

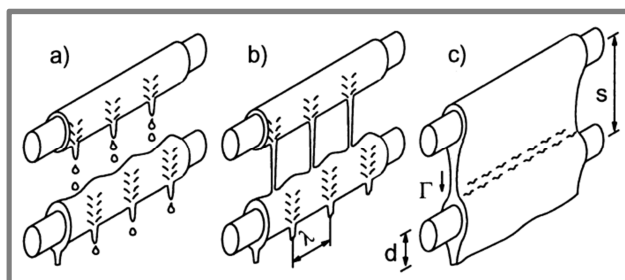
NÁZEV ZAŘÍZENÍ: EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO HODNOCENÍ SKRÁPĚNÝCH TRUBKOVÝCH SVAZKŮ (ATMOSFÉRICKÝ STAND)

ROK VZNIKU: 2013

UMÍSTĚNÍ: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, TECHNICKÁ 2896/2, 616 69 BRNO, C3/314 2.2

ÚVOD

Na horizontálním trubkovém svazku, který je skrápěn kapalinou o nízkém průtoku, je vytvořen tenký kapalný film, skrze který probíhá efektivní přenos tepla. Kapalina tekoucí přes svazek může vytvářet tři základní režimy skrápění, které jsou patrné z obrázku 1. Jedná se o kapkový režim (a), sloupcový režim (b) a blánový (listový) režim (c).



Obr. 1 Režimy skrápění¹

Přechod mezi režimem kapkovým a sloupcovým je definován tak, že mezi kapičkami je alespoň jeden stabilní sloupec kapaliny. Přechod mezi režimem sloupcovým a blánovým je definován tak, že se sloupce spojují a tvoří malé listy, které mají trojúhelníkový tvar. V tomto režimu mezi sebou koexistují sloupce i listy. Jaký typ režimu nastane, závisí především na rozteči trubek v horizontálním trubkovém svazku, velikosti průtoku a fyzikálních vlastnostech kapaliny.

Vyhodnocení naměřených dat vychází z tepelné bilance mezi skrápěnou a skrápěcí smyčkou podle Zákona zachování energie. Teplo přenášené ze skrápěcí do skrápěné kapaliny (a opačně) je složeno z konvekce, vedení a záření. Při nižších teplotách je teplo přenášené zářením zanedbatelné, proto není při dalším výpočtu uvažováno. Výpočet zkoumaného součinitele přestupu tepla vychází z Newtonova zákona přestupu tepla a Fourierova zákona vedení tepla a proto ho lze definovat pro přestup tepla ze skrápěné do skrápěcí kapaliny

$$\alpha_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \left[\frac{1}{k_s} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot r_i} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \right]} \quad (8)$$

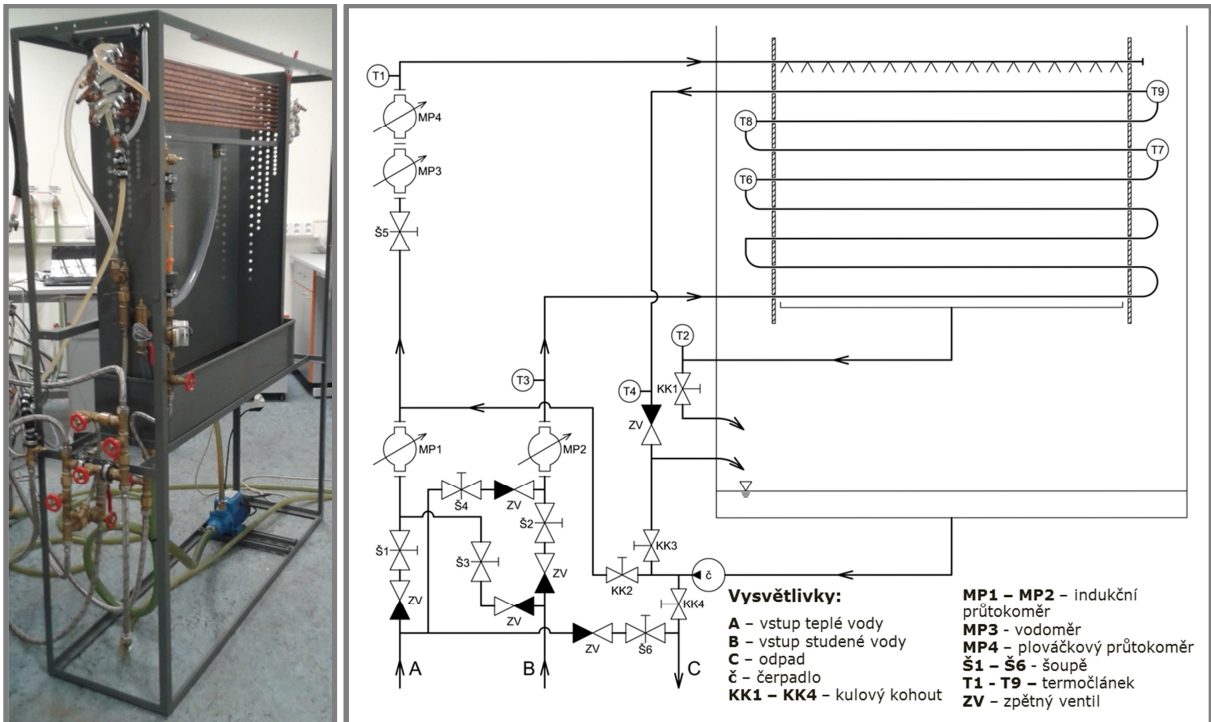
a opačně

$$\alpha_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \left[\frac{1}{k_s} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot r_i} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right) \right]} \quad (9)$$

1 MĚŘÍCÍ 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. Toto experimentální a výukové zařízení vzniklo rozšířením a úpravou zařízení s názvem „Zkušební zařízení pro hodnocení skrápěných trubkových svazků“ o topnou, chladicí, regulační a měřicí část. Skrápěný svazek se může skládat z jedné až 20 trubek o vnějším průměru 12 mm a zkoumané délce 1,0 m.

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.



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

Skrápěcí kapalina o teplotě (T1) a objemovém průtoku (V1 – měřeno indukčním průtokoměrem MP1 - FLOMAG 3000) vytéká z distribuční trubky, která je umístěna nad svazkem, do kterého vtéká kapalina o teplotě (T3) a o průtoku (V2 – měřeno indukčním průtokoměrem MP2 - FLOMAG 3000) a vytéká o teplotě (T4) do sběrného žlabu umístěného pod zkoumaným výměníkem. Ve smyčce jsou navíc umístěny čtyři termočlánky (T6 – T9) 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 termočlátku (T4), 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 (Š6). Skrápěcí smyčka je dále osazena vodoměrem a plovákovým průtokoměrem pro vizuální kontrolu. Všechny použité termočlánky jsou obalované a neuzemněné typu T.

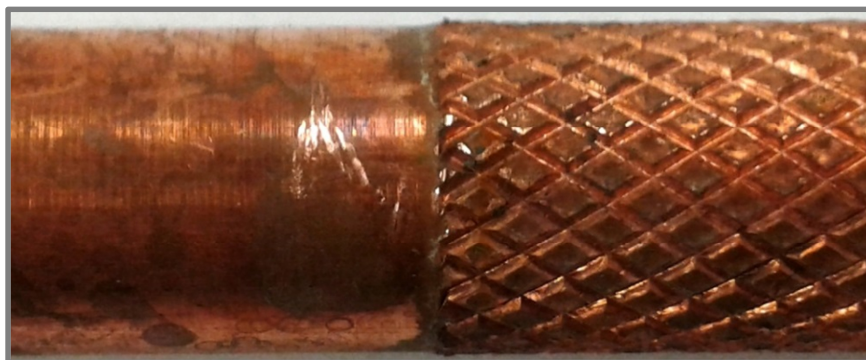
Teplotní regulační smyčka může pracovat ve třech režimech na bázi směšování teplé a studené vody, resp. i bez přísunu tepla:

- A) Předávání tepla skrápěné kapalině
 - 1) z přívodu (B) teče studená voda skrz šoupě (Š2), které může být přehřívána směšováním s horkou vodou (šoupě Š4)
 - 2) z přívodu (A) teče horká voda skrz šoupě (Š1), která může být ochlazována směšováním se studenou vodou (šoupě Š3)
- B) Předávání tepla skrápěcí kapalině
 - 1) z přívodu (A) teče horká voda skrz šoupě (Š4), která může být ochlazována směšováním se studenou vodou (šoupě Š2)
 - 2) z přívodu (B) teče studená voda skrz šoupě (Š3), které může být ohřívána směšováním s horkou vodou (šoupě Š1)
- C) Ostrovní provoz – nejčastěji pro měření režimů skrápění
 - 1) Šoupata (Š1 – Š4) a kulový kohout (KK4) jsou zavřené

- 2) Čerpadlem je dopravována kapalina skrze kulový kohout (KK2) a šoupě (Š5) do distribuční trubky. Při požadovaném malém průtoku skrápěcí kapaliny lze část průtoku za čerpadlem odklonit zpět do žlabu skrze kulový kohout (KK3)

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 programu LabView.

Mimo vlivů teplot skrápěného a skrápěcího média a průtoků médií na zkoumaném přestupu tepla může být také testován vliv povrchu trubek. Na Obr. 3 je patrný rozdíl mezi hladkým povrchem a povrchem s rýhami, které na povrchu vytváří plochu s kosočtverci. Tento povrch byl vytvořen objemovým tvářením za studena a to rádlováním (rýhování). Vnější průměr trubek je v rozmezí 12,3 – 12,4 mm. Ve výpočtech je uvažováno se středním průměrem trubek 12,0 mm.



Obr. 3 Hladký vs. rádlovaný povrch

Na experimentálním zařízení je možné měnit rozteč trubek a to ve čtyřech sloupcích (A – D). V tabulce 1 jsou možné rozteče při uvažování deseti trubek a vzniklá mezera mezi trubkami.

Tab. 1 Možné rozteče a vzniklé mezery mezi trubkami při deseti trubkách ve svazku

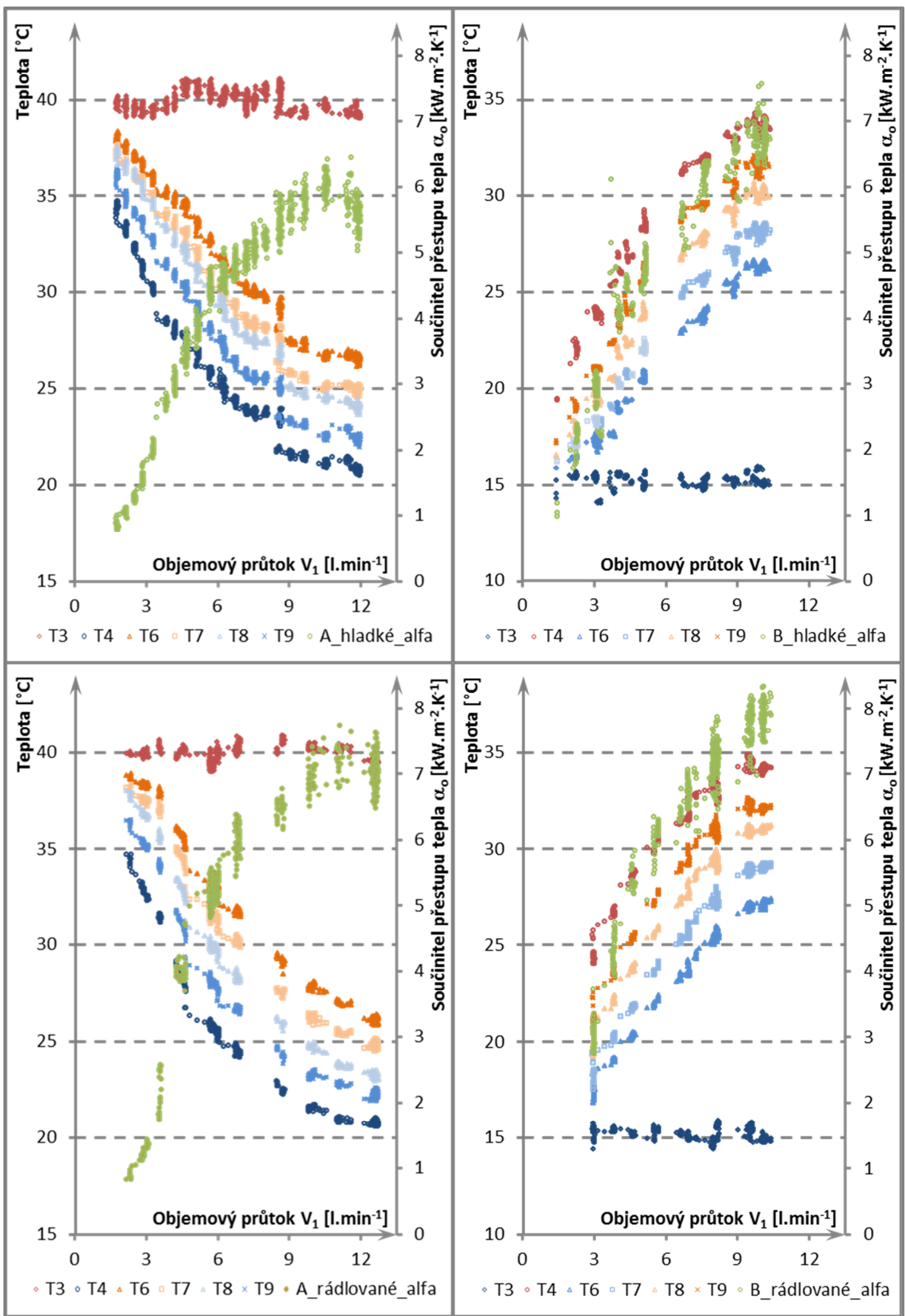
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Rozteč [mm]	15	30	20	40	25	50	35	70
Mezera mezi trubkami [mm]	3	18	8	28	13	38	23	58

2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Byly testovány dva geometricky identické trubkové svazky skládající se z deseti trubek o rozteči 15mm, tj. mezera mezi trubkami byla průměrně 3,0 mm a dvou tepelných režimech, kde při prvním byla skrápěcí kapalina ohřívána (A) a při druhém režimu ochlazována (B). První svazek byl složen z hladkých trubek a druhý svazek z rádlovaných. Průměrné hodnoty skrápěcí kapaliny na vstupu do distribuční trubky (T1), průměrné teploty skrápěné kapaliny na vstupu do svazku (T3) a její průměrný průtok (V2) a na závěr rozsah testovaných průtoků skrápěcí kapaliny jsou v tabulce 2.

Tab. 2 Průměrné základní naměřené parametry výměníků

Režim	Povrch	počet hodnot	T1	T3	V1	V2
A	Hladký	448	15,2±0,35	40,6±0,32	3,6-13,73	7,23±0,05
B	Hladký	533	40,1±0,50	15,2±0,27	1,5-10,37	7,21±0,05
A	Rádlovaný	647	15,1±0,37	39,8±0,46	2,2-12,75	7,24±0,04
B	Rádlovaný	546	40,4±0,49	15,1±0,34	2,9-10,10	7,21±0,05



Obr. 4 Výsledné závislosti součinitele přestupu tepla na povrchu trubek a rozložení teplot ve výměníku

Na obrázku 4 jsou mimo zkoumaných součinitelů přestupu tepla také vyneseny teploty na vstupu (T3) resp. výstupu (T4) z trubkového svazku a mezi nimi pak teploty změřené v různých částech svazku. Teplota T6 je změřena po šesti metrech od vstupní teploty (T3). Teplota T7 po sedmi metrech, teplota T8 po osmi metrech a teplota T9 po devíti metrech. Změřeny jsou tedy teplotní diference na prvních čtyřech skrápěných trubkách. Z těchto teplot lze usuzovat optimální délku skrápěného svazku. U všech typů režimů i povrchů vychází při nízkém objemovém průtoku skrápěcí kapaliny nadbytečně dlouhý výměník a naopak u velkých průtoků je patrná jistá stabilizace teploty na stejné úrovni, což je způsobeno vysokým kapalným filmem na trubkách (bylo dosahováno listového režimu), při kterém již nebyl efektivní přenos tepla. Při vysokých průtocích lze navýšit skrápěnou délku anebo zvýšit rozteč trubek.

V BRNĚ 10. 12. 2013