

Metodika vyhodnocování intenzity chlazení vodního paprsku dopadajícího na svislý povrch

Methodology of Evaluation of Intensity of Cooling of Water Jet Impinging on the Vertical Surface

Ing. Jan Komínek¹, Ing. Michal Guzej¹, prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Pro mnoho průmyslových aplikací je velmi podstatný vliv teplotních změn v materiálu během výroby. Zvláště pak v chladicích procesech, kde se dosahuje vysokých intenzit chlazení a tím i velkých gradientů teplot. Znalost intenzity chlazení je potřebná, jako okrajová podmínka pro numerické simulace. Okrajové podmínky se získávají experimentální cestou a následným vyhodnocením.

Tento článek se zabývá vyhodnocením intenzity chlazení pro chlazení svislé plochy s počáteční teplotou větší, než je Leidenfrostova teplota pro tento typ chlazení. Cílem je na základě experimentálně změřených teplot během chlazení stanovit okrajovou podmínku na chlazeném povrchu. Chlazení je realizováno pomocí plochého paprsku vody, který dopadá na horní okraj svislé plochy, a to poté, co se vodní paprsek dotkne povrchu, po něm volně stéká směrem dolů. Okrajovou podmínku je potřeba stanovit jako funkci teploty a vertikální polohy, protože se intenzita chlazení mění se vzdáleností od místa dopadu vodního paprsku. Změřené teploty jsou získávány z M termočlánků, které jsou rozmístěny v různých výškách blízko chlazeného povrchu. Popsaný typ chlazení odpovídá kontinuálnímu liti hliníku v provozní praxi. K jeho řešení se používají inverzní úlohy vedení tepla (například 2D sekvenční metoda specifikace funkce). Získaná řešení mohou být značně zkreslená v důsledku tzv. Leidenfrostovu jevu, který v tomto speciálním typu chlazení vytvoří ostrou hranici mezi přechodovým a blánovým varem. Tato hranice se navíc během experimentu pohybuje ve svislém směru.

Řešení problému je navrženo ve formě modifikace běžných metod o posuvné výpočetní hranice. Vliv popsané metody na výsledky je testován na reálných datech z experimentů.

Klíčová slova: 2D inverzní úloha; intenzita chlazení; Leidenfrostův jev; kontinuální liti hliníku

Influence of the temperature change in various materials during their processing is important for many industrial applications. Especially for cooling process wherein high cooling intensity are achieved, which causes large temperature gradient. Cooling intensities are needed as a boundary condition for numerical simulation. Boundary conditions are obtained by experimental investigation and subsequent evaluation.

This article deals with evaluation of cooling intensity at cooling of vertical surface with initial temperature greater than the Leidenfrost temperature for this type of cooling. The objective is determined by the boundary conditions on the cooled surface based on the temperature recordings from the experiment. Cooling is carried out by flat water jet, which hits the upper part of the cooling surface. Water flows down along the surface after the water jet touches the surface. The boundary conditions should be estimated as a function of temperature and vertical position, because the cooling intensity varies with the distance from the impingement zone. The measured temperatures are obtained from M thermocouples placed close to the cooling surface in different vertical positions. Described type of cooling corresponds to the DC casting of aluminum.

Methods for solving the inverse heat conduction problem are usually used for solving this type of task (for example 2D sequential function specification method can be used). Unfortunately the obtained results can be distorted by special cooling mode caused by the Leidenfrost effect. Sharp border between the transient and film boiling mode is created by the Leidenfrost effect and by special type of cooling. Moreover the border is shifting during the experiment.

This problem is detailed in detail in this article. Possible solution is designed in a form of modification of common computation methods by shifting computation elements borders. The effect of application of the described method is shown on real data from experiments.

Key words: 2D inverse task; cooling intensity; Leidenfrost effect; DC-casting of aluminum

V současné době je běžné simulovat různé tepelné procesy jako je chlazení, kalení nebo i operace, které vedou k teplotním změnám v materiálu, aby se tak stanovil jejich vliv na finální strukturu, zbytkové napětí a potenciální vznik defektů. Simulace pracují na základě řešení přímé úlohy vedení tepla, která je běžně řešena metodami konečných prvků [1], diferencí [2] či objemů [3]. Tyto metody jsou dobře známé a jejich řešení jsou obsažena ve všech standardních komerčních softwarech, jako je ANSYS a COMSOL.

Pro řešení každé simulace je potřebné znát:

- geometrii,
- materiálové vlastnosti – součinitel tepelné vodivosti, hustotu, měrnou tepelnou kapacitu,
- počáteční podmínku – rozložení teplot na počátku simulace,
- okrajové podmínky – hustoty tepelných toků nebo součinitele přestupu tepla na povrchu materiálu.

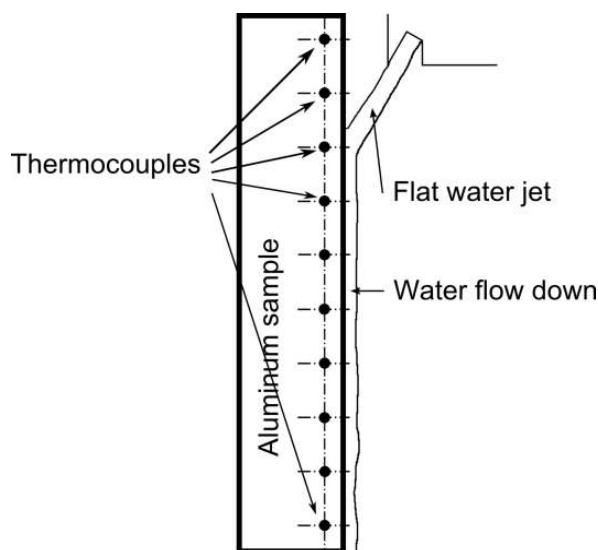
Stanovení většiny uvedených položek není problematické. Geometrie je většinou zadána, materiálové vlastnosti jsou získány z databází nebo změřeny, počáteční podmínka je většinou zjednodušena na homogenní rozložení teploty. Zbývají okrajové podmínky, které je sice možné vyjádřit empirickými vztahy [4, 5], ty jsou však přesné jen pro triviální případy geometrií, malé rozsahy teplot nebo pro různé speciální konfigurace, které v průmyslových aplikacích nejsou běžné. V praxi se okrajové podmínky získávají experimentální cestou. Běžně používaná nestacionární metoda spočívá v použití vzorku se zabudovanými teplotními snímači. Vzorek je ohřátý na počáteční teplotu a poté je vystaven podmínkám, které jsou co nejblíží reálným podmínkám v provozu. Během experimentu jsou zaznamenávány teploty, které se pak pomocí inverzní úlohy vedení tepla přepočítají na okrajové podmínky a povrchové teploty.

Tento článek se zaměřuje na řešení 2D inverzní úlohy vedení tepla na vysoce tepelně vodivém vzorku, který je vyroben z hliníku. K chlazení je použitý plochý vodní paprsek, který dopadá na svislý povrch vzorku. Poté, co dojde ke kontaktu mezi vodou a vzorkem, voda dále volně stéká po povrchu směrem dolů. Tato konfigurace je běžná pro kontinuální lité hliníku, pro které bylo navrženo měření i modifikace výpočetní metody. Klasické řešení inverzní úlohy vedení tepla je v tomto případě značně zkomplikované tzv. Leidenfrostovým jevem, v jehož důsledku je potřebné klasické přístupy modifikovat.

1. Popis experimentů

Testovací vzorek byl vyroben z malé hliníkové desky a během experimentu byl umístěn svisle. K záznamu teplot sloužily termočlánky zabudované těsně pod povrchem v různých výškách s pravidelnými rozestupy

(obr. 1). Vzorek byl chlazený plochým vodním paprskem, který dopadá na vrchní část vzorku. Voda se po kontaktu s povrchem neodráží, nýbrž volně po povrchu stéká dolů, a tak způsobuje chlazení po celé zbývající délce povrchu.



Obr. 1 Průřez hliníkového vzorku
Fig. 1 Cross section of the aluminum sample

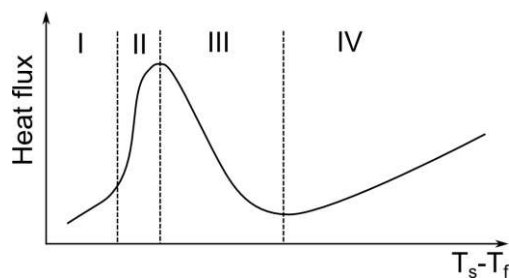
Na základě experimentů je možné rozdělit chlazený povrch do dvou oblastí s odlišným režimem chlazení: dopadovou oblast, v okolí dopadajícího paprsku vody, kde je od počátku experimentu vysoká intenzita chlazení a oblast stékání, která je chlazená stékající vodou a intenzita chlazení se zde v průběhu experimentu značně mění. Druhá oblast je od počátku experimentu chlazená jen velmi malou intenzitou, dokud její povrchová teplota neklesne pod tzv. Leidenfrostovu teplotu (LF teplotou). Poté se i v této části projeví velmi intenzivní přestup tepla do chladicí vody.

1.1 Postup měření

Každému experimentu předchází ohřev vzorku na počáteční teplotu, blízkou teplotě tání hliníku. Vzorek je ohříván v horizontální poloze v peci. Na začátku experimentu je nastaven požadovaný průtok vodního paprsku a spuštěn záznam teplot. Vzorek je otočen do vertikální pracovní pozice a experiment započne odstraněním deflektoru.

1.2 Leidenfrostův jev

Projevy Leidenfrostova jevu jsou dobře patrné na tvaru funkce hustoty tepelného toku v závislosti na rozdílu povrchové teploty a teploty okolí (obr. 2). Funkce za vyšších teplot nabývá svého lokálního minima, namísto monotónně rostoucího průběhu, který by se dal očekávat. Teplota odpovídající tomuto minimu se označuje jako Leidenfrostova teplota.



Obr. 2 Typický průběh hustoty tepelného toku pro různé typy varu za atmosférického tlaku, I – vedení, II – bublinkový var, III – přechodový var, IV – blánový var, T_s je povrchová teplota a T_f je teplota kapaliny

Fig. 2 Typical boiling curves for water cooling at 1 atm., I – convection, II – nucleate boiling, III – transient boiling, IV – film boiling, T_s is the surface temperature and T_f is the temperature of fluid

Podstata tohoto jevu spočívá v různých režimech varu. Pokud se voda dostává do kontaktu s povrchem s dostatečně vysokou teplotou, vytváří se na povrchu parní vrstva, která svojí přítomností povrch tepelně izoluje, a brání tak dalšímu kontaktu s chladicí vodou. Nejnížší teplota, při které je povrch již stabilně pokrytý parní vrstvou, je právě Leidenfrostova teplota a jak je vidět z grafu na obr. 2, leží tato teplota na hranici mezi přechodným (III) a blánovým (IV) varem. [4]

2. Inverzní úloha vedení tepla

2.1 Přímá a inverzní úloha

O přímé úloze hovoříme tehdy, pokud se ze známých (změřených) příčin snažíme stanovit důsledky. Pokud je tomu naopak, tj. ze známých důsledků stanovujeme příčiny, pak jde o inverzní úlohu [6]. V našem případě vedení tepla jsou příčiny počáteční teplota a okrajové podmínky a důsledky jsou průběhy teplotního pole.

Přímá úloha vedení tepla se nejčastěji řeší pomocí numerických metod, protože analyticky jsou řešitelné pouze speciální případy úloh vedení tepla.

Inverzní úlohy vedení tepla jsou často označovány jako špatně podmíněné. V praxi to znamená, že malá změna ve vstupních datech (změřených teplotách) může způsobit extrémní změnu ve výsledcích (spočtené okrajové podmínce). Navíc není zaručena jednoznačnost řešení, a úloha je tak z matematického hlediska ne zcela korektní.

K řešení lineární inverzní úlohy vedení tepla je možné použít například celodoménovou metodu s použitím Tikhonovy regularizace nebo sekvenční Beckovu metodu odhadu funkce.

V tomto článku byla použita modifikovaná sekvenční Beckova metoda, a to pro svoji schopnost postihnout teplotně závislé materiálové parametry, jako je hustota, měrná tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita.

2.2 Sekvenční Beckova metoda

Výpočet hustoty tepelných toků na povrchu probíhá postupně v časových krocích od začátku po konec experimentu. Každá hodnota Q_n je stanovena na základě známého rozložení teplot v materiálu z předcházejícího časového kroku $n-1$ a určitého počtu změřených teplot $t_n, t_{n+1}, \dots, t_{n+N_f}$ v budoucích časových krocích. Jejich počet N_f se označuje jako počet dopředných kroků.

Pro výpočet se předpokládá, že hledaná hodnota Q_n má konstantní průběh po dobu N_f časových kroků. Q_n se pak získá minimalizací výrazu (1).

$$\min_{Q_n} \sum_{i=1}^{N_f} \left(Y_{n+i} - T_{n+i} |_{Q_n} \right)^2, \quad (1)$$

kde Y_i jsou změřené teploty, $T_i |_{Q_n}$ jsou vypočítané teploty za předpokladu konstantní hustoty tepelného toku $Q_i = Q_n$ po dobu N_f časových kroků [7].

Pro lineární případ má úloha jednoduché řešení vyjádřené v rov. (2).

$$Q_{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} (Y_{n+i} - T_{n+i} |_{Q_i=0}) \Phi_i}{\sum_{i=1}^{N_f} \Phi_{n+i}^2}, \quad (2)$$

kde T_i jsou teploty vypočítané pro hustotu tepelného toku $Q_i = 0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

V jiných než lineárních případech je možné použít standardní minimalizační metody. V tomto článku byla použita Brentnova optimalizační metoda, která stanoví hodnoty účelové funkce ve třech různých bodech, které pak prokládá parabolou. V minimu paraboly se vypočte hodnota účelové funkce. Nový bod nahradí jeden z původních a opět se použije proložení paraboly. Proces se iteračně opakuje [8].

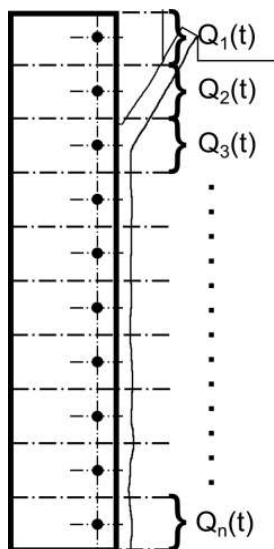
Dopředné kroky slouží ke stabilizaci a redukci šumu v řešení inverzní úlohy. Počet dopředných kroků N_f funguje jako regularizační parametr. Malá hodnota N_f vede k nestabilitě řešení. Velká hodnota způsobuje přehlazení řešení [9]. Volba počtu dopředných kroků je samostatný problém. V praxi se často postupuje metodou „pokus-omyl“, nebo se použije některé z doporučených kritérií, které však nezaručují kvalitu výsledku.

2.3 Řešení dvojrozměrného problému s termočládky v M výškových úrovních

Výpočetní metoda popsaná v předchozí kapitole se dá s mírnými modifikacemi použít na řešení 2D problému.

Okrajová podmínka na chlazeném povrchu je po výšce rozdělena do M oblastí příslušejících M termočládkům. Hustoty tepelných toků v jednotlivých oblastech jsou

reprezentovány funkcemi $Q_i(t)$ v závislosti na čase (obr. 3).



Obr. 3 Rozložení funkcí součinitelů přestupu tepla na povrchu
Fig. 3 Distribution of the heat flux function coefficients on the surface area

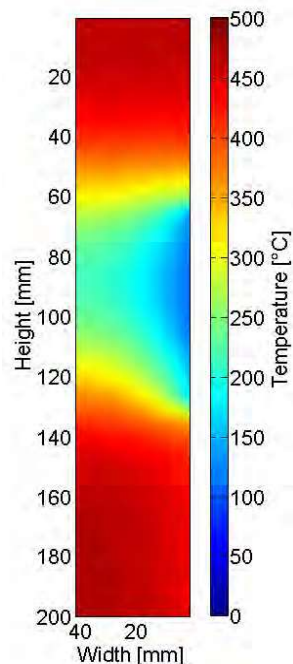
Původní minimalizační úloha v rov. (1) je pro čas t_n rozšířena na minimalizaci s M parametry $Q_1(t_n)$, $Q_2(t_n)$, ..., $Q_M(t_n)$. Tento problém může být řešen například metodou kráčejícího simplexu [10].

2.4 Problematika chlazení svislého povrchu plochým vodním paprskem

V předchozí kapitole se uvažovaly okrajové podmínky Q_i , vyjádřené pouze jako funkce času $Q_i(t)$, nikoliv vertikální polohy chlazené plochy. Problémem je, že tento předpoklad může být použit pouze tehdy, pokud je reálný průběh okrajové podmínky ve vertikálním směru na každé kontrolní oblasti homogenní nebo jen mírně se měnící.

To ovšem není případ řešené úlohy. Zde je reálná situace přímo opačná, protože součinitel přestupu tepla je extrémně závislý na povrchové teplotě v blízkosti LF teploty, která se však ve vertikálním směru prudce mění (obr. 4). Důsledkem je, že ve vertikálním směru má hustota tepelného toku téměř skokovou změnu v bodě s LF teplotou.

Množinu bodů s touto teplotou můžeme nazývat LF hranicí, která odděluje oblasti málo a velmi intenzivního chlazení. Tato hranice se navíc během experimentu pohybuje. Důvodem je podchlazení povrchu v dopadové oblasti na začátku experimentu. Vlivem vedení tepla uvnitř materiálu se podchlazená oblast (s teplotou pod LF teplotou) rozšiřuje, a tím se i zvětšuje plocha intenzivně chlazeného povrchu. LF hranice se tak posouvá směrem dolů téměř konstantní rychlostí.



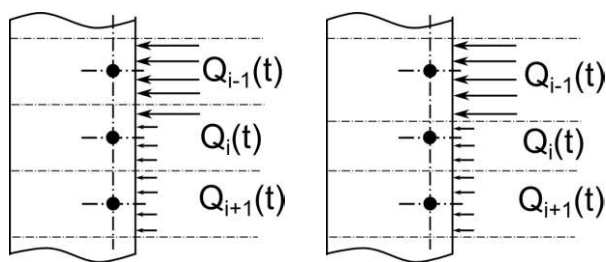
Obr. 4 Typické rozložení teplot uvnitř 6,5 s po začátku experimentu. Vzorek je chlazený vodním paprskem, který dopadá na pravou stranu přibližně 70 mm od horní hrany, ostatní strany jsou izolovány.

Fig. 4 Typical temperature distribution inside the sample 6.5 s after the beginning of the experiment. The sample is cooled by water jet, which falls on the right side, approx. 70 mm from the top edge, other edges are isolated.

2.5 Modifikace výpočetní metody

Při použití předešlých metod dochází k velkým nepřesnostem zejména ve chvíli, kdy se LF hranice nachází blízko středu kontrolní oblasti. V takovém případě je vypočtená hodnota tepelného toku Q_i chybně aplikována na největší část kontrolní oblasti. Naopak v případě, kdy se LF hranice nachází na rozhraní oblastí dvou funkcí, je chyba minimální. Stačí tedy zaručit, aby LF hranice vždy ležela na rozhraní mezi dvěma funkcemi. Protože se však LF hranice pohybuje, je nutné toho dosáhnout posouváním hranic oblastí funkcí Q_i . Tento princip je ilustrován na obr. 5. Levá část obrázku zachycuje situaci, kdy na část povrchu působí dvě diametrálně odlišné hustoty tepelných toků. Protože rozhraní mezi nimi neleží na hranici kontrolních oblastí, dochází ke zkreslení vypočtených hodnot $Q_i(t)$, které jsou aplikovány na celou kontrolní oblast. Obrázek vpravo znázorňuje řešení této situace pomocí posunutí hranice kontrolních oblastí.

Tyto posuny jsou prováděny v každém časovém kroku. Pokud by měla být hranice mezi funkcemi Q_{i-1} a Q_i posunuta za pozici i -tého termočlásku, pak je hranice posunuta zpět na původní pozici a její úlohu zastoupí další z hranic, tj. hranice mezi funkcemi Q_i a Q_{i+1} .

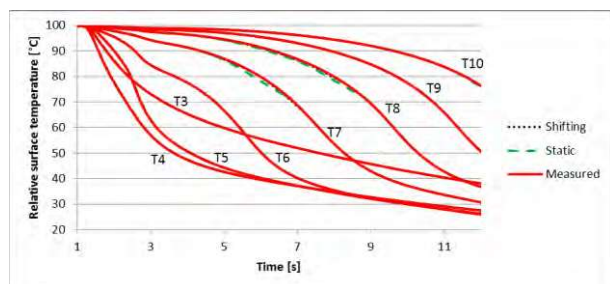


Obr. 5 Princip posouvání hranic
Fig. 5 Principle of shifting of the borders

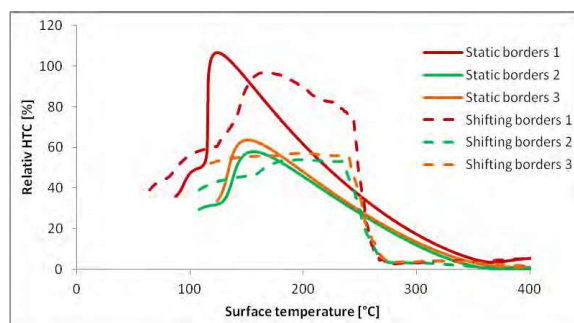
Samostatným problémem je správné určení polohy, respektive rychlosti posunu LF hranice. Záznam polohy LF v čase je možné získat obrazovou analýzou videozáznamu nebo jej stanovit výpočetně. Výpočetní určení spočívá v řešení dvojstupňové optimalizace, kde prvním stupněm je řešení části inverzní úlohy a druhým stupněm je stanovení rychlosti pohybu LF hranice v daném úseku výpočtu.

3. Diskuse výsledků

Metoda byla testována na reálných datech z pokusného měření v Laboratoři přenosu tepla a proudění VUT v Brně. Ke srovnání byla použita běžná 2D metoda bez posouvání hranic a metoda s posuvnými hranicemi. Na grafu v obr. 6 můžeme vidět srovnání vypočtených teplot obou metod ve srovnání s měřenými teplotami. Rozdíly v teplotách jsou téměř zanedbatelné. Navzdory tomu rozdíly ve vypočtených funkcích součinitelů přestupu tepla (obr. 7) jsou a nelze je zanedbat.



Obr. 6 Srovnání měřených a vypočtených teplot
Fig. 6 Comparison of measured temperature with calculated temperature



Obr. 7 Srovnání relativních HTC funkcí pro případy posouvajících a pevných hranic
Fig. 7 Comparison of relative HTC function with and without shifting of borders

Závěr

Chlazení pomocí vodního proudu, který následně stéká po povrchu, je komplexní a komplikovaný proces. K jeho správnému vyhodnocení je zapotřebí řešit minimálně dvojrozměrnou inverzní úlohu. Za vysokých teplot je problematika ztížena výskytem Leidenfrostova jevu, který se navíc po chlazené ploše pohybuje. Řešení takové úlohy běžnými metodami vede ke značnému zkreslení výsledků. Problém je řešitelný pomocí prezentované modifikace výpočetní metody, tj. posunu hranic oblastí, na které jsou aplikovány hledané funkce. Funkčnost metody byla testována na reálných datech z experimentů provedených v Laboratoři přenosu tepla a proudění (VUT Brno).

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu "Národní program udržitelnosti I".

Literatura

- [1] ZIENKIEWICZ, O.C a R.L TAYLOR. *The Finite Element Method*: Vol. 1, 4 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, 689 s.
- [2] ČERMÁK, L. *Numerické metody*, II. vyd. 1. Brno: CERM, 2004, 179 s.
- [3] PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Great Britain: Taylor, 1980, 197 s.
- [4] INCROPERA, F. P., DAVID, P. DEWITT *Fundamentals of heat and mass transfer*, 4th ed. New York: Wiley, 1996, 886 s.
- [5] HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. McGraw-Hill, 1976
- [6] BECK, J. V, BLACKWELL, B., St. CLAIR, Charles, R.Jr.: *Inverse heat conduction: ill-posed problems*. New Yourk: Wiley, 1985
- [7] RAUDENSKY, M. *Heat transfer coefficient estimation by inverse conduction algorithm*. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 1993, No. 3, pp. 257-266
- [8] WILLIAM, H. *Numerical recipes in C*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, xxvI, 994 s.
- [9] WOODBURY, Keith A. *Inverse Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2003, 466 s.
- [10] POHANKA, M., WOODBURY, K. A. *Downhill Simplex method for computation of interfacial heat transfer coefficients in alloy casting*. *Inverse Problems In Engineering* [online]. TAYLOR, 2003, 11(5): 409-424 [cit. 2015-07-15]. DOI: 10.1080/1068276031000109899