

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 621

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Hana Bellerová

**Rozvoj inverzních úloh vedení tepla
se zaměřením na velmi rychlé procesy
v mikroskopických měřících**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Laboratoř přenosu tepla a proudění

Ing. Hana Bellerová

**ROZVOJ INVERZNÍCH ÚLOH VEDENÍ TEPLA SE
ZAMĚŘENÍM NA VELMI RYCHLÉ PROCESY
V MIKROSKOPICKÝCH MĚŘÍTCÍCH**

**THE DEVELOPMENT OF INVERSE HEAT CONDUCTION
PROBLEMS FOCUSED ON VERY FAST PROCESSES
IN MICROSCALES**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
Oponenti: doc. Ing. Michal Jaroš, CSc.
prof. Ing. Mirko Dohnal, DrSc.
Datum obhajoby: 14. 4. 2011

Klíčová slova

Vedení tepla, přenos tepla, intenzita chlazení, součinitel přestupu tepla, inverzní úloha, nanokapalina

Keywords

Heat conduction, heat transfer, cooling intensity, heat transfer coefficient, inverse task, nanofluid

Místo uložení dizertační práce

Laboratoř přenosu tepla a proudění, FSI VUT v Brně

Obsah

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	5
2.1 Inverzní úloha vedení tepla	5
2.2 Velmi rychlé procesy	6
2.3 Nanokapaliny	7
3 NÁVRH EXPERIMENTU.....	7
3.1 Inverzní úloha vedení tepla při velmi rychlých procesech	7
3.2 Inverzní úloha v mikroskopických měřících.....	9
4 EXPERIMENT	10
4.1 Vlastnosti testovaných nanokapalin.....	10
4.2 Experimentální plán	10
4.3 Chlazený senzor	11
4.4 Popis experimentu.....	12
5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	14
5.1 Model	14
5.2 Výsledky	14
5.3 Zhodnocení výsledků	17
6 ZÁVĚR.....	19
LITERATURA	21
ABSTRAKT	24
ABSTRACT	24
ŽIVOTOPIS.....	25

1 ÚVOD

V technické praxi se setkáváme s procesy, které ovlivňují teplotní pole těles nebo záměrně vyvolávají jeho změny. Pro řízení takových procesů je potřeba znát teplotní pole v tělesech co nejpřesněji.

Ze znalosti materiálových charakteristik chlazeného tělesa, počáteční teploty a okrajové podmínky, tj. teploty povrchu během chlazení, intenzity chlazení povrchu, nebo povrchového tepelného toku, lze řešením rovnice vedení tepla určit rozložení teploty v celém tělese v průběhu procesu.

V řadě případů je okrajová podmínka neznámá, pak lze využít inverzní úlohu vedení tepla. Postup řešení inverzní úlohy vedení tepla je opačný k postupu řešení rovnice vedení tepla. Zatímco do rovnice vedení tepla vstupuje okrajová podmínka a výsledkem je teplotní pole tělesa, do inverzní úlohy vedení tepla vstupují teploty uvnitř tělesa a výsledkem je okrajová podmínka.

Protože se teploty uvnitř tělesa získávají měřením, je výsledek výpočtu ovlivněn nejen parametry úlohy, ale také vlastnostmi měřicího zařízení a způsobem měření. Nevhodná volba těchto vstupů může způsobit degradaci informace o teplotních změnách na povrchu nebo dokonce divergenci úlohy. Na vstupní charakteristiky jsou obzvláště citlivé velmi rychlé procesy chlazení, kdy chladicí intenzita na povrchu mění svoji hodnotu velmi rychle.

S rozvojem technologií výroby mikroelektroniky a s rozšířením jejího použití vznikl požadavek na velmi účinné chlazení s co možná nejmenším množstvím chladicího média. Takovým intenzivně chladicím médiem by mohla být nanokapalina, tj. suspenze kapaliny a nanočástic. Podle teoretického výzkumu prof. Choi, který nanokapaliny v roce 1995 vyvinul, je možné předpokládat mnohonásobné zvýšení chladicí intenzity. Toto zvýšení bylo v některých případech potvrzeno, ale ne zcela objasněno. V experimentální části disertační práce je proto srovnána chladicí intenzita při ostřiku nanokapalinami pomocí inverzní úlohy vedení tepla.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 INVERZNÍ ÚLOHA VEDENÍ TEPLA

Řešením inverzní úlohy je měrný tepelný tok na povrchu tělesa q^m a následně součinitel přestupu tepla HTC^m . Tyto okrajové podmínky jsou pro každý časový krok m určeny z následujících vzorců:

$$q^m = q^{m-1} + \frac{\sum_{\kappa=m+1}^{m+n_t} \sum_{s=r, r=1}^{n_T} (T_r^{*,\kappa} - T_s^\kappa) \cdot \zeta_r^\kappa}{\sum_{\kappa=m+1}^{m+n_t} \sum_{r=1}^{n_T} (\zeta_r^\kappa)^2}, \quad (1)$$

$$\text{kde } \zeta_r^\kappa = \frac{\partial T_r^\kappa}{\partial q^\kappa},$$

$$HTC^m = \frac{q^m}{T_\infty - \frac{T_0^m + T_0^{m-1}}{2}}. \quad (2)$$

Teplota $T_r^{*,\kappa}$ změřená r tým termočlánkem v časovém kroku κ je srovnávána s teplotou T_s^κ vypočtenou v místě r tého termočlánku s ve stejném časovém kroku. Přitom se bere do úvahy také citlivost ζ_r^κ r tého termočlánku na změnu měrného tepelného toku v časovém kroku κ . Cílem je získat vypočtené hodnoty co nejbližší hodnotám změřeným. Symbol n_T ve vzorcích představuje počet termočlánků a n_t počet dopředných kroků, jejichž použití vede ke stabilizaci výpočtu. Symbol T_0^m představuje teplotu povrchu vypočtenou v časovém kroku m a T_∞ teplotu chladiva.

Inverzní úloha pracuje s nepřesnými změřenými daty ($T_r^{*,\kappa}$) a je na chyby v nich citlivá v závislosti na charakteru chlazení. Ve většině dostupných publikací jsou přijímána zjednodušení, že termočlánek zabudovaný ve zkoumaném tělese neovlivňuje jeho teplotní pole. Takto získané výsledky jsou ve skutečnosti chybné.

2.2 VELMI RYCHLÉ PROCESY

Použití zákonů klasické fyziky je limitováno. V oblasti vedení tepla se za hranici obvykle považuje rozměr prostoru srovnatelný s velikostí střední volné dráhy nosiče tepla v daném prostředí, nebo jevy rychlostně srovnatelné s rychlostí nosiče v prostředí. V procesech, při kterých je tato hranice překročena směrem k malým měřítkům a rychlým dějům, je nutné přihlížet k vlnovému charakteru šíření tepla.

Jeden ze stěžejních zákonů, na němž je postavena klasická teorie vedení tepla, je Fourierův zákon. Podle něj tepelný tok vzniká jako reakce na teplotní gradient mezi dvěma místy a je přímo úměrný tomuto teplotnímu gradientu s konstantou přímé úměrnosti, kterou je součinitel tepelné vodivosti. Z Fourierova zákona plyne, že součinitel tepelné vodivosti je vlastností materiálu a nezáleží na velikosti tělesa nebo prostoru, v němž tepelný tok nastane. Dále je podle Fourierova zákona tepelný tok vyvolán teplotním gradientem okamžitě a okamžitě se projeví ve všech místech materiálu, jinak řečeno teplo se šíří nekonečnou rychlostí. Ani jedno ze zmíněných tvrzení, na nichž je Fourierův zákon postaven, není pravděpodobně pravdivé. Řada experimentálně získaných součinitelů tepelných vodivostí nanočástic totiž neodpovídá součinitelům tepelných vodivostí příslušných materiálů, a také rychlost šíření tepla není podle Mitra [1], Kaminski [2], Herwig a Beckert [3] a Tzou a Chen [4] nekonečná. Rychlosti šíření tepelných vln jsou však v materiálech velmi vysoké vzhledem k času procesu nebo možností jeho sledování (podle [4] je v kovech rychlost tepelné vlny řádově $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Ucelená teorie vedení tepla beroucí do úvahy i jevy mikrosvěta nebyla dosud vypracována. Nedostatek znalostí, které jsou k vytvoření teorie potřeba, je způsoben tím, že vliv odlišnosti zákonitostí je na veličiny, s nimiž člověk obvykle pracuje, zanedbatelný vůči vlivu nepřesnosti měření. Až v případech jako vedení tepla v nanostrukturách byly zpozorovány odchylky od klasických zákonů. Pro výpočet inverzní úlohy vedení tepla, která je předmětem této práce, lze takové odchylky

zanedbat. Zkoumaná tělesa jsou mnohem větší než je délka střední volné dráhy nosičů tepla, a z důvodu existence limitů v rychlosti měření termočlánkem nelze takový proces považovat za dostatečně rychlý. Na způsobu vyhodnocování inverzní úlohy nic nezmění ani použití chladiv s nanočásticemi, vlastnosti chladiva totiž do inverzního výpočtu nevstupují.

2.3 NANOKAPALINY

Nejdiskutovanější vlastností nanokapalin je součinitel tepelné vodivosti. Tepelnou vodivost nanokapalin ovlivňuje několik faktorů jako druh základní kapaliny, druh částic, jejich velikost, tvar a koncentrace, druh a koncentrace stabilizačních příměsí. Při porovnání výsledků experimentů s výpočty součinitele tepelné vodivosti pomocí dosud existujících modelů se ukázalo, že tyto modely (Hamilton-Crosser, Masuda, Wasp [5],...) v případě nanokapalin neplatí pravděpodobně proto, že berou do úvahy množství částic v kapalinách a některé i jejich tvar, ne však velikost. Dosud je tedy nutné součinitel tepelné vodivosti určovat experimentálně. Většina vědců potvrdila zvýšení tepelné vodivosti kapalin s nanočásticemi Fe, Al₂O₃, TiO₂ a uhlíkovými nanovláknami obvykle 20-40 %. Nanokapaliny s nanočásticemi Fe byly zkoumány např. v práci Zhu [6], Hong [7], s Al₂O₃ v Murshed [8], Eastman [9], Masuda [10], s TiO₂ v Murshed [11]. Tepelná vodivost nanokapalin s uhlíkovými nanovláknami měla být podle prof. Choi [12] zvýšena až o 160 %. Následoval zájem dalších vědců, ale dosáhli zlepšení pouze 20-40 % [13], [14].

Zvýšení chladicí intenzity při laminárním i turbulentním proudění bylo při použití Al₂O₃ potvrzeno v [15], [16], [17], [18], při použití TiO₂ v [19], [20], Fe v [21] a uhlíkových nanovláknách v [22], [23], [24], [25]. Nižší chladicí intenzita různých nanokapalin byla pozorována v [26], [27], [28], [29]. Lze však říct, že podle většiny publikací bylo přidáním nanočástic do základní kapaliny dosaženo zlepšení přenosu tepla.

Sprchovému chlazení nanokapalinami se mnoho vědců zatím nevěnovalo. V práci Bansal a Pyrtle z Univerzity Jižní Florida [30] byl popsán experiment, při němž byl chlazen měděný povrch z teploty 150 °C na teplotu 75 °C. Povrch byl vystaven ostříku nanokapalinou s hliníkovými nanočásticemi o velikosti 45 nm o hmotnostních koncentracích 0,25 %, 0,2525 % a 0,505 %. Chladicí intenzita byla srovnatelná s chladicí intenzitou destilované vody. Oproti těmto výsledkům Chakraborty [31], který použil 0,1 hm. % TiO₂ o velikosti 30-50 nm ve vodě pro sprchové chlazení desky o teplotě 1200 °C, dosáhl významného zlepšení.

3 NÁVRH EXPERIMENTU

3.1 INVERZNÍ ÚLOHA VEDENÍ TEPLA PŘI VELMI RYCHLÝCH PROCESECH

Je-li rychlost šíření tepla v materiálech rovna rychlosti zvuku (v oceli 6000 m·s⁻¹ [32]), je uvnitř tělesa ve vzdálenosti 2,15 mm od povrchu časové zpoždění tepelné

vlny $4,3 \cdot 10^{-7}$ s. V případě, že je teplota zaznamenávána každou setinu sekundy, nemůže hrát takové zpoždění roli. Přesto se stává, že ve vzdálenosti 2,15 mm pod povrchem je i po časech delších než setina sekundy naměřena nulová teplotní změna. Je to dáno existencí odporu látky proti šíření tepla (tj. převrácené hodnoty součinitele tepelné vodivosti), jehož důsledkem je zmenšující se velikost teplotního gradientu směrem od chlazeného povrchu. Protože senzor zabudovaný v tělese není schopen rozeznat změny, které jsou vzhledem k jeho rozlišovací schopnosti příliš malé, je změřená teplotní změna nulová. To neodpovídá skutečnosti a informace o dění na povrchu je tak degradována. Může se také stát, že rozlišovací schopnost senzoru je sice dostatečná, ale velikost změřené teplotní změny je srovnatelná s velikostí okolního šumu. Taková data jsou rovněž bezcenná.

Údaje nutné ke správnému naplánování experimentu je možné (ze znalosti rozlišitelnosti zařízení ke snímání dat) odhadnout použitím analytického řešení [33] rovnice vedení tepla nekonečně rozměrnou deskou, kterou se teplo šíří pouze ve směru její tloušťky $2l$. Deska je chlazena ze dvou stran shodnou chladicí intenzitou danou HTC . Proměnná x představuje vzdálenost od středu desky:

$$\frac{T(x,t) - T_\infty}{T^0 - T_\infty} = \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{4 \sin \zeta_\kappa}{2\zeta_\kappa + \sin(2\zeta_\kappa)} \cdot \exp\left(\frac{-\zeta_\kappa^2 \cdot \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot t}{l^2}\right) \cos(\zeta_\kappa \cdot x), \quad (3)$$

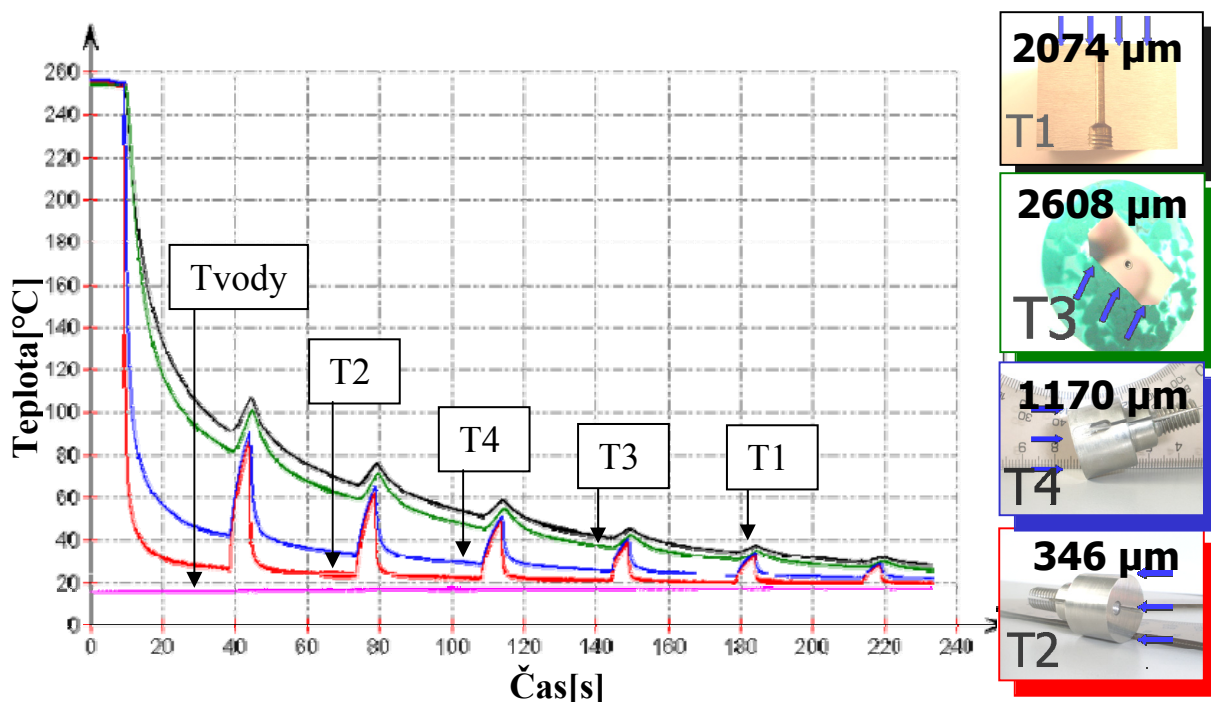
kde diskrétní hodnoty ζ_κ jsou pozitivní kořeny rovnice $\zeta_\kappa \cdot \operatorname{tg} \zeta_\kappa = \frac{HTC \cdot l}{k}$.

Ze vzorce (3) můžeme pro určitá HTC spočítat teplotní změnu v místě termočlánu po určitém čase. Ze vzorce byla podle [33] za předpokladu $HTC = 10\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ve vzdálenosti 2 mm od povrchu po čase 0,035 s vypočtena teplotní změna 0,01 °C. Pro $HTC = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ by byla stejná změna na stejném místě naměřena po 0,05 s, pro $HTC = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ po 0,075 s. Pro porovnání teplotní změna 0,25 °C nastane ve stejném místě pro $HTC = 10\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ za 0,06 s, pro $HTC = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ za 0,1 s a pro $HTC = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ za 0,18 s.

Součinitel přestupu tepla HTC vypočtený inverzní úlohou vedení tepla závisí také na jejích parametrech jako je velikost časového a prostorového kroku a počet dopředných kroků. Čím menší časový a prostorový krok, tím jsou chyby výpočtu menší, ale zvětšuje se jeho časová náročnost. Čím je větší počet dopředných kroků, tím více se vyhladí výsledná data. Příliš velký počet dopředných kroků vede ke ztrátě informace, příliš malý počet způsobí kopírování šumu v měření, a inverzní úloha může zdivergovat.

3.2 INVERZNÍ ÚLOHA V MIKROSKOPICKÝCH MĚŘÍTCÍCH

V Laboratoři přenosu tepla a proudění byly zkoumány 4 druhy termočlánků různým způsobem zabudovaných do ocelové desky chlazené z počáteční teploty 250 °C. První termočlánek T1 typu K o průměru 1,5 mm byl v předvrtané díře přitlačován pružinou kolmo k chlazenému povrchu ve vzdálenosti 2074 μm . Termočlánek T2 byl nejprve zapájen do ocelového válečku (dále senzoru) a s ním vložen do chlazené desky tak, že osa termočlánu byla rovnoběžná s chlazeným povrchem. Průměr termočlánu byl 0,5 mm a jeho vzdálenost od povrchu 346 μm . Termočlánek T3 o průměru 1,5 mm byl zabudován přímo do ocelové desky rovnoběžně k jejímu povrchu ve vzdálenosti 2608 μm . Termočlánek T4 o průměru 1 mm byl zalepen tmelem do senzoru rovnoběžně k jeho povrchu ve vzdálenosti 1170 μm a poté vložen do testované desky.



Obr. 1 Teplota uvnitř desky změřená termočlánekami T1-T4 v průběhu chlazení vodou o tlaku 5 bar (po každých 30ti sekundách bylo chlazení na 5 s přerušeno)

Reakce jednotlivých termočlánků na teplotní změny jsou patrné z obr. 1. Odezva termočlánu T1 byla ze všech porovnávaných nejpomalejší a T2 nejrychlejší. Z výsledků je zřejmé, že bude-li termočlánek umístěn k izotermám rovnoběžně, co nejbližší povrchu, a bude-li průměr termočlánu co nejmenší, bude měřením dosaženo přesnějších výsledků než v opačných případech. Přitom se ve zkoumaném rozsahu těchto parametrů ukazuje, že největší vliv na nepřesnosti měření má poloha termočlánu vzhledem k izotermám, poté vzdálenost od povrchu a průměr termočlánu.

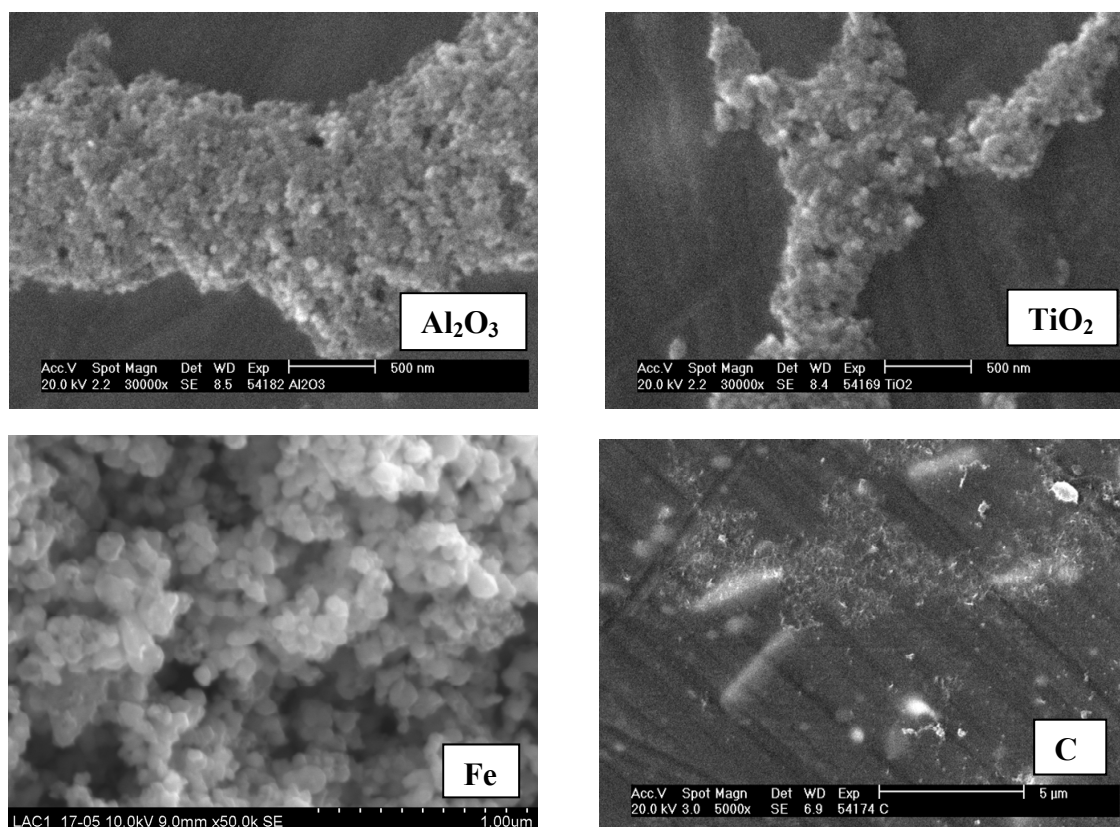
Měření teploty termočlánekem je jeho geometrií, umístěním a materiálovými charakteristikami významně ovlivněno. Tyto parametry musí být uvažovány také při

řešení inverzní úlohy vedení tepla, do níž změřené teploty vstupují. Nepřesnosti jsou pak částečně eliminovány, ne však odstraněny.

4 EXPERIMENT

4.1 VLASTNOSTI TESTOVANÝCH NANOKAPALIN

Nanokapaliny s nanočásticemi Al_2O_3 a TiO_2 byly vyrobeny o koncentraci 40 hm. % (± 1 hm. %) ve vodě. Nanokapalina s Fe o koncentraci 40 hm. % ve vodě byla poskytnuta prof. Miroslavem Mašláňem z Palackého university v Olomouci a nanokapalina s uhlíkovými nanovláknky byla vyrobena o koncentraci 1 hm. % ($\pm 0,5$ hm. %) ve vodě. Nanočástice Al_2O_3 , TiO_2 a Fe (obr. 2) měly kulový tvar o velikosti po řadě 78 nm, 82 nm (obr. 2) a 80 nm v průměru. Délka uhlíkových nanovláken byla $1,3 \mu\text{m}$ a průměr 9 nm. Nanokapalina s Fe jako jediná neobsahovala žádný stabilizátor.



Obr. 2 Fotografie nanočástic; uhlíková nanovláknka jsou na fotografii patrná jako podlouhlé útvary s nepřiliš zřetelnými hranicemi; fotografie Fe nanočástic byla pořizena Palackého univerzitou v Olomouci, ostatní na FSI VUT v Brně

4.2 EXPERIMENTÁLNÍ PLÁN

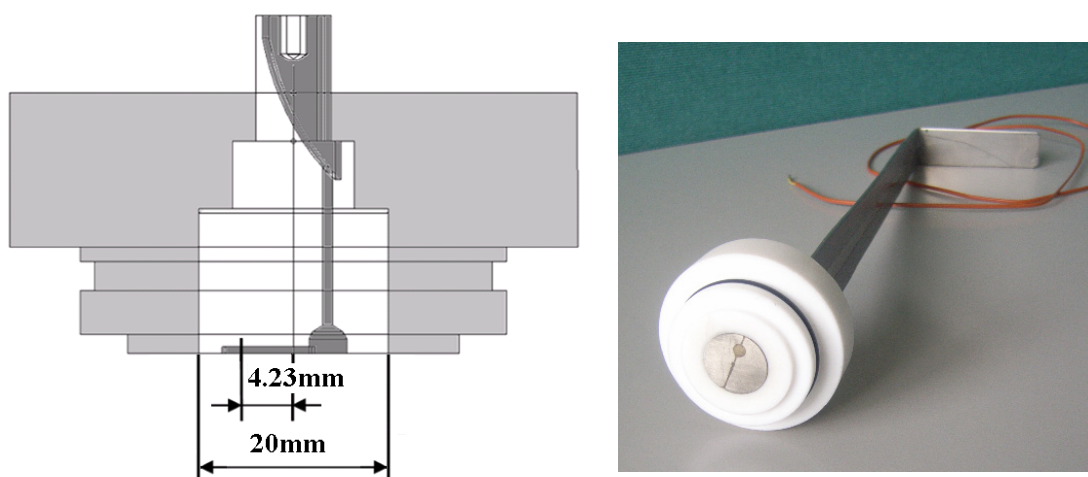
Experimentální plán byl sestaven tak, aby byla měřením získána informace o vlivu druhu nanočástic a jejich koncentrací ve vodě na intenzitu chlazení. Nanokapaliny vybrané ke zkoumání obsahovaly Fe, Al_2O_3 , TiO_2 o hmotnostních koncentracích 1 hm. %, 10 hm. % a 40 hm. %, nebo vícevrstvá uhlíková nanovláknka

o koncentracích 0,01 hm. %, 0,1 hm. % a 1 hm. %. Nanokapaliny byly zkoumány při třech různých průtocích ($1 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$, $1,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ a $2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$). Dále byly použity dva typy trysek, kuželová tryška s úhlem rozstříku 45° byla umístěna ve třech různých ostřikových vzdálenostech (40, 100 a 160 mm), jednopaprsková tryška pouze ve vzdálenosti 100 mm. Experimentální podmínky byly během experimentu stálé. Podle experimentálního plánu byla jako první testována voda, dále nanokapaliny s oxidy železa, uhlíkovými nanovláknky, Al_2O_3 , TiO_2 . Na závěr experimentálního plánu byly opakovány experimenty s vodou.

V případě kuželové tryšky je vhodné z ostřikové vzdálenosti a průtoku určit hustotu kapaliny dopadající na povrch v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, v případě jednopaprskové tryšky je hustota dopadající kapaliny vyjádřena v $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.3 CHLAZENÝ SENZOR

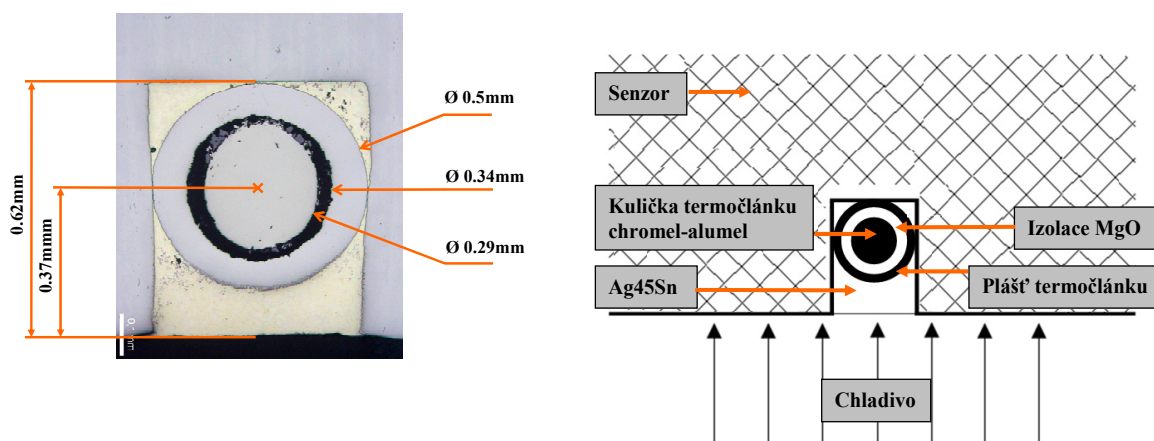
Chlazený senzor měl tvar válce o průměru 20 mm. Byl vyroben z austenitické oceli 314 AISI a zabudován do teflonu (obr. 3) tak, aby všechny povrchy kromě testovaného byly během experimentu chráněny proti přestupu tepla. Do senzoru byl stříbrnou pájkou Ag45Sn zapájen plášťový neuzemněný termočlánek typu K o průměru 0,5 mm rovnoběžně k chlazenému povrchu ve vzdálenosti 0,37 mm (obr. 4). Přesné místo měření, které je dáno polohou kuličky termočlánu (obr. 3), je 4,23 mm od středu senzoru. Termočlánek byl během měření spojen s data loggerem, mobilním zařízením pro záznam dat. Frekvence snímání dat byla nastavena na hodnotu 333 Hz.



Obr. 3 Nákres chlazeného senzoru (bíle) v teflonu (světle šedě), tmavě šedě je zakreslen otvor pro vložení termočlánu, ocelový senzor byl k teflonu přišroubován maticí na opačné straně chlazené části senzoru; vpravo fotografie

4.4 POPIS EXPERIMENTU

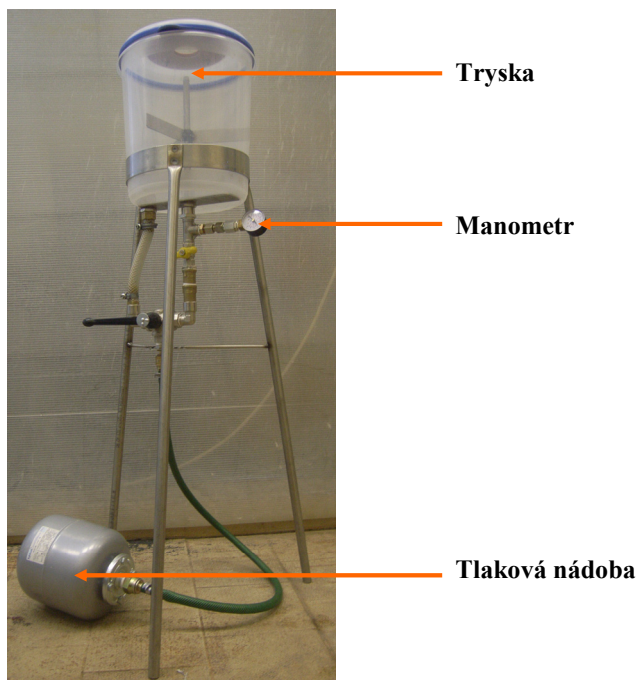
Ocelový senzor zabudovaný do teflonu byl zahřát na teplotu 190 °C elektrickou páčkou (obr. 5) a držen na této teplotě po dobu 15 minut. Poté byl vložen do experimentálního zařízení (obr. 6) zkoumaným povrchem dolů. Pod vzorkem byla umístěna tryska. Před experimentem byla testovaná kapalina uložena v tlakové nádobě s membránou, která v ní oddělovala kapalinu a dusík. Tlakový dusík byl použit jako hnací médium pro kapalinu, čerpán byl do tlakové nádoby z kontejneru s manometrem (obr. 5) a jeho tlak byl udržován na konstantní hodnotě. Po vložení ocelového vzorku do experimentálního zařízení byl otevřen kohout před tryskou. Testovaná kapalina se tak dostala z tlakové nádoby přes hadici do trysky a na horký povrch vzorku dopadala daným stálým průtokem. Během ostříku byla kapalina zachytávána v experimentálním zařízení (obr. 6) a na konci experimentu byla přemístěna opět do tlakové nádoby. Měření trvalo řádově desítky sekund, povrch vzorku se za tu dobu zchladil na teplotu asi 30 °C. Kromě teploty v místě termočlánku 0,37 mm pod povrchem senzoru byla v průběhu experimentu snímána také teplota chladiva a teplota okolního vzduchu. Teplota chladiva byla měřena termočlánkem typu K o průměru 1 mm umístěným v hadici s chladivem. Data byla zaznamenávána do data loggeru, po měření byla stažena do počítače, a dále vyhodnocena inverzní úlohou naprogramovanou v Borland Delphi 7. Výstupem z programu byl součinitel přestupu tepla, fyzikální veličina charakterizující chladicí intenzitu.



Obr. 4 Geometrie a složení termočlánku v řezu



Obr. 5 Experimentální vybavení

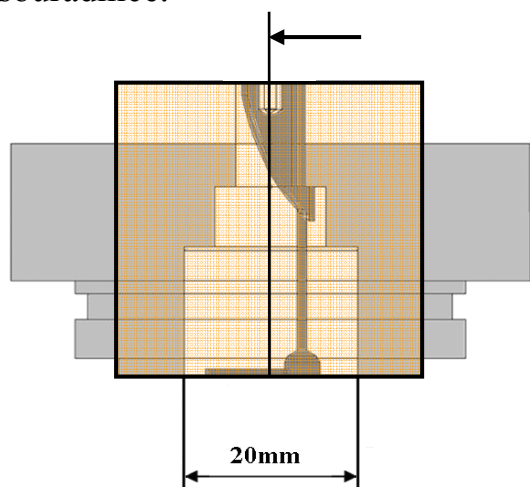


Obr. 6 Experimentální zařízení

5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

5.1 MĚŘENÝ VZOREK

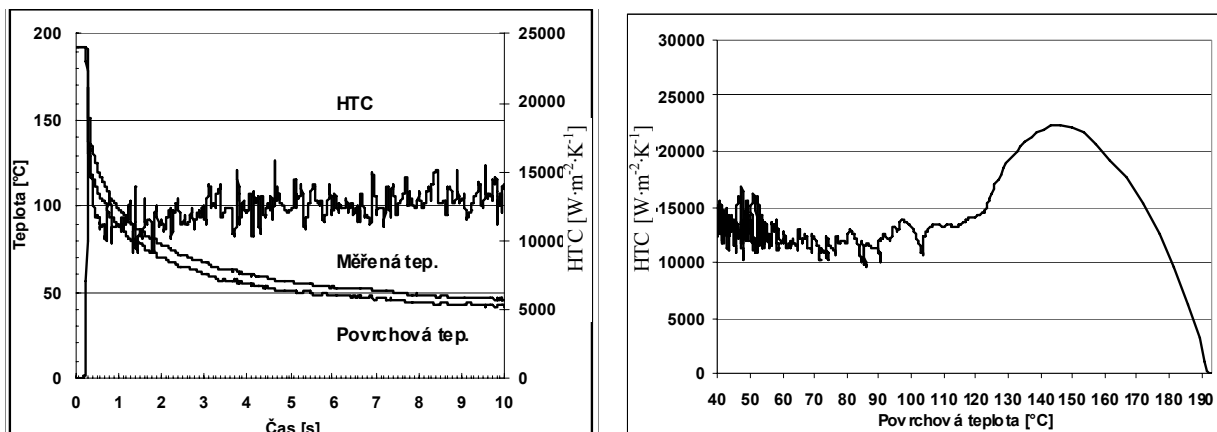
V průběhu experimentu byl chlazen válcový ocelový senzor po stranách chráněný teflonem. Ve výpočtu je uvažována pouze část barevně vyznačená v obr. 7. Tato část bude dále označována jako vzorek. Osová symetrie vzorku (válcového tvaru) a chladicího paprsku je narušena přítomností termočlánku, proto je teplotní pole vzorku řešeno ve dvou dimenzích v kartézském souřadném systému. Za předpokladu, že intenzita chlazení se mění pouze v průběhu experimentu, tzn. s časem, a nezávisí na poloze na povrchu vzorku, je použita jednorozměrná inverzní úloha, tzn. vypočtený součinitel přestupu tepla je pouze funkcí času nikoli souřadnice.



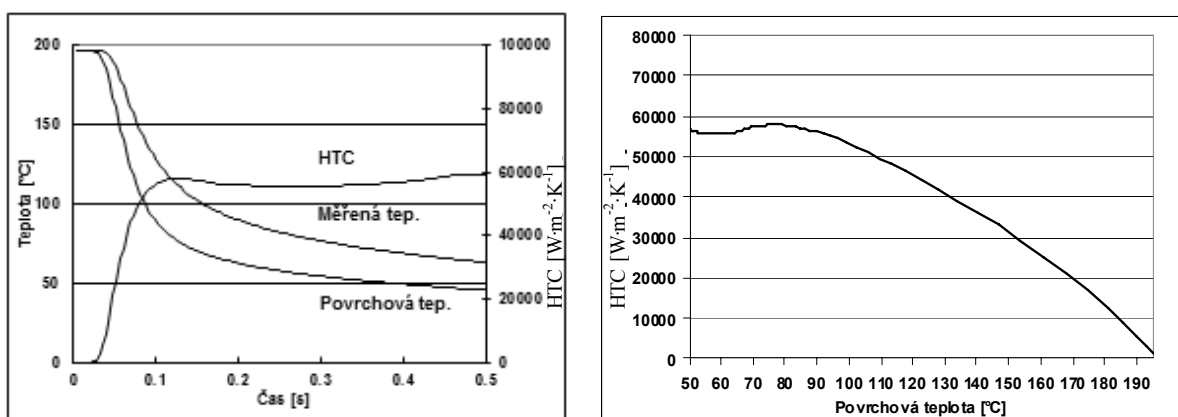
Obr. 7 Část senzoru uvažovaná ve výpočtovém modelu je ohraničená obdélníkem

5.2 VÝSLEDKY

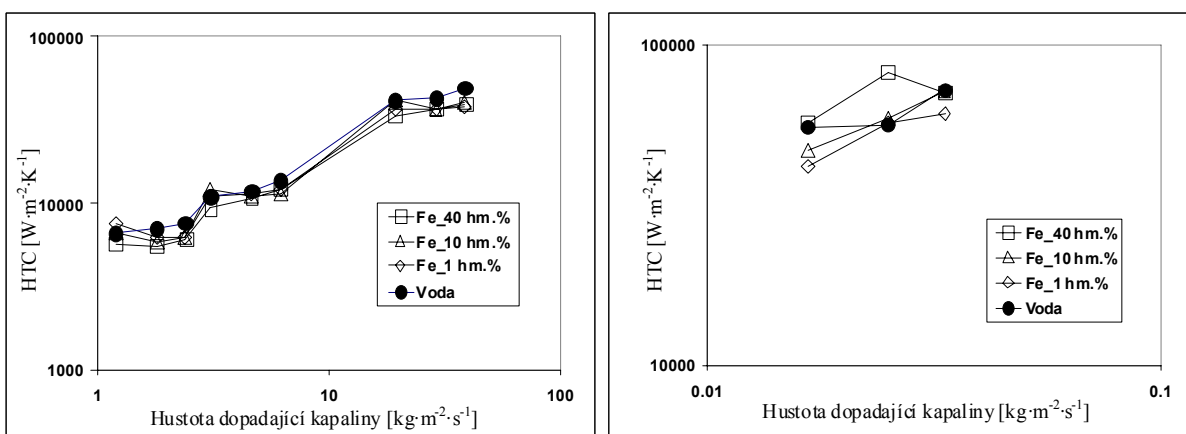
Pro představu o výsledcích jednotlivých experimentů slouží dva záznamy chlazení vodou, na obr. 8 s použitím kuželové trysky a na obr. 9 s použitím jednopaprskové trysky. Z porovnání výsledků jednotlivých experimentů zobrazených v grafech v obr. 10-13 plyne, že *HTC* roste s rostoucí hustotou dopadající kapaliny (hustota dopadající kapaliny byla vypočítána z průtoku a ostřikové vzdálenosti). Při použití jednopaprskové trysky koncentrace nanočástic nemá významný vliv na *HTC*. Při použití kuželové trysky nemá koncentrace nanočástic významný vliv na *HTC* pro nižší hustotu dopadající kapaliny. Pro vyšší hustotu dopadající kapaliny způsobuje pokles *HTC* přítomnost uhlíkových nanovláken ve vodě. Po porovnání intenzit chlazení nanokapalinami s intenzitami chlazení vodou lze říct, že přidání nanočástic do vody snižuje *HTC* ve většině zkoumaných případů. Intenzita chlazení byla překvapivě vyšší při použití nanokapaliny s 1 hm. % uhlíkových nanovláken (obr. 11) a to pouze pro kuželovou trysku při ostřikové vzdálenosti 100 mm (tj. při hustotě dopadající kapaliny $3,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $4,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a $6,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Nic podobného nebylo pozorováno při použití jednopaprskové trysky.



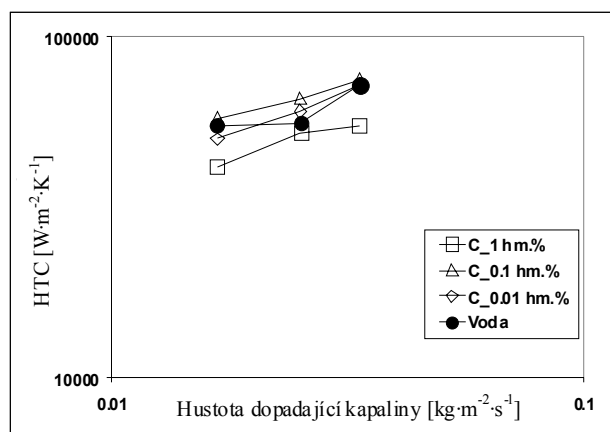
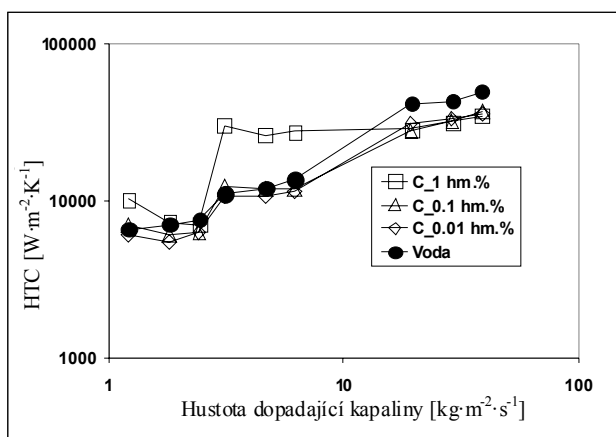
Obr. 8 Záznam teplot a výsledky výpočtu HTC při chlazení vodou (průtok $1,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$, kuželová tryska, ostříková vzdálenost 100 mm)



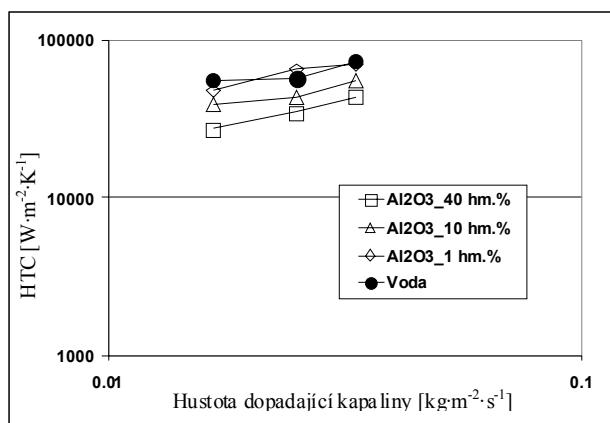
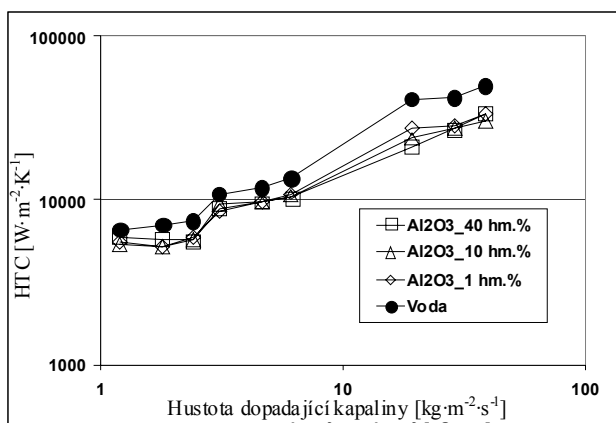
Obr. 9 Záznam teplot a výsledky výpočtu HTC při chlazení vodou (průtok $1,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$, jednopaprsková tryska, ostříková vzdálenost 100 mm)



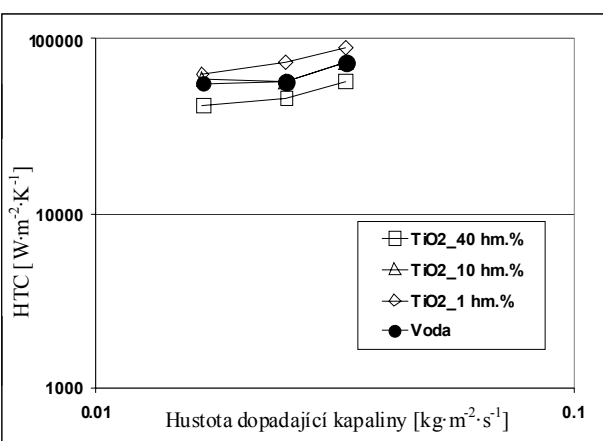
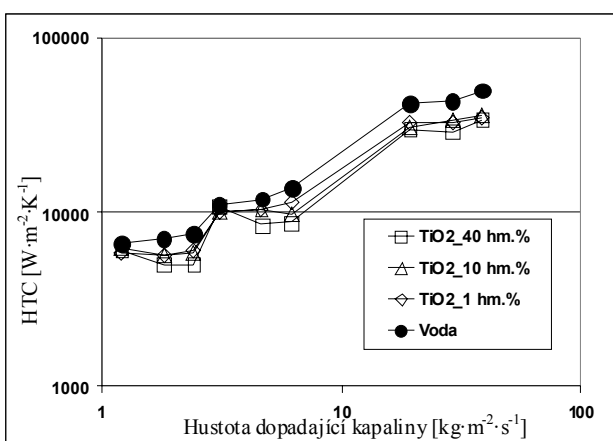
Obr. 10 Vypočtené hodnoty HTC v závislosti na hustotě dopadající kapaliny pro nanokapalinu s Fe nanočásticemi o různých koncentracích při použití kuželové trysky (vlevo) a jednopaprskové trysky (vpravo)



Obr. 11 Vypočtené hodnoty HTC v závislosti na hustotě dopadající kapaliny pro nanokapalinu s uhlíkovými nanovláknými o různých koncentracích při použití kuželové trysky (vlevo) a jednopaprskové trysky (vpravo)



Obr. 12 Vypočtené hodnoty HTC v závislosti na hustotě dopadající kapaliny pro nanokapalinu s nanočásticemi Al_2O_3 o různých koncentracích při použití kuželové trysky (vlevo) a jednopaprskové trysky (vpravo)



Obr. 13 Vypočtené hodnoty HTC v závislosti na hustotě dopadající kapaliny pro nanokapalinu s nanočásticemi TiO_2 o různých koncentracích při použití kuželové trysky (vlevo) a jednopaprskové trysky (vpravo)

Pomocí programu Matlab R2009b a jeho podprogramu „Surface fitting tool” byly hodnoty HTC určené inverzní úlohou proloženy funkcemi, v nichž V představuje hustotu dopadající kapaliny a P_M hmotnostní koncentraci nanočástic. Funkce jsou vytvořeny pouze pro kuželovou trysku, protože pro jednopaprskovou trysku nebylo získáno dostatečné množství dat. Hodnoty pro 1 hm. % uhlíkových nanovláken, které jsou velmi odlišné od ostatních, nejsou ve vzorci uvažovány. Tvary funkcí jsou následující:

$$HTC(Fe) = 3200 \cdot V^{0.9} - 25 \cdot V^2 - V^{2.5} \cdot P_M^{0.1},$$

$$V \in \langle 0,40 \rangle \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, P_M \in \langle 0,40 \rangle \text{ hm. \%}$$

(97,2 % změřených hodnot funkci vyhovuje)

$$HTC(C) = 5000 \cdot V^{0.7} - 10 \cdot V^2 - 814 \cdot V^{0.8} \cdot P_M^{0.03},$$

$$V \in \langle 0,40 \rangle \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, P_M \in \langle 0,1 \rangle \text{ hm. \%}$$

(97,6 % změřených hodnot funkci vyhovuje)

$$HTC(Al_2O_3) = 4718 \cdot V^{0.7} - 6,46 \cdot V^2 - 1098 \cdot V^{0.77} \cdot P_M^{0.03},$$

$$V \in \langle 0,40 \rangle \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, P_M \in \langle 0,40 \rangle \text{ hm. \%}$$

(98,1 % změřených hodnot funkci vyhovuje)

$$HTC(TiO_2) = 3823 \cdot V^{0.83} - 20 \cdot V^2 - 735 \cdot V^{0.8} \cdot P_M^{0.05},$$

$$V \in \langle 0,40 \rangle \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, P_M \in \langle 0,40 \rangle \text{ hm. \%}$$

(97,6 % změřených hodnot funkci vyhovuje)

5.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Většina literárních zdrojů potvrdila po přidání nanočástic do základních kapalin zlepšení tepelné vodivosti a součinitele přestupu tepla při obtékání těles. Prací o chlazení ostřikem nanokapalinami však nebylo publikováno dostatečné množství, aby bylo podobné zvýšení součinitele přestupu tepla potvrzeno nebo vyvráceno. Z většiny výsledků experimentů prezentovaných v této práci vyplývá, že při teplotách 50 až 100 °C je intenzita chlazení ocelového vzorku nanokapalinami s nanočásticemi Fe, Al₂O₃, TiO₂ a uhlíkovými nanovláknými nižší. Rozdíly v HTC nanokapalin oproti HTC vody při ostřiku jsou shrnuty v Tab. 1. Při použití kuželové trysky se ukazuje, že s rostoucí koncentrací nanočástic ve vodě HTC klesá, vliv velikosti koncentrace na HTC je velmi malý, ale již malé koncentrace nanočástic ve vodě snižují významně chladicí intenzitu. Vliv průtoku má stejný charakter jako při ostřiku vodou. S klesající ostřikovou vzdáleností je patrný vyšší pokles v HTC vzhledem k vodě (obr. 10-13). Z Tab. 1 a z obr. 10-13 je dále zřejmé, že při použití jednopaprskové trysky jsou výsledné hodnoty HTC velice variabilní a nelze za těchto podmínek jednoznačně popsat chování nanokapalin.

Za významnou lze považovat pouze změnu intenzity chlazení při ostřiku nanokapalinou s 1 hm. % uhlíkových nanovláken kuželovou tryskou ze vzdálenosti 100 mm (obr. 11). Součinitel přestupu tepla HTC je v tomto případě významně vyšší než součinitel přestupu tepla HTC vody, přičemž roste s klesající hustotou

dopadající kapaliny. Pro $3,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ byl pozorován vzrůst o 174 % vzhledem k *HTC* destilované vody, pro $4,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ o 119 % a pro $6,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ o 101 %. Pro ostatní hustoty dopadající kapaliny byl v porovnání s vodou pozorován pokles *HTC* o 32 % (Tab. 1).

Tab. 1 Maximální rozdíl v *HTC* testovaných kapalin vzhledem k *HTC* vody

Aditivum		Rozdíl v <i>HTC</i> vůči <i>HTC</i> vody v %			
Druh	Koncentrace [hm. %]	Kuželová tryska		Jednopaprsková tryska	
		min.	max.	min.	max.
Fe	40	-22	-15	-2	+46
	10	-18	+8	-15	+5
	1	-23	+14	-24	+1
C	1	-32	+174	-25	-6
	0,1	-32	+10	+3	+18
	0,01	-26	-4	-9	+8
Al ₂ O ₃	40	-49	-10	-51	-39
	10	-42	-17	-29	-24
	1	-34	-15	-15	+13
TiO ₂	40	-36	-8	-26	-20
	10	-30	-5	-1	+5
	1	-30	-11	+13	+31

Pokles hodnoty *HTC* byl pozorován také v práci Bansal & Pyrtle [30] při použití hliníkových nanočástic ve vodě. Oproti tomu výsledky Chakraborty [31] ukazují vzrůst hodnoty *HTC* přidáním nanočástic TiO₂. Důvod rozdílů by mohl být v rozsahu teplot provedených experimentů. Experimenty v této práci a v práci Bansal & Pyrtle byly provedeny pro teploty 50 až 200 °C, zatímco výzkum Chakraborty pro teploty 500 až 1200 °C.

Rozdíly v intenzitách chlazení při ostříku a během obtékání těles nanokapalinami jsou dány dynamikou obou dějů. Intenzita chlazení v obou případech závisí na viskozitě kapaliny, její rychlosti, na drsnosti a smáčivosti povrchu. Chlazení ostříkem je navíc ovlivněno velikostí kapky, jejím povrchovým napětím, tlakem a rychlostí dopadu. Je pravděpodobné, že povrchové napětí kapky obsahující nanočástice a její velikost se od kapek vody liší. V [34] experimentálně ověřili, že Al₂O₃ nanočástice ve vodě snižují povrchové napětí kapek. Menší povrchové napětí potvrdili také v [35] přidáním nanočástic Al₂O₃ a SiO₂ do vody. V [35] dále ukázali, že nižší povrchové napětí má za následek vznik menšího počtu bublin při varu. Malé povrchové napětí také ovlivní velikost kapek. Kapalina vycházející z trysky se odporem vzduchu rozpadne na menší kapky, které mají nižší intenzitu chlazení než kapky velké.

6 ZÁVĚR

Pro dosažení vysoké kvality tepelně zpracovávaných produktů je nutná znalost teplotního pole tělesa během procesu. Teplotní pole celého tělesa lze určit řešením parciální diferenciální rovnice vedení tepla ze znalosti jeho materiálových charakteristik, počáteční teploty a jedné z následujících veličin: teploty povrchu, povrchového tepelného toku, součinitele přestupu tepla. Materiálové charakteristiky vstupují do rovnice jako koeficienty neznámých, počáteční teplota tělesa jako počáteční podmínka a ostatní zmíněné veličiny jako okrajová podmínka.

Ve velkém množství technických aplikací, jako např. chlazení při válcování oceli za tepla, je okrajová podmínka v průběhu procesu neznámá. Nejdosažitelnější okrajovou podmínkou je teplota povrchu chlazeného tělesa, kterou je v některých případech možné změřit termočlánkem nebo termovizní kamerou. Problém s použitím termočlánku nastává, je-li povrch pro měření nedostupný. Použití termovizní kamery je zase závislé na odhadu emisivity povrchu, což způsobuje chyby ve výsledných datech. Z těchto důvodů se hledají jiné způsoby určení okrajové podmínky, jako je využití zákona zachování energie (v případě izolovanosti systému), empirických vztahů (platných za určitých podmínek) nebo inverzní úlohy.

Postup řešení inverzní úlohy vedení tepla je opačný k postupu řešení rovnice vedení tepla. Zatímco do rovnice vedení tepla vstupuje okrajová podmínka a výsledkem je teplotní pole tělesa, do inverzní úlohy vedení tepla vstupují teploty změřené uvnitř tělesa a výsledkem je okrajová podmínka. Protože úloha pracuje s nepřesnými změřenými daty, je z matematického hlediska nekorektní, tzn. nelze dokázat existenci a jednoznačnost jejího řešení. Z tohoto důvodu se ukazují limity v jejím použití. Nepřesnosti ve výsledcích inverzní úlohy souvisí s rychlostí zkoumaného procesu a s vlivem termočlánku na teplotní pole. Rychlostí procesu je myšlena rychlost změny okrajové podmínky, která má být úlohou určena. Z dostupné literatury je u dějů rychlejších než řádově 10^{-6} - 10^{-12} sekund nutné uvažovat vlnový charakter šíření tepla. Tak rychlé děje však v technické praxi nejsou zaznamenatelné, proto vlnová teorie není uvažována (v experimentální části práce byla použita vzorkovací frekvence měření 333 Hz, tzn. $3 \cdot 10^{-3}$ s).

Z experimentů provedených v Laboratoři přenosu tepla a proudění vyplývá, že do řešení inverzní úlohy vedení tepla je nutné zahrnout termočlánek zabudovaný v chlazeném tělese. I při zahrnutí termočlánku do výpočtu však dochází k degradaci informace o chlazení povrchu. Hlavně v případech, kdy je termočlánek nevhodně zabudován, se teplotní gradient může v místě měření snížit natolik, že význam velikosti šumu vzhledem k naměřeným datům bude dominantní. Negativní vliv na výsledky má také nevhodně zvolená frekvence snímání dat, nebo malá rozlišovací schopnost přístroje k záznamu. Dále je nutné věnovat pozornost parametrům samotné úlohy, jako počet dopředných kroků, délka časového a délkového kroku, zvolená chyba algoritmu.

V experimentální části práce byla inverzní úloha použita ke stanovení intenzity chlazení během ostřiku ocelového vzorku o počáteční teplotě 190 °C několika druhy

nanokapalin a vodou. Testovány byly dva typy trysek (kuželová, jednopaprsková), tři ostřikové vzdálenosti (40, 100, 160 mm) a tři průtoky (1, 1,5, 2 kg·min⁻¹). Překvapivě pouze nanokapalina s 1 hm. % uhlíkových nanovláken MWNT dopadající na horký povrch ze vzdálenosti 100 mm vykazovala zvýšení intenzity chlazení oproti vodě a to až o 174 %. Intenzita chlazení ostatními nanokapalinami obsahujícími nanočástice Al₂O₃, TiO₂ a Fe klesla vůči vodě až o 30 %. Pokles hodnot *HTC* je pravděpodobně způsoben poklesem povrchového napětí, které má za následek menší velikost kapek dopadajících na chlazený povrch a také menší počet bublin při varu. Z rešerše vyplývá, že se nanokapaliny mohou při ostřiku chovat jinak za vysokých teplot nad 500 °C, kde podle [31] dochází ke zvýšení intenzity chlazení. V práci jsou také uvedeny publikace jiných autorů zkoumajících tepelné vlastnosti nanokapalin. Ve svých závěrech se však značně rozcházejí. Zatím nebyla vybudována jednotná teorie vysvětlující tepelné vlastnosti nanokapalin.

Přínos práce spočívá ve stanovení postupu při návrhu experimentu pro určení chladicí intenzity kapalin během ostřiku a při volbě parametrů inverzní úlohy ovlivňujících přesnost výsledků. Dále pak v získání nových informací o tepelných vlastnostech nanokapalin, které mohou přispět k vytvoření ucelené teorie o jejich chování, a tím i k jejich případnému využití v technické praxi

LITERATURA

- [1] Mitra K., Kumar S., Vedavarz A., Moallemi M.K., *Experimental evidence of hyperbolic heat conduction in processed meat*: ASME J. Heat Transfer 1995, 117:568-573.
- [2] Kaminski W., *Hyperbolic Heat Conduction Equation for Materials with a Nonhomogeneous Inner Structure*, ASME J. Heat Transfer 1990, 112:555-560.
- [3] Herwig H., Beckert K., *Fourier Versus Non-Fourier Heat Conduction in Material With a Nonhomogeneous Inner Structure*, ASME J. Heat Transfer 2000, 122:363-365.
- [4] Tzou D.Y., Chen J.K., *Thermal Lagging in Random Media*, J. Thermophys. Heat Transfer 1998, 12:567-574.
- [5] Xuan Y., Roetzel W., *Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids*, International Journal of Heat and Mass Transfer 2000, 3701-3707.
- [6] Zhu H., Zhang C., Liu S., Tang Y., Yin Y., *Effect of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids*, Applied Physics Letters 2006, 89:023123.
- [7] Hong K.S., Hong T.K., Yang H.S., *Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles*, Applied Physics Letters 2006, 88:031901.
- [8] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., *Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids*, International Journal of Thermal Science 2008, 47(5):560-568.
- [9] Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Thompson L.J., Lee S., *Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids*, Nanophase and Nanocomposite Material 1997, II:3-11.
- [10] Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., *Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of γ Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ ultra-fine particles)*, Netsu Bussei 1993, 4:227-233.
- [11] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., *Enhanced thermal conductivity of TiO₂ water based nanofluids*, International Journal of Thermal Sciences 2005, 44:367-373.
- [12] Choi S.U.S., Zhang Z.G., Lockwood F.E., Grulke E.A., *Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotubes Suspensions*, Physics Letters 2001, 79:2252-2254.
- [13] Assael M.J., Chen C.F., Metala I., Wakeham W.A., *Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water*, International Journal of Thermophysics 2004, 25:971-985.
- [14] Amrollahi A., Hamidi A.A., Rashidi A.M., *The Effects of Temperature, Volume Fraction and Vibration Time on the Thermo-physical Properties of a*

- Carbon Nanotube Suspension (Carbon Nanofluid)*, Nanotechnology 2008, 19(31):1-8.
- [15] Lai W.Y., Vinod S., Phelan P.E., Prasher R., *Convective Heat Transfer for Water-Based Alumina Nanofluids in a Single 1.02 mm Tube*, Journal of Heat Transfer 2009, 131:112401-1–112401-9.
- [16] Heris S.Y., Etemad S.G., Esfahany M.N., *Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer*, Heat and Mass Transfer 2006, 33:529-535.
- [17] Nguyen C.T., Roy G., Gauthier C., Galanis N., *Heat transfer enhancement using Al₂O₃-water nanofluid for an electronic liquid cooling system*, Applied Thermal Engineering 2007, 1501-1506.
- [18] Wen D., Ding Y., *Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions*, International journal of heat and mass transfer 2004, 47:5181-5188.
- [19] Chen H., Yang W., He Y., Ding Y., Zhang L., Tan C., Lapkin A.A., Bavykin D.V., *Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids)*, Powder technology 2008, 183:63-72.
- [20] He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H., *Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe*, International Journal of Heat and Mass Transfer 2007, 50:2272-2281.
- [21] Shi M.H., Shuai M.Q., Li Q., Xuan Y.M., *Study on pool boiling heat transfer of nano-particle suspensions on plate surface*. Journal of Enhanced Heat Transfer 2007, 14:223-231.
- [22] Ding Y., Alias H., Wen D., Williams R.A., *Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)*, International Journal of Heat and Mass Transfer 2006, 49:240-250.
- [23] Liao L., Liu Z.H., *Forced convective flow drag and heat transfer characteristic of carbon nanotube suspensions in horizontal small tube*, Heat and Mass Transfer 2009, 45:1129-1136.
- [24] Park K.J., Jung D.S., *Enhancement of nucleate boiling heat transfer using carbon nanotubes*, International Journal of Heat and Mass Transfer 2007, 50:4499-4502.
- [25] Amrollahi A., Rashidi A.M., Lotfi R., Meibodi M.E., Kashefi K., *Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region*, International Communications in Heat and Mass Transfer 2010, 37:717-723.
- [26] Das S.K., Putra N., Roetzel W., *Pool boiling characteristics of nano-fluids*, International journal of Heat and Mass Transfer 2003, 46:851-862.
- [27] Pak B.C., Cho Y.I., *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles*, Experimental Heat transfer 1998, 11:151-170.

- [28] Trisaksri V., Wongwises S., *Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids*, International journal of Heat and Mass Transfer 2009, 52:1582-1588.
- [29] Park K.J., Jung D., Shim S.E., *Nucleate boiling heat transfer in aqueous solutions with carbon nanotubes up to critical heat fluxes*, International Journal of Multiphase Flow 2009, 35:525-532.
- [30] Bansal A., Pyrtle F., *Alumina nanofluid for spray cooling enhancement*, ASME JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference 2007, 797-803.
- [31] Chakraborty S., Chakraborty A., Das S., Mukherjee T., Bhattacharjee D., Ray R.K., *Application of Water Based TiO₂ Nano-fluid for Cooling of Hot Steel Plate*, ISIJ International 2010, 50:124-127.
- [32] Internetová encyklopedie [cit. 30.8.2010], dostupný www.wikipedia.org
- [33] Pohanka M., *Limitation of thermal inverse algorithm and boundary conditions reconstruction for very fast changes on boundary*, článek ve sborníku Engineering Mechanics, 2007, ISBN 978-80-87012-06-2, 229-230.
- [34] Golubovič M.N., Hetiarachi M., Worek W.M., Minkowycz W.J., *Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study*, Applied Thermal Engineering 2009, 29:1281-1288.
- [35] Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W., *Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids*, Applied Physics Letters 2006, 89:1-3.

ABSTRAKT

Řešením inverzní úlohy je okrajová podmínka v rovnici vedení tepla. Z její znalosti lze určit teplotní pole chlazeného tělesa. V práci jsou zkoumány způsoby, jak zvýšit přesnost výsledků získaných řešením inverzní úlohy založeném na Beckově sekvenčním algoritmu. Pozornost je zaměřena na děje, při kterých se okrajová podmínka mění velmi rychle, a je tak náročnější ji určit. Je ukázáno, že umístění a typ termočlátku hrají v přesnosti výpočtu zásadní úlohu, dále to je frekvence měření a rozlišitelnost přístroje pro záznam dat z termočlátku. Také nastavení parametrů inverzní úlohy je nutno pečlivě uvážit. Poznatky z teoretické části práce jsou využity v experimentální části, v níž je zkoumána chladicí intenzita při ostříku ocelového vzorku vodou s nanočásticemi Al_2O_3 , TiO_2 , Fe a uhlíkovými nanovláknými MWNT o třech různých koncentracích. Experimenty byly provedeny pro tři různé ostříkové vzdálenosti (40, 100, 160 mm), tři průtoky ($1, 1,5, 2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$) a dva typy trysek (kuželová a jednopaprsková). Z porovnání s vodou je intenzita chlazení nanokapalinami překvapivě nižší a to až o 30 % s výjimkou 1 hm. % uhlíkových nanovláken ve vodě dopadajících na horký povrch ze vzdálenosti 100 mm. V tomto případě bylo dosaženo zvýšení až o 174 %. Na závěr jsou vyloženy možné důvody pozorovaného chování nanokapalin.

ABSTRACT

The inverse heat conduction task is solved to determine boundary condition of the heat equation. This work deals with the ways how to increase the accuracy of the results obtained by solving inverse task based on the Beck sequential algorithm. The work is focused on the boundary condition changing very fast. This boundary condition is determinable with difficulty. It is shown that the placement and the type of the thermocouple play major role in accuracy of the calculation. The frequency of measuring and the discriminability of used devices also play a role as well as the setup of parameters in the inverse task. The election of mentioned parameters is described with regard to the speed of cooling. Knowledge from the theoretical part of the work is applied in the experimental part. The cooling intensity is investigated during spraying of the steel sample by water with nanoparticles Al_2O_3 , TiO_2 , Fe and MWNT at three different concentrations. The experiments were carried out for three spray heights (40, 100, 160 mm), three flow rates (1, 1.5, 2 kg/min) and two types of the nozzle (full cone and solid jet). Surprisingly, the cooling intensity by using nanofluids is lower about 30 % in comparison to the cooling intensity of pure water. But there was an exception. The cooling intensity of 1 wt. % of carbon nanotubes in water falling from the full cone nozzle placed in distance of 100 mm from the steel surface was higher about 174 %. Finally, the reasons of the behavior of nanofluids are discussed.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno Bellerová, Hana
Adresa Jírovцова 15
62300 Brno
Česká republika
Telefon +420 608 352 155
Email beller@seznam.cz

Zaměstnání

12/2010 – dosud Ekol s.r.o.
výpočtář

Vzdělání

2006 – dosud Studium PhD., Laboratoř přenosu tepla a proudění, FSI VUT v Brně
obor Inženýrská mechanika
doktorská práce Rozvoj inverzních úloh vedení tepla se zaměřením na velmi rychlé procesy v mikroskopických měřících

2001 – 2006 Ing., Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně,
obor Matematické inženýrství
diplomová práce Matematické modelování proudění v bezlopatkových turbínách

1994 – 2001 Gymnázium Vídeňská 47, Brno

Studijní pobyty

09/2007 Experimentální výzkum zaměřený na chlazení ocelových tyčí, výzkumný ústav Mefos, Lulea, Sweden

09/2009 Studijní pobyt Arizona State Univerzity, Phoenix, U.S.A.

Znalosti a dovednosti

PC znalosti Borland Delphi 7
základy SolidWorks, Inventor, AutoCAD
MS Office

Jazykové znalosti Anglický jazyk – pokročilý
 Německý jazyk – mírně pokročilý
 Francouzský jazyk – začátečník

Řidičský průkaz B, aktivní řidič

Zájmy a aktivity

Cestování

Příroda