



# TECHNOLOGIE OCHRANY OVZDUŠÍ

## Přednáška č. 2

- Přednášející: Ing. Marek Staf, Ph.D.

tel. 220 444 458; e-mail [marek.staf@vscht.cz](mailto:marek.staf@vscht.cz)

budova A, ústav 216, č. dveří 162

# Osnova přednášky



- Původ prachových částic a emisní limity
- Zdravotní rizika expozice TZL
- Rozdělení systémů odlučování TZL
- Mechanické procesy
- Filtrace
- Elektrostatické procesy

# Emisní limity TZL (PM)



## ■ Příloha 10 Zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb.

- Suché spaliny, 273,15 K / 101,325 kPa,  $O_{2, \text{ref.}} = 10 \%$  a pro ústřední vytápění 13 %). Neuvedené zdroje mají specifické emisní limity.

Palivo	Jmenovitý tepelný příkon (kW)	Mezní hodnoty emisí TZL $\text{mg.m}^{-3}$
Biologické	$\leq 65$	150
	>65 až 187	150
	>187 až 300	150
Fosilní	$\leq 65$	125
	>65 až 187	125
	>187 až 300	125

- Imisní limit EU od 1.1. 2015: roční průměr  $\text{PM}_{2,5} = 25 \mu\text{g.m}^{-3}$

# Emisní limity TZL (PM)



## ■ Vyhláška č. 415/2012 Sb.

Druh paliva	Specif. em. lim. [mg.m <sup>-3</sup> ]		
	do 31. 12. 2017		
	>0,3-1	>1-5	>5-50 MW
Pevné palivo obec	250	250	150 100 fluidní 250 biomasa
Dřevotř. překl. dřevovl.	150	150	150
Kapal palivo	-	100	100
Plyn a zkapal plyn	-	-	50

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m <sup>3</sup> ]					
	do provozu do 7. ledna 2014			do provozu po 7. lednu 2014		
	50-100	> 100-300	> 300 MW	50-100	> 100-300	> 300 MW
Pevné	30	25	20	20	20	10
Biom.	30	20	20	20	20	20
Rašel.	30	20	20	20	20	20
Kapal.	30	25	20	20	20	10
Zkapal plyn	5	5	5	5	5	5
Plyn obec.	5	5	5	5	5	5
Zemní plyn	5	5	5	5	5	5
Koks. plyn	30	30	30	30	30	30
Vysok. plyn	10	10	10	10	10	10
Plyn zplyň. rafinér zbytků	5	5	5	5	5	5

# Původ emisí tuhých látek



- **Spalovací procesy**
  - Anorganické složky v podobě popílku;
  - Organické složky ve formě sazí;
- **Ostatní průmyslové technologie**
  - Mechanické operace v průmyslu (broušení, řezání, vrtání, drcení, mletí, sítování atd.);
- **Zemědělství a lesnictví**
  - Zpracování suchých rostlinných materiálů (sítování, pneumatická doprava, drcení, mletí apod.);
- **Těžba nerostných surovin**
  - Anorganický prach z důlní a lomové činnosti apod.;
- **Doprava**
  - Organické složky zejm. ze spalování ve vznětových motorech;
  - Anorganické složky z mechanické abraze (brzdové obložení aj.)

# Zdravotní rizika expozice TZL



- **Studováno podezření z vyvolávání těchto onemocnění (Zdroj: WHO)**
  - Bronchiální astma;
  - Nádory plic;
  - Choroby kardiovaskulárního systému (infarkt myokardu, cévní mozková příhoda, embolie);
  - Chronická onemocnění horních a dolních cest dýchacích (alergie, chronická alergická rýma);
  - Předčasné porody, defekty plodu a samovolné potraty;





# Přehled systémů odlučování TZL



- **Volba vhodného odlučovače závisí na:**

- Distribuci velikostí odlučovaných částic;
- Požadované účinnosti separace (tzv. odlučivosti  $\eta$  „éta“);

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{ex}}{C_{in}}$$

$\eta$  se dělí na:

$\eta$  celková

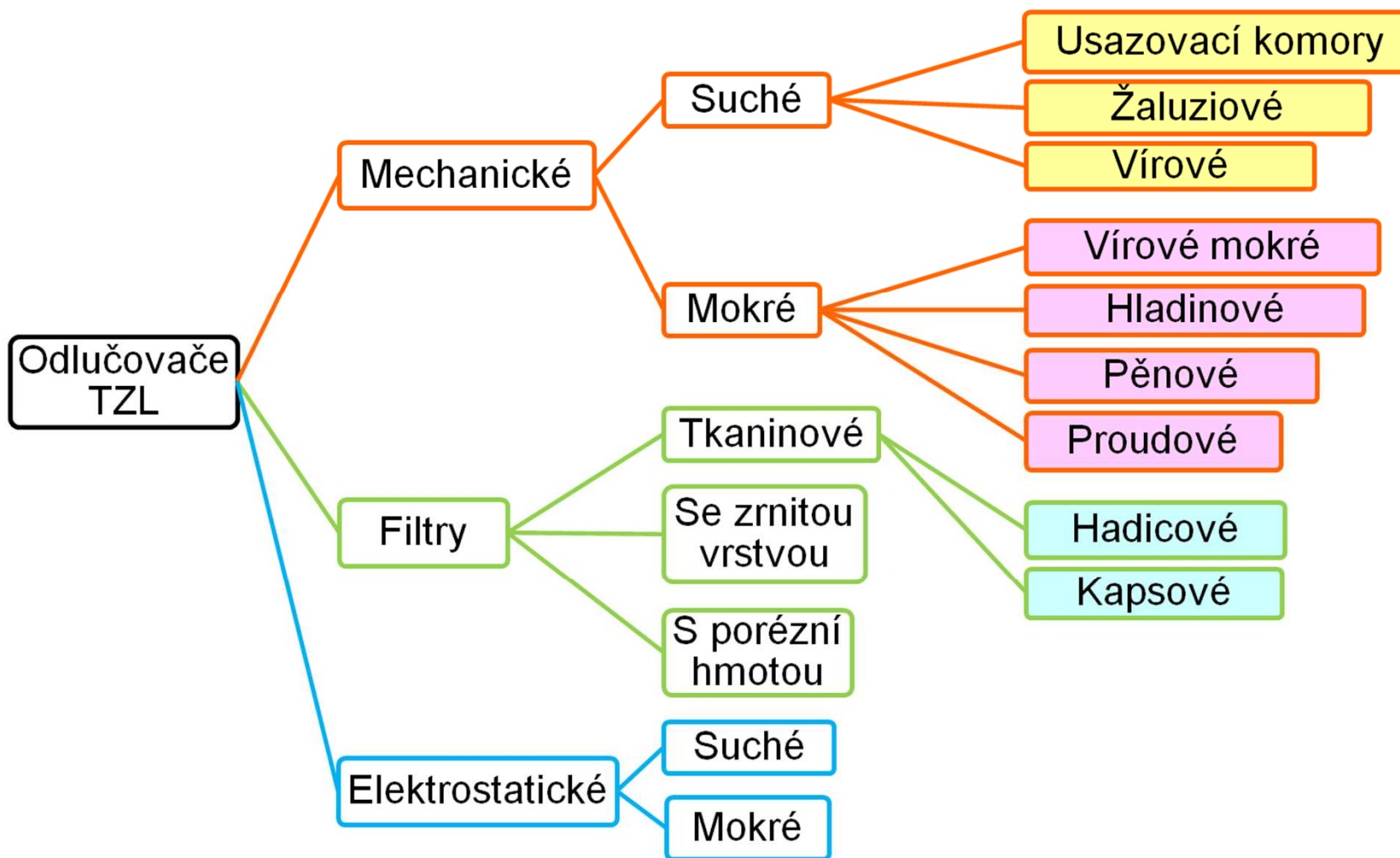
$\eta$  frakční

- Tvaru a dalších fyzikálních vlastnostech částic
- Maximální akceptovatelné tlakové ztrátě zařízení
- Požadované hodnotě hodinového průtoku plynu odlučovačem
- Teplotě plynu
- Dalšíh parametrech konkrétní instalace

# Přehled systémů odlučování TZL



## ▪ Rozdělení odlučovačů dle principu funkce





# Mechanické odlučovače TZL



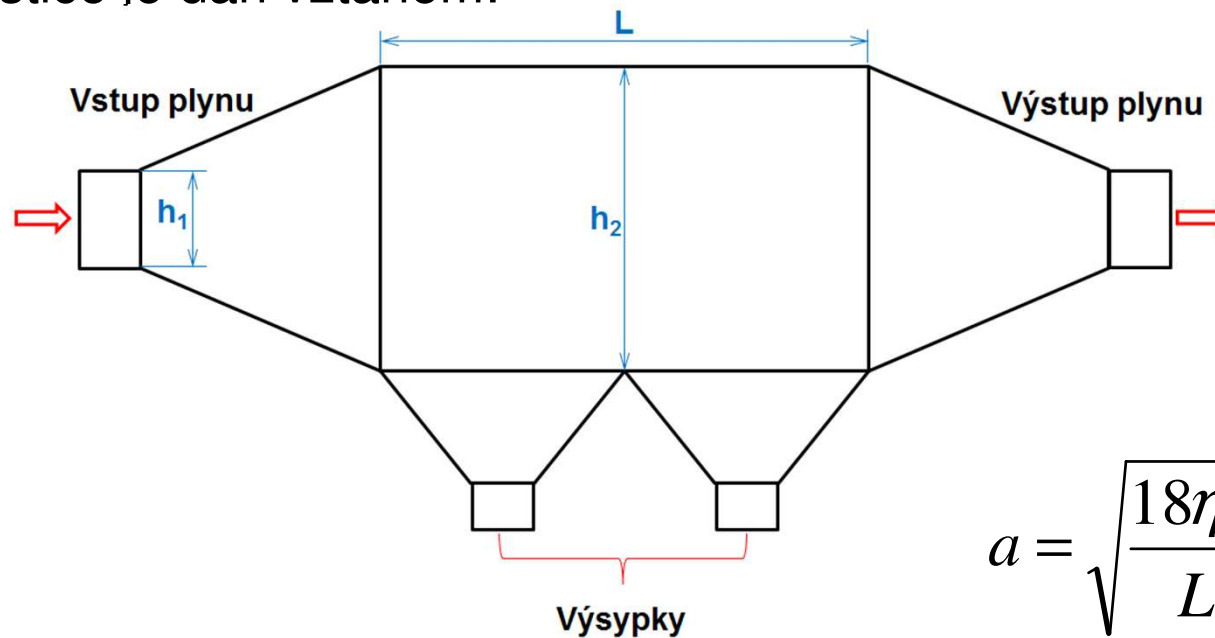
- **Společné vlastnosti mechanických odlučovačů:**
  - Jednoduchá technická konstrukce;
  - Nízké investiční náklady;
  - Nízké provozní náklady (spotřeba el. energie, údržba);
  - Nízký stupeň separace (odlučivost) submikronických částic;
  - Suché systémy vhodné pro plyny s vysokou teplotou;
  - Časté použití jako první stupeň kombinovaných systémů
- **Výhody mokrých systémů oproti suchým:**
  - Vyšší odlučivost;
  - Možnost společného separace TZL a některých plynů;
  - Použitelnost i pro lepivé a abrazivní částice;
- **Nevýhody mokrých systémů oproti suchým:**
  - Vysoká spotřeba vody, navíc s nutností kalového hospodářství;
  - Zvýšená koroze zařízení.

# Mechanické suché odlučovače



## ■ Usazovací komory (settling chambers)

- Separace poklesem rychlosti rozšířením průřezu ( $v_2 < 1$  m/s);
- Vhodné pouze jako předstupeň další separace; minimální průměr částice je dán vztahem:



$$a = \sqrt{\frac{18\eta h_2 v_2}{L\varphi g}}$$

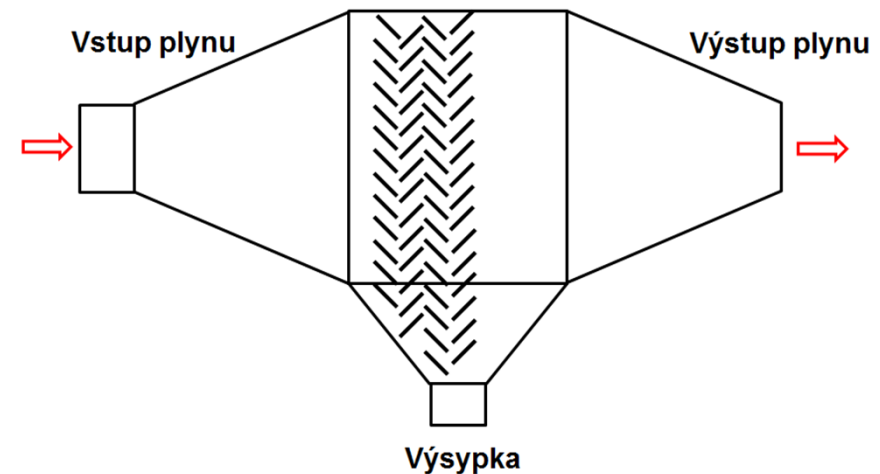
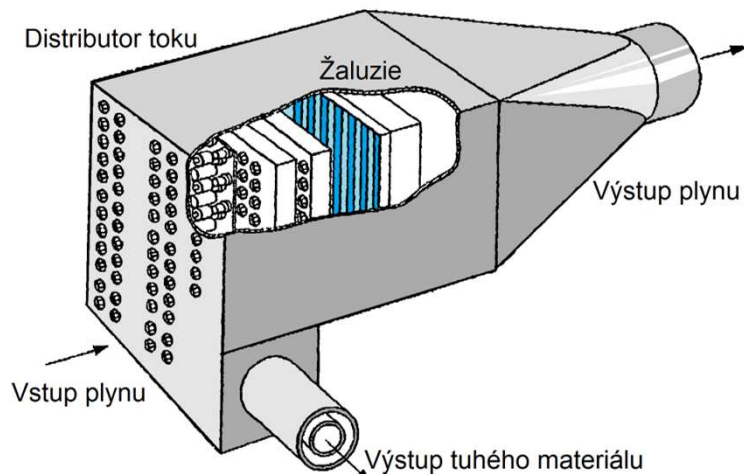
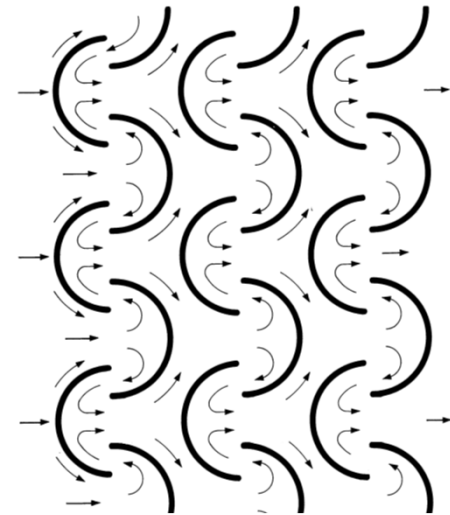
- Ve vzorci je  $\alpha$  průměr částice;  $\eta$  dynamická viskozita plynu;  $\varphi$  měrná hmotnost plynu;  $g$  tíhové zrychlení.

# Mechanické suché odlučovače



## ■ Žaluziové (setrvačné) odlučovače (inertial separators)

- Tvarově podobné usazovacím komorám
- Na žaluziích změna směru proudění a redukce rychlosti průtoku na cca 10 %.
- Tím se dosahuje pádové rychlosti částic.
- Pouze předseparace (nízká účinnost)
- Vhodné pro suché plyny (i horké) a nelepivé č.
- Řada tvarů a roztečí lamel



# Mechanické suché odlučovače



## ■ Vírové odlučovače (cyklony, cyclones)

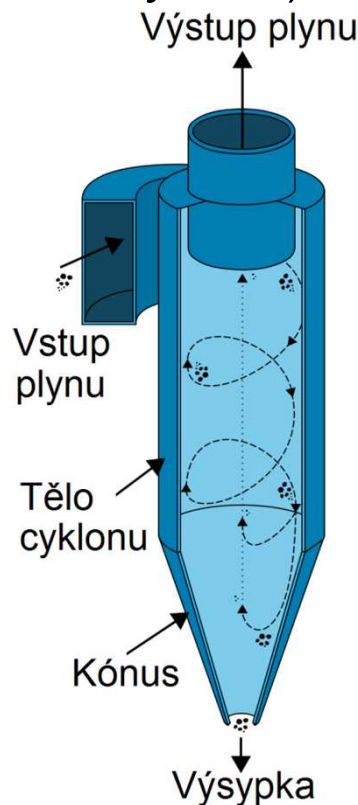
- Odloučení odstředivou silou, kdy částice směřují na boční stěny.
- Účinnost klesá s poklesem rychlosti pod vypočtenou optimální úroveň dané konstrukce.
- Nejrozšířenější mechanické odlučovače.
- Nevhodné pro abrazivní prach (prodření pláště)
- Vhodné pro nelepivý prach a též pro horké plyny.
- Často jsou řazeny do sestav, tzv. multicyklonů.
- Multicyklony jsou kompaktnější a mají vyšší účinnost v širším rozmezí průtoku (Menší průměr článku  $\Rightarrow$  Vyšší obvodová rychlost  $\Rightarrow$  Vyšší odlučivost)
- Nevýhodou multicyklonu je vyšší tlaková ztráta.

# Mechanické suché odlučovače

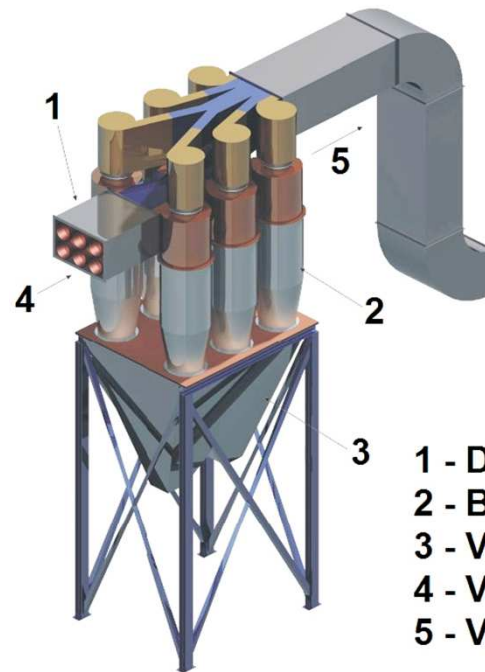


## ■ Vírové odlučovače (cyklony, cyclones)

- Rotační pohyb je docílen buď tečným vstupem plynu (tangenciální systém) nebo pomocí lopatkové vestavby u osového vstupu.



Tangenciální cyklon



Řadový multicyklon



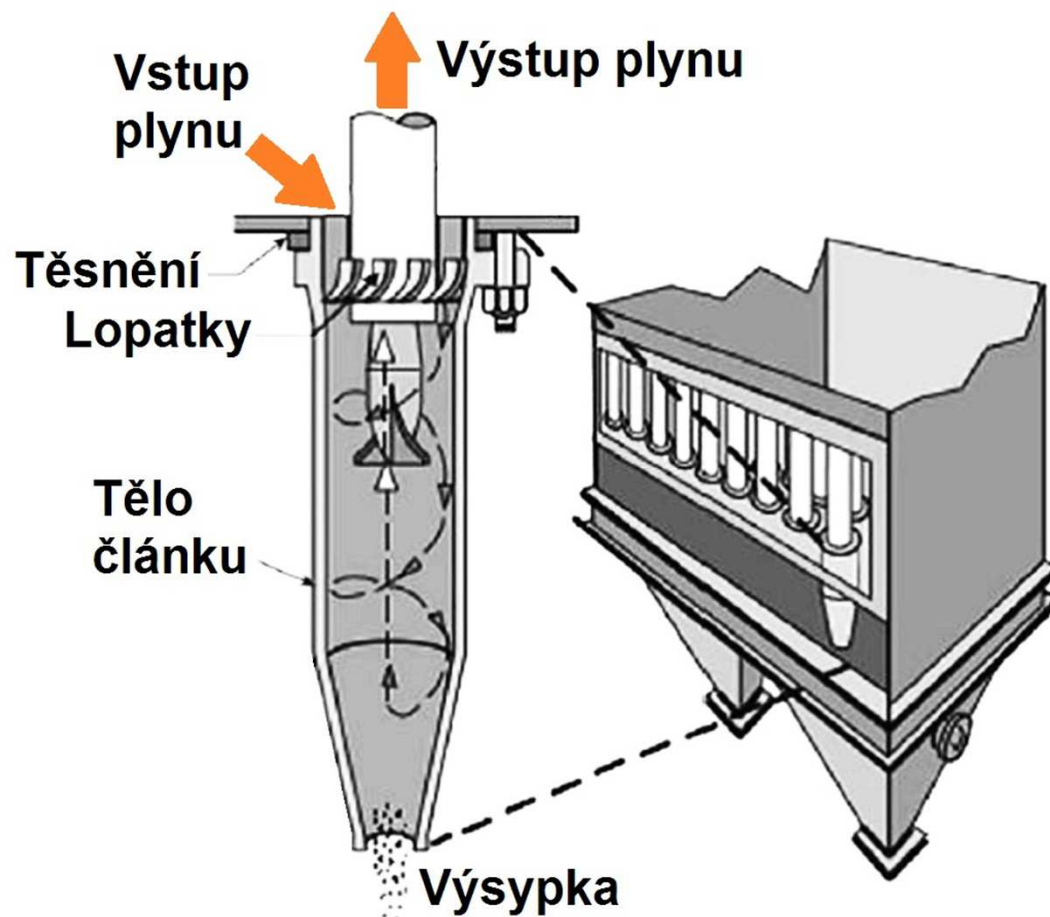
Kruhový multicyklon

- 1 - Distributor toku
- 2 - Baterie cyklonů
- 3 - Výsypka
- 4 - Vstup plynu
- 5 - Výstup plynu

# Mechanické suché odlučovače



- Vírové odlučovače (cyklony, cyclones)



Multicyklon s axiálními články v boxu



# Mechanické mokré odlučovače



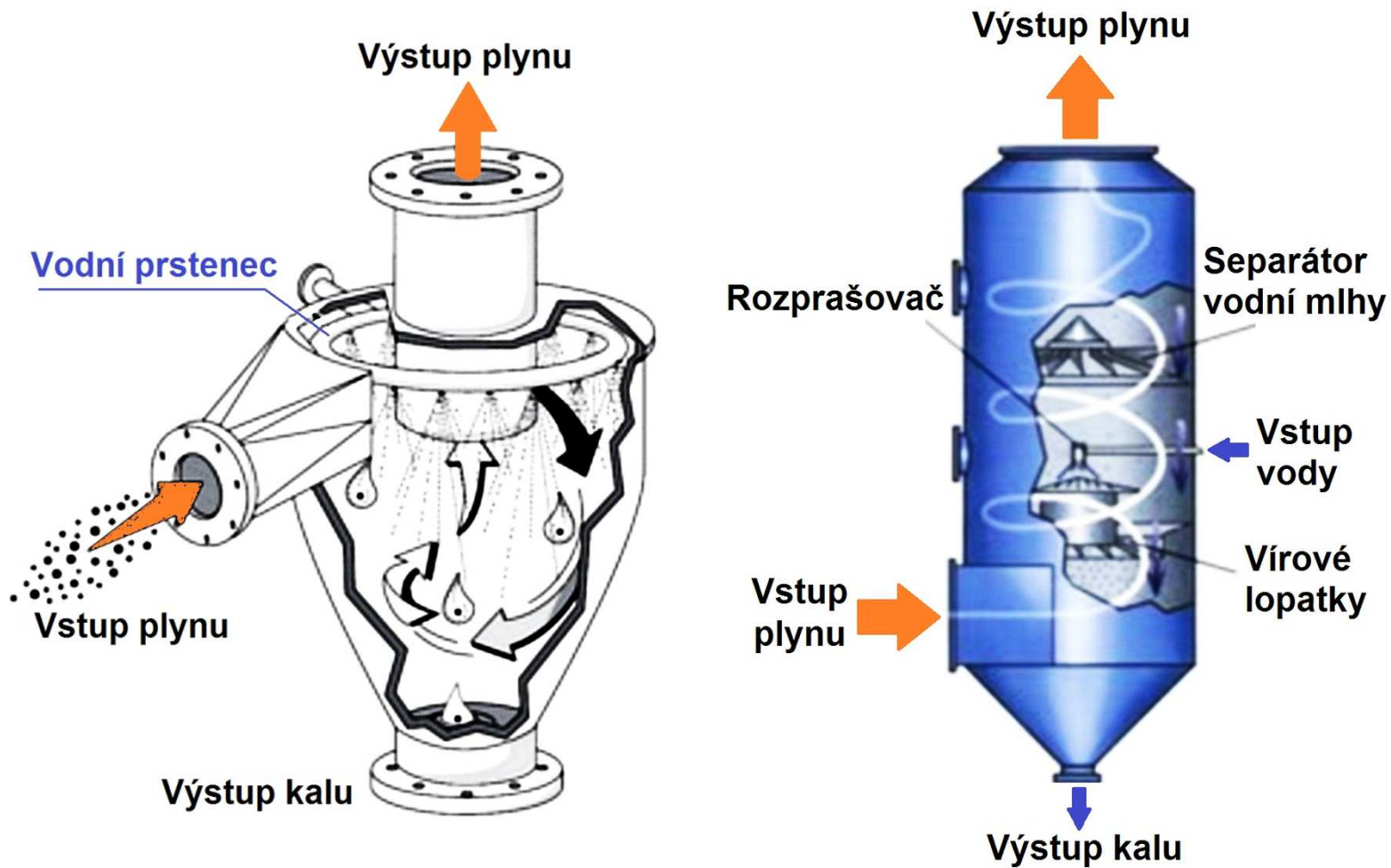
## ■ Vírové mokré odlučovače (Cyclonic spray scrubbers)

- Prach je ze stěn pláště cyklonu omýván rozprašovanou vodou.
- Suspenze částic a vody je ve formě kalu odváděna patou zařízení.
- Nejrozšířenější konstrukce užívají osový vstup plynu s usměrněním proudu pomocí lopatkové vestavby.
- Aby byla zachována účinnost a zároveň se eliminovalo riziko ucpání systému se doporučuje neužívat pro hmotnostní konc. TZL  $> 30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .
- Zařízení se vyznačuje velkou spotřebou vody, v rozsahu  $0,1 - 0,4 \text{ kg}_{\text{vody}}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{plynu}}$ .
- Vstupní rychlost plynu se pohybuje v oblasti 4 m/s.

# Mechanické mokré odlučovače



- Vírové mokré odlučovače (Cyclonic spray scrubbers)



# Mechanické mokré odlučovače



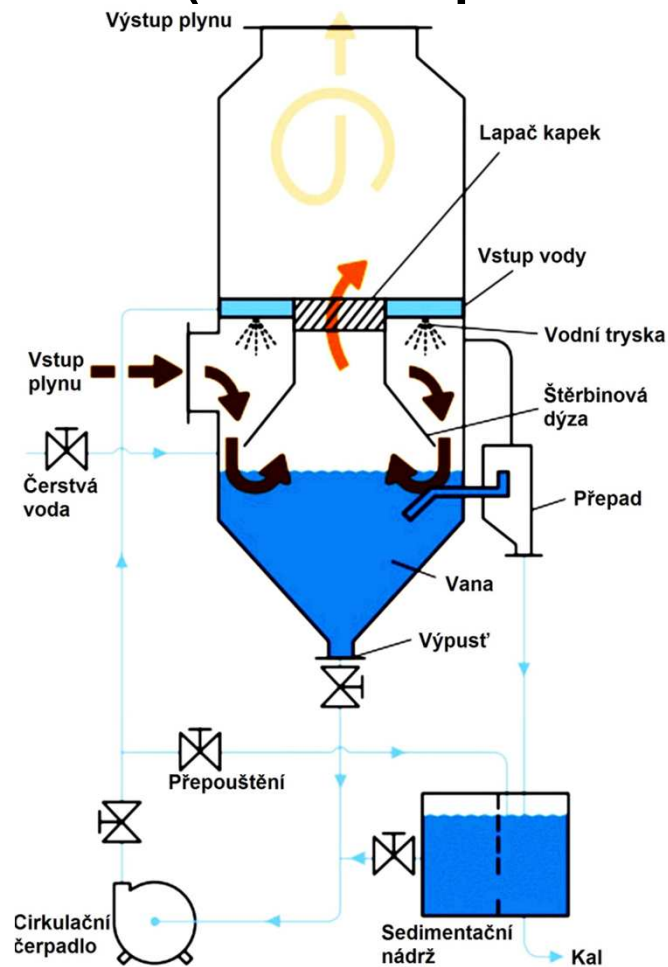
## ■ Hladinové odlučovače (Level wet particulate scrubbers)

- Vysoký stupeň separace v širokém rozsahu velikostí částic;
- Minimální mez odlučivosti je cca 1  $\mu\text{m}$ ;
- Nevýhoda: velká tlaková ztráta cca 15 kPa;
- Výhoda: velikost tlakové ztráty málo závislá na průtoku;
- Hladina musí být správně nastavena!
- Princip: plyn je veden štěrbinou těsně nad hladinou vody;
- Vzniká tříšť s vysokou účinností separace.
- Obvyklé jsou 2 způsoby řešení: systém s kolmým vedením vůči hladině a systém s tečným (tangenciálním) vedením (častější);
- V horní části každého zařízení je instalován lapač vodních kapek, např. lamelový.

# Mechanické mokré odlučovače



## ■ Hladinové odlučovače (Level wet particulate scrubbers)

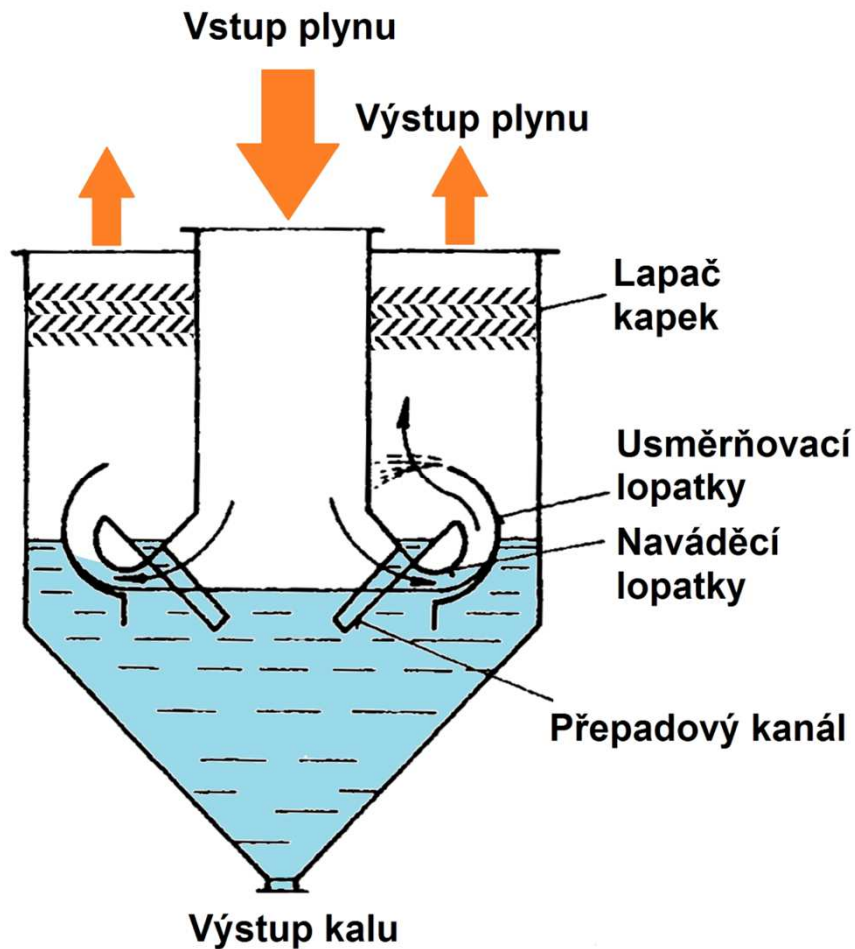


Odlučovač s kolmým vstupem (D Turbulaire firmy Babcock & Wilcox)

# Mechanické mokré odlučovače



## ■ Hladinové odlučovače (Level wet particulate scrubbers)



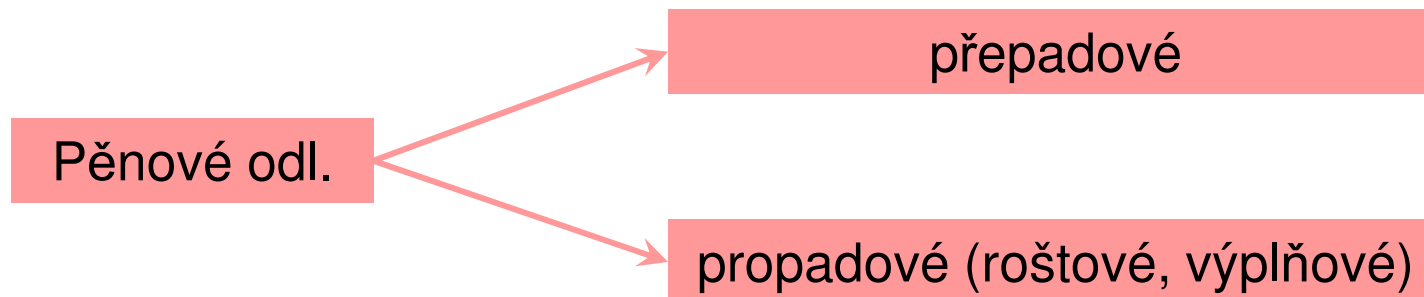
Odlučovač s tečným vstupem (vpravo ACO Ltd. Wet Scrubber)

# Mechanické mokré odlučovače



## ■ Pěnové odlučovače

- V podstatě patrové scrubbery s uspořádáním podobným absorpčním kolonám;



- Vhodné pro smáčivé prachy, ale nevhodné pro prach cementující;
- Lineární rychlost plynu cca 2 m/s, spotřeba vody od 0,3 kg.m<sup>-3</sup> pro koncentrace prachu do 30 g.m<sup>-3</sup>, do 0,6 kg.m<sup>-3</sup> pro koncentrace do 500 g.m<sup>-3</sup>
- Výhody: možnost zpracovat plyn o koncentraci prachu do 500 g.m<sup>-3</sup>; mez odlučivosti až 1,5 μm na jedno patro;
- Nevýhody: relativně velká tlaková ztráta (cca 300 Pa/patro); úzký rozsah průtoku plynu cca ± 20 % oproti konstrukčnímu optimu.



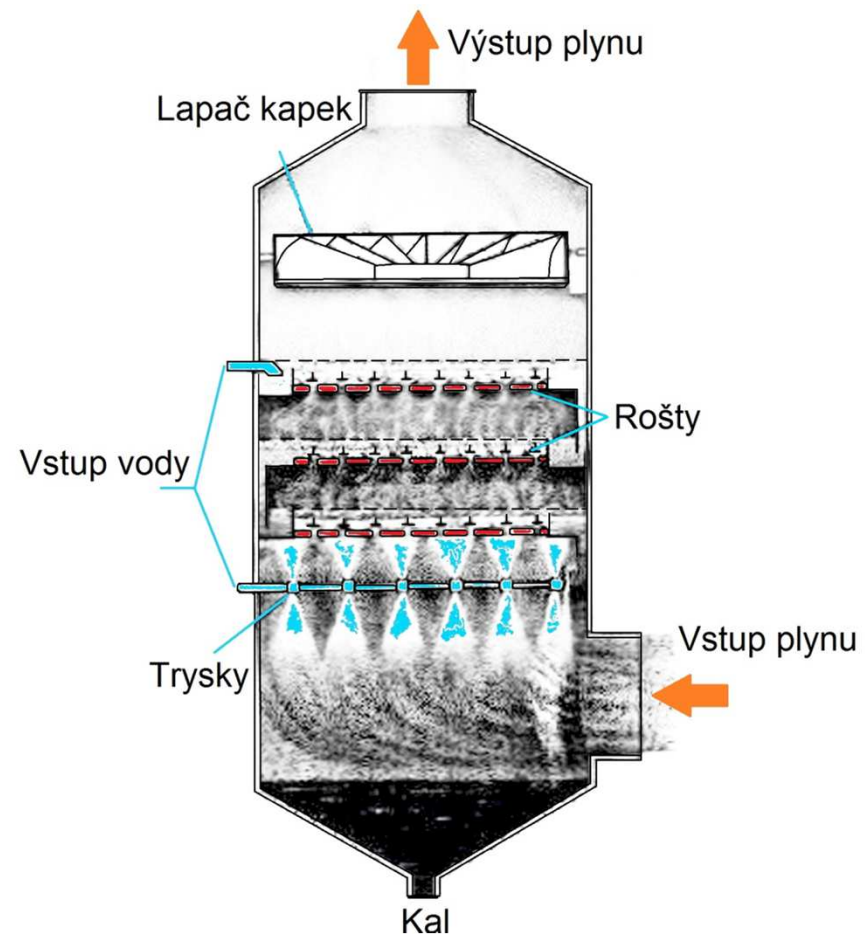
# Mechanické mokré odlučovače



## ■ Pěnové odlučovače



Dvouvěžový odlučovač se 4 patry

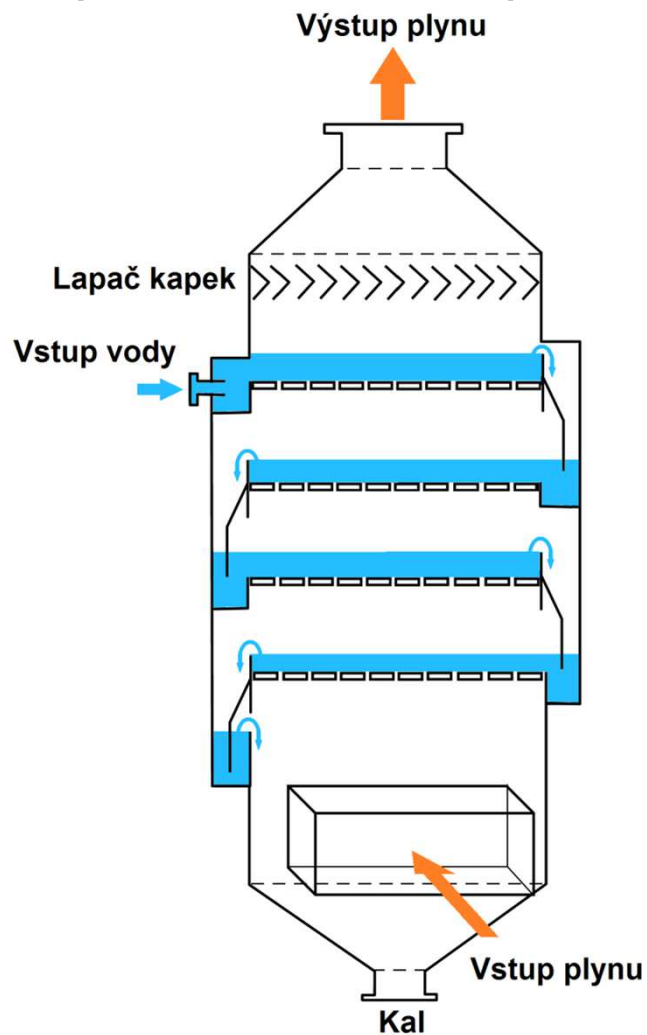


Přepadový s přidavnými tryskami

# Mechanické mokré odlučovače



- Pěnové odlučovače (Foam Scrubbers)



Přepadový se 4 patry

# Mechanické mokré odlučovače



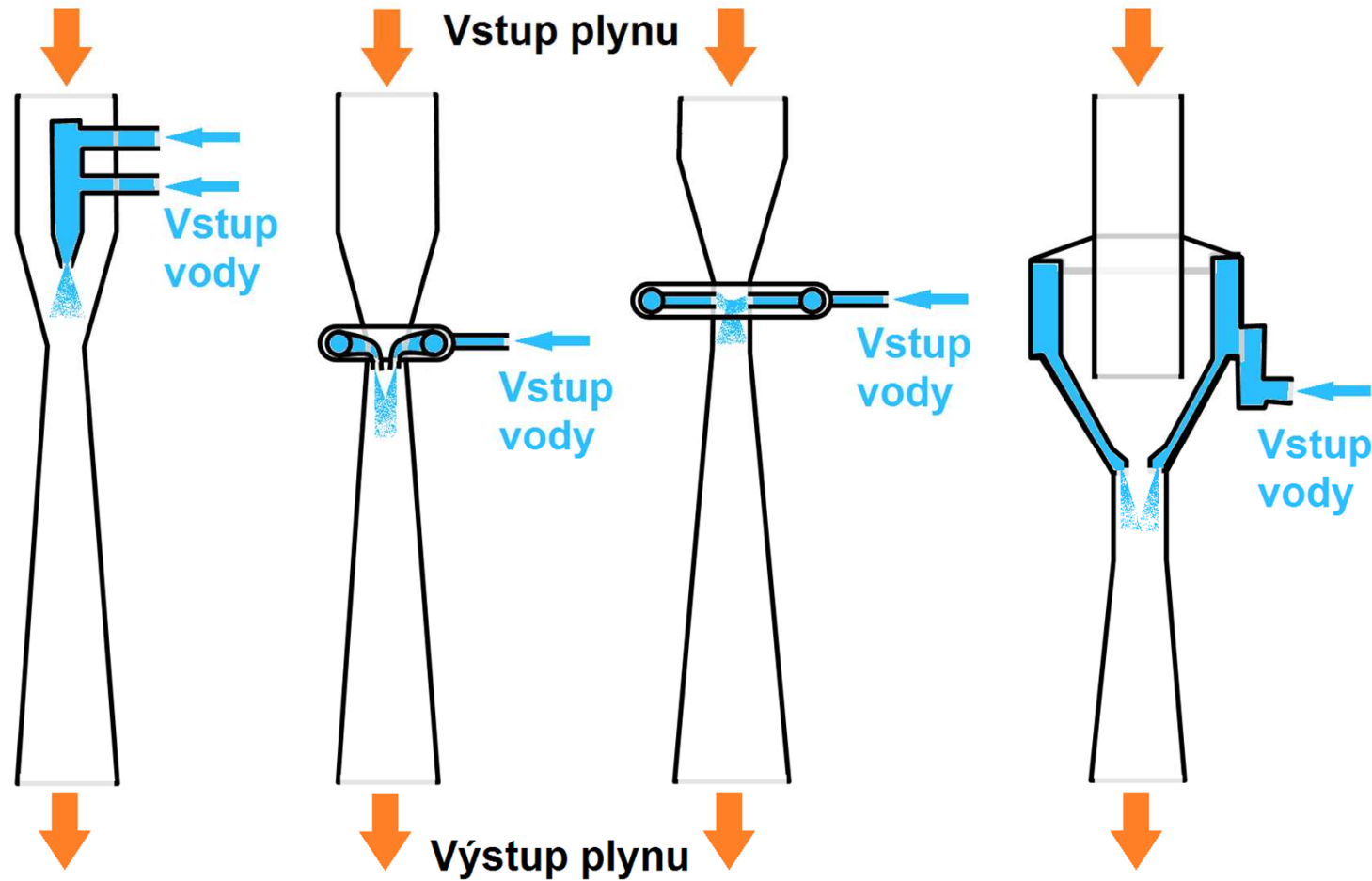
## ■ Proudové odlučovače (Jet Venturi Scrubbers)

- Obvyklé konstrukce vycházejí z Venturiho dýzy (Venturi Nozzle).
- Odloučení setrvačností mezi pomaleji vtékající kapalinou a rychle proudícím plynem (až 100 m/s) a dále turbulencemi v difuzoru;
- Přívod vody a tvar difuzoru řešen mnoha různými konstrukcemi;
- Nejvyšší separace docílena u malých průměrů dýzy;
- V trysce tříštění do mikronových kapek;
- Výhody: odloučení i submikronových částic, vysoká účinnost;
- Nevýhody: velká tlaková ztráta až 5 – 10 kPa, velká spotřeba vody v rozmezí 0,7 – 2,0 dm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> plynu a velká spotřeba elektrické energie až 5 kWh / 1 000 m<sup>3</sup> plynu.

# Mechanické mokré odlučovače



## ■ Proudové odlučovače (Jet Venturi Scrubbers)



Vstup vody: osový

osový věnec

kolmý věnec

volný vtok

Výstup plynu

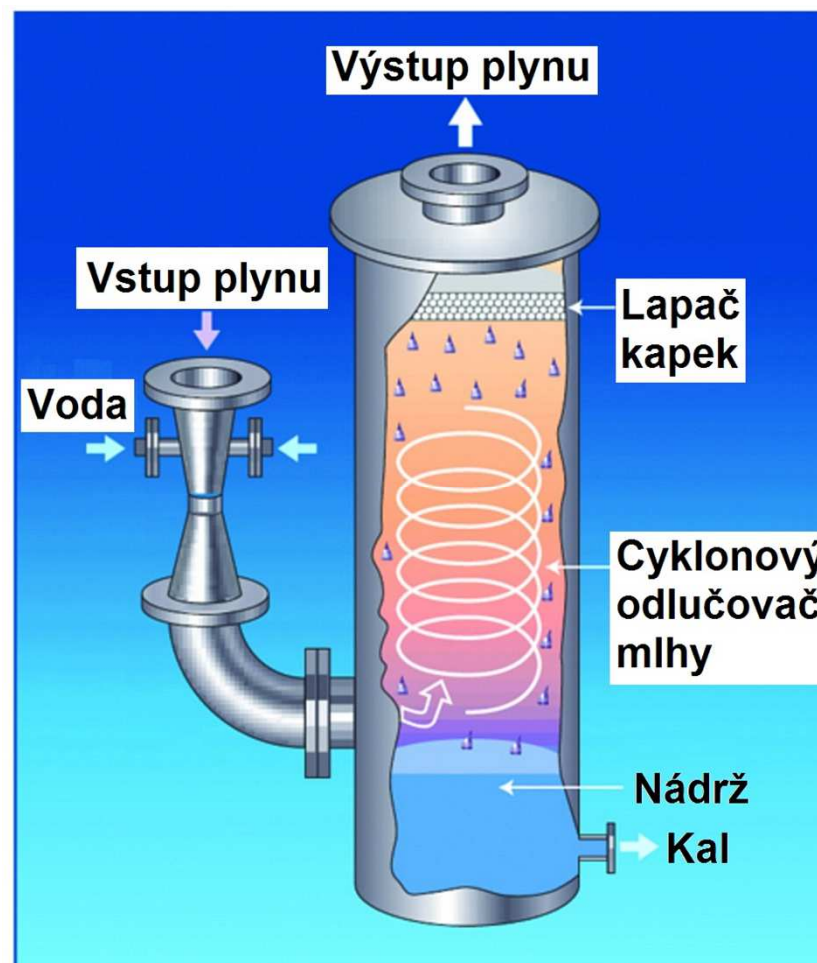
# Mechanické mokré odlučovače



## ■ Proudové odlučovače (Jet Venturi Scrubbers)



Reálná instalace systému Venturi



# Filtry



## ■ Tkaninové odlučovače (filtry)

- Filtrační materiál vláknitý (tkaniny), zrnitá hmota nebo porézní hmota;
- Po náběhu se tvoří filtrační koláč, který je vlastní filtrační vrstvou pro menší částice.
- Odlučování probíhá jednak na povrchu vrstvy a jednak uvnitř vrstvy. Systém funguje do koncentrace prachu  $< 100 \text{ g.m}^{-3}$
- Filtry pro čištění atmosférického vzduchu nejsou regenerovány, průmyslové filtry ano.
- Tkaniny vyráběny vpichováním (tvorba otvorů) nebo tkaním;
- Materiál tkanin: přírodní (bavlna, vlna), polymerní (PA, PES, expandovaný PTFE, PE aj.), anorganické (skelná vlákna, drátky);
- Teplotní odolnost: přírodní mat., PA, PP  $< 90 \text{ }^\circ\text{C}$ , PTFE  $< 280 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Prodyšnost tkaniny při tlakové ztrátě 200 Pa je řádově  $10^2 \text{ dm}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$



# Filtry



## ■ Tkaninové odlučovače (filtry)

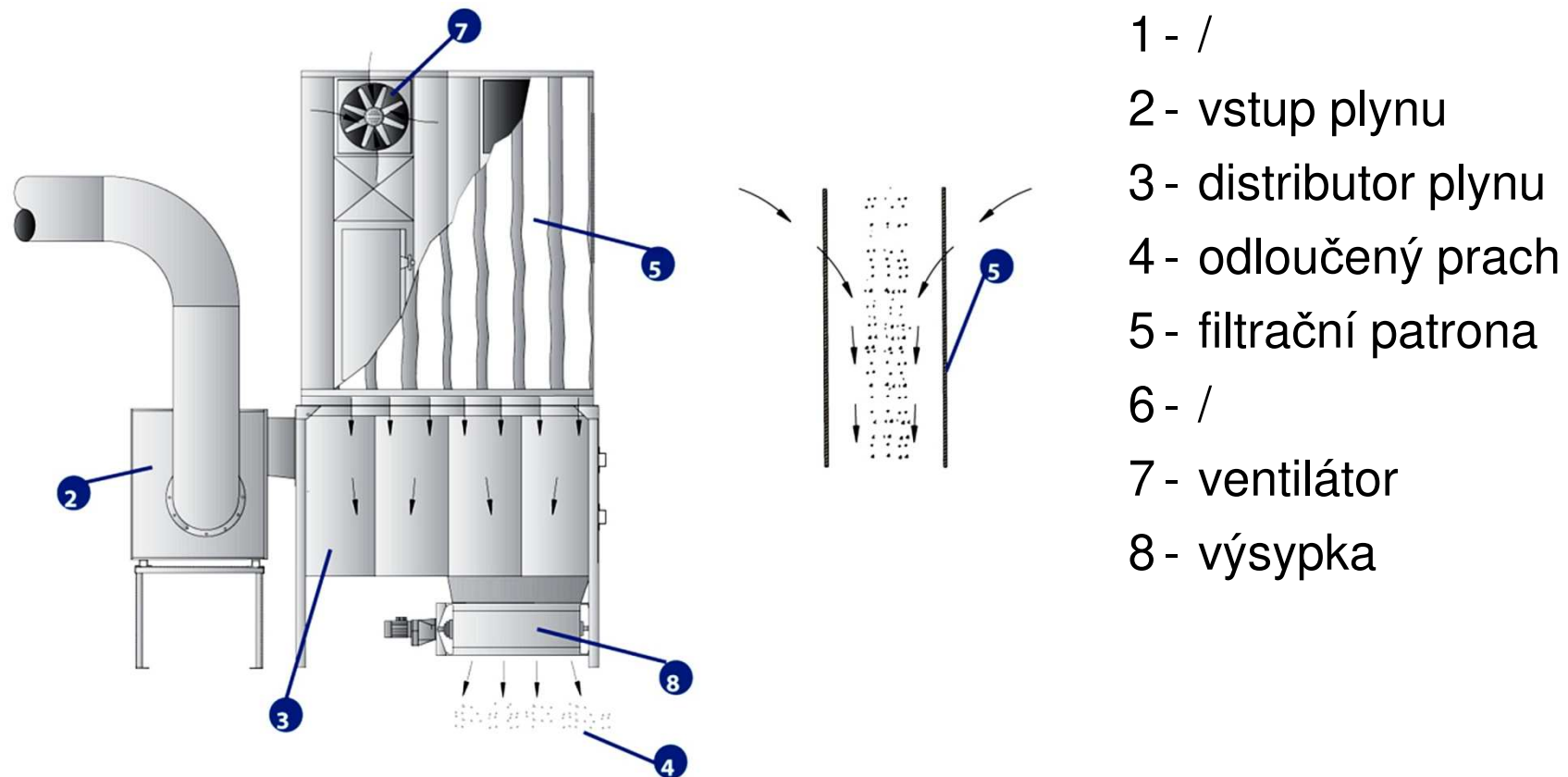
- U filtrů se kromě již uvedené odlučivosti uvádí tzv. jímavost, tedy hmotnost prachu na jednotku plochy filtru při maximální přípustné tlakové ztrátě;
- Pórovitost filtračního materiálu je objem pórů vztažený na objem celé filtrační hmoty.
- Na rozdíl např. od cyklonů u filtrů roste tlaková ztráta v průběhu procesu a s ní roste též odlučivost.
- Regenerace tkaninových filtrů se provádí zpětným proplachem čistým plynem (reverzace) nebo pulzním zpětným profukem.
- Reverzní tok se často doplňuje ještě mechanickými vibracemi nebo setřásáním.
- Technické provedení: hadicové (průměr 14 – 25 cm / délka cca 10 m / tlaková ztráta 800 – 1500 Pa) nebo kapsové (kratší, širší, vyztužené obručemi s obdobnou tl. ztrátou);

# Filtry



## ■ Tkaninové odlučovače (Bag filters, Hose filters, Sleeve filters)

– Regenerace automatická po dosažení limitní tlakové ztráty;

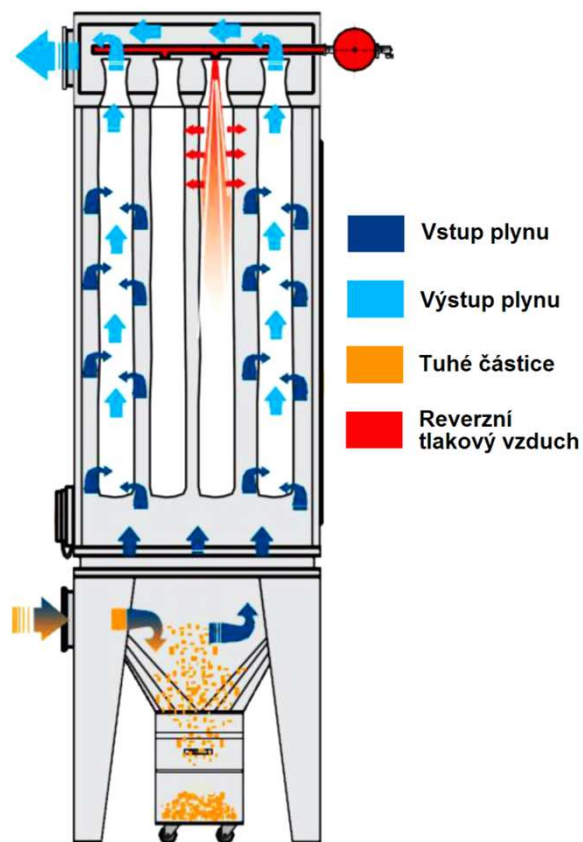


Reverzační regenerace

# Filtry



- **Tkaninové odlučovače (Bag filters, Hose filters, Sleeve filters)**
  - Regenerace automatická po dosažení limitní tlakové ztráty;



Pulzní regenerace



Baterie kapsových filtrů



# Filtry



- **Tkaninové odlučovače (Bag filters, Hose filters, Sleeve filters)**



Nové filtrační rukávce před instalací



Rozvod vzduchu na profuk



Podpůrné kostry filtru

# Filtry



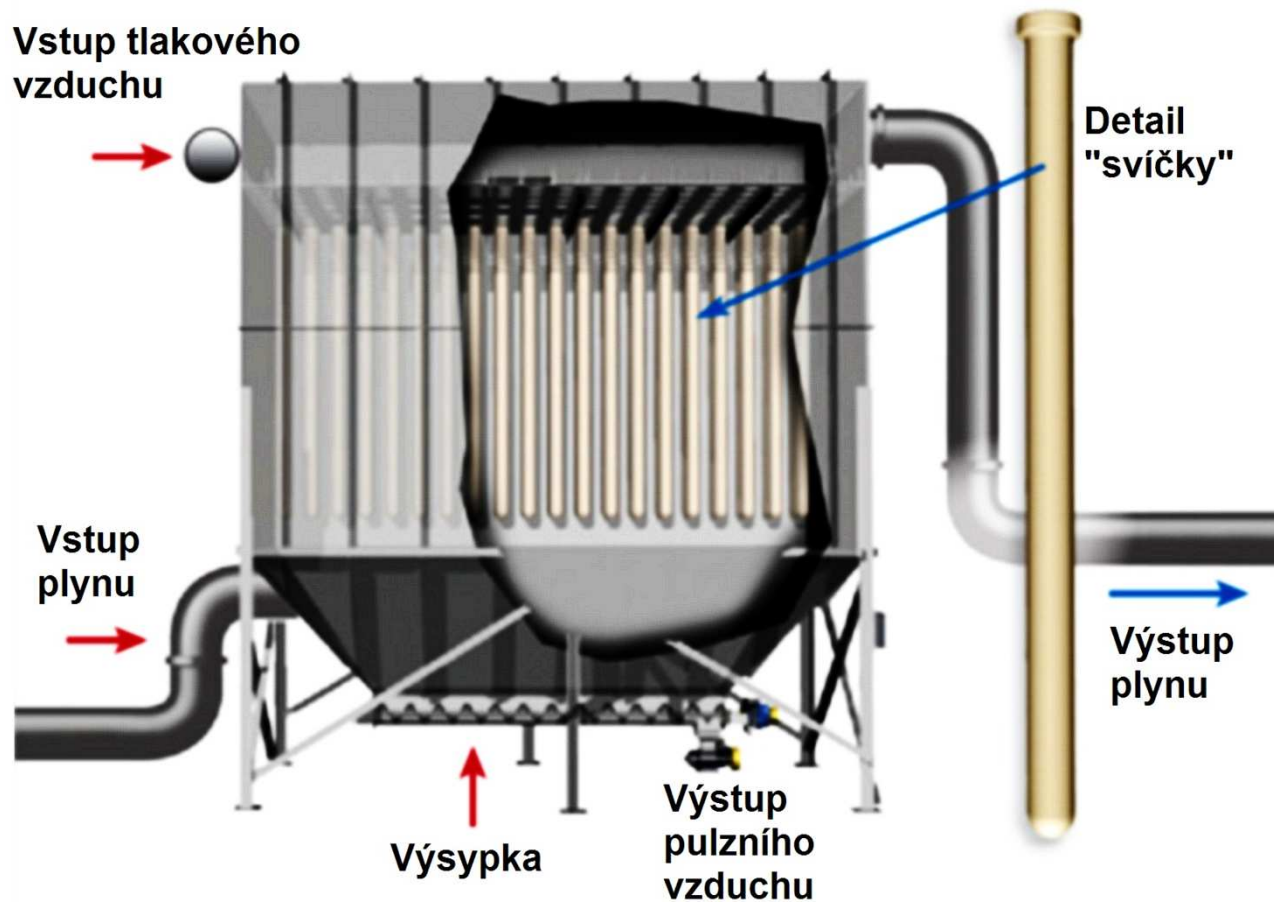
## ■ Filtry se zrnitou nebo porézní vrstvou

- Filtrační vrstva anorganická, z dolomitu, slinutého písku apod.;
- Možnost filtrovat do 500 °C;
- Některé vrstvy potažené teflonovou membránou pro zlepšení regenerace (na úkor max. pracovní teploty);
- U potahovaných vrstev vyšší počáteční tlaková ztráta, ale více konstantní v průběhu používání;
- Porézní vrstvy naneseny na nosné kostře formy trubky, desky apod.;
- Tloušťka vrstvy jsou jednotky mm až 1 cm;
- Regenerace probíhá pulzním profukem.

# Filtry



- Filtry se zrnitou nebo porézní vrstvou (Candle filter)



Svíčkový filtr



# Elektrostatické odlučovače



## ■ Suché elektrostatické odlučovače

- Transport prachu mezi nabíjecí (sršící) elektrodou a srážecí (sběrací) elektrodou;
- Nabíjecí elektroda má malý povrch; srážecí má velký povrch, na němž sedimentují částice.
- Nabitý prach je přitažen srážecí elektrodou, ztrácí na ní náboj a sedimentují.
- Napětí mezi sršící a srážecí elektrodou je 55 – 75 kV.
- Napětí musí být dostatečné, aby na sršící elektrodě vznikla stabilní korona tvořící ionty. Napětí nesmí překročit kritickou mez, kdy dojde přeskoku.
- Kritické napětí determinuje průměr sršící elektrody, složení plynu a vzdálenost mezi elektrodami.
- Nabíjecí elektrody v podobě drátů různého tvaru průřezu o vzdál. 15 – 20 cm, sběrací elektrody jsou deskové (vzdál. 30 – 40 cm).

# Elektrostatické odlučovače



## ■ Suché elektrostatické odlučovače

- Regenerace filtru probíhá mechanickým oklepáním kladivy na excentru;
- Obvyklé instalace: pro energetické kotle spalující uhlí, pro saze, spalovny TKO, rotační cementárenské pece, prach z celulózek aj.
- Výhody: malá tlaková ztráta 20 – 50 Pa, odlučování malých částic 0,01 – 60  $\mu\text{m}$ , vysoká separace > 99,9 %, funkce do vysoké teploty 380 °C;
- Nevýhody: velká energetická náročnost;
- Pozor: čím vyšší je elektrická rezistivita prachu, tím horší je migrační rychlost částice a tím větší musí být srážecí elektroda;
- Paradoxně obsah síry a vodní páry snižuje měrný el. odpor;

# Elektrostatické odlučovače



## ■ Suché elektrostatické odlučovače

- Odlučovací plocha srážecí elektrody  $A$  [ $\text{m}^2$ ] je dána Deutsch-Andersonovou rovnicí, kde  $w$  je migrační rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];
  - $\dot{V}$  průtok plynu [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{ex}}{C_{in}}$$

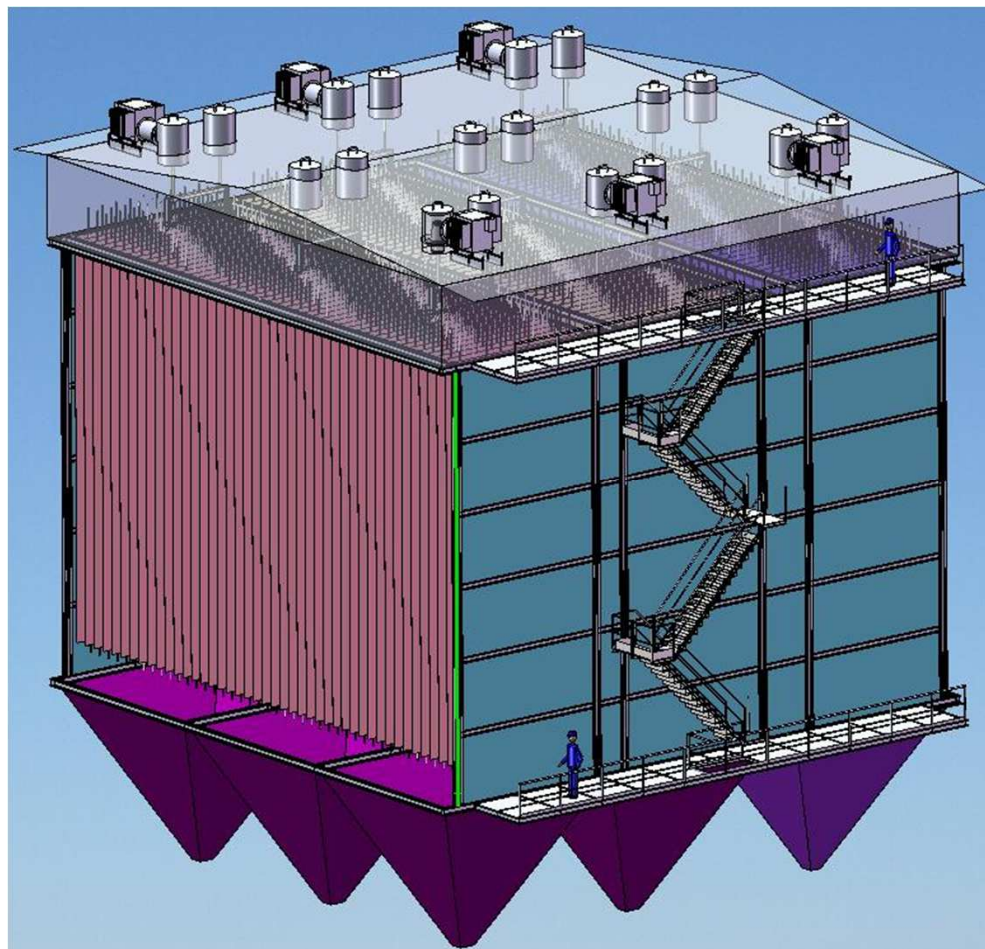
$$\eta = 1 - e^{-\frac{wA}{\dot{V}}}$$

$$A = \ln \frac{\dot{V}}{w(1-\eta)}$$

# Elektrostatické odlučovače



- Suché elektrostatické odlučovače

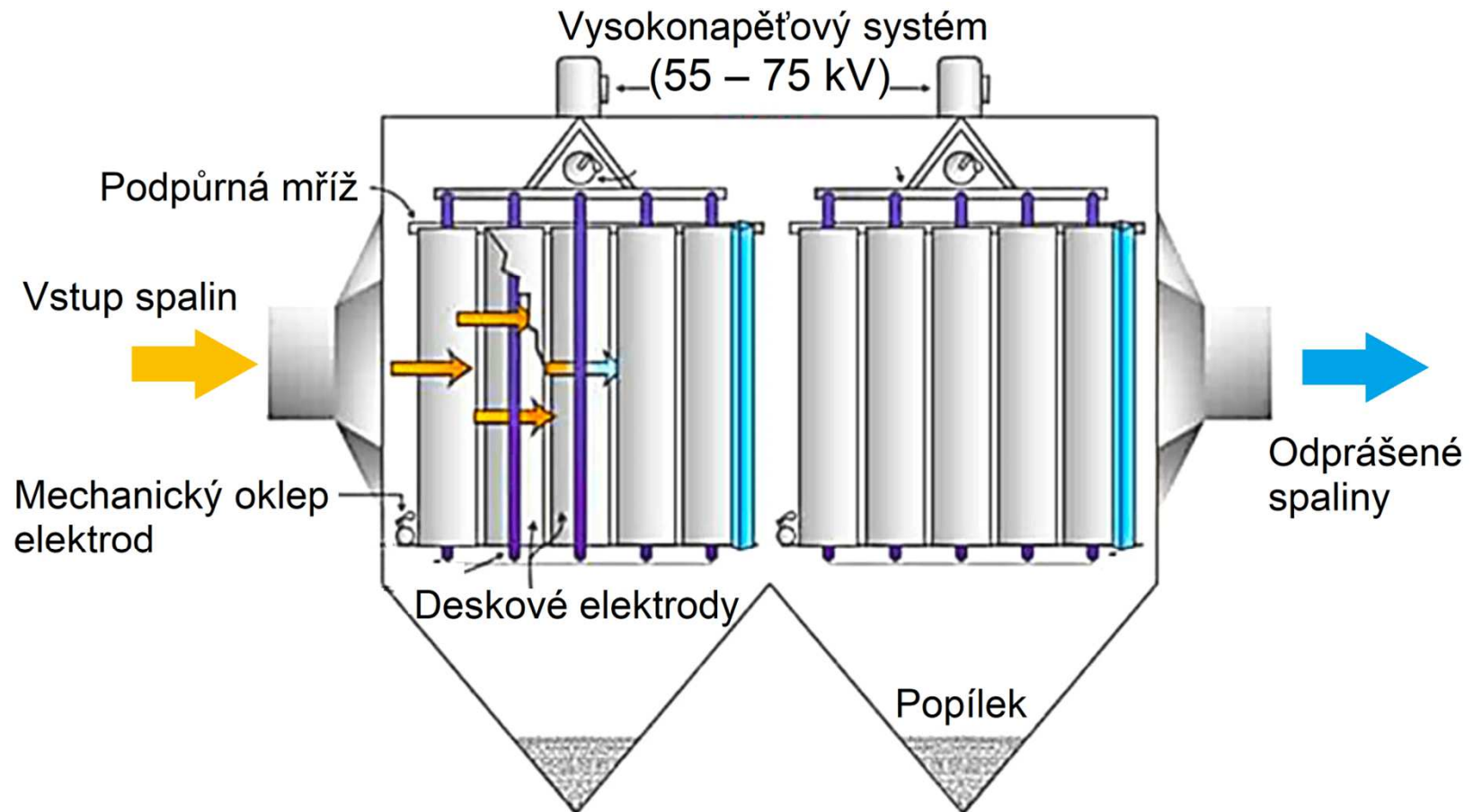


Elektrárenský elektrofiltr

# Elektrostatické odlučovače



## Suché elektrostatické odlučovače



Řez dvousekčním ESP



# Elektrostatické odlučovače



- **Suché elektrostatické odlučovače** (Zdroj: ČEZ, a.s.)

- Současný stav, příklad 200 MW kotel

Obsah popílku ve spalinách = 30 g.m<sup>-3</sup>

Produkce spalin = 1 050 000 m<sup>3</sup>/hod.

Hodinový výkon odlučovače = 31,5 tuny popílku

Denní výkon odlučovače = 756 tun popílku

Obr. Elektrárna Tušimice  
Spalinovody ústící do  
6 elektrofiltrů



<http://virtualni prohlidky.cez.cz/cez-tusimice/>



# Elektrostatické odlučovače



- Suché elektrostatické odlučovače na elektrárně Prunéřov II  
Pozn. Blok č. 5



ESP



spalinovod od ESP

# Elektrostatické odlučovače



## ■ Mokrý elektrostatické odlučovače

- Separace aerosolů anorganických kyselin i jiných agresivních látek;
- Konstrukce podobná suchým, ale nutnost použití speciálních materiálů;
- Sršící elektrody z kyselinovzdorné slitiny HASTELLOY® alloy C-276 (min. 57 %Ni, 16 % Cr; 16 % Mo, 5 % Fe, 4 % W, max. 2.5 % Co, 1 % Mn, 0,35 % V, 0.08 % Si, 0,01 % C), INCONEL® alloy C-276 apod.
- Zbytek odlučovače konstruován z oceli opatřené vrstvami olova, kyselinovzdornou vyzdívkou nebo kyselinovzdornou pryskyřicí.