



Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.
 ČVUT v Praze Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí,

Vliv návrhu trubkového registru absorbérů na účinnost solárního kolektoru

Influence of Absorber Piping Grid on Solar Collector Efficiency

Recenzent
 doc. Ing. Karel Brož, CSc.

Článek analyzuje vliv průměru trubek absorbérů na přestup tepla do teplotnosné látky. Rozbor je aplikován na ploché kolektory s měděnými absorbéry i trubkami, řazenými paralelně. Je použit zjednodušující předpoklad konstantní hustoty tepelného toku po délce trubky. Pro vodu s nemrznoucí směsí je dokázáno, že volba průměru trubky má jen malý vliv na změnu celkové účinnosti kolektoru.

Klíčová slova: solární kolektor, průtok, tepelné ztráty kolektoru, účinnost kolektoru, laminární a turbulentní proudění

The article contains an analysis of the absorber pipe diameter influencing the heat flow to heat transfer fluid. The analysis was carried out for flat solar collectors with copper absorbers and piping, arranged in parallel. A simplifying assumption of constant heat flow along the tube length was used. For water with anti-freezing mixtures the conclusion that the choice of the tube diameter has only a small influence on the change of solar collector overall efficiency was confirmed.

Key words: solar collector, heat transfer coefficient, efficiency coefficient, laminar and turbulent flows

ÚVOD

Pro celoroční využití sluneční energie se v klimatických podmínkách střední Evropy používají solární kolektory s kovovým absorbérům (měď, hliník) napájeným nebo navařeným na trubkovém registru, kterým se odvádí teplo do primárního okruhu solární soustavy. Při návrhu konstrukce trubkového registru absorbérů je otázkou, jak optimálně navrhnout dimenze trubek a zapojení trubkového registru při daném průtoku (high-flow, low-flow), aby byl zajištěn dostatečný přestup tepla z absorbérů do teplotnosné látky (z hlediska účinnosti kolektoru) a zároveň se nezvyšovaly tlakové ztráty kolektoru nad únosnou mez (z hlediska provozní spotřeby energie pro pohon oběhových čerpadel). V tomto článku se zabývám analýzou přenosu tepla a vlivem návrhu dimenzí trubek registru na celkovou účinnost solárního kolektoru. V dalším navazujícím článku se budu zabývat vlivem dimenze trubek a zapojení registru na tlakové ztráty kolektoru a s nimi spojenými nároky na provozní čerpací práci. Analýzy se týkají ma- plošných solárních kolektorů o běžném rozměru 1 x 2 m.

PŘESTUP TEPLA PŘI PROUDĚNÍ V TRUBKOVÉM REGISTRU

Přestup tepla z vnitřní stěny trubky do teplotnosné látky je v odborné literatuře [1, 2, 3] popsán především pro dva základní případy: a) trubku s konstantní teplotou po celé své délce; b) trubku s konstantní hustotou tepelného toku na povrchu trubky. Pro řešení přestupu tepla v trubkách registru odvádějících teplo z absorbérů je vhodnější případ **konstantní hustoty tepelného toku**, neboť teplota trubky se po délce mění, zatímco předaný tepelný tok (pohlčené sluneční záření) je po délce trubky přibližně konstantní (při malých rozdílech teplot mezi vstupem a výstupem kolektoru). Je nutné si však uvědomit, že ani tento model přesně nevystihuje případ skutečného kolektoru, neboť hustota tepelného toku není po obvodu ideálně rovnoměrná. Vysoká tepelná vodivost materiálu trubky (zpravidla měď) však umožňuje s dostatečnou přesností využít příslušných dále uváděných vztahů.

Dalším podstatným rozlišením dostupných modelů pro přenos tepla prouděním v trubce je typ proudění (laminární, turbulentní). U laminárního proudění navíc záleží na skutečnosti, zda se jedná o oblast plně vyvinuté-

ho proudění (vyvinutý rychlostní profil a teplotní profil, např. dlouhé trubky), nebo o vstupní oblast (při změně dimenze trubky, směru proudění, např. odbočky ze sběrné trubky) s vyvinutým rychlostním profilem a vyvíjejícím se teplotním profilem, případně s vyvíjejícím se rychlostním i teplotním profilem. U turbulentního proudění vzhledem k jeho charakteru nezáleží ani na vstupní oblasti, ani na skutečnosti, zda se jedná o případ konstantní teploty nebo toku.

Dostupné vhodné modely pro turbulentní proudění se liší málo, k výrazným odchýlkám dochází až při vysokých hodnotách Reynoldsova čísla Re_D .

Z relativně velkého množství vztahů pro stanovení střední hodnoty Nusseltova čísla Nu_D , které jsou k dispozici v literatuře [1, 2, 3], byly pro účely analýzy vybrány takové, které jsou vhodné pro podmínky absorbérů solárních kolektorů. Hodnota Nu_D je uvažována jako průměrná hodnota v dané délce trubky L .

V oblasti **plně vyvinutého laminárního proudění** s vyvinutým rychlostním a teplotním profilem byla odvozena hodnota Nusseltova čísla [1, 2] (pro konstantní hustotu toku tepla)

$$Nu_D = \frac{48}{11} = 4,364 \quad (1)$$

Pro **laminární proudění v náběhové oblasti** s vyvíjejícím se teplotním profilem byla vybrána korelace pro stanovení Nusseltova čísla v závislosti na bezrozměrném parametru x^* , kterou navrhl Shah [1] na základě měření a modelování

$$Nu_D = \begin{cases} 1,953 \cdot x^{*-1/3} & x^* \leq 0,03 \\ 4,364 + \frac{0,0722}{x^*} & x^* \geq 0,03 \end{cases} \quad (2)$$

Parametr x^* je definován jako převrácená hodnota Graetzova čísla, které charakterizuje laminární tok v trubce

$$x^* = Gz^{-1} = \frac{x / D_i}{Re_D \cdot Pr} \quad (3)$$

kde za x se dosazuje délka trubky absorbérů L (m).

Pro **turbulentní proudění** byl v analýze použit vztah navržený Hausenem [3], zohledňující délku trubky a vliv změny viskozity u vnitřní stěny trubky na přestup tepla

$$Nu_D = 0,037 \cdot \left[1 + \left(\frac{D_L}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot (Re^{0,75} - 180) \cdot Pr^{0,42} \cdot \left(\frac{\mu_m}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (4)$$

kde μ_s (Pa · s) je dynamická viskozita stanovená pro teplotu stěny potrubí t_s (°C), μ_m (Pa · s) je dynamická viskozita stanovená pro střední teplotu teplotnosné látky v potrubí t_m (°C). Vztah je platný pro rozsah Prandtlových čísel $0,6 < Pr < 10^3$, pro rozsah Reynoldsových čísel $2300 < Re_D < 10^6$ a široký rozsah štíhlosti potrubí $0 < D/L < 1$.

Součinitel přestupu tepla při proudění v trubce h_{fi} (W/m²·K) se stanoví na základě vypočteného Nusseltova čísla

$$h_{fi} = Nu_D \cdot \frac{\lambda_f}{D_i} \quad (5)$$

kde λ_f (W/m·K) je tepelná vodivost teplotnosné látky a D_i (m) je vnitřní průměr potrubí.

ÚČINNOST SOLÁRNÍHO KOLEKTORU

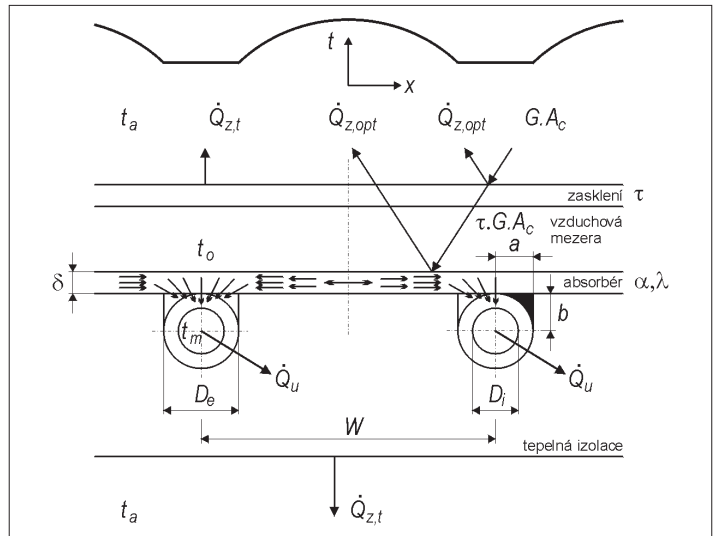
Vliv přestupu tepla prouděním v trubkách odvádějících teplo z absorpční plochy kolektoru na účinnost solárního kolektoru lze vyjádřit několika rovnicemi. Základní rovnicí pro stanovení účinnosti kolektoru na základě konstrukčních parametrů, provozních a klimatických podmínek je tzv. Hottel-Whillier-Blisssova rovnice

$$\eta = F_R \cdot \left[\tau \cdot \alpha - U \cdot \frac{(t_m - t_a)}{G} \right] \quad (6)$$

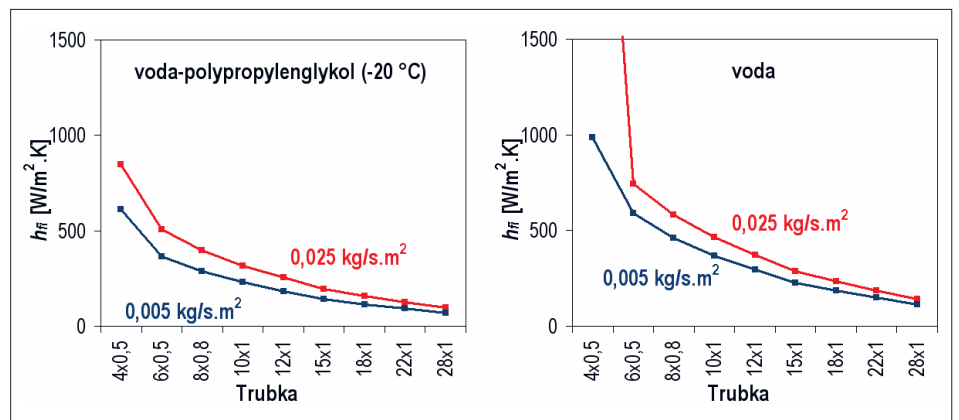
kde $\tau \cdot \alpha$ (-) je součin propustnosti zasklení a pohltivosti absorpčního povrchu pro oblast slunečního záření (tzv. optická účinnost), U (W/m²·K) je součinitel prostupu tepla kolektoru, t_m (°C) je teplota teplotnosné látky na vstupu do kolektoru, t_a (°C) je teplota okolí kolektoru a G (W/m²) je sluneční ozáření kolektoru. Parametr F_R se nazývá **tepelný přenosový součinitel kolektoru** a ve své podstatě zahrnuje vliv parametrů ovlivňujících přenos tepla z povrchu absorpčního povrchu do teplotnosné látky. Tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R je svým významem ekvivalentní účinnosti tepelného výměníku, definovaného jako poměr okamžitého přeneseného tepelného výkonu k maximálnímu možnému tepelnému výkonu.

$$F_R = \frac{M \cdot c}{A_c \cdot U} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c \cdot U \cdot F'}{M \cdot c} \right) \right] \quad (7)$$

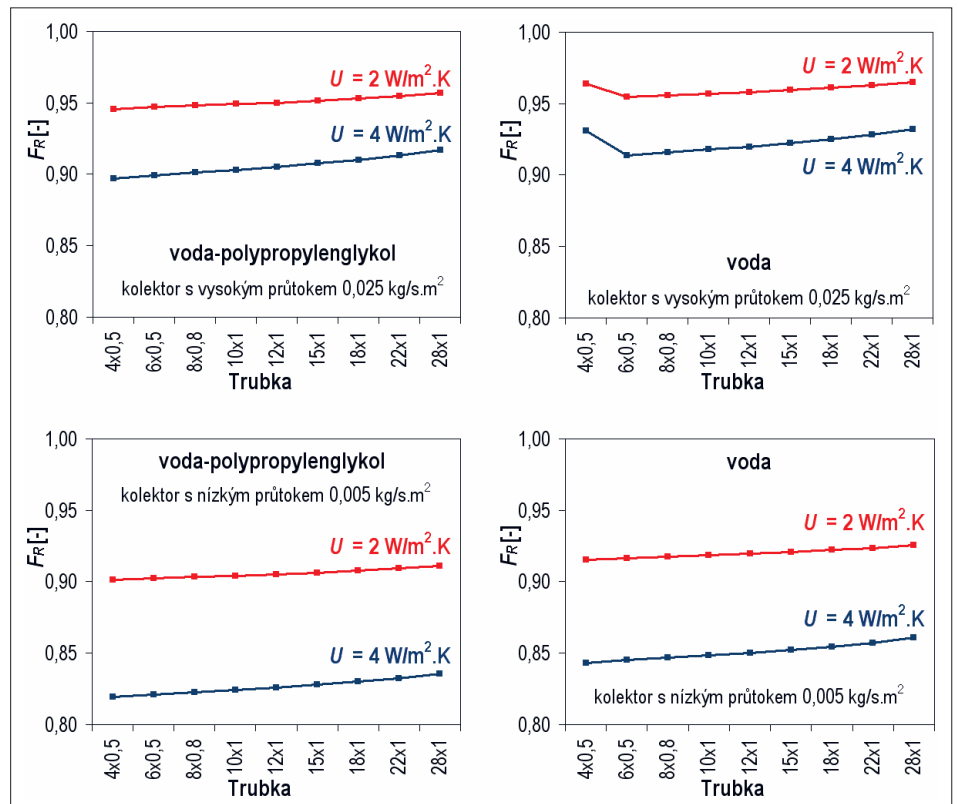
kde M (kg/s) je hmotnostní průtok teplotnosné látky kolektorem, c (J/kg·K) je měrná tepelná kapacita teplotnosné látky, A_c (m²) je plocha kolektoru a F' (-) je **účinnostní součinitel kolektoru**. Účinnostní součinitel kolektoru je konstantní pro danou konstrukci



Obr. 1 Schematický řez solárním kolektorem a základní parametry a veličiny použité v bilancích



Obr. 2 Přestup tepla při proudění v trubce v závislosti na její dimenzi pro různé průtoky absorpčním kolektorem (high-flow a low-flow kolektor) a různé teplotnosné látky



Obr. 3 Tepelný přenosový součinitel kolektoru v závislosti na dimenzi trubek registru

absorbéru a průtok teplotnosné látky. Pro různé konstrukční řešení spoje absorbéru a trubky se liší vztah pro stanovení F' [4]. Pro typ konstrukce absorbéru zobrazený na obr. 1 platí vztah

$$F' = \frac{1/U}{W \left[\frac{1}{U \cdot [D_e + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_{\text{spoj}}} + \frac{1}{h_{fi} \cdot \pi \cdot D_i} \right]} \quad (8)$$

kde W (m) je rozteč trubek absorbéru, případně šířka lamely, D_e (m) je vnější průměr trubky, C_{spoj} (W/K) je tepelná propustnost spoje trubka-absorbér a F (-) je **standardní účinnost žebra** daná vztahem

$$F = \frac{\tanh[m \cdot (W - D_e) / 2]}{m \cdot (W - D_e) / 2} \quad (9)$$

$$m = \sqrt{\frac{U}{\lambda \cdot \delta}} \quad (10)$$

kde λ (W/m.K) je tepelná vodivost materiálu absorbní plochy a δ (m) je tloušťka absorbní plochy.

Na základě výše uvedených vztahů je možné analyzovat vliv dimenze trubek registru absorbéru na účinnost, resp. tepelný přenosový součinitel solárního kolektoru pro běžné návrhové podmínky.

ANALÝZA

Vliv dimenze trubek registru na přestup tepla a účinnost kolektoru byl analyzován pro běžný případ absorbéru: rozměry 1 x 2 m (10 lamel o délce $L = 2$ m, rozteč $W = 10$ cm), tloušťka absorbéru $\delta = 0,2$ mm, materiál absorbéru a potrubí: měď ($\lambda = 350$ W/m.K), tepelná propustnost spoje $C_{\text{spoj}} = 250$ W/K. Solární kolektor byl uvažován se součinitelem prostupu tepla kolektoru $U = 4$ W/m².K (průměrný selektivní absorbér a jednoduché zasklení) a $U = 2$ W/m².K (pokročilý solární kolektor se zasklením na bázi transparentní tepelné izolace). Hmotnostní průtok byl uvažován obvyklý pro high-flow kolektory 0,025 kg/(s.m²), tj. cca 18 l/h jednou trubkou, a pro low-flow kolektory 0,005 kg/(s.m²), tj. cca 3,6 l/h jednou trubkou registru. V analýze byly uvažovány dvě teplotnosné látky: nemrznoucí směs polypropylen glykolu a vody s teplotou tuhnutí -20 °C (používaná v solárních soustavách pro celoroční použití) a čistá voda (používaná ve zkouškách tepelného výkonu solárních kolektorů podle [5]). Teplota teplotnosné látky byla uvažována jako průměrná teplota v kolektorech solárních soustav pro přípravu teplé užitkové vody během roku (40 °C).

V laminárním režimu, který se vyskytuje při běžných provozních podmínkách v naprosté většině absorbéru kolektorů, je Nusseltovo číslo nezávislé na dimenzi trubky. Vyplývá to ze skutečnosti, že převrácená hodnota Graetzova čísla je závislá pouze na daném průtoku a délce trubky registru L (m), nikoli však na průměru trubky D_i , jak ukazuje úprava vztahu (3)

$$x^* = \frac{\frac{L}{D_i}}{\frac{w \cdot D_i}{v} \cdot \frac{v}{a}} = \frac{L \cdot a}{w \cdot D_i} \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4 \cdot V} = \frac{\pi \cdot L \cdot a}{4 \cdot V} \quad (11)$$

kde a (m²/s) je teplotní vodivost teplotnosné látky a V (m³/s) je objemový průtok trubkou. Turbulentní režim se projevil pouze u nejmenší uvažované dimenze trubek v případě teplotnosné látky vody. Při použití teplotnosné látky na bázi nemrznoucí směsi vody a polypropylen glykolu s výrazně vyšší viskozitou, bude proudění laminární pro všechny uvedené dimenze.

Na obr. 2 jsou znázorněny hodnoty součinitele přestupu tepla h_{fi} v závislosti na dimenzi trubek registru. Křivky jsou uvedeny pro kolektor s vysokým průtokem (high-flow) a kolektor s nízkým průtokem (low-flow) a pro obě uvažované teplotnosné látky. Z grafu je vidět výrazná závislost součini-

tele přestupu tepla h_{fi} na dimenzi trubek. Nicméně, jak je vidět z obr. 3, na účinnosti kolektoru se vliv dimenze trubek registru projevuje minimálně, jak u nemrznoucí směsi tak u vody. Změna tepelného přenosového součinitele kolektoru F_R je řádově ± 1 % v celém rozsahu uvažovaných dimenzí, pro kolektor s nízkým i vysokým průtokem. U kolektoru s horšími tepelně-izolačními vlastnostmi se vliv projevuje v mírně vyšší míře.

Situace je jasnější při detailním rozboru členů v rovnici (8) pro vyjádření účinnostního součinitele F' . Zatímco geometrická charakteristika absorbéru má výrazný dopad na účinnostní součinitel, vliv tepelné propustnosti spoje u kvalitního provedení (pájené) a vliv součinitele přestupu tepla při hodnotách $h_{fi} > 100$ W/m².K je minimální (viz tab. 1). Vliv dimenze je patrný v 1. členu a ve 3. členu pouze při turbulentním proudění. Při laminárním proudění je pro všechny dimenze trubek součin h_{fi} a D_i ve 3. členu stejný, což vyplývá z konstantní hodnoty Nu_D . Člen vyjadřující tepelný odpor spoje (2. člen) zůstává stejný prakticky nezávisle na dimenzi. Závislost F_R na dimenzi trubek má potom zanedbatelně stoupající trend v závislosti na rostoucí dimenzi trubky, což je způsobeno především poklesem 1. členu, tzn. změnou geometrické charakteristiky, nikoli změnou přenosu tepla v trubce.

Tab. 1 Rozbor členů v rovnici pro výpočet účinnostního součinitele kolektoru F' (orientační hodnoty).

	$\frac{1}{U \cdot [D_e + (W - D_e) \cdot F]}$	$\frac{1}{C_{\text{spoj}}}$	$\frac{1}{h_{fi} \cdot \pi \cdot D_i}$
$U = 2$ W/m ² .K	5,1	0,004	0,108
$U = 4$ W/m ² .K	2,6	0,004	0,108

ZÁVĚR

Byla provedena analýza vlivu dimenze trubek registru odvádějícího teplo z absorbéru solárního kolektoru teplotnosnou látkou do primárního okruhu solární soustavy. Analyzován byl běžný typ spojení absorbér-trubka, běžné materiály (měď) a geometrické charakteristiky absorbéru v maloplošných solárních kolektorech.

Na základě analýzy přestupu tepla z povrchu absorbéru do teplotnosné látky bylo zjištěno, že dimenze trubek registru nemá významný vliv na celkovou účinnost kolektoru, vyjádřenou tepelným přenosovým součinitelem kolektoru F_R .

Poděkování

Tato práce byla podpořena interním grantem č. CTU 0511412 „Optimalizace solárního kolektoru pro kombinované soustavy vytápění a chlazení“ na ČVUT v Praze (2005) a výzkumným záměrem č. MSM 6840770011 „Technika prostředí“.

Kontakt na autora: Tomas.Matuska@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Shah, R.K., London, A.L.: Laminar flow forced convection in ducts. 1st edition. New York: Academic Press. 1978.
- [2] Kays, W.M., Crawford, M.E.: Convective heat and mass transfer, 3rd edition. McGraw-Hill, Inc. 1993. ISBN 0-07-112516-7.
- [3] Sazima, M. a kol.: Sdílení tepla. Technický průvodce, sv. 78. ISBN 80-03-00675-9.
- [4] Duffie, J., Beckman, W.: Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. 1991. ISBN 0-471-51056-4.
- [5] ČSN EN 12975-2 Tepelné solární soustavy a součásti – Solární kolektory – Část 2: Zkušební metody. ČNI 2003.
- [6] Matuska, T.: Projekt IGS ČVUT 2005 č. CTU 0511412. Optimalizace solárního kolektoru pro kombinované soustavy vytápění a chlazení. ČVUT 2005. ■