



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka fakulta



Možnosti spätného získavanie tepla z technologických procesov

prof. RNDr. Milan Malcho, PhD.
Katedra energetickej techniky

Vysoké Tatry, 29. 11. 2011

Energetická efektívnosť

- ❑ energetická náročnosť v SR je v súčasnosti **3 - krát vyššia** ako je priemer EÚ-27, aj napriek jej klesajúcemu trendu
- ❑ historicky vysoko energeticky náročná štruktúra priemyslu

Ciele SR:

- **dosiahnuť postupné zníženie energetickej náročnosti na úroveň priemeru pôvodných EÚ-15**
- celkový národný cieľ úspor energie za 9 rokov (**2008 - 2016**): dosiahnuť kumulovanú hodnotu úspor vo výške **9 %** konečnej energetickej spotreby
- nasledujúcich 5 rokov (**2017 - 2021**) je cieľ úspor **0,5%** konečnej energetickej spotreby ročne
- pre roky **2022 - 2030** bol stanovený cieľ úspor na **0,1%** konečnej energetickej spotreby ročne

Odpadové teplo - DEZ

teplo z odpadového
vzduchu a spalín



vzniká v rôznych technologických
procesoch priemyselnej
a energetickej výroby

najdôležitejší druhotný
energetický zdroj tepla



zníženie spotreby energie
v technologických procesoch

rastom cien energie



ekonomickejším sa stáva aj spätné
získavanie tepla z nízko
potenciálneho odpadového vzduchu

získavanie tepla
z odpadového vzduchu
a spalín



najschodnejšie je využitím
rekuperačných výmenníkov tepla

znečistenie odpadového
vzduchu lepiivým prachom
alebo kondenzátom



obmedzenie aplikácií
v technologických procesoch môže
podstatne znížiť tepelnú efektívnosť,
alebo aj vyradiť zariadenia na spätné
získavanie tepla z činnosti

Využitie energetického potenciálu odpadového tepla

- *Energia vo forme tepla, ktorá odchádza z výrobného procesu, pokiaľ táto energia nie je sama hlavným výrobkom.*
- *V procese hutníckej a keramickej výroby ide v rozhodujúcej miere o využívanie citeľného tepla spalín, chladiacej vody, koksu, kovu alebo strusky.*
- *V procesoch technológií sušenia ide aj o využívanie latentného tepla vlhkých odpadových tepiel alebo vlhkých zmesí spalín a vzduchu.*
- *Využitím odpadového tepla ako DEZ sa zlepšuje využitie palív používaných v technologických procesoch a znižuje sa spotreba palív na zabezpečenie napr. tepelnej pohody.*
- *Z technicko-ekonomických dôvodov väčšinou nie je možné využiť celé citeľné teplo z DEZ.*

Zdroje odpadového tepla v technologických procesoch

Podľa pomeru medzi kvalitatívnym a kvantitatívnym ukazovateľom sú odpadové energie:

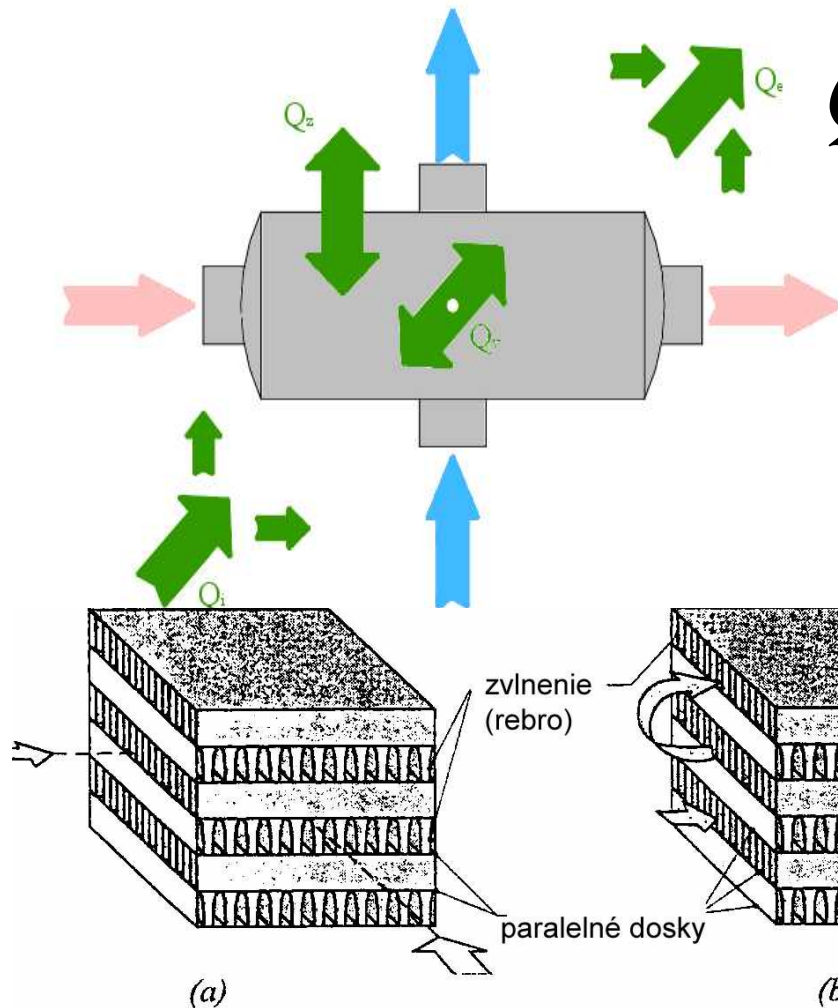
- **nízko potenciálne** – s nízkou koncentráciou energie v jednotke množstva, a naopak s veľkým množstvom nositeľa energie
- **stredného potenciálu**, napr. citeľné odpadové teplo spalín - teplota spalín býva v rozpätí 300 – 1 000 °C
- **s vysokým potenciálom**, napr. chemicky viazané teplo a radiačné teplo

Pri posúdení využitia DEZ je potrebné zobrať do úvahy hlavne:

- *Výšku energetickej hladiny*
- *Pravidelnosť výskytu*
- *Technickú obtiažnosť zužitkovania*
- *Použitelnosť získanej energie*

*V aplikáciách na spätné získavanie tepla sa využívajú
prevažne **rekuperačné výmenníky** tepla rôznych
konštrukcií.*

Rekuperačné výmenníky tepla



$$\dot{Q} = \dot{m}_1(h_{11} - h_{12}) = \dot{m}_2(h_{22} - h_{21})$$

vlastný výkon výmenníka cez stredný rozdiel teplôt Δt_m

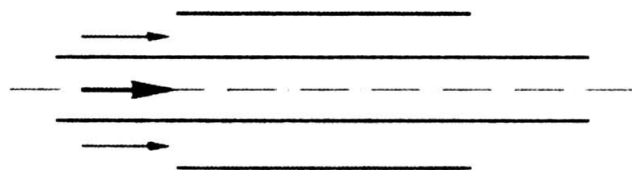
$$\Delta T_{1n} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = LMTD$$

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta T_{1n}$$

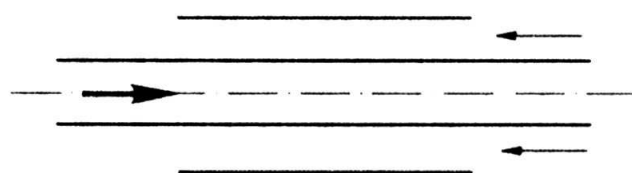
ΔT_1 a ΔT_2 rozdiely teplôt oboch tekutín na koncoch výmenníka tepla

Rekuperátory
podľa usporiadania prúdov
oboch tekutín delíme na:

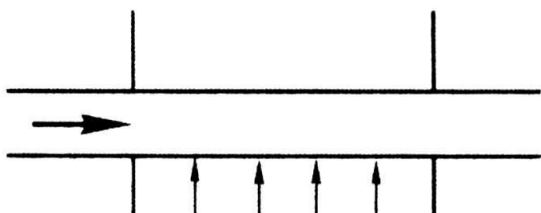
Výmenníky tepla



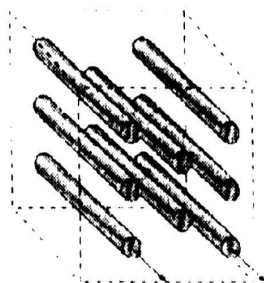
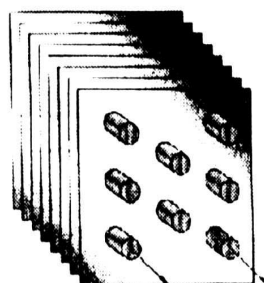
• súprúdové



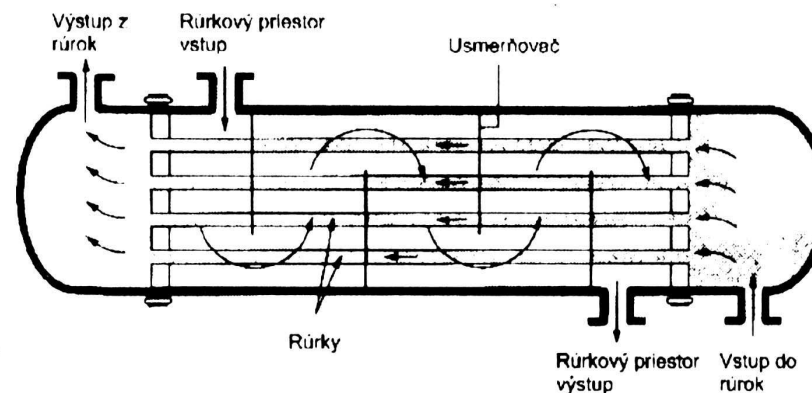
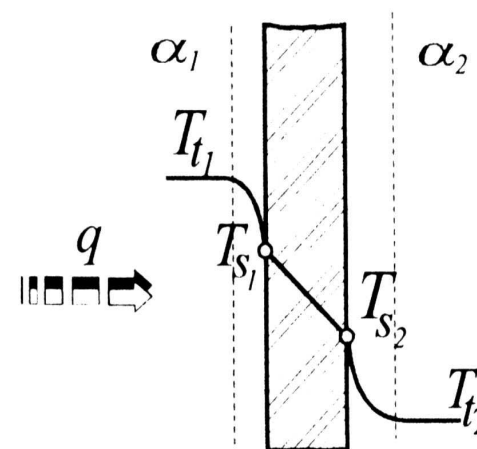
• protiprúdové



• s priečnym prúdením



Křížový výmenník tepla bez miešania
a s miešaním jedného prúdu



Kotlový výmenník tepla s medzistienkami

Určenie tepelného potenciálu

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} (T_{11} - T_{12}) = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} (T_{21} - T_{22})$$

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta T_{\ln} \quad \Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{11} - T_{12}) = \rho \dot{V} c_p (T_{11} - T_{12})$$

$$\frac{p}{\rho} = r \cdot T$$

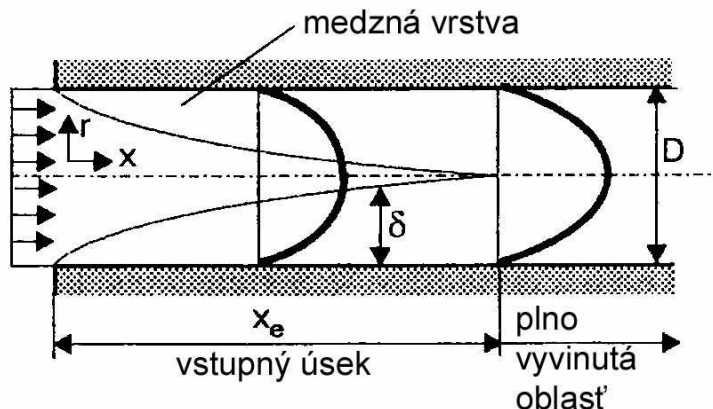
Konvekcia pri vnútornom prúde

- pri vnútornom prúde sa MV nemôže rozvíjať voľne bez vplyvu vnútornej geometrie stien kanála
- nemá možnosť neobmedzeného rastu v smere prúdu, ako tomu bolo na doske

Hydrodynamické úvahy

Na rozdiel od vonkajšieho obtekania, pri vnútornom obtekaní rozoznávame dve dôležité oblasti:

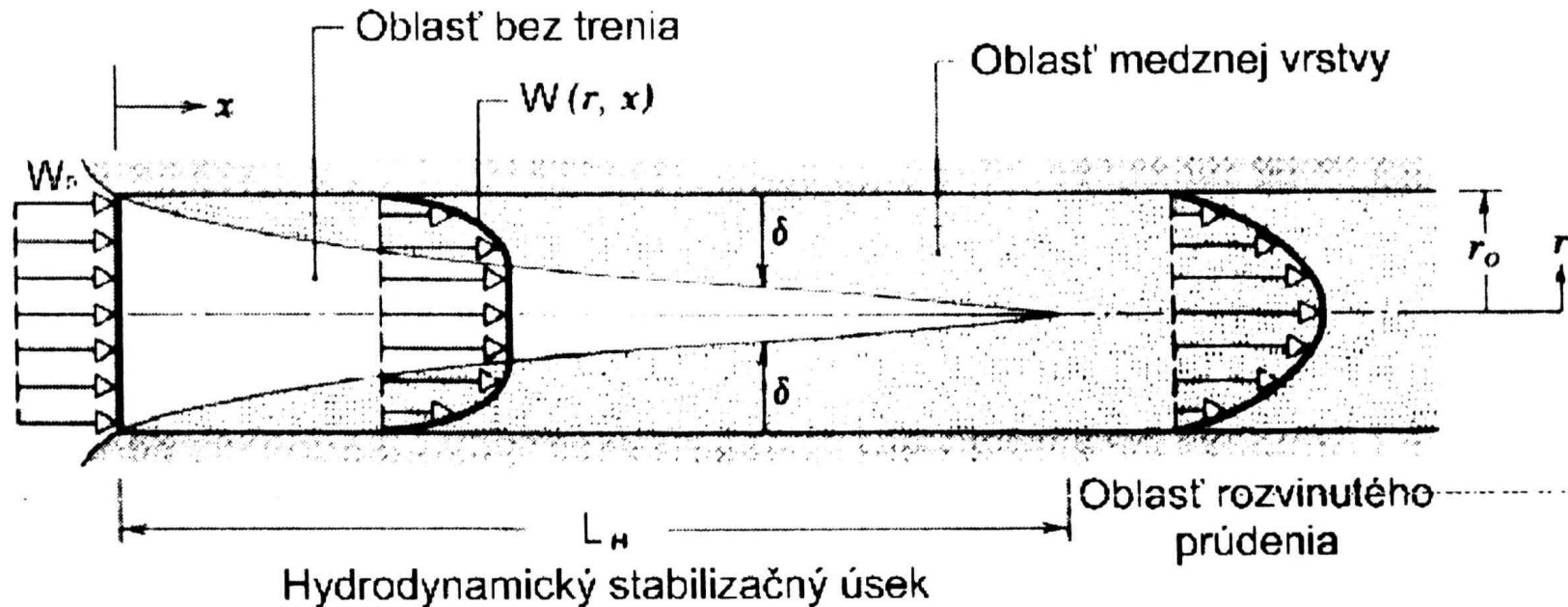
- vstupnú časť – v ktorej sa prúd rozvíja
- časť s plne rozvinutým prúdením



Podmienky prúdenia vo vstupných častiach:

- laminárne prúdenia v kruhovej rúrke polomeru r_0
- do tekutiny vstupuje rovnomernou rýchlosťou w_0

Rozvoj dynamickej laminárnej medznej vrstvy



- pri styku so stenou spôsobí viskozita tekutiny brzdenie častíc pri stene a tvorbu medznej vrstvy (MV) s rastom x
- zmenšuje sa vnútorná časť prúdu ► MV sa napokon spojí na osi rúrky vo vzdialenosti, ktorú voláme **stabilizačný úsek L_H** , vo vzdialenosti x_C od vstupu do rúrky
- pre $x > x_C$ sa MV rozšíri na celý prierez rúry (MV zaplní rúru a vytvára sa **časť plne rozvinutého prúdenia**)

Pre laminárne prúdenie v rúrkach je známa **kritická hodnota $Re_{D,c}$** :

$$Re_{D,c} = w_m D / \nu \geq 2\,300$$

kde: w_m je stredná rýchlosť prúdu v priereze rúry,
 D je priemer rúry, ktorej prekročenie znamená prechod
na prúdenie turbulentné, resp. prechodné.

Pri laminárnom prúdení je dĺžka stabilizačného úseku:

$$L_H / D = (0,03 - 0,05) Re$$

a pre turbulentné prúdenie:

$$L_H / D = 0,693 Re D^{0,25} \sim 10-60$$

Prúdenie v časti úplnej stabilizácie prúdu (pre izotermické prúdenie)

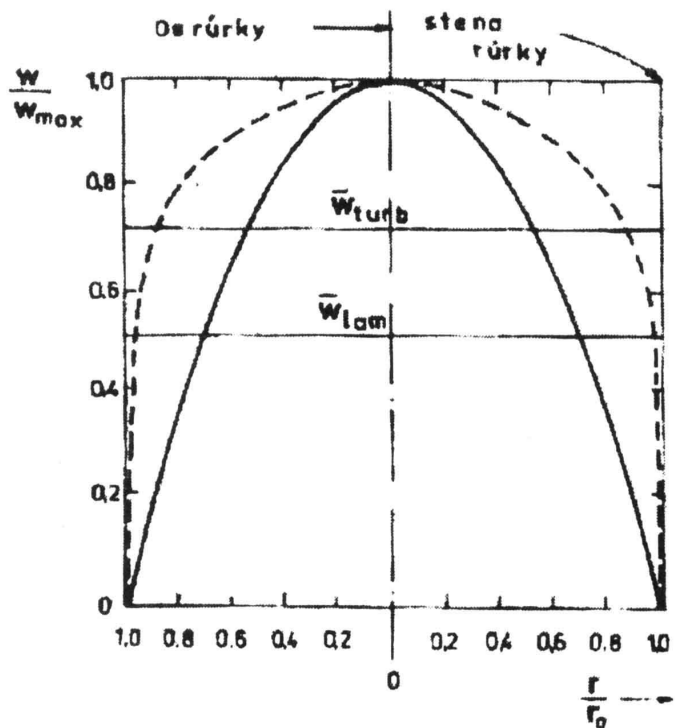
Rýchlostný profil pri rozvinutom laminárnom režime prúdenia je
v tvare paraboly:

$$\frac{w(r)}{w_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \qquad w_m = v_{max} / 2$$

Pre turbulentné prúdenie ide o akúsi useknutú parabolu, s hodnotou $w(r) \approx (0,7 - 0,9)w_{max}$, podľa Re_D čísla, ktorého hodnota je $Re_D > 10^4$.

Pre výpočet výkonu čerpadla alebo ventilátora sa často požaduje aj znalosť trecieho súčiniteľa λ :

$$\lambda = \frac{-(dp / dx)D}{\rho w_m^2 / 2}$$



Trecí súčiniteľ sa obyčajne určuje z Moodyho (Nikuadzeho) diagramu

- pre laminárne prúdenie je $\lambda = 64/Re$,
- pre turbulentné prúdenie v hydrodynamicky hladkých rúrkach:

$$\lambda = 0,316 Re_D^{-0,25} \quad Re_D < 2 \cdot 10^4$$

$$\lambda = 0,184 Re_D^{-1,5} \quad Re_D > 2 \cdot 10^4$$

Pre drsné potrubia treba použiť Moodyho diagram.

Rýchlostné rozloženie pri laminárnom a turbulentnom prúdení

Okamžitá rýchlosť:

$$w = w_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n}$$

kde

w je okamžitá rýchlosť vrstvy prúdu tekutiny,

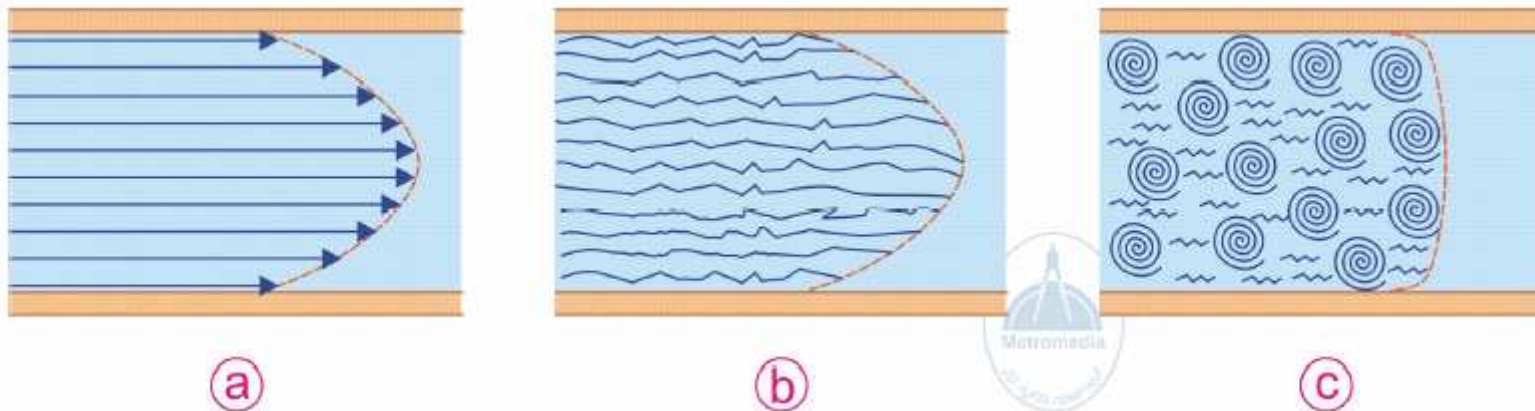
$w_{\max}$ je maximálna rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze potrubia,

r je vzdialenosť vrstvy prúdu tekutiny od osi kruhového potrubia,

R je polomer potrubia,

n je exponent závisiaci od typu prúdenia.

Rozloženie rýchlosti závisí od viacerých faktorov - tvar profilu potrubia (kanála), vlastnosti jeho povrchu, blízkosť zdroja tekutiny, prítomnosť regulačných prvkov a podobne.



Prúdenie tekutiny v uzavretom potrubí

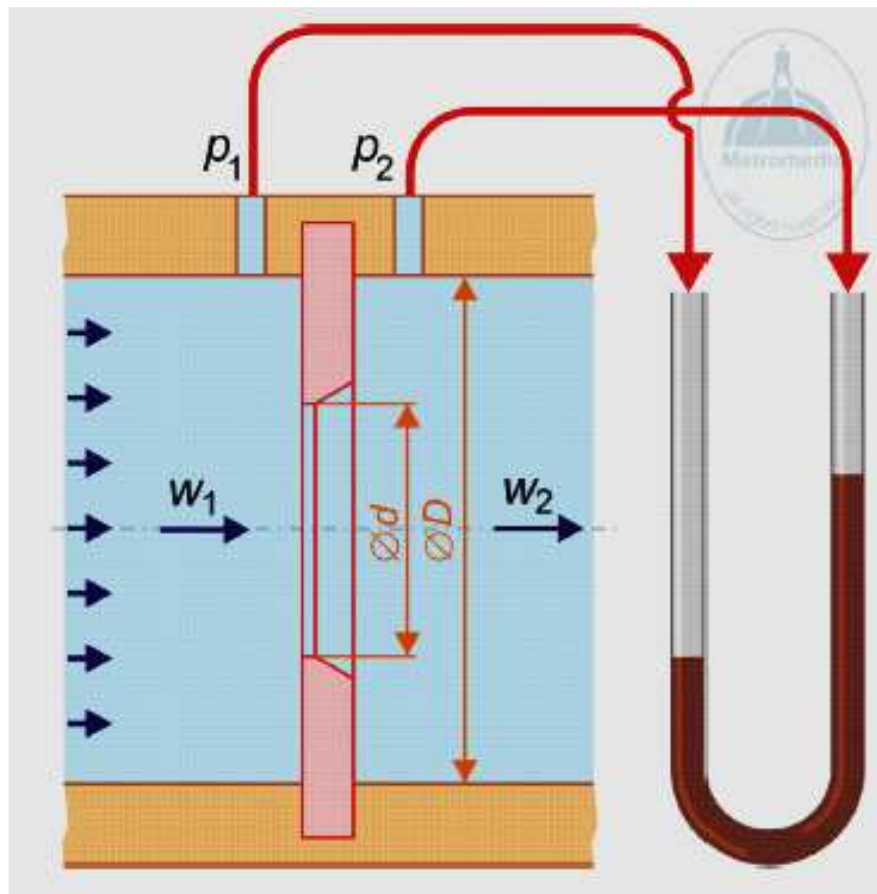
a) laminárne prúdenie

b) prechodové prúdenie

c) turbulentné prúdenie

Teoretický objemový a hmotnostný prietok

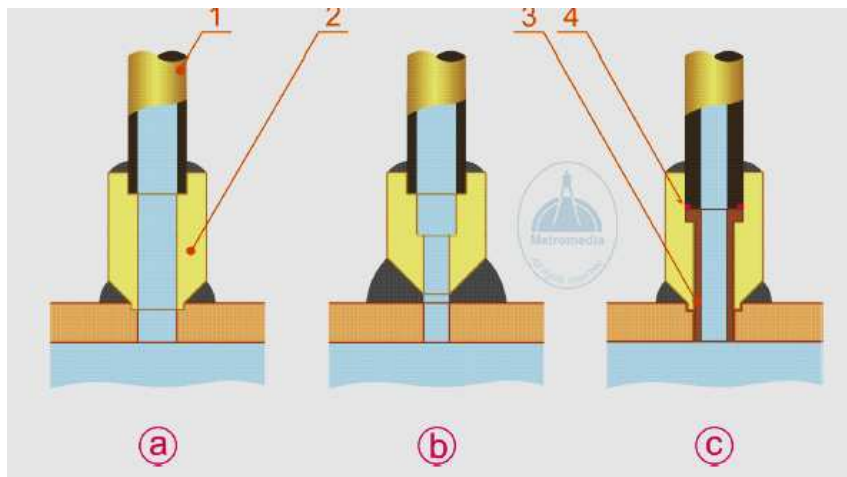
Rýchlosť prúdiacej tekutiny pred škrtiacim orgánom w_1 a jej tlak p_1 . Za ním poklesne tlak na p_2 a rýchlosť sa zvýši na w_2



$$q_v = \frac{c \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}}$$

$$q_m = \frac{c \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \rho \cdot (p_1 - p_2)}$$

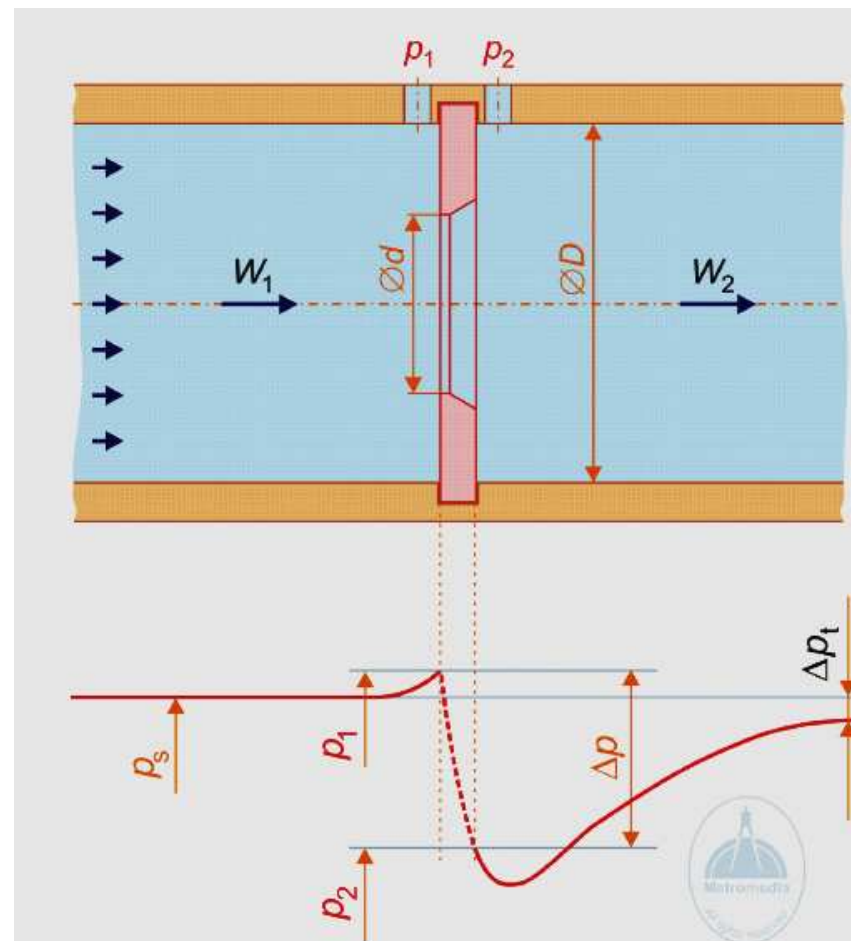
kde c je prietokový koeficient škrtiaceho orgánu, $c = f(Re_D, \beta^2, D)$
 ε je expanzný koeficient, pre kvapalinu $\varepsilon = 1$, $\varepsilon = f(\beta^2, \Delta p/p_1, \chi)$
 β je pomer priemerov, $\beta = d/D$,
 p_1 je tlak tekutiny pred škrtiacim orgánom,
 p_2 je tlak tekutiny za škrtiacim orgánom,
 ρ je hustota meranej tekutiny,
 d je vnútorný priemer škrtiaceho orgánu,
 χ je izoentropický koeficient,
 D je vnútorný priemer potrubia.



Vyhotovenie odberov tlakov:

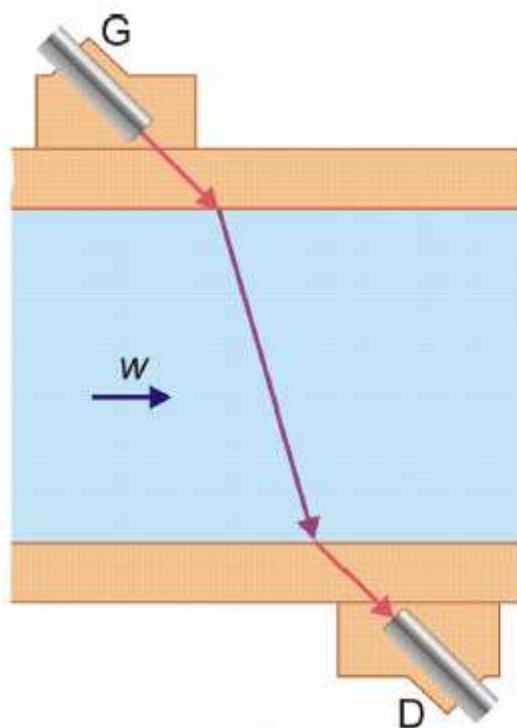
- a) pre teploty do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$
- b) s úplným prevarením
- c) pre teploty nad $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

- 1 – odberová rúrka
- 2 – nástavec
- 3 – vložka
- 4 – tesnenie

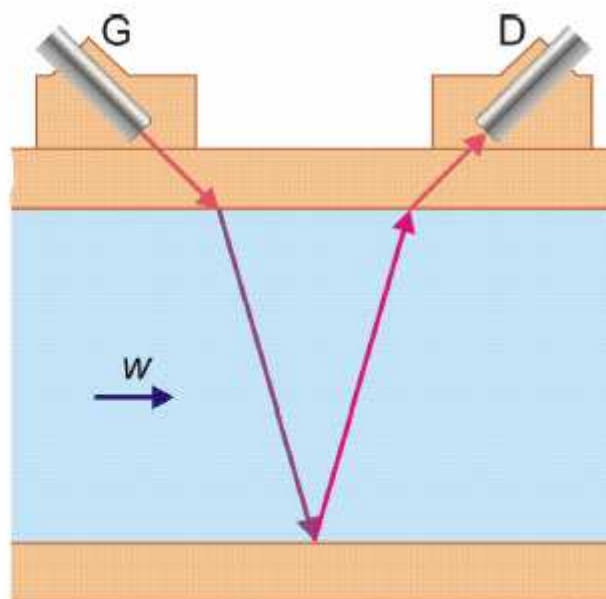


Priebeh tlakov v blízkom okolí clony

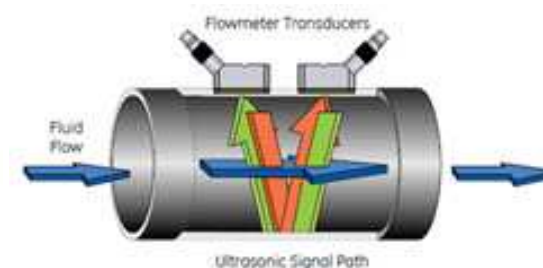
Ultrazvukový prietokomer založený na snímaní času prechodu



a)



b)



**Prenosný ultrazvukový
prietokomer:**

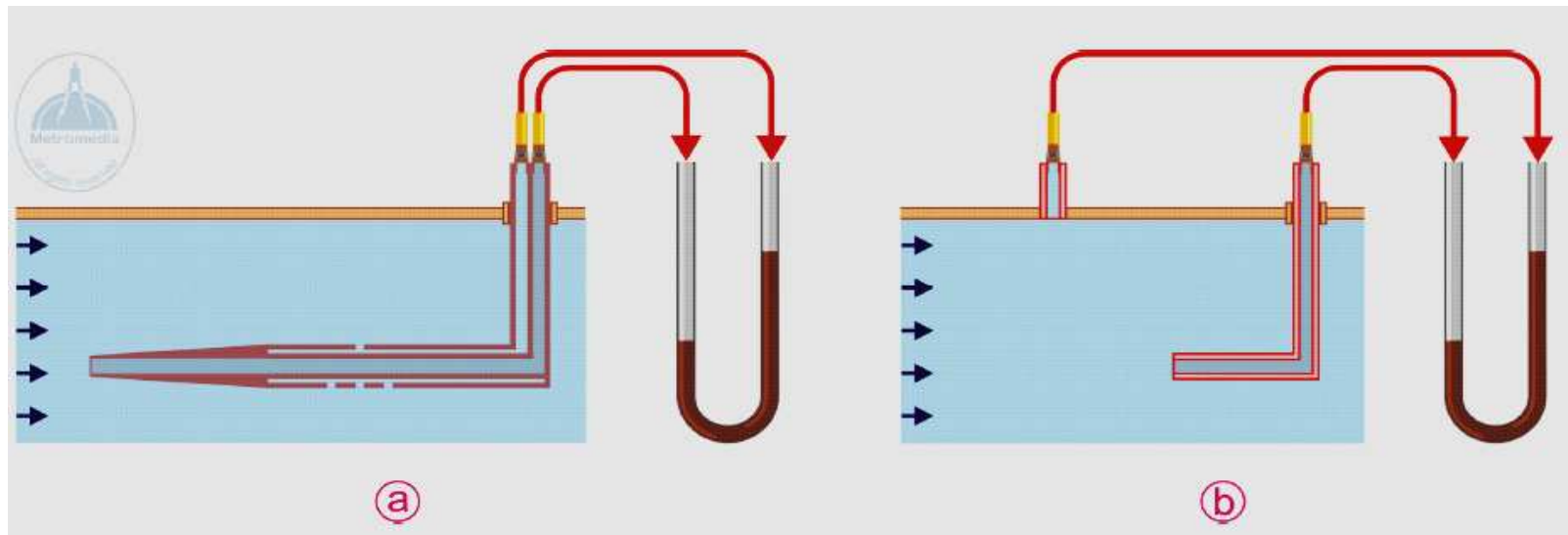
- a) prechodový
- b) odrazový



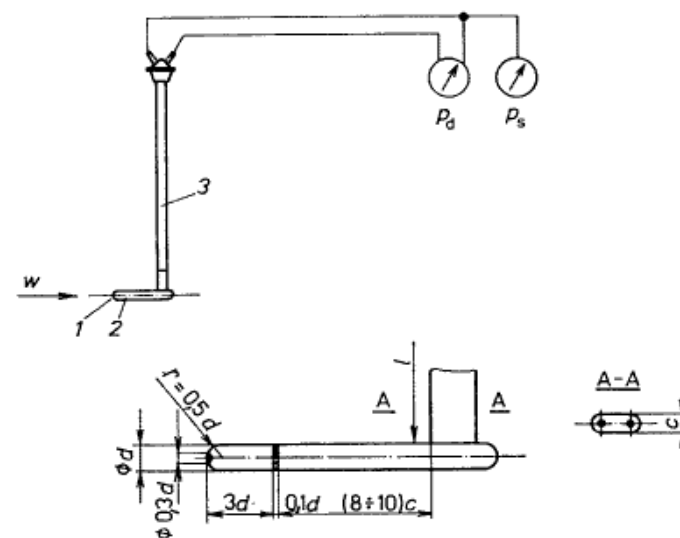
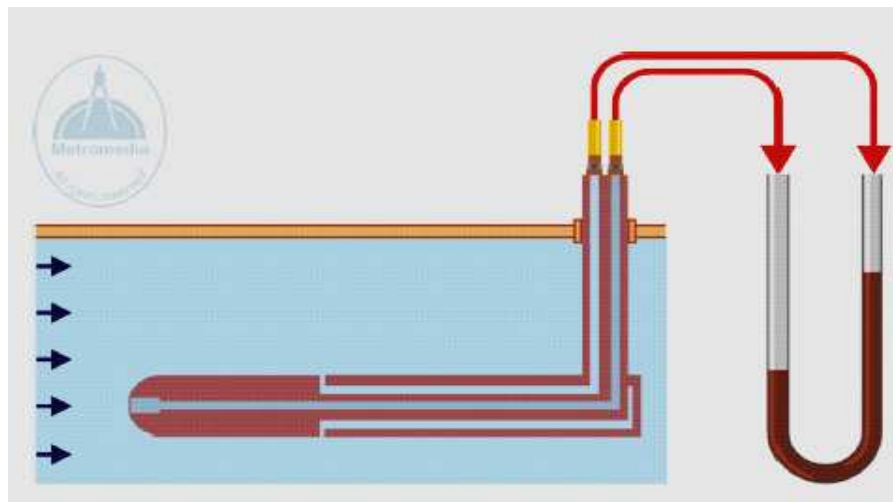
Pitotova trubica

a) pre plyn

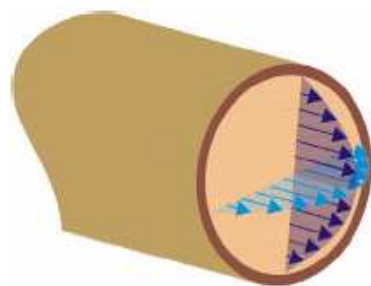
b) pre kvapalinu



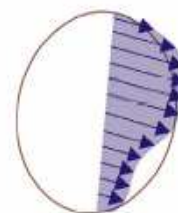
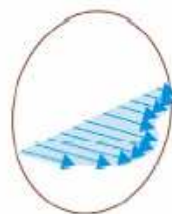
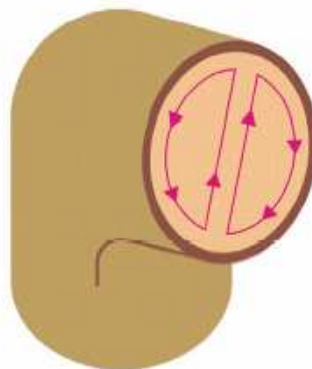
Prandtlova trubica



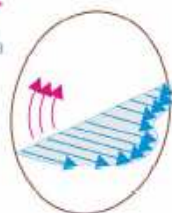
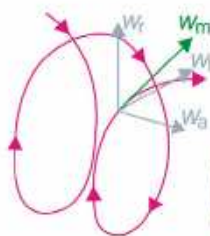
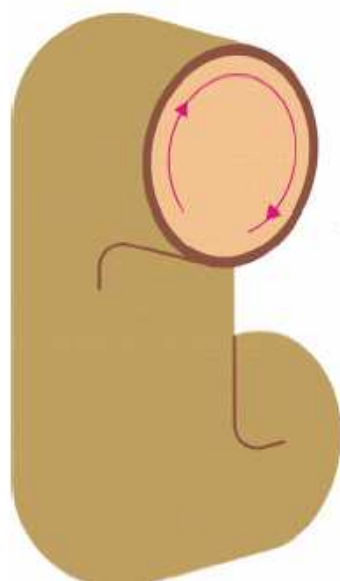
Poruchy rýchlostného profilu prúdiacej tekutiny



a

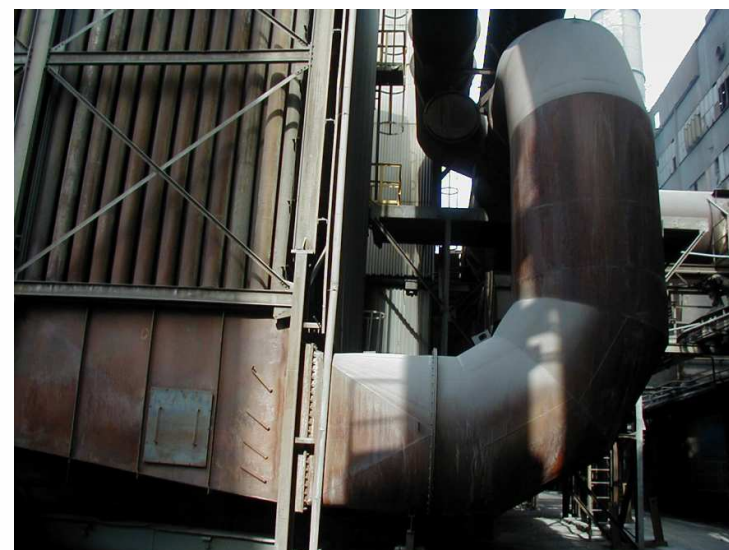


b



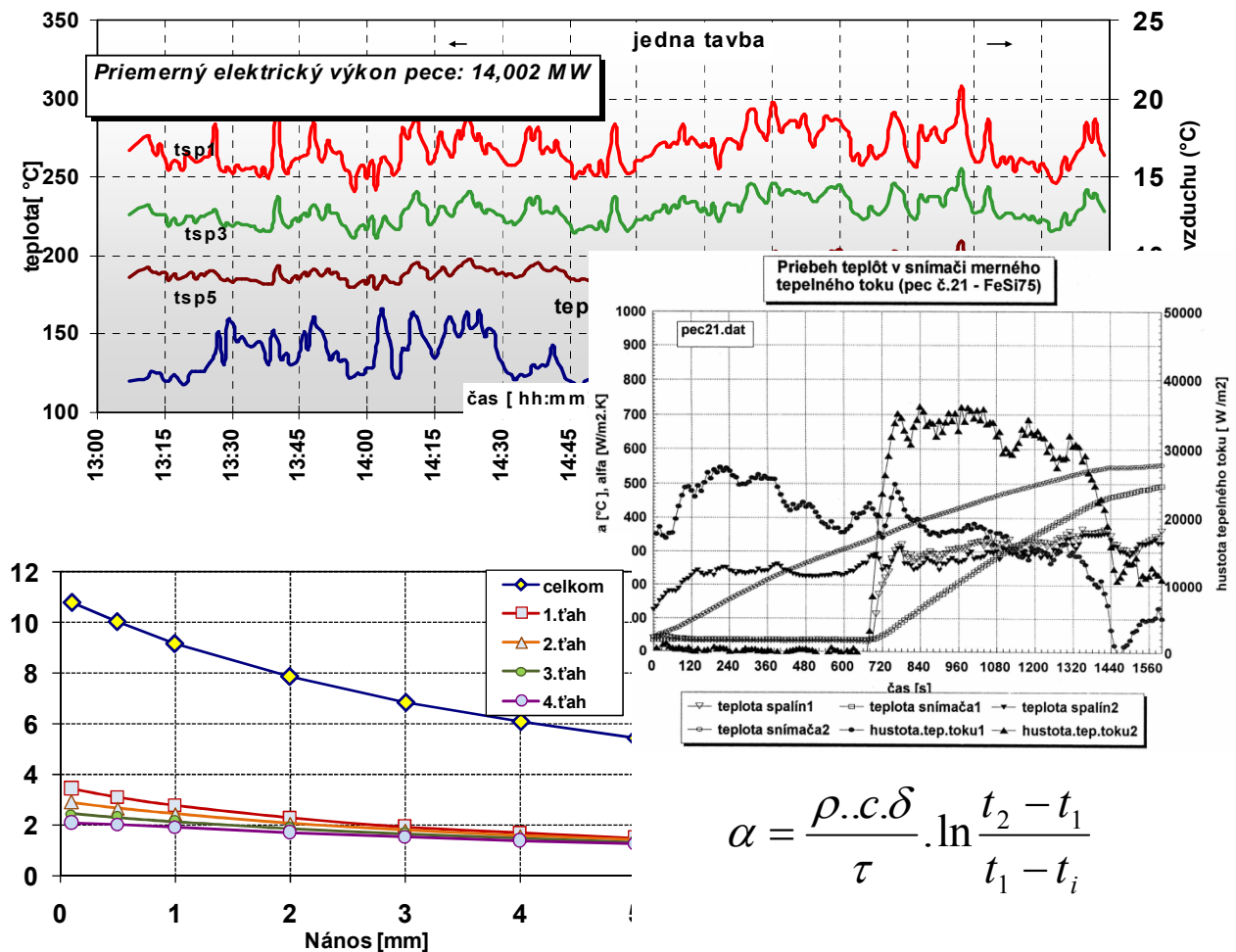
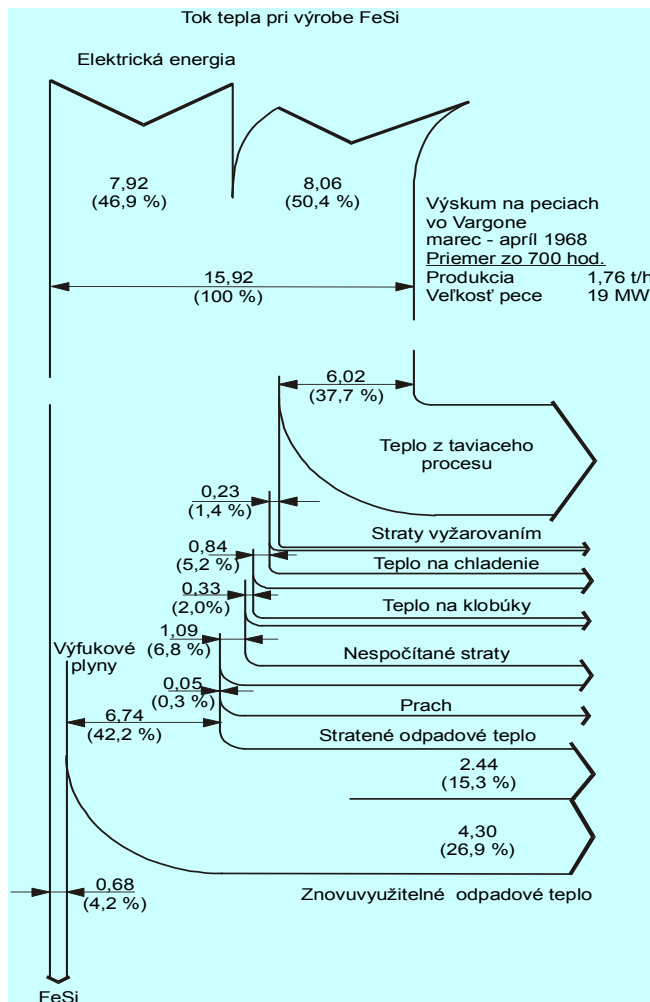
c

- a) Symetrický profil v rovnej rúre
- b) Jednoduché koleno
- c) Dvojité koleno



Aplikácie spätného získavania tepla z vysoko potenciálneho tepla

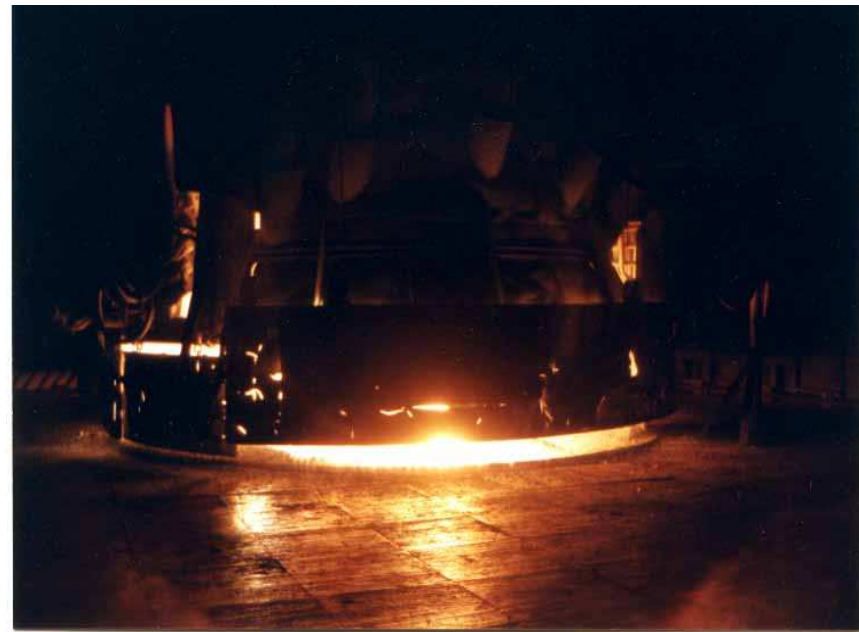
Typické pre metalurgiu a keramický priemysel



Druhotný energetický zdroj tepla využívajúci odpadové teplo spalín z elektrických oblúkových pecí pri výrobe ferozliatin

Druhotné energetické zdroje (DEZ) - pôvod v technologických zariadeniach, v ktorých sa tepelný potenciál úplne nevyužíva, pretože jeho parametre sú pre pôvodnú technológiu nevhodné

Technologické procesy v EOP - masívny tok odpadového tepla
(radiačný, konvektívny)



DEZ - zdroj tepelnej energie pre iné zariadenia, v ktorých môžu úplne alebo čiastočne nahradiť palivo alebo energiu

Využitelný energetický potenciál odpadového tepla (EOP)

EOP pracujú nad kychťou pri pomerne vysokých teplotách.

Pri výrobe ferosilícia je teplota na plášti pece cca **400 °C** a v prípade technologických porúch **až 900 – 1000 °C**.

Pri výrobe ferosilícia EOP vznikajú ako vedľajšie produkty tzv. **kremičité úlety**:

- veľmi jemné častice pravidelného guľového tvaru a hladkého povrchu
- vznikajú kondenzáciou pár oxidu kremičitého vychádzajúcich z EOP
- majú výborné tepelnoizolačné vlastnosti $\lambda < 0,04 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$
- značne komplikujú riešenie problematiky využitia tepla zo spalín EOP

Využitelný energetický potenciál odpadového tepla (EOP)

Merania jednoznačne potvrdili, že:

- teplota spalín má stochastický charakter medzi dvomi zavážkami
- teplota spalín kolíše v rozpätí 250 – 360 °C
- dominantný spôsob prenosu tepla je radiačný prenos
- tepelný výkon, resp. hustota tepelného toku do steny snímača sa pohybovala v intervale **25 – 35 kW/m²**, podľa jeho umiestnenia v peci

Meranie v závode Široká preukázalo, že pri teplote pecnej atmosféry 360 °C bola povrchová teplota snímača až 550 °C.

Na základe týchto experimentálnych meraní **bol navrhnutý nový typ klobúka EOP ako tlaková nádoba**, za predpokladu **maximálneho merného tepelného toku 40 kW/m²**.

Dôvody riešenia tepelno-technického komplexu v závode Široká

1. generálna oprava EOP č. 22
2. zvýšenie výkonu EOP č. 22 z 14,5 MW_e na 18 MW_e
3. zabezpečenie funkčnosti spalínového traktu vo vzťahu na odprašovanie spalín
4. ekologizácia vykurovania závodu a prípravy teplej vody
5. zníženie energetických nákladov výroby

Návrh technického riešenia

- Klobúk pece len navrhnutý ako tlaková nádoba rozdelená na tri nezávislé segmenty.
- Segmenty sú tvorené sústavou doskových výmenníkov a rúrovou konštrukciou.
- Pracovný pretlak v systéme je 0,27 MPa, čomu zodpovedá teplota vody cca 140 °C.
- Odoberaný užitočný tepelný výkon je pri výkone pece 18 MW_e cca 1,5 MW_t.

System odovzdávania tepla

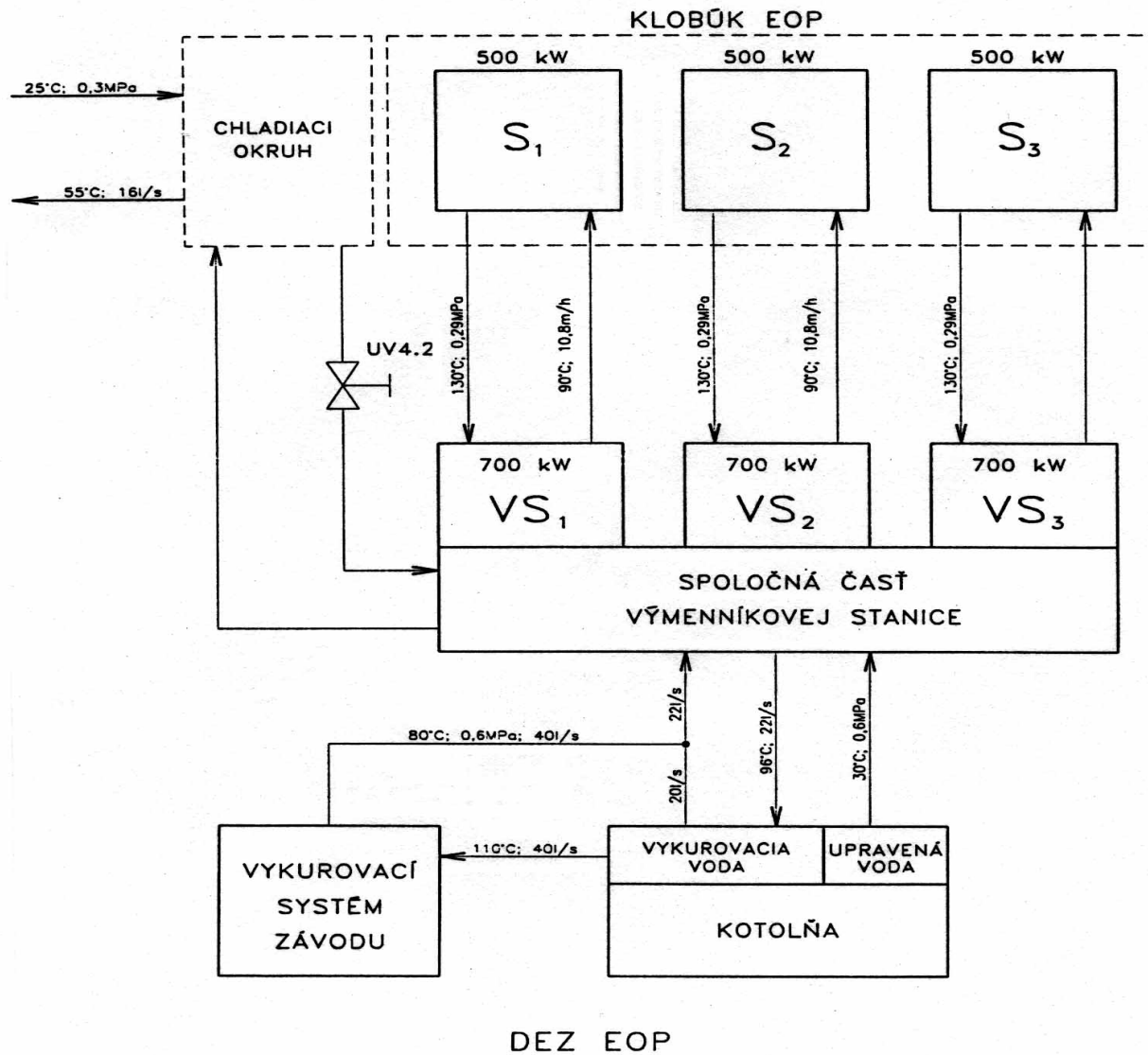
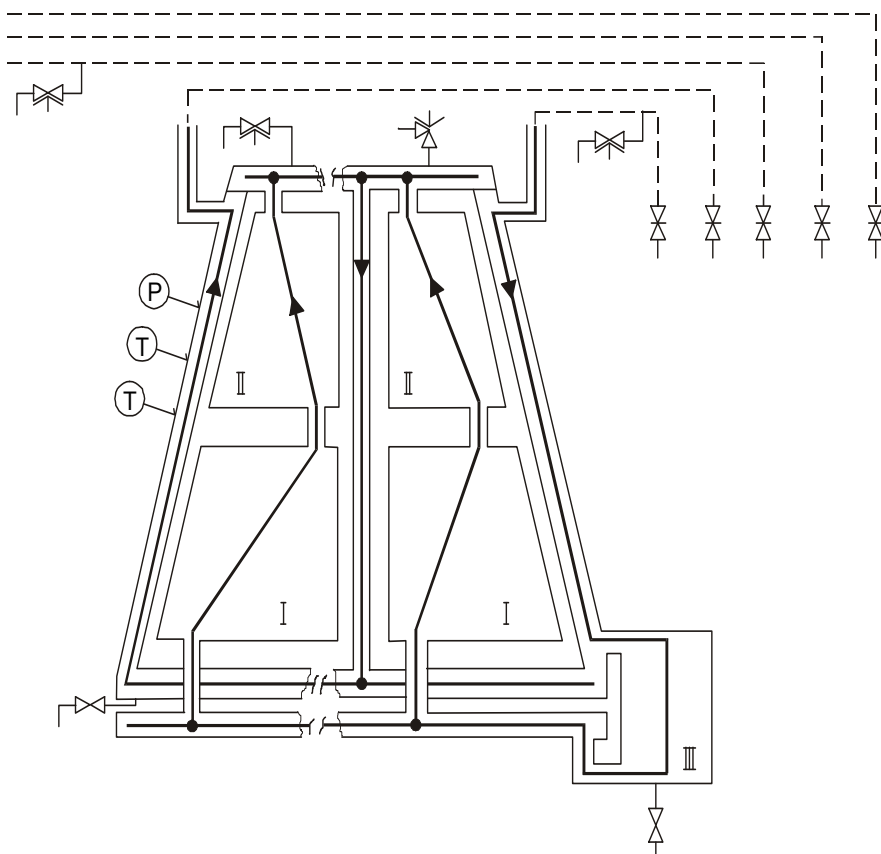
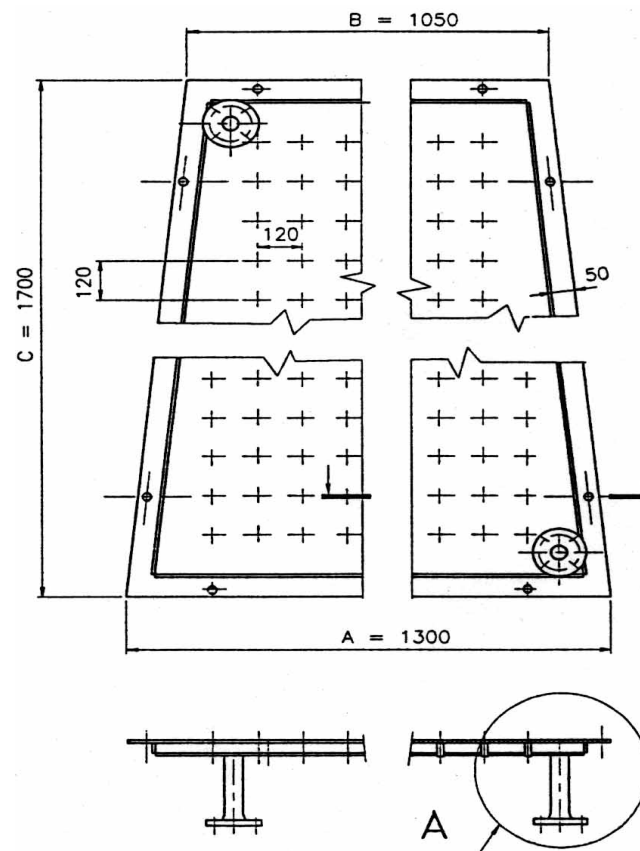


Schéma koncepčného riešenia DEZ v závode Široká



Každý segment EOP je tvorený z doskových výmenníkov a rúrkových segmentov - tlakových nádob a spoločnými kontrolnými a zabezpečovacími prvkami.



Panely chladiča - veľkoplošné doskové výmenníky tepla z plechu vhodného na stavbu tepelno-technických zariadení do teplôt 450 °C, hrúbky 6 mm. Vo vnútri panelu sú umiestnené priehradky, ktoré usmerňujú prúd vody po celej ploche panela.

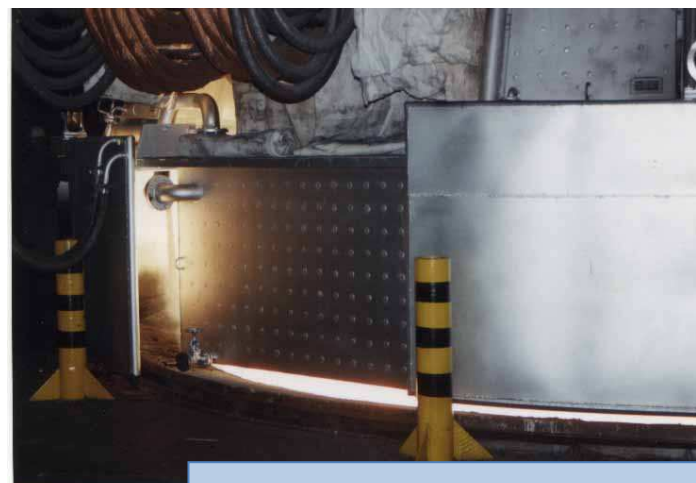
Pôvodná pec počas rekonštrukcie



Výmenníková stanica

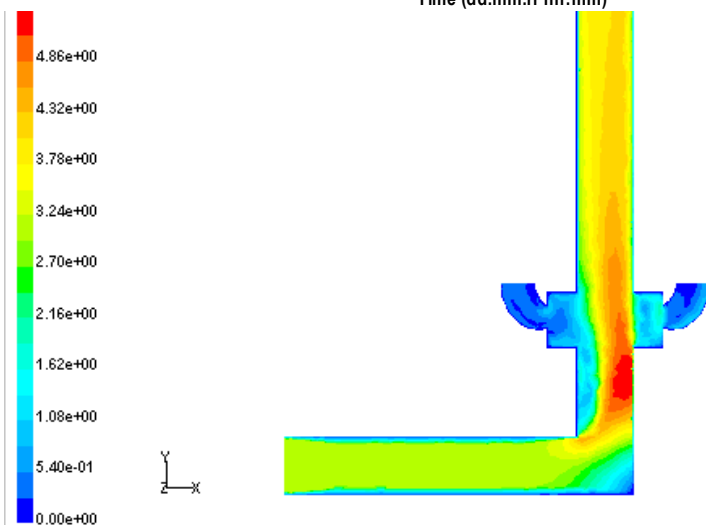
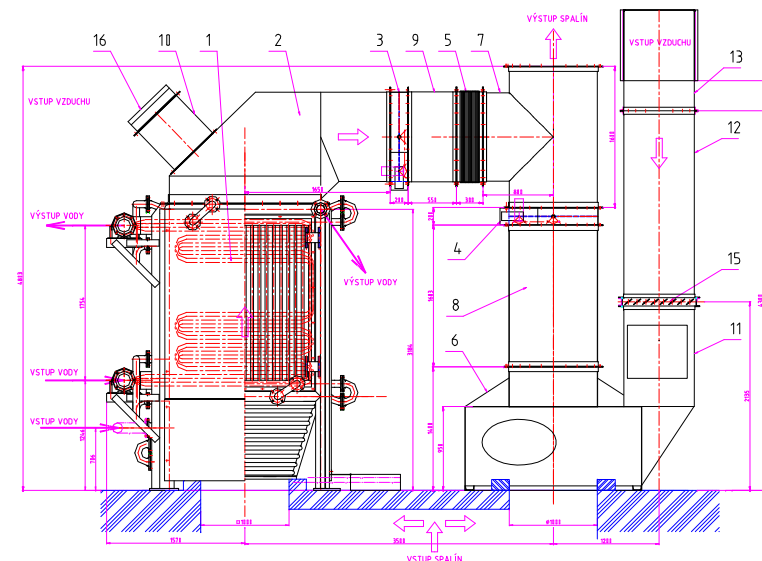
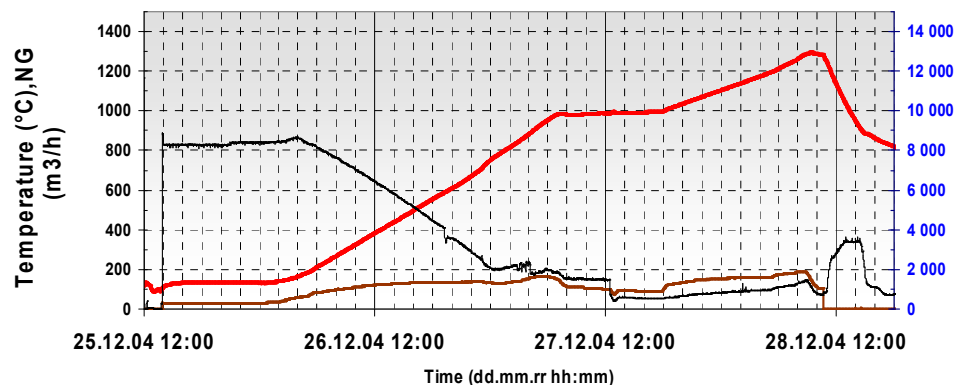


Nový klobúk EOP a VT

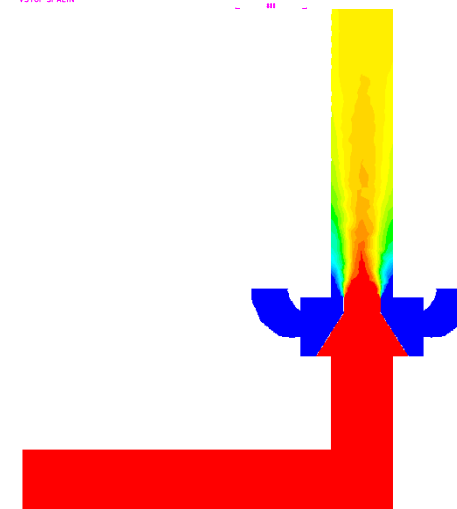
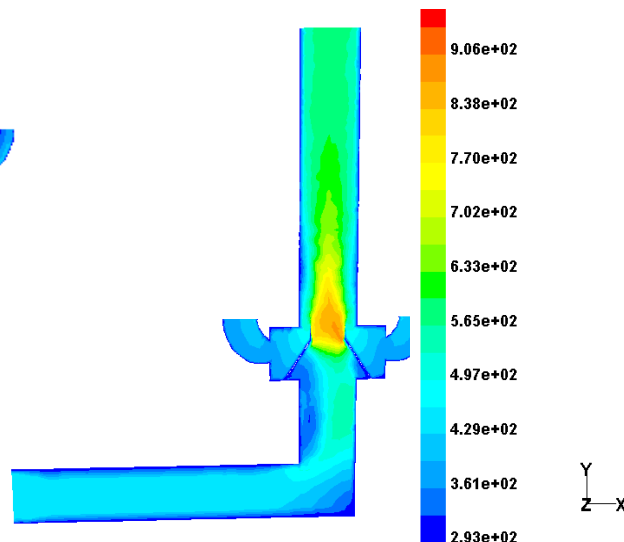
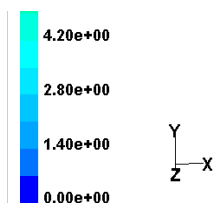


VT pod napájaním elektród

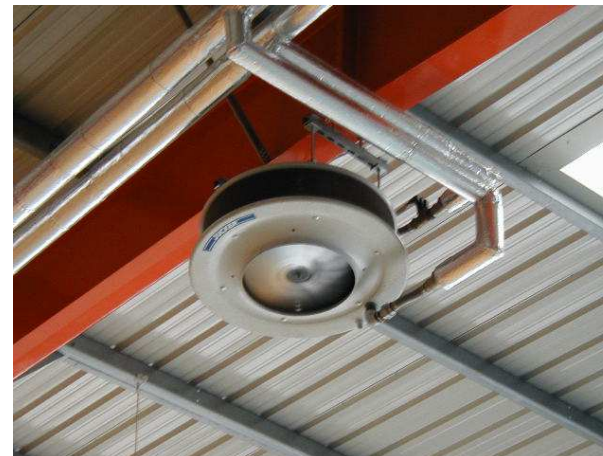
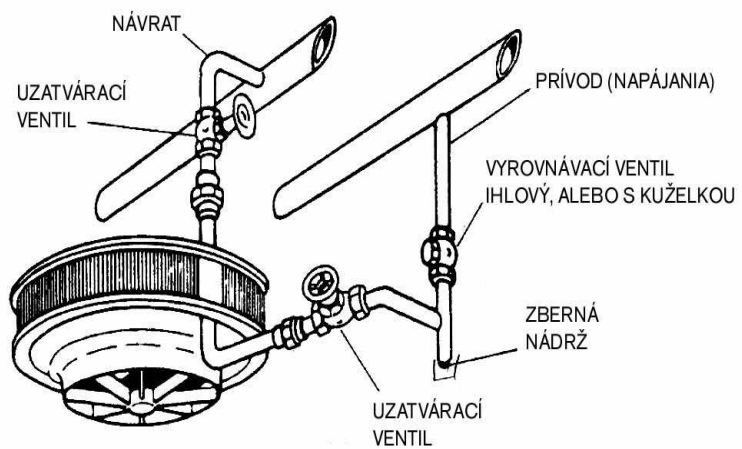
Aplikácie spätného získavania tepla stredného potenciálu pri časovo nespojitých procesoch



Úspora:
- pri 0,9 MW je to
23 000 GJ/rok



Realizácia technického riešenia



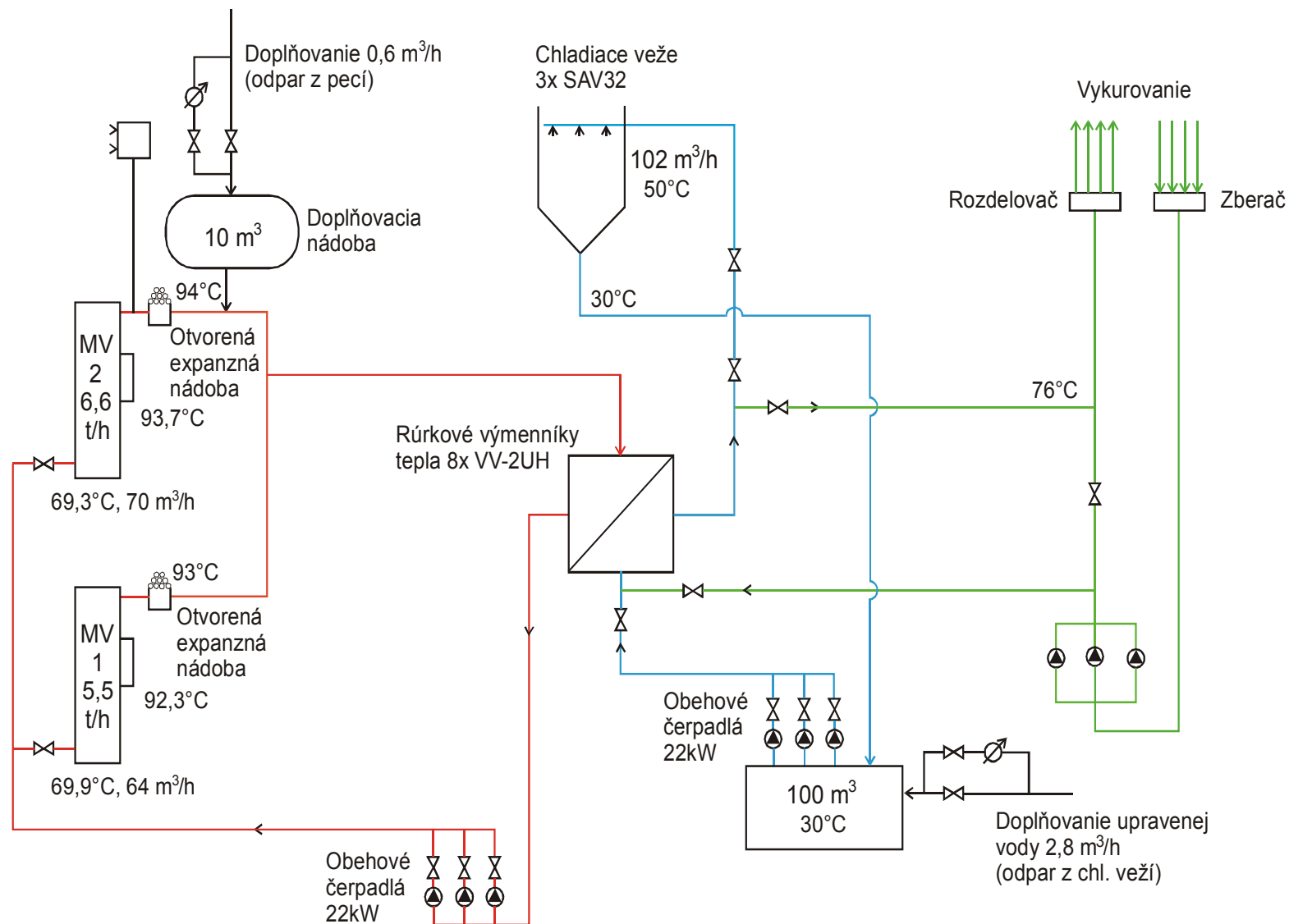
Vplyv spôsobu chladenia na pevnostné parametre vnútorného plášťa kuplovej pece



Stav pred riešením

Zariadenia, ktoré zabezpečujú chladenie hore uvedených systémov sú v prevádzke od roku 1988. Boli projektované na pece, ktoré boli tavným výkonom pod súčasne prevádzkovanými pecami. Tavné výkony na KP sú 6,5 t/h a 5,5 t/h. Teplotný spád 96 °C na 70 °C. Vychladzovanie sa uskutočňuje na 8 ks výmenníkov typu voda-voda.

System chladenia kuplových pecí (pôvodné usporiadanie)



Možnosti zníženia energetickej náročnosti tavenia minerálnej suroviny na základe úpravy chladiaceho okruhu

✓ zvýšenie teplotného potenciálu chladiacej tekutiny

- buď použiť existujúci chladiace médium, tzn. upravenú vodu a namiesto otvoreného systému **systém uzavretý**
- pri zvýšení tlaku na **0,3 MPa** by sa mohla zvýšiť teplota chladiacej vody na výstupe až na **140 °C**

výhody

- zníženie teplotného spádu => zníženie aj potrebného chladiaceho výkonu
- pri prípadnom vniknutí vody do pecného priestoru, vzhľadom na jej vysoké latentné teplo vyparovania, nedochádza k prudkým tlakovým zmenám

nevýhody

- pec je považovaná za tlakovú nádobu
- vyššie nároky na pevnosť plášťa pece
- všetky spoje a prípadné netesnosti budú vystavené omnoho väčším nárokom na kvalitu vyhotovenia
- zvýšenie teploty na vonkajších stranách obvodového vnútorného plášťa

Kvapalinové chladiace systémy

podľa druhu chladiacej kvapaliny

voda, vysokovriace kvapaliny

podľa spôsobu odoberania tepla

- *teplovodný chladiaci systém, do 110 °C*
- *horúcovodný až do 180 °C*

podľa spôsobu vytvárania tlaku v systéme

- otvorenou expanznou nádobou
- vonkajšími mechanickými pomocnými prostriedkami, najčastejšie čerpadlami - dotláčačkami alebo plynovým vankúšom nad hladinou kvapaliny

Vplyv prechodu otvoreného systému na systém uzavretý

Potenciálne šetrenie tepelnej energie (napr. v tepelnom príkone paliva) **pri zvýšení teploty chladiacej vody na 140 °C** a pri súčasnom prietoku chladiacej vody **3,4 %**, čo predstavuje tepelný výkon **118 kW z 3,5 MW**.

Úspora **101,4 t/rok koksu** pri 300-dňovej prevádzke pecí (ak predpokladáme výhrevnosť koksu 30,1 MJ/kg).

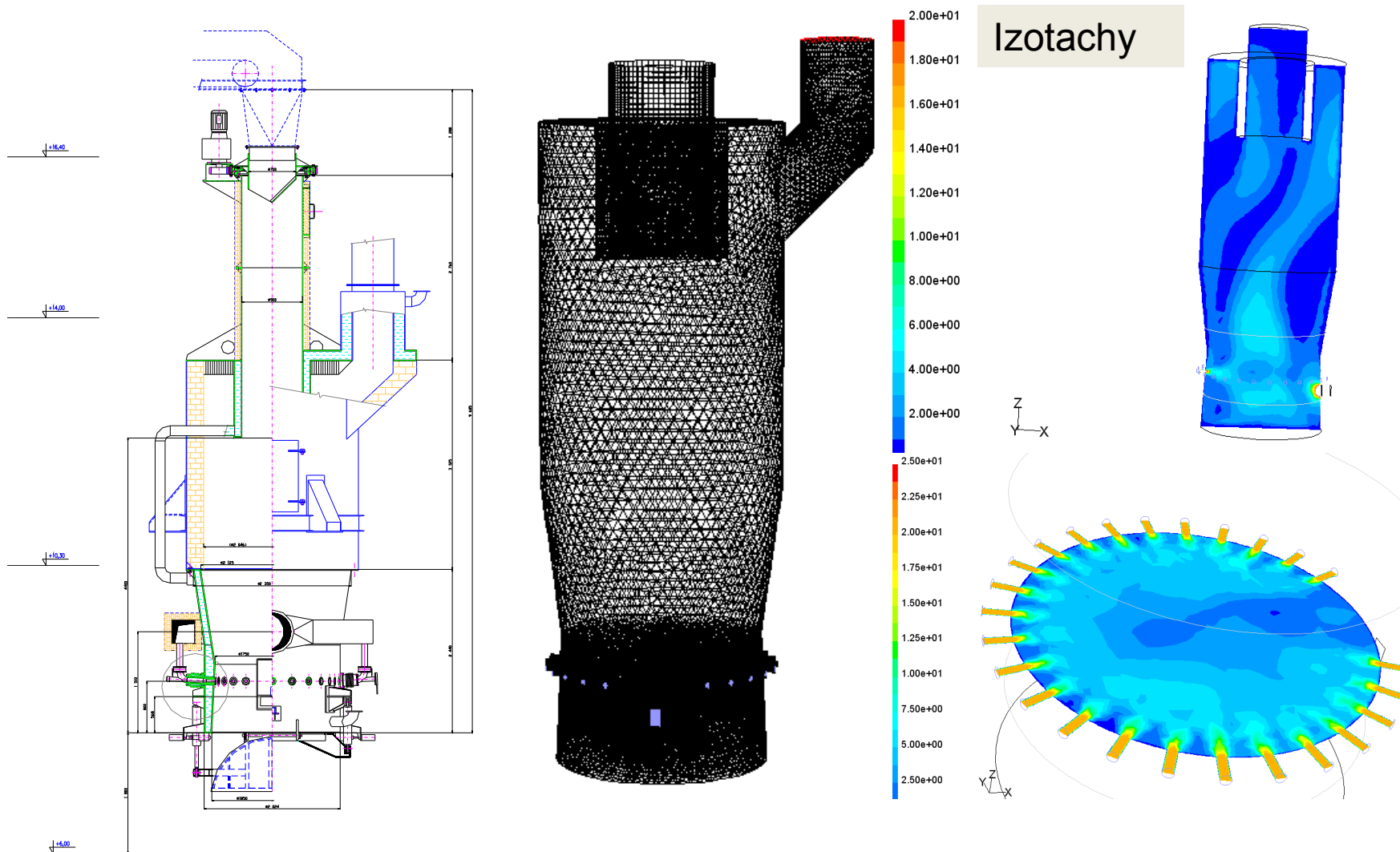
Uzavretý systém je schopný dynamickejšie reagovať na zmeny prietoku (nie je závislý na prirodzenom spáde medzi otvorenou hladinou systému dopĺňovania vody a čerpadlami).

Zníženie opotrebovania lopatiek čerpadiel vplyvom kavitácie.

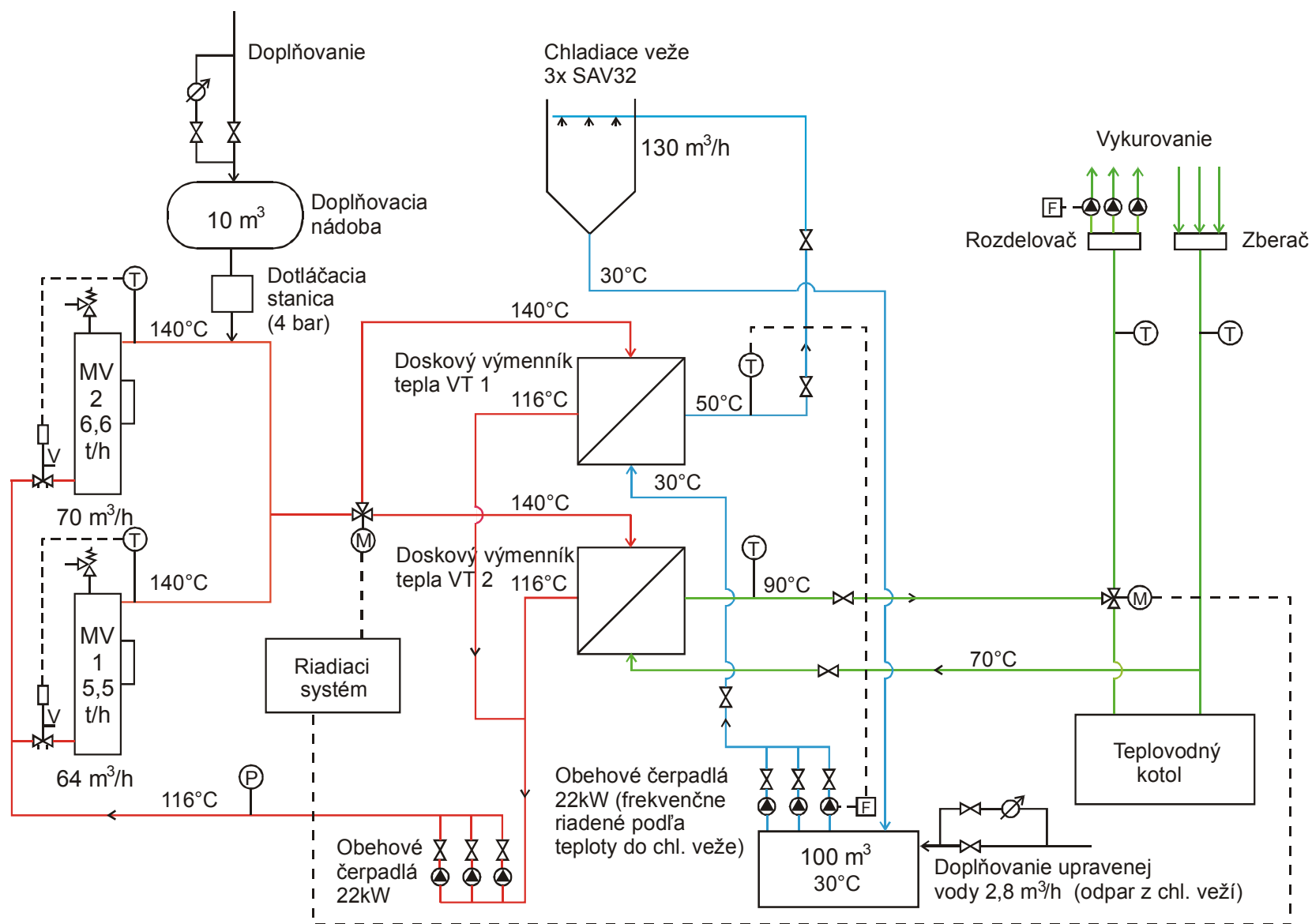
V uzavretom systéme je možnosť **regulácie čerpadla** na nastavený konštantný tlak pomocou frekvenčného meniča.

Prietok cez jednotlivé pece sa dá regulovať na konštantnú výstupnú teplotu chladiacej vody pomocou regulačnej armatúry na vstupe do pece.

Modelovanie procesov v kuplovej peci pomocou programového systému FLUENT



Návrh úpravy systému chladenia kuplových pecí



Návrh úpravy systému chladenia kuplových pecí

- primárny chladiaci okruh dynamickejší
- zníži sa odvod tepla do chladiacej vody o cca 3,5 %
- systém na sekundárnej strane funguje ako štandardná horúcovodná výmenníková stanica s výstupom klasického teplovodného spádu 90 °C / 70 °C

Ak by sa podarilo umiestniť do vykurovania len cca 50 % odpadového tepla, potom sa dá ušetriť na prevádzke teplovodných kotlov:

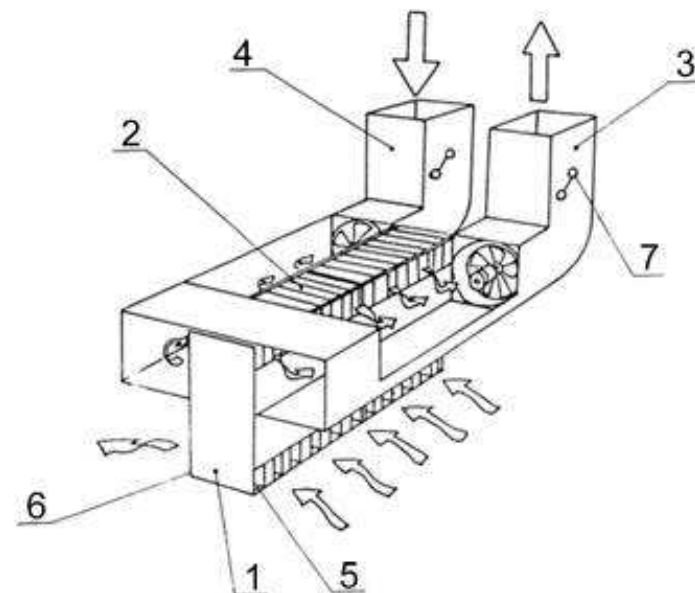
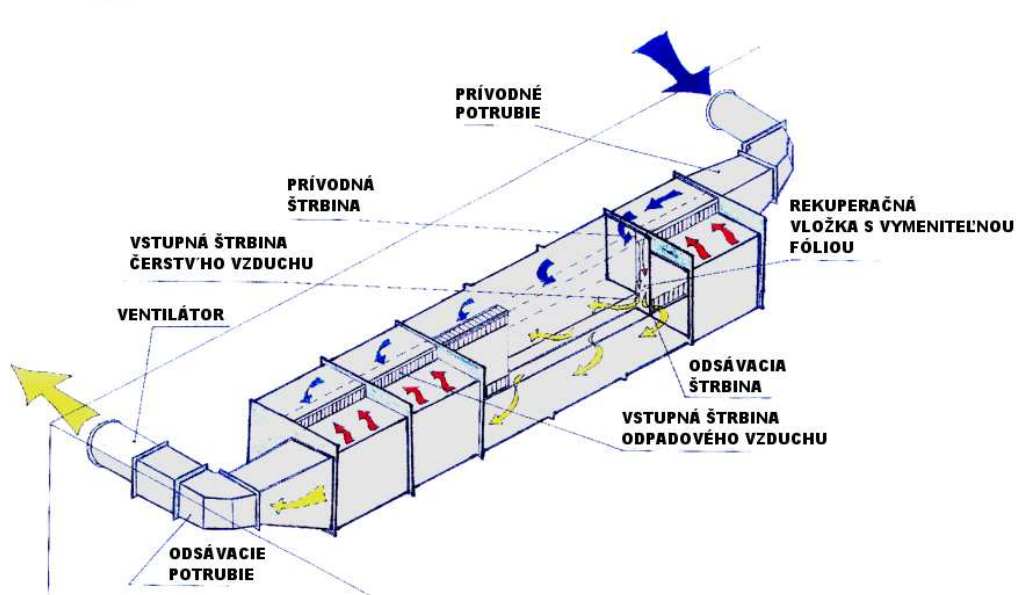
$$1\,751\,060 \text{ (W)} \times 3\,600 \text{ (s)} \times 24 \text{ (h)} \times 200 \text{ (vykurovacích dní/rok)} = \mathbf{30\,240 \text{ GJ/rok}}$$

Navrhovaný systém umožňuje takú prevádzku vykurovania, že teplovodné kotly môžu pracovať ako doplnkový zdroj tepla so 100 % rezervou vykurovacieho výkonu v prípade výpadku kuplových pecí.

Na základe úpravy chladiaceho systému z otvoreného na uzavretý - možnosť ušetrenia upravenej vody objemu

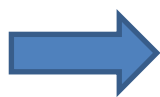
$$\text{cca } 0,6 \text{ (m}^3\text{/h)} \cdot 24 \text{ (h)} \cdot 300 \text{ (d/rok)} = \mathbf{4\,320 \text{ m}^3\text{/rok}}$$

Možnosti aplikácie výmenníkov tepla na spätné získavanie nízkopotenciálneho tepla



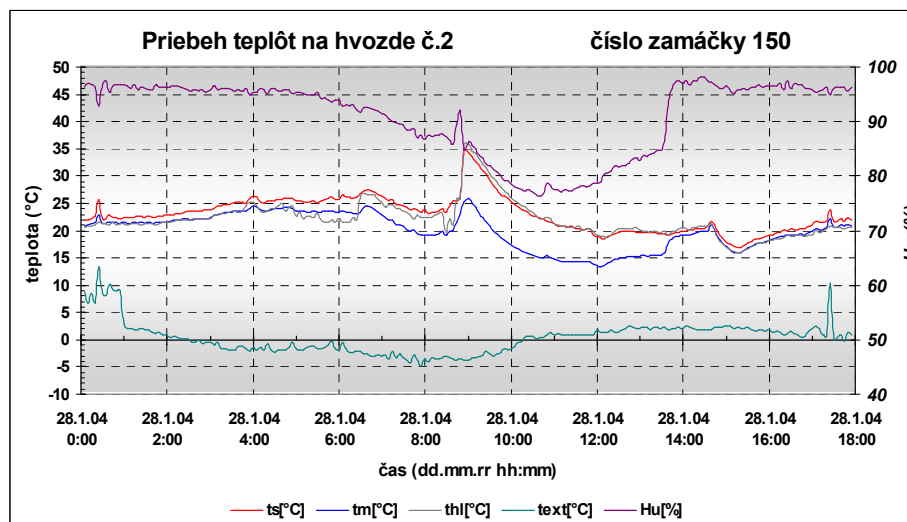
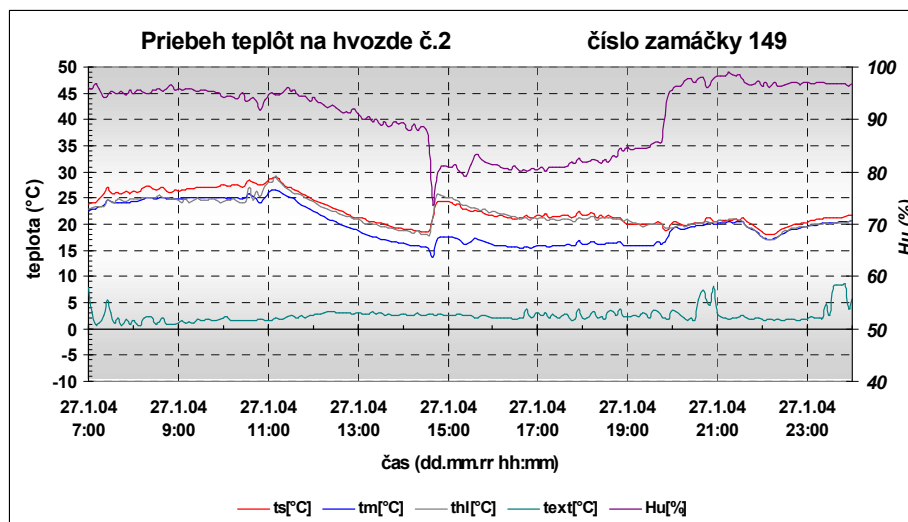
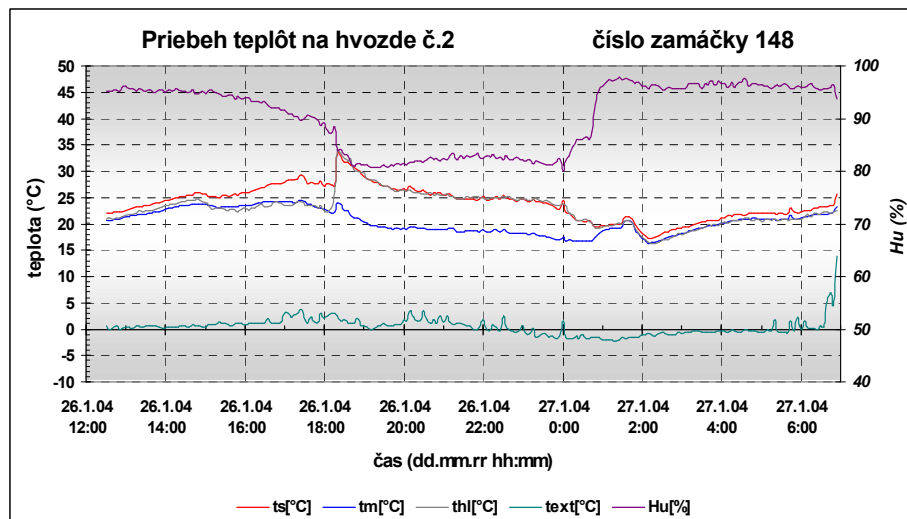
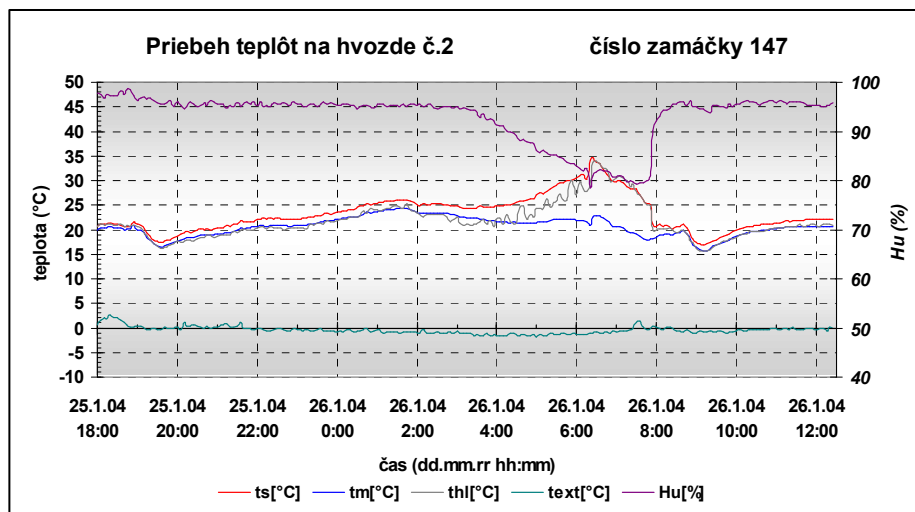
Vetrание rôznych technologických procesov, priestorov poľnohospodárskej výroby

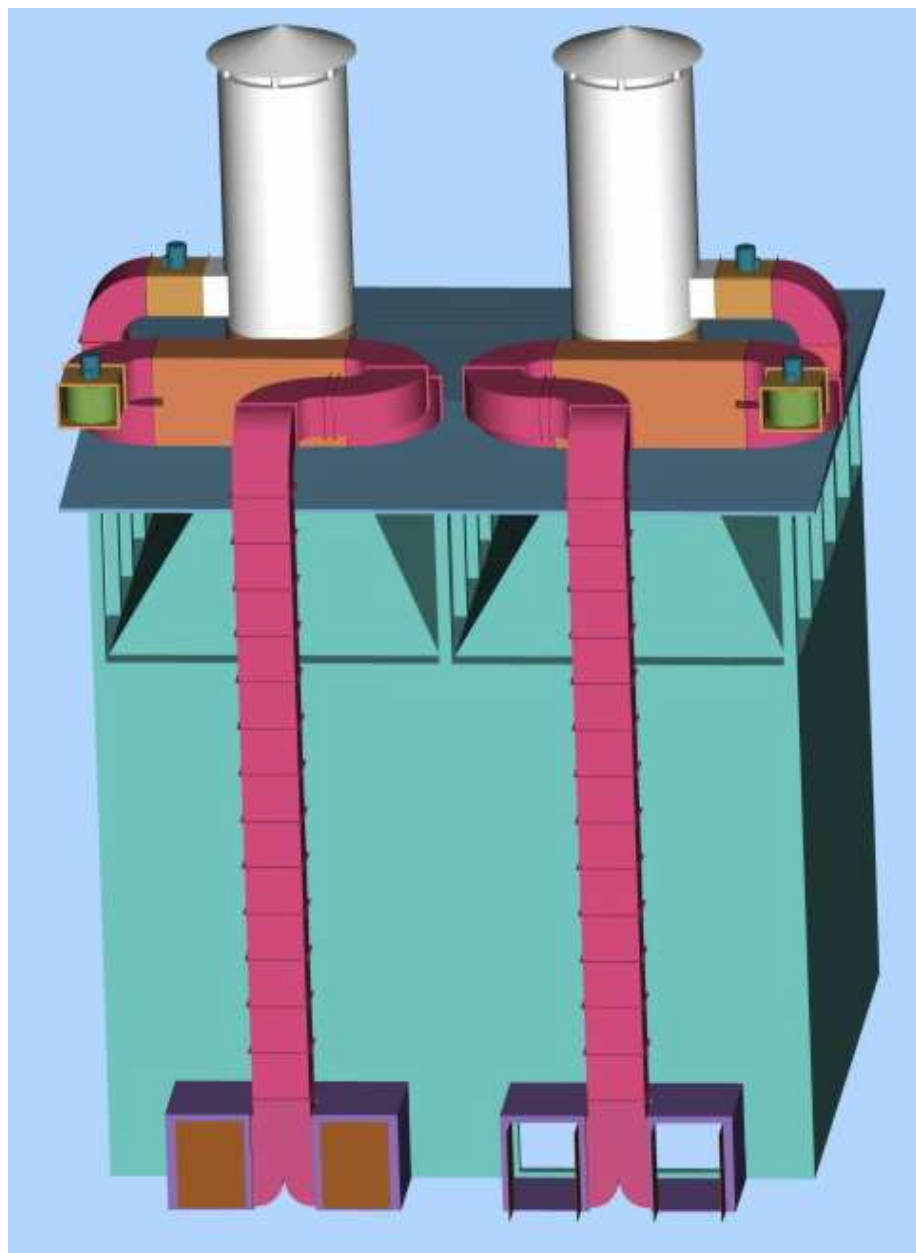
- s produkciou značného množstva nízko potenciálneho tepla
- veľmi často i množstva znečisťujúcich látok nachádzajúce sa v odpadovom vzduchu



špecifické požiadavky na teplovýmennú plochu

Záznamy teplôt na hvozde v sladovni





Návrh systému získavania nízkopotenciálneho tepla pri hvozdení sladu

Limitujúce faktory využitia tepla v zariadeniach pre jeho spätné získavanie

- **Teplota odpadového teplonosného média**
- **Celkový potenciál odpadového tepla**
- **Zaťaženie teplonosného média pevným alebo kvapalným úletom**
- **Možnosť umiestnenia získaného tepla**
- **Pravidelnosť výskytu**
- **Priestorové a konštrukčné obmedzenia**

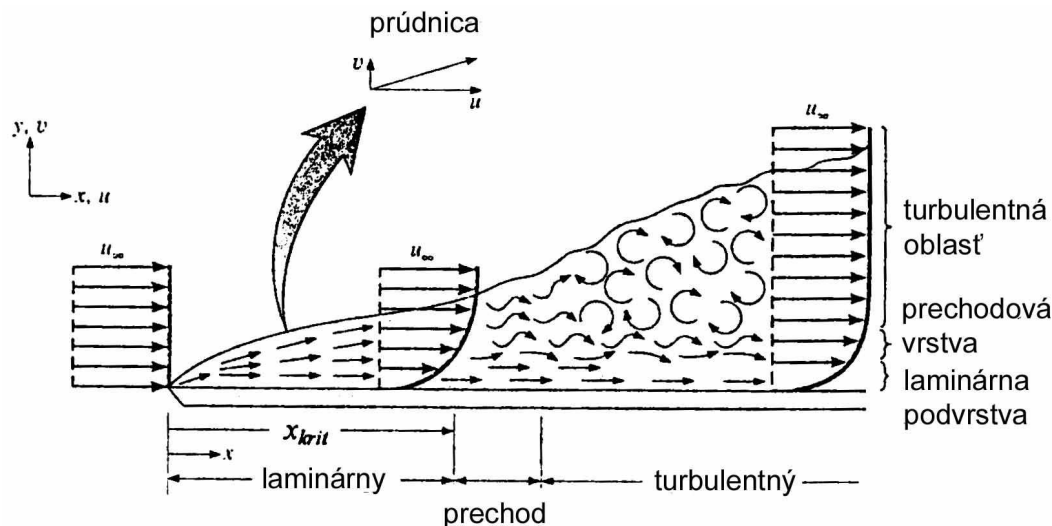
Limitujúce faktory prenosu tepla v zariadeniach pre jeho spätné získavanie



Zanášanie teplovýmenných plôch!

Možnosti intenzifikácie prestupu tepla

Cieľ: Maximálny prechod tepla z odpadového média do média ohrievaného

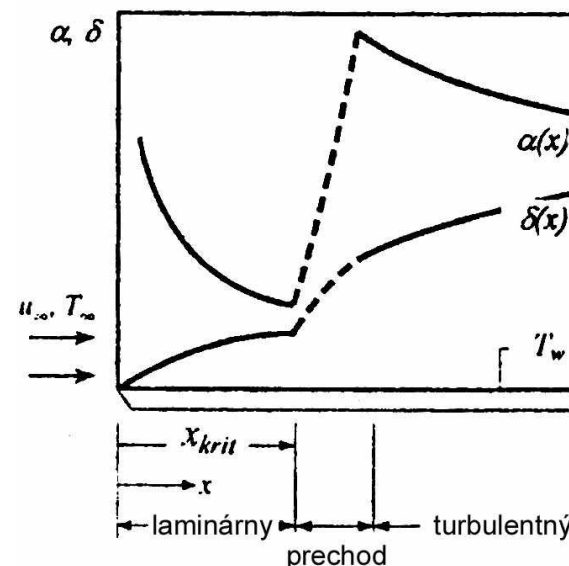


Urýchlenie prechodu do turbulencie:

- riadiacim prúdom
- úpravou tvaru povrchu
- teplotnou turbulizáciou
- akustickými účinkami

Iné spôsoby zvýšenia prestupu tepla:

- zväčšenie povrchu teplovýmennej plochy
- úprava povrchu
- zakrivením rúrky alebo zakrivením kanálu
- použitie statických zmiešavačov



Cena: značné zvýšenie tlakových strát - napr. 4x α zdrsnením povrchu spôsobí 50- násobné zvýšenie tlakovej straty

Ďakujem za pozornosť