



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**SNÍŽENÍ PŘESTUPU TEPLA A TLAKOVÝCH ZTRÁT PŘÍSADOU MICELÁRNÍHO
ADITIVA PŘI PROUDĚNÍ VODY V KRUHOVĚ ZAKŘÍVENÉ TRUBCE.**

V. Mík, J. Myška, J. Kořenář

Experimentálně byla sledována změna přestupu tepla při proudění vody a vody s různými koncentracemi micelárního aditiva v kruhově zakřivené trubce. Měření bylo provedeno při konstantním tepelném toku stěnou $q = 50$ a 75 kW/m^2 a v rozsazích $Re = 10\,600 - 71\,000$ a teplotách od 15°C do 55°C . Ze zjištěných průběhů přestupu tepla podél šroubovicově zakřivené trubky při proudění vody a vody s přísadou aditiva byla vyhodnocena míra snížení přestupu tepla způsobená aditivem. Současně byly měřeny změny tlakových ztrát, které byly porovnány se změnami přestupu tepla.

Klíčová slova: Přestup tepla, snižování tlakových ztrát, micelární aditiva.

Úvod

Snižování tření při proudění kapalných teplotonosných 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 nejučinnějším 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. ve spirálové trubce. V ÚH byl dříve prováděn výzkum přenosu tepla při laminárním proudění newtonských kapalin [1]. 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 [2] 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 plochém kanále s ohřívanou stěnou byla pro stanovení vlivu ohřevu provedena měření dvou

flukтуаčních složek rychlosti pomocí LDA. Autoři [3] provedli měření snižování tření a přestupu tepla ve vstupním úseku trubky. Snižování tření je doprovázeno snížením přestupu tepla a tento úbytek je důležitý problém při navrhování soustav pro sdílení tepla.

Experimenty

Měření probíhalo na hydraulické cirkulační trase s konstantním tlakovým spádem, jejíž schéma je na obr.1. Tlakový spád byl získaný buď rozdílem hladin přepadové nádrže 6 s hladinou 5 m nad podlahou laboratoře, nebo při vyřazení této nádrže konstantními otáčkami objemového čerpadla 3 poháněného 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 1, kde je buď chlazena, nebo ohřívána a přiváděna k čerpadlu. Tato nádrž umožňuje i měření průtoku objemovou metodou pomocí přesuvné odměrné nádrže 14. Z čerpadla nebo přepadové nádrže přichází kapalina do uklidňovací komory 9, jejíž velikost spolu s vestavbami homogenizuje proudění a teplotu kapaliny, slouží i k odvzdušnění kapaliny a k měření její vstupní teploty do experimentální trubky. K této komoře je připevněna experimentální trubka 10, která je výměnná. K dispozici jsou 2,5 m dlouhé přímé trubky různých průměrů, nebo v našem případě to byla trubka kruhově zakřivená. Experimentální trubka je z chromniklové oceli, vnitřní průměr je 12 mm, tloušťka stěny 1 mm. Po přímé části dlouhé 1,5 m je trubka stočena do jednoho závitů šroubovice o poloměru křivosti 245 mm a stoupání 60 mm, přičemž osa šroubovice je svislá. Ohřívána byla pouze šroubovice Jouleovým teplem, které vzniká průchodem střídavého proudu o vysoké intenzitě trubkou z nerezové oceli, která má velký odpor. Tento proud dodává rozmrazovací transformátor 13. Na přímé i kruhově zakřivené části trubky jsou umístěny odběry statického tlaku, které umožňují sledovat průběh statického tlaku podél trubky, nebo potřebné rozdíly tlaku. Měření bylo prováděno jak piezometrickými trubicemi na přímé části, tak indukčním tlakovým snímačem na zakřivené části trasy. Na konci experimentální trubky je výstupní komora 11, která slouží k měření střední směšovací teploty kapaliny na konci ohřívaného úseku trubky. Z této komory odtéká kapalina do zásobní nádrže. Průtok kapaliny byl měřen indukčním průtokoměrem *KROHNE* 12, který byl kalibrován již zmíněnou objemovou metodou. Jednotlivé části experimentálního zařízení jsou propojeny potrubím sacím 2, výtlačným 4, obtokovým 5, zpětným 7 a přívodním 8. Koncentrace přísad v kapalině byla určována vahou přísady. Viskozita byla měřena kapilárními viskozimetry v reologické laboratoři.

Teploty na povrchu trubky byly měřeny 17 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. Společný studený spoj termočlánků je umístěn v uklidňovací komoře, takže je měřen rozdíl teplot vstupní kapaliny a stěny trubky. Střední směšovací teplota protékající kapaliny je stanovena kalorimetrickým výpočtem, protože popsany 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 nesnáze je vyřešena dobrou tepelnou izolací trubky pěnovým polystyrénem a elektrickým

ohřevem, při kterém lze dodanou energii přesně stanovit měřením elektrického proudu a napětí.

Termočlánky mají pro měření teploty výhodné vlastnosti – široký teplotní rozsah, rychlou odezvu a zaměnitelnost. Převodní charakteristika termočlánku 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. Převod naměřených napětí termočlánků spolu s jejich přepínáním byl realizován měřicím modulem vlastní výroby, který umožňoval přesnost měření teploty zhruba 0,1°C a četnost měření 20 za vteřinu. Veškerý software k ovládání uvedeného měřicího modulu pro měření, zpracování dat a vyhodnocování výsledků byl vytvořen v ÚH.

Během měření byly sledovány průběhy teplot (jejich klouzavé průměry) na monitoru počítače, což bylo důležité pro posouzení ustálení teplot při zapnutí, nebo změně topení. Po skončení měření byly pomocí různých programů získané soubory dále zpracovávány a vyhodnocovány většinou formou grafů (např. obr. 3 a 4). 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 zaváděna z klávesnice.

Vlastní měření bylo provedeno s vodou a 3 koncentracemi [g/l] směsi cetyl trimetyl amonium chlorid (CTAC) a salicylan sodný (NaSal) s odpovídajícími zdánlivými viskozitami [mPa s] měřenými při 20°C kapilárním viskozimetrem:

0,3/0,375 - 1,17

0,44/0,55 - 1,71 až 1,17 po týdnu

1,14/1,43 - 3,42.

U uvedených roztoků byla nejprve ověřena jejich schopnost snižovat tlakové ztráty – příklad vyhodnocení pro jeden roztok je uveden na obr. 2. Nejnižší koncentrace se ukázala jako neúčinná a proto tepelná měření s tímto roztokem byla provedena jen orientačně při dvou teplotách a několika průtocích.

Základní hodnotou získanou při měření byly kromě průtoku, výkonu topení a tlakových ztrát údaje termočlánků, které udávaly průběh rozdílu teploty stěny a vstupující kapaliny Δt podél zakřivené trubky, jak je uvedeno na obr.3, kde jsou již porovnány průběhy teplot pro různé kapaliny při jinak stejných podmínkách. 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 příklady jehož průběhů jsou uvedeny na obr.4.

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

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

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

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

Z tohoto obrázku vyplývá i dobrá přesnost měření, protože u střední koncentrace aditiva bylo měření průběhů teplot podél trubky prováděno dvakrát ke zjištění reprodukovatelnosti měření. Na obr. 5 jsou vyneseny hodnoty středního Nusseltova čísla $\overline{Nu}$ v závislosti na průtoku. Toto kritérium bylo stanoveno z místních Nusseltových čísel podle následujícího vzorce

$$\overline{Nu} = \frac{1}{l_c} \sum_{i=1}^{17} Nu_i \Delta l_i$$

Další bezrozměrná kritéria související s prouděním a přestupem tepla v kruhově zakřivené trubce.

$$Re = \frac{d \rho v}{\mu_{ef}} \quad Pr = \frac{c_p \mu_{ef}}{\lambda} \quad De = Re \sqrt{\frac{d}{2R}}$$

Výsledky

K posouzení velikosti snížení přestupu tepla vlivem působení látky snižující tření názorně slouží závislosti středního Nusseltova čísla přes celou ohřívanou trubku na střední rychlosti průtoku pro vodu a různé koncentrace aditiva a různé teploty – příklad je uveden na obr. 5. Z průběhů vyplývá, že nejvyšší koncentrace aditiva vykazovala stabilní vlastnosti a s teplotou i průtokem se její vlastnosti téměř neměnily. Snížení přestupu tepla bylo pro všechny teploty stejné a měnilo se od 50% při rychlosti 1 m/s až po více než 200% při 7 m/s. S časem se její vlastnosti také neměnily až na náhlou ztrátu schopnosti snižovat tření při 15°C viz 2 body na obr. 5 a 6. U této koncentrace byla též sledována trvanlivost provedením několika měření po 3 měsících kdy se účinnost snížila o více než polovinu. Nejnižší použitá koncentrace aditiva nepůsobila snižování tření a proto se přestup tepla blížil hodnotám pro vodu. Nejsložitěji se chovala střední koncentrace aditiva. Pro nižší průtoky se její účinek blížil vlivu nejvyšší koncentrace, avšak v oblasti okolo 4 m/s se její účinek začal ztrácet a při vyšších průtocích se přestup blížil hodnotám pro vodu. Také u této koncentrace se projevil vliv stárnutí (snížení viskozity) a při posledním měření při 15°C je přestup podobný jako pro vodu – jak vyplývá z obr. 5.

Současně s přestupem tepla byly měřeny tlakové ztráty při ohřevech na polovině zakřivené trubky. Průběhy tlakových ztrát v závislosti na průtokové rychlosti pro danou teplotu kapaliny a ohřev byly pro různé koncentrace aditiva porovnány s vodou. Příklad je uveden na obr. 6. Z porovnání průběhů na obr. 5 a 6 vyplývá, že snížení tlakových ztrát odpovídá přesně snížení přestupu tepla. Tato skutečnost vyplývá z fyzikální podstaty tlakových ztrát a přestupu tepla. Zajímavé jsou kvantitativní změny obou veličin, které jsou vyjádřeny efektivností snižování třecích ztrát. Ta je dána poměrem snížení tlakových ztrát ke snížení přestupu tepla a je většinou nižší než jedna.

Poděkování

Autoři děkují GA ČR za finanční podporu projektu č.101/99/1431, při jehož řešení tato práce vznikla.

Seznam symbolů

c_p	J/kg K	měrná tepelná kapacita (měrné teplo)
d	m	vnitřní průměr trubky
i	Pa/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 trubky
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)

Bezrozměrná kritéria

De	-	Deanovo číslo
$\overline{Nu}$	-	střední Nusseltovo číslo
Nu	-	místní Nusseltovo číslo
Pr	-	Prandtlovo číslo
Re	-	Reynoldsovo číslo

Literatura

- [1] Balejová M., Čákr J., Mík V., Non-isothermal laminar flow in curved pipes, Applied Scientific Research, 32, 1976, 6, 587-592
- [2] Kawaguchi Y., Tawaraya Y., Yabe A., Hishida K., Maeda M., Active control of turbulent drag reduction in surfactant solutions by wall heating, FED-237, 1996 Fluid Engineering division Conference, Vol. 2, ASME 1996, pp. 47-52
- [3] Gasljevic K., Matthys E.F., 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 1994, pp. 51-61