

ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO HODNOCENÍ SKRÁPĚNÝCH TRUBKOVÝCH SVAZKŮ

Rok vzniku: 2009

Umístěno na: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 616 69 Brno, Hala C3/Energetický ústav

1.1 Úvod do problému

Literatura zabývající se problematikou skrápěných trubkových výměníků definuje celkem tři typy režimů stékání neboli skrápění:

- kapkový
- sloupcový
- blánový

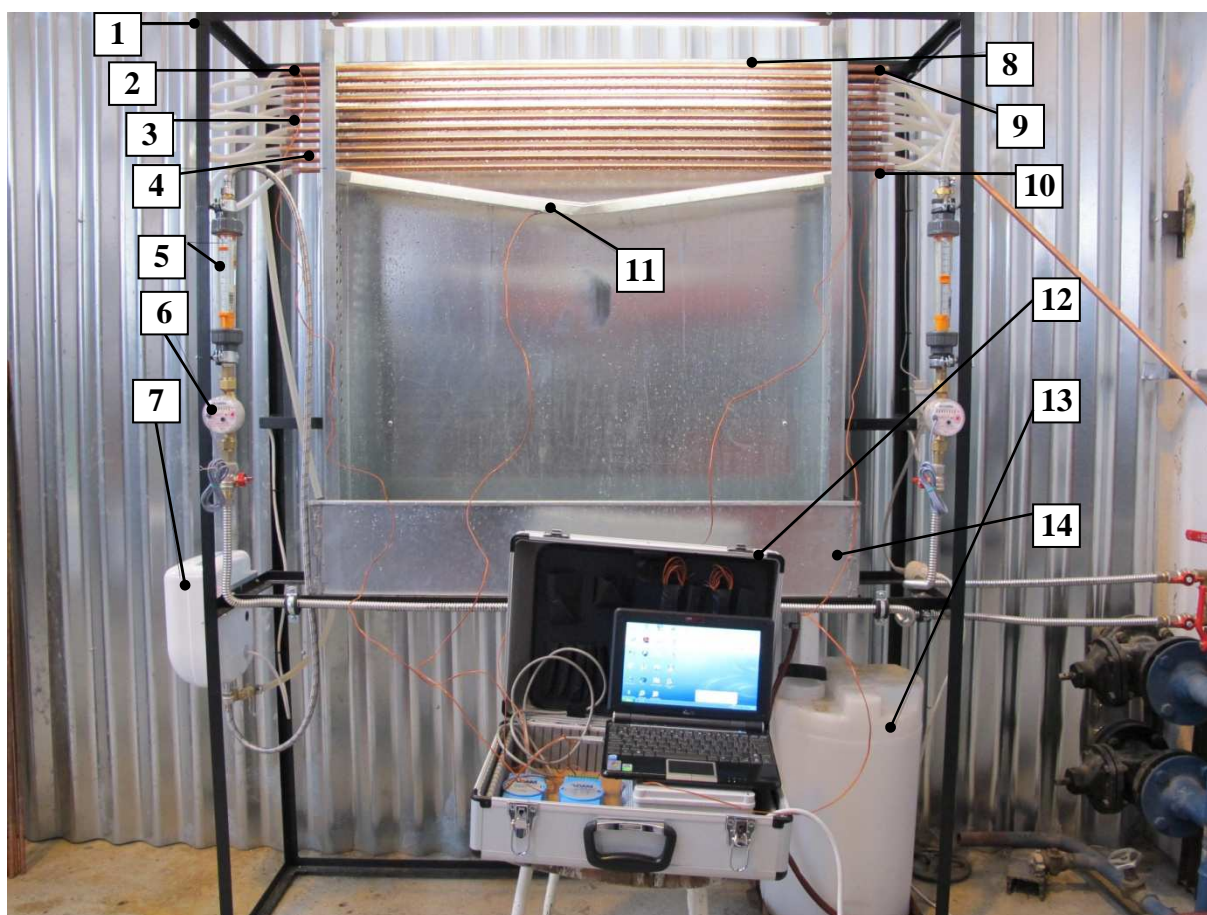
Na charakter skrápění mají hlavní vliv dvě fyzikální vlastnosti a to povrchové napětí a viskozita. Zde platí, čím menší viskozita, tím lépe kapalina smáčí povrch trubek. Snažíme se tak docílit i různými rozpuštěnými přísadami v pracovní látce (např. vyšší alkoholy-Hexanol). Fyzikální vlastnosti skrápěné kapaliny rovněž do značné míry ovlivňují součinitel přestupu tepla na vnější straně skrápěných trubek a zároveň mají velký vliv na přechodová Reynoldsova čísla mezi jednotlivými režimy skrápění.

1.2 Popis zařízení

Na základě požadavků kladených na experimentální skrápěný trubkový výměník byl nejprve vytvořen počítačový model ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO HODNOCENÍ SKRÁPĚNÝCH TRUBKOVÝCH SVAZKŮ. Následně byla realizována jeho výroba a kompletace měřicí aparatury.

1.2.1 Konstrukční popis odpovídající vyobrazení na obr. 1

- 1) Nosný rám.
- 2) Termočlánek 1 snímá vstupní teplotu skrápěné kapaliny.
- 3) Testované trubky.
- 4) Testovací sekce umožňuje testovat skrápění trubek o vnějším průměru 12 mm s rozdílnou povrchovou úpravou, různého materiálu. Trubkový svazek je možno uspořádat do vertikálního zákrytu s roztečemi 15, 20, 25 a 30 mm. Testovací sekce umožňuje testovat celkem 20 kusů trubek
- 5) Průtokoměr experimentální výměník je vybaven celkem dvěma průtokoměry pro sledování okamžitého průtoku v rozsahu 0-500 l/h. Jeden je umístěn na smyčce s chladicí kapalinou a druhý pak na smyčce se skrápěnou kapalinou.
- 6) Vodoměr stejně jako průtokoměry jsou i vodoměry pro sledování celkového průtoku umístěny jak na smyčce s chladicí tak na smyčce se skrápěnou kapalinou.
- 7) Průtokový ohřívač jeho cílem je ohřev skrápěné kapaliny. Skrápěná stejně jako chladicí kapalina je odebírána z vodovodu v laboratořích EÚ. Příkon ohřívače je 5kW.



Obrázek 1: ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO HODNOCENÍ SKRÁPĚNÝCH TRUBKOVÝCH SVAZKŮ

- 8) Distribuční trubka prostřednictvím této trubky je ohřátá kapalina distribuována na trubkový svazek. V ose trubky jsou vyvrtány díry o průměru 1,5 mm s roztečemi 10 mm po celé délce testovací sekce.
- 9) Termočlánek 2 snímá výstupní teplotu chladicí kapaliny.
- 10) Termočlánek 3 snímá vstupní teplotu chladicí kapaliny.
- 11) Termočlánek 4 snímá teplotu skrápěné kapaliny na výstupu z trubkového svazku.
- 12) Měřicí počítač slouží ke sledování a záznamu teplot z jednotlivých termočláneků.
- 13) Plastová nádrž v současné době není v experimentálním výměníku zapojena. Své uplatnění spolu s čerpadlem ovšem nalezne v případě testování jiné kapaliny než vody (roztok LiBr, který je jako pracovní látka v absorpčních obězích využíván).
- 14) Žlab pomocí žlabu je zachycena skrápěná kapalina, která je výtokovým otvorem z experimentálního výměníku odváděna.

1.3 Metodika měření

Testovány byly hladké, pískované a žebrované měděné trubky (viz. obr. 3, 4, 5) o svislých roztečích 15, 20, 25, 30 mm s nastaveným průtokem skrápěné kapaliny 100, 150, 200 a 300 l/h, při konstantně nastaveném průtoku chladicí kapaliny 150 l/h. Při jednotlivých kombinacích průtoků a roztečí byly ponechány 1 – 2 min intervaly na ustálení tepelného toku a poté v intervalu 5 sekund probíhal zápis hodnot teplot z termočláneků po dobu 5 minut. Po uplynutí se odečetl i stav vodoměrů.



Obrázek 3: Hladká trubka Obrázek 4: Pískovaná trubka Obrázek 5: Žebrovaná trubka

Ztráty, které vznikly ochlazením skrápěné kapaliny od okolního vzduchu, se určily z min. průtoku tedy 100 l/h, kdy jsou ztráty do okolí maximální. Odečet vstupních a výstupních teplot skrápěné kapaliny probíhal také 5 minut. Ochlazení skrápěné kapaliny vlivem okolního prostředí bylo stanoveno pro každou rozteč a povrch trubek.

Ztráty na straně chladicí kapaliny jsme měřili při zavřeném přívodu skrápěné kapaliny. Na rozdíl od skrápěné kapaliny, kde je nutno zjistit ochlazení vlivem okolního prostředí pro každou rozteč, stačí v případě chladicí smyčky stanovit ochlazení či ohřátí chladicí kapaliny pouze jednou při libovolné rozteči. Odečet vstupních a výstupních teplot chladicí kapaliny probíhal rovněž v intervalu 5 minut.

Na základě údajů odečtených na jednotlivých vodoměrech při začátku a na konci měření jsme stanovili hodnotu objemového průtoku při všech testovaných průtocích a roztečích. Ten byl následně převeden na hmotnostní průtok.

Při výpočtu tepelných ztrát na straně skrápěné kapaliny jsme vycházeli z teplotní difference zjištěné při minimálním průtoku u jednotlivých roztečí při vypnuté chladicí smyčce. Při maximálním průtoku 300 l/h je teplotní difference skrápěné kapaliny na vstupu a výstupu z trubkového svazku nulová (potvrzeno měřením). Teplotní difference u průtoků ležících uvnitř tohoto intervalu byla stanovena pomocí lineární interpolace. Tepelná ztráta pak byla dopočtena pomocí rovnice

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t \quad (1)$$

Tepelnou ztrátu na straně chladicí kapaliny jsme stanovili s využitím teplotní difference zjištěné při vypnuté skrápěné smyčce, která pak byla dopočtena rovněž pomocí výše zmíněné rovnice (1), stejně tak i celkové množství odevzdaného a přijatého tepla při různých průtocích.

Teplo skutečně vyměněné mezi skrápěnou a chladicí kapalinou jsme dostali po odečtení ztrát od celkového odevzdaného či přijatého tepla.

Součinitel prostupu tepla byl nakonec dopočten pomocí rovnice prostupu tepla

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta T_{in} \quad (2)$$

Při výpočtu součinitele prostupu tepla jsme počítali jednak s celkovou plochou a s průměrnou hodnotou skutečného tepla, které přijme chladicí kapalina a odevzdá skrápěná, tak i jednotlivými pokrytím skrápěné kapaliny na všech trubkách při všech roztečích. Všechny vypočítané a změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách a v grafech.

1.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

1.4.1 Stanovení vnějšího součinitele přestupu tepla

Stanovení tohoto součinitele probíhalo pomocí následujících rovnic

- Výpočet Reynoldsova čísla (fyzikální vlastnosti odečteny pro průměrnou teplotu v chladicí smyčce)

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (3)$$

- Výpočet Nusseltova čísla (Dittův – Boeltův vztah)

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (4)$$

- Výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně

$$\alpha_{in} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (5)$$

- Výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně

$$\alpha_{out} = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{r_{out}}{r_{in} \cdot \alpha_{in}} - \frac{r_{out}}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_{out}}{r_{in}}} \quad (6)$$

1.4.2 Stanovení vnějšího součinitele přestupu tepla podle Jakoby – Hu [2]

Pro určení tohoto součinitele byly stanoveny fyzikální vlastnosti pro vstupní teplotu skrápěné kapaliny

- Výpočet Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu} \quad (7)$$

- Výpočet přechodových Re

Počítá se z důvodu identifikace režimu skrápění pro konkrétní hmotnostní průtok
Blánový režim – sloupcový režim

$$Re = 1,431 \cdot Ga^{*0,234} \quad (8)$$

Sloupcový režim – kapkový režim

$$Re = 0,084 \cdot Ga^{*0,302} \quad (9)$$

Ga^* modifikované Galileovo číslo

$$Ga^* = \frac{\rho \cdot \sigma^3}{\mu^4 \cdot g} \quad (10)$$

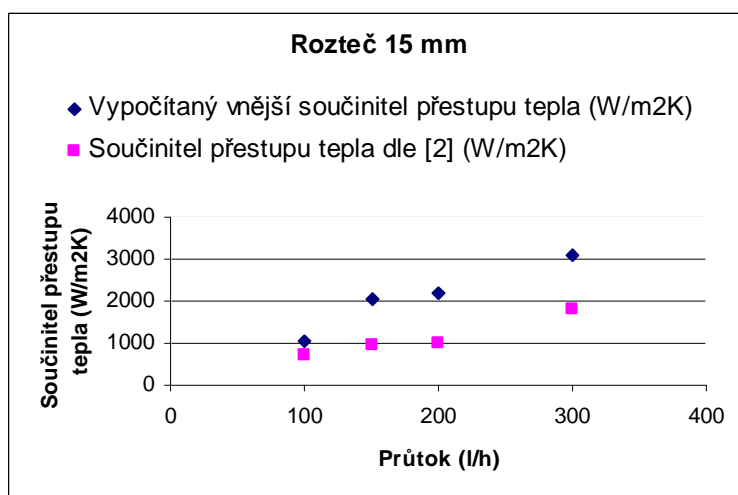
- Výpočet Nusseltova čísla. V celém rozsahu testovaných průtoků jsme se pohybovaly v kapkovém režimu skrápění. Pro každý režim skrápění platí jiná kritériální rovnice na výpočet Nu, dle lit. [2]. Rovnice (11) je platná pro kapkový režim skrápění. Uvedený vztah je podle autora se střední odchylkou 6,1 %.

$$Nu = 0,113 \cdot Re^{0,85} \cdot Pr^{0,85} \cdot \left(\frac{\rho^2 \cdot g \cdot d^3}{\mu^2} \right)^{-0,27} \cdot \left(\frac{s}{d} \right)^{0,04} \quad (11)$$

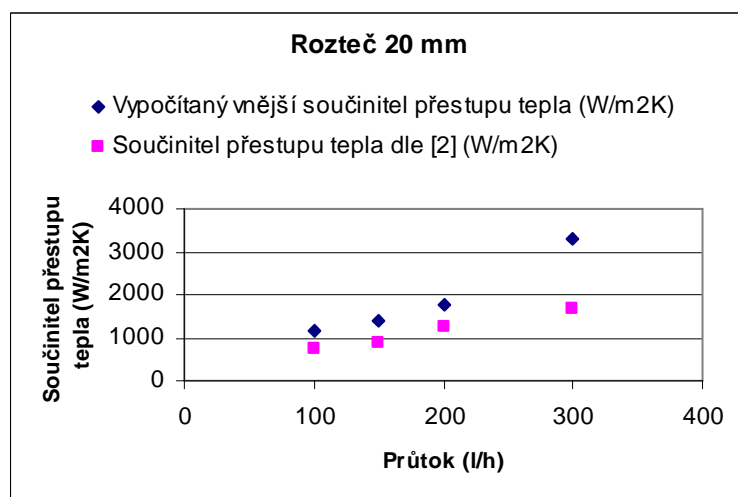
- Výpočet vnějšího součinitele přestupu tepla

$$\alpha_{out} = \frac{Nu}{\left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}}} \cdot \lambda \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (12)$$

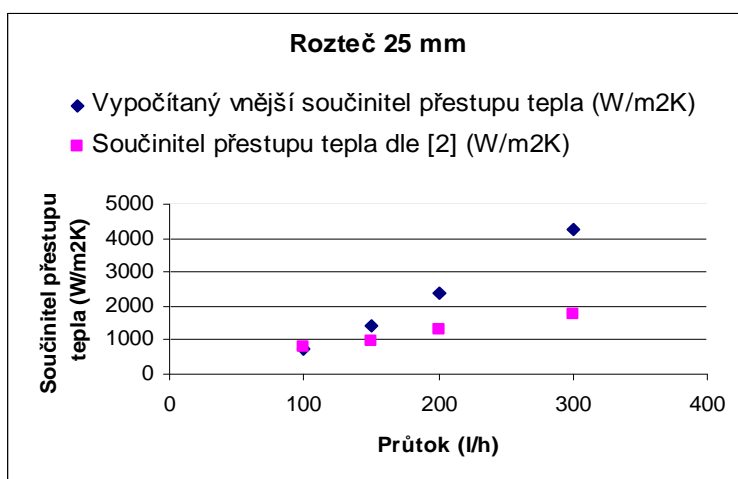
Srovnání obou variant výpočtu uvádí následující grafy pouze pro hladké trubky.



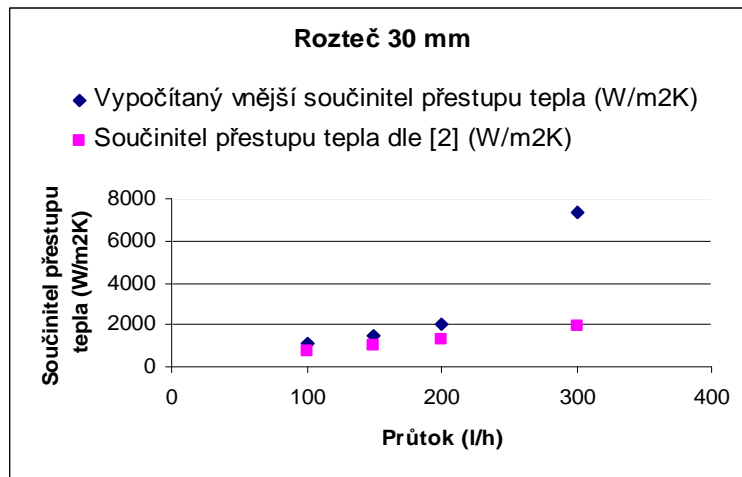
Obrázek 6: Porovnání součinitelů přestupu tepla pro rozteč 15 mm



Obrázek 7: Porovnání součinitelů přestupu tepla pro rozteč 20 mm



Obrázek 8: Porovnání součinitelů přestupu tepla pro rozteč 25 mm



Obrázek 9: Porovnání součinitelů přestupu tepla pro rozteč 30 mm

Použité veličiny

| | | |
|------------------|------------------------------------|---|
| μ | dynamická viskozita | $[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
| ρ | hustota | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ |
| ν | kinematická viskozita | $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$ |
| u | průměrná rychlost proudění | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ |
| Γ | hmotnostní tok na 1 m délky trubky | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$ |
| σ | povrchové napětí | $[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$ |
| r_{in} | vnitřní poloměr trubky | $[\text{m}]$ |
| λ | tepelná vodivost | $[\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$ |
| r_{out} | vnější poloměr trubky | $[\text{m}]$ |