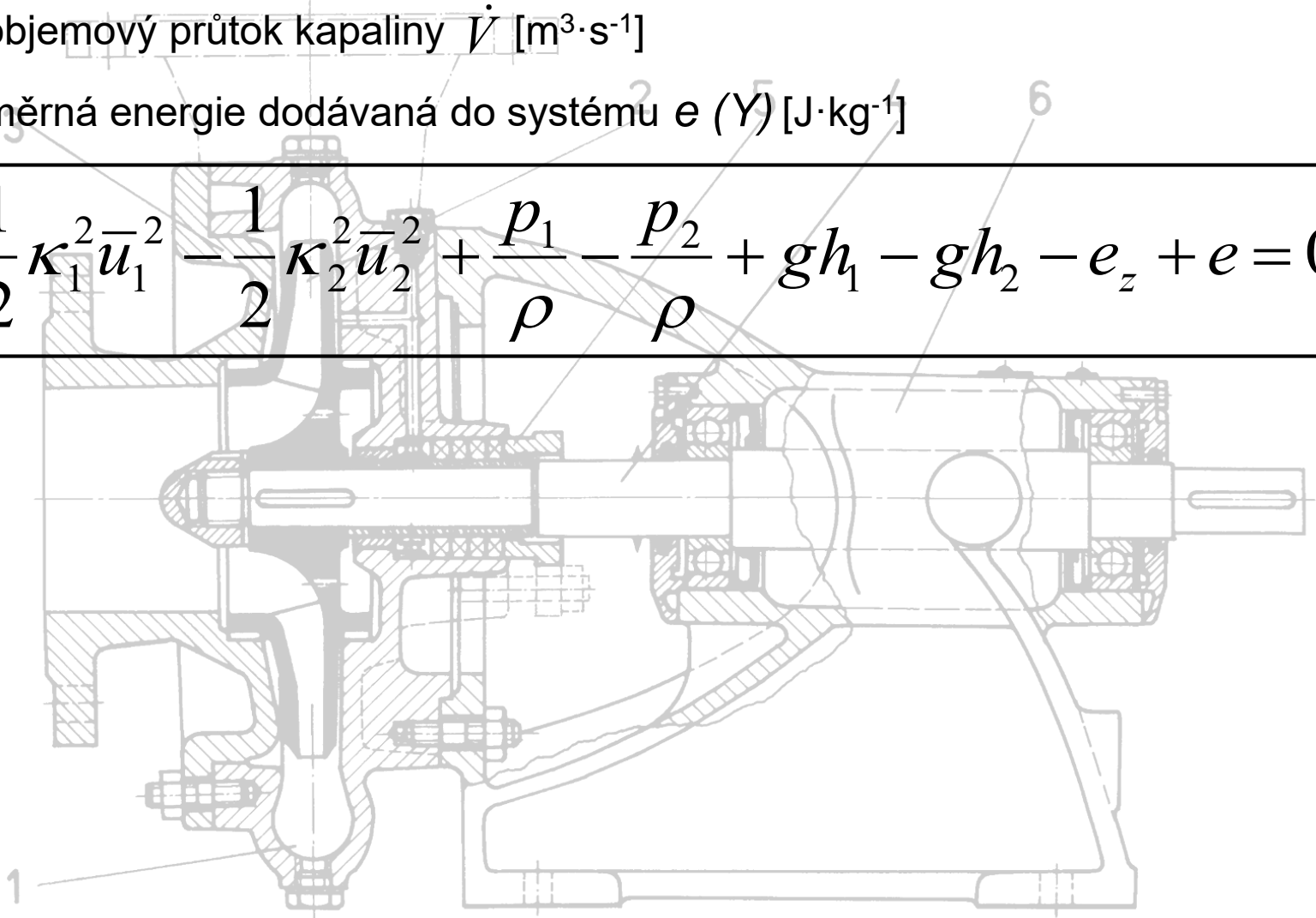
Princip práce
odstředivého
čerpadla



Základní parametry čerpadel

- objemový průtok kapaliny \dot{V} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- měrná energie dodávaná do systému e (Y) [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$\frac{1}{2} \kappa_1^2 \bar{u}_1^2 - \frac{1}{2} \kappa_2^2 \bar{u}_2^2 + \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} + gh_1 - gh_2 - e_z + e = 0$$



Charakteristika čerpadel

Rovnice kontinuity pro nestlačitelné kapaliny

$$\rho \left(\frac{d\vec{u}}{dt} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{f}$$

Zavedení bezrozměrných proměnných: $\vec{x}^* = \frac{\vec{x}}{D}$, $\nabla^* = \nabla D$, $S^* = \frac{S}{D^2}$, $\vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{nD}$, $p^* = \frac{p}{\rho Y}$

$$\rho n^2 D \vec{u}^* \cdot \nabla^* \vec{u}^* = -\frac{\rho Y}{D} \nabla^* p^* + \mu \frac{n}{D} \nabla^{*2} \vec{u}^* \cdot \frac{1}{\rho n^2 D}$$

$$\vec{u}^* \cdot \nabla^* \vec{u}^* = \frac{Y}{n^2 D^2} \nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \vec{u}^*$$

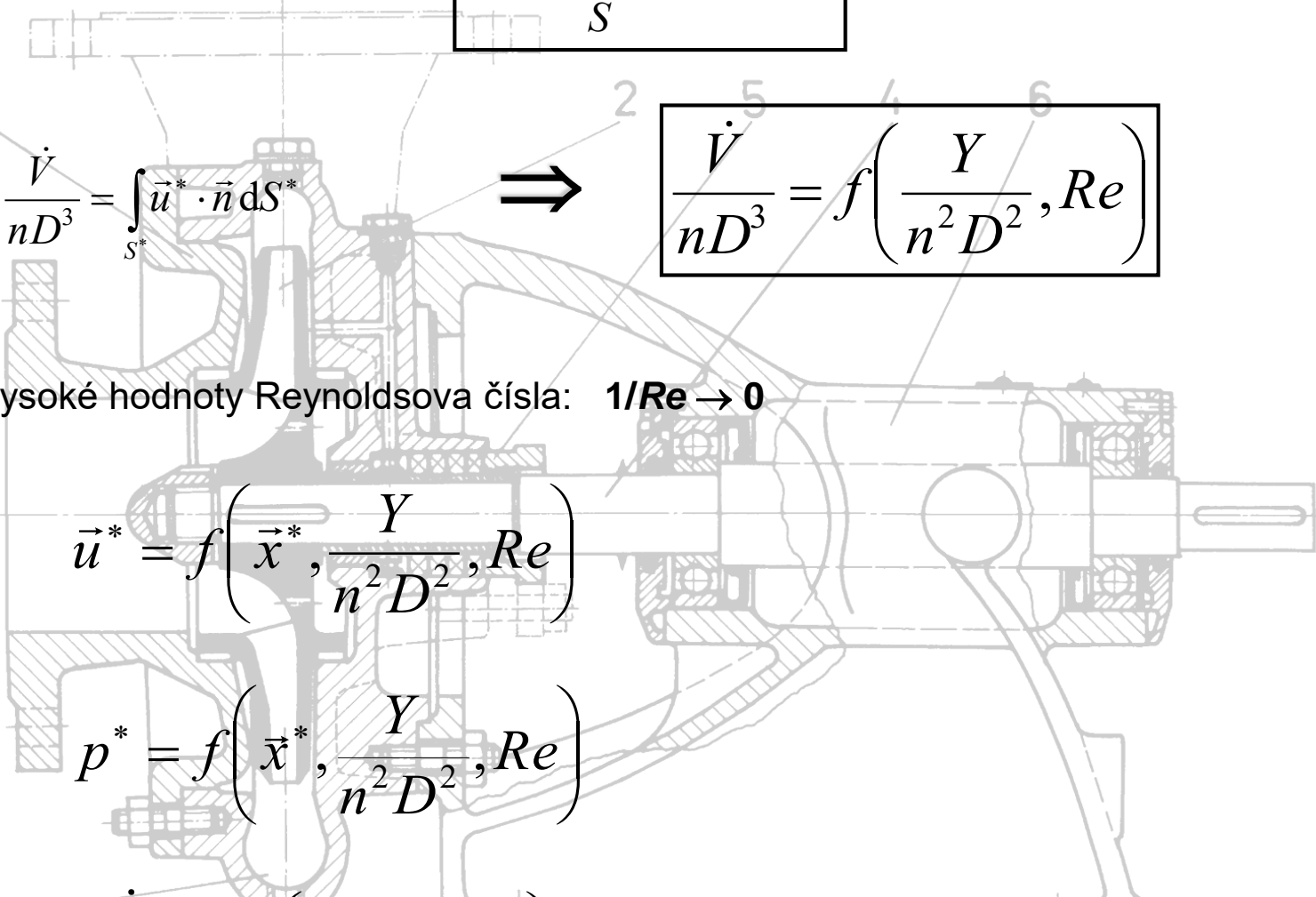


$$\vec{u}^* = f \left(\vec{x}^*, \frac{Y}{n^2 D^2}, Re \right)$$

$$p^* = f \left(\vec{x}^*, \frac{Y}{n^2 D^2}, Re \right)$$

Objemový průtok

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



3 $\frac{\dot{V}}{nD^3} = \int_{S^*} \vec{u}^* \cdot \vec{n} dS^*$ \Rightarrow $\frac{\dot{V}}{nD^3} = f\left(\frac{Y}{n^2 D^2}, Re\right)$

Pro vysoké hodnoty Reynoldsova čísla: $1/Re \rightarrow 0$

$$\vec{u}^* = f\left(\vec{x}^*, \frac{Y}{n^2 D^2}, Re\right)$$

$$p^* = f\left(\vec{x}^*, \frac{Y}{n^2 D^2}, Re\right)$$

1 $\frac{\dot{V}}{nD^3} = f\left(\frac{Y}{n^2 D^2}, Re\right) \Rightarrow Y = f_2(\dot{V})$

Pro konstantní otáčky a průtok

Příkon čerpadel

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

$$\vec{\sigma} = -p\vec{\delta} + 2\mu\vec{\Delta} \quad \vec{\Delta} = \frac{1}{2} \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right]$$

Zavedení bezrozměrných proměnných: $\vec{x}^* = \frac{\vec{x}}{D}$, $\nabla^* = \nabla D$, $S^* = \frac{S}{D^2}$, $\vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{nD}$, $p^* = \frac{p}{\rho Y}$

Po úpravě a vydělení rovnice $\rho n^2 D^2$

$$\frac{P}{\rho n^3 D^5} = \int_{S_p^*} \vec{u}^* \cdot \left\{ -\frac{Y}{n^2 D^2} p^* \vec{\delta} + \frac{\mu}{n D^2 \rho} \left[\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T \right] \right\} \cdot \vec{n} dS^*$$

Pro vysoké hodnoty Reynoldsova čísla: $1/Re \rightarrow 0$

$$\frac{P}{\rho n^3 D^5} = f \left(\frac{Y}{n^2 D^2}, \frac{n D^2 \rho}{\mu} \right)$$

$$Po = f_2 \left(\frac{Y}{n^2 D^2} \right) = f_3 \left(\frac{\dot{V}}{n D^3} \right)$$

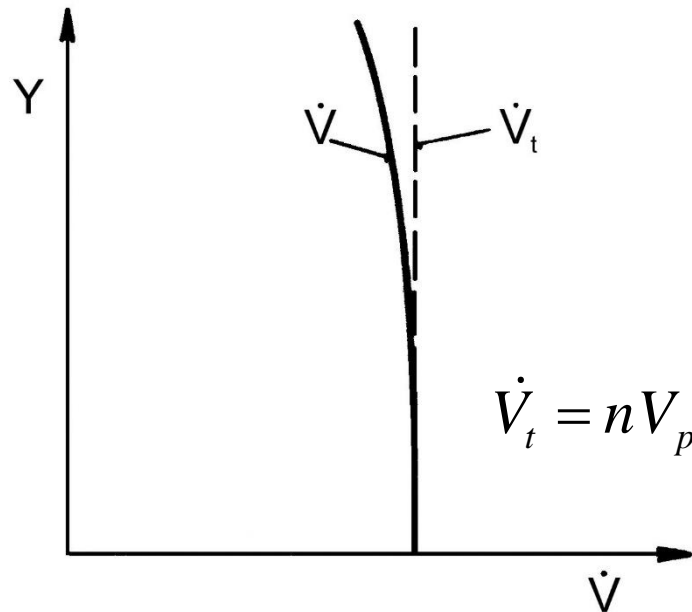
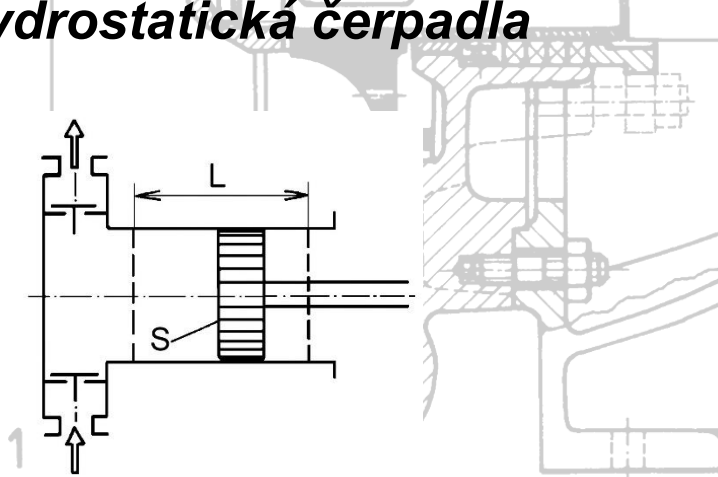
Základní parametry čerpadel

- objemový průtok kapaliny \dot{V} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- měrná energie dodávaná do systému e (Y) [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$\frac{1}{2} \kappa_1^2 \bar{u}_1^2 - \frac{1}{2} \kappa_2^2 \bar{u}_2^2 + \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} + gh_1 - gh_2 - e_z + e = 0$$

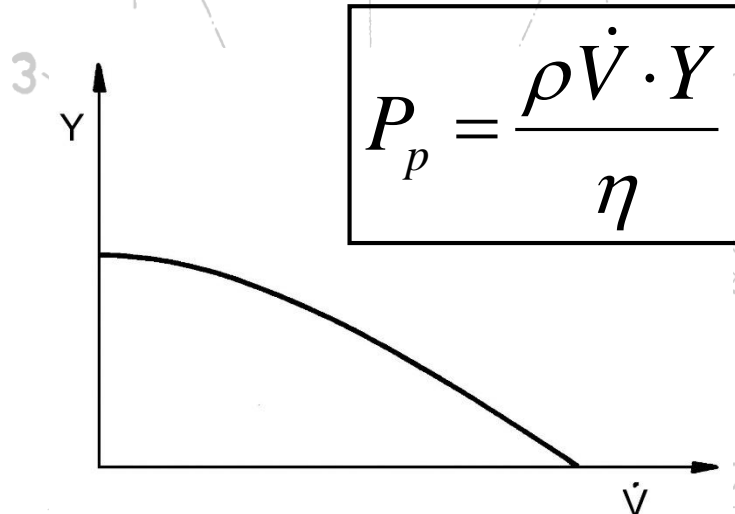
Charakteristika a příkon čerpadel

Hydrostatická čerpadla



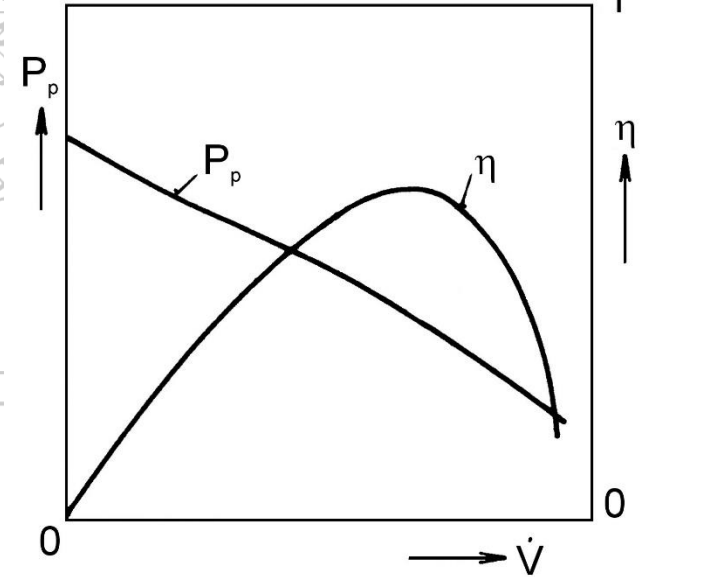
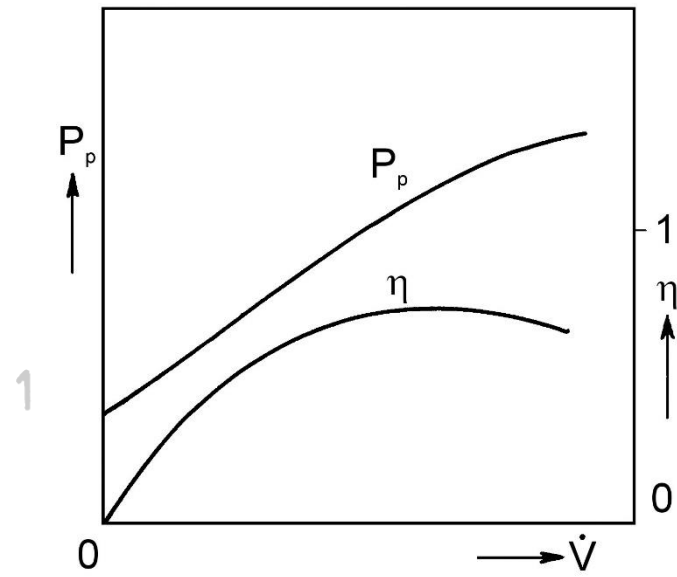
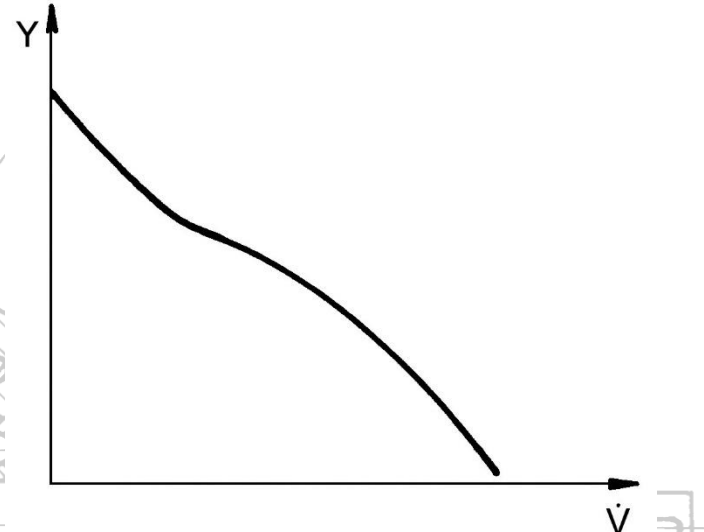
Hydrodynamická čerpadla

Odstředivé čerpadlo



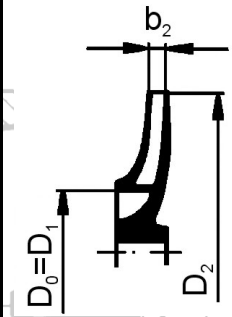
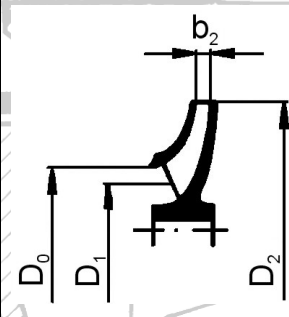
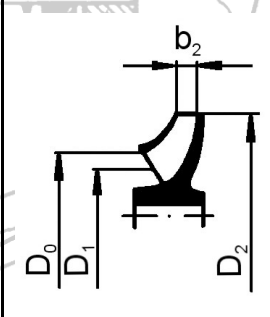
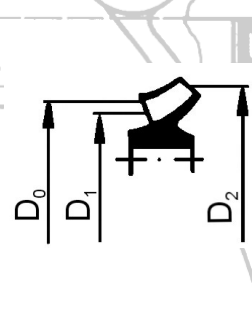
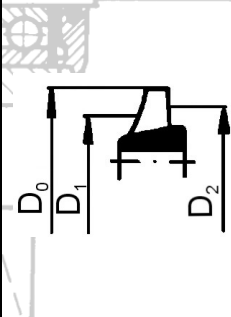
$$P_p = \frac{\rho \dot{V} \cdot Y}{\eta}$$

Axiální vrtulové čerpadlo



Měrné otáčky hydrodynamických čerpadel

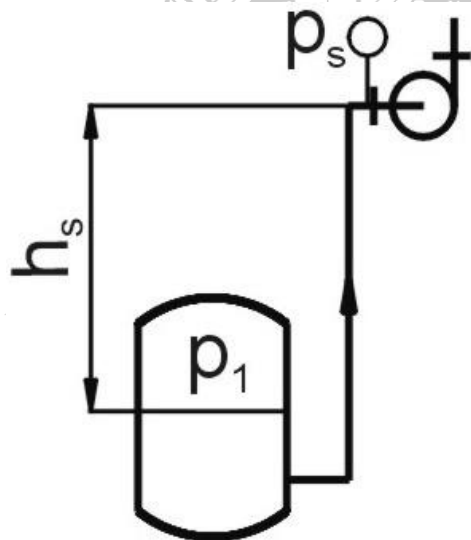
$$\left(\frac{\dot{V}_n}{nD_3} \right)^{1/2} \left(\frac{Y_n}{n^2 D^2} \right)^{-3/4} = \frac{n \dot{V}_n^{1/2}}{Y_n^{3/4}} = n_b$$

	Radiální čerpadla			Diagonální čerpadla	Axiální čerpadla
	pomaluběžná	normální	rychluběžná		
n_b D_2/D_0	0,03 až 0,06 ~ 2,5	0,06 až 0,12 ~ 2	0,12 až 0,25 ~ 1,6 až 1,4	0,25 až 0,5 ~ 1,2 až 1,1	0,5 až 1,2 ~ 0,8 až 0,6
					

Měrné otáčky jsou měřítkem rychloběžnosti čerpadla a vyjadřují frekvenci otáčení, kterou by mělo čerpadlo geometricky podobné danému, kdyby v bodě **maximální účinnosti** při **měrné energii** $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ dosahovalo **průtoku** $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Minimální přípustný tlak v sacím hrdle čerpadla

Při návrhu sacího potrubí je velmi důležitou veličinou tlak v sacím hrdle čerpadla. Hodnota tohoto tlaku musí zaručovat, že tlak v žádném místě čerpadla nepoklesne na tlak nasycených par, případně na tlak, při kterém dochází k uvolňování rozpuštěných plynů (při čerpání kapalin s vysokým bodem varu, např. olejů).



$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_s}{\rho} + gh_s + \frac{\kappa_s^2 \bar{u}_s^2}{2} + e_{zs}$$

$$\rho \frac{\kappa_s^2 \bar{u}_s^2}{2} + p_s = p'' + \Delta p_s$$

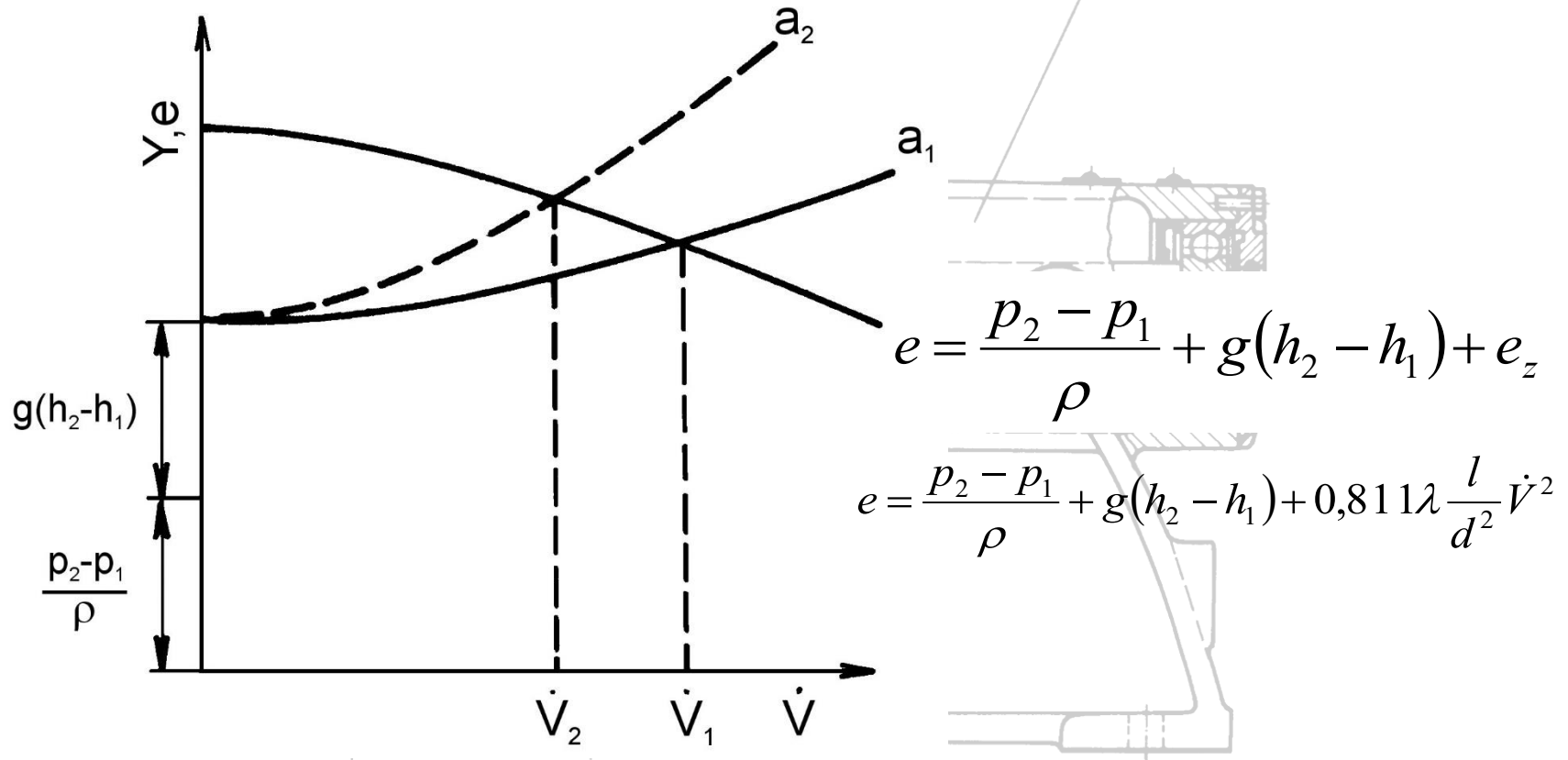
$$\Delta p_s, \Delta Y_s, \Delta h_s = f(\dot{V})$$

$$\Delta p_s = \Delta Y_s \rho$$

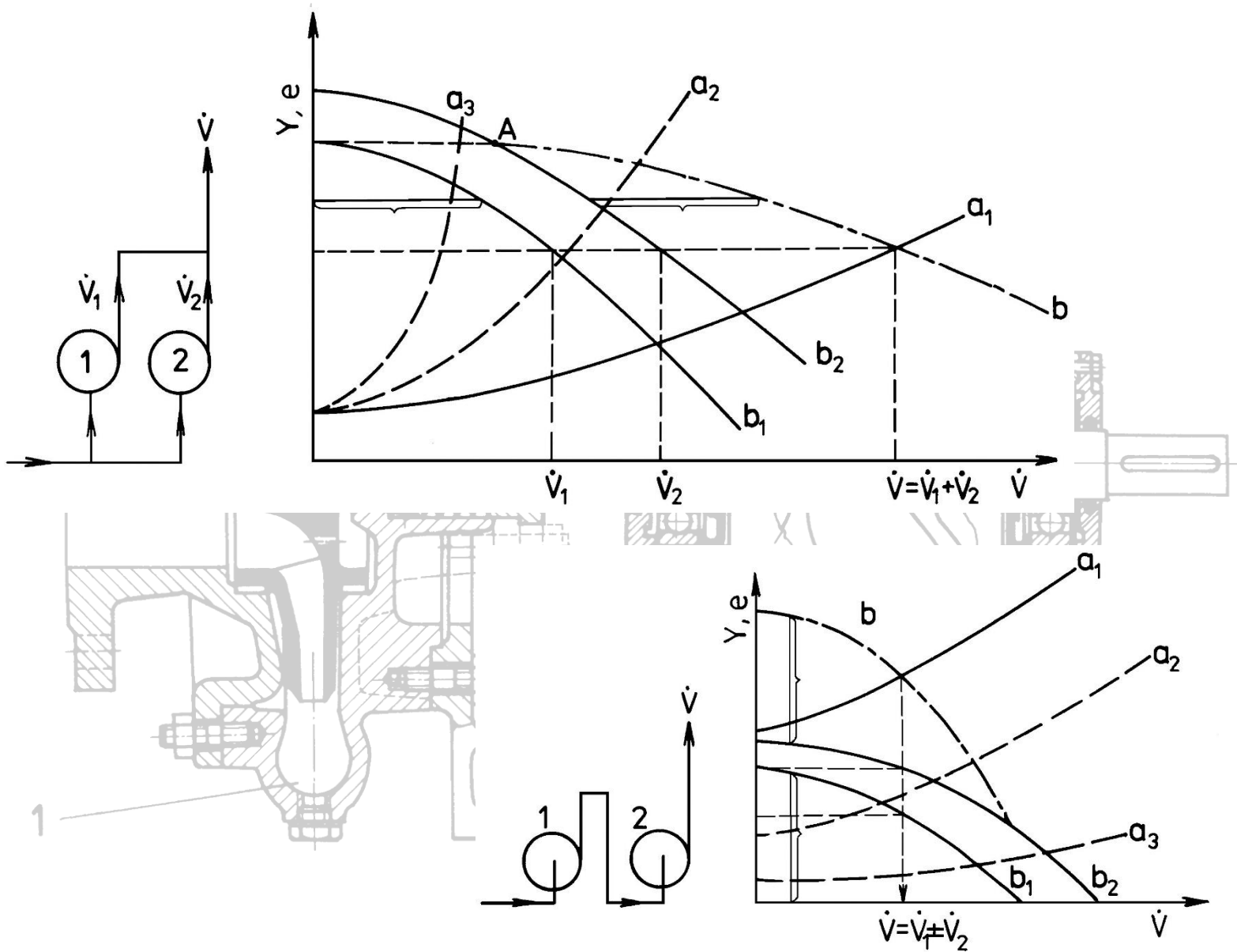
$$\Delta p_s = \rho g \Delta h_s$$

Pracovní bod čerpadla

Pracovní bod čerpadla získáme jako průsečík charakteristiky systému, který je tvořen potrubím a vřazenými odpory (místními odpory, filtry, výměníky apod.), s charakteristikou čerpadla.



Paralelní a sériové řazení čerpadel



Konstrukční provedení čerpadel

Hydrostatická čerpadla

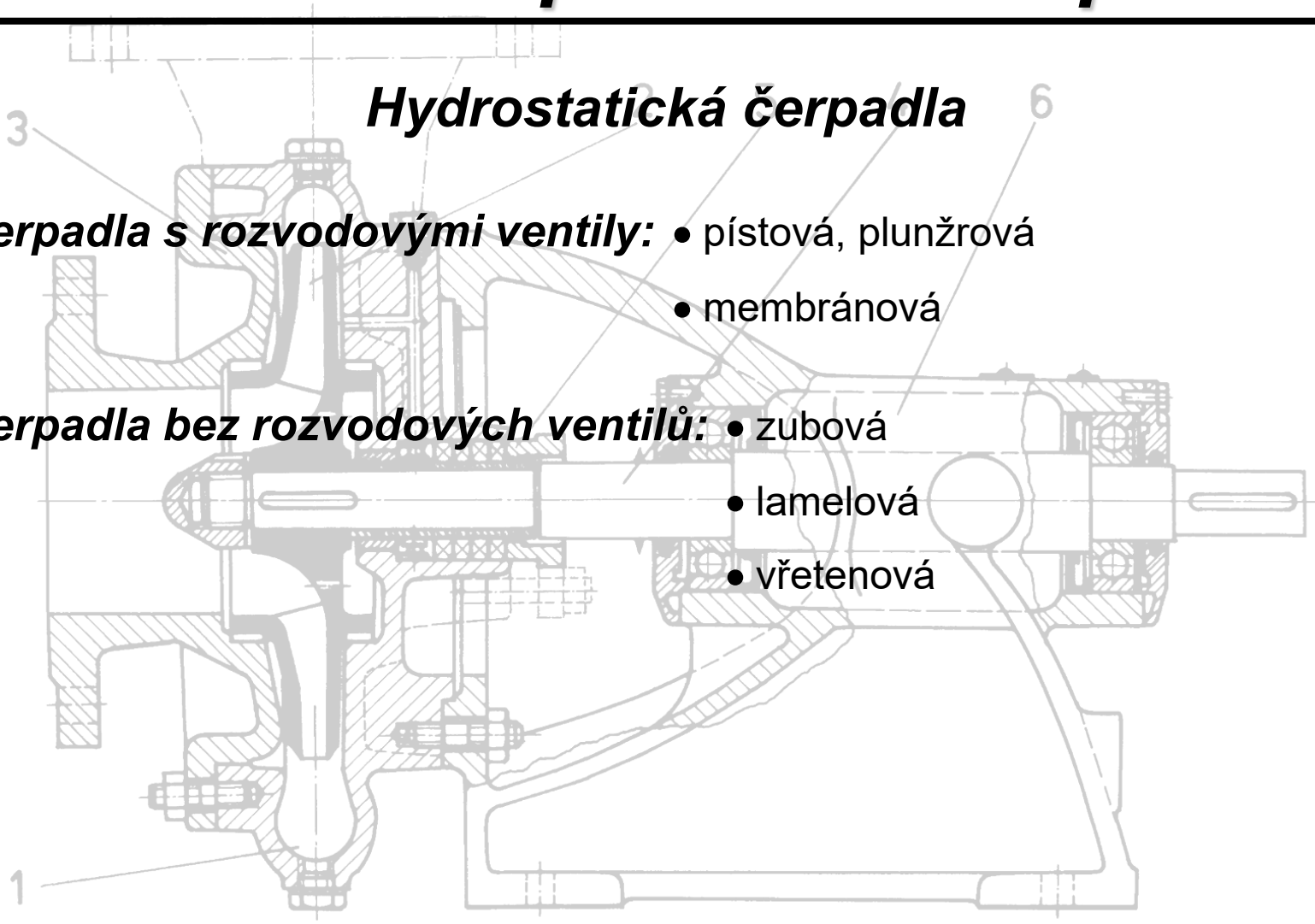
Čerpadla s rozvodovými ventily: • pístová, plunžrová

• membránová

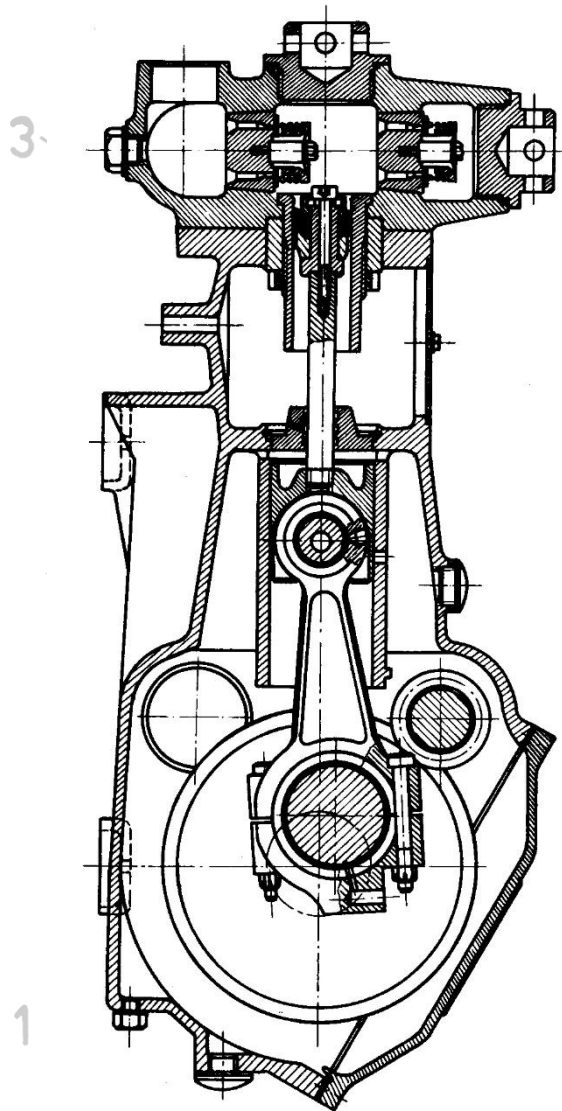
Čerpadla bez rozvodových ventilů: • zubová

• lamelová

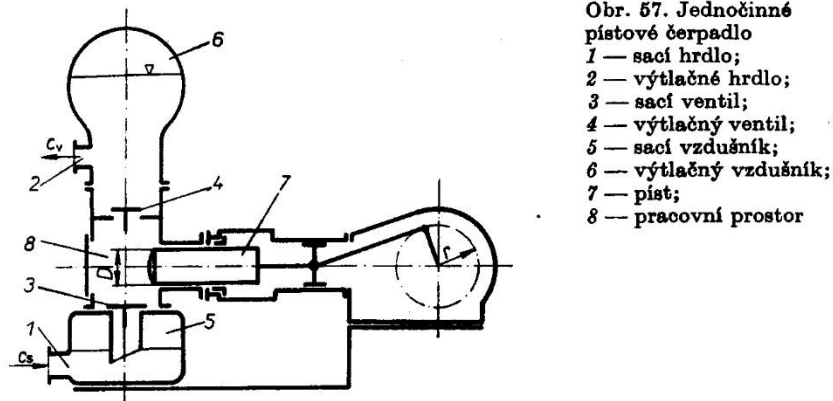
• vřetenová



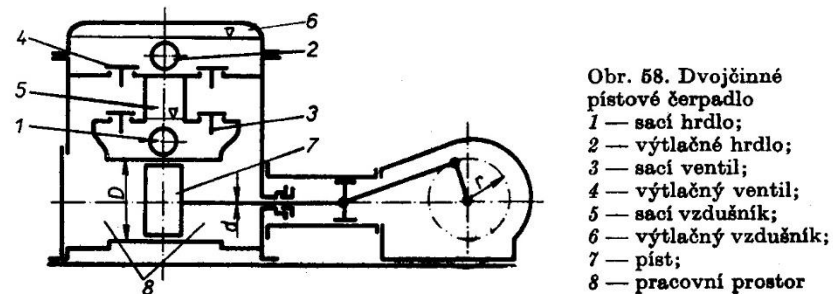
Pístová a plunžrová čerpadla



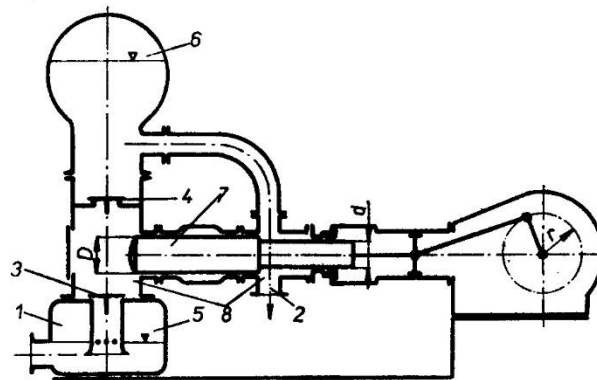
Obr. 56. Tříválcové vysokotlaké čerpadlo



Obr. 57. Jednočinné pístové čerpadlo
 1 — sací hrdlo;
 2 — výtláčné hrdlo;
 3 — sací ventil;
 4 — výtláčny ventil;
 5 — sací vzdušník;
 6 — výtláčny vzdušník;
 7 — píst;
 8 — pracovní prostor

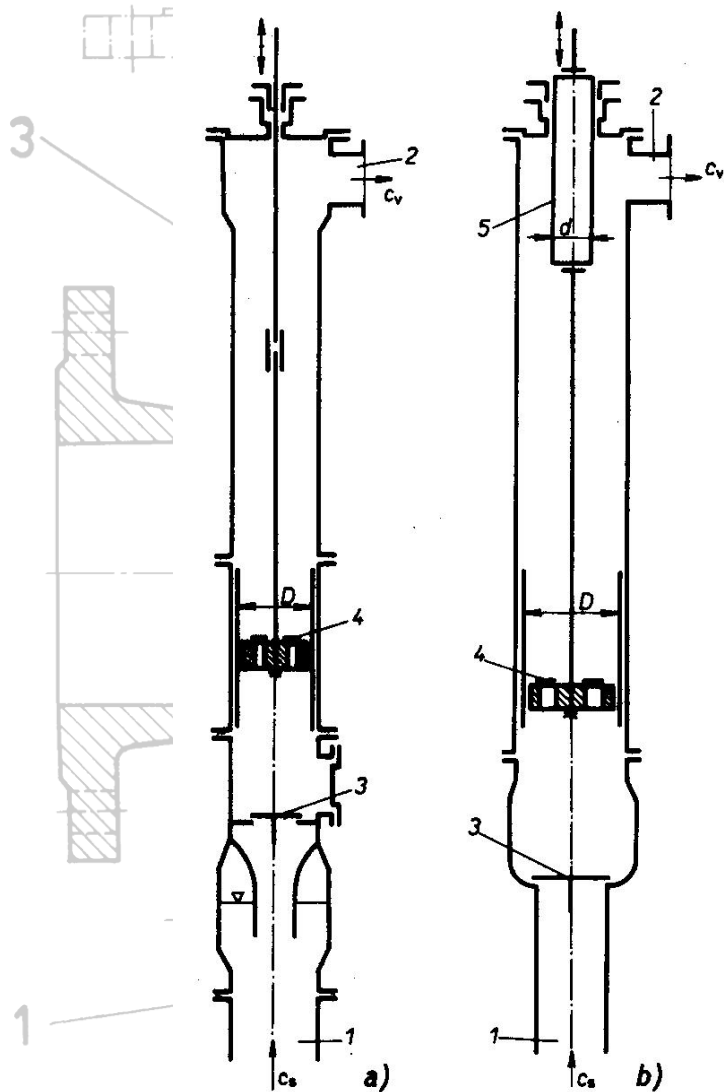


Obr. 58. Dvojčinné pístové čerpadlo
 1 — sací hrdlo;
 2 — výtláčné hrdlo;
 3 — sací ventil;
 4 — výtláčny ventil;
 5 — sací vzdušník;
 6 — výtláčny vzdušník;
 7 — píst;
 8 — pracovní prostor

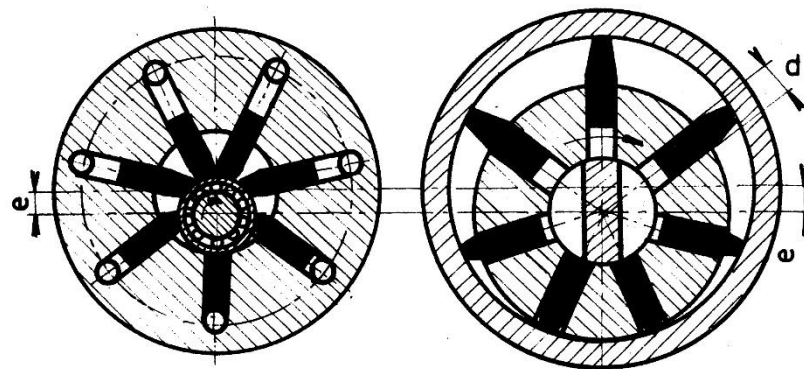


Obr. 59. Diferenciální pístové čerpadlo
 1 — sací hrdlo; 2 — výtláčné hrdlo; 3 — sací ventil; 4 — výtláčny ventil; 5 — sací vzdušník; 6 — výtláčny vzdušník; 7 — píst; 8 — pracovní prostor

Zdvižná čerpadla



Čerpadla s radiálními písty



Obr. 7.15

Schema pístových jednotek s radiálními písty. Vnější rozvod kapaliny (vlevo), vnitřní rozvod (vpravo).

Obr. 60. Zdvižné čerpadlo

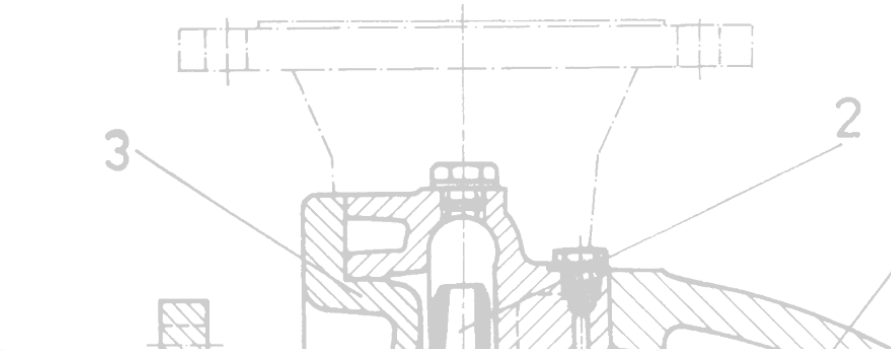
a) jednočinné, b) diferenciální

1 — sací hrdlo; 2 — výtláčné hrdlo;

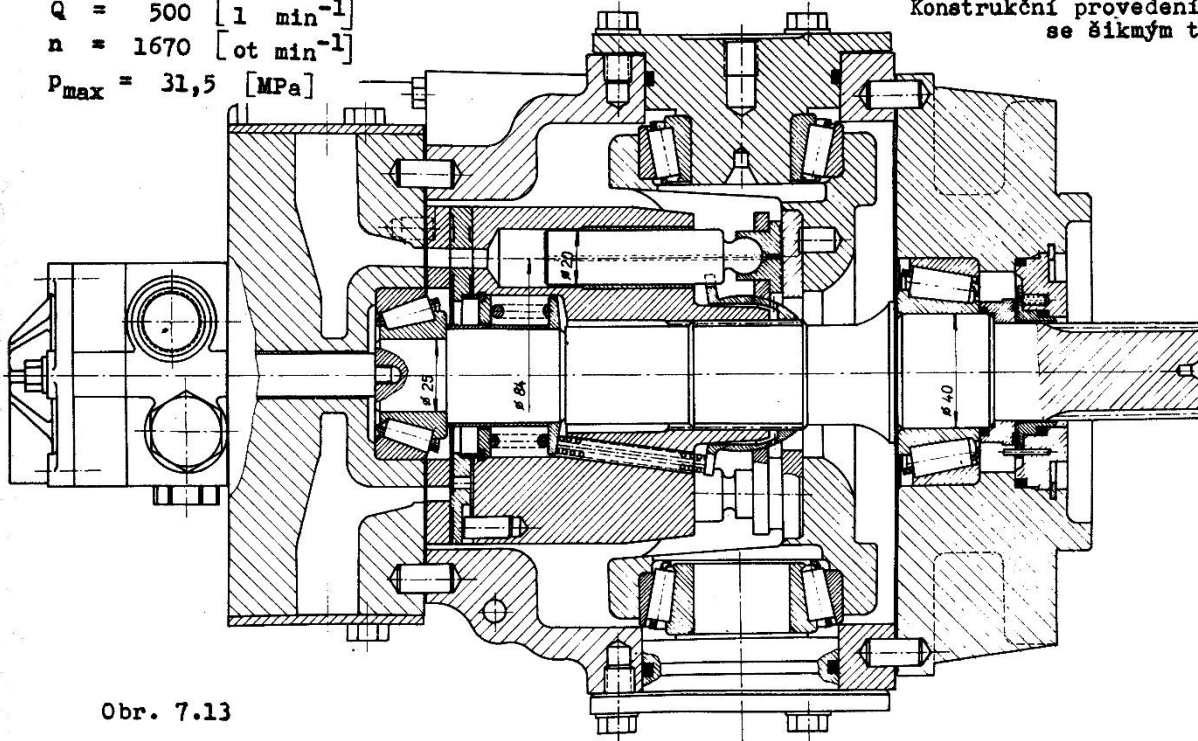
3 — sací ventil; 4 — píst s výtláčným ventilem; 5 — plunžr nebo diferenciální píst

píst

Čerpadla s axiálními písty

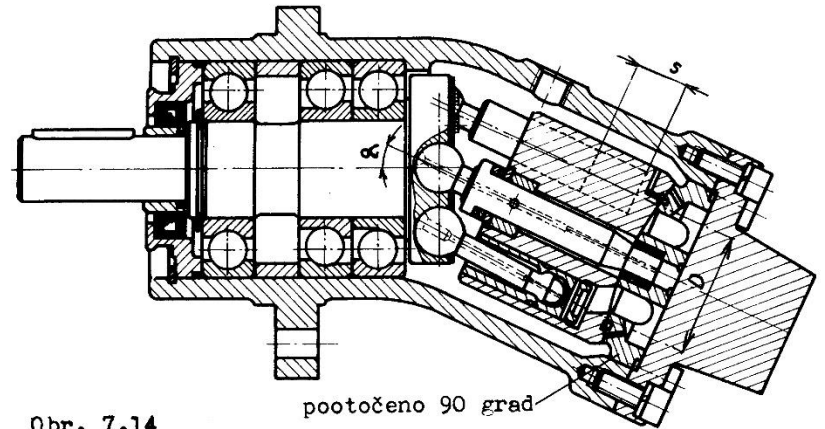


$Q = 500 \text{ [l min}^{-1}\text{]}$
 $n = 1670 \text{ [ot min}^{-1}\text{]}$
 $p_{\max} = 31,5 \text{ [MPa]}$



Obr. 7.13

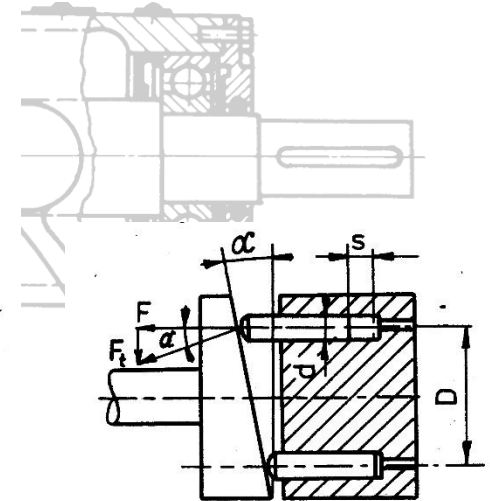
Konstrukční provedení axiální hydrostatické jednotky se šikmou deskou



Obr. 7.14

pootočeno 90 grad

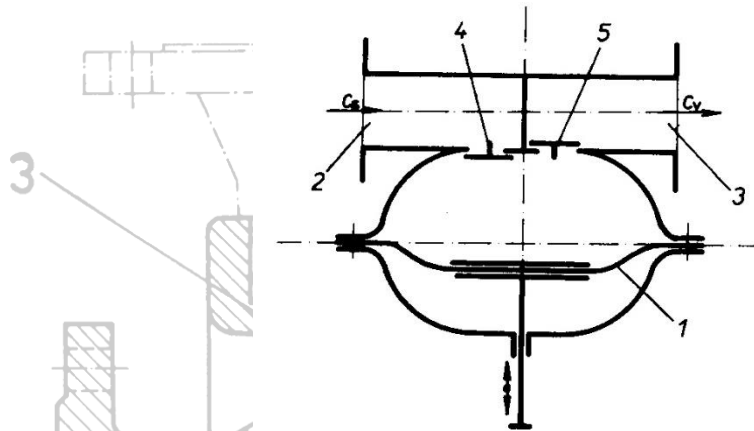
Konstrukční provedení axiální hydrostatické jednotky se šikmým tělesem



Obr. 7.10

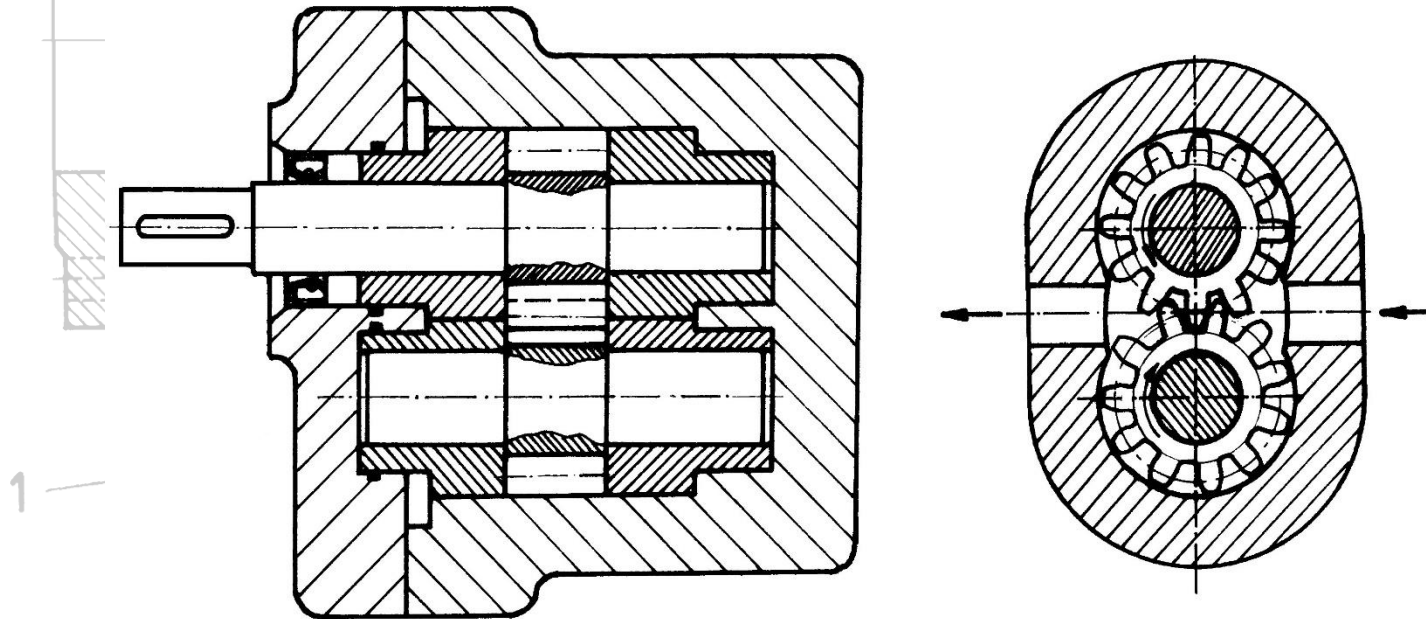
Schema mechanismu šikmé desky

Membránová čerpadla

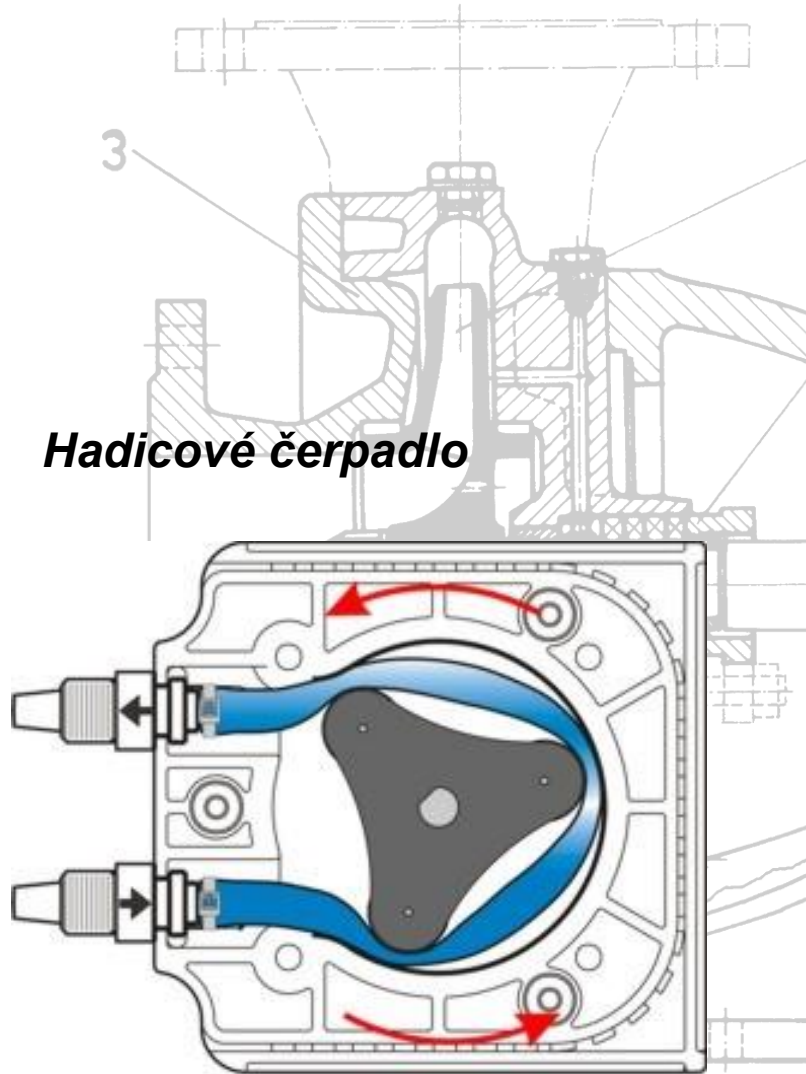


Obr. 61. Membránové čerpadlo
1 — membrána; 2 — sací hrdlo;
3 — výtlačné hrdlo; 4 — sací ventil;
5 — výtlačný ventil

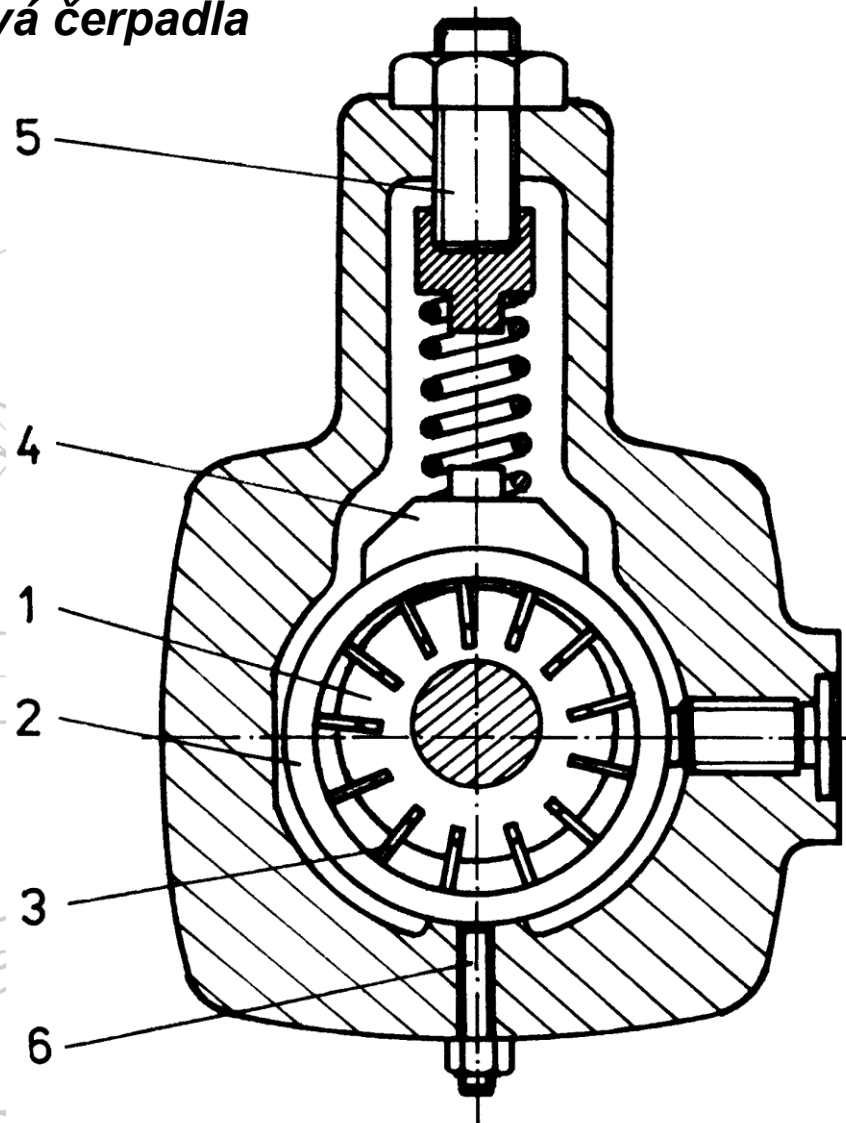
Zubová čerpadla



Lamelová čerpadla



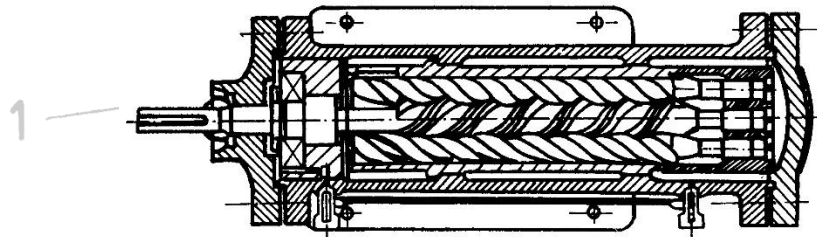
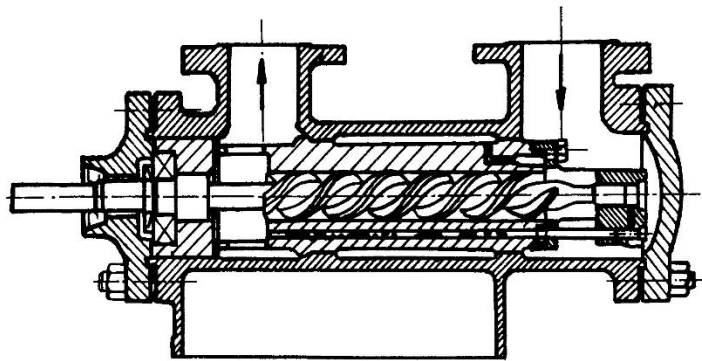
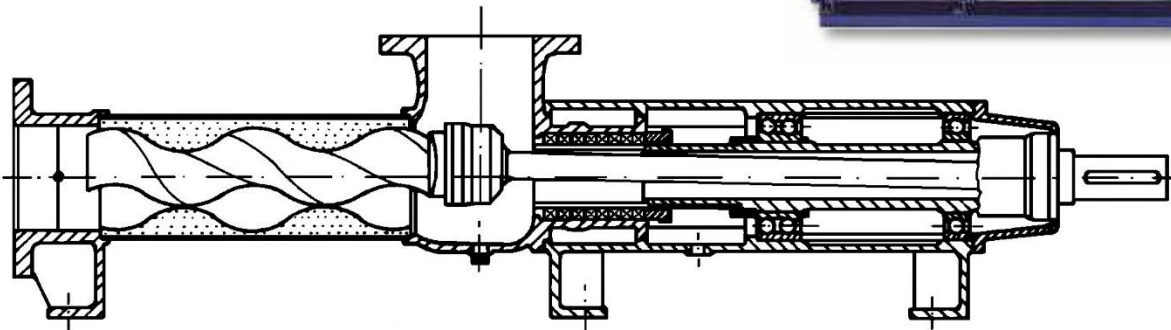
Hadíkové čerpadlo



1 – rotor, 2 – stator, 3 – lamela, 4 – opěrka,
5 – reg. šroub, 6 – narážka

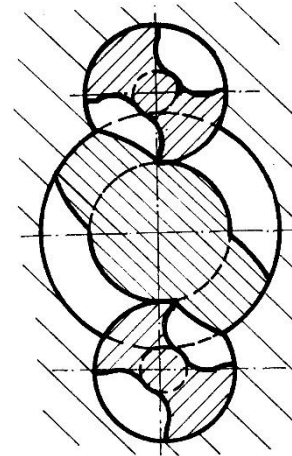
Vřetenová čerpadla

Čerpadlo „MONO“



Obr. 75. Trojvřetenové šroubové čerpadlo

Trojvřetenové čerpadlo



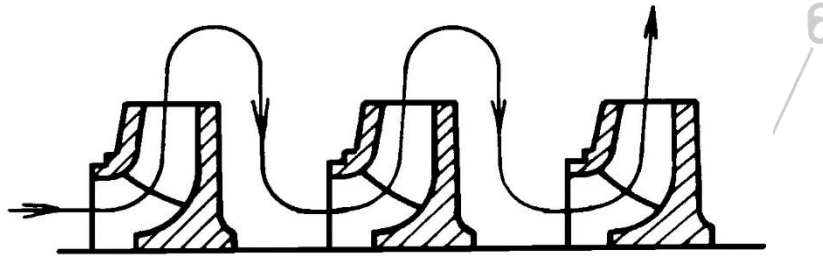
Obr. 7.24
Příčný řez třívřetenovou jednotkou.

Hydrodynamická čerpadla

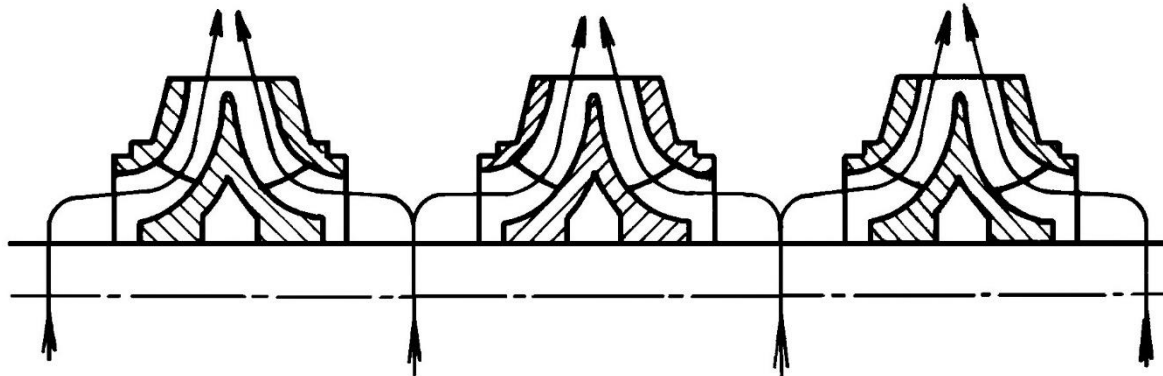
Uspořádání oběžných kol

sériové

3

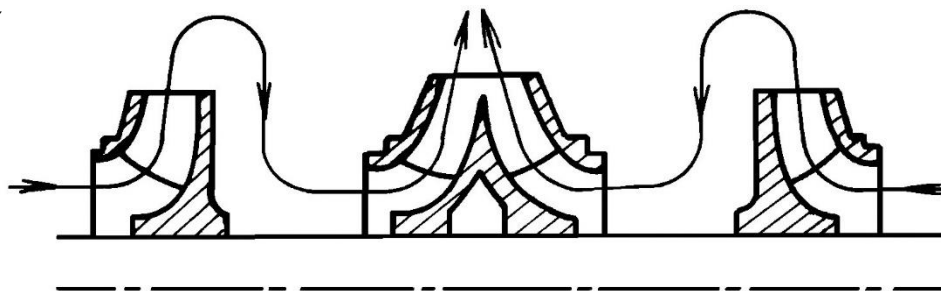


paralelní



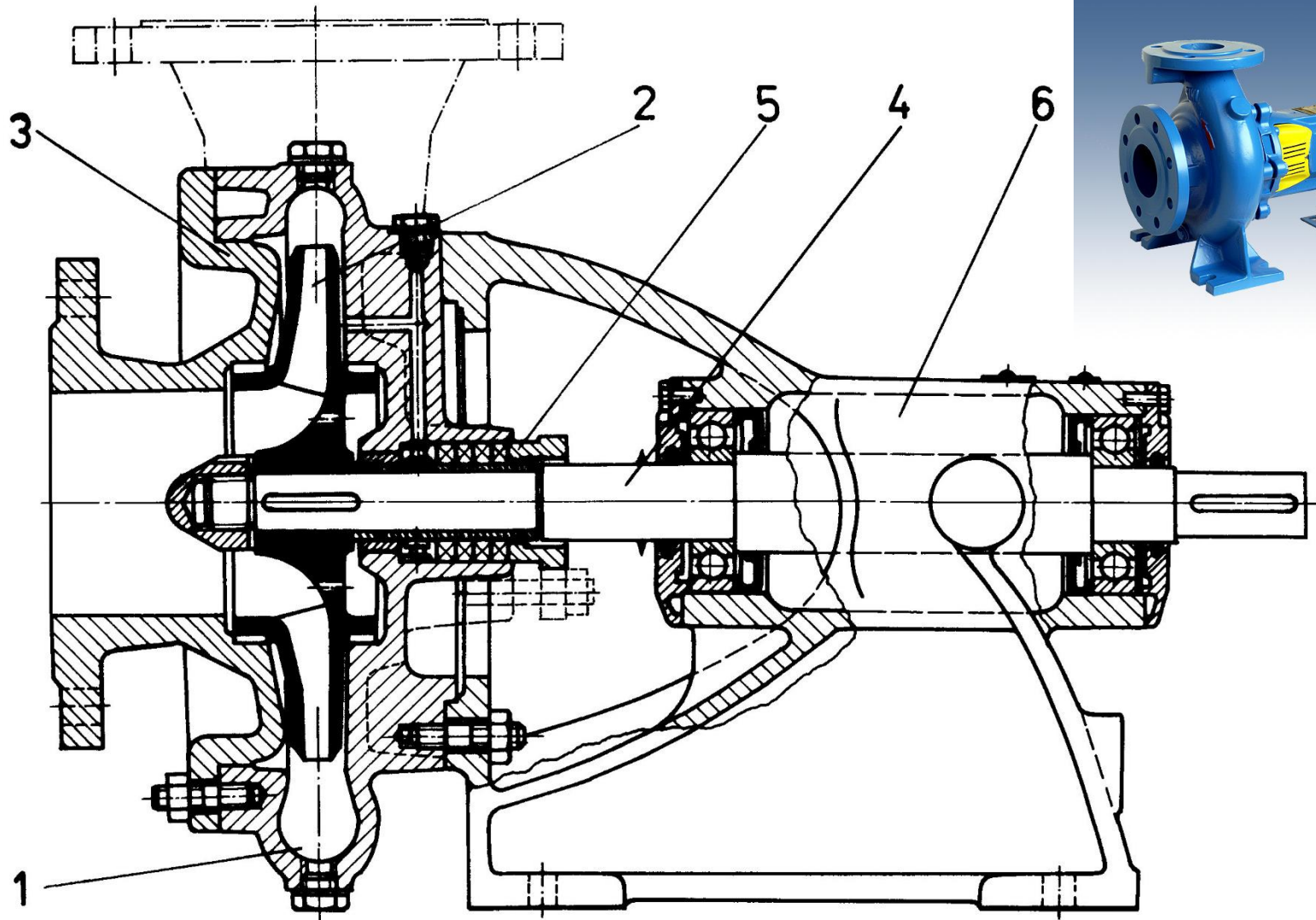
sériově-paralelní

1



6

Jednostupňové spirálové kozlíkové čerpadlo

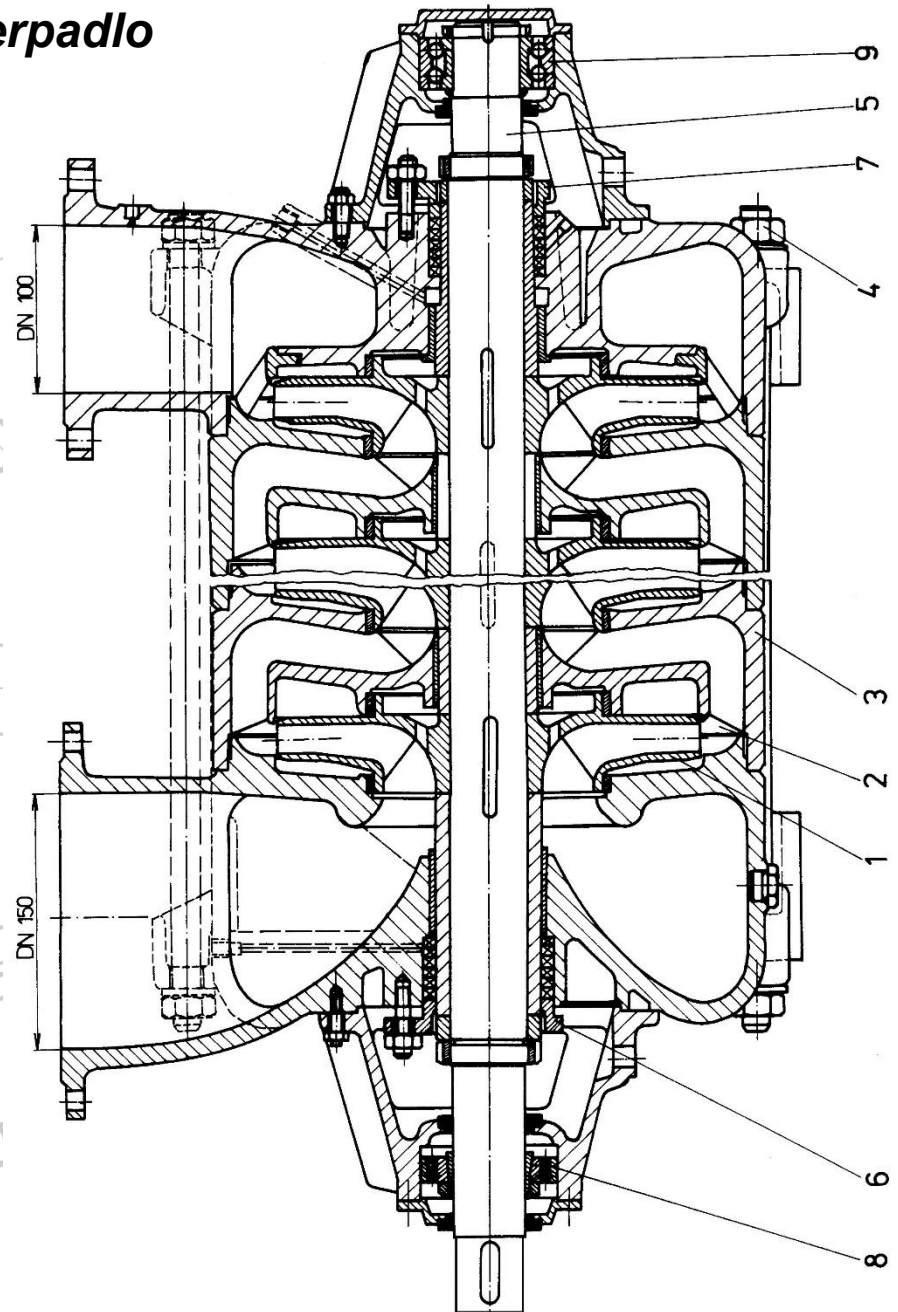


1 – spirálová skříň, 2 – oběžné kolo, 3 – víko se sací, hrdlem, 4 – hřídel, 5 – ucpávka,
6 – ložiskový kozlík

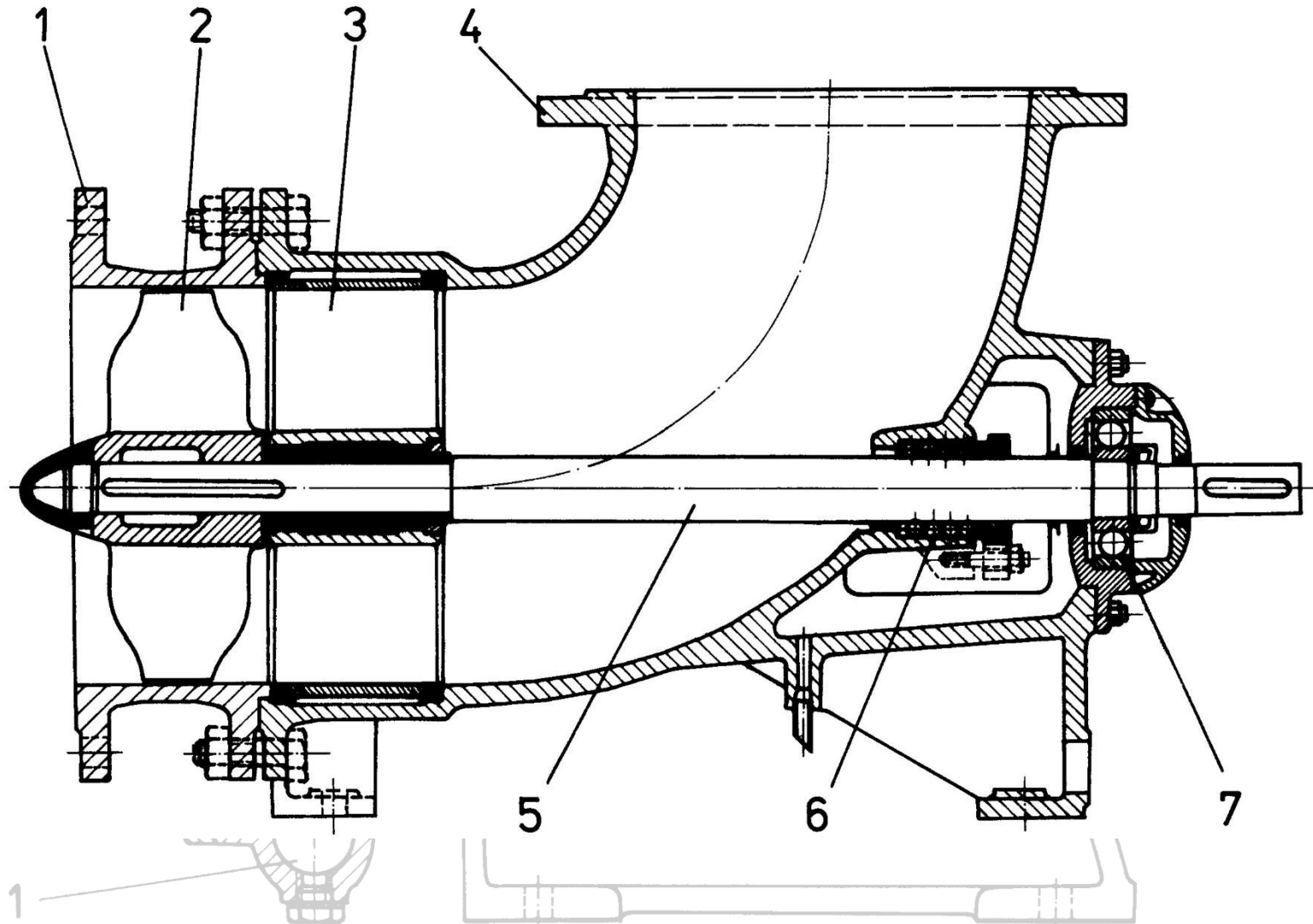
Vícestupňové radiální člankové čerpadlo

3

- 1 – oběžné kolo
- 2 – rozvaděč
- 3 – článek
- 4 – spojovací svorník
- 5 – hřídel
- 6, 7 – ucpávka,
- 8, 9 – ložisko



Horizontální axiální čerpadlo

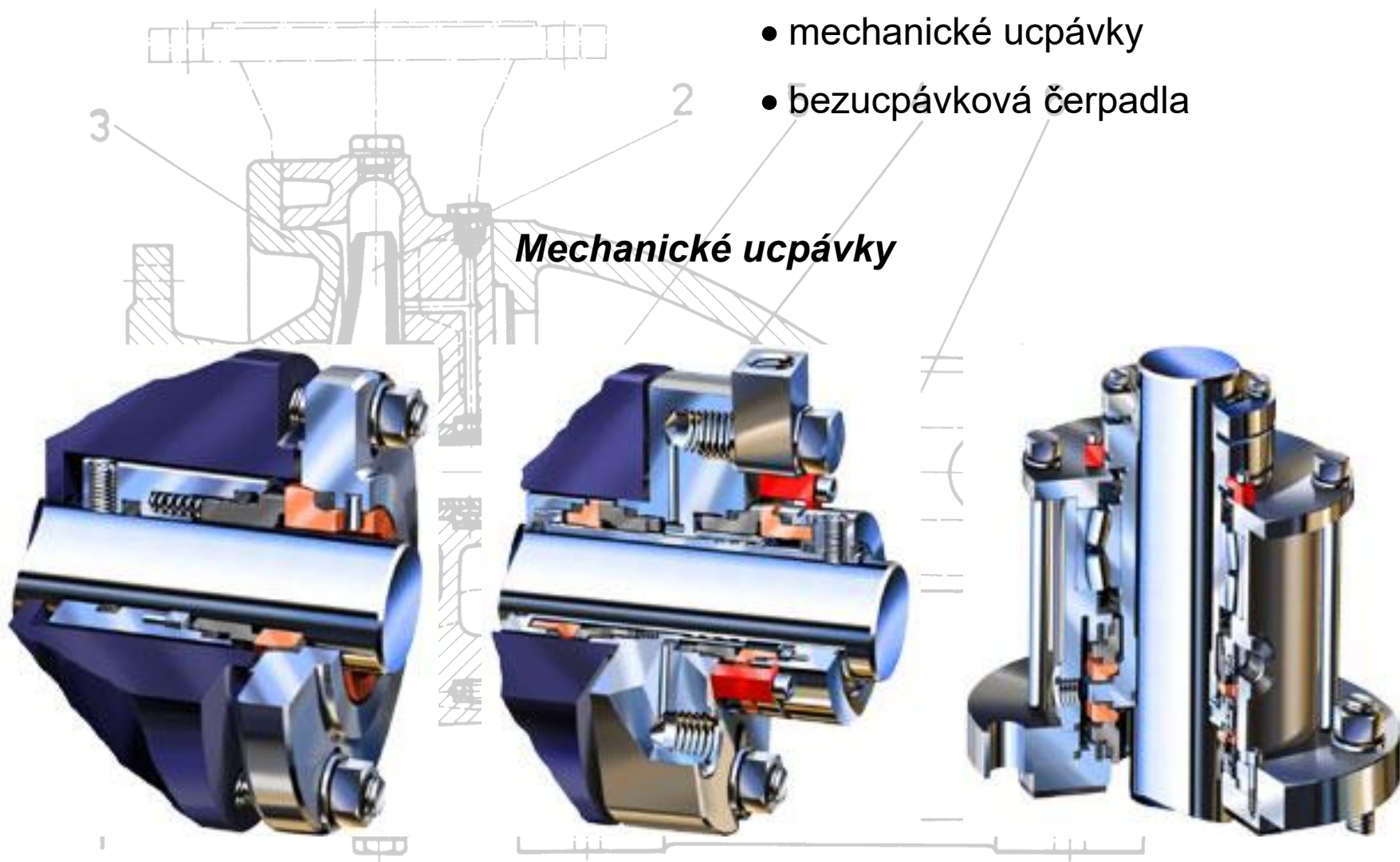


1 – sací nástavec, 2 – oběžné lopatky, 3 – rozváděč, 4 – skříň čerpadla, 5 – hřídel,
6 – ucpávka, 7 – ložisko

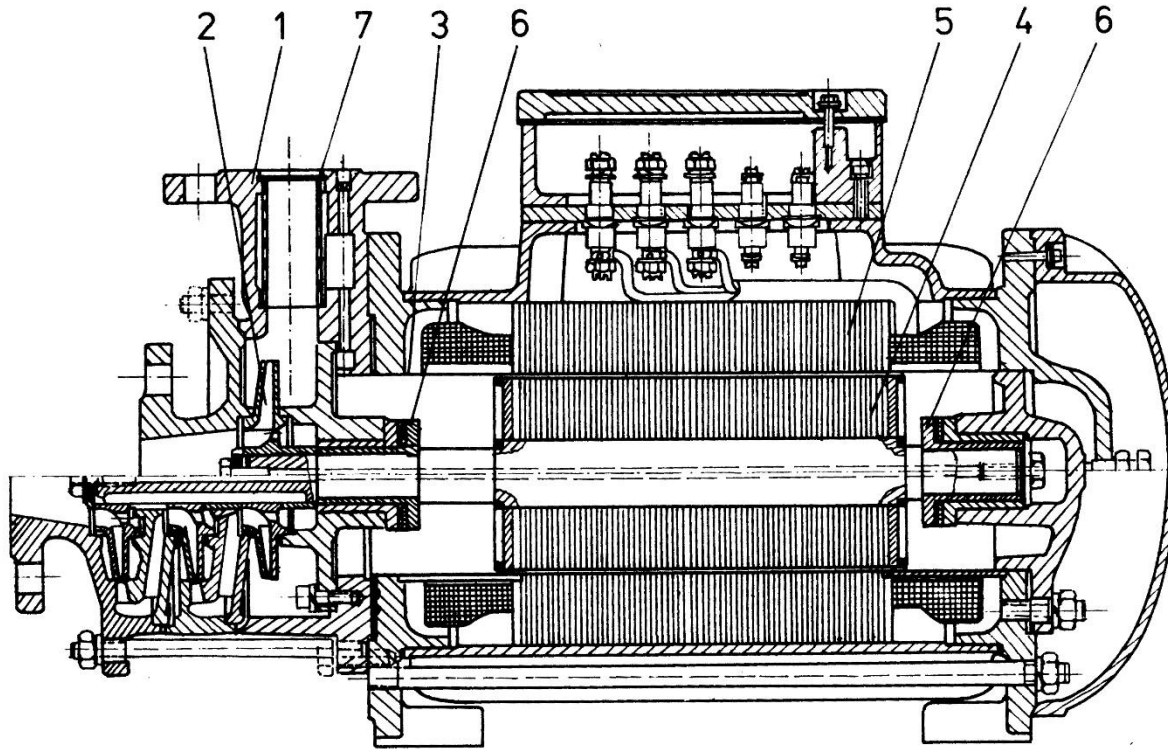
Utěsňování hřídelí čerpadel:

- měkké stlačované ucpávky
- mechanické ucpávky
- bezucpávková čerpadla

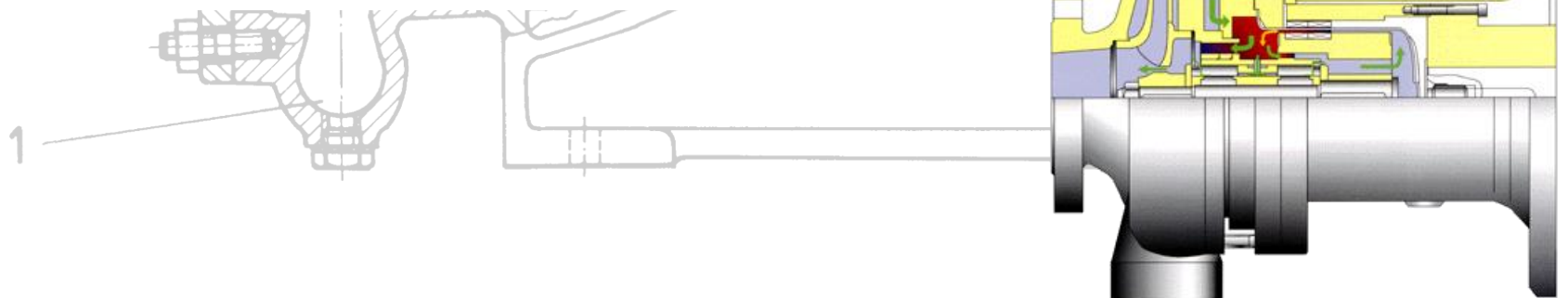
Mechanické ucpávky



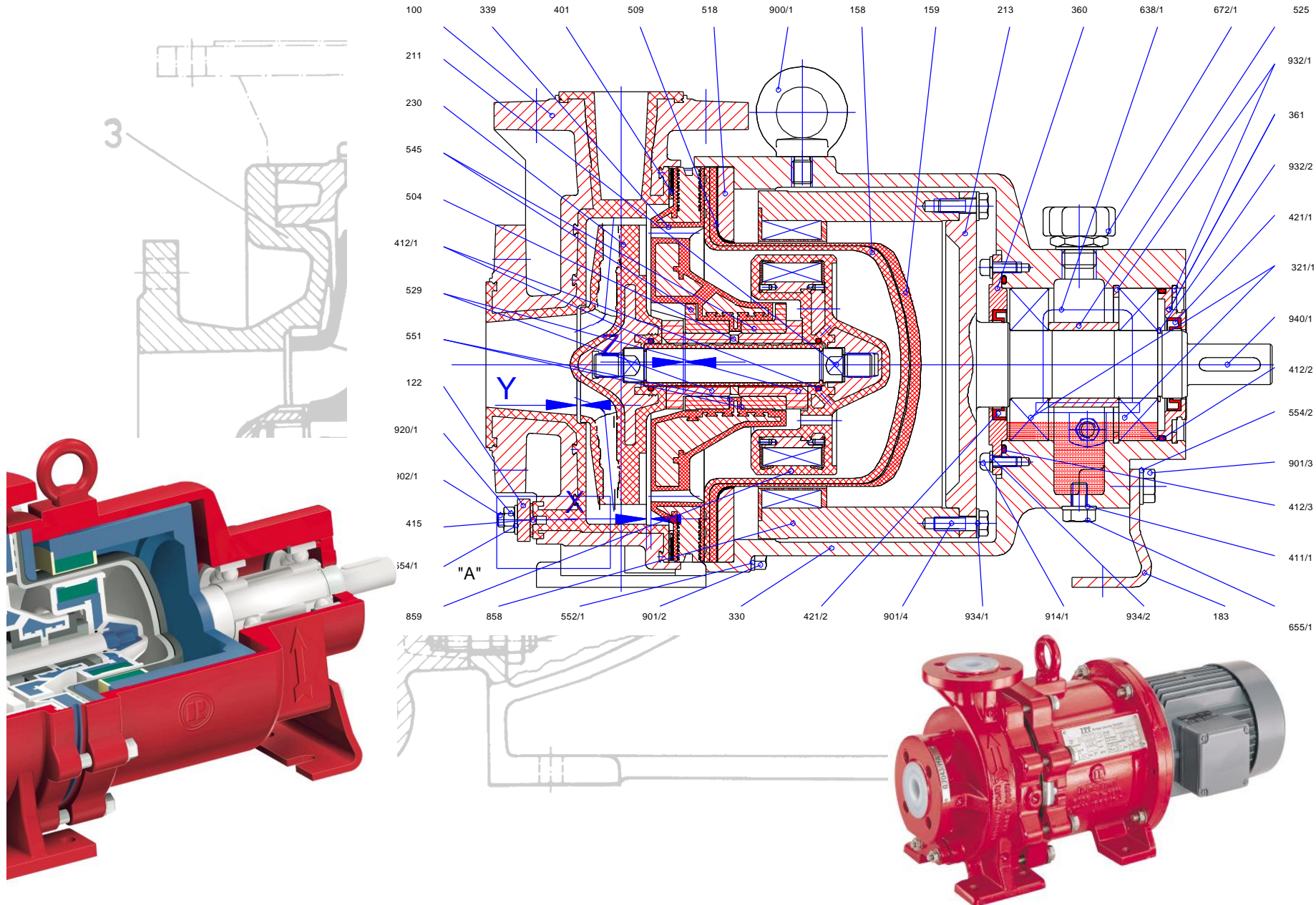
Bezucpávková čerpadla (rotor-stator)



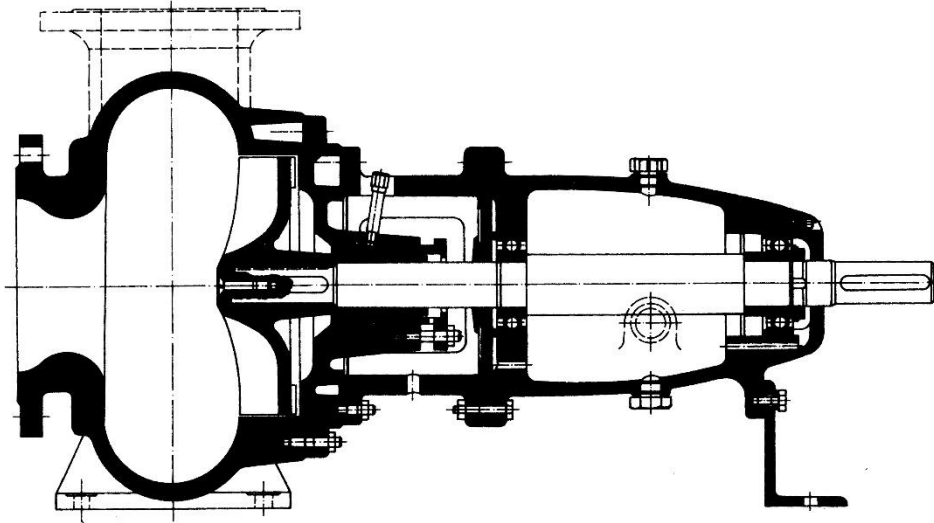
Obr. 85. Bezucpávkové odstředivé čerpadlo v jednostupňovém a trojstupňovém provedení
1 – skříň čerpadla, 2 – oběžné kolo, 3 – pouzdro z nemagnetického materiálu, 4 – rotor elektromotoru, 5 – stator elektromotoru, 6 – kluzná ložiska, 7 – filtr



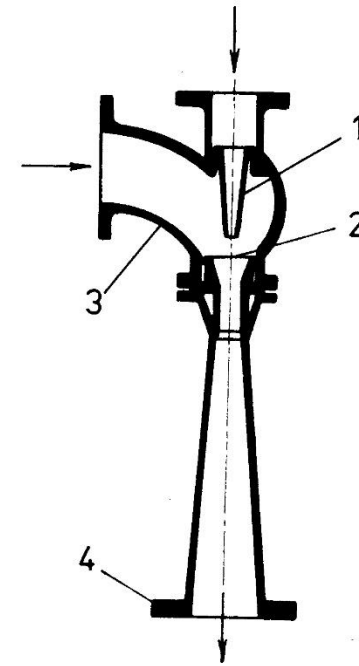
Bezucpávková čerpadla (magnetická spojka)



Jiné způsoby čerpání kapalin

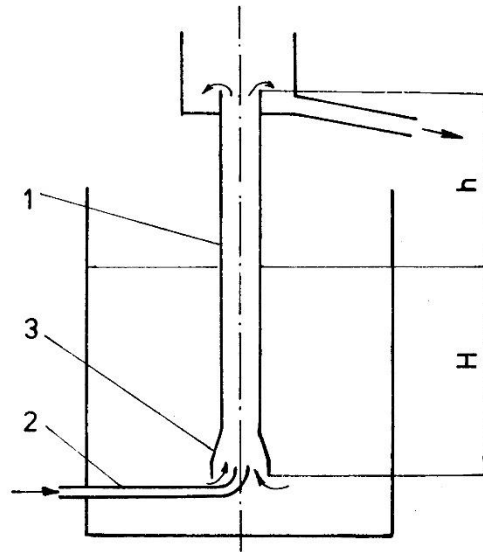
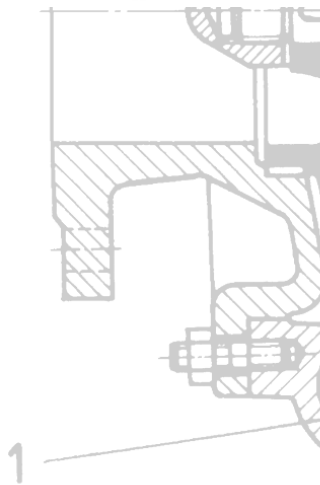


Obr. 87. Vřítivé čerpadlo



Obr. 88. Vodoproudé čerpadlo

1 – tryska hnací kapaliny, 2 – směšovací tryska, 3 – sací potrubí, 4 – výstupní hrdlo



Obr. 89. Schéma mamutky

1 – trubka, kterou prochází směs plynu a kapaliny,
2 – přívod tlakového vzduchu, 3 – směšovací komora

KOMPRESORY

Ventilátory:

- malé hodnoty kompresního poměru $p_2 / p_1 \approx 1$
- zanedbání stlačitelnosti \Rightarrow výpočet jako u čerpadel)

Ventilátory rozdělujeme podle rozdílu tlaků $\Delta p = p_v - p_s$ na:

- nízkotlaké ventilátory $\Delta p = 60 \div 1000 \text{ Pa}$
- středotlaké ventilátory $\Delta p = 1000 \div 2000 \text{ Pa}$
- vysokotlaké ventilátory $\Delta p = 2000 \div 10000 \text{ Pa}$

Kompresory:

- vyšší hodnoty kompresního poměru p_2 / p_1
- malá a střední množství plynu – **kompresory**
- velká množství plynu – **turbokompresory**
- vysoký kompresní poměr – víceúrovňové kompresory

Kompresory v užším slova smyslu se nazývají stroje, které stlačují plyn na tlak 0,3 až 250 MPa a rozdělujeme je na:

- nízkotlaké kompresory výtlačný tlak do 2,5 MPa
- středotlaké kompresory výtlačný tlak od 2,5 do 10 MPa.

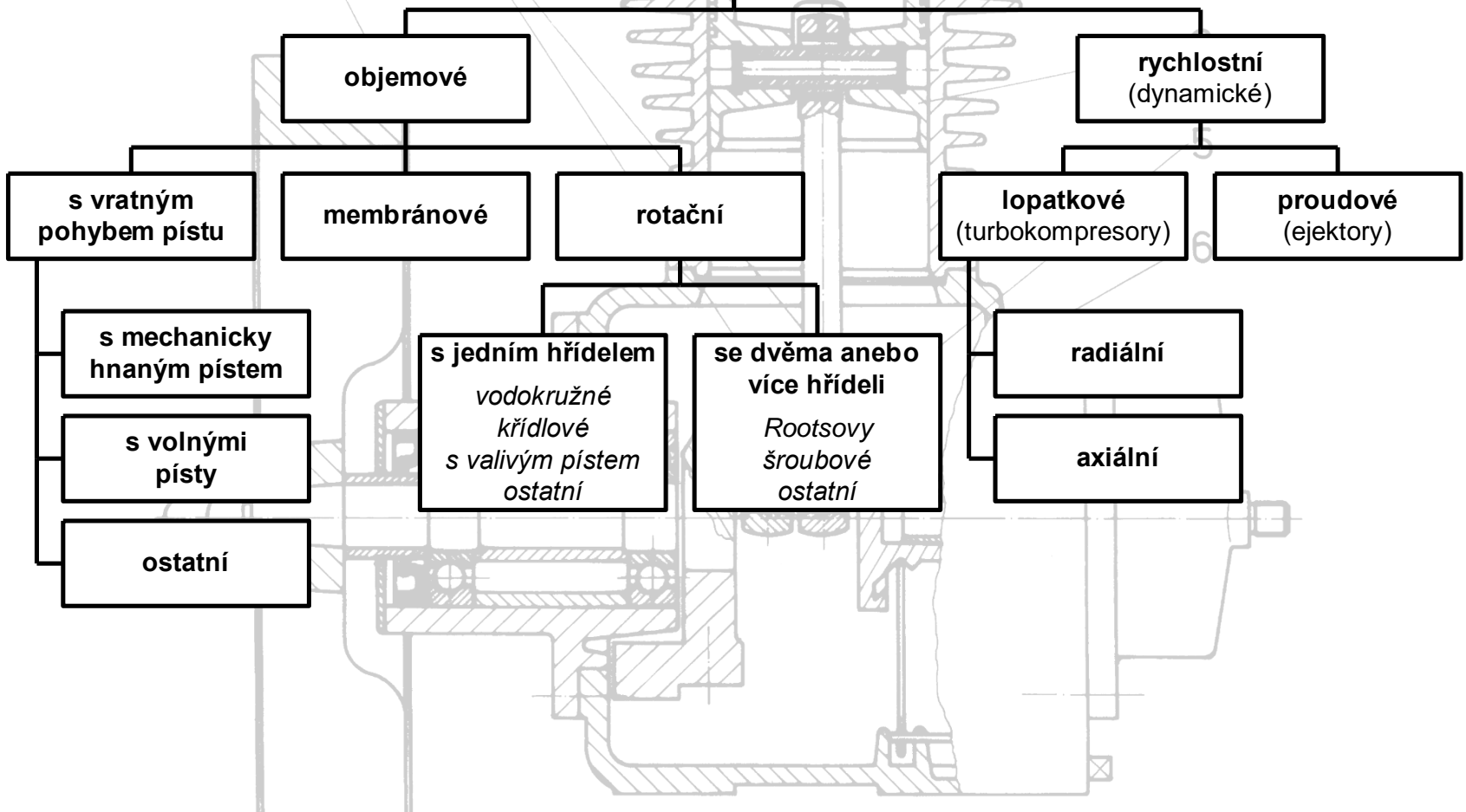
Dmychadla:

- atmosférický sací tlak
- kompresní poměr $p_2 / p_1 < 3$

Vývěvy:

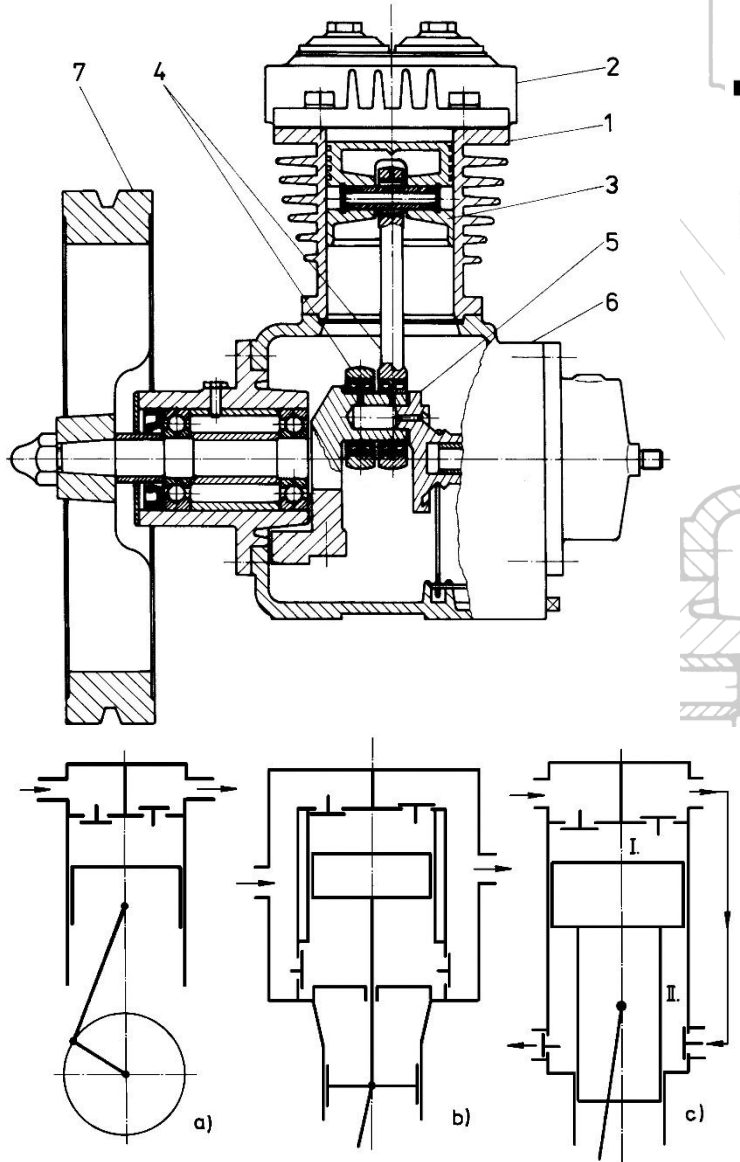
- odsávají plyn a vytvářejí podtlak

KOMPRESORY

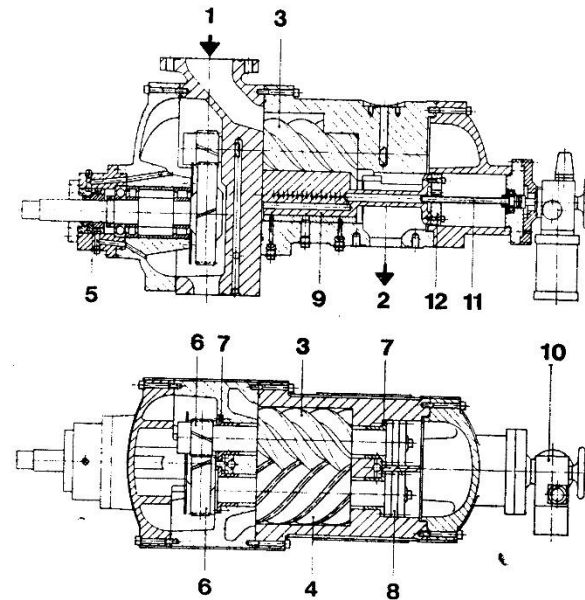
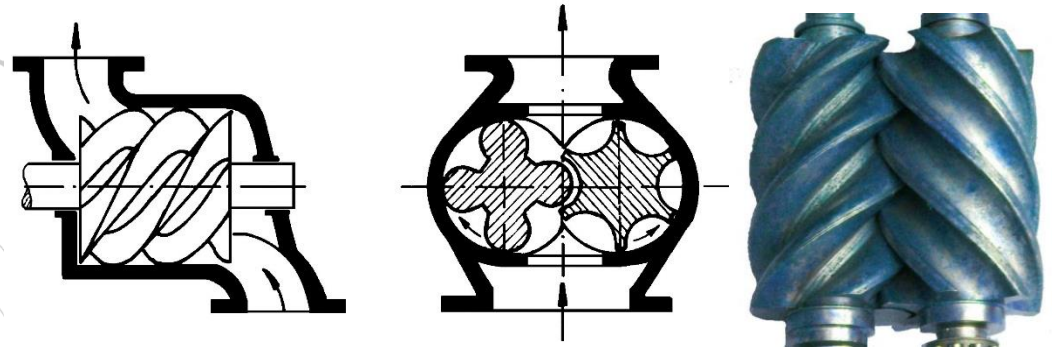


Objemové kompresory

Pístový kompresor

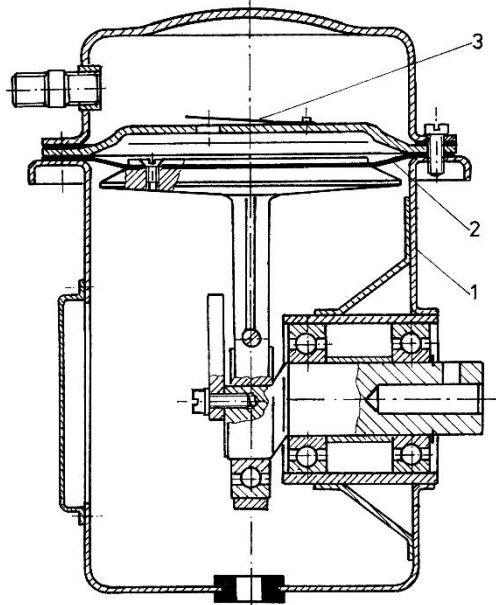


Šroubový kompresor



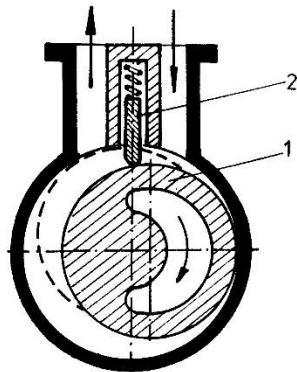
Obr. 20.4. Chladicí šroubový kompresor s vnitřním chlazením olejem a s regulací šoupátkem
 1 — vstup, 2 — výstup, 3 — hlavní rotor, 4 — vedlejší rotor, 5 — ucpávka s třecím kroužkem,
 6 — převodovka 7 — radiální kluzné ložisko, 8 — axiální kluzné ložisko, 9 — regulační šou-
 pátko, 10 — ovládací šoupátko, 11 — ovládací větveno, 12 — vyrovnávací pist
 (GHH Sterkrade, NSR),

Membránový kompresor



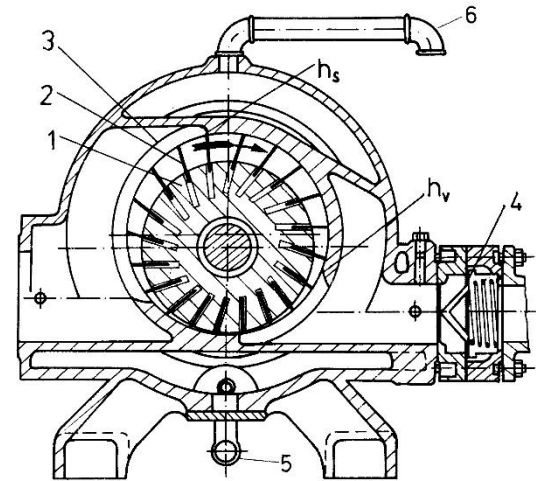
Obr. 92. Membránový kompresor
1 – skříň kompresoru,
2 – membrána, 3 – výtlačný ventil

Kompresor s valivým pístem



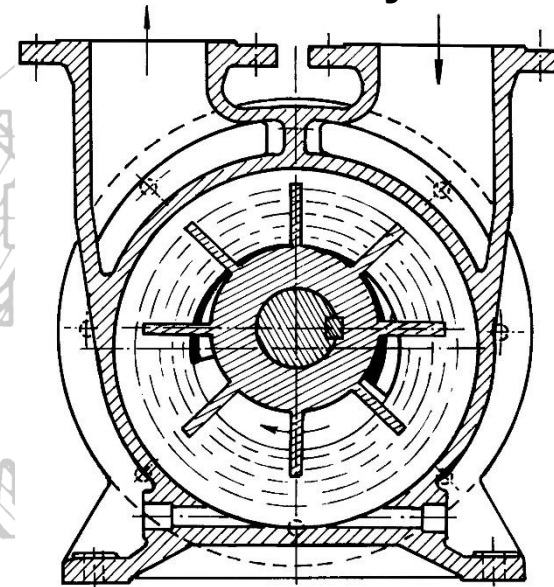
Obr. 106. Schéma kompresoru s valivým pístem
1 – valivý píst, 2 – těsnicí lišta

Křídlový kompresor



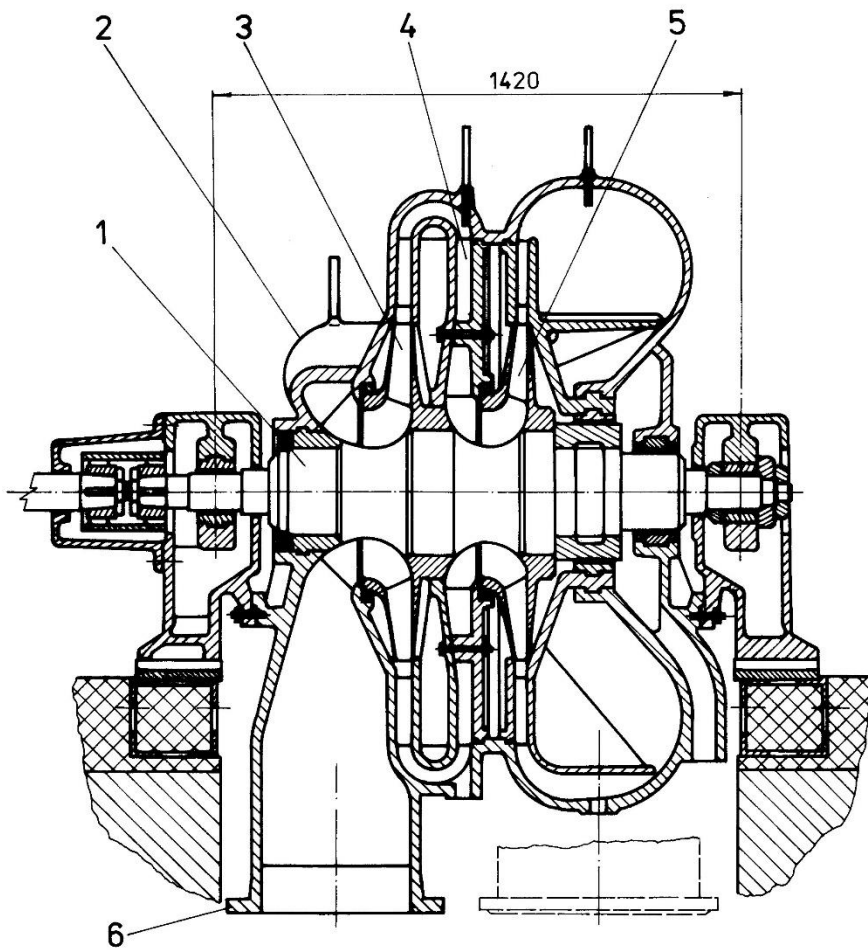
Obr. 105. Křídlový kompresor
1 – rotor, 2 – posuvná křídla, 3 – stator, 4 – zpětný ventil,
5 a 6 – vstup a výstup chladicí vody

Vodokružná vývěva

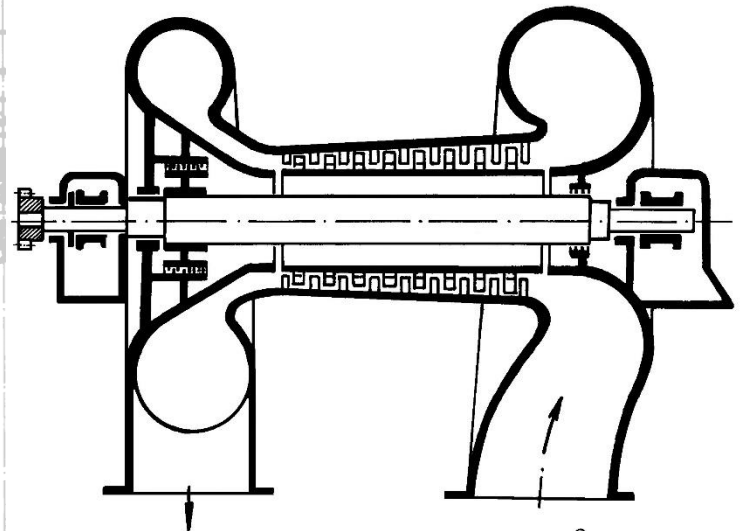


Dynamické kompresory

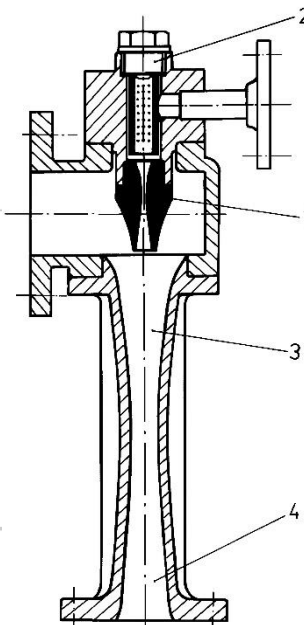
Dvoustupňový radiální turbokompresor



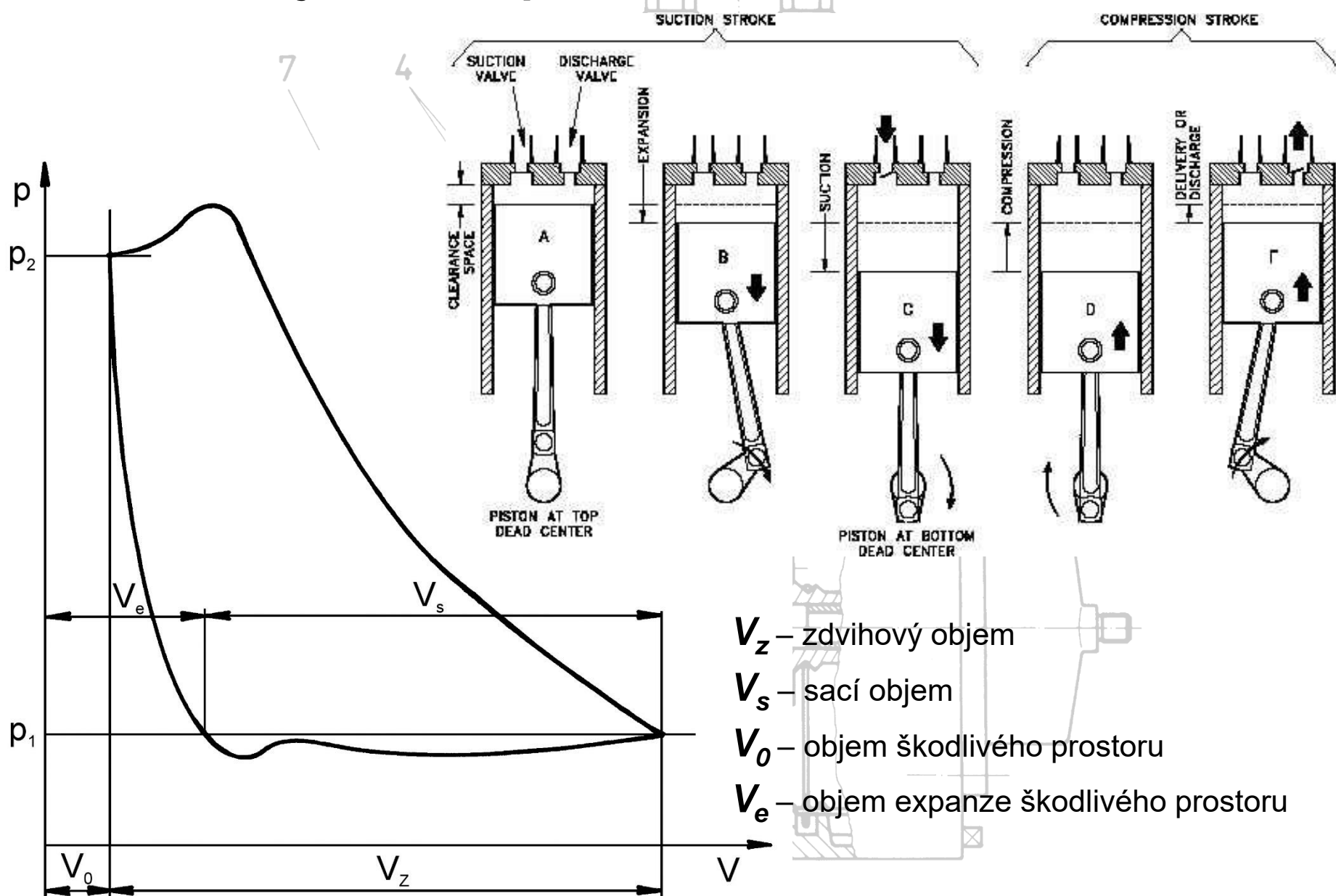
Axiální turbokompresor



Proudový ejektor



Pracovní cyklus kompresoru



V_z – zdvihový objem

V_s – sací objem

V_0 – objem škodlivého prostoru

V_e – objem expanze škodlivého prostoru

Základní výpočty kompresorů

- příkon kompresoru P [W]

$$P = P_{ad} / \eta_{cad}$$

$$\eta_{cad} = \eta_{ad} \cdot \eta_m = 0.5 \div 0.8$$

mechanická účinnost

adiabatická účinnost

- měrná energie e (Y) [J·kg⁻¹]

$$de = dp / \rho$$

adiabatický děj: $p \cdot v^\kappa = \text{const}$

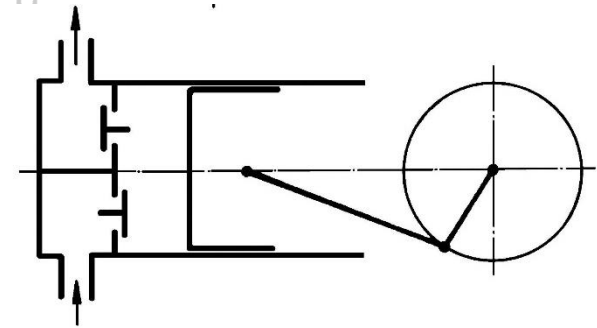
polytropický děj: $\kappa \rightarrow n$

$$e_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$P_{ad} = e_{ad} \dot{m} = e_{ad} \rho_1 \dot{V} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 \dot{V}_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]$$

- teoretická výkonnost jednoválcového jednočinného kompresoru \dot{m}_t [kg·s⁻¹]

$$\dot{m}_t = S \cdot L \cdot \rho_g \cdot n$$



- dopravní účinnost η_d

$$\eta_d = \eta_o \cdot \eta_{\check{s}} \cdot \eta_t \cdot \eta_n$$

hlavní podíl – objemová účinnost
 $\eta_{\check{s}} \cdot \eta_t \cdot \eta_n = 0,75 \div 0,95$

netěsnosti

expanze plynu ze škodlivého prostoru – objemová účinnost

$$\eta_o = \frac{V_s}{V_z} = \frac{V_z + V_o - V_e}{V_z}$$

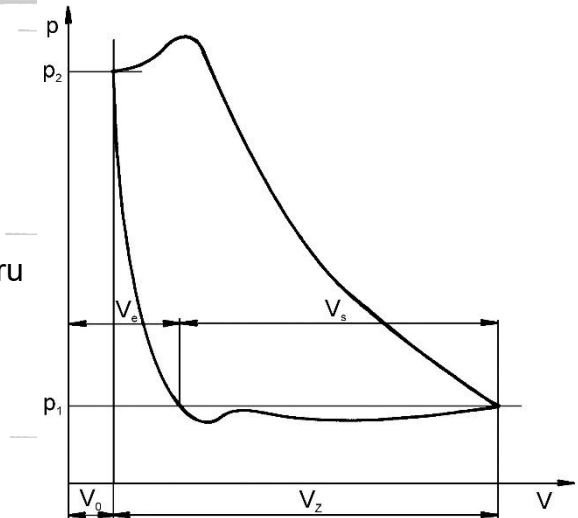
$\eta_o = 0 \rightarrow$ kritický kompresní poměr p_2/p_1 , všechnen nasátý plyn je stlačen do škodlivého prostoru

tlakové ztráty v sání

ohřátí plynu během sání

- skutečná výkonnost \dot{m} [kg·s⁻¹]

$$\eta_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_t} \Rightarrow \dot{m} = \dot{m}_t \cdot \eta_d$$

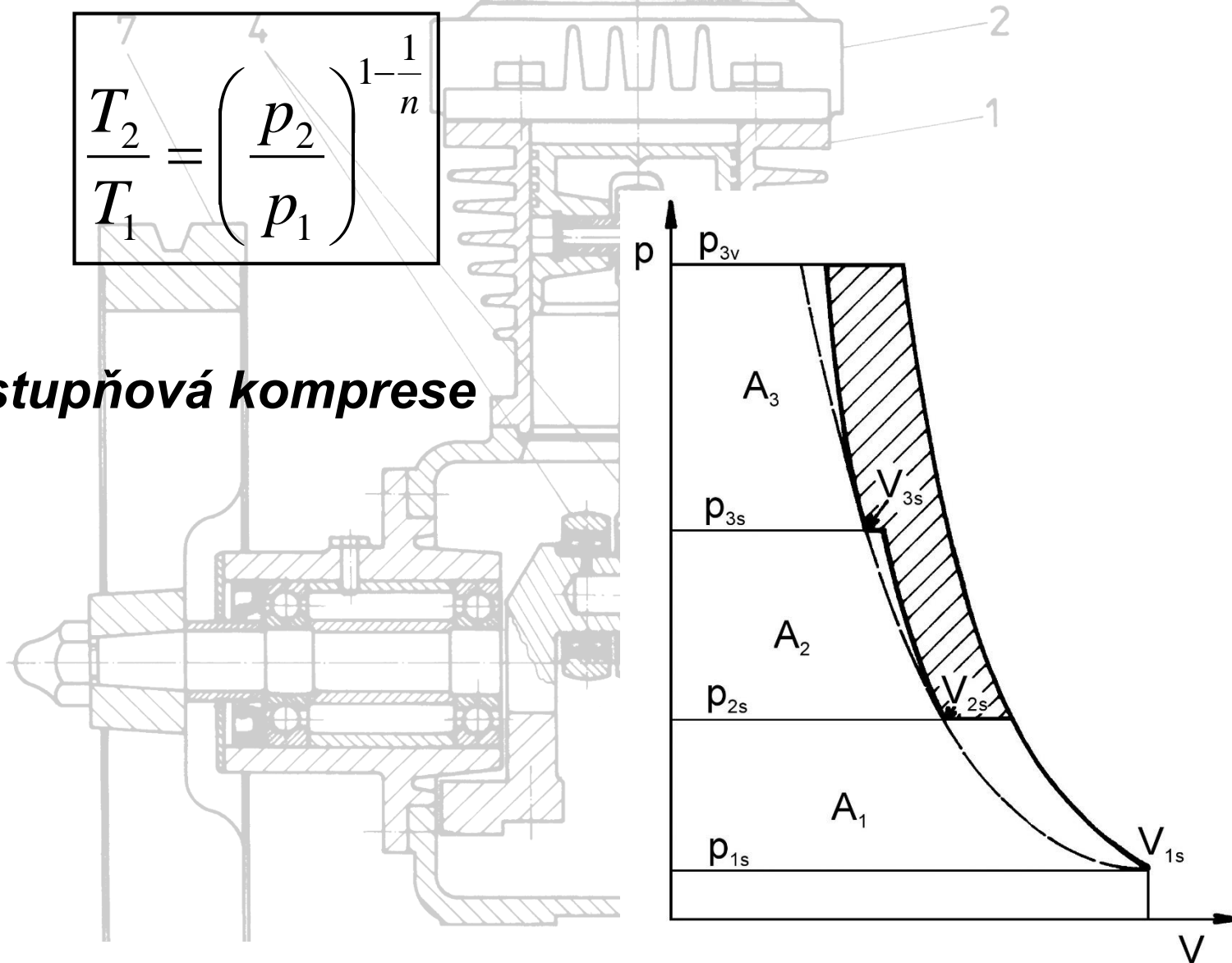


- ohřev plynu během komprese

$$p \cdot v^n = \text{const.}, \quad p v = \frac{RT}{M}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1 - \frac{1}{n}}$$

Vícestupňová komprese



Provedení kompresorů pro technické plyny

Kyslíkové kompresory

- prudká reakce kyslíku s olejem a při vysoké teplotě i s některými kovy
- stlačovaný kyslík se nesmí dostat do kontaktu s žádným mastným povrchem
- malé průtoky – membránové kompresory s ocelovou membránou
- bezmazné pístové kompresory, labyrintové ucpávky, měkké uhlíkové nebo teflonové ucpávky
- bezmazné šroubové kompresory nebo turbokompresory

Acetylenové kompresory

- nesmí pracovat s vysokým kompresním poměrem
- při teplotě nad 90°C se acetylen rozkládá na C a H₂ → 12x nárůst tlaku, teplota až 3600°C
- acetylen se vzduchem vytváří výbušnou směs → vodokružné kompresory
- acetylen nesmí přijít do styku s Cu, Hg, Ag → výbušný acetylid

Chlorové kompresory

- nemohou být mazané olejem → chlor olej rozkládá, starší mazané koncentrovanou H₂SO₄
- bezmazné kompresory
- vlhký chlor je značně korozivní
- nad 100°C – chlorová koroze oceli, litiny a Cu
- nad 270°C – exotermická reakce Fe a Cl₂ → chlorový pořár

