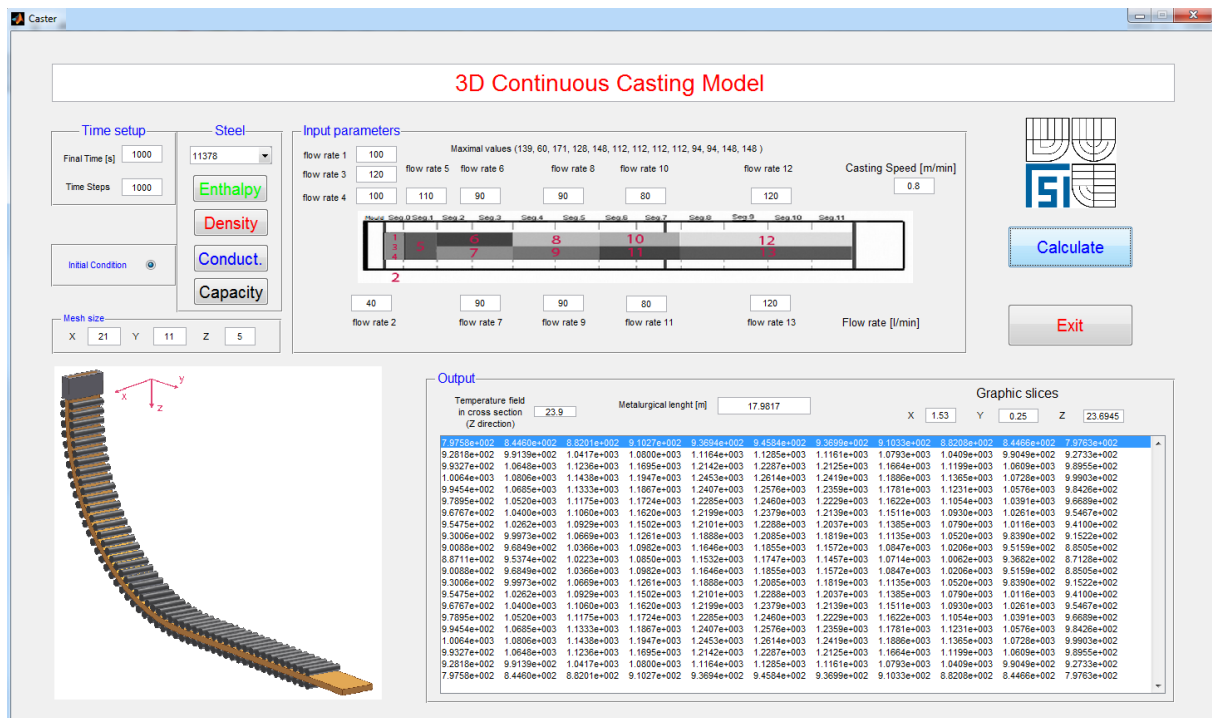


3D Continuous Casting Model



Obr. 1: Interface programu 3D Continuous Casting Model

Apollo ID: 25905

Datum: 01. 03. 2012

Typ projektu: R – software

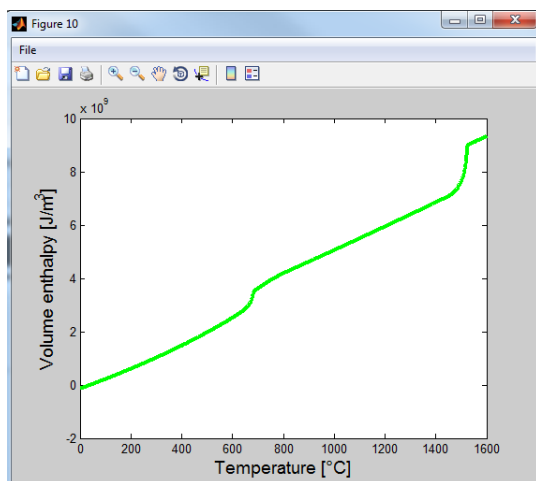
Autoři: Ing. Tomáš Mauder

Popis funkce

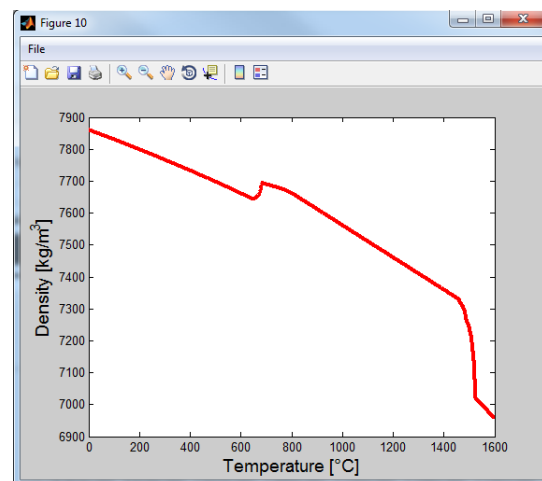
Software 3D Continuous Casting Model je určen pro simulaci tepelných pochodů při plynulém odlévání oceli [1, 3]. Pomocí programu může uživatel snadno měnit řídicí parametry zařízení pro plynulé odlévání (ZPO) ovlivňující tuhnutí oceli, kterými jsou lící rychlost a průtoky vody pro jednotlivé chladicí okruhy sekundární chladicí zóny [1]. Geometrie ZPO odpovídá radiálnímu bramovému lití s výstupním rozměrem bramy v příčném řezu 1530 x 250 mm. Na základě vstupních parametrů uživatel dostane vykresleno teplotní pole podél celého procesu, teplotní profil na povrchu a uvnitř ZPO, velikost metalurgické délky a hodnoty teplot v jednotlivých výpočetních uzlech.

Před samotným spuštěním výpočtu může uživatel nastavit velikost výpočetní sítě, dobu výpočtu a časový krok. Výsledky se ukládají v souborech s koncovkou *.mat. Při použití počáteční podmínky může uživatel počítat teplotní pole od poslední uložené pozice. Navíc může uživatel porovnávat teplotní pole pro různé třídy oceli, které jsou v nabídce programu. Termo-fyzikální parametry jednotlivých značek oceli a jejich teplotní závislost je rovněž v programu k dispozici (viz obr. 2-5). Výsledky jsou zpracovány do čtyř grafů. První graf (obr. 6) vykresluje teplotní pole na povrchu předlitku pro celou 3D geometrii ZPO. Pro lepší názornost je však použit obrázek 7, kde je tento graf rozvinutý. Zde můžeme lépe vidět teplotní gradienty a nerovnoměrné rozložení chlazení na povrchu předlitku. Uživatel si navíc může nastavit, v kterých řezech chce teplotní pole vykreslit (obr. 8). Další typ grafu je na obrázku 9, kde jsou znázorněny průběhy izolikvidy a izosolidy v podélném osovém řezu předlitku. Z tohoto grafu pak lze snadno odečíst metalurgickou délku. Třetí typ grafu je zobrazen na obrázku 10. V tomto grafu jsou znázorněny průběhy teplot v šesti bodech příčného průřezu bramy. Je zde znázorněna teplota likvidu a teplota solidu, oblast krystalizátoru, růst tloušťky licí kůry jak ze strany malého, tak ze strany velkého rádiu (černá, resp. modrozelená křivka).

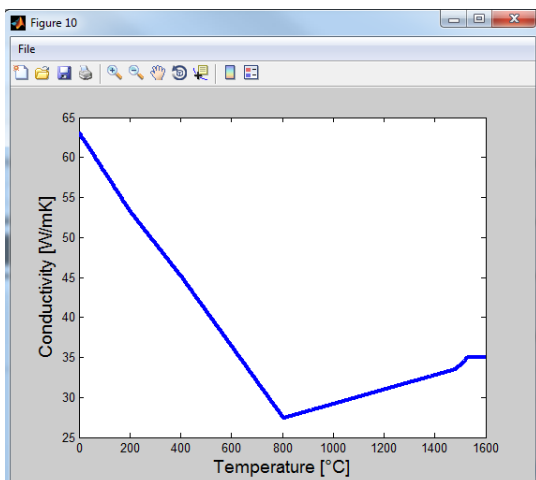
Model je napsán v programu MATLAB verze R2011b a kompilován toolboxem Matlab Compiler. Program byl vytvořen jak pro 32bit verzi tak pro 64bit verzi.



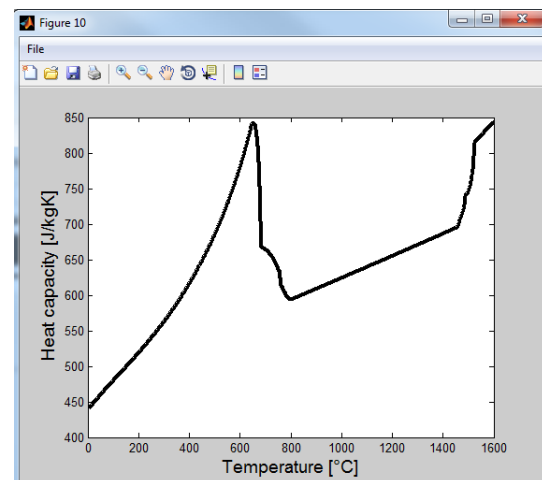
Obr. 2: Objemová entalpie



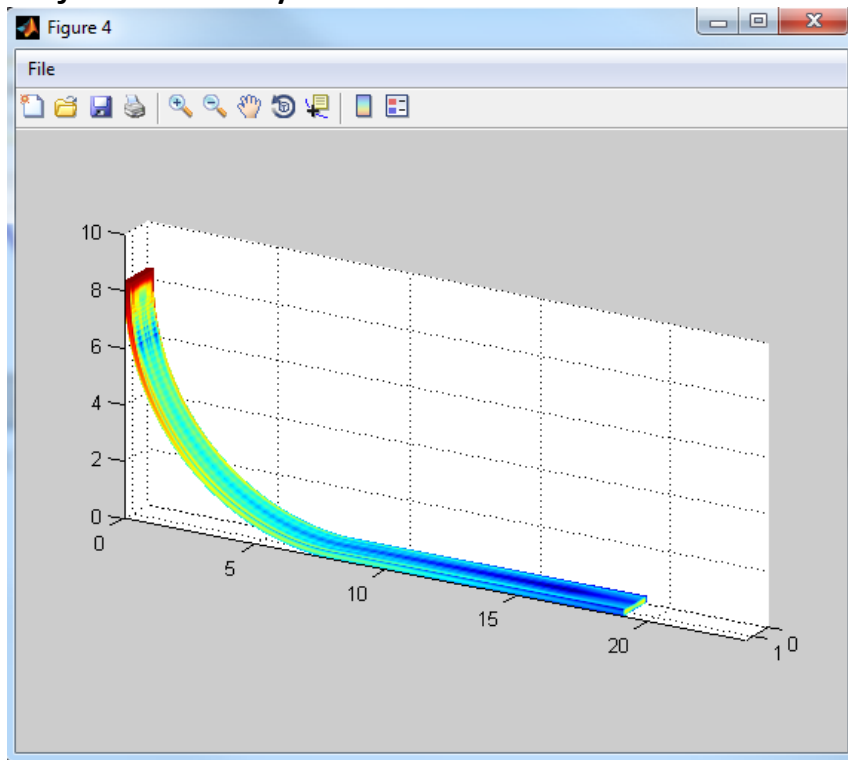
Obr. 3: Hustota



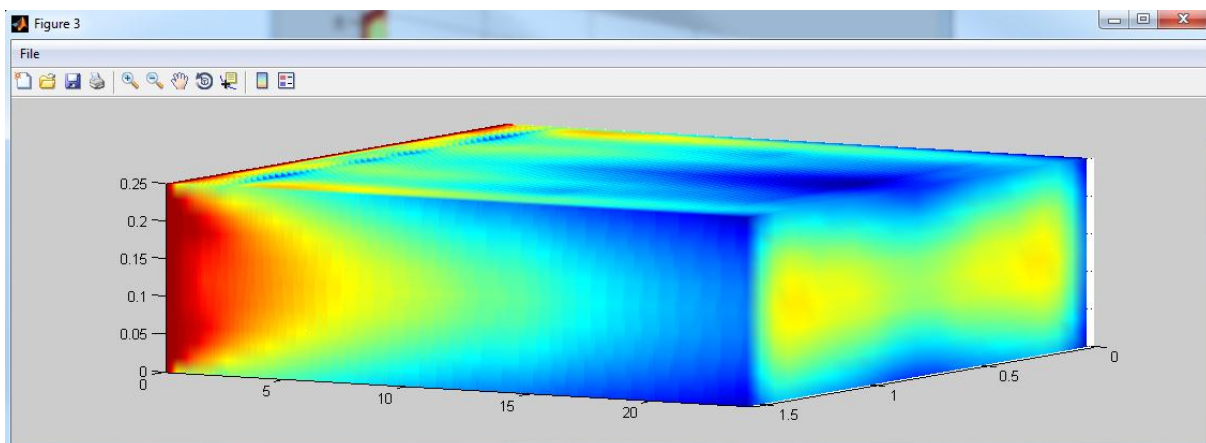
Obr. 4: Tepelná vodivost



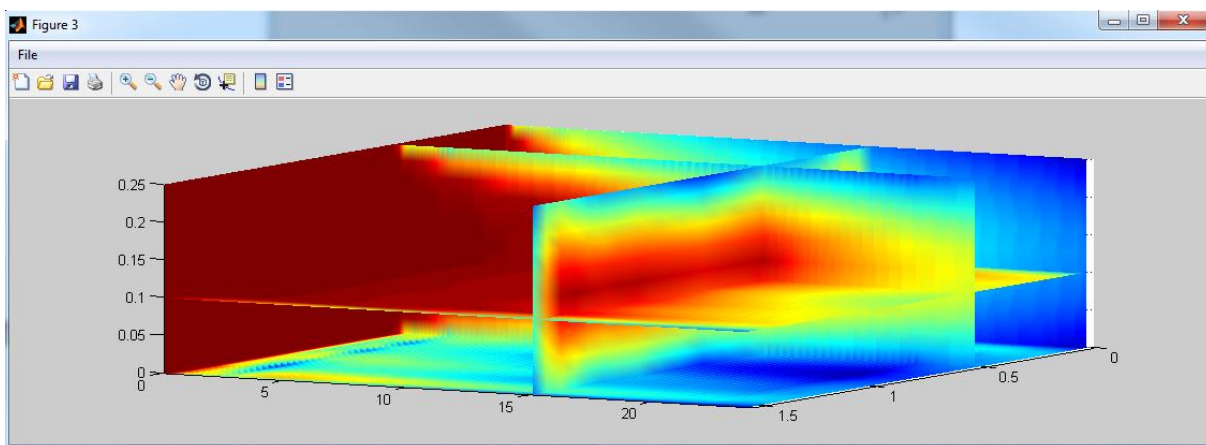
Obr. 5: Měrná tepelná kapacita



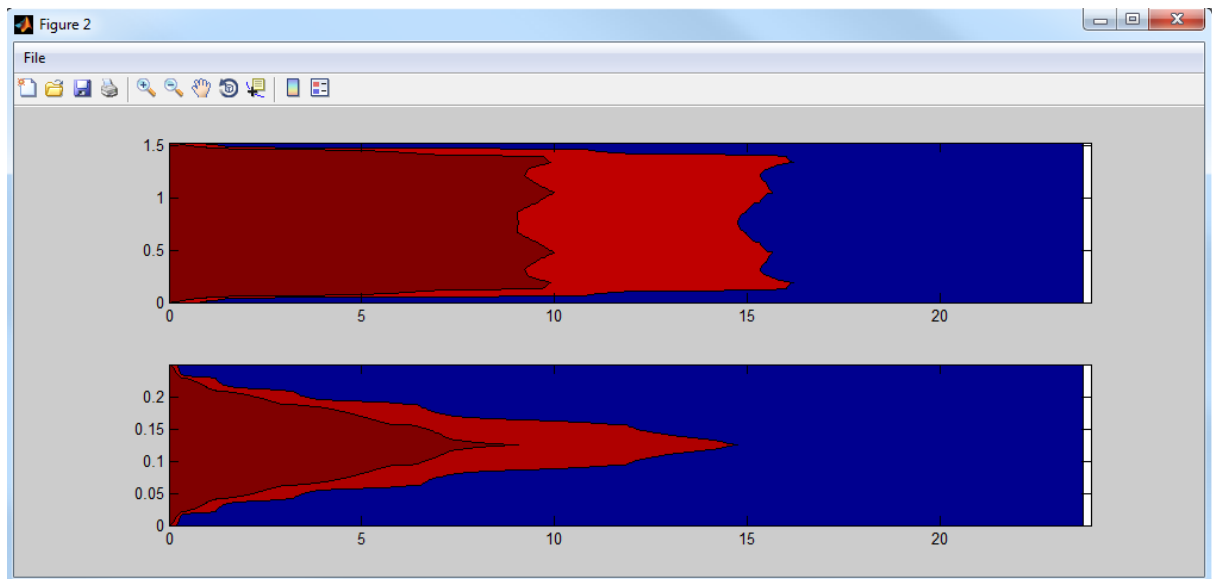
Obr. 6: Teplotní pole na povrchu předlitku



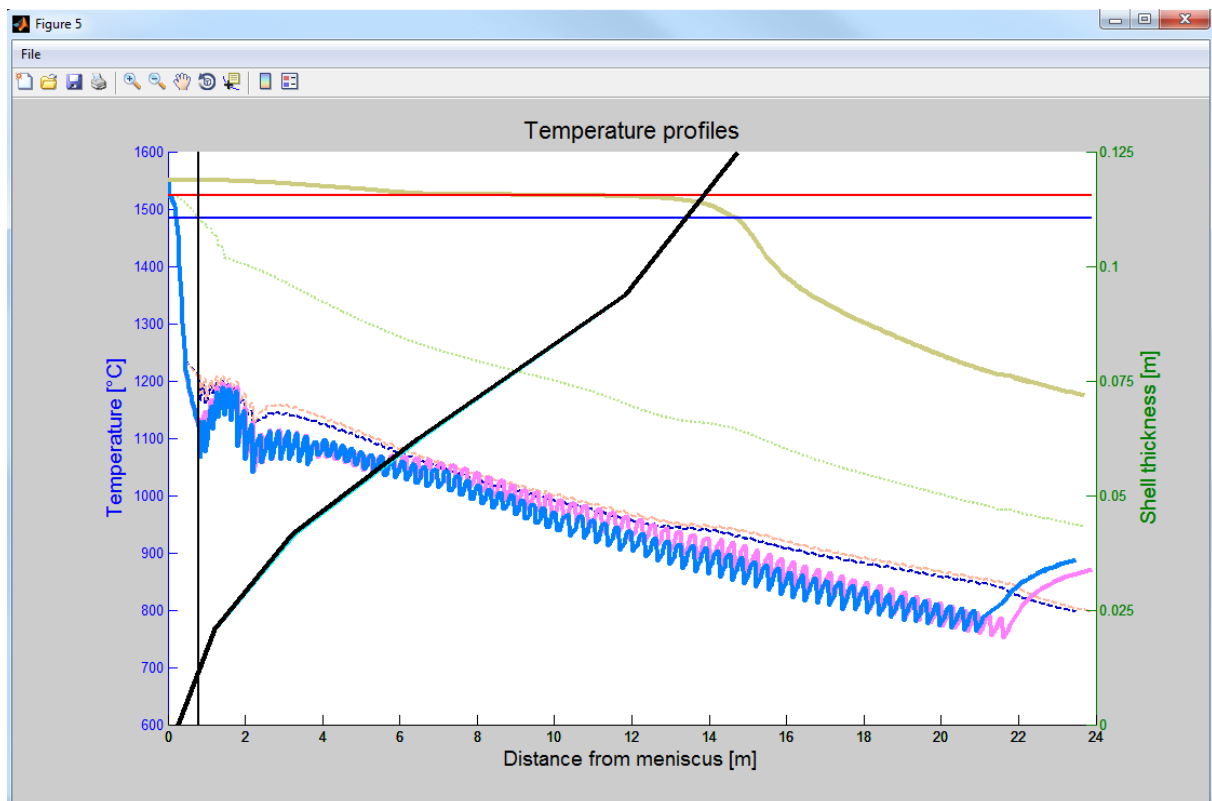
Obr. 7: Teplotní pole v rozvinutém tvaru



Obr. 8: Teplotní pole v rozvinutém tvaru



Obr. 9: Průběhy izolikvidy a izosolidy



Obr. 10: Teplotní průběhy a tvorba tloušťky licí kůry

Popis algoritmu

Model pro predikci rozložení teplot, růstu utuhlé kůry a výpočtu metalurgické délky je založen na Fourierově-Kirghoffově parciální diferenciální rovnici [1, 2, 3] se zavedením objemové entalpie pro řešení fázových a strukturálních změn (v kartézských a cylindrických souřadnicích)

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \tau} &= \lambda(T)\Delta(T) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}, \\ \frac{\partial H}{\partial \tau} &= \lambda(T)\Delta(T) + v_z \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \varphi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Při této metodě je entalpie primární proměnná, zatím co teplota je dopočítávána podle vztahu [3]

$$H(T) = \int_0^T \rho(\xi)c(\xi) d\xi + \rho(T)(1 - f_s)L. \quad (2)$$

Počáteční podmínky určuje rozložení teplot v celém předlitku v čase $\tau = 0$. Pokud uživatel nenastaví načítání poslední spočítané pozice, tak je nastavena automaticky teplota v celém předlitku na teplotu lící, tj. 1550°C. Okrajové podmínky jsou vyjádřeny následovně

$$\begin{aligned} T &= T_{casting} && \text{hladina oceli (na začátku ZPO)} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 && \text{rovina symetrie a v místě konce ZPO} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= \dot{q} && \text{v krystalizátoru a místě styku předlitku z válci} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= htc(T_\infty - T_{surf}) + \sigma\varepsilon(T_\infty^4 - T_{surf}^4) && \text{v sekundární a terciární zóně} \end{aligned} \quad (3)$$

Numerická diskretizace je provedena na neekvidistantní síti ve všech směrech pomocí numerické metody konečných diferencí [2] (v kartézských a cylindrických souřadnicích)

$$\begin{aligned} H_{i,j,k}^{n+1} &= H_{i,j,k}^n + \Delta\tau \lambda_{i,j,k}(T_{i,j,k}^n) [QX + QY + QZ] + v_z \Delta\tau \frac{H_{i,j,k-1}^n - H_{i,j,k}^n}{\Delta z_{k-1}}, \\ H_{m,p,i}^{n+1} &= T_{m,p,i}^n + \Delta\tau \lambda_{m,p,i}(T_{m,p,i}^n) [QR1 + QR2 + Q\Phi + QX] + \\ &\quad + v_z \Delta\tau \frac{H_{m,p-1,i}^n - H_{m,p,i}^n}{r_m \Delta\varphi_{p-1}}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} QX &= \frac{\frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta x_i} - \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{\Delta x_{i-1}}}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{2}} & QR1 &= \frac{T_{m,p,i}^n - T_{m-1,p,i}^n}{r_m \Delta r_{m-1}}, \\ QY &= \frac{\frac{T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta y_j} - \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y_{j-1}}}{\frac{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}}{2}} & QR2 &= \frac{\frac{T_{m+1,p,i}^n - T_{m,p,i}^n}{\Delta r_m} - \frac{T_{m,p,i}^n - T_{m-1,p,i}^n}{\Delta r_{m-1}}}{\frac{\Delta r_m + \Delta r_{m-1}}{2}}, \\ QZ &= \frac{\frac{T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta z_k} - \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z_{k-1}}}{\frac{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}}{2}} & Q\Phi &= \frac{\frac{T_{m,p+1,i}^n - T_{m,p,i}^n}{r_m \Delta\varphi_p} - \frac{T_{m,p,i}^n - T_{m,p-1,i}^n}{r_m \Delta\varphi_{p-1}}}{r_m \frac{\Delta\varphi_p + \Delta\varphi_{p-1}}{2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Algoritmus výpočtu je řešen explicitní metodou výpočtu. Kvůli stabilitě výpočtu a uživatelské volbě prostorové sítě si uživatel může měnit časový krok výpočtu.

Technické a programové požadavky

Hardwarové nároky jsou stanoveny náročností programu MATLAB. Softwarové požadavky: MATLAB verze R2011b a vyšší, nebo nainstalovaný MATLAB Compiler Runtime 7.15.

Popis použití

Program se spouští souborem *Caster.exe*.

- Po jeho spuštění se zobrazí uživatelské rozhraní (obr. 1). V tomto rozhraní uživatel nastavuje jednotlivé vstupní parametry, volí značku oceli, výpočetní čas, aktivaci počáteční podmínky aj.
- Samotný výpočet se spustí pomocí tlačítka *Calculate*. Předpokládanou dobu výpočtu uvádí progress bar. Výpočet lze kdykoli zastavit a nechat vykreslit aktuální stav.

- Po dokončení výpočtu je automaticky vykresleno finální teplotní pole a jednotlivé grafické výstupy. Dále je spočítána metalurgická délka a zobrazeny hodnoty v příčném řezu nastavené uživatelem.
- Celý program může uživatel vypnout tlačítkem *Exit*.

Vazba na projekty

- FSI-J-11-7 Optimalizace a numerické modelování úloh s fázovými a strukturálními přeměnami
- ED0002/01/01 - NETME Centre

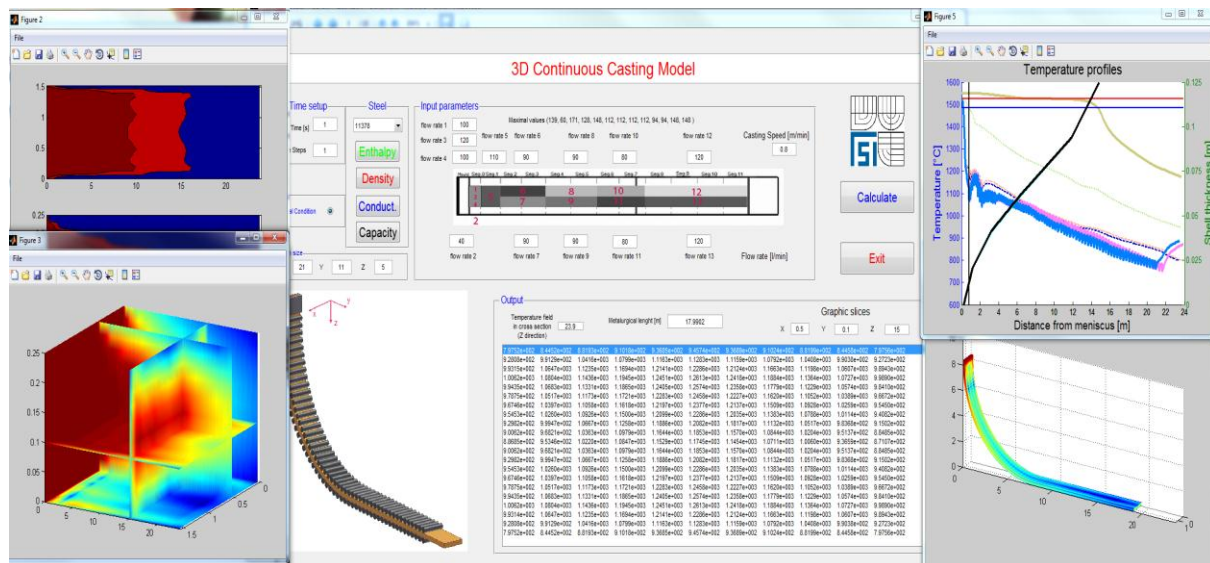
Licenční podmínky

Využití výsledku jiným subjektem je možné bez nabytí licence

Kontaktní osoba

Ing. Tomáš Mauder, ymaude00@stud.fme.vutbr.cz

Dokumentace grafického uživatelského rozhraní



Stažení a používání software

Software je možné stáhnout na <http://otp.fme.vutbr.cz/vysledkyvyzkumu>

Literatura

- [1] Štětina, J. The dynamic model of the temperature field of concast slab, Ph.D. Thesis, Technical University of Ostrava, Czech Republic, 2007, 105 p.
- [2] Inkropera, F. P., Dewitt D. P. Fundamentals of Heat Mass Transfer, Fourth Edition, Toronto, Willey & Sons, 1996, ISBN 0-471-300460-3, 886 p.
- [3] Stefanescu, D. M. Science and Engineering of Casting Solidification, Second Edition, New York, Springer Science, 2009, ISBN 978-0-387-74609-8, 402 p.

Prohlašuji, že popsaný výsledek naplňuje definici uvedenou v Příloze č. 1 Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje v roce 2012 a že jsem si vědom důsledků plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.

V Brně dne 01.03.2012.

Ing. Tomáš Mauder