

Obhajoba doktorské dizertační práce

# Optimalizace parametrů sekundárního chlazení plynulého odlévání oceli

Autor práce: **Ing. Lubomír Klimeš**

Školitel: **doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

30. října 2014

# Obsah

- 1 **motivace** řešení DDP
- 2 **cíle** DDP
- 3 **plynulé odlévání oceli**
- 4 **počítačový model teplotního pole**  
plynule odlévaného předlitku
- 5 **paralelizace výpočtu modelu** na GPU
- 6 **verifikace a validace** modelu
- 7 **prediktivní řízení** dynamického provozu lícího stroje

# Motivace řešení tématu DDP

- **ocel** – jeden z nejrozšířenějších konstrukčních materiálů
- **produkce** v roce 2014 cca  $1,6 \cdot 10^9$  tun
- dodržení **kvality** odlévaných předlitků a maximalizace **produktivity** výroby
- speciální značky oceli
- **optimální řízení** provozu lícího stroje
- nutnost použití **počítačových modelů** a **simulací**

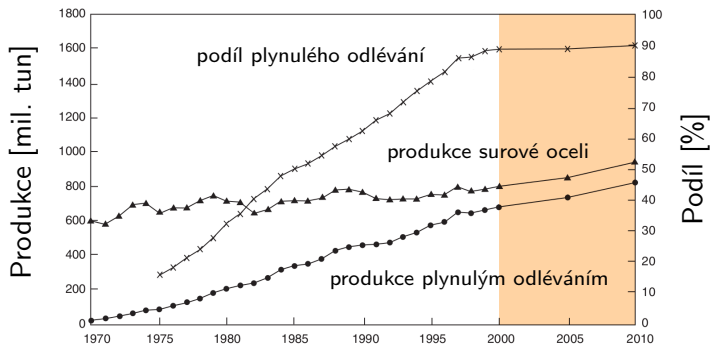


# Cíle DDP

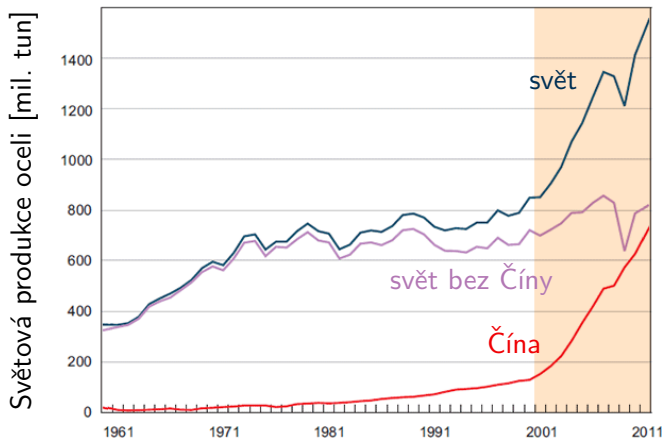
- 1** vývoj a **implementace počítačového modelu teplotního pole** plynule odlévaného sochoru
- 2** **zpracování experimentálních dat**: součinitel přestupu tepla chladicích trysek, provozní data z ocelárny
- 3** **validace a verifikace počítačového modelu** pomocí reálných dat z ocelárny
- 4** **vývoj a implementace počítačového systému pro optimální řízení** provozu licího stroje se zaměřením na dynamické situace

# Plynulé odlévání oceli

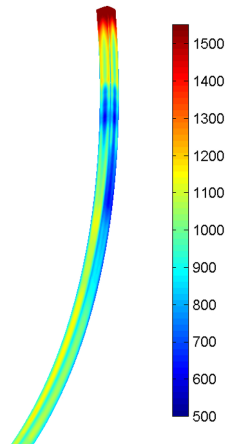
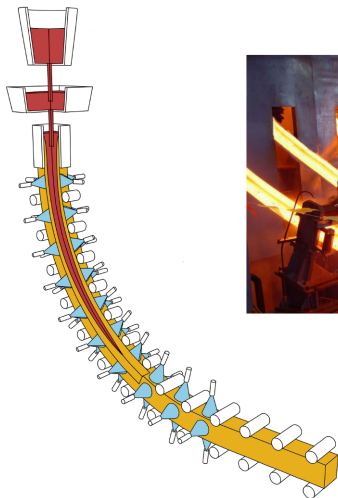
- rozmach průmyslového nasazení metody po II. sv. válce
- zvýšení produktivity výroby a kvality oceli
- 2014:  $\approx 95\% = 1,5 \cdot 10^9$  tun oceli – plynulé odlévání



# Plynulé odlévání oceli



# Plynulé odlévání oceli: sochorové ZPO



# Počítačový model teplotního pole: rovnice

## ■ Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \text{ grad } T) + v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q}$$

## ■ modelování fázových změn: metoda objemové entalpie

$$H(T) = \int_0^T \left( \rho c - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial \theta} \right) d\theta$$



# Počítačový model teplotního pole: rovnice

## ■ Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \text{ grad } T) + v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q}$$

## ■ modelování fázových změn: metoda objemové entalpie

$$H(T) = \int_0^T \left( \rho c - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial \theta} \right) d\theta$$

## ■ Fourierova-Kirchhoffova rovnice s metodou entalpie

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k \text{ grad } T) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

# Počítačový model teplotního pole: rovnice

## ■ Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \text{ grad } T) + v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q}$$

## ■ modelování fázových změn: metoda objemové entalpie

$$H(T) = \int_0^T \left( \rho c - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial \theta} \right) d\theta$$

## ■ Fourierova-Kirchhoffova rovnice s metodou entalpie

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k \text{ grad } T) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

## ■ implementace: metoda kontrolních objemů + explicitní diskretizace v čase

## Počítačový model teplotního pole: podmínky

- počáteční podmínka

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z)$$

- okrajové podmínky: hladina oceli v krystalizátoru

$$T(x, y, z = 0, t) = T_{\text{licí}}$$

- okrajové podmínky: krystalizátor, kontakt chladicích válců s předlitkem, místo pálení

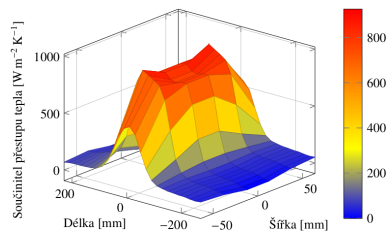
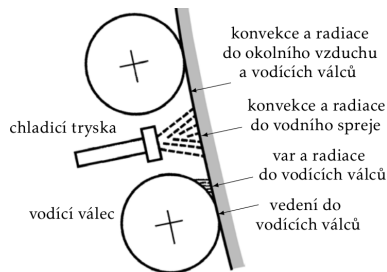
$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \dot{q}$$

- okrajové podmínky: sekundární a terciární chladicí zóny

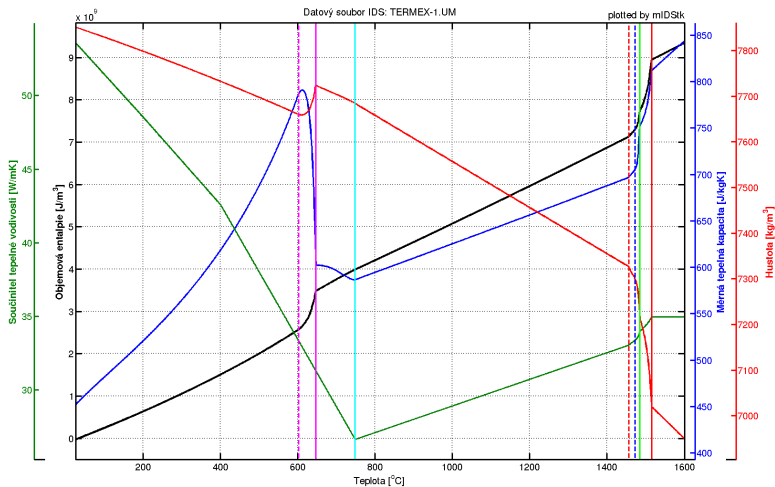
$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T - T_{\infty}) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4)$$

# Počítačový model teplotního pole: chladicí trysky

- $h = h(\dot{W}, T_{\text{povrch}}, v_{\text{lití}}, \dots)$
- Leidenfrostův jev a Leidenfrostova teplota
- empirické vzorce  $\times$  experimenty (např. „teplý model“)



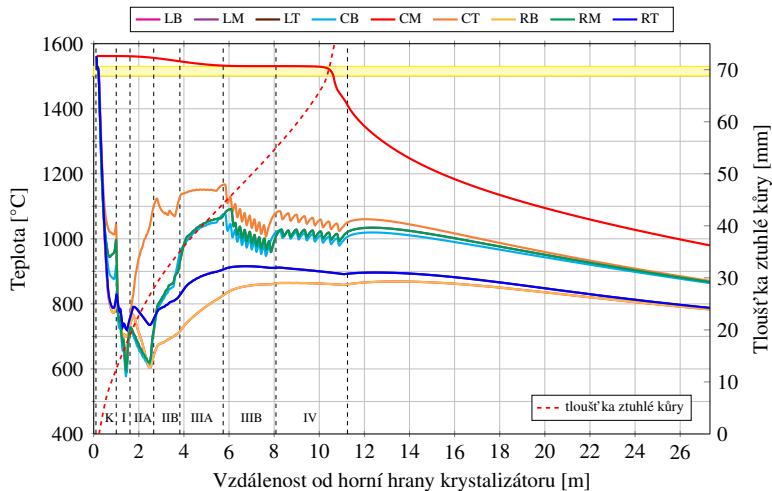
# Počítačový model teplotního pole: TF vlastnosti



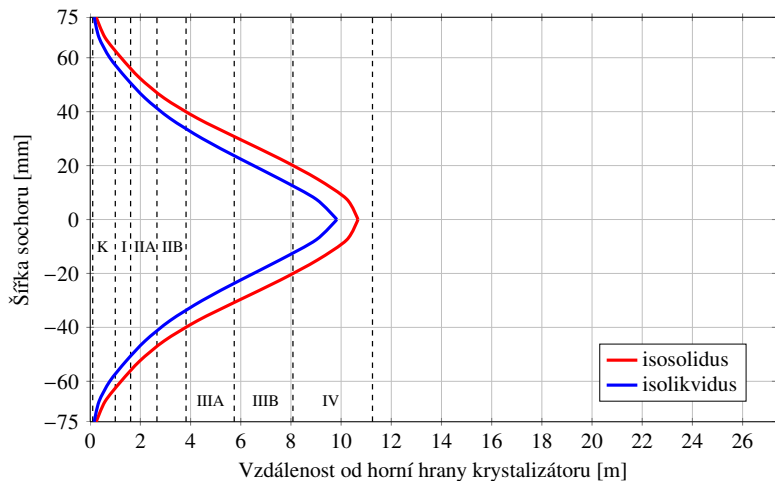
## Počítačový model teplotního pole: konfigurace

- konfigurace dle **licího stroje v Třineckých železárnách**
- **formát** sochoru:  $150 \times 150$  mm
- **licí rychlosti**: 2,5–3 m/min
- poloměr licího oblouku: 9 000 mm
- přímá část: 12 842 mm
- **okruhy sekundárního chlazení**: 6
- **počet chladicích trysek**: 194
- výpočetní síť:  $21 \times 21 \times (61 + 900 + 857) = 8 \cdot 10^5$
- velikost kontrolního objemu:  $7,5 \times 7,5 \times$  cca 15 mm

# Počítačový model teplotního pole: výsledky



# Počítačový model teplotního pole: výsledky





## Paralelizace modelu na GPU

- **počítačový model teplotního pole:**  
numerické řešení přenosu tepla a tuhnutí předlitku
- prostorová **výpočetní síť** × **časová diskretizace**
- simulace: řádově  $10^9$  **operací**
- **real-time** úlohy (optimalizace, regulace, ...)

# Paralelizace modelu na GPU

- **počítačový model teplotního pole:**  
numerické řešení přenosu tepla a tuhnutí předlitku
- prostorová **výpočetní síť** × **časová diskretizace**
- simulace: řádově  $10^9$  **operací**
- **real-time** úlohy (optimalizace, regulace, ...)

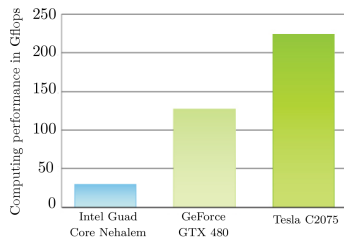
*Jak model zrychlit?*

# Paralelizace modelu na GPU

- **počítačový model teplotního pole:**  
numerické řešení přenosu tepla a tuhnutí předlitku
- prostorová **výpočetní síť** × **časová diskretizace**
- simulace: řádově  $10^9$  **operací**
- **real-time** úlohy (optimalizace, regulace, ...)

*Jak model zrychlit?*

- CPU → **GPGPU**
- masivně paralelizovatelné úlohy
- $10^2$  až  $10^3$  jader

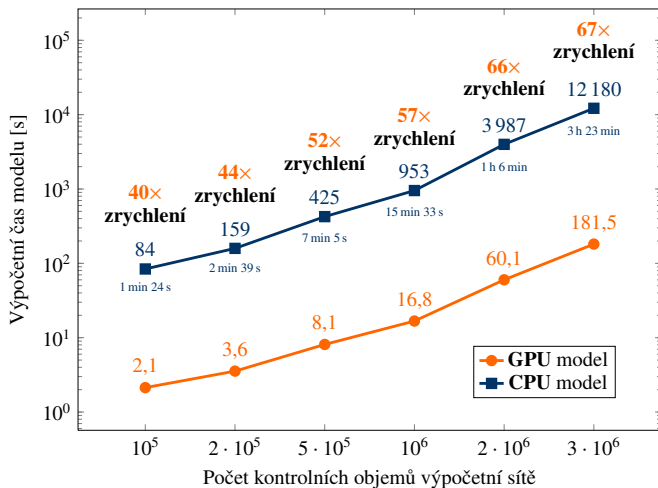


# Paralelizace modelu na GPU

- původní implementace NVIDIA GPU/CUDA C++
- **explicitní časová diskretizace**
- paralelizace pro kontrolní objemy v dané časové iteraci:
  - 1 stanovení tepelné vodivosti
  - 2 výpočet  $H^{t+\Delta t}$
  - 3 přepoččet  $H^{t+\Delta t} \rightarrow T^{t+\Delta t}$
- **GPU NVIDIA Tesla C2075**  
448 CUDA jader, 6 GB RAM



# Paralelizace modelu na GPU: benchmarking

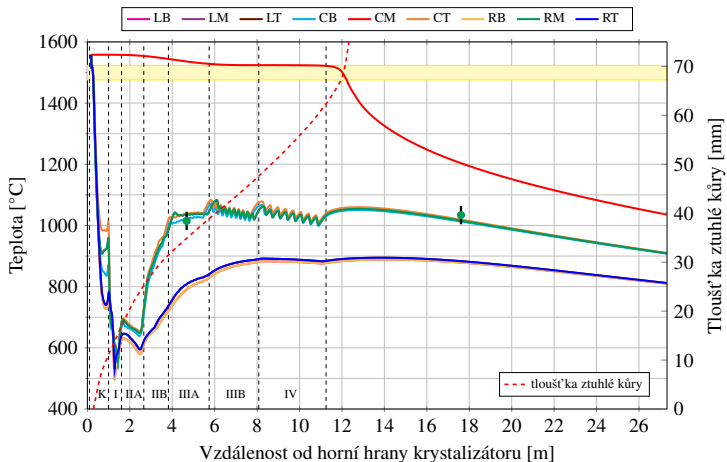


## Verifikace a validace modelu

- zpracována **reálná data z taveb** z Třineckých železáren
- dvě **pyrometrická měření**
- tři značky oceli: 9SMN28, TERMEX-1, K70CAR



# Verifikace a validace modelu: ocel 9SMN28



# Prediktivní řízení pomocí GPU modelu

- řízení **dynamických situací** během lití
- **model predictive control** (MPC)
- počítačový model = **senzor** pro predikci budoucího vývoje systému
- chování řízeného systému je „odhadnuto“ předem
- **real-time řízení** – velmi rychlý **GPU model**

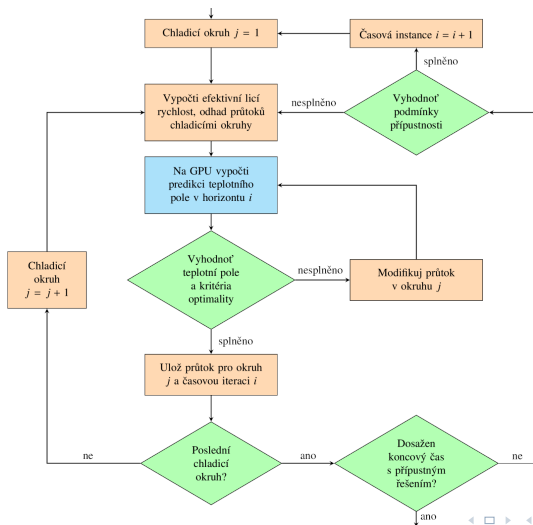




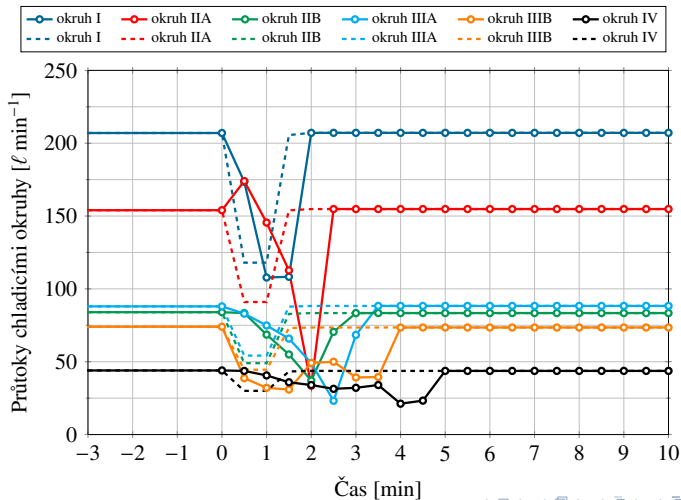
# Prediktivní řízení pomocí GPU modelu

- **navrhnout a implementován MPC systém**
- sensor predikce = GPU model teplotního pole
- **řízené veličiny**: povrchová teplota předlitku
- iterativní zaregulování průtoků v okruzích
- efektivní licí rychlost
- **vstupy** pro řízení:
  - licí rychlost
  - predikční horizont
  - požadované povrchové teploty předlitku
- **výstupy** řízení: průtoky vody v chladicích okruzích SCH

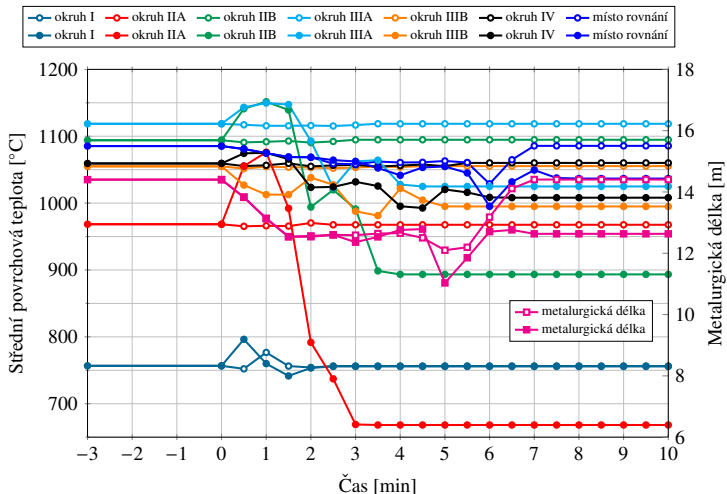
# Prediktivní řízení pomocí GPU modelu



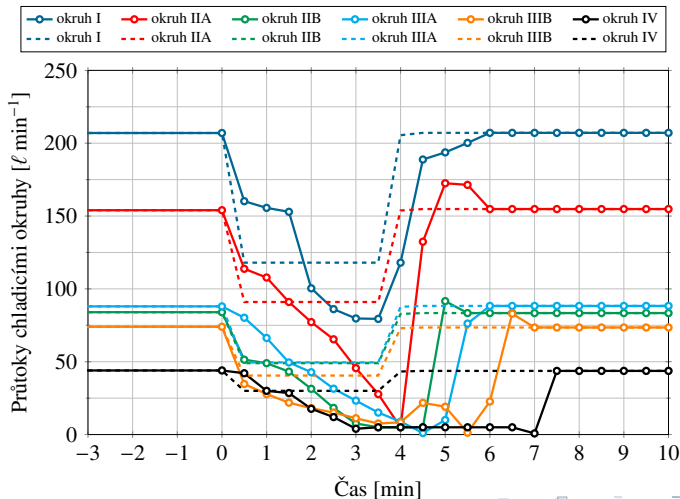
# MPC řízení: vznik průvalu (2,8 → 1,4 m/min: 90 s)



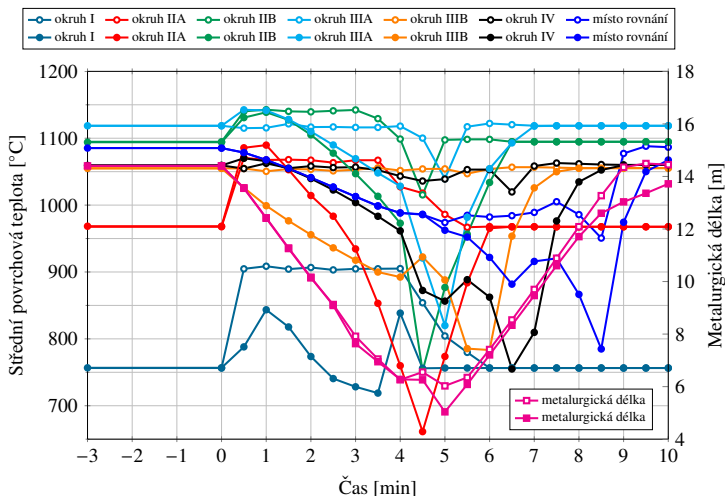
# MPC řízení: vznik průvalu (2,8 → 1,4 m/min: 90 s)



# MPC řízení: výměna mezipánve ( $2,8 \rightarrow 0,5 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ : 4 min)



# MPC řízení: výměna mezipánve ( $2,8 \rightarrow 0,5 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ : 4 min)



# Závěr

- všechny **cíle DDP splněny**
- více než **20 publikací** vztahující se k tématu DDP a dalších cca 20 ostatních (celkem **15 ve WoS, 7 s IF**)
- **h-index = 3**
- počet **software** dle metodiky RIV: 4
- zaměstnanecký vynález → **patent**
- spolupráce na řešení 4 projektů GAČR, projektu COST a projektu OPVK
- řešitel a spoluřešitel 4 projektů specifického výzkumu IGA

**Děkuji vám  
za pozornost.**



## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

- 1** Stabilita numerické metody je zásadní pro numerické řešení. Je pochopitelné, že se hledá nejdelší časový krok, při kterém je výpočet ještě stabilní. Zkracování kroku by mělo vést ke zpřesňování výsledků. Bylo by možné hledat na druhém protipólu ještě nejmenší přípustný časový krok? Tato otázka by souvisela s počtem desetinných míst, na kterých je výpočet prováděn.

## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

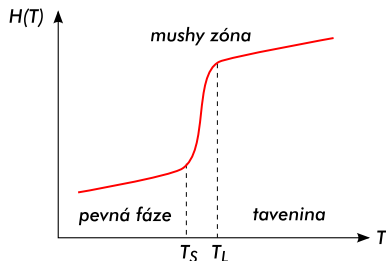
$\Delta t$ [s]	Teplota [°C]			
	MR	B	hrana	jádro
0,3	1102,09648	1098,90219	926,64063	1521,15444
0,2	1103,61411	1101,07238	928,65471	1521,33292
0,1	1105,38759	1103,31320	931,09232	1521,50762
0,05	1106,31119	1104,46482	932,57855	1521,59072
0,01	1107,00072	1105,28858	933,54380	1521,65416
0,005	1107,08595	1105,38964	933,66346	1521,66194
0,001	1107,15398	1105,47022	933,75902	1521,66815

$$\Delta t_{\text{teor}} = 0,274 \text{ s}$$

## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

- 2 Dvě použité metody — metoda entalpie a metoda efektivní kapacity jsou srovnány v kapitole 3.6. Srovnání vyznívá ve prospěch metody efektivní kapacity zejména s ohledem na rychlost výpočtů. Jako nevýhoda je však u této metody uváděna nižší přesnost. Je možné kvantifikovat tuto důležitou informaci?

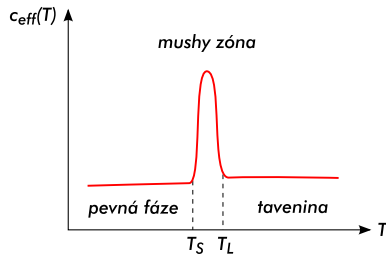
# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.



$$H(T) = \int_{T_{\text{ref}}}^T \left( \rho c - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial \theta} \right) d\theta$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = k \Delta T + v_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

$$T^t \rightarrow H^{t+\Delta t} \rightarrow T^{t+\Delta t}$$



$$c_{\text{eff}}(T) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial T} = c - L_f \frac{\partial f_s}{\partial T}$$

$$\rho c_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T + v_z c_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$T^t \rightarrow T^{t+\Delta t}$$

## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

- 3** Rovnice 3.65 v kapitole 3.8 jsou poněkud obtížně interpretovatelné, protože některé použité indexované symboly nejsou vysvětleny ani uvedeny v Seznamu použitých symbolů. Navíc by bylo vhodné, aby autor uvedl, který přístup používá on a případně i proč.

## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Modelování taveniny v jádře předlitku – rovnice (3.85):

$$k_{\text{eff}}(f_s, k_s, k_\ell, m \geq 1) = f_s k_s + m(1 - f_s) k_\ell$$

$$k_{\text{eff}}(k, T, T_s, T_\ell, m \geq 1) = k \left[ 1 + (m - 1) \left( \frac{T - T_s}{T_\ell - T_s} \right)^2 \right]$$

$$k_{\text{eff}}(k_s, k_\ell, T, T_s, T_\ell) = k_s + (k_\ell - k_s) \frac{T - T_s}{T_\ell - T_s}$$

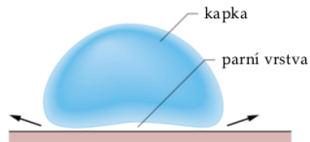
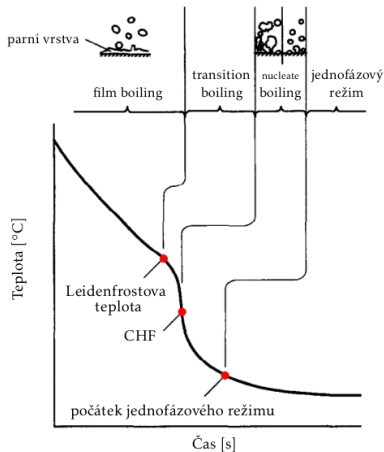
$$k_{\text{eff}}(k_s, f_\ell) = k (1 + m f_\ell)$$

- $s = \text{solid}$ ,  $\ell = \text{liquid}$ ,  $m = \text{koeficient}$
- $k_{\text{eff}}$  důležitý zejména při modelování krystalizátoru

## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

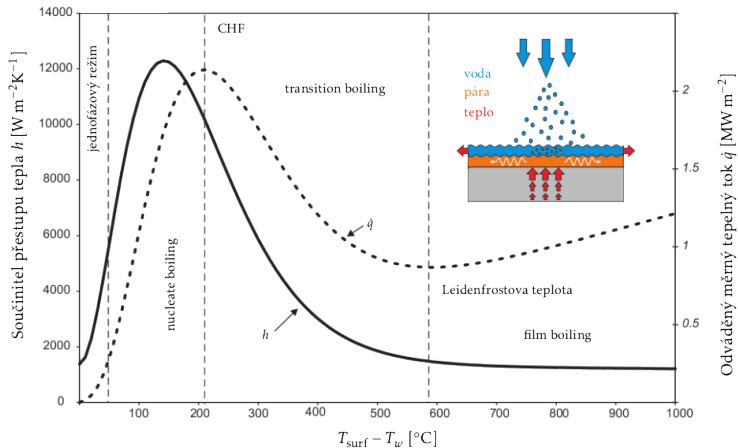
- 4 V kapitole 3.9 na straně 53 nahoře je uvedeno, že v režimu varu povrchového filmu dochází ke krátkému kontaktu kapek (1–10 ms) s chlazeným povrchem. V navazujícím textu je však uvedeno, že parní vrstva brání kapkám smáčet povrch. Běžně je také v literatuře uváděno, že v tomto režimu nedochází k přímému kontaktu kapek s povrchem a přenos tepla je zde do značné míry nezávislý i na drsnosti povrchu. Je možné vysvětlit informaci o kontaktu kapek s povrchem?

# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.





# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

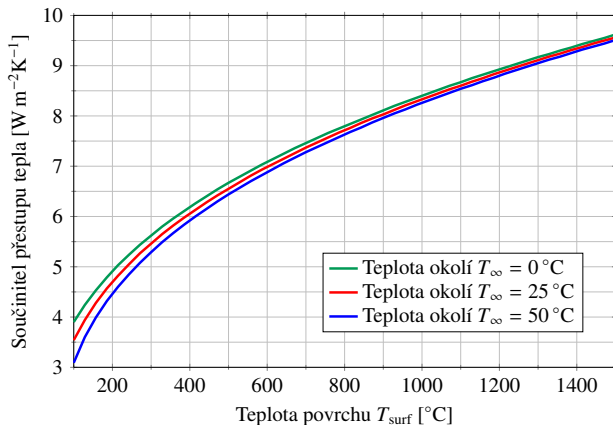


## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

- 5** V kapitole 3.11 je u komentáře vztahu 3.73 a obr. 3.26 pravděpodobně přehlédnutím uvedeno, že „teplota má na emisivitu povrchu malý vliv“, když se vztah váže k intenzitě přenosu tepla při přirozené konvekci. Jako komentář oponenta bych uvedl, že by podmínky skutečně přirozené konvekce, s hodnotami součinitele přestupu tepla do  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , bylo na licím stroji obtížné hledat.

# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

$$h_{\text{nat}} = 0,84 \sqrt[3]{T_{\text{surf}} - T_{\infty}}$$

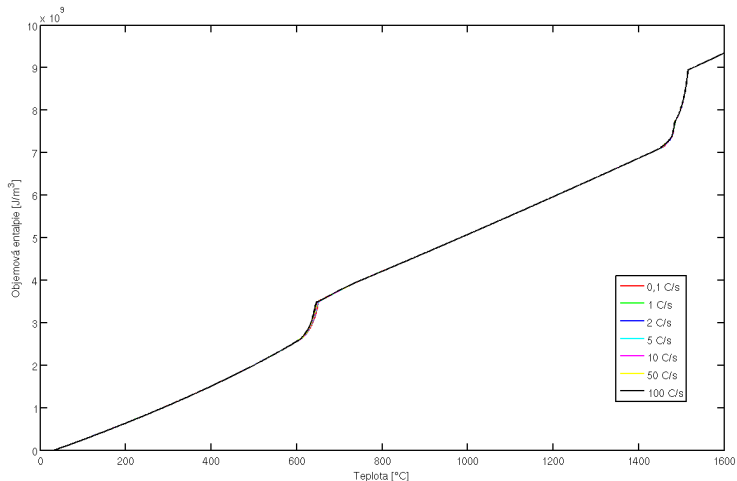


## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

- 6** Kapitola 4 a zejména část 4.1 ukazuje velmi pěkně závislosti termofyzikálních veličin na teplotě. V části 4.2 autor uvádí „při výpočtu vlastností je možné volit rychlost ochlazování“. Jak výrazné jsou tyto závislosti při modelování kontinuálního lití oceli a jak by pak bylo vhodné přistupovat k problému, kde rychlost ochlazování je v různých místech tělesa různá?

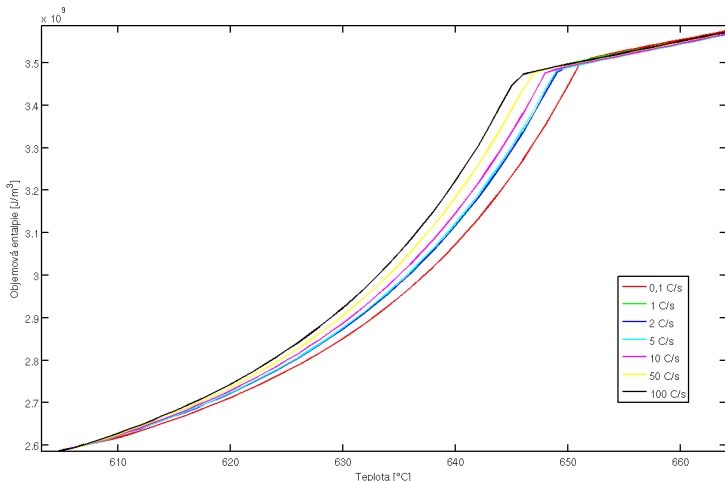
# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Ochlazování do teploty 1 000 °C



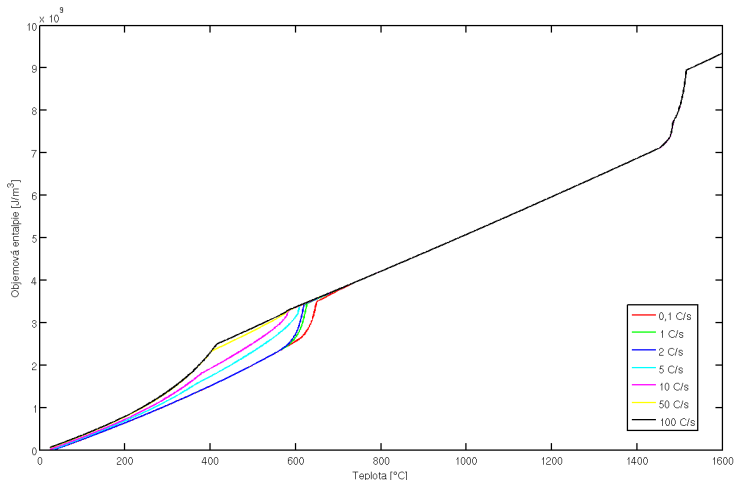
# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Ochlazování do teploty 1 000 °C



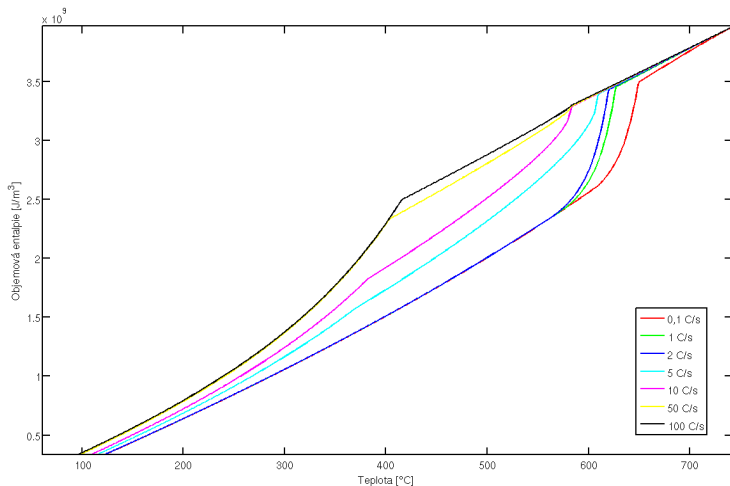
# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Ochlazování pod teplotu 1 000 °C (ADC)



# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Ochlazování pod teplotu 1 000 °C (ADC)



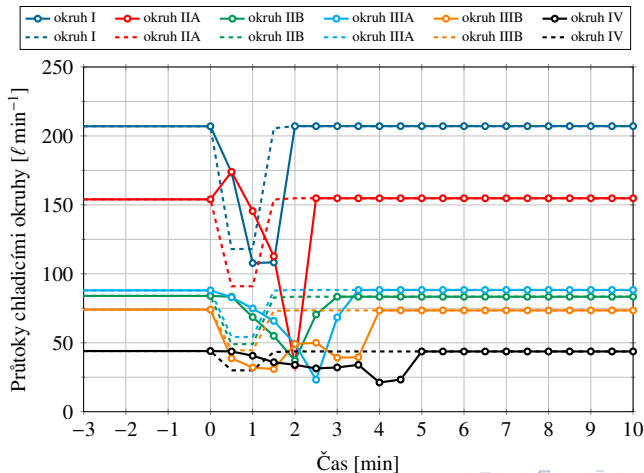


## Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

- 7** V kapitole 7.4 jsou uvedeny ukázky reakce řídicího systému na několik modelových situací. Třetí případová studie ukazuje reakci na krátké, ale výrazné snížení licí rychlosti. Na obrázku 7.15 jsou zobrazeny průtoky přes jednotlivé chladicí okruhy. Simulovaná „porucha“ je velmi dynamická, ovšem změny průtoků jsou prováděny s časovým krokem jedna minuta – tedy krokem velmi dlouhým. Jedná se o problém regulace licího stroje, problém regulačního programu nebo jen o způsob zobrazení dat v těchto obrázcích?

# Otázky oponenta: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Případová studie se vznikem průvalu (2,8 → 1,4 m/min: 90 s)

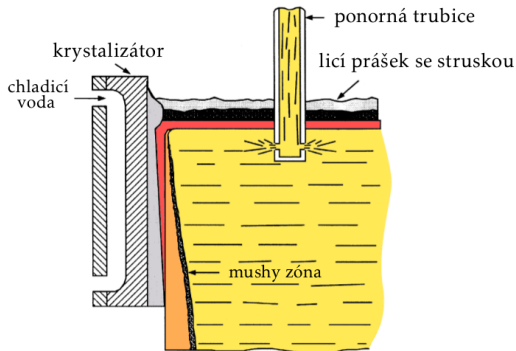


## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 1 Na straně 15 se hovoří o „vzduchové mezeře“, avšak mezera není vyplněná čistým vzduchem.

# Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 1 Na straně 15 se hovoří o „vzduchové mezeře“, avšak mezera není vyplněná čistým vzduchem.



## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 2 Jako doplnění k tvrzení „Metalurgická délka je přímo úměrná licí rychlosti a nepřímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti oceli“ na straně 20 prosím autora, aby se pokusil odhadnout a porovnat vnitřní a vnější tepelné odpory a jejich vliv na intenzitu odvodu tepla z předlitku v jednotlivých zónách chlazení, a tedy i na metalurgickou délku.

## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

Krystalizátor	$k/h$	$d$ [mm]	$R$ [ $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{kW}}$ ]	Podíl [%]	Podíl* [%]
Tavenina	$35 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	65	1,857	14,9	64,3
Mushy zóna	$34 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	5	0,147	1,2	5,1
Ztuhlá kůra	$32 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	5	0,156	1,2	5,4
Licí prášek	$0,4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	0,25	0,625	5,0	21,7
Plynová mezera	$0,026 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	0,25	9,615	76,9	—
Cu stěna	$375 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	25	0,067	0,5	2,3
Voda	$28 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{K}}$	—	0,036	0,3	1,2

12,5 / 2,9\*

## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

Sekundární ch.	$k/h$	$d$ [mm]	$R$ [ $\frac{m^2K}{kW}$ ]	Podíl [%]	Podíl* [%]
Tavenina	$35 \frac{W}{mK}$	25	0,714	6,7	28,5
Mushy zóna	$34 \frac{W}{mK}$	10	0,294	2,8	11,7
Ztuhlá kůra	$30 \frac{W}{mK}$	40	1,333	12,4	53,2
Přirozená konvekce a radiace	$120 \frac{W}{m^2K}$	—	8,333	78,1	—
Chladicí trysky a radiace	$6\,110 \frac{W}{m^2K}$	—	0,164	—	6,6
			10,6 / 2,5*		

# Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

<b>Terciární ch.</b>	$k/h$	$d$ [mm]	$R$ [ $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{kW}}$ ]	Podíl [%]
Ztuhlá kůra	$30 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	75	2,5	21,6
Přirozená konvekce a radiace	$110 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	—	9,091	78,4
			11,6	

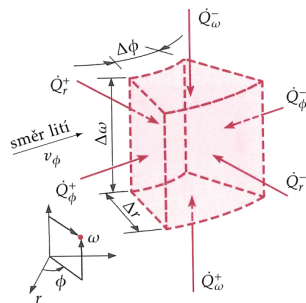
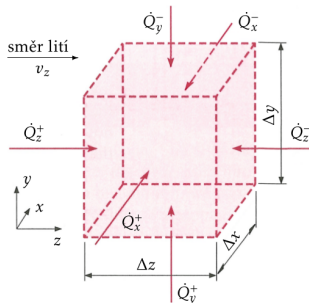


## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 3 Použil autor ve svém modelu cylindrické souřadnice v licím oblouku nebo je tvar nahrazen rovným úsekem?

## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 3** Použil autor ve svém modelu cylindrické souřadnice v licím oblouku nebo je tvar nahrazen rovným úsekem?



## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 4 Používá autor v modelu konstantní nebo proměnný časový výpočtový krok? Jakým způsobem je výpočtový krok stanoven?

## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 4 Používá autor v modelu konstantní nebo proměnný časový výpočtový krok? Jakým způsobem je výpočtový krok stanoven?

Pro danou konfiguraci výpočetní sítě ( $7,5 \times 7,5 \times 15$  mm):

- **konstantní**  $\Delta t = 0,15$  s
- teoretický  $\Delta t_{\text{teor}} = 0,211$  s pro  $v_z = 3$  m/min
- maximální  $\Delta t_{\text{max}} = 0,23$  s pro  $v_z = 3$  m/min

# Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

**Vnitřní kontrolní objem.**

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \underbrace{\left(1 - \frac{2k \Delta t}{\rho c \Delta^2 x} - \frac{2k \Delta t}{\rho c \Delta^2 y} - \frac{2k \Delta t}{\rho c \Delta^2 x} - \frac{v_z \Delta t}{\Delta z}\right)}_{\geq 0} T_{i,j,k}^n + \dots,$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{2k}{\rho c} \left( \frac{1}{\Delta^2 x} + \frac{1}{\Delta^2 y} + \frac{1}{\Delta^2 z} \right) + \frac{v_z}{\Delta z}}.$$

**Povrchový kontrolní objem s konvekcí.**

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \underbrace{\left(1 - \frac{k \Delta t}{\rho c \Delta^2 x} - \frac{2k \Delta t}{\rho c \Delta^2 y} - \frac{2k \Delta t}{\rho c \Delta^2 x} - \frac{h \Delta t}{\rho c \Delta x} - \frac{v_z \Delta t}{\Delta z}\right)}_{\geq 0} T_{i,j,k}^n + \dots,$$

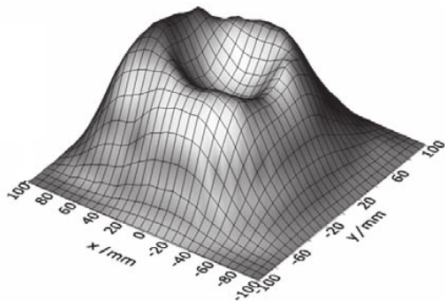
$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{k}{\rho c} \left( \frac{1}{\Delta^2 x} + \frac{2}{\Delta^2 y} + \frac{2}{\Delta^2 z} \right) + \frac{h}{\rho c \Delta x} + \frac{v_z}{\Delta z}}.$$

## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 5 Je Gaussovská pravděpodobnostní funkce vhodná pro aproximaci rozložení součinitele přestupu tepla kuželové trysky, uvážíme-li častý případ funkce rozložení ve tvaru „kráteru“ u těchto typů trysek?

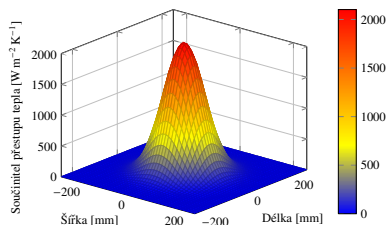
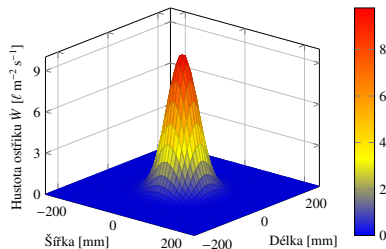
## Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

- 5 Je Gaussovská pravděpodobnostní funkce vhodná pro aproximaci rozložení součinitele přestupu tepla kuželové trysky, uvážíme-li častý případ funkce rozložení ve tvaru „kráteru“ u těchto typů trysek?



# Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

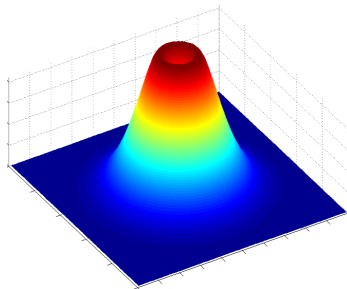
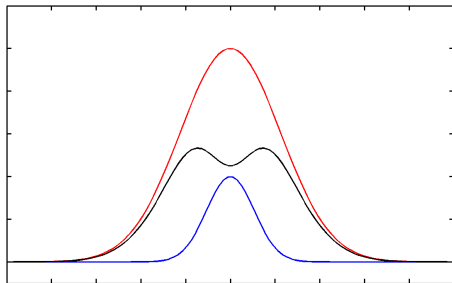
$$f(x, y) = k_1 \cdot \exp \left\{ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{k_2} \right\}$$





# Otázky oponenta: doc. Dr. Ing. René Pyszko

$$f(x, y) = k_{1,1} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{k_{2,1}} \right\} - k_{1,2} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{k_{2,2}} \right\}$$



## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

- 1 Ako ste identifikovali statické a dynamické charakteristiky jednotlivých regulačných obvodov?

## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

- 1 Ako ste identifikovali statické a dynamické charakteristiky jednotlivých regulačných obvodov?
  - zesílení a časové konstanty regulačních obvodů
  - např. skoková změna průtoku v chladicím okruhu a odezva na tuto změnu

## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

- 1 Ako ste identifikovali statické a dynamické charakteristiky jednotlivých regulačných obvodov?
  - zesílení a časové konstanty regulačních obvodů
  - např. skoková změna průtoku v chladicím okruhu a odezva na tuto změnu
  - MPC regulátor tyto údaje nevyužívá, proto nebyly stanoveny
  - možnost zlepšit regulační chování integrací charakteristik do MPC regulátoru

## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

- 2 Ako ste volili parametre MPC regulátora (matice  $\Psi$  a  $\Lambda$ )? Boli tieto parametre pre všetky simulačné štúdie rovnaké?

## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

- 2 Ako ste volili parametre MPC regulátora (matice  $\Psi$  a  $\Lambda$ )? Boli tieto parametre pre všetky simulačné štúdie rovnaké?

$$\begin{aligned}
 J(k) &= \sum_{p=1}^N [y(k+p|k) - y^{\text{SP}}(k+p|k)]^T \Psi(p) [y(k+p|k) - y^{\text{SP}}(k+p|k)] + \\
 &\quad + \sum_{p=0}^{M-1} \Delta u(k+p|k)^T \Lambda(p) \Delta u(k+p|k) = \\
 &\quad = \sum_{p=1}^N \|y(k+p|k) - y^{\text{SP}}(k+p|k)\|_{\Psi(p)}^2 + \sum_{p=0}^{M-1} \|\Delta u(k+p|k)\|_{\Lambda(p)}^2
 \end{aligned}$$

- implementovaný MPC regulátor:  $\Psi = \mathbf{I}$ ,  $\Lambda = \mathbf{0}$

## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

3 Ako ste volili horizont predikcie?

## Otázky oponenta: Ing. Pavol Buček, Ph.D.

- 3 Ako ste volili horizont predikcie?
  - horizont predikce 30 s
  - kompromis: trvání dynamických stavů vs. výpočetní náročnost a čas výpočtu vs. zpoždění reakce technologie při modifikaci průtoků v jednotlivých okruzích
  - MPC systém umožňuje použití libovolného horizontu predikce dle požadavků uživatele



**Děkuji vám  
za pozornost.**

**Děkuji vám  
za pozornost.**