

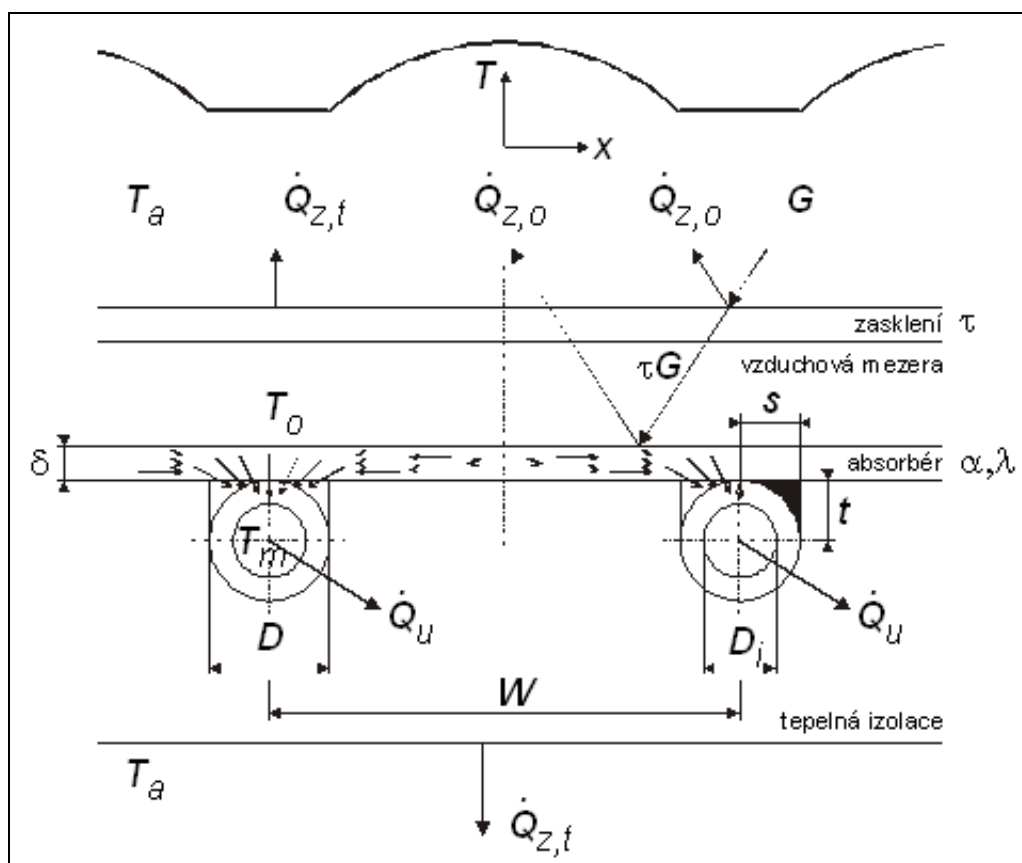
Stanovení účinnosti plochého solárního kolektoru (II)

Datum: 6.6.2005 | Autor: Ing. Tomáš Matuška, Ph.D. | Organizace: ČVUT, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí | Recenzent: doc. Ing. Karel Brož, CSc.

Pro stanovení účinnosti plochého solárního kolektoru nejsou v žádné naší literatuře ucelené analytické a experimentální vztahy. Seriál tří článků uvádí stručný rozbor a definuje základní vztahy k této problematice. Druhý díl je zaměřen na vnitřní energetickou bilanci absorberu.

VNITŘNÍ ENERGETICKÁ BILANCE ABSORBÉRU

Fyzikální procesy odehrávající se v absorberech plochých solárních kolektorů je možné teoreticky popsat vnitřní energetickou bilancí, vyjadřující přenos tepla z povrchu absorberu do teplotnosné látky. Konstrukce plochých kolektorů je zpravidla založena na trubce protékané teplotnosnou látkou, na které je připevněna lamela s povrchem určeným k absorpci slunečního záření. Základem teoretického řešení tepelného chování absorberu je výpočet teplotního pole na lamelě (technicky známého žebra s dopadem slunečního záření), tedy diferenciální rovnice druhého řádu se dvěma okrajovými podmínkami, a řešení teplotního pole na trubce.



Obr. 3 - Znáromění bilance vně a uvnitř absorberu a průběhu teplot v lamelě

Částečným výsledkem řešení je tepelný tok lamelou (žebrem) k trubce, vztažený na jednotku délky trubky

$$q_{lam}^I = (W - D)F[\tau\alpha G - U(T_0 - T_a)] \quad (5)$$

kde $F(-)$ je standardní účinnost žebra daná vztahem

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (6)$$

$$\text{kde } m = \sqrt{\frac{U}{\lambda\delta}} \quad (7)$$

a tepelný tok (zisk) trubky samotné, vztažený na jednotku délky

$$q'_{tr} = D[\tau\alpha G - U(T_0 - T_a)]. \quad (8)$$

Využitelný tepelný tok $q'_u = q'_{lam} + q'_{tr}$ (W/m) musí být přenesen z povrchu lamely a trubky do teplotnosné látky (kapaliny) proudící uvnitř trubky. Odpor proti toku tepla do kapaliny je dán tepelným odporem spoje lamely s trubkou a tepelným odporem proti přestupu tepla z vnitřního povrchu trubky do kapaliny. Využitelný tepelný tok je pak dán rovnicí

$$q'_u = \frac{T_0 - T_m}{\frac{1}{h_{f,i} \pi D_i} + \frac{1}{C_{spoj}}} \quad (9)$$

kde D_i (m) je vnitřní průměr trubky, $h_{f,i}$ (W/m²K) je součinitel přestupu tepla mezi vnitřním povrchem trubky a teplotnosnou látkou. Teplota T_0 (°C) je teplota v patě lamely (žebra) a teplota T_m (°C) je střední teplota teplotnosné látky v trubce daná aritmetickým průměrem

$$T_m = \frac{T_{in} + T_e}{2} \quad (10)$$

kde T_{in} (°C) je teplota na vstupu do kolektoru a T_e (°C) je teplota na výstupu z kolektoru.

Tepelná propustnost spoje C_{spoj} (W/mK) je odhadnuta na základě známé tepelné vodivosti spoje λ_{spoj} (W/mK), průměrné tloušťky spoje t (mm) a šířky spoje s (mm) (viz obr. 3) a je vztažena na jednotku délky trubky

$$C_{spoj} = \frac{\lambda_{spoj} s}{t} \quad (11)$$

Eliminací teploty v patě lamely T_0 z rovnic je možné vyjádřit využitelný tepelný tok na základě parametrů kolektoru (rozměrů, fyzikálních vlastností) a teploty teplotnosné látky

$$q'_u = WF'[\tau\alpha G - U(T_m - T_a)] \quad (12)$$

kde F' (-) je účinnostní součinitel kolektoru

$$F' = \frac{1/U}{W \left[\frac{1}{U[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_{spoj}} + \frac{1}{h_{f,i} \pi D_i} \right]} = \frac{1/U}{1/U_o} \quad (13)$$

Účinnostní součinitel kolektoru F' ve své podstatě vyjadřuje poměr mezi dvěma tepelnými odpory, ve jmenovateli je obsažen odpor proti přenosu tepla z kapaliny do okolního vzduchu, v čitateli je odpor proti přenosu tepla z absorberu do okolního vzduchu. Účinnostní součinitel kolektoru je konstantní pro danou konstrukci absorberu a průtok teplotné látky. Pro různé konstrukční řešení spoje lamely a trubky se liší vztah pro stanovení F' [2]. Vztah (13) platí pro typ konstrukce absorberu zobrazený na obr. 3. Rovnici účinnosti solárního kolektoru v závislosti na střední teplotě teplotné látky T_m lze psát jako

$$\eta = F' \left[\tau\alpha - U \frac{(T_m - T_a)}{G} \right] \quad (14)$$

Z účinnostního součinitele kolektoru F' vyplývají důležité zásady návrhu konstrukce kolektoru, zejména absorberu. Se zmenšováním rozteče trubek W v kolektoru a tedy zmenšováním šířky lamely se zvyšuje účinnostní součinitel kolektoru, stejně jako se zvětšující se tloušťkou lamely δ a zvyšující se tepelnou vodivostí materiálu lamely a trubky. Omezení tloušťky absorberu vyplývá z ekonomiky návrhu absorberu a snahy o minimalizaci tepelné kapacity (setrvačnosti) kolektoru. Je samozřejmé, že účinnostní součinitel kolektoru se bude zvyšovat také se snižujícím se celkovým součinitelem prostupu tepla kolektoru U a zvyšujícím se součinitelem přestupu tepla z povrchu trubky do teplotné látky $h_{f,i}$ (ovlivněno především rychlostí proudění teplotné látky v trubce).

Využitelný tepelný tok vztážený na jednotku délky trubky se celý přenáší do teplotné látky. Ta vstupuje do kolektoru o teplotě T_{in} , zvyšuje svou teplotu a opouští kolektor o teplotě T_e . Energetickou bilanci elementu teplotné látky lze získat diferenciální rovnicí, jejímž řešením je závislost teploty teplotné látky na souřadnici ve směru toku. Dosazením okrajové podmínky získáme vztah pro stanovení výstupní teploty T_e z kolektoru v závislosti na jeho parametrech a provozních podmínkách.

$$\frac{T_e - T_a - \tau\alpha G / U}{T_{in} - T_a - \tau\alpha G / U} = \exp(-A_c U F' / \dot{M}c) \quad (15)$$

kde \dot{M} (kg/s) je hmotnostní průtok teplotné látky kolektorem a c (J/kg.K) je měrná tepelná kapacita teplotné látky.

Při hodnocení provozu solárních kolektorů je výhodné pracovat s veličinou, která vztahuje energii dodanou solárním kolektorem (okamžitý využitelný tepelný zisk) k energii, která by byla dodána za předpokladu, že by teplota celého absorberu byla rovna vstupní teplotě teplotné látky. Tato veličina se nazývá **tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R** (-).

$$F_R = \frac{\dot{M}c(T_e - T_{in})}{A_c [\tau\alpha G - U(T_{in} - T_a)]} \quad (16)$$

Dosazením z rovnice (15) lze tepelný přenosový součinitel kolektoru vyjádřit jako

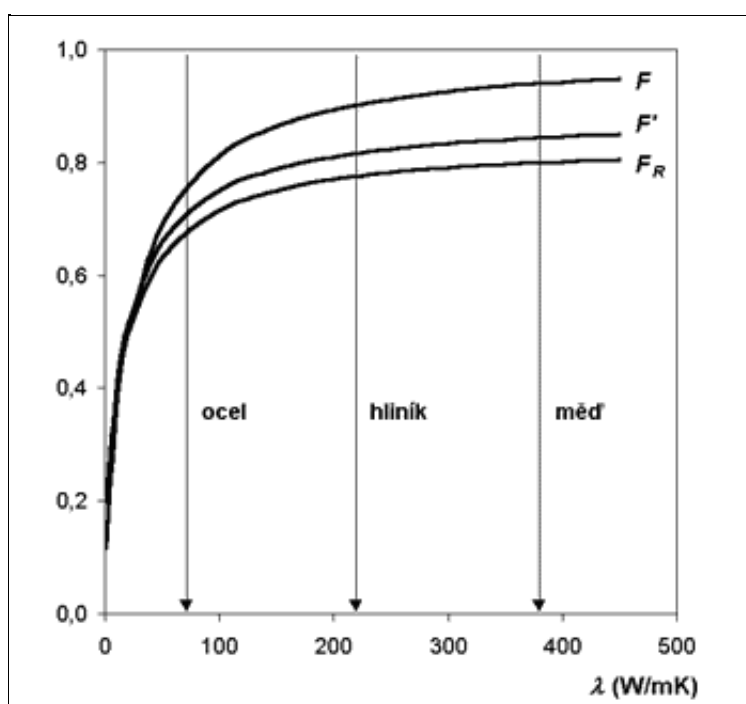
$$F_R = \frac{\dot{M}c}{A_c U} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U F'}{\dot{M}c}\right) \right] \quad (17)$$

Pro účely grafických zobrazení je dále definován **průtokový součinitel kolektoru F''** (-) jako poměr F_R k F' .

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{M}c}{A_c U F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U F'}{\dot{M}c}\right) \right] \quad (18)$$

Průtokový součinitel kolektoru představuje poměr energie dodané solárním kolektorem k energii, která by byla dodána za předpokladu, že průměrná teplota teplotné látky v kolektoru je rovna vstupní teplotě. Průtokový součinitel kolektoru je funkcí jediné bezrozměrné proměnné.

Na obr. 4 je znázorněna závislost součinitelů F , F' a F_R na tepelné vodivosti žebra a trubky s vyznačením oblasti různých materiálů používaných pro absorbery kolektorů (ocel, hliník, měď). Z grafu je zřejmá silná vazba součinitelů na volbu použitého materiálu.



Obr. 4 - Závislost součinitelů F , F' a F_R na tepelné vodivosti materiálu absorberu λ

Tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R je závislý na průtoku a na vlastnostech teplotné látky (hustota, tepelná kapacita). Zvyšováním průtoku v kolektoru se snižuje teplotní spád na kolektoru (rozdíl mezi výstupem a vstupem), střední teplota v kolektoru se přibližuje teplotě na vstupu a přenosový součinitel kolektoru roste. Roste tím samozřejmě i účinnost, neboť při nižší střední teplotě absorberu jsou tepelné ztráty do okolí nižší.

Při nárůstu průtoku nade všechny meze je teplotní rozdíl mezi vstupem a výstupem kolektoru roven nule, ale povrch absorberu má teplotu vždy vyšší než je teplota teplotné látky. Tento rozdíl teplot je vyjádřen účinnostním součinitelem kolektoru F' . Proto tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R je vždy menší než účinnostní součinitel kolektoru F' .

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. V solárním kolektoru dochází k maximálnímu možnému využitelnému výkonu v případě, že celý kolektor je na teplotě rovné teplotě vstupující látky. Tento maximální možný využitelný výkon násobený (korigovaný) přenosovým součinitelem kolektoru F_R dává okamžitý využitelný tepelný výkon (skutečně dodanou energii) podle vztahu

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [\tau \alpha G - U(T_m - T_a)] \quad (19)$$

a podobně pro účinnost

$$\eta = F_R \left[\tau \alpha - U \frac{(T_m - T_a)}{G} \right] \quad (20)$$

kde $(T_m - T_a)/G$ je střední redukovaný teplotní rozdíl stanovený pro vstup do kolektoru.

Uvedené rovnice jsou vhodné pro práci v podstatě se všemi plochými kolektory. Využitelný tepelný výkon z kolektoru lze stanovit jako funkci teploty na vstupu do kolektoru T_{in} . Křivku účinnosti kolektoru v závislosti na vstupní teplotě lze výhodně použít při matematickém modelování solárních soustav, neboť teplota na vstupu do kolektoru T_{in} je obvykle známa, na rozdíl od střední teploty absorbéru T_{abs} či střední teploty teplotosné látky T_m (přepokládá znalost teploty na výstupu kolektoru T_e). Matematický model kolektoru se potom chová jako fyzikální model (reálný kolektor při experimentu): na základě znalosti teploty a průtoku na vstupu do kolektoru a klimatických veličin je možné stanovit teplotu na výstupu z kolektoru, užitečný výkon odebíraný z kolektoru a účinnost kolektoru.

Pro hodnocení výkonu, resp. účinnosti solárních kolektorů je třeba znát hodnoty celkového součinitele přenosu tepla kolektoru U a součinitele přestupu tepla uvnitř trubek kolektoru $h_{f,i}$. Ty jsou však do určité míry funkcí teploty. Střední teplotu teplotosné látky v kolektoru T_m lze určit ze vztahu

$$T_m = T_{in} + \frac{\dot{Q}_u / A_c}{F_R U} (1 - F''_R) \quad (21)$$

Tato teplota je vhodná pro stanovení teplotně závislých vlastností teplotosné látky v kolektoru.

Střední teplotu absorbéru T_{abs} určíme jako

$$T_{abs} = T_m + \frac{\dot{Q}_u / A_c}{F_R U} (1 - F_R) \quad (22)$$

Energetickou bilanci je nutné řešit v iteračním cyklu, neboť celkový součinitel prostupu tepla kolektoru U je zpětně závislý na T_{abs} .

LITERATURA

- [1] Cihelka, J.: Solární tepelná technika. T. Malina 1994.
- [2] Duffie, J., Beckman, W.: Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. 1991. ISBN 0-471-51056-4.
- [3] Kreider, J., Kreith, F.: Solar Energy Handbook. McGraw-Hill, Inc. 1981. ISBN 0-07-035474-X.
- [4] ČSN EN ISO 9488 - Solární energie - Slovník. ČSN 1998.
- [5] ČSN EN 12975-2 - Solární tepelné soustavy a součásti - Solární kolektory - Část 2: Zkušební metody. ČSN 2003.
- [6] Matuška, T.: Aktivní solární tepelné systémy - část 1. Teoretické vztahy. Vytápění, větrání, instalace. 2003, roč. 12, č. 2, s. 64-67. ISSN 1210-1389.

