

Ing. SHEMELIN Viacheslav
 ČVUT v Praze
 Univerzitní centrum energeticky
 efektivních budov
 doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.
 ČVUT v Praze
 Fakulta strojní
 Ústav techniky prostředí

Recenzent
 Ing. Michal Broum

Teoretická analýza plochého solárního kolektoru s vakuovým zasklením

Theoretical Analysis of Flat-Plate Solar Collector with Vacuum Glazing

V článku je teoretickými výpočty analyzován plochý solární kolektor s vakuovým zasklením, které se v posledních letech objevuje v oblasti zasklení budov. Kromě stanovení křivek účinnosti různých variant kolektorů s vakuovým zasklením, je porovnávána i možná produkce tepla během roku při různých provozních teplotách.

Klíčová slova: vakuové zasklení, solární kolektor, vakuový kolektor

The flat-plate solar collector with vacuum glazing is analyzed in the paper, using theoretical calculation. This type of glazing is in recent years appearing in the field of building windows. Aside of the determination of the efficiency curves for different variants of vacuum-glazed collector, the possible production of heat during the year is compared for different operation temperature.

Klíčová slova: vacuum glazing, solar collector, vacuum collector

ÚVOD

Vysokoteplotní aplikace využití sluneční energie jako je solární chlazení či technologické teplo jsou doménou trubkových vakuových kolektorů s reflektorem nebo bez reflektoru. Zásadní nevýhodou trubkových kolektorů obecně je menší podíl činné plochy kolektoru oproti hrubé ploše, kterou kolektor zaujímá na střeše. Solární trubkové kolektory typu Sydney navíc kvůli omezenému přestupu tepla z povrchu skleněného absorberu do kapaliny vykazují relativně nízkou „optickou“ účinnost, tj. účinnost při nulových tepelných ztrátách [1].

Snahy dosáhnout tepelné kvality vakuových trubkových kolektorů v plochém provedení vedly v minulosti k solárním kolektorům s transparentní tepelnou izolací [2] (vícenásobné zasklení, voštinové průsvitné izolace) či plochým vakuovým kolektorům [3] (vakuovaná skříň kolektoru). Zatímco solární kolektory s transparentní izolací vedou ke zhoršení optické účinnosti (násobné odrazy), ploché vakuové kolektory dostupné na trhu nedosahují v praktických realizacích vysokého stupně vakua a nízké tepelné ztráty na úrovni trubkových vakuových kolektorů.

Příspěvek se zabývá myšlenkou nahradit jednoduché sklo používané ve většině plochých solárních kolektorů plochým vakuovým dvojsklem

[4, 5], které na jedné straně bude vykazovat nízkou úroveň prostupu tepla (nízkoemisivní povlak, vysoké vakuum) a na druhé straně vysokou propustnost sluneční energie (antireflexní povlaky). Ploché solární kolektory s nízkou tepelnou ztrátou na úrovni vakuových trubkových kolektorů a zároveň s dostatečně vysokou optickou účinností by bylo možné efektivně využít pro integraci do obálky budov (obytných, průmyslových), která je k dispozici.

VAKUOVÉ DVOJSKLO JAKO KRYCÍ ZASKLENÍ KOLEKTORU

Vakuové dvojsklo se skládá ze dvou těsněných plochých skel s vakuovaným meziprostorem o tlaku nižším než 0,1 Pa. Dutina meziprostoru má rozměr řádově desetin mm. Skla jsou podepřena maticí pilířů, aby se zabránilo jejich zhroucení vlivem podtlaku. Přenos tepla v takovém dvojskle je dán vedením tepla zbytkovým plynem, vedením tepla podpůrnými distančními vložkami, vedením tepla okrajovým těsněním a sáláním mezi oběma skly. Vakuum umožňuje eliminovat volnou konvekci a omezit vedení meziprostorem na minimum. Povlak s nízkou emisivitou omezuje přenos tepla meziprostorem sáláním. Pilíře mají rozměr okolo 0,5 mm v průměru a chovají se jako tepelné mosty.

Celkovou tepelnou propustnost zasklením h_{p1-p2} (meziprostorem mezi vnitřními povrchy skel) lze modelovat součtem dílčích tepelných propustností h podle vztahu [6]

$$h_{p1-p2} = h_g + h_r + h_{pil} = 0,8p + 4\varepsilon_{eff}\sigma T_m^3 + \frac{2\lambda a}{d^2} \quad [W/m^2K] \quad (1)$$

kde je:

p tlak v meziprostoru [Pa]

ε_{eff} efektivní emisivita dvojskla, stanovená jako

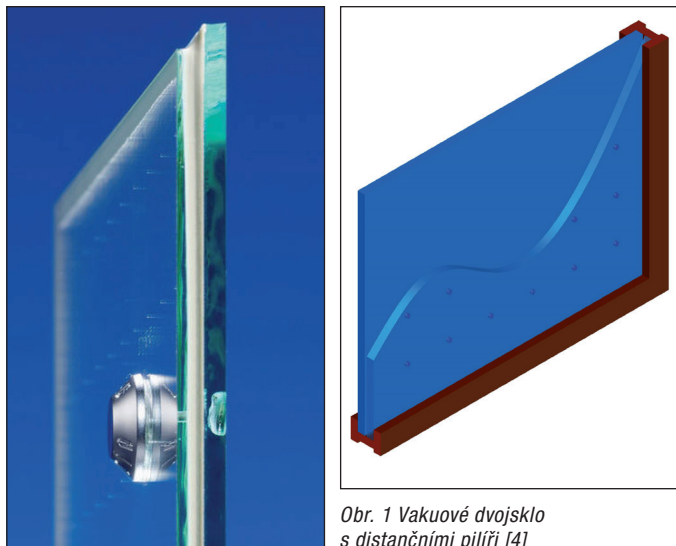
$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [-] \quad (2)$$

kde je:

ε_1 emisivita vnitřního povrchu prvního skla [-],

ε_2 emisivita vnitřního povrchu druhého skla [-],

T_m střední absolutní teplota skel [K],



Obr. 1 Vakuové dvojsklo s distančními pilíři [4]

σ Stefan-Boltzmanova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$,
 λ tepelná vodivost skla-pilířů $[\text{W/m.K}]$,
 a poloměr pilířů $[\text{m}]$,
 d vzdálenost mezi pilíři $[\text{m}]$.

Uvedený vztah platí pouze pro tlak meziprostoru menší než 0,1 Pa, tzn. vysoké vakuum.

Vakuové dvojsklo se již objevuje v portfoliu dodavatelů zasklení pro použití v budovách. Konfigurace skel 3 - 0,2 - 3 mm má propustnost slunečního záření na úrovni 62 až 63 % a součinitel prostupu tepla 1,4 až 1,5 $\text{W/m}^2\text{K}$ [4, 5]. Průměr pilířů vakuového zasklení SPACIA je 0,5 mm a jejich rozestup je 20 mm [7]. Tlak mezi skly je v dalších výpočtech uvažován 0,1 Pa.

Pro použití vakuového dvojskla v solárních kolektorech je nutné vhodně zvolit nízkoemisivní povlak. Povlaky dostupné na trhu byly vyvinuty téměř výhradně pro architekturu. Obvykle se pro zajištění tepelného a vizuálního komfortu v budovách používají povlaky na bázi stříbra, které mohou zajistit velmi nízkou emisivitu (méně než 0,03) a vysokou propustnost viditelného záření (až do 0,90). Nicméně propustnost v celé oblasti vlnových délek slunečního záření (0,3 až $3 \mu\text{m}$) není zpravidla vyšší než 0,60. Nízká propustnost slunečního záření, způsobená odrazivostí nízkoemisivního povlaku pro blízké infračervené záření (NIR) ve slunečním spektru, je obecně nevhodná pro použití v solárních kolektorech. Použitím velmi tenkého stříbrného povlaku, který byl vyvinut v posledních letech pro trojsklo, nebo použitím oxidů kovů [8], lze dosáhnout hodnot propustnosti slunečního záření nad 0,75, avšak s vyšší emisivitou (mezi 0,08 až 0,20). Zároveň je možné použít pro oba povrchy vnějšího skla antireflexních povlaků a tím snížit odraz na obou rozhraních vzduch-sklo a zvýšit propustnost vakuového dvojskla.

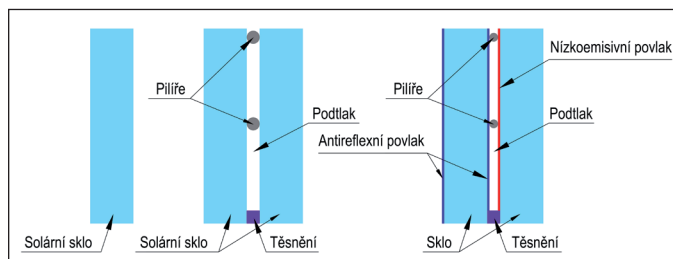
Pro účely analýzy použití vakuového dvojskla pro plochý solární kolektor byly uvažovány kromě referenčního jednoduchého skla dvě zatím teoretická vakuová dvojskla s vlastnostmi uvedenými v tab. 1, stanovenými výpočtem na základě modelu přenosu tepla ve vakuovém zasklení. Varianta skla VG1 je vakuové dvojsklo na bázi dvou solárních nízkoželezitéch skel (např. Solarphire, Solatex, ClearVision, apod.) bez nízkoemisivního povlaku a bez antireflexních povlaků. Varianta VG2 je vakuové dvojsklo na bázi dvou solárních nízkoželezitéch skel, u kterého je vnější sklo opatřeno antireflexním povlakem na vnějším (pozice 1) i vnitřním povrchu (pozice 2) a vnitřní sklo je opatřeno na vnějším povrchu (pozice 3) nízkoemisivním povlakem s emisivitou 0,2 s vysokou propustností slunečního záření 0,89 [8]. Konfigurace vakuových skel jsou uvedeny názorně na obr. 2.

Tab. 1 Porovnání fyzikálních vlastností zasklení kolektoru

Vlastnosti	REF	VG1	VG2
Tloušťka [mm]	4	4+0,2+4	4+0,2+4
Emisivita [-] pozice 2 / pozice 3	-	0,85 / 0,85	0,85 / 0,20
Propustnost sluneční energie [%]	90,8	82,5	80,8
Tepelná propustnost $[\text{W/m}^2\text{K}]$ při 60 °C	150	7,2	2,9

MODEL SOLÁRNÍHO KOLEKTORU

Pro modelování solárního kolektoru s plochým vakuovým zasklením byl použit matematický model solárního kolektoru vycházející z vnější energetické bilance absorberu (přenos tepla z povrchu absorberu do okolního prostředí) a vnitřní energetické bilance absorberu (přenos tepla z povrchu absorberu do tekutiny) [9]. Model řeší energetickou bilanci solárního



Obr. 2 Konfigurace variant zasklení kolektoru

kolektoru v ustáleném stavu v souladu s rovnicí Hottela-Whilliera pro využitelnou tepelnou energii [10]

$$\dot{Q} = F_R A [G \tau \alpha - U(t_m - t_e)] \quad [\text{W}] \quad (3)$$

kde je:

F_R tepelný přenosový součinitel kolektoru [-],
 A referenční plocha solárního kolektoru $[\text{m}^2]$,
 G sluneční ozáření $[\text{W/m}^2]$,
 τ propustnost slunečního záření zasklením [-],
 α pohltivost slunečního záření absorberem [-],
 U součinitel prostupu tepla kolektoru $[\text{W/m}^2\text{K}]$,
 t_m vstupní teplota kapaliny $[\text{°C}]$,
 t_e teplota okolí $[\text{°C}]$.

Vnější energetická bilance absorberu řeší přenos tepla:

- ☐ konvekcí a radiací z povrchu absorberu,
- ☐ vedením tepla vakuovým sklem/zasklením nebo izolací,
- ☐ konvekcí a radiací z vnějšího povrchu zasklení a zadní strany do okolí.

Pro správný výpočet součinitelů přestupu tepla je nutné znát teploty hlavních povrchů (zasklení, izolace). Zároveň rozložení teplot v kolektoru je závislé na hodnotách součinitelů přestupu tepla (poměru tepelných odporů). Proto vnější energetická bilance absorberu je řešena v iteračním cyklu. Na začátku iteračního procesu se teplota absorberu odhaduje z teploty kapaliny na vstupu do kolektoru.

Součinitel přestupu tepla radiací mezi povrchem absorberu a vnitřním povrchem zasklení se v modelu kolektoru stanoví podle vztahu

$$h_{r,abs-p1} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1}{\epsilon_{p1}} - 1} (T_{abs}^2 + T_{p1}^2) (T_{abs} + T_{p1}) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (4)$$

kde je:

ϵ_{abs} emisivita absorberu [-],
 ϵ_{p1} emisivita vnitřního povrchu zasklení [-],
 T_{abs} absolutní teplota absorberu $[\text{K}]$,
 T_{p1} absolutní teplota vnitřního povrchu zasklení $[\text{K}]$.

Součinitel přestupu tepla volnou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi absorberem a zasklením se v modelu stanoví podle vztahu:

$$h_{k,abs-p1} = \frac{Nu_L \lambda_{abs-p1}}{L_{abs-p1}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5)$$

kde je:

λ_{abs-p1} tepelná vodivost vzduchu ve vrstvě při střední teplotě $[\text{W/m.K}]$,
 L_{abs-p1} rozměr mezery (tloušťka vrstvy) $[\text{m}]$.

Pro Nusseltovo číslo Nu_L při volné konvekci v uzavřené vrstvě vzduchu lze v odborné literatuře najít velký počet vztahů a korelací získaných z experimentů. Pro výpočet v modelu byl použit vztah podle Hollandse [11]

$$Nu_L = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra_L \cos \phi} \right]^+ \cdot \left(1 - \frac{(\sin 1,8\phi)^{1,6} 1708}{Ra_L \cos \phi} \right) + \left[\left(\frac{Ra_L \cos \phi}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad [-] \quad (6)$$

kde je:

ϕ sklon solárního kolektoru (vzduchové vrstvy) [°]

Ra_L Rayleighovo číslo [-]

Součinitel přestupu tepla radiací z povrchu vnějšího zasklení do okolí se obecně stanoví podle vztahu:

$$h_{r,p2-e} = \varepsilon_{p2} \sigma \frac{(T_{p2}^4 - T_o^4)}{T_{p2} - T_e} \quad [W/m^2K] \quad (7)$$

kde je:

ε_{p2} emisivita vnějšího povrchu zasklení kolektoru [-],

T_{p2} absolutní teplota vnějšího povrchu zasklení [K],

T_o absolutní ekvivalentní teplota oblohy [K],

T_e absolutní teplota okolí [K].

Ekvivalentní teplota oblohy se zavádí vzhledem ke skutečnosti, že teplota oblohy není rovnoměrná a atmosféra významně vyzařuje jen v určitých oblastech vlnových délek. Existuje řada více či méně složitých a spolehlivých korelací pro výpočet ekvivalentní teploty oblohy. Pro modelování ekvivalentní teploty oblohy byl zvolen vztah podle Swinbanka [12] pro jasnou oblohu:

$$T_o = 0,0552 T_e^{1,5} \quad [K] \quad (8)$$

Určení přenosu tepla konvekcí z vnějšího povrchu zasklení do okolí v reálných podmínkách (s přirozenou a nucenou konvekcí) je podobně problematické jako v případě sálání vůči obloze. V literatuře lze najít velký počet vztahů a korelací získaných z experimentů, které více či méně reprodukuji okrajové podmínky instalace solárních kolektorů. I když konečná hodnota součinitele přestupu tepla je teoreticky ovlivněna rozměry kolektoru, jeho sklonem, úhlem náběhu proudícího vzduchu, intenzitou turbulence a dalšími vlivy, většina autorů uvádí jednoduché korelace ve formě lineární funkce. V oblasti solárních kolektorů je nejvíce používán model podle McAdamse [13]

$$h_{k,p2-e} = 5,7 + 3,8w \quad [W/m^2K] \quad (9)$$

kde je:

w rychlost větru [m/s].

Potom lze vypočítat součinitel prostupu tepla přední stranou kolektoru U_p podle vztahu

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{k,abs-p1}} + \frac{1}{h_{r,abs-p1}} + \frac{1}{h_{p1-p2}} + \frac{1}{h_{k,p2-a}} + \frac{1}{h_{r,p2-e}}} \quad [W/m^2K] \quad (10)$$

a z poměru jednotlivých tepelných odporů lze iteračním způsobem stanovit zpětně povrchové teploty zasklení. Podobným způsobem se řeší přenos tepla zadní a boční stranou (tepelnou izolací kolektoru). Iterační

proces konverguje velmi rychle a vnější energetická bilance je ukončena po zhruba 5 iteracích. Výsledkem vnější bilance je celkový součinitel prostupu tepla kolektoru U .

Přenos tepla z povrchu absorbéru do kapaliny protékající uvnitř trubek může být popsán vnitřní energetickou bilancí absorbéru, která řeší přenos tepla:

□ vedením žebrem z povrchu absorbéru do místa spoje s trubicí;

□ vedením vlastním spojem trubka-absorbční povrch;

□ nucenou konvekcí z vnitřního povrchu trubky do kapaliny.

Teoretický výpočet je založen na výpočtu účinnosti žebra s dopadem slunečního záření. Vnitřní energetická bilance absorbéru probíhá v jednoduchém iteračním cyklu pro výpočet správné střední teploty kapaliny. Na začátku iteračního procesu se střední teplota kapaliny t_m odhaduje z teploty kapaliny na vstupu do kolektoru.

Výsledky vnitřní energetické bilance jsou účinnostní činitel F' a tepelný přenosový činitel kolektoru F_R , které se stanoví na základě vstupních parametrů absorbéru, provozních a klimatických podmínek a výsledků z vnější bilance. Existují různé konfigurace absorbéru. Pro konfiguraci absorbéru s horním spojem se účinnostní činitel F' stanoví podle vztahu:

$$F' = \frac{1/U}{W \left(\frac{1}{U(2a + (W - 2a)F)} \right) + \frac{1}{C_{sp}} + \frac{1}{h_i \pi D_i}} \quad [-] \quad (11)$$

kde je:

C_{sp} tepelná propustnost spoje [W/m.K]

$$C_{sp} = \frac{\lambda_{sp} a}{b} \quad [W/m.K] \quad (12)$$

kde je:

λ_{sp} tepelná vodivost spoje [W/m.K],

a šířka spoje [m],

b tloušťka spoje [m],

D_i vnitřní průměr trubek [m],

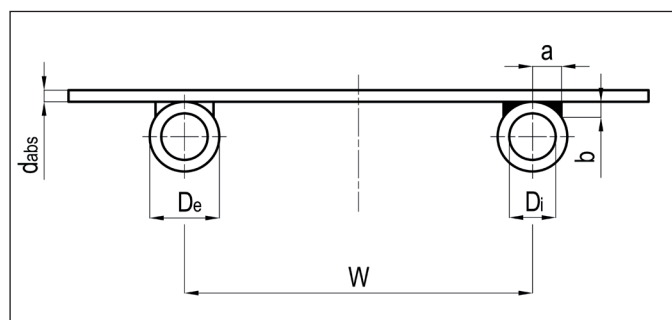
h_i součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí v potrubí absorbéru [W/m²K].

Součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí mezi kapalinou a stěnami trubek absorbéru se stanoví z Nusseltova čísla podle vztahu:

$$h_i = Nu_D \frac{\lambda_f}{D_i} \quad [W/m^2K] \quad (13)$$

kde je:

λ_f tepelná vodivost kapaliny [W/m.K].



Obr. 3 Konfigurace absorbéru s horním spojem

Přenos tepla v kruhovém potrubí při laminárním proudění teplotnosné kapaliny je široce popsán v odborné literatuře. Nejčastěji se používá rovnice Shaha [14] pro konstantní tepelný tok, odpovídající situaci v solárních kolektorech

$$Nu_D = 4,364 \quad [-] \quad (14)$$

V případě turbulentního proudění je používána řada rovnic pro výpočet Nusseltova čísla. Pro výpočet byl použit model od Colburna [15]

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^{0,33} \quad [-] \quad (15)$$

Tepelný přenosový činitel kolektoru je definován jako poměr skutečného užitečného energetického zisku kolektoru k užitečnému zisku v případě, že povrch absorberu má teplotu kapaliny [16]

$$F_R = \frac{\dot{M}c}{AU} \left(1 - \exp \left(- \frac{AUF'}{\dot{M}c} \right) \right) \quad [-] \quad (16)$$

kde je:

- $\dot{M}$ celkový hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny solárním kolektorem [kg/s],
- c měrná tepelná kapacita teplotnosné kapaliny [J/kg.K],
- U celkový součinitel prostupu tepla kolektoru [W/m²K].

Hlavními výstupy z vnitřní bilance jsou výstupní teplota kapaliny t_{out} , střední teplota teplotnosné kapaliny v kolektoru t_m a zejména teplota absorberu t_{abs} , která umožňuje výpočty vnější energetické bilance

$$t_{abs} = t_m + \frac{\dot{Q}}{F_R UA} (1 - F_R) \quad [^\circ\text{C}] \quad (17)$$

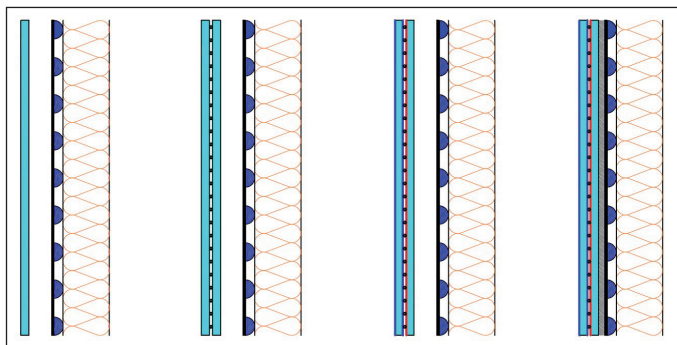
$$t_m = t_{in} + \frac{\dot{Q}}{F_R UA} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (18)$$

Analogicky k vnější bilanci, iterační proces konverguje velmi rychle.

Vnější i vnitřní energetické bilance jsou na sobě vzájemně závislé. Pro přenos výsledků z výpočtu vnější energetické bilance do výpočtu vnitřní bilance (celkový součinitel prostupu tepla kolektoru U) a z výsledků vnitřní energetické bilance do výpočtu vnější bilance (teplota absorberu t_{abs}) byl zaveden nadřazený cyklus. Podrobnější popis modelu lze nalézt v [9].

VÝSLEDKY

Byly modelovány čtyři varianty plochých solárních kolektorů o rozměru 1 x 2 m. Pro všechny varianty kolektorů se uvažuje identická konstruk-



Obr. 4 Konfigurace variant kolektorů

ce měděného absorberu (typu spájená lamela-trubka s roztečí trubek 100 mm) o tloušťce 0,2 mm. Vzdálenost mezi povrchem absorberu a vnitřním povrchem zasklení byla uvažována 20 mm. Tepelná izolace rámu má tloušťku 50 mm při tepelné vodivosti 0,035 W/m.K.

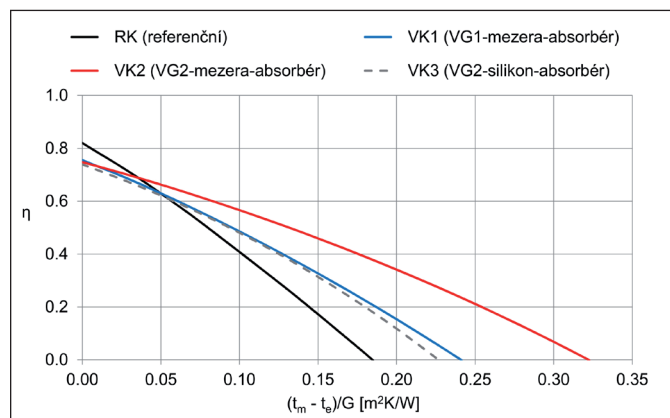
Referenční variantou (RK) je vysoce kvalitní solární kolektor s referenčním solárním zasklením a selektivním absorberem s pohltivostí 0,95 a emisivitou 0,05. Použití vakuového skla namísto jednoduchého zasklení kolektorů je modelováno v rámci ostatních variant. Varianta VK1 uvažuje místo referenčního zasklení vakuové dvojsklo VG1, varianta VK2 uvažuje vakuové dvojsklo VG2. Varianta VK3 má jinou konfiguraci solárního kolektoru s absencí vzduchové mezery mezi absorberem a zasklením. Vakuové dvojsklo VG2 je spojeno přímo s absorpčním povrchem o pohltivosti 0,95 trvale pružným vysoce propustným tepelně odolným silikonovým tmelem („lepený“ spoj) za účelem snížení stavební výšky kolektoru.

Obr. 5 ukazuje křivky účinnosti variant kolektorů jako výsledek komplexního modelování tepelných toků v plochém solárním kolektoru. Z grafů je patrná odlišnost v energetické kvalitě mezi vakuovým kolektorem s jedním nízkoemisivním povlakem (VK1 – pouze absorber, VK3 – pouze zasklení) a dvěma nízkoemisivními povlaky (VK2 – absorber, zasklení).

Tab. 2 Koeficienty křivky účinnosti srovnávaných kolektorů vztahované k ploše apertury

Varianta kolektoru	η_0	a_1	a_2
RK	0,822	3,710	0,005
VK1	0,748	2,375	0,004
VK2	0,739	1,551	0,003
VK3	0,730	2,011	0,007
TV	0,656	2,040	0,005
TVR	0,690	1,186	0,004

Do grafu na obr. 6 jsou vyneseny křivky účinnosti plochých vakuových kolektorů společně s typickými křivkami účinnosti trubkového vakuového kolektoru s reflektorem (TVR) a bez něho (TV). Zatímco srovnání v grafu na obr. 5 platí pro vztahování křivky účinnosti k ploše apertury, v grafu na obr. 6 jsou porovnány účinnostní křivky vztahované k hrubé ploše kolektoru, tj. ploše kolektoru, kterou zabírá na střeše (viz nová zkušební norma EN ISO 9806). Vzhledem k tomu, že rozdíl mezi plochou apertury (zasklení) a hrubou plochou se u plochého kolektoru pohybuje okolo 10 %, zatímco u trubkového kolektoru bez reflektoru okolo 40 % a s reflektorem okolo 20 %, vykazují ploché kolektory s vakuovým zasklením vyšší účinnost. Navíc z architektonického pohledu umožňuje plochý solární kolektor daleko jednodušší zakomponování do obálky budovy.

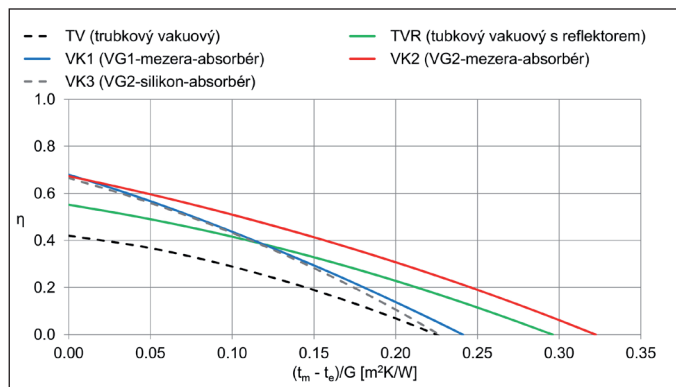


Obr. 5 Křivky účinnosti variant kolektorů – výsledky modelování

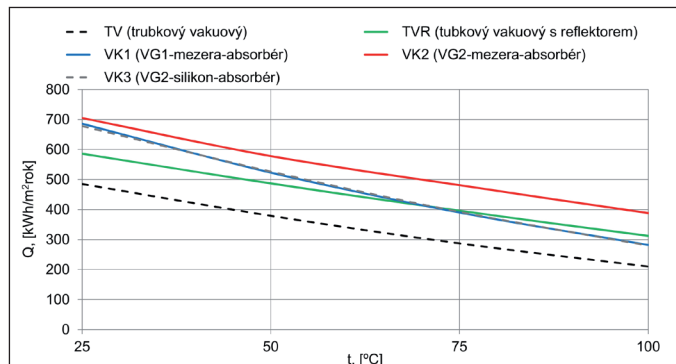
Aplikací ScenoCalc [17] byla modelována výkonnost srovnávaných variant solárních vakuových kolektorů při provozní teplotě 25, 50, 75 a 100 °C a klimatických podmínkách Würzburgu. Jako vstupní údaje byly použity údaje z tab. 2 a dále optické charakteristiky kolektorů. Výkonnost je zde definována jako čistý roční tepelný zisk kolektoru při celoročně konstantní teplotě kapaliny. Výkonnost v kWh/m².rok byla vztažena k hrubé ploše solárního kolektoru. Výsledky jsou uvedeny v tab. 3 a v grafu na obr. 7. Trubkový vakuový solární kolektor bez reflektoru dosahuje nejhorších výsledků. Důvodem je velmi nízká užitečná plocha kolektoru v poměru k hrubé ploše (využívá pouze 60 %). Trubkový vakuový solární kolektor s reflektorem pro nízké provozní teploty do 75 °C dosahuje horších výsledků než ploché vakuové kolektory. V teplotní oblasti nad 75 °C je významně výkonnější pouze varianta plochého vakuového kolektoru VK2. Varianta VK2 má velmi nízké tepelné ztráty z důvodu použití dvou nízkoemisivních povlaků (jeden v zasklení, druhý na absorberu). Při provozní teplotě 100 °C je dosažený rozdíl mezi VK2 a ostatními uvažovanými plochými kolektory s vakuovým zasklením více než 100 kWh/m² ročně. Solární kolektor VK2 vykazuje v porovnání s trubkovým vakuovým kolektorem bez reflektoru při 100 °C téměř dvojnásobné roční tepelné zisky.

Tab. 3 Porovnání tepelných zisků srovnávaných solárních vakuových kolektorů vztažených k hrubé ploše kolektoru

Varianty kolektorů	25 °C	50 °C	75 °C	100 °C
TV [kWh/m ² .rok]	485	379	287	210
TVR [kWh/m ² .rok]	586	487	396	312
VK1 [kWh/m ² .rok]	686	523	390	282
VK2 [kWh/m ² .rok]	705	578	481	388
VK3 [kWh/m ² .rok]	678	526	392	280



Obr. 6 Porovnání účinnosti plochých vakuových kolektorů s trubkovými vakuovými kolektory, vztaženo k hrubé ploše kolektoru



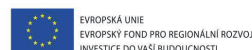
Obr. 7 Porovnání výkonnosti vakuových solárních kolektorů

ZÁVĚR

S využitím matematického modelu byly teoreticky porovnány různé konfigurace plochých vakuových kolektorů postavené na plochem vakuovém zasklení. Výsledky pro uvažované (zatím fiktivní) varianty poukázaly na výrazný potenciál zvýšení účinnosti nejen v oblasti vyšších teplotních úrovní. Na základě analýzy lze nyní přistoupit k praktickému řešení plochého vakuového solárního kolektoru s využitím pokročilého vakuového dvojskla a nízkoemisivního povlaku vysoce propustného pro sluneční záření.

Kontakt na autora: viacheslav.shemelin@uceeb.cz

Tento příspěvek vznikl za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpI č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.



Použité zdroje:

- [1] MATUŠKA, T. *Solární zařízení v příkladech*. GRADA, 2013. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [2] ROMMEL, M., WAGNER, A. Application of transparent insulation materials in improved flat-plate collectors and integrated collector storages. *Solar Energy*. 1992, Volume 49, Issue 5, s. 371–380.
- [3] BENZ, N., BEIKIRCHER T. High efficiency evacuated flat-plate solar collector for process steam production. *Solar Energy*. 1999, Volume 65, Issue 2, s. 111–118.
- [4] Nippon Sheet Glass SPACIA. Technical information [online]. Dostupné z: <http://www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html>
- [5] Pilkington SPACIA Vacuum Glazing Performance data [online]. Dostupné z: <http://www.pilkington.com>
- [6] COLLINS, R. E., SIMKO, T. M. Current status of the science and technology of vacuum glazing. *Solar energy*. 1998, Volume 62, Issue 3, s. 189–213.
- [7] EAMES, P. C. Vacuum glazing: Current performance and future prospects. *Vacuum*. 2008, Volume 82, Issue 7, s. 717–722.
- [8] GIOVANNETTI, F., FÖSTE, S. High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: Applications and performance. *Solar energy*. 2014, Volume 104, s. 52–59.
- [9] MATUSKA, T., ZMRHAL, V. A mathematical model and design tool KOLEKTOR 2.2 reference handbook [online]. 2009. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~matustom/kolektor/Reference_Handbook_KOLEKTOR_012009.pdf
- [10] HOTTEL, H. C., WOERTZ, B. B. The performance of flat plate solar heat collectors. *Transactions of ASME*. 1942, Volume. 64, s. 91–104.
- [11] HOLLANDS, K. G. T. Free convective heat transfer across inclined air layers. *Transactions of ASME. Journal of Heat Transfer*. 1976, Volume 98, s. 189–193.
- [12] SWINBANK, W., C. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. 1963, Volume 89, s. 339–348.
- [13] MCADAMS, W. H. *Heat Transmission*. New York, 1954.
- [14] SHAH, R. K., LONDON, A. L. *Laminar flow forced convection in ducts*. New York: Academic Press, 1978.
- [15] COLBURN, A. P. *Trans. AIChE*. 1933, Volume 29, s. 174–210
- [16] DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd edition. New York: Wiley & Sons, 2006.
- [17] ScenoCalc – a program for calculation of annual solar collector energy output [online]. Dostupné z: <http://www.sp.se/en/index/services/solar/ScenoCalc/Sidor/default.aspx>