

# Sluneční kolektor s transparentní izolací

## Solar collector with transparent insulation

Tomáš MATUŠKA  
ČVUT, fakulta strojní v Praze,  
Ústav techniky prostředí

Recenzoval  
Doc. Ing. Karel Brož, CSc.

Článek uvádí možnosti použití transparentních tepelných izolací jako krycí vrstvy pro aperturu kolektorů slunečního záření. Autor porovnává energetické efekty různých druhů transparentních izolací na kolektorech firmy EKOSOLARIS, a.s. na základě jím sestavených programů KOLEKTOR (stacionární model tepelných toků a ztrát kolektoru) a PROVOZ SK (celoroční provoz kolektoru za podmínek slunečního záření podle referenčního roku pro pražskou oblast). Výpočetové programy byly korigovány podle výsledků měření v solární laboratoři Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze. Výsledky naznačují, že využití voštínových transparentních izolací lze podstatně zvýšit celoroční účinnost kolektoru s neselektivním absorbérem tak, že předčí klasické provedení kolektoru s vysoce selektivním absorbérem.

**Klíčová slova:** kolektor slunečního záření, transparentní tepelné izolace, absorbér selektivní a neselektivní, účinnost.

The possibilities of transparent thermal insulations use in solar collectors are described. Author compares energy savings of different types of transparent insulations used on collectors produced by Czech firm EKOSOLARIS a.s.. Computer programmes KOLEKTOR and PROVOZ\_SK are used for all-year energy savings evaluation. These programmes are based on Reference Year Climate Data for Prague region and were corrected according to real measured results in open Solar Laboratory at Department of Environmental Engineering, CTU Prague. The results confirm that transparent insulation of honeycomb structure applied at usual non-selective absorber is rather more efficient than single-glazed highly selective absorber.

**Key words:** solar collector, transparent thermal insulation, selective and non-selective absorber, efficiency.

V současné době se v oblasti využívání sluneční energie věnuje celosvětově velká pozornost použití transparentních tepelných izolací jako zasklívacích prvků v pasivních i aktivních solárních systémech. Transparentní izolace nabízí obecně dvě významné vlastnosti pro solární techniku: relativně vysokou propustnost slunečního záření a nízkou tepelnou ztrátu. Transparentní tepelné izolace prošly v posledních desetiletích velkým vývojem, od laboratorních experimentů přes první pokusné realizace až do aplikačního stadia.

Tradičním prvkem zasklení v solární technice je sklo. Jeho výhodou je relativně vysoká propustnost slunečního záření, dobrá absorpcie infračerveného záření, odolnost proti poškrábání a vysokým teplotám. Na druhou stranu má však řadu nevýhod jako např. vysokou hustotu a především velkou tepelnou vodivost ( $\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$ ). Součinitel prostupu tepla jednoduchým zasklením je  $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Pro zvýšení izolační schopnosti se zvyšuje počet tabulí, čímž klesne součinitel prostupu tepla na  $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  (dvojsklo) a  $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  (trojsklo). Vícenásobná zasklení však zároveň snižuje propustnost slunečního záření. Transparentní izolace svými dobrými tepelně izolačními vlastnostmi odstraňuje problém vysokých tepelných ztrát tradičního zasklení.

## POUŽITÍ TRANSPARENTNÍCH IZOLACÍ VE SLUNEČNÍCH KOLEKTORECH

Ploché sluneční kolektory jsou nejpoužívanějším typem kolektorů pro přípravu teplé užitkové vody (TUV) s využitím slunečního záření. Jako zasklení se u nich používá tabulové bezpečnostní sklo o tloušťce 4 až 5 mm. Pro sezónní přípravu TUV se používají kolektory s neselektivním absorbérem, pro celoroční přípravu TUV jsou nutné absorbéry selektivní z důvodu snížení využívání tepelné energie, a tedy tepelných ztrát kolektoru v zimním období.

Celková účinnost plochého slunečního kolektoru je závislá na optických a tepelných vlastnostech jeho prvků (zasklení, absorbér, rám kolektoru). Účinnost je dána jednak tzv. optickou účinností (součin propustnosti slunečního záření zasklením a pohltivosti absorbéra) a tepelnou ztrátou kolektoru. Součinitel prostupu tepla krycího skla je okolo  $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , optická účinnost kolektoru je ko-

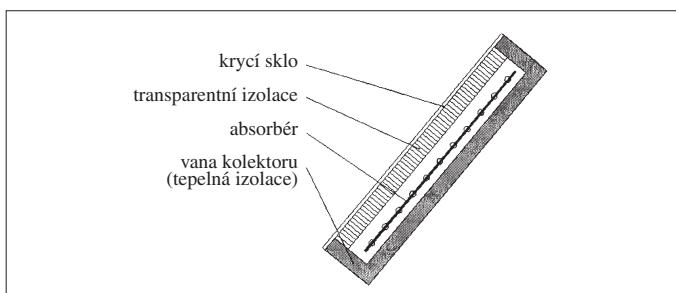
lem 80 %. Zhruba 80 % z celkové tepelné ztráty neselektivního slunečního kolektoru tvorí tepelná ztráta zasklením. V zimním období dochází u takových slunečních kolektorů k velkým tepelným ztrátám, způsobeným využíváním tepelné energie z absorbéra a prostupem tepla zasklením, a tím k výraznému snížení účinnosti. Pro snížení tepelných ztrát se proto využívají tzv. selektivní absorbéry, které snižují tepelné ztráty využíváním. Tepelná ztráta zasklením se tak sníží zhruba na 70 % z celkové tepelné ztráty kolektoru.

Transparentní tepelné izolace jako zasklení slunečních kolektorů umožňují jednak zvýšit celkovou účinnost kolektoru v oblasti provozních parametrů a jednak dosáhnout vyšších provozních teplot. Tepelná ztráta zasklením se výrazně sníží v závislosti na použitém typu transparentní izolace. Použití voštínových transparentních izolací může podíl tepelné ztráty zasklením poklesnout až na 30 % z celkové tepelné ztráty kolektoru. Na druhou stranu se do určité míry zhorší optická účinnost (s poklesem propustnosti slunečního záření zasklením).

## SLUNEČNÍ KOLEKTORY S TRANSPARENTNÍ IZOLACÍ

Pro účely zjišťování potenciálu použití transparentních izolací v aktivních systémech využití slunečního záření (slunečních kolektorech) byly vyrobeny dva sluneční kolektory s výměnným zasklením, aby bylo možné snadno vyměňovat jednotlivé typy transparentních izolací. Kolektor č. 1 byl vyroben na podkladě slunečního kolektoru s neselektivním absorbérem Ekostart Standard (Ekosolaris a.s.). Kolektor č. 2 byl vyroben na podkladě slunečního kolektoru se selektivním absorbérem Ekostart Therma (Ekosolaris a.s.). Tyto kolektory byly vybrány z důvodu zkoumání interakce tepelného chování transparentní izolace a absorbéra (neselektivní, selektivní). Schéma kolektoru s transparentní izolací je na obr. 1.

Kolektor č. 1 má absorpční plochu vytvořenou z měděných trubek a měděných lamel o šířce 110 mm. Horní povrch lamel je opatřen mírně selektivním nátěrem Solarlack M 40 Li (pohltivost absorbéra  $\alpha = 0,95$ , zářivost absorbéra  $\varepsilon = 0,86$ ), spodní povrch lamel není pokryt žádnou vrstvou (lesklá měď). Kolektor č. 2 má selektivní absorpční vrstvu Black crystal™ (fa Thermafin, USA), zajišťující pohltivost absorbéra  $\alpha = 0,95$  a zářivost absorbéra  $\varepsilon = 0,08$ .



Obr. 1 Schéma kolektoru s transparentní izolací

Pro analýzu slunečních kolektorů s transparentní izolací byly použity následující typy transparentních tepelných izolací:

- vícestěnné komůrkové desky Lexan Thermoclear (GE Plastics);
- voštinové struktury Okalux Kapipane (Okalux Kapillarglas GmbH).

Účinnost slunečních kolektorů s transparentní izolací byla porovnávána s účinností původních slunečních kolektorů s tabulovým sklem. Vlastnosti zkoumaných zasklení jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 – Parametry transparentních izolací použitých pro sluneční kolektory

Typ zasklení	Propustnost slunečního záření $\tau_n [-]$	Součinitel prostupu tepla $U [\text{W/m}^2\text{K}]$
Sklo čiré tl. 4 mm	0,88	5,8
Lexan Thermoclear LTC10/2RS	0,76	3,5
Lexan Thermoclear LTC16/3TS	0,70	2,7
Lexan Thermoclear LTC20/5RS	0,60	1,8
Okalux Kapipane 40 mm	0,80	1,5
Okalux Kapipane 82 mm	0,78	1,1
Okalux Kapipane 122 mm	0,77	0,8

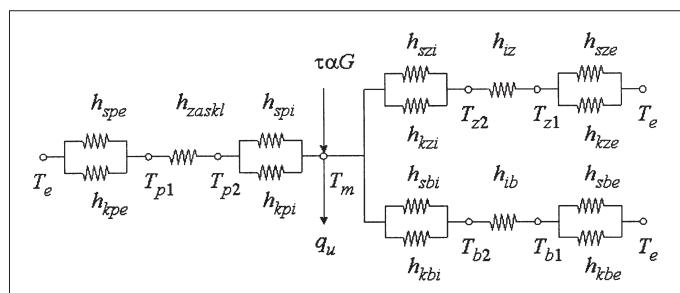
Hodnoty standardního součinitele prostupu tepla  $U$  jednotlivých zasklení byly převzaty z podkladů výrobců, hodnoty propustnosti slunečního záření  $\tau_n$  při normálovém úhlu dopadu byly převzaty z výsledků projektu měření optické propustnosti transparentních izolací [2]. Pro detailní analýzu chování kolektorů byly dále převzaty závislosti propustnosti slunečního záření na úhlu dopadu.

## ANALÝZA

Pro teoretickou analýzu celkové účinnosti slunečních kolektorů s transparentní izolací byl použit stacionární matematický model slunečního kolektoru. Matematický model uvažuje tepelné odpory, resp. součinitely přestupu tepla  $h$ , zastupující jednotlivé režimy přenosu tepla v kolektoru – vedením, konvekcí ( $k$ ), sáláním ( $s$ ) (viz obr. 2).

Pro účely výpočtu byl vytvořen počítačový program KOLEKTOR (Excel, Visual Basic), jehož vstupem jsou parametry slunečního kolektoru – parametry absorberu (pohltivost  $\alpha_a$ , zářivost  $\varepsilon_a$ ), parametry zasklení (tepelná propustnost  $h_{zaskl}$ , propustnost slunečního záření  $\tau_{zaskl}$ , zářivost materiálu zasklení  $\varepsilon_{zaskl}$ ), parametry vany kolektoru (tepelná vodivost izolace  $\lambda_{iz}$ , tloušťka izolace  $\delta_{iz}$ , zářivost povrchu izolace  $\varepsilon_{iz}$ ) – a parametry okolního prostředí (okolní teplota  $T_e$ , intenzita slunečního záření  $G$ , rychlosť větru  $w$ , zářivost okolních povrchů, např. střechy,  $\varepsilon_s$ ). Střední teplota absorberu  $T_m$  je proměnným parametrem.

Jelikož na počátku výpočtu nejsou známy teploty uvnitř kolektoru (teplota na vnější straně zasklení  $T_{p1}$ , teplota na vnitřní straně zasklení  $T_{p2}$ , teplota na vnější straně zadní tepelné izolace kolektoru  $T_{z1}$ , teplota na vnitřní straně zadní tepelné izolace kolektoru  $T_{z2}$ , teplota na vnější straně boční tepelné izolace



Obr. 2 Stacionární tepelně-elektrický model slunečního kolektoru

kolektoru  $T_{b1}$ , teplota na vnitřní straně boční tepelné izolace kolektoru  $T_{b2}$ ) program tyto zvolí a postupným iterováním dosáhne správných hodnot (dosažení rovnováhy tepelných toků v kolektoru).

Matematický model byl porovnán s experimentálním stanovením křivek účinnosti slunečních kolektorů. Účinnost slunečních kolektorů s různými typy transparentních izolací použitými jako zasklení byla měřena v souladu s metodikou uvedenou v normě ISO 9806-1: 1994 – Test methods for solar collectors – Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop [4]. Účinnost (venkovní stacionární test účinnosti) slunečních kolektorů s transparentní izolací byla měřena v solární laboratoři Ústavu techniky prostředí, FSI ČVUT. Měřicí trať byla uzpůsobena k měření dvojice slunečních kolektorů současně a k srovnávacímu měření vždy s jedním typem transparentní izolace, použitým jako zasklení neselektivního a selektivního kolektoru současně.

Matematický model byl pro další použití k analýze slunečních kolektorů s transparentní izolací kalibrován s využitím výsledků měření slunečních kolektorů. Vypočtené teoretické hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami při stejných provozních podmínkách. Neznámé (neurčité) vstupní parametry slunečních kolektorů pro výpočet programem KOLEKTOR byly korigovány (kalibrovány) tak, aby došlo ke shodě ve stanovení účinnosti. Takto kalibrované modely (neselektivní kolektor, selektivní kolektor) byly použity pro všechny ostatní typy zasklení kolektorů.

K vyhodnocování celoročního provozu slunečního kolektoru v podmínkách referenčního roku pro Prahu byl vytvořen počítačový program PROVOZ SK (Excel, Visual Basic). Vstupem programu jsou výstupy programu KOLEKTOR, tzn. křivka účinnosti slunečního kolektoru ve tvaru polynomu 2. stupně  $\eta = a + b \cdot [(T_m - T_e)/G] + c \cdot [(T_m - T_e)/G]^2$ . Program vyhodnocuje v hodinových krocích účinnost kolektoru v závislosti na teplotě okolí, dopadajícím slunečním záření (zvlášť vyhodnocována je přímá a zvlášť difuzní složka slunečního záření), a stavu nabíjení zásobníku během dne, které má přímý vliv na střední teplotu absorberu  $T_m$  (uvažuje se plynulé zvyšování teploty  $T_m$  od 20 do 60 °C během dne). Je uvažována závislost propustnosti slunečního záření zasklení kolektoru na úhlu dopadu slunečních paprsků (u průměru slunečního záření). Program využívá klimatické databáze referenčního roku pro Prahu. Výstupem programu je průměrná celoroční účinnost daného slunečního kolektoru  $\eta_{roční}$ . Výsledky průměrné celoroční účinnosti slunečních kolektorů s jednotlivými zaskleními jsou uvedeny v tab. 2.

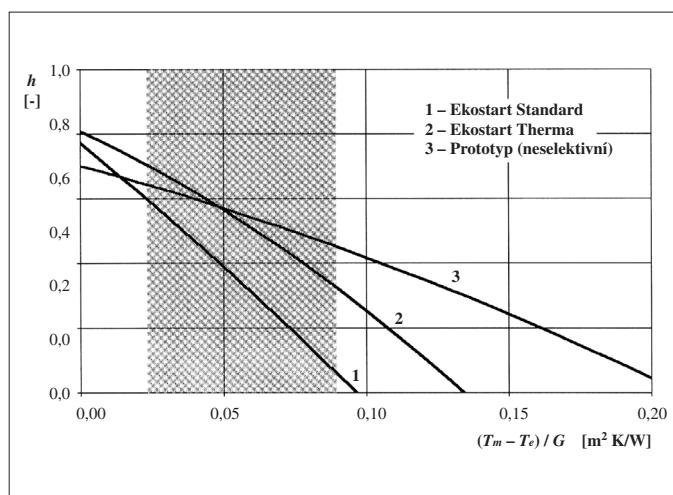
Tab. 2 Porovnání celoroční účinnosti  $\eta_{roční}$  zkoumaných kolektorů

Zasklení	Absorbér	
	Neselektivní	Selektivní
Sklo 4 mm	0,21	0,31
Lexan Thermoclear LTC10/2RS	0,21	0,26
Lexan Thermoclear LTC16/3TS	0,21	0,25
Lexan Thermoclear LTC20/5RS	0,17	0,20
Okalux Kapipane 40 mm + sklo	0,33	0,36
Okalux Kapipane 82 mm + sklo	0,37	0,38
Okalux Kapipane 122 mm + sklo	0,38	0,38

U slunečních kolektorů se strukturami Lexan Thermoclear dochází k výraznému poklesu optické účinnosti (nízká propustnost slunečního záření strukturou). Tím se zhoršuje celková účinnost natolik, že u neselektivního kolektoru je celoroční provoz s takovou strukturou horší, či srovnatelný se základním typem (sklo). Z použití těchto struktur na kolektory s neselektivním absorbérem vyplývá malý či nulový zisk (viz tab. 2). Obdobné výsledky byly získány pro kolektory se selektivním absorbérem, kde oproti základnímu typu selektivního kolektoru (sklo) je celoroční účinnost kolektoru se strukturami Lexan Thermoclear mnohem horší.

Naopak použití voštinových struktur Okalux Kapipane na sluneční kolektory přináší zisk. Z křivek účinnosti a z analýzy celoročního provozu vyplývá, že použití transparentních izolací Okalux Kapipane výrazně zvyšuje účinnost obou typů slunečních kolektorů (neselektivní, selektivní). U kolektoru s neselektivním absorbérem je nárůst celoroční účinnosti zhruba o 15 % oproti původnímu neselektivnímu kolektoru se sklem. U kolektoru se selektivním absorbérem je nárůst o 5 až 7 %.

Navíc kolektor s voštinovou strukturou a neselektivním absorbérem má průměrnou celoroční účinnost vyšší než selektivní kolektor s jednoduchým zasklením (základní typ). Ekonomicky a energeticky náročná výroba selektivního povrchu absorbéru tak může být nahrazena použitím transparentní izolace při zachování přibližně stejné účinnosti.



Obr. 3 Porovnání prototypu neselektivního slunečního kolektoru s transparentní izolací  
Křivka 3 – s kolektory dostupnými na trhu v ČR (Ekostart Standard a Ekostart Therma).  
Rastrem je naznačena pracovní oblast kolektoru, křivky jsou vypočteny pro  $G = 800 \text{ W/m}^2$

## PROTOTYP SLUNEČNÍHO KOLEKTORU S TRANSPARENTNÍ IZOLACÍ

Na základě uvedené analýzy slunečních kolektorů byl navržen sluneční kolektor s transparentní izolací. Jedná se o kolektor s neselektivním absorbérem se zasklením na bázi voštinové struktury tl. 82 mm s ochranným bezpečnostním sklem. Voštinová struktura Okalux Kapipane se pro použití ve slunečních kolektorech ukázala nevhodná z důvodu nízké teplotní odolnosti materiálu. Maximální doporučovaná provozní teplota struktury z PMMA je 80 °C a využívá se proto výhradně ve stavebnictví (pasivní sluneční architektura). Při chodu kolektoru například je možné ve slunečním kolektoru s transparentní izolací dosáhnout teploty až 240 °C. Pro prototyp bylo proto navrženo použít voštinové struktury ze skla, která má stejný průměr i délku voštín (struktura Helioran tl. 80 mm, Glaswerke Arnold GmbH). Podle podkladu výrobce se struktura vyznačuje prakticky stejnými optickými i tepelně-technickými vlastnostmi jako Okalux Kapipane a je proto možné využít výsledky analýzy získané pro struktury Okalux.

Na obr. 3 je uvedeno porovnání křivky účinnosti prototypu slunečního kolektoru na bázi voštinové transparentní izolace tl. 80 mm a neselektivního absorbéru s původním neselektivním kolektorem Ekostart Standard a selektivním kolektorem Ekostart Therma.

Z porovnání celoroční účinnosti prototypu s kolektorem Ekostart Therma (viz tab. 3) je zřejmé, že prototyp dosahuje vyšší účinnosti než sluneční kolektor s kvalitním selektivním absorbérem.

Tab. 3 Porovnání prototypu s původními slunečními kolektory

Typ kolektoru	$\eta_{roční}$ [%]	Plocha [m <sup>2</sup> ]	bez DPH [Kč]	bez DPH [Kč/m <sup>2</sup> ]
Ekostart Standard	21	1.50	8 800	5 867
Ekostart Therma	31	1.50	11 050	7 367
Prototyp Okalux 82 mm	37	1.50	10 800	7 200

Byla zpracována orientační ekonomická analýza reálné ceny prototypu. Prototyp je založen na původním neselektivním kolektoru Ekostart Standard. Místo mírně selektivního laku Solarlack M 40 Li bude pro absorbér použit černý trvanlivý lak  $\alpha/\varepsilon = 0,90/0,90$ . To zlevní výrobu kolektoru zhruba o 800 Kč. Cena transparentní izolace (bez DPH) pro plochu kolektoru 1,50 m<sup>2</sup> je zhruba 2800 Kč (1850 Kč/m<sup>2</sup>). Celková cena bez DPH bude tedy 10 800 Kč. Do odhadu ceny prototypu nebylo zahrnuto zvýšení nákladů na dvojnásobnou tloušťku prototypu oproti původním kolektorům. Porovnání s cenami původních slunečních kolektorů je uvedeno v tab. 3. Z porovnání plyne konkurenceschopnost prototypu slunečního kolektoru s původními slunečními kolektory na trhu v ČR.

## ZÁVĚR

V projektu byl zkoumán potenciál využití transparentních tepelných izolací v plochých slunečních kolektorech. Byl vytvořen matematický model slunečního kolektoru. Standardní metodikou byly změny křivky účinnosti slunečních kolektorů s transparentními izolacemi (neselektivní, selektivní) a naměřené hodnoty byly využity pro kalibraci matematického modelu. Výsledky kalibrovaného modelu (křivka účinnosti ve tvaru polynomu) byly využity k analýze celoročního provozu slunečních kolektorů s transparentní izolací.

Na základě celoroční analýzy byl navržen prototyp slunečního kolektoru s voštinovou strukturou Helioran tl. 80 mm a s neselektivním absorbérem. Prototyp byl porovnán se slunečními kolektory dostupnými na trhu v ČR. Prototyp vypadá nejvyšší celoroční provozní účinnost (%). Porovnání měrné ceny zkoumaných slunečních kolektorů ukázalo dobrou konkurenceschopnost prototypu slunečního kolektoru s transparentní izolací (7 200 Kč/m<sup>2</sup>) s ostatními slunečními kolektory na trhu v ČR.

## Literatura:

- [1] DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes. 2<sup>nd</sup> ed. Wiley Interscience. 1991.
- [2] MATUŠKA, T., BROŽ, K.: Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 1999 č. int. 2399015 – Transparentní tepelné izolace. ČVUT Praha 2000.
- [3] MATUŠKA, T.: Závěrečná zpráva projektu IG2000 č. int. 3000056 – Sluneční kolektor s transparentní izolací. ČVUT Praha 2001.
- [4] Standard ISO 9806-1:1994 – Test methods for solar collectors – Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop. ISO 1994.