

COMPARISON OF HEAT TRANSFER IN A STRAIGHT AND HELICAL TUBE AND INFLUENCE OF PRESET SINGULARITIES ON HEAT TRANSFER IN A STRAIGHT TUBE AT THE FLOW OF SURFACTANT SOLUTIONS

V. Mík*, L. Mihálka**, J. Kořenář*, J. Myška*

Summary: *Experiments were made on a hydraulic facility with closed loop. The influence of a preset valve and circular bend 180° on the heat transfer along the 16 mm tube was investigated. Three different concentrations of cationic surfactant Arquad S 50 (oleyltrimethylammonium chloride) in mixture with NaSal (sodium salicylate) were experimented with. The range of Reynolds numbers was 8.000-100.000 and the heat flux through the tube wall was 22 and 40 kW/m².*

1. Úvod

Snižování tření při proudění kapalných teplotnosných medií je významným prostředkem pro řešení energetických úspor v různých oblastech nejen průmyslu, ale i při vytápění a klimatizaci obydlí. Z důvodů racionalizace spotřeby tepelné energie se stále častěji používá dálkového vytápění celých obytných okrsků. Vedle polymerů, které byly první použity ke snižování tlakových ztrát při proudění, jsou nejúčinnějším a nejperspektivnějším prostředkem pro utlumení turbulence s následným snížením třecích ztrát některé povrchově aktivní látky (PA), nazývané též micelární aditiva. Výzkum těchto látek je již delší dobu úspěšně prováděn v ÚH. Z fyzikální podstaty děje vyplývá, že redukce tlakových ztrát pomocí těchto PA látek je doprovázena i redukcí součinitele přestupu tepla. K posouzení vlivu PA látek na přestup tepla je potřebné získat dostatečné množství spolehlivých hodnot přestupu tepla při složitějším a definovaném proudění jak vody, tak vody s příměsí PA látek, které se vyskytuje např. při proudění za ventilem, nebo obloukem. V ÚH byl dříve prováděn výzkum přenosu tepla při laminárním proudění newtonských kapalin (Balejová a ost. 1976). Tehdy používané zařízení bylo po úpravách a modernizaci možné použít pro stanovení přestupu tepla i při turbulentním proudění vody a vodných roztoků PA. V práci Kawaguchi et al. (1996) byly experimentálně sledovány tokové charakteristiky roztoků surfaktantů s cílem ovlivnit snižování tření pomocí ohřevu stěny. Pro stanovení teplotního vlivu na vlastnosti kapaliny byla provedena reologická měření. V plochem kanále s ohřívanou stěnou byla pro *

* Ing. Václav Mík, CSc., Mgr. Josef Kořenář, CSc., Ing. Jiří Myška, CSc., Institute of Hydrodynamics AS CR, Pod Patankou 5, 166 12 Praha 6, CR, tel.: +420 233 109 087, e-mail: mik@ih.cas.cz

** Ing. Ludevit Mihálka, Institute for Process Engineering Faculty of Mechanical Engineering CTU Prague, Technická 4, 166 07 Praha 6, CR, tel.: +420 224 352 719

stanovení vlivu ohřevu provedena měření dvou flukтуаčních složek rychlosti pomocí LDA. Aguilar et al. (1994) provedli měření snižování tření a přestupu tepla ve vstupním úseku trubky. Snižování tření je doprovázeno snížením V práci (Aguilar et al. 2001) porovnali snižování tření a přestupu tepla přestupu tepla a tento úbytek je důležitý problém při navrhování soustav pro sdílení tepla.

2. Experimenty

Měření probíhalo na hydraulické cirkulační trase s objemovým čerpadlem s konstantními otáčkami poháněným axiálním pístovým hydromotorem napájeným tlakovým olejem z hydraulického agregátu. Tento pohon umožňuje regulaci otáček čerpadla v širokých mezích a tím i průtoku kapaliny trasou. Kapalina po průtoku experimentálním úsekem je shromažďována v zásobní nádrži, kde je buď chlazena, nebo ohřívána a přiváděna k čerpadlu. Tato nádrž umožňuje i měření průtoku objemovou metodou pomocí přesuvné odměrné nádrže. Z čerpadla odchází kapalina asi 5 m dlouhou trubkou $\varnothing$ 80 mm, kde se homogenizuje proudění a teplota kapaliny, pak prochází hadicí $\varnothing$ 50 mm, která umožňuje připojování různých předřazených prvků, do přechodného kusu, který se skládá ze 100 mm dlouhého konfuzoru redukcí $\varnothing$ 50 mm na $\varnothing$ 16 mm a 400 mm dlouhé přímé části o $\varnothing$ 16 mm. Tento přechodný kus je přišroubován buď na předřazený prvek a ten na trubku, nebo přímo na experimentální trubku 2,5 m dlouhou, která je z chromniklové oceli o vnitřním průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,5 mm. Předřazené elementy byly plně a z poloviny otevřené sedlové ventily Js 15 a oblouk 180° (DN 16, poloměr zakřivení $R=225$). Experimentální trubka byla ohřívána Jouleovým teplem, které vzniká průchodem střídavého proudu o vysoké intenzitě trubkou z nerezové oceli, která má velký odpor. Tento proud dodává rozmrazovací transformátor. Na konci experimentální trubky je výstupní komora, která slouží k měření střední směšovací teploty kapaliny na konci ohřívání úseku trubky. Z této komory odtéká kapalina do zásobní nádrže. V konfuzoru byly umístěny 2 termočlánky na měření střední směšovací teploty vstupující kapaliny. Posléze byl jeden termočlánek přidán na povrch přímé části přechodného kusu. Pro každý termočlánek na ohřívání trubce bylo jeho zvýšení teploty (teploty stěny trubky) ohřevem oproti střední teplotě vstupující kapaliny Δt vypočteno jako rozdíl (teploty čidla při ohřevu – teplota čidla bez ohřevu) a (teplota referenčního čidla při ohřevu – teplota referenčního čidla bez ohřevu). Tento postup sloužil k minimalizaci vlivu celkových teplotních změn zařízení, případně časových vlivů teploty kapaliny. Průtok kapaliny byl měřen indukčním průtokoměrem KROHNE, který byl kalibrován již zmíněnou objemovou metodou. Koncentrace přísad v kapalině byla určována vahou přísady. Viskozita byla měřena viskozimetrem v reologické laboratoři.

Teploty na povrchu trubky byly měřeny 18 termočlánky, které jsou umístěny ve vodorovné rovině souměrnosti trubky na její vnější straně podle zásad měření povrchové teploty pevného materiálu s poměrně nízkou tepelnou vodivostí. Střední směšovací teplota protékající kapaliny je stanovena kalorimetrickým výpočtem, protože popsáný elektrický odporový ohřev představuje přestup tepla s konstantním tepelným tokem stěnou trubky a umožňuje toto jednoduché a poměrně přesné stanovení této důležité veličiny. Vliv osového vedení tepla a vliv teplotní závislosti elektrického odporu trubky na stálost tepelného toku podél celé trubky byl ověřen výpočtem a u laminárního proudění, kde jsou poměrně vysoké teplotní rozdíly, nepřesáhla chyba několik procent. U tepelných měření je největší problém stanovit množství sdíleného tepla s odpovídající přesností. Tato nesnáz je vyřešena dobrou

tepelnou izolací trubky pěnovým polystyrénem a elektrickým ohřevem, při kterém lze dodanou energii přesně stanovit měřením elektrického proudu a napětí.

Termočláanky mají pro měření teploty výhodné vlastnosti – široký teplotní rozsah, rychlou odezvu a zaměnitelnost. Termočlánek využívá Seebeckova jevu: spojíme-li 2 vodiče z různých kovů A a B v uspořádání, že jeden spoj je umístěn v prostředí o teplotě t_1 , zatímco opačné konce mají srovnávací teplotu t_2 , měříme na nich ss napětí závislé na složení vodičů A, B a teplotním rozdílu $\Delta t = t_1 - t_2$. Převodní charakteristika termočláunku napětí/teplota je obecně nelineární. Z celé řady normalizovaných termočlánků byl pro naše měření z ekonomických důvodů zvolen termočlánek T(Cu-ko), který v horní oblasti předpokládaného rozsahu měřených teplot 10 – 100°C vykazuje již nezanedbatelnou nelinearitu (jeho citlivost roste s teplotou) a proto naměřené termonapětí bylo korigováno ve vyhodnocovacím programu. Z důvodu velkého počtu teplotních měření, která jsou pro stanovení přestupu tepla základní veličinou, není představitelná realizace měření jinak, než pomocí počítače.

Koncepce návrhu měřicího modulu byla vedena snahou o jeho univerzální využití nejen pro stávající úlohu. Pro řízení záznamu naměřených dat a jejich vyhodnocení je použit jakýkoliv běžný osobní počítač s paralelním portem, takže spojením počítače s měřicím modulem obstarává kabel k tiskárně. Základem vlastního měřicího modulu je 20-bitový dvoukanálový A/D převodník CS5504 (*Crystal Semiconductor Corporation*) se seriovým výstupem dat.

Měření sestává z jednotlivých cyklů, ve kterých byly změřeny teploty ve všech požadovaných snímačích (termočláncích) a případně je zkontrolován stav baterie. Po každém cyklu byly teploty společně s datem a časem měření uloženy buď do paměti nebo do souboru na disku (podle rozsáhlosti měření). Jednotlivé cykly se opakují v požadovaných časových intervalech a po požadovanou dobu nebo počet cyklů. Konvertor je schopen dodávat maximálně 200 vzorků za vteřinu, při použití běžného hodinového krystalu 32 768 Hz je četnost měření omezena na 20 za vteřinu. Tato rychlost snímání umožnila, aby každá naměřená hodnota teploty byla průměrem z mnoha desítek odečtů, jejichž počet bylo možné volit.

Po skončení měření byla data v každém případě uložena do souboru, který na svém počátku obsahuje hlavičku s údaji o uspořádání (konfiguraci) experimentu a datum a časy měření.

Během měření byly sledovány průběhy teplot (jejich klouzavé průměry) na monitoru počítače, což bylo důležité pro posouzení ustálení teplot při zapnutí, nebo změně topení. Průběhy všech teplot během měření slouží také k jeho kontrole. Po skončení měření byly pomocí různých programů získané soubory dále zpracovávány a vyhodnocovány většinou formou grafů – viz obrázek.

Veškerý software pro měření, zpracování dat a vyhodnocování výsledků byl vytvořen v ÚH. Další data, kterých je nesrovnatelně méně než teplot (tepelný tok, rychlost proudění apod.), potřebná pro výpočet přestupu tepla a dalších charakteristik byla pro kompletní zpracování výsledků zavedena z klávesnice. Podrobnosti o měřicích zařízeních a prostředcích pro sběr dat jsou v práci Mík a ost.(2001).

Vlastní měření bylo provedeno s vodou a 3 vodnými koncentracemi v [mM] kationaktivního surfaktantu s obchodním názvem Arquad 50 (oleyltrimethylammonium chlorid, molekulová hmotnost $M=344$ g/mol) s přísadou NaSal (salicylan sodný, molekulová

hmotnost $M=160$ g/mol) s odpovídajícími zdánlivými viskozitami [mPa s] měřenými při 20°C viskozimetrem se souosými válci:

4,55/11,38 (1,565/1,82 g/l) - 1,5

3,27/8,18 (1,125/1,3 g/l) - 1,45

2,5/6,25 (0,86/1 g/l) - 1,4.

Použitý surfaktant má v požívaných koncentracích velmi nízkou zdánlivou viskozitu v širokém rozsahu smykových rychlostí – na rozdíl od jiných, podobných surfaktantů.

Základní hodnotou získanou při měření byly kromě průtoku, výkonu topení a tlakových ztrát údaje termočlánků, které udávaly průběh teploty stěny a vstupující kapaliny Δt podél trubky.

Z výkonu elektrického topení byl za předpokladu zanedbatelných tepelných ztrát vypočítán tepelný tok q a spolu s údaji termočlánků bylo podle následujících rovnic vypočteno místní Nusseltovo číslo Nu

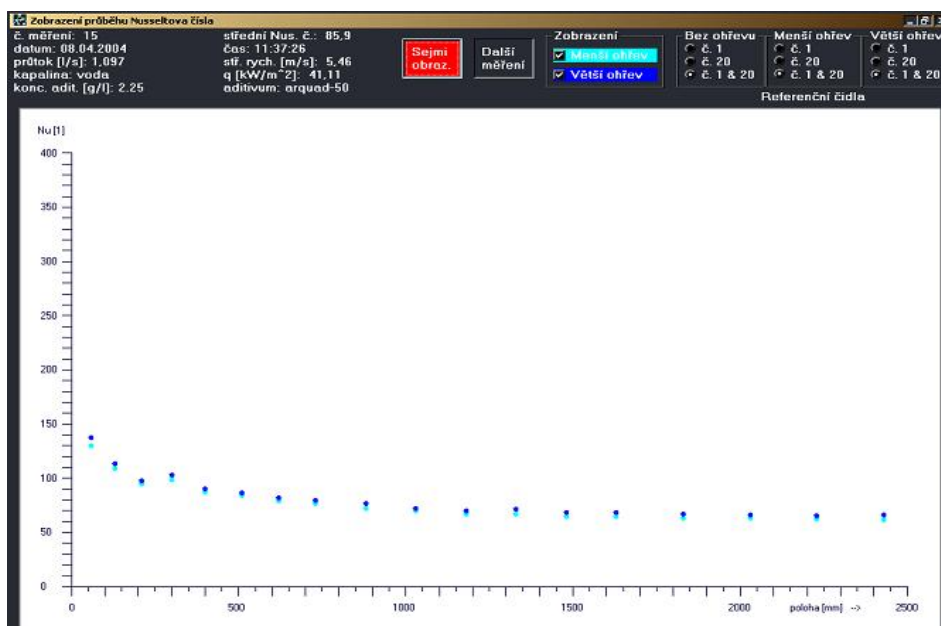
$$q = \frac{P}{S} \qquad q = \alpha(\Delta t - t_b)$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = \frac{d}{\lambda} \frac{q}{\Delta t - t_{bm}}$$

$$t_b = \frac{P}{c_p \rho Q}$$

$$t_{bm} = t_b \frac{l}{l_c}$$

příklady jehož průběhů jsou uvedeny na obrázku.



Obrázek 1. Průběh místního Nusseltova čísla podél trubky pro vysoký a nízký ohřev.

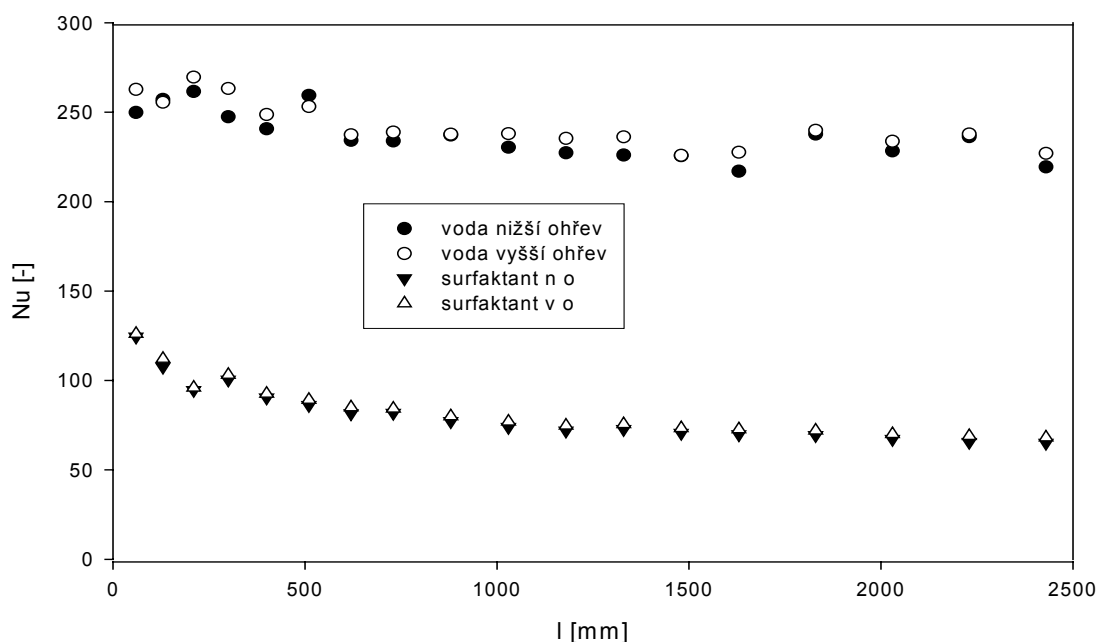
Tento obrázek představuje průběh místního Nusseltova čísla podél trubky před kterou je z poloviny otevřený sedlový ventil při proudění vody s přísadou 1,125 g/l aditiva s rychlostí 5,5 m/s. Takovéto obrázky jsou vlastně výstupem měřicího zařízení, neboť obsahují zpracované údaje ze všech naměřených hodnot. Z obrázku vyplývá i dobrá přesnost měření, protože hodnoty získané při značně rozdílných tepelných tocích se téměř neliší, což je správné, protože u kapalin s nízkou viskozitou se neprojevuje teplotní závislost viskozity, která by způsobovala různé hodnoty přestupu pro různé intenzity topení. Reprodukovatelnost měření byla zkontrolována měřením vody pouze v trubce na počátku a na konci měření kdy bylo dosaženo stejných hodnot průběhů místních Nu čísel. Pro porovnání míry snížení přestupu tepla surfaktanty bylo vypočteno střední Nusseltovo číslo přes celou trubku. Toto kritérium bylo stanoveno z místních Nusseltových čísel podle následujícího vzorce

$$\overline{Nu} = \frac{1}{l_c} \sum_{i=1}^{18} Nu_i \Delta l_i$$

Další bezrozměrná kritéria související s prouděním a přestupem tepla v trubce

$$Re = \frac{d \rho v}{\mu_{ef}} \quad Pr = \frac{c_p \mu_{ef}}{\lambda}$$

Příklad snížení přestupu tepla podél trubky vlivem aditiva za plně otevřeným sedlovým ventilem při průtoku $v = 5,5$ m/s ($Re = 88\,000$) je vyjádřeno průběhem místních Nusseltových čísel v následujícím obrázku.

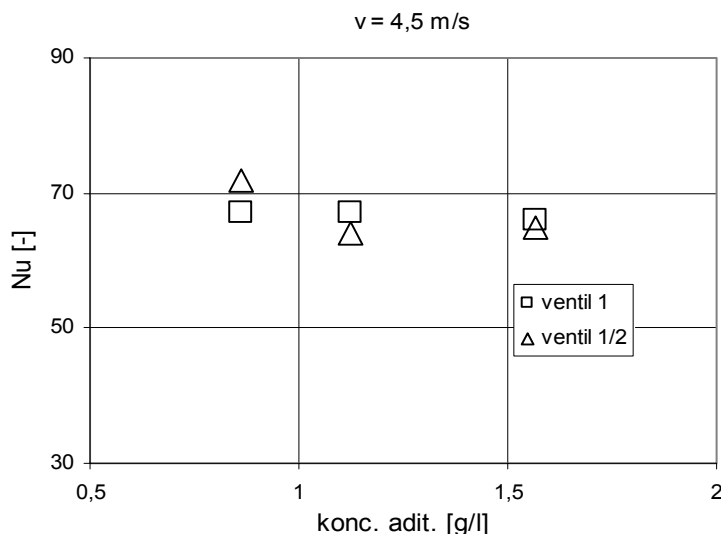


Obrázek 2. Srovnání průběhů místních Nusseltových čísel podél trubky za otevřeným ventilem pro vodu a vodu s přísadou aditiva.

Z průběhů místních Nu čísel vyplývá, že jejich zvýšení zasahuje jistou část trubky. Délka této části je přímo úměrná střední průtokové rychlosti. Konstantou je tedy čas, který by měl souviset s dobou regenerace micel.

Pro výše uvedený průtok bylo snížení přestupu tepla vyjádřeno pomocí středních Nu čísel přes celou trubku: oblouk 67%, plně otevřený ventil 67% a trubka 74%.

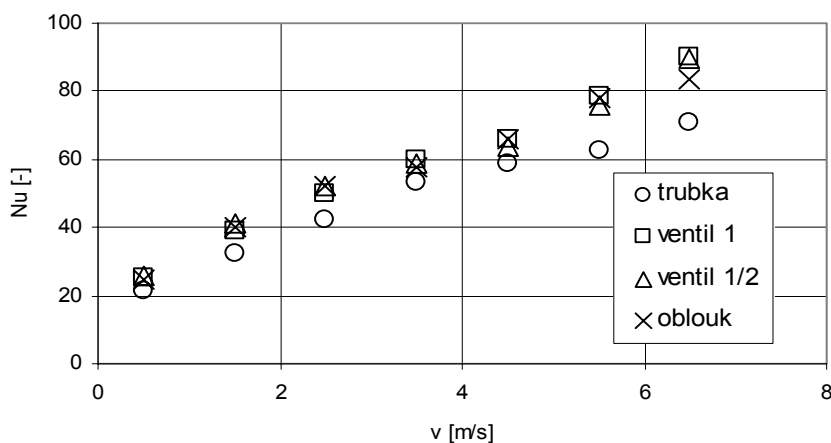
Vliv koncentrace aditiva vyplývá z dalšího obrázku kde je závislost středního Nusseltova čísla na koncentraci pro uvedenou průtokovou rychlost.



Obrázek 3. Závislost středního Nusseltova čísla na koncentraci aditiva.

Je vidět, že vliv koncentrace se téměř neprojevuje, pouze pro nejnižší koncentraci jsou hodnoty středních Nu čísel nepatrně vyšší, což by a mohlo souviset s nižší viskozitou tohoto roztoku.

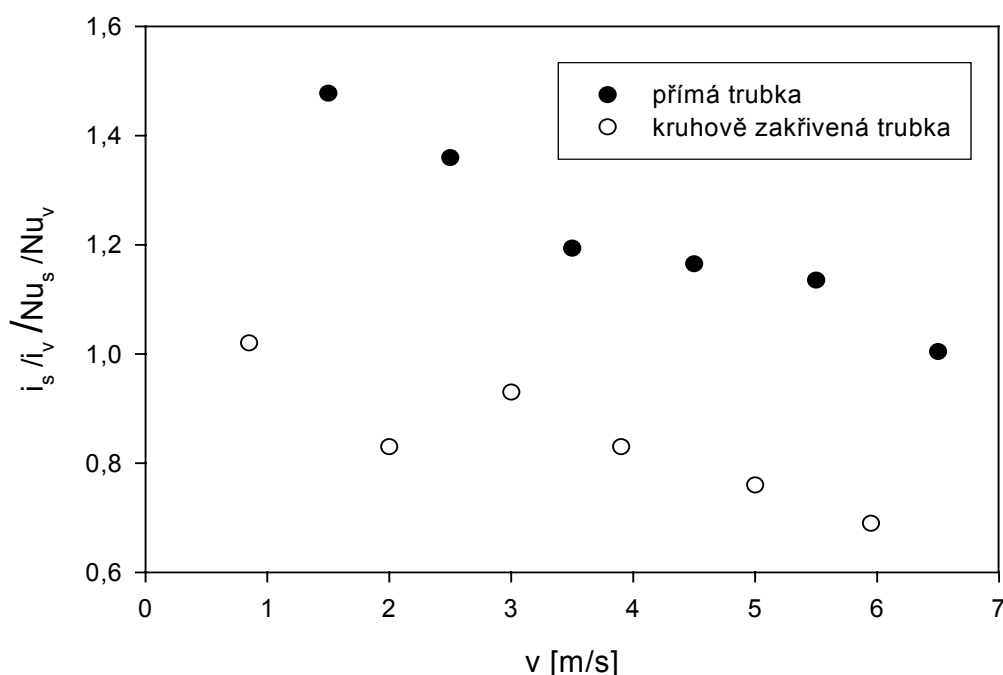
Vliv předřazených prvků vyplývá z dalšího obrázku, který představuje závislost středních Nu čísel přes celou trubku na střední průtokové rychlosti vody pro jednotlivé prvky (ventil 1 je plně otevřený ventil a ventil 1/2 je ventil otevřený z poloviny).



Obrázek 4. Příznivý vliv předřazených prvků na střední Nusseltovo číslo při proudění vody s aditivem

Příznivý účinek předřazených prvků se projeví především při vyšších průtocích. Při proudění samotné vody není vliv předřazených prvků na přestup tepla není žádný, hodnoty se pohybují v rozsahu $\pm 5\%$ hodnot pro samotnou trubku. Necitlivost na předřazené prvky při proudění vody a naopak jejich příznivý vliv při proudění vody s aditivem lze vysvětlit tím, že potlačená turbulence při proudění v trubce se předřazenými prvky přece jen zvýší.

Pro porovnání přestupu tepla v přímých a kruhově zakřivených trubkách (Mík a ost. 2002) byla využita efektivita přísad snižujících tření, tj. poměr snížení tření ku poměru snížení přestupu tepla. Pro snížení tření byl využit poměr tlakových spádů při proudění vody a vody s přísadou aditiva. Pro vyjádření změn přestupu tepla sloužily střední Nusseltova čísla přes celou trubku. Pokud je hodnota takto definované efektivity větší než jedna, je použití aditiv nevýhodné, protože snížení tření je nižší než snížení přestupu tepla. Z následujícího obrázku vyplývá, že vyhovující je kruhově zakřivená trubka, pro přímou trubku je potřebné hledat prostředky pro zvyšování přestupu tepla.



Obrázek 5. Porovnání efektivity přísady snižující tření pro přímou a kruhově zakřivenou trubku.

3. Výsledky

Experimentálně zjištěné průběhy místních Nusseltových čísel podél trubky při proudění vody a vody s přísadou aditiva dávají podrobnou informaci o přestupu tepla a jeho změnách při různých předřazených prvcích. K vyhodnocení míry snížení přestupu tepla způsobenou aditivem byla využita střední Nusseltova čísla přes celou ohřívanou trubku. Bylo vyčísleno snížení přestupu tepla vlivem aditiva.

Z porovnání průběhů místních Nusseltových čísel vyplývá:

- předřazené prvky u vody téměř nemají vliv na přestup tepla,
- velikost tepelného toku nemá na přestup tepla vliv,
- koncentrace aditiva nemá na přestup tepla téměř žádný vliv, to znamená, že koncentrace má vliv podobně jako u tlakových ztrát na jiné vlastnosti (trvanlivost, kritické smykové

napětí aj.). Pouze u nejvyšší koncentrace jsou náznaky, že na konci trubky dochází k mírnému snížení přestupu tepla, které by mohlo souviset s počátkem regenerace micel, - předřazené prvky mají příznivý vliv na zvýšení přestupu tepla především ve vstupní oblasti trubky při proudění vody s přísadami aditiva. Zvýšení je oproti vodě výrazné a jen pozvolna klesá, takže zasahuje významnou část trubky.

Příznivý vliv předřazených prvků na přestup tepla v celé trubce při proudění vody s aditivem vyplývá ze zvýšení středních Nusseltových čísel.

Pro porovnání přestupu tepla v přímých a kruhově zakřivených trubkách byla využita efektivita přísad snižujících tření, tj. poměr snížení tření ku poměru snížení přestupu tepla.

4. Poděkování

Práce vznikla za finanční podpory grantových projektů č.101/03/0585 a č.101/06/1478 GA ČR a Výzkumného záměru AVOZ20600510 AV ČR.

5. Seznam symbolů

c_p	J/kg K	měrná tepelná kapacita (měrné teplo)
d	m	vnitřní průměr trubky
i	kPa/m	tlakový spád
l	m	vzdálenost termočlánku od počátku ohřevu trubky
l_c	m	celková délka ohřívání trubky
Δl	m	část ohřívání trubky příslušející určitému termočlánku
P	W	výkon elektrického topení
Q	m ³ /s	objemový průtok kapaliny
q	W/m ²	hustota tepelného toku
R	m	poloměr zakřivení oblouku
S	m ²	povrch trubky
t	°C	teplota
Δt	°C	rozdíl teploty stěny a střední směšovací teploty vstupující do ohřívání části trubky
t_b	°C	rozdíl střední směšovací teploty na konci trubky a na vstupu do trubky
t_{bm}	°C	rozdíl střední směšovací teploty v místě termočlánku a na vstupu do trubky
v	m/s	střední rychlost kapaliny v průřezu
α	W/m ² K	součinitel přestupu tepla
λ	W/m K	součinitel tepelné vodivosti
μ_{ef}	Pa s	zdánlivá dynamická viskozita
ρ	kg/m ³	měrná hmotnost (hustota)

Indexy

s	surfaktant
v	voda

Bezrozměrná kritéria

$\overline{Nu}, Nu_{st}$	-	střední Nusseltovo číslo
--------------------------	---	--------------------------

Nu	-	místní Nusseltovo číslo
Pr	-	Prandtlovo číslo
Re	-	Reynoldsovo číslo

6. Literatura

- Aguilar G., Gasljevic K., Matthys E.F. (1994) Hydrodynamic and thermal field development in the pipe entry region for turbulent flow of drag-reducing surfactant solutions. *Developments in Non-Newtonian Flows*. FED-206/AMD-191, ASME, pp. 51-61.
- Aguilar, G., Gasljevic, K., Matthys, E.F. (2001) Asymptotes of maximum friction and heat transfer reductions for drag-reducing surfactant solutions. *Int.J. Heat Mass Transfer*, 44, pp. 2835-43.
- Balejová, M., Čákr, J., Mík, V. (1976) Non-isothermal laminar flow in curved pipes. *Applied Scientific Research*, 32, 6, pp.587-592.
- Kawaguchi, Y., Tawaraya, Y., Yabe, A., Hishida, K., Maeda, M. (1996) Active control of turbulent drag reduction in surfactant solutions by wall heating. FED-237, 1996 Fluid Engineering division Conference, Vol. 2, ASME, pp. 47-52.
- Mík, V., Myška, J., Kořenář, J. (2001) Změna přestupu tepla způsobená přidáním micelárního aditiva do vody pro snížení tlakových ztrát. 48. Konference CHISA 2001, 15.-18.10. 2001, Srní Šumava, plné texty na CD-ROM, ISBN: 80-86059-32-4.
- Mík, V., Kořenář, J., Myška, J. (2002) Decrease of heat transfer in the flow of drag reducing surfactant solution in a helical tube. 12th European Drag Reduction Meeting, April 18-20, 2002, Herning, DK.