

Aplikace metody teplotních oscilací pro měření součinitele přestupu tepla

Stanislav Solnař*¹

¹ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Průspěvek se zabývá aplikací metody teplotních oscilací pro měření součinitele přestupu tepla α . Tato metoda umožňuje mapovat rozložení intenzity přestupu tepla na ploše. Metoda je založena na měření odezvy povrchové teploty na dopadající tepelný tok definovaného průběhu na povrchu, kde intenzitu přestupu tepla vyšetřujeme. Průspěvek popisuje princip metody, přístrojové vybavení potřebné pro její aplikaci a metody používané při vyhodnocení. Výsledky experimentálních měření jsou porovnány s výsledky získanými numerickým výpočtem s pomocí programu ANSYS CFD.

Klíčová slova: součinitel přestupu tepla; TOIRT; teplotní oscilace

1. Úvod

V rámci technického pokroku a neustálého zvyšování účinnosti strojů a aparátů, využití regenerovaného tepla a finančních úspor se snažíme mimo jiné i o maximalizaci přestupu tepla v aparátech, v nichž k přenosu tepla dochází. Intenzita konvektivního přestupu tepla je charakterizována velikostí součinitele přestupu tepla α , který se vyskytuje v Newtonově ochlazovacím zákoně

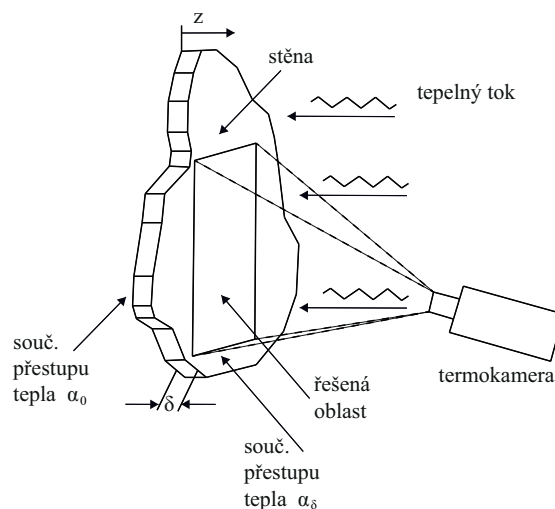
$$\dot{Q} = \alpha S \Delta T, \quad (1)$$

kde \dot{Q} je konvektivní tepelný tok, S teplosměnná plocha a ΔT rozdíl teplot mezi stěnou a okolím. V literatuře se většinou neuvádí korelace pro přímý výpočet α , ale pro jeho bezrozměrnou formu v Nusseltově čísle. Kriteriační rovnice nacházíme nejčastěji ve tvaru $Nu = f(Re, Pr)$, kde Re je Reynoldsovo číslo a Pr Prandtlovo číslo [1].

Měřením součinitele přestupu tepla na povrchu se zabýval S. Freund v [2]. Metoda zde byla použita pro měření teplotní odezvy desky, která byla ohřívána oscilačním tepelným tokem. Dále se v práci zabýval měřením součinitele přestupu tepla při proudění vody v trubce nebo v impaktním proudu dopadajícím na desku. Další aplikace je např. [4], kde byly měřeny součinitele přestupu tepla na desce výměníku tepla. V závěru práce byly experimentální výsledky porovnány s numericky vypočtenými. Poslední zde popsaná aplikace je [5], kde byla metoda použita pro měření a popis přestupu tepla při ostříkávání hladiny vodou. Experimentálně získaná data vykazovala velmi dobrou shodu součinitele přestupu tepla s daty získanými konvenčními metodami.

2. Metoda teplotních oscilací

Princip metody TOIRT (Temperature Oscillation Infra Red Thermography) autorů Wandelt a Roetzel [3] je znázorněn na obrázku 1. Metoda je založena na měření časové závislosti teploty $T|_{z=\delta}$ na stěně o tloušťce δ . Teplota stěny je měněna řízeným tepelným tokem. Teplotní odezva je závislá na vlastnostech stěny a součinitelích přestupu tepla na obou stranách stěny, které jsou na obrázku 1 označeny jako α_0 a α_δ .



Obr. 1. Princip metody teplotních oscilací [3]

Časová změna teploty T v homogenní desce s teplotní vodivostí a je popsána Fourierovou rovnicí.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Pokud zanedbáme přenos tepla vedením ve směrech roviny desky x a y (první dvě parciální derivace na pravé straně) a přidáme okrajové podmínky pro obě strany desky, můžeme nalézt analytické řešení pro případ periodické oscilace tepelného toku. Okrajové podmínky třetího druhu na povrchu desky se dají vyjádřit jako

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_0 T|_{z=0}, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\delta} = \hat{q} \sin \omega t - \alpha_\delta T|_{z=\delta}, \quad (4)$$

kde α_0 je vyšetřovaný součinitel přestupu tepla na jedné straně desky, α_δ součinitel přestupu tepla na druhé straně desky, ω úhlová rychlost oscilujícího tepelného toku a \hat{q} amplituda tepelného toku.

*Kontakt na autora: Stanislav.Solnar@fs.cvut.cz

Při řešení výše zmíněné soustavy lze využít Laplaceovu transformaci a získat výsledek

$$T(z, t) = A(z) \sin(\omega t - \varphi(z)). \quad (5)$$

Fázové zpoždění na povrchu s oscilujícím tepelným tokem lze vyjádřit jako

$$\tan \varphi|_{z=\delta} = \frac{c_1 + 2\xi\psi_0 c_2 + 2\xi^2\psi_0^2 c_3}{2\xi\psi_0(1+r)c_0 + 2\xi^2\psi_0^2(1+2r)c_1 + 4\xi^3\psi_0^3 r c_2 + c_3} \quad (6)$$

kde použité bezrozměrné parametry jsou

$$r = \frac{\alpha_d}{\alpha_0}, \psi_0 = \frac{\alpha_0 a}{d\lambda\omega}, \xi = d\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (7)$$

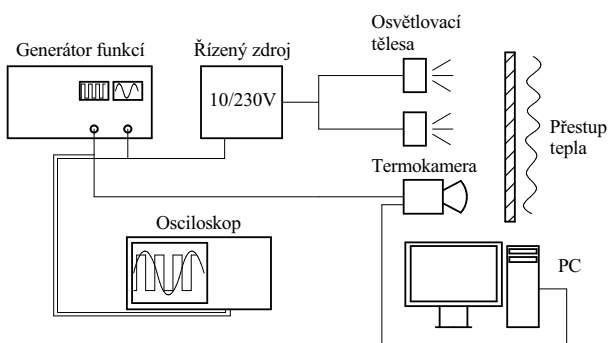
$$\begin{aligned} c_0 &= \cosh^2 \xi \cos^2 \xi + \sinh^2 \xi \sin^2 \xi \\ c_1 &= \cosh \xi \sinh \xi + \cos \xi \sin \xi \\ c_2 &= \cosh^2 \xi \sin^2 \xi + \sinh^2 \xi \cos^2 \xi \\ c_3 &= \cosh \xi \sinh \xi - \cos \xi \sin \xi \end{aligned} \quad (8)$$

Ačkoliv to z rovnice (6) není úplně zřejmé, měření není závislé na amplitudě tepelného toku. Není tedy nutné měřit přesnou teplotu povrchu. Naopak je měření závislé na přesném odečtu doby mezi tepelným tokem a teplotou povrchu. Dále je měření závislé na odhadu součinitele přestupu tepla α_0 [3].

3. Aplikace metody

Při aplikaci metody teplotních oscilací je potřeba zajistit generování tepelného toku dopadajícího na měřenou plochu se sinusovým časovým průběhem a následně snímat v přesně definovaných časových intervalech teplotu povrchu. Tepelný tok dopadající na měřenou plochu je vytvářen pomocí tří halogenových osvětlovacích těles s celkovým výkonem 1500 W. Tato halogenová osvětlovací tělesa jsou napájena výkonovým stabilizovaným zdrojem řízeným stejnosměrným vstupním napětím 1 až 10 V. Řídicí signál přesného sinusového průběhu je generován s pomocí dvoukanalového funkčního generátoru BK Precision 4052.

Druhý kanál tohoto generátoru je využit pro generování spouštěcího impulsu termokamery thermo IMAGER TIM 160, která je použita pro snímání odezvy povrchové teploty s rozlišením 160×120 bodů.

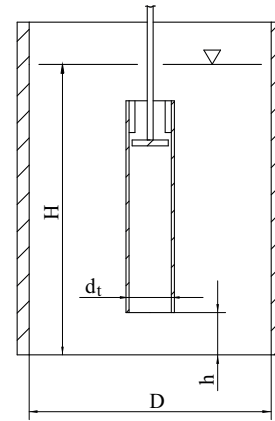


Obr. 2. Schéma přístrojové techniky

Při měření byla nastavena frekvence oscilujícího tepelného toku na 0,1 Hz s modulací 20 až 100%. Vzorkovací frekvence snímání teplotního pole termokamerou byla 10 Hz.

3.1. Experiment

Přestup tepla při výtoku vody z usměrňovacího válce byl měřen na kruhovém dnu nádoby s průměrem $D = 400$ mm. Dno nádoby bylo vyrobeno z plechu o tloušťce 1 mm. Plech byl vyroben z nerezové oceli s tepelnou vodivostí $\lambda = 15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, hustotou $\rho = 7600 \text{ kg m}^{-3}$ a tepelnou kapacitou $c_p = 500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Dopadající proud na desku byl vytvářen míchadlem umístěným v usměrňovacím válci o průměru $d = 60$ mm. Usměrňovací válec o průměru $d_t = 70$ mm ústí nad dnem nádoby ve výšce $h = 70$ mm. Výška hladiny byla $H = 480$ mm.



Obr. 3. Schéma experimentu

Teplota vody v celém objemu nádoby byla 21°C a byla přibližně konstantní po celou dobu měření. Související vlastnosti jsou: dynamická viskozita $\mu = 1,002 \text{ mPa s}$, hustota $\rho_v = 998,21 \text{ kg m}^{-3}$, tepelná vodivost $\lambda_v = 0,606 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a Prandtlovo číslo $\text{Pr} = 6,98$. Měření probíhalo při otáčkách míchadla $n = 550 \text{ min}^{-1}$.

Reynoldsovo číslo bylo určeno ze vztahu

$$\text{Re}_m = \frac{n d^2 \rho}{\mu} = 32875 \quad (9)$$

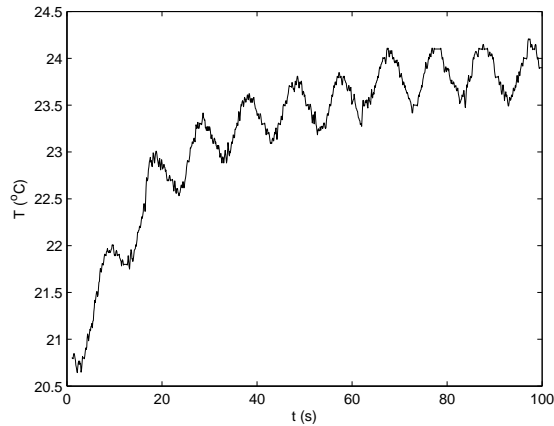
a poté pomocí průtokového čísla $N_Q = 0,4613$ přepočteno na Reynoldsovo číslo v trubce dle vztahu (10).

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot N_Q}{\pi} \cdot \text{Re}_m = 19309 \quad (10)$$

Reynoldsovo číslo bylo $\text{Re} = 19309$, což odpovídá výtokové rychlosti $\bar{u} = 0,28 \text{ m s}^{-1}$.

3.2. Zpracování dat

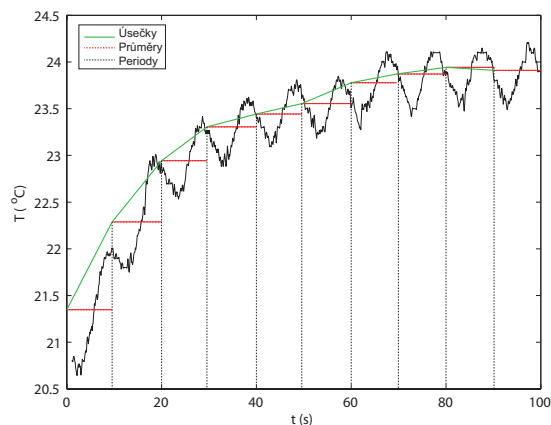
Zpracování dat probíhá dvoufázově. První fáze upravuje data pro regresi. Druhá fáze přepočítává data získaná z regrese na součinitel přestupu tepla α . Typický záznam dat pro jeden bod můžeme vidět na obrázku 4.



Obr. 4. Záznam dat pro jeden bod měření

Jelikož se záznam nejvíce podobá exponenciální funkci se superponovanou sinusovou funkcí, je nutné data pro regresi upravit. V prvních pokusech byla záznamem dat regresně proložena exponenciála a data od ní byla odečtena. Nyní používáme úpravu dat pomocí postupných úseček. Cílem této úpravy dat je minimalizovat neustálé stoupání teploty v záznamu dat. Pokud by tato úprava dat neproběhla, musel by být experiment proveden v teoreticky nekonečném čase.

Pro každou periodu sinusoidy je vypočtena průměrná hodnota teplot. Tato hodnota je přenesena na začátek každé periody. Tyto body jsou spojeny úsečkami a od těchto úseček jsou odečtena data. Tento cyklus se opakuje pro minimalizaci směrnic jednotlivých lineárních funkcí.

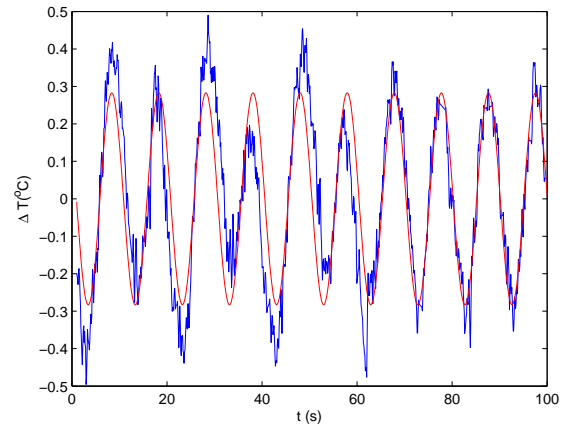


Obr. 5. Úprava dat

Takto upravení data prochází procedurou nelineární regrese. Jako modelová funkce pro regresi je použita rovnice (5)

$$T(z, t) = A(z) \sin(\omega t - \varphi(z)),$$

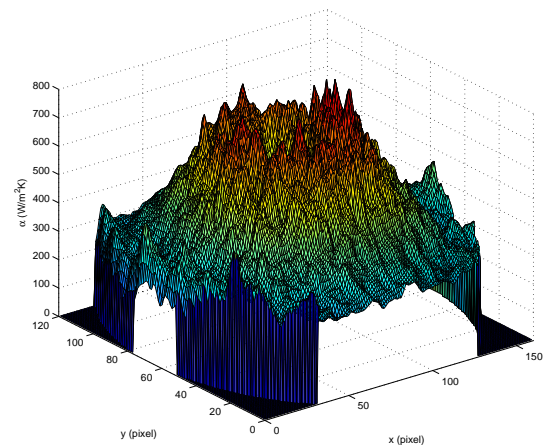
kde A odpovídá amplitudě sinusoidy, ω úhlové rychlosti tepelného signálu a φ fázovému zpoždění teploty. Z řešení soustavy rovnic je zřejmé, že ω musí být stejná jako ω vysílaného tepelného signálu. Jedná se tedy o dvouparametrickou regresi.



Obr. 6. Upravená data a nelineární regrese

Po regresi získáme mapu fázových zpoždění $\varphi(x, y)$ v jednotlivých bodech měření. V druhé fázi následuje přepočítání fázových zpoždění na součinitele přestupu tepla. K tomuto přepočtu je využito analytický výpočet dle rovnice (6). Analytické řešení je podáno jako závislost fázového zpoždění na součiniteli přestupu tepla. Tato závislost byla pro dané nastavení systému invertována a poté pomocí funkce interpolace odečtena.

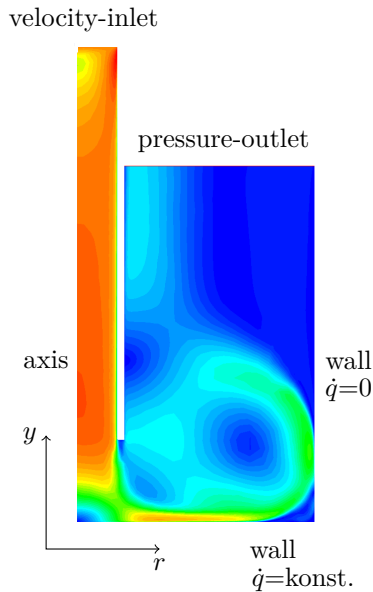
Po druhé fázi zpracování dat získáme mapu rozložení součinitele přestupu tepla α . Výsledek měření můžeme vidět na obrázku 7.



Obr. 7. Mapa součinitele přestupu tepla pro daný experiment

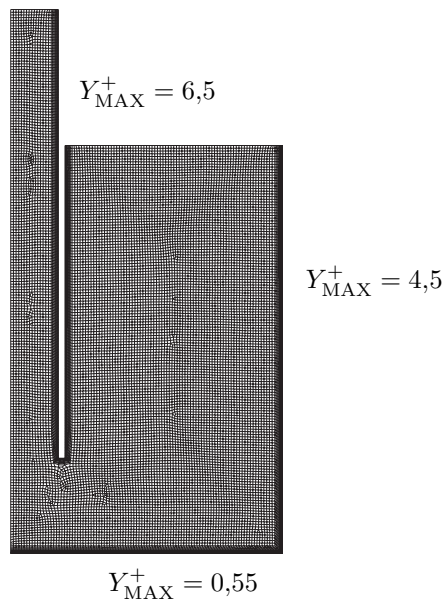
4. CFD model

V rámci porovnání výsledků byla úloha řešena i numericky v CFD ANSYS (Fluent). Úloha byla zjednodušena na 2D problém a byla využita osová symetrie. Na obrázku 8 můžeme vidět rychlostní pole a označení okrajových podmínek úlohy. Při výpočtu byla ve Fluent Solver využita dvojice okrajových podmínek velocity-inlet a pressure-outlet. Reynoldsovo číslo, které je vyšší než 10^4 , indikuje turbulentní proudění. Model turbulence byl zvolen SST k-omega Intermittency model.



Obr. 8. Rychlostní pole a popis okrajových podmínek

Při síťování úlohy byl kladen důraz především na velikost elementů v okolí dna nádoby. Zde byla volena velikost elementů tak, aby se bezrozměrná velikost elementu Y^+ rovnala přibližně 1. Celkový počet elementů byl 23 tis.



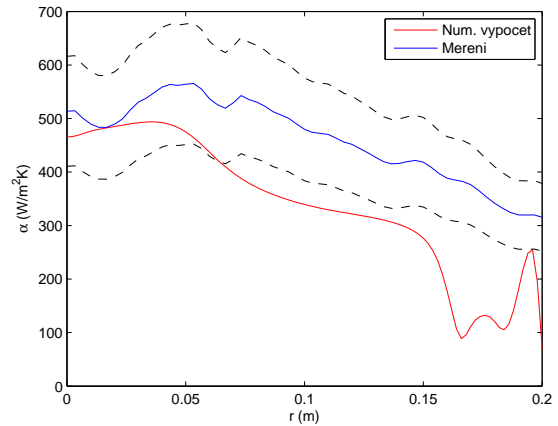
Obr. 9. Síť

Při výpočtu byl Solver pro všechny výskyty (momentum, velocity, k, omega ...) nastaven na Second order.

Jako vstupní okrajová podmínka byla zvolena axiální rychlost vypočítaná z experimentu, tangenciální složka rychlosti nebyla zatím uvažována. To bude mít nejspíše za následek snížení součinitele přestupu tepla.

Při výpočtu bylo sledováno rychlostní pole a rozložení součinitele přestupu tepla na dně nádoby (Surface heat transfer coefficient).

Porovnání experimentálně získaných dat a dat z numerického výpočtu můžeme vidět na obrázku 10.



Obr. 10. Porovnání experimentálních a numerických dat

Při porovnání experimentálních a numerických dat byla provedena citlivostní analýza fázového zpoždění samotného měřicího systému. Na obrázku 10 můžeme vidět experimentálně stanovená data a dále oblast vymezenou změnou systémového fázového zpoždění o $\pm 20\%$.

5. Závěr

Cílem této práce je aplikace metody TOIRT pro měření součinitele přestupu tepla. V práci jsem dokázal zprovoznit měřicí techniku a aplikovat ji pro přestup tepla konvekcí. Experimentálně stanovená data jsem porovnal s numericky vypočtenými a provedl jsem citlivostní analýzu.

V rámci měření jsem zaznamenával a posuzoval okolní vlivy. Na základě analýzy těchto vlivů jsem dospěl k následujícím doporučením

1. Stejná teplota tekutin a okolí - je vhodné dodržet stejnou teplotu média a stěny, na které probíhá přestup tepla. Teplejší, nebo naopak chladnější tekutina ovlivňuje teplotní pole a tedy i výsledky měření.
2. Tepelný výkon - poměr dodávaného tepelného výkonu na povrch měřeného tělesa a průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla by měl být větší než 1. K tomuto účelu bylo zavedeno poměrné číslo ϑ .

$$\vartheta = \frac{\dot{q}_{\text{dod}}}{\bar{\alpha}} = \frac{\dot{Q}_{\text{dod}}}{S} \frac{1}{\bar{\alpha}} > 1 \quad (11)$$

ϑ má jednotku K a udává fiktivní ohřátí tělesa za dobu měření. Pokud ϑ podělíme počtem period, získáme přibližnou hodnotu teplotní oscilace v bodě. Teplotní oscilace by měla být daleko vyšší než nejnižší možná rozeznávací hodnota měření (v našem případě 0,1 K).

3. Stínění - odstínění měřicího prostoru eliminuje narušení měření.

Seznam použitých symbolů

a	součinitel teplotní vodivosti ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
A, \hat{q}	amplituda (–)
$c_{0,1,2,3}$	bezrozměrné parametry (–)
c_p	měrná tepelná kapacita ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
d	průměr míchadla (m)
d_t	průměr trubky (m)
D	průměr nádoby (m)
h	výška vyústění (m)
H	výška vody (m)
L	charakteristický rozměr (m)
N_Q	průtokové číslo (–)
Nu	Nusseltovo číslo (–)
Pe	Pecletovo číslo (–)
Pr	Prandtlovo číslo ($= \nu/a$)(–)
\dot{q}	měrný tepelný tok (W m^{-2})
\dot{Q}	tepelný tok (W)
r	bezrozměrný parametr (–)
Re	Reynoldsovo číslo ($= u L \rho / \mu$)(–)
Re_m	Reynoldsovo číslo při míchání (–)
S	plocha (m^2)
t	čas (s)
T	teplota ($^{\circ}\text{C}$, K)
\bar{u}	rychlost (m s^{-1})
Y^+	bezrozměrná velikost elementu (–)

α	součinitel přestupu tepla ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
δ	tloušťka stěny (m)
λ	součinitel tepelné vodivosti ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
ϑ	poměrné číslo (K)
μ	dynamická viskozita (Pa s)
ν	kinematická viskozita ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
ξ, ψ_0	bezrozměrné parametry (–)
ρ	hustota (kg m^{-3})
ω	úhlová rychlost (rad s^{-1})

Reference

- [1] ŠESTÁK, J., RIEGER, F. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02933-6
- [2] FREUND, S. *Local Heat Transfer Coefficients measured with Temperature Oscillation IR Thermography: Disertační práce*. Hamburg: Universität der Bundeswehr Hamburg, 2008
- [3] WANDEL, M., ROETZEL, W. *Lockin thermography as a measurement technique in heat transfer*. Hamburg, 1997
- [4] FREUND, S., KABELAC, S. Investigation of local heat transfer coefficients in plate heat exchanger with temperature oscillation IR thermography and CFD. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, vol. 53, no. 53, p. 3764–3781
- [5] PAUTSCH, A. G. *Mass and Energy Transport Phenomena in the Thin Film of Spray Cooling System: Disertační práce*. Madison: University of Wisconsin, 2007