

# 30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

*Jednotlivý příspěvek ze sborníku*



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Robotizované laboratorní zařízení pro testování chladicích účinků vodních a vodovzdušných trysek

René PYSZKO<sup>1</sup>, Jiří BURDA<sup>2</sup>, Pavel FOJTÍK<sup>3</sup>, Tomáš KUBÍN<sup>4</sup>, Marek VELIČKA<sup>5</sup>,

<sup>1</sup> Doc.Dr.Ing. René Pyszko, VŠB – TUO, 17. listopadu 15, Ostrava Poruba, rene.pyszko@vsb.cz

<sup>2</sup> Ing. Jiří Burda, VŠB – TUO, 17. listopadu 15, Ostrava Poruba, jiri.burda@vsb.cz

<sup>3</sup> Ing. Tomáš Kubín, VŠB – TUO, 17. listopadu 15, Ostrava Poruba, tomas.kubin@vsb.cz

<sup>4</sup> Ing. Pavel Fojtík, Ph.D., VŠB – TUO, 17. listopadu 15, Ostrava Poruba, pavel.fojtik@vsb.cz

<sup>5</sup> Ing. Marek Velička, VŠB – TUO, 17. listopadu 15, Ostrava Poruba, marek.velicka@vsb.cz

**Abstrakt:** *Na katedře tepelné techniky VŠB - TU Ostrava bylo vyvinuto a postaveno laboratorní zařízení pro testování chladicích trysek. Trysky jsou hodnoceny pomocí tří různých veličin, a to intenzity ostříku, silových účinků chladicí kapaliny, které jsou měřeny na studeném izotermickém povrchu, a součinitele přestupu tepla z horkého povrchu, měřeného pomocí žhavené sondy. Charakteristiky trysek jsou měřeny a vyhodnoceny ve formě plošné distribuce veličiny na chlazeném povrchu. Chlazený povrch může být rovinný, válcový, nebo obecný. Tryska se pohybuje relativně vůči měřicí sondě v rovině nebo po válcové či obecné ploše a ve stanovených pozicích je provedeno měření. Pohyb sondy je realizován průmyslovým robotem. Zařízení je plně automatizováno. Výsledky jsou využitelné jak pro testování přesnosti výroby, opotřebení nebo zanesení trysek, tak jako okrajové podmínky numerických modelů přenosu tepla.*

### 1. Úvod

Na katedře tepelné techniky VŠB – Technické univerzity Ostrava jsou dlouholeté zkušenosti v měření charakteristik chladicích trysek, a to jak na tzv. studených, tak teplých modelech ostříku. Za dobu několika desítek let byla vyvinuta řada měřicích metod. V poslední době, zejména v souvislosti s měřením vodních trysek s velkým průtokem vody pro tzv. tvrdé chlazení vysokouhlíkových ocelí při plynulém odlévání, bylo nutno vyvinout nové metody fyzikálního modelování ostříku a postavit moderní laboratorní testovací zařízení.

Na zařízení je možno měřit jak studené, tak teplé charakteristiky trysek. Studené charakteristiky trysek se využívají pro popis distribuce chladicího média na chlazené ploše, případně pro měření silových účinků média. Využívají se pro testování kvality výroby trysky, identifikaci opotřebení nebo zanesení trysky. Naproti tomu teplý model umožňuje měření rozložení součinitele přestupu tepla na ochlazované ploše v závislosti na teplotě chlazeného povrchu. Tato tzv. teplá

charakteristika je využívána pro návrh chladicích systémů a jako okrajová podmínka numerických modelů přenosu tepla [1], [2].

Podrobné proměření ostřikové charakteristiky trysky v závislosti na souřadnicích ostřikového obrazce je časově náročné a vyžaduje bezobslužný provoz. Z toho důvodu bylo vyvinuto a postaveno plně automatizované robotizované testovací zařízení.

### 2. Studený model ostříku

Ostřikové charakteristiky jsou obecně vyjádřeny rozložením intenzity ostříku  $I$  na ochlazovaném povrchu v systému kartézských souřadnic  $(x, y)$ , tj. jako funkce  $I = f(x, y)$ , případně u válcových ploch v systému cylindrických souřadnic  $(\varphi, y)$ , tj.  $I = f(\varphi, y)$ .

Intenzita ostříku je definována jako množství vody  $V$  dopadající na plochu  $S$  za čas  $\tau$

$$I = \frac{V}{S \cdot \tau} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1)$$

V případě testovacího zařízení chladicí médium dopadá do sběrné komůrky o definované ploše vstupního otvoru, ze které je voda odváděna do vyhodnocovacího zařízení. To je tvořeno elektronickou vahou, která měří hmotnost přitéklé vody za dobu ostříku. Měřicí nádobka je automaticky vyprazdňována miniaturním čerpadlem. Elektronická váha je kompenzována na kolísání okolní teploty.

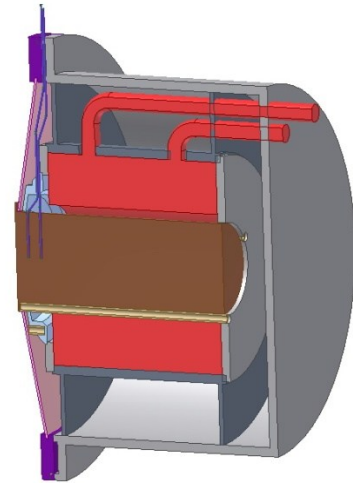
Pro měření silových účinků chladicí vody je využito tenzometrického snímače druhé elektronické váhy. Na snímač váhy působí síla dynamického účinku chladicího média, které dopadá na definovanou plošku.

### 3. Sonda teplého modelu ostříku

Proces odvodu tepla z horkých povrchů při ostříku chladicí vodou nebo heterogenní směsí vody a vzduchu je složitý děj, při kterém se uplatňuje nucená konvekce za současného varu a odpařování. Významnou roli zde hraje kinetická energie a velikost kapiček, jejich schopnost rozrušování souvislé parní nebo vodní vrstvy. Současně probíhá radiace, přičemž tepelné záření je selektivně pohlcováno párou, vodními kapkami nebo souvislou vrstvou vody na velmi krátkou vzdálenost. Tyto mechanismy odvodu tepla je obtížné od sebe oddělit, proto se povrchová podmínka stanovuje měřením celkového součinitele přestupu tepla na fyzikálním modelu.

Na katedře tepelné techniky jsou využívány dvě metody, reprezentované tzv. přímo žhavenou a nepřímo žhavenou sondou [3]. Přímou žhavenou sondu je založena na principu měření elektrického příkonu, potřebného pro udržení konstantní teploty měřicí sondy, zahřívané přímým průchodem elektrického proudu. Jde o stacionární metodu. Po odečtení tepelných ztrát do okolí ze sondy a z přívodních vodičů je z elektrického příkonu a měřené teploty sondy vypočítán součinitel přestupu tepla. Výhodou je přímý výpočet a

nezávislost metody na znalosti termofyzikálních parametrů materiálu sondy. Při testování trysek s velkými průtoky se přímo žhavená sonda neosvědčuje. V důsledku fyzikálních dějů na povrchu sondy dochází k prudkým změnám v intenzitě chlazení, což klade velké nároky na regulační algoritmus a vede k propalování sondy.



Obrázek 1: Nepřímo žhavená sonda

Pro testování trysek velkých chladicích výkonů byla proto vyvinuta nepřímo žhavená sonda, využívající nestacionární metodu měření. Nevýhodou je to, že do výpočtu vstupují termofyzikální parametry materiálu sondy (měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, hustota), závislé na teplotě, jejichž hodnoty jsou při vysokých teplotách obtížně měřitelné. Přesto se tento přístup jeví v současné době pro měření výkonných trysek jako vhodnější. Konstrukční řešení sondy je patrné z obrázku 1.

Sonda je tvořena jádrem z žáruvzdorné oceli o průměru 20 mm, umístěném v keramické píce, která je vybavena topným vinutím. Ve dvou různých vzdálenostech těsně pod pracovním povrchem (čelem jádra) jsou termočlánky pro měření teplot. Snahou konstrukce sondy je zajistit pokud možno jednosměrný tepelný tok v jádře.

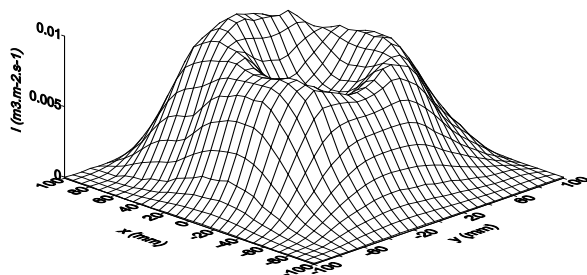
Po zahřátí sondy na požadovanou teplotu a po dosažení přibližně ustáleného teplotního pole

je čelo jádra na několik sekund vystaveno účinku chladicího média. S využitím naměřených teplotních průběhů je řešením inverzní úlohy vedení tepla vypočtena hodnota součinitele přestupu tepla v závislosti na teplotě povrchu.

#### 4. Měřicí a pohybový systém

Chladicí tryska je umístěna naproti sondě. Měření probíhá skenovací metodou. Tryska se přesouvá do diskretních pozic, ve kterých probíhá měření. Postupně je tak skenován celý ostřikový obrazec. Pohyb trysky je inverzní vůči virtuální ochlazované ploše, jejíž část tvoří měřicí ploška sondy. V případě rovinné ochlazované plochy se tryska pohybuje v rovině, v případě válcové ochlazované plochy o poloměru  $R$  se tryska pohybuje po válcové ploše o poloměru  $R_1 = R + B$ , kde  $B$  je vzdálenost trysky od ochlazované plochy.

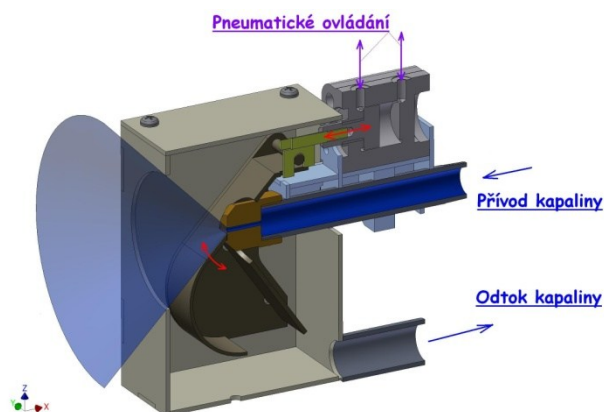
Naměřené veličiny v jednotlivých pozicích jsou ukládány v počítači ve formě matice a poté vyhodnoceny a archivovány. Příklad grafického výstupu rozložení intenzity ostřiku na rovinné ploše uvádí obrázek 2.



Obrázek 2: Rozložení intenzity ostřiku

Řízení jednotlivých uzlů zařízení, měření, vyhodnocení a ukládání dat je zajištěno řídicím počítačem. Tlak nebo volitelně průtok chladicího média je regulován PID regulátorem, který je součástí frekvenčního měniče motoru čerpadla. Průtok chladicí vody je měřen indukčním průtokoměrem, tlak je snímán piezoelektrickým snímačem.

Mezi jednotlivými měřeními musí být přerušen ostřík. Pro zamezení vzniku tlakových rázů v přívodních hadicích je místo ventilů použit speciální přerušovač ostřiku, viz obrázek 3. Mechanismus je tvořen pohyblivou clonou, umístěnou v těsné blízkosti před výstupním otvorem chladicí trysky. Clona je přesunována pneumatickým pístem, který je ovládán čtyřcestným elektromagnetickým ventilem. Počítač nastavuje přesnou dobu ostřiku pro jednotlivá měření. Přesnost spínání je v řádu milisekund.



Obrázek 3: Přerušovač ostřiku

Maximální délka intervalu ostřiku je dána měřicím rozsahem použité váhy. Je použito dvoustupňové měření. V prvním kroku se provede orientační měření zachyceného množství vody za krátký časový interval. Z naměřených hodnot se stanoví optimální doba ostřiku, zajišťující pro danou trysku co nejpřesnější měření. Po výpočtu se provede ostré měření a pokračuje se na další pozici ostřikového obrazce.

V případě teplého modelu je použita nepřímě žhavená sonda. Měření na teplém modelu trvá řádově delší dobu ve srovnání se studeným modelem z důvodu nutnosti dosažení kvaziustáleného stavu teplotního pole sondy před ostříkem v každé měřicí pozici.

Pohyb trysky je řešen prostřednictvím průmyslového robota KUKA VKR 150 L120/2, viz obrázek 4. Dosud byly vytvořeny dva uživatelské programy pro řídicí počítač robota



v KRL jazyce, a to pro měření rovinných ploch a válcových ploch. Pro případ obecné ochlazované plochy je možné zařízení modifikovat pouhou úpravou řídicího SW robota.



Obrázek 4: Pohled na testovací zařízení

Pokyny pro přesun ramene robota do jednotlivých pozic v průběhu měřicího cyklu uděluje nadřazený počítač přes vstupně-výstupní periférii. Jedná se o I/O kartu ICP DAS PCI-1202H. Za účelem jednoduchého fyzického připojení a předzpracování signálů jsou použity speciální I/O moduly. Termočlánky jsou připojeny přes modul DB-37. Galvanické oddělení digitálních vstupů je realizováno pomocí modulu DB-16P a modul DB-16R pro výstupní signály je osazen relé typu C.

Ze softwarového hlediska řídicí program využívá knihovnu funkcí, dodávanou společně s I/O kartou. Byl vyvinut algoritmus, zajišťující pod systémem Windows stabilní vzorkovací periodu pro digitalizaci analogových signálů s chybou periody menší než 0,01 s. Bylo nutné vytvořit přesný časovač pro nastavení doby ostříku chladicí vodou. Za tímto účelem byla vytvořena vícevláknová aplikace, využívající synchronizační objekty Event. Tyto objekty řídí vlákna s nejvyšší prioritou. Časování je pak odvozeno od básové frekvence systémového časovače.

Veškeré vstupní a výstupní signály z nadřazeného počítače jsou připojeny ke speciálnímu modulu distribuovaných vstupů a výstupů, který komunikuje přes optickou linku s řídicím systémem robota pomocí průmyslové sběrnice INTERBUS-S. Vstupy/výstupy jsou pak namapovány do určitého paměťového prostoru počítače robota, odkud mohou být jejich stavy vyčteny/zapsány uživatelským programem v KRL jazyce. Popsané hardwarové vybavení a vyvinuté řídicí aplikace umožňují dosáhnout požadované přesnosti naměřených výsledků a zajišťují vysokou opakovatelnost měření.

## 5. Závěr

Na katedře tepelné techniky VŠB-TUO bylo vybudováno originální plně automatizované robotizované pracoviště pro výzkum ochlazování horkých povrchů vodními a vodovzdušnými tryskami. Zařízení slouží k definování okrajových podmínek numerických úloh, řešících v laboratořích i v nejrůznějších průmyslových odvětvích chlazení tuhých těles prostřednictvím chladicích trysek. Zařízení může sloužit také pro testování stavu trysek jak nově vyrobených, tak používaných v provozu.

*Výzkum byl finančně podpořen granty GAČR 106/07/0938 a MPO ČR FT-TA4/048.*

## 6. Literatura

- [1] PŘÍHODA M., MOLÍNEK J., PYSZKO R., VELÍČKA M., VACULÍK M., BURDA J.: HEAT TRANSFER DURING COOLING OF HOT SURFACES BY WATER NOZZLES, ZAGREB, CMS, 2009
- [2] PŘÍHODA M., MOLÍNEK J., PYSZKO R.: POSOUZENÍ VLIVU OSTŘIKOVÉHO ÚHLU TRYSKY NA KINETIKU TEPLOTNÍHO POLE TUHNOUCÍHO PŘEDLITKU, BRATISLAVA, STU, 2006
- [3] PŘÍHODA M., MOLÍNEK J., PYSZKO R., JEDLIČKA Z., VÁCLAVÍK L.: STANOVENÍ SOUČinitele PŘESTUPU TEPLA V SEKUNDÁRNÍ OBLASTI CHLAZENÍ PŘI PLYNULÉM ODLÉVÁNÍ OCELI, OSTRAVA, OCELOT S.R.O., 1999