



Teplotní pole na skrápěném trubkovém svazku

Petr KRACÍK^{1,}, Martin ZACHAR¹, Tomáš COPEK¹, Jiří POSPÍŠIL¹*

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor energetického inženýrství,
Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

* Email: kracik@fme.vutbr.cz

Na skrápěném trubkovém svazku může stékající kapalina vytvářet tři základní režimy. A to kapkový, sloupcový a listový. Vlivů na jednotlivé typy režimů a současně na přestup tepla je několik. Mimo velikosti průtoku skrápěcí kapaliny je to například průměr trubek, rozteč trubek trubkového svazku, či fyzikální stav skrápěcí kapaliny. V tomto článku jsou prezentovány změny teplotního pole na povrchu skrápěného trubkového svazku při změně průtoku skrápěcí kapaliny. Měření probíhala při atmosférickém tlaku na trubkovém svazku, který se skládá z deseti měděných trubek o průměru 12 milimetrů, s roztečí trubek 20 mm a zkoumané délce trubky jeden metr. Byl testován teplotní spád 15 / 40, kde 15°C měla skrápěcí kapalina na vstupu do distribuční trubky, která byla při stékání po výměníku ohřívána a 40°C měla skrápěná (topná) voda na vstupu do výměníku s konstantním průtokem cca 7.2 litrů za minutu. Testovaný průtok skrápěcí kapaliny se pohyboval v rozmezí cca 1,8 až 12,9 litrů za minutu. Po dílčích krocích průtoku byly pořízeny termovizní kamerou sekvence o 181 snímcích s frekvencí záznamu 30 Hz, které byly následně vyhodnoceny v programu Matlab.

Klíčová slova: teplotní pole, termovizní měření, skrápění, trubkový svazek

1 Úvod

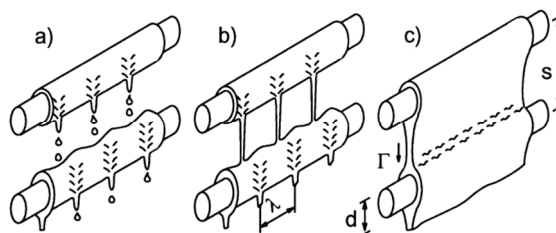
V důsledku klesající zásoby fosilních paliv a jejich vzrůstající ceně je kladen důraz primárně na minimalizaci spotřeby energií, sekundárně na úsporu primárního paliva, které vstupuje do energetických procesů, jež by měly mít co nejvyšší účinnost, a terciárně je využíváno tzv. obnovitelných zdrojů energie. V České republice je pro výrobu tepelné a elektrické energie nejčastěji využívána technologie spalující biomasu. I současný výzkum se snaží reflektovat tyto potřeby. Například je prováděn výzkum v oblasti optimalizace technologie pro přípravu dřevní masy [3, 4] před spalováním či dalším využitím pro výrobu pelet. Na Odboru energetického inženýrství je dlouhodobý výzkum zaměřen mimo jiné na využití odpadní tepelnou energii, která je mařena například ve velkých energetických celcích v kondenzátorech, na možnou výrobu chladu v absorpčních jednotkách.

Jednou ze základních součástí absorpčního oběhu je výparník, ve kterém je teplonosná látka rozstříkována na trubkovém svazku. Vzhledem k podtlaku v nádobě, ve které je svazek umístěn, dochází k varu skrápěcí kapaliny na trubkovém svazku. Teplo potřebné pro var je



odnímáno ochlazované látce, která proudí uvnitř trubkového svazku. A právě problematice skrápěných trubkových svazků je věnován tento příspěvek.

Kapalina tekoucí přes horizontální trubkový svazek vytváří tři základní režimy skrápění, které jsou patrné z obr. 1. Při malém průtoku kapalina kape z trubky na trubku tzv. kapkový režim (a). Při zvyšujícím se průtoku se kapky spojují a vytváří sloupce tj. sloupcový režim (b). Při dalším navyšování průtoku se sloupce spojují a vytváří nejprve listy, které se při dalším navýšení průtoku spojují mezi sebou, až vyplní celou mezeru mezi trubkami. Proto je tento režim nazýván listový, nebo také blánový (c)



Obr. 1 Režimy skrápění [1]

Výzkum v oblasti skrápěných výměníků lze rozdělit do dvou základních oblastí. První oblastí je zkoumání přestupu tepla a stanovení součinitele přestupu tepla na skrápěných trubkových svazcích pro různé kapaliny, ať již docházelo k varu či nikoliv. Pro vodu jako skrápěcí kapalinu to byli například [6, 7, 8, 9, 11]. Druhou oblastí je testování režimů skrápění pro různé průměry trubek, rozteče trubek i materiály trubek a určování rozhraní pro jednotlivé režimy. Touto oblastí se zabývali hlavně [2, 5, 10].

Všechny dodnes publikované výsledky pro vodu, jako skrápěcí kapalinu, jsou pro jednu až tři trubky, u kterých se za přísně laboratorních a předem striktně definovaných podmínek stanovují zmíněné zkoumané závislosti. Na skrápěné trubky nebylo pohlíženo z provozního hlediska, kde je více trubek a může docházet k různým režimům v různých částech a s různě vysokými přestupy tepla.

Tento příspěvek je věnován teplotním polím na skrápěném trubkovém svazku, který se skládá z deseti hladkých trubek, a jejich změnám v závislosti na změně průtoku skrápěcí kapaliny. Teplotu kapaliny lze stanovit různými způsoby, ať již kontaktně či bezkontaktně. V našem případě byla ke stanovení teploty na povrchu skrápěného trubkového svazku využita termovizní kamera.

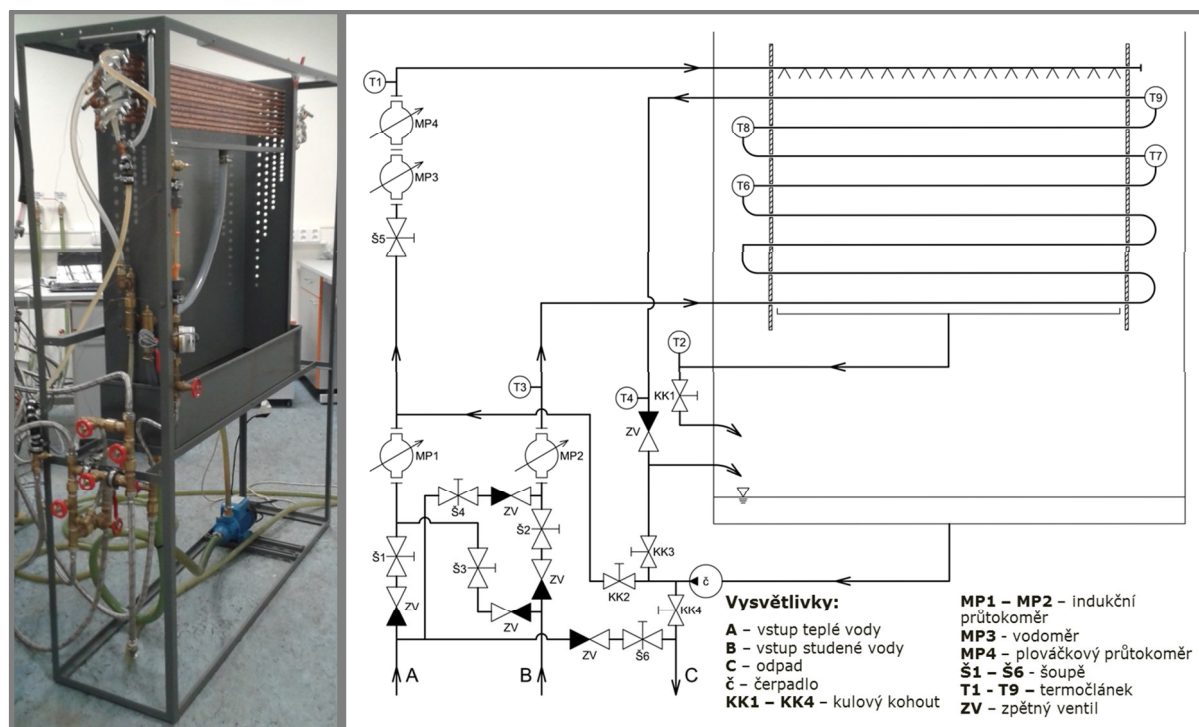
2 Měřicí zařízení

Pro zkoumání přestupu tepla a režimů skrápění na skrápěných trubkových svazcích bylo postaveno zkušební zařízení, jehož schéma je na obr. 2 vpravo a jeho fotka vlevo.

Skrápěcí kapalina o teplotě (T_1) a objemovém průtoku (V_1 – měřeno indukčním průtokoměrem FM1 - FLOMAG 3000) vytéká z distribuční trubky, která je umístěna nad svazkem, do kterého vtéká kapalina o teplotě (T_3) a o průtoku (V_2 – měřeno indukčním průtokoměrem FM2 - FLOMAG 3000) a vytéká o teplotě (T_4) do sběrného žlabu umístěného pod zkoumaným výměníkem. Zkoumaná zóna, resp. skrápěná zóna je široká jeden metr. Ve smyčce jsou navíc umístěny čtyři termočlánky (T_6 – T_9) pro určení průběhu změny teploty ve smyčce. Skrápěcí kapalina je pod výměníkem sbírána do žlábků, který je umístěný těsně za poslední trubkou a ze kterého je odváděna k termočlánku (T_4), který měří její teplotu a poté volně odtéká do sběrného žlabu, ze kterého kapalinu odčerpává čerpadlo do odpadu (C). V případě přebytku teplé vody je možné ji upouštět do odpadu skrze šoupě (GV6).



Skrápěcí smyčka je dále osazena vodoměrem a plováчковým průtokoměrem pro vizuální kontrolu. Všechny použité termočlánky jsou obalované a neuzemněné typu T.



Obr. 2 Fotka Atmosférického standu (vlevo) a schéma Atmosférického standu (vpravo)

Všechny zkoumané teploty kapaliny (T1 - T9), teplota okolí (nezapouzdřený termočlánek typu T) a průtoky V1 a V2 jsou kontinuálně zaznamenávány skrze převodníky DAQ 56 do počítače v prostředí LabView.

Před Atmosférický stand byla na stativu umístěna termovizní kamera FLIR SC 660 se základním objektivem, který má zorné pole 45° x 34° / 0.2 m. Termovizní kamera umožňuje snímání sekvencí s frekvencí 30 Hz po dobu 6 sekund s rozlišením obrazu 640 x 420 pixelů při ukládání záznamu do kamery a v případě ukládání do počítače s frekvencí až 60 Hz s neomezenou délkou záznamu.

3 Výsledky experimentů

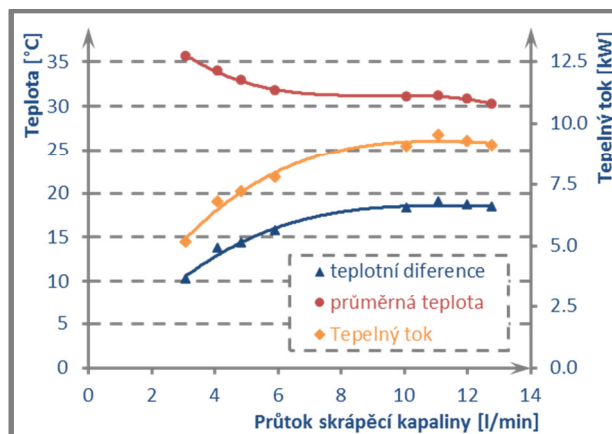
Při experimentech publikovaných v tomto článku byl sestaven trubkový svazek skládající se z deseti hladkých trubek horizontálně umístěných pod sebou s roztečí trubek 20 mm. Teplota vody proudící uvnitř trubek ze spodu nahoru byla nastavena na průměrnou hodnotu 14,8 °C ± 0,49 °C a průměrném průtoku 7,21 l/min ± 0,05 l/min. U skrápěcí kapaliny, tj. ta, která proudí vně trubkového svazku, byla nastavena průměrná teplota 14,8 °C ± 0,49 °C na výstupu z distribuční trubky a průtok byl monotónně snižován z 12,9 l/min až na 1,8 l/min. Celkový počet hodnot každé měřené veličiny, které byly zaznamenávány do měřícího počítače, byl 1 119.

Na obrázku 3 jsou vyneseny průměrné hodnoty v závislosti na průtoku skrápěcí kapaliny, při kterých byly pořizovány záznamy termovizní kamerou (viz níže). První závislostí je průměrná střední teplota odvozená z teploty na vstupu a výstupu skrápěné kapaliny proudící ve smyčce. Druhou závislostí je teplotní diference, která byla vypočítána z již zmíněných



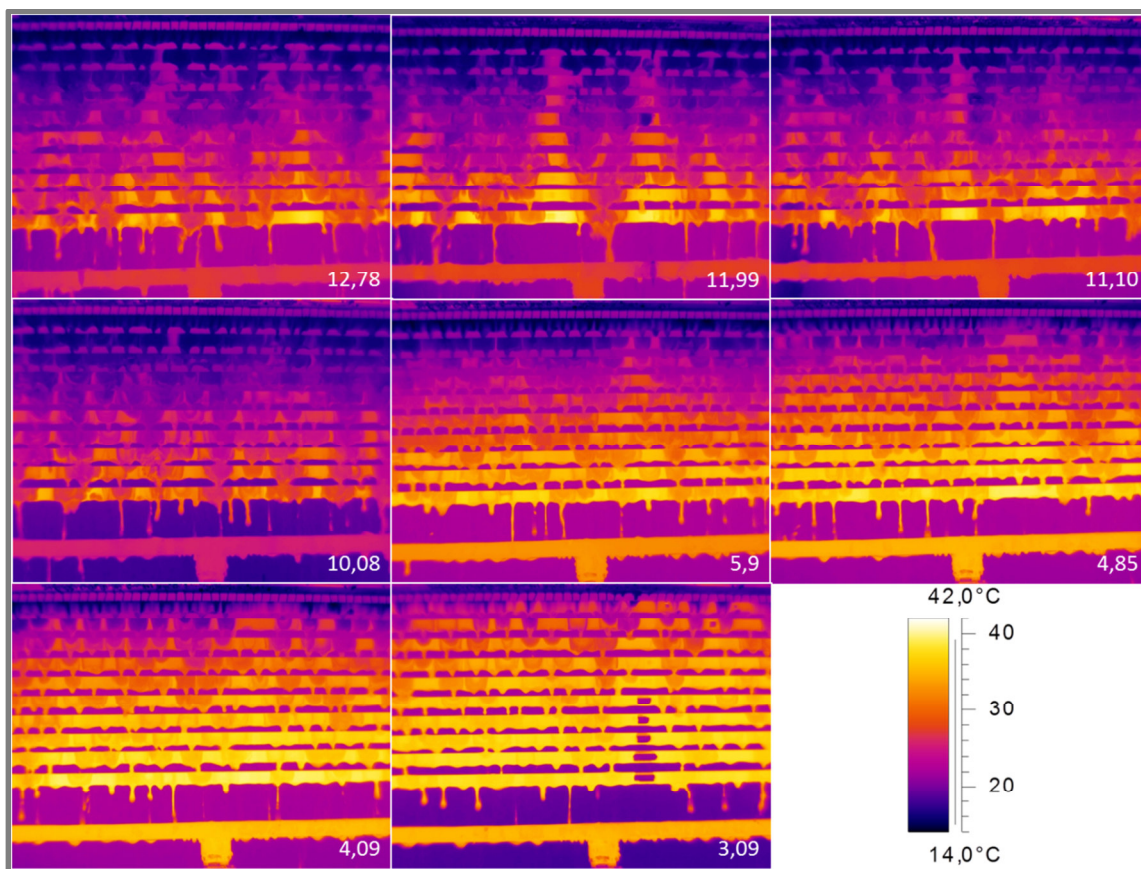
teplot. Poslední veličinou, která je v grafu vynesena, je celkový tepelný tok, který byl odebrán skrápěné kapalině a který je vypočítán podle rovnice 1.

$$\dot{Q} = \dot{V}_2 \cdot \rho \left(p; \frac{t_3 + t_4}{2} \right) \cdot c_p \left(p; \frac{t_3 + t_4}{2} \right) \cdot (t_3 - t_4) \quad [W] \quad (1)$$



Obr. 3 Závislost průměrné teploty, teplotního gradientu a celkového tepelného toku na průtoku skrápěcí kapaliny (vpravo)

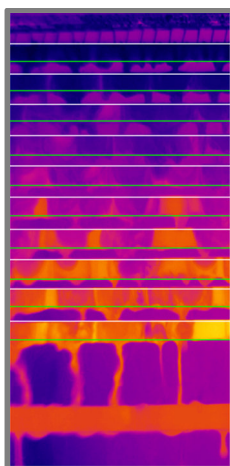
Z vynesených závislostí je patrný růst tepelného toku, resp. teplotní diference, resp. pokles průměrné teploty do průtoku skrápěcí kapaliny cca 8,0 litrů za minutu a při následujícím stoupaní průtoku skrápěcí kapaliny již nenarůstal tepelný tok a stabilizoval se na hodnotě cca 9,25 kW.



Obr. 4 Ukázky snímků vybraných ze sekvencí při jednotlivých snímaných průtocích

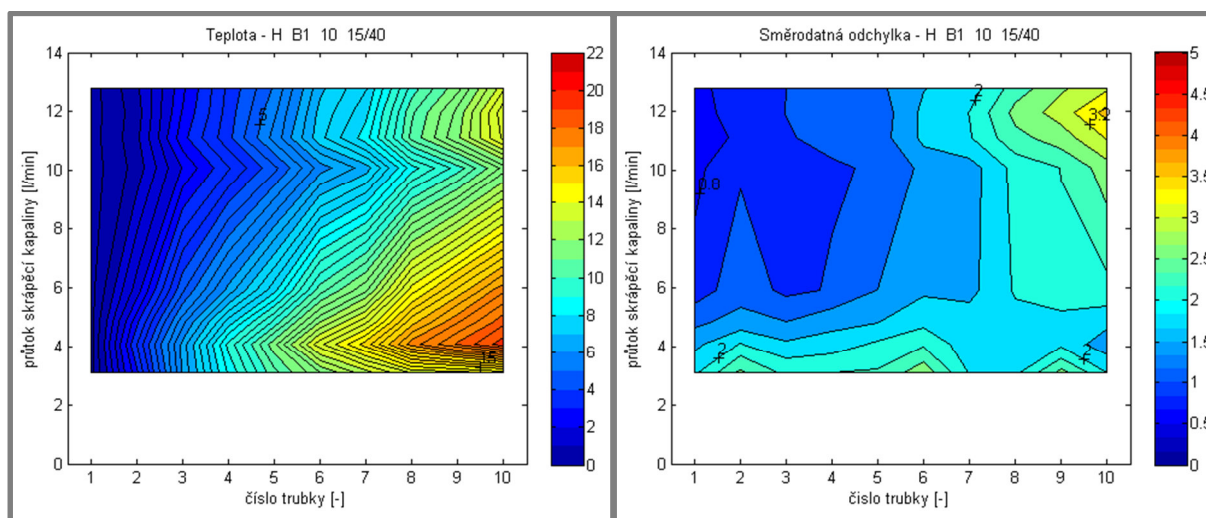


Při požadovaných ustálených vstupních stavech byly pořizovány termovizní kamerou sekvence, na kterých byly zaznamenávány dynamické změny teplotního pole povrchu skrápěného trubkového svazku. Celkem bylo zaznamenáno 8 sekvencí ve zkoumaném rozsahu. Na obrázku 4 jsou ukázky snímků vybraných z jednotlivých sekvencí při průtocích, které jsou uvedeny v dolním pravém rohu každého snímku a jsou v litrech za minutu. U horního okraje každého obrázku je patrná část distribuční trubky, ze které vytéká skrápěcí kapalina. V dolní části každého obrázku je vidět sběrný žlábek skrápěcí kapaliny, který ji odvádí k měřicímu termočládku. Všechny snímky mají shodnou barevnou škálu, uvedenou na obrázku a je v rozsahu 14,0 °C pro černou barvu až pro bílou barvu, která náleží 42 °C.



Obr. 5 Ukázka snímku s hranicemi zkoumaných ploch

Aby bylo možné jednotlivé sekvence porovnat a kvantifikovat změny teplotního pole, byl vytvořen algoritmus v softwaru Matlab R2010b. Nejprve byla na obrázku vybrána reprezentativní oblast, ve které byly vyznačeny plochy, které zaujímají jednotlivé trubky. Příklad takového snímku je na obrázku 5. Horní hranice trubky je vyznačena bílou čarou a dolní hranice trubky je vyznačena zelenou čarou. Mezi těmito hranicemi byly na každém snímku u jednotlivých trubek odečteny teploty. V každém řezu se jejich počet pohyboval kolem 39 tisíc, tj. v každé sekvenci bylo u každé trubky odečteno celkem cca 7 miliónů hodnot.



Obr. 6 Průběh teploty (vlevo) a směrodatné odchylky (vpravo)



Z těchto hodnot byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka, která značí rozptyl teplot, ve kterém se pohybuje průměrná hodnota a lze podle ní stanovit stabilitu teplotního pole na trubce. Takto vzniklo v obou případech na 80 hodnot. Pro přehlednost byly vypočtené hodnoty vyneseny do vrstevnicových grafů, které jsou patrné na obrázku 6 vpravo pro směrodatné odchylky a vlevo pro teplotní difference, jelikož při dílčích zkoumaných průtocích nebyla teplota skrápěcí kapaliny stejná, byla hodnota teploty první trubky odečtena od teploty u zbývajících trubek. Na obou grafech je na ose „y“ vynesena průtok a na ose „x“ číslo trubky, kde číslo jedna odpovídá první trubce ve směru toku skrápěcí kapaliny, tedy té nahore a číslo 10 odpovídá poslední trubce.

4 Závěr

V tomto článku byly prezentovány dílčí výsledky výzkumu teplotních polí na skrápěném trubkovém svazku, které byly zaznamenávány termovizní kamerou. Trubkový svazek byl složen z deseti hladkých měděných trubek o průměru 12,0 mm, zkoumané délce trubky jeden metr a s roztečí trubek 20,0 mm. Z měřených závislostí teplotních diferencí, resp. tepelného toku předaného skrápěcí kapalině je patrný trend růstu až po cca 8 litrů za minutu. Poté se jednotlivé veličiny stabilizovali a hodnoty s rostoucím průtokem již nerostly.

Při pohledu na ukázky termovizních snímků z jednotlivých sekvencí je patrné rozložení kapaliny na trubkovém svazku. Při nejvyšším průtoku na prvních trubkách bylo rozložení vody rovnoměrné s ohledem na jeho distribuci s tím, že se na dalších trubkách reálná využitá plocha zmenšovala, přestože na trubkách kapalným film byl. Tj. tím, že se zužovala využitá část výměníku, narůstala tloušťka filmu a tím pádem docházelo i ke stabilizaci tepelného toku, který již dále nerostl. Tento jev lze dobře vidět i na vrstevnicových grafech, kde je na posledních trubkách velká směrodatná odchylka. Toto chování lze přisuzovat vlivům povrchového napětí kapaliny, která se snaží zaujmout co nejvýhodnější prostor s tím, aby snížila své povrchové napětí. Z těchto důvodů lze určit i optimální pásmo průtoku skrápěcí kapaliny pro daný výměník, které se pohybuje mezi cca 5,0 až 9,0 litrů za minutu.

Při dalším snižování průtoku střední teplota výměníku sice narůstá ale s ní i směrodatná odchylka. Tj. výměník jako takový není v dostatečné míře využit a jeho plocha je nadbytečná. Při nejnižším průtoku dokonce zaniká na pěti posledních trubkách kapalným film, což jsou místa s tmavou barvou.

V následujícím zkoumání teplotních polí je naším cílem testovat různé parametry výměníků, které je mohou ovlivňovat. Jako například různé rozteče trubkového svazku, jeho délku, resp. počet trubek či jejich povrch.

Poděkování

Výsledky, které zde byly publikovány jsou výstupem spolupráce projektu specifického výzkumu FSI-S-14-2403 a NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I.”



Použitá literatura

- [1] ARMBRUSTER, R. a J. MITROVIC. Evaporative cooling of a falling water film on horizontal tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1998, roč. 18, č. 3, s. 183-194. ISSN 08941777.
- [2] ARMBRUSTER, R. a J. MITROVIC. Patterns of falling film flow over horizontal smooth tubes. *Proceedings of the 10th international heat transfer conference: Brighton, UK*. 1994, č. 3, s. 275-280.
- [3] BENIAK, Juraj, Juraj ONDRUŠKA a Viliam ČAČKO. Design Process of Energy Effective Shredding Machines for Biomass Treatment. *Acta Polytechnica*. ISSN 1210-2709. 2012, vol. 52, issue 5, s. 133-137.
- [4] BENIAK, Juraj, Peter KRIŽAN, Miloš MATÚŠ a Monika KOVÁČOVÁ. THE OPERATING LOAD OF A DISINTEGRATION MACHINE. *Acta Polytechnica*. ISSN 1210-2709. 2014, vol. 54, issue 1, s. 1-5.
- [5] HU, X. a A. M. JACOBI. The Intertube Falling Film: Part 1 - Flow Characteristics, Mode Transitions, and Hysteresis. *Journal of Heat Transfer*. 1996, roč. 118, č. 3, s. 616-624. ISSN 0022-1481.
- [6] CHIEN, Liang-Han a Chuan-Hung CHENG. A Predictive Model of Falling Film Evaporation with Bubble Nucleation on Horizontal Tubes. *HVAC*. 2006-1-1, vol. 12, issue 1, s. 69-87.
- [7] LORENZ, J. J. a D. YUNG. A Note on Combined Boiling and Evaporation of Liquid Films on Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1979, vol. 101, issue 1, s. 178-180. DOI: 10.1115/1.3450914.
- [8] OWENS, W. L. Correlation of thin film evaporation heat transfer coefficients for horizontal tubes. *Proceedings, Fifth Ocean Thermal Energy Conversion Conference, Miami Beach, Florida*. 1978, s. 71-89.
- [9] PARKEN, W. H., L. S. FLETCHER, V. SERNAS a J. C. HAN. Heat Transfer Through Falling Film Evaporation and Boiling on Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1990, vol. 112, issue 3, s. 744-750.
- [10] ROQUES, J. F., V. DUPONT a J. R. THOME. Falling Film Transitions on Plain and Enhanced Tubes. *Journal of Heat Transfer* [online]. 2002, vol. 124, issue 3, s. 491-499
- [11] SERNAS, V. Heat Transfer Correlation for Subcooled Water Films on Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1979, vol. 101, issue 1, s. 176-178.