

ODHAD ENERGETICKÉHO ZISKU A OPTIMALIZACE ORIENTACE TRUBKOVÝCH VAKUOVÝCH SLUNEČNÍCH KOLEKTORŮ V SOLÁRNÍM SYSTÉMU

Část I. Teoretické podklady a jejich verifikace

MILOSLAV SOURAL*, MAREK LIŠKA**, IVAN PIKNA*

**Výskumný a vývojový ústav sklársky, ul. SNP 20, 912 50 Trenčín*

***Spoločné laboratórium pre základný výskum skla Centra chemického výskumu SAV a Výskumného a vývojového ústavu sklárskeho, ul. SNP 20, 912 50, Trenčín*

Došlo 7. 6. 1988

Byl navržen způsob výpočtu ozáření čelní a zadní pracovní plochy trubkových vakuových slunečních kolektorů přímým, difúzním a odraženým slunečním zářením. Způsob výpočtu bere v úvahu orientaci pracovních ploch kolektoru vzhledem k poloze Slunce na obloze. Navržené vztahy byly ověřeny porovnáním s experimentálními daty.

Dále byla navržena metoda matematické simulace denního průběhu teplot a energetického zisku solárního systému, sestávajícího z vakuových kolektorů, výměníku tepla, zásobníku ohřívané vody a regulačních prvků.

ÚVOD

Přeměna energie slunečního záření v energii tepelnou je jednou z možností náhrady klasických energetických zdrojů. Velkou výhodou tohoto způsobu získávání tepelné energie je její obnovitelnost bez přímého vlivu na životní prostředí, nevýhodou pak nerovnoměrnost a relativně malá hustota toku slunečního záření dopadajícího na zemský povrch.

Abyste získávání tepelné energie tímto způsobem bylo ekonomicky výhodné, musí být příslušná zařízení buď velmi laciná, a tím jednoduchá, nebo musí být jejich vyšší cena vyvážena vysokou účinností a životností. Lze říci, že v posledních letech se vývoj ubírá oběma směry.

V ČSSR byl vyvinut trubkový vakuový sluneční kolektor (dále jen TVK), který svými parametry může být významným přínosem v oblasti solární energetiky jak u nás, tak v zahraničí [1].

TVK je tvořen skleněným krytem válcového tvaru, ve kterém je uzavřen absorbér se spektrálně selektivní absorpční vrstvou, zajišťující vysoký stupeň pohlcování slunečního záření za současně velmi nízkého vyzařování tepelné energie. Teplo vzniklé na absorbéru je odváděno pracovní kapalinou, která proudí kovovým kanálem, jenž je tepelně vodivě spojený s absorbérem, přičemž oba vývody kanálu jsou vakuově těsně vyvedeny přes zátav typu kov—sklo vně skleněného krytu. Minimalizace konvektivních a konduktivních ztrát je zajištěna vyvákuováním vnitřního prostoru skleněného krytu na poměrně velmi nízký tlak 10^{-2} až 10^{-3} Pa, který je indikován a udržován baryovými getry. Celá konstrukce TVK (obr. 1) je řešena tak, aby nebylo nutné používat prvky vyrovnávající rozdílnou úroveň dilatace použitých materiálů. Jednotlivé elementy TVK je možno po jejich uložení a hydraulickém propojení v nosném rámu používat na ohřívání teplé užitkové vody. Hlavní důraz při jejich využití je však kladen na výšeteplotní aplikace pro systémy na vytápění, klimatizaci nebo výrobu chladu. Velmi perspektivní je využití TVK jako sběrače koncentrovaného slunečního záření, ať již pro lineární

čočky nebo různé korytové koncentrátoary. Pracovní teploty se pak mohou pohybovat kolem 250 °C.

Účelnost využívání slunečních kolektorů pro uvedené aplikace je úzce svázaná nejen s lokalitou jejich umístění, ale i s kvalitní projekční přípravou celého solárního systému. V tomto směru je nutné v ČSSR ještě vykonat mnoho práce jak teoretické, tak především experimentální. Nejvíce propracované jsou v současné době systémy nejjednodušší, tedy systémy na ohřev teplé užitkové vody, se kterými máme již některé praktické zkušenosti a hlavně dostatek vstupních dat pro jejich navrhování.

Z tohoto důvodu je i tato práce věnována posouzení možnosti využití TVK pro ohřev teplé užitkové vody se zaměřením na odhad celoročního energetického zisku a na zjištění optimální orientace TVK.

Změnou, popř. doplněním vstupních dat a některých částí (podprogramů) základního výpočetního programu je možné dále popsat výpočet univerzálně používat nejen pro různé lokality umístění TVK, ale i pro různé typy reálných solárních systémů.

VÝPOČET OZÁŘENÍ PRACOVNÍCH PLOCH KOLEKTORU

TVK může zachytávat sluneční záření jak plochou přivrácenou k obloze (čelní plocha), tak plochou přivrácenou k zemskému povrchu (zadní plocha), neboť tato zadní plocha není pokryta tepelnou izolací, nutnou u běžných typů plochých slunečních kolektorů k omezení tepelných ztrát.

Celkové ozáření E pracovní plochy TVK je proto dáno součtem

$$E = E_{\check{c}} + E_z \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (1)$$

kde $E_{\check{c}}$, popř. E_z je ozáření čelní, popř. zadní plochy kolektoru.

Ozáření čelní plochy kolektoru lze rozepsat jako

$$E_{\check{c}} = E_{\check{c}p} + E_{\check{c}d} + E_{\check{c}o} \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (2)$$

přičemž $E_{\check{c}p}$ je ozáření čelní plochy kolektoru přímým slunečním zářením, $E_{\check{c}d}$ je ozáření čelní plochy kolektoru difúzním zářením a $E_{\check{c}o}$ je ozáření čelní plochy kolektoru zářením odraženým.

Obdobně pro ozáření zadní plochy kolektoru platí

$$E_z = E_{zp} + E_{zd} + E_{zo} \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (3)$$

kde jednotlivé indexy p, d, o odpovídají indexům v rovnici (2).

Ozáření libovolně orientované čelní, popř. zadní plochy kolektoru přímým slunečním zářením, je možné vypočítat pomocí vztahu

$$E_{\check{c}p} = {}^N E_p \cdot \cos i \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (4)$$

popř.

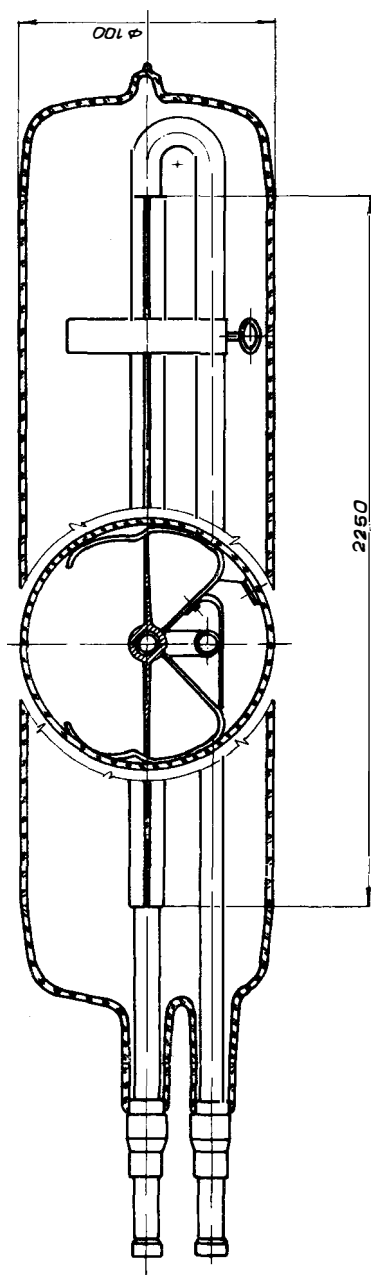
$$E_{zp} = {}^N E_p \cdot \cos i \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (5)$$

kde ${}^N E_p$ je přímé sluneční ozáření plochy kolmé ke směru paprsků slunečního záření a i je úhel dopadu přímého slunečního záření na čelní, popř. zadní plochu kolektoru, tj. ostrý úhel mezi směrem slunečních paprsků a normálou čelní, popř. zadní plochy kolektoru.

Je zřejmé, že platí implikace

$$E_{\check{c}p} > 0 \Rightarrow E_{zp} = 0 \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (6)$$

$$E_{zp} > 0 \Rightarrow E_{\check{c}p} = 0 \quad (\text{Wm}^{-2}). \quad (7)$$



Obr. 1. Konstruktivní řešení trubkového vakuového slunečního kolektoru. Šířka absorberu je 89 mm, čelní plocha absorberu činí 0,2 m².

Vztahy, potřebné k výpočtu výšky Slunce nad obzorem, azimutu slunce a příslušného $\cos i$ v závislosti na orientaci kolektoru jsou podrobně vysvětleny v práci [2].

Ozáření čelní plochy difúzním zářením lze podle práce [3] určit pomocí rovnice

$$E_{\text{čd}} = H E_d \cdot \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (8)$$

kde $H E_d$ je difúzní ozáření horizontální roviny. Úhel β je úhlem sklonu kolektoru, tj. ostrým úhlem, který svírají normály k zemskému povrchu a k ploše kolektoru.

Difúzní záření je maximální na horizontální rovinu, protože je ohraničena celou oblohou hemisférou. Uvažujeme-li, že difúzní záření je přísně izotropní, je možné pro ozáření zadní plochy difúzním zářením napsat

$$E_{\text{zd}} = H E_d - E_{\text{čd}} = H E_d \cdot \left[1 - \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (\text{Wm}^{-2}). \quad (9)$$

Ozáření zadní plochy zářením odraženým od zemského povrchu je možné odhadnout na základě měření uvedených v práci [4]. Zde byla zjištěna lineární závislost intenzity odraženého záření na intenzitě globálního slunečního záření, dopadajícího na horizontální plochu. Měření byla vykonávána při umístění čidla, snímajícího odražené záření, ve výšce 150 cm nad travnatým povrchem. Získaná závislost má tvar

$$H E_o = 0,17 \cdot H E_G + 5,33 \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (10)$$

kde $H E_o$ je ozáření horizontální plochy, přivrácené k zemskému povrchu, $H E_G$ je globální sluneční ozáření horizontální zemské roviny.

Uvedený vztah je platný celoročně pro nížinné oblasti.

Odražené záření je, podobně jako difúzní, maximální na horizontální rovinu, protože je ohraničena celou plochou přilehlého zemského povrchu. Pokud opět přijmeme zjednodušení, že odražené záření je přísně izotropní, je možné s dostatečnou přesností vyjádřit odražené záření, dopadající na zadní a čelní plochu kolektoru, skloněného pod úhlem β , obdobnými rovnicemi jako u záření difúzního

$$E_{\text{zo}} = H E_o \cdot \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (11)$$

$$E_{\text{čo}} = H E_o - E_{\text{zo}} = H E_o \cdot \left[1 - \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (\text{Wm}^{-2}). \quad (12)$$

Uvedená zjednodušení popisu difúzního a odraženého záření, dopadajícího na rovinu obecného sklonu, umožňují jednoduše určit celkovou hodnotu obou složek záření difúzního charakteru, dopadajících na čelní i zadní plochu TVK, jako součet hodnot $H E_d$ a $H E_o$, přičemž velikost tohoto ozáření je zcela nezávislá na orientaci TVK.

VERIFIKACE PLATNOSTI VZTAHŮ, NAVRŽENÝCH PRO VÝPOČET OZÁŘENÍ PRACOVNÍCH PLOCH TVK

Pro ověření opodstatněnosti použití rovnic (8) až (12) a vstupních dat optických vlastností TVK k odhadu energetického zisku TVK byla na jejich základě spočítána teoretická zdánlivá optická účinnost $\gamma_{\text{opt}}^{\text{teor}}$ a porovnána s naměřenou zdánlivou

optickou účinností $z\eta_{\text{opt}}^{\text{mer}}$, která byla získána na základě měření účinnosti TVK ve Státním výzkumném ústavě pro stavbu strojů Praha-Běchovice [5].

Rozdíl mezi zdánlivou optickou účinností a skutečnou optickou účinností je dán způsobem definice referenční plochy (referenční plochou je pouze plocha čelní strany kolektoru) a je úměrný pohlcování světelné energie zadní plochou absorberu.

Měřený kolektor měl absorpční plochu čelní i zadní strany 2 m^2 , přičemž absorberby byly pokryty na obou stranách spektrálně selektivní absorpční vrstvou o hodnotě sluneční absorptivity $P_{\alpha_s}^0 = 0,975$. Tato hodnota platí pro kolmý dopad záření na absorpční plochu. Světelná propustnost skleněného krytu kolektoru $P_{\tau_k}^0 = 0,895$ též platí pro kolmý dopad záření vzhledem k podélné ose skleněného krytu. Obě uvedené hodnoty odpovídají metodice měření účinnosti kolektoru v zemích RVHP [6], použité i pro získání křivky účinnosti TVK. Získaná křivka účinnosti platí pro letní období a pro průměrné ozáření čelní absorpční plochy 853 Wm^{-2} , přičemž úhel sklonu kolektoru β byl 30° . Dále je nutné zavést optickou účinnost kolektoru při ozáření výhradně difúzním zářením $D\eta_{\text{opt}} = 0,796$. Způsob získání hodnot, popisujících optické vlastnosti kolektoru, je uveden v kapitole 6.

Hodnota $z\eta_{\text{opt}}^{\text{mer}} = 0,998$ byla získána z výsledků uvedených v protokolu [5], a to přepočtem z celkové plochy kolektoru na absorpční plochu. Kolektor byl při měření umístěn nad travnatým povrchem.

Protože při měření účinnosti nebyla měřena velikost difúzního záření, odhadli jsme jeho velikost (vzhledem k podmínkám metodiky RVHP) v rozmezí $10-30\%$ z celkového ozáření.

Pro horní hranici 30% difúzního záření je pak možné vyčíslit:

a) Velikost přímého ozáření čelní plochy kolektoru

$$E_{\text{čp}} = 853 \cdot 0,7 = 597,1 \quad \text{Wm}^{-2}. \quad (13)$$

b) Velikost difúzního a odraženého ozáření čelní plochy kolektoru

$$E_{\text{čd}} + E_{\text{čo}} = 853 \cdot 0,3 = 255,9 \quad \text{Wm}^{-2}. \quad (14)$$

c) Velikost globálního ozáření horizontální zemské roviny při průměrné výšce Slunce nad obzorem $57,5^\circ$ (opět dáno metodikou RVHP a měřeným obdobím). Velmi malou odchylku od kolmého dopadu přímého slunečního záření na referenční plochu kolektoru zanedbáváme ($\cos i \doteq 0,999$)

$${}^H E_G = E_{\text{čp}} \cdot \sin 57,5^\circ + E_{\text{čp}} \left[\cos^2 \left(\frac{30^\circ}{2} \right) \right] \quad (\text{Wm}^{-2}). \quad (15)$$

d) Velikost ozáření odraženého na čelní plochu kolektoru

$$E_{\text{čo}} = ({}^H E_G \cdot 0,17 + 5,33) \cdot \left[1 - \cos^2 \left(\frac{30^\circ}{2} \right) \right] \quad (\text{Wm}^{-2}). \quad (16)$$

e) Velikost difúzního ozáření horizontální zemské roviny

$${}^H E_d = E_{\text{čd}} / \left[\cos^2 \left(\frac{30^\circ}{2} \right) \right] = 264,5 \quad \text{Wm}^{-2}. \quad (17)$$

f) Kombinací rovnic (15) až (17) lze vyčíslit velikost ozáření čelní plochy kolektoru difúzním a odraženým zářením, které pro uvedené podmínky mají hodnotu $E_{\text{čd}} = 246,8 \text{ Wm}^{-2}$ a $E_{\text{čo}} = 9,1 \text{ Wm}^{-2}$ a dále velikost ${}^H E_G = 768,1 \text{ Wm}^{-2}$.

g) Velikost ozáření odraženého na horizontální plochu, přivrácenou k zemskému povrchu

$${}^H E_o = {}^H E_G \cdot 0,17 + 5,33 = 135,9 \quad \text{Wm}^{-2}. \quad (18)$$

Teoretická zdánlivá optická účinnost TVK pak bude

$$z\eta_{\text{opt}}^{\text{teor}} = [E_{\text{cp}} \cdot P\tau_K^0 \cdot Pa_S^0 + ({}^H E_d + {}^H E_o) \cdot D\eta_{\text{opt}}] / 853 = 0,984 \quad (19)$$

a obdobně pro dolní hranici 10 % difúzního záření $z\eta_{\text{opt}}^{\text{teor}} = 0,982$. Obě vypočítané hodnoty jsou v přijatelné shodě s hodnotou naměřenou (0,998). Vzhledem k charakteru modelových výpočtů energetického zisku lze považovat navržené vztahy pro výpočet ozáření obou pracovních ploch TVK za vyhovující.

VERIFIKACE ZPŮSOBU VÝPOČTU OZÁŘENÍ PRACOVNÍCH PLOCH TVK

Pro výpočty ozáření obou ploch kolektoru byly použity naměřené průměrné denní průběhy slunečního záření přímého ${}^N E_p$ a průměrné denní průběhy difúzního záření ze dnů s různým stupněm pokrytí oblohy oblačností ${}^H E_d$ pro lokalitu Bratislava-Koliba [7, 8].

V rámci výpočtu energetického zisku solárního systému byla pro případ horizontální orientace pracovních ploch kolektoru ($\beta = 0^\circ$) a při simulaci zakrytí zadní strany kolektoru ($E_z = 0$) vypočtena průměrná denní suma energie globálního záření na jednotkové horizontální rovině (vždy pro 15. den každého měsíce), a to pro den s nepřetržitým slunečním svitem ${}^H Q_{\text{jas}}^{\text{vyp}}$ a pro den bez přímého slunečního záření ${}^H Q_{\text{zam}}^{\text{vyp}}$.

Tabulka I

Porovnání průměrných měsíčních sum energie globálního slunečního záření na jednotkové horizontální rovině, vyplývajících ze způsobu výpočtu ozáření pracovních ploch TVK (${}^H Q_{\text{mes}}^{\text{vyp}}$), s hodnotami určenými na základě pyranometrických měření (${}^H Q_{\text{mes}}^{\text{mer}}$). Pro informaci je uveden i přehled použitých hodnot s_m [9] pro lokalitu Bratislava-Koliba.

Měsíc 1966—1979	s_m (—)	${}^H Q_{\text{mes}}^{\text{vyp}}$ (kWh m ⁻²)	${}^H Q_{\text{mes}}^{\text{mer}}$ (kWh m ⁻²)	●dchykla (%)
leden	0,18	22,757	23,934	—4,9
únor	0,28	39,875	41,158	—3,1
březen	0,37	80,503	84,805	—5,1
duben	0,47	121,991	129,186	—5,6
květen	0,52	164,292	172,670	—4,9
červen	0,51	170,967	176,020	—2,9
červenec	0,52	168,960	171,449	—1,5
srpen	0,53	146,841	149,096	—1,5
září	0,51	103,692	104,321	—0,1
říjen	0,42	62,532	67,849	—7,8
listopad	0,23	28,484	29,435	—3,2
prosinec	0,18	18,755	20,154	—6,9
Rok		1129,649	1170,077	—3,5

Průměrná měsíční suma energie globálního slunečního záření na jednotkové horizontální rovině HQ_{mes}^{vyp} pak byla vypočtena jako

$$HQ_{mes}^{vyp} = [HQ_{jas}^{vyp} \cdot s_m + HQ_{zam}^{vyp} \cdot (1 - s_m)] \cdot N \quad (Jm^{-2}), \quad (20)$$

kde s_m je hodnota průměrného měsíčního slunečního svitu, který je definován jako podíl skutečného slunečního svitu k svitu astronomicky možnému v daném měsíci a lokalitě, N je počet kalendářních dnů v daném měsíci.

Hodnoty HQ_{mes}^{vyp} pak byly po přepočtu na rozměr kWh m⁻² porovnány se skutečnými hodnotami průměrných měsíčních sum energie globálního slunečního záření HQ_{mes}^{mer} , získaných pyranometrickým měřením z dané lokality a časového období [9].

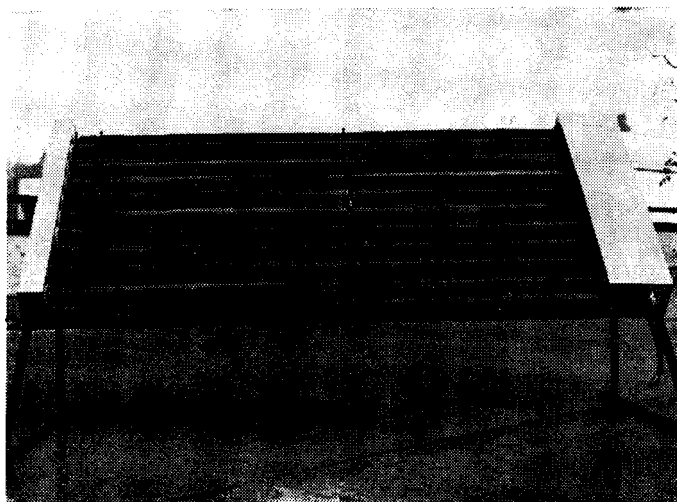
Porovnání těchto údajů a jejich relativní odchylky jsou uvedeny v tabulce I.

Rozdíly mezi hodnotami HQ_{mes}^{vyp} a HQ_{mes}^{mer} jsou z hlediska praktického využití odhadu energetického zisku solárního systému přijatelné. Způsob výpočtu ozáření čelní plochy kolektoru E_c lze proto považovat za dostatečně přesný.

SOLÁRNÍ SYSTÉM NA OHŘEV TEPLÉ UŽITKOVÉ VODY

Solární systém byl navržen v rámci vývoje TVK [1] a skládá se z kolektorového pole, výměníku tepla, zásobníku teplé vody, rozvodného potrubí a regulace systému.

Kolektorové pole se skládá ze šesti jednotek — rámců (obr. 2), z nichž každý má čelní absorpční plochu 2 m², celkem tedy 12 m². Tyto jednotky jsou zapojeny sériovo-parallelně, přičemž v uvažovaném případě je 6 paralelních větví. Předpokládá se, že všechny rámy mají shodné parametry a že kolektorové pole je umístěno na travnaté ploše, která není stíněna terénními nerovnostmi nebo okolními objekty.



Obr. 2. Rám s trubkovými vakuovými slunečními kolektory. Celková čelní plocha absorbérů činí 2 m². Jednotlivé kolektory jsou v rámu propojeny do série.

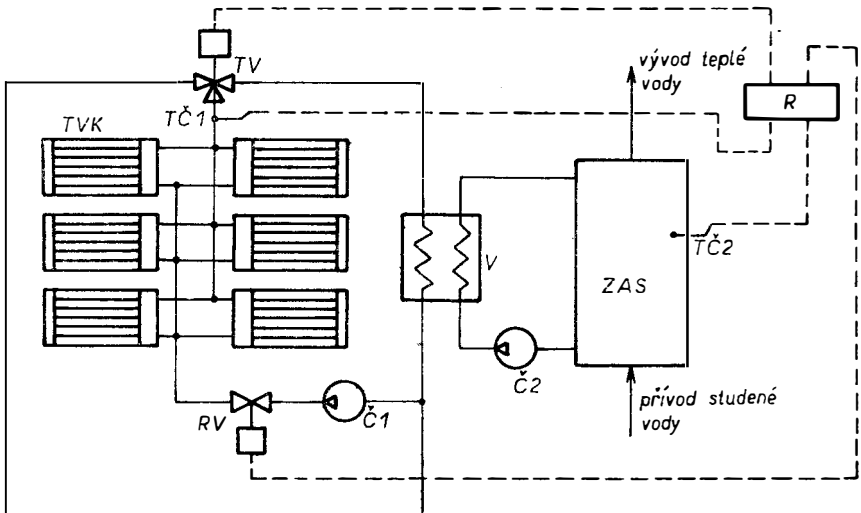
System na ohřev teplé užitkové vody je možno rozdělit na dva samostatné okruhy. Primární okruh, v němž cirkuluje pracovní kapalina, a sekundární okruh, v němž cirkuluje ohříváná voda. Při výpočtu není uvažováno s objemem kapaliny v rozvodném potrubí jak primárního, tak sekundárního okruhu, neuvažují se proto tepelné ztráty ani akumulace tepla v těchto místech.

Výměník tepla je samostatným členem (nejedná se tedy např. o systém, kdy teplosměnná plocha je přímo zabudovaná v zásobníku). Do výměníku tepla vstupuje ohřátá pracovní kapalina z výstupu kolektorového pole, odevzdává část tepelné energie (která je určena účinností výměníku) ohříváné vodě, jež přes zásobník cirkuluje ve výměníku. Ochlazená pracovní kapalina je z výměníku vedena na vstup kolektorového pole. Pro potřeby uváděných simulačních výpočtů byla zvolená 90 %ní účinnost výměníku při všech pracovních režimech.

Zásobník ohříváné vody má obsah 1 250 kg vody, tedy asi 100 kg ohříváné vody na 1 m² absorpční plochy. Vzhledem k promíchávání obsahu zásobníku cirkulací kapaliny v sekundárním okruhu může být teplota vody v zásobníku považována v celém jeho objemu za konstantní. Tepelné ztráty zásobníku se zanedbaly.

Regulace systému zabezpečuje změnu průtoku pracovní kapaliny v závislosti na její teplotě a ovládá činnost trojcestného ventilu, který otvírá nebo uzavírá průchod pracovní kapaliny přes výměník tepla.

Zjednodušené schéma solárního systému na ohřev teplé užitkové vody je na obr. 3.



Obr. 3. Zjednodušené schéma uvažovaného solárního systému na ohřev teplé užitkové vody.

- Legenda: TVK — Rámy trubkových vakuových kolektorů
 TV — Trojcestný ventil
 RV — Regulační ventil průtoku
 Č 1 — Čerpadlo primárního okruhu
 Č 2 — Čerpadlo sekundárního okruhu
 TČ 1 — Snímač teploty na výstupu kolektorového pole
 TČ 2 — Snímač teploty vody v zásobníku
 V — Výměník tepla
 ZAS — Zásobník ohříváné vody
 R — Regulátor

URČENÍ PRŮBĚHU TEPLOT PRACOVNÍ KAPALINY

Pro výpočet energetického zisku stačí určit průběh teplot pracovní kapaliny pouze v jedné paralelní větvi.

Je zřejmé, že časový průběh teplot pracovní kapaliny i ohřívané vody má spojitý charakter. Při numerickém simulačním výpočtu nahrazujeme spojitý průběh postupností diskretních stavů. Proto byla absorpční plocha jedné z paralelních větví rozdělena na určitý konečný počet dílků. Vzhledem ke způsobu načítání hodnot ozáření (nejsou uvažovány velké změny ozáření během menších časových úseků vlivem oblačnosti) byl jako základ určen jeden element TVK, takže jeden dílek odpovídá $S_1 = 0,2 \text{ m}^2$ absorpční plochy. Počet dílku n při daném výpočtu je pak dán

$$n = 10 \cdot s \quad (-), \quad (21)$$

kde s je počet rámu v sérii jedné paralelní větve. Geometrické diskretizaci absorpční plochy odpovídá způsob výpočtu v diskretních časových krocích, přičemž délka jednoho kroku je dána průtokem pracovní kapaliny a hmotností pracovní kapaliny, odpovídající jednomu dílku absorpční plochy. Hmotnostní průtok jednou paralelní větví byl ohraničen hodnotami 30–120 kg za hodinu. Při jejich návrhu byl brán ohled na zabezpečení dostatečného koeficientu přestupu tepla na straně jedné a na zamezení neúměrného zvýšení hydraulických ztrát v systému na straně druhé. Jestliže jeden rám kolektoru má obsah pracovní kapaliny rovný 3,6 kg, jeden dílek představuje $m_1 = 0,36 \text{ kg}$ a délka časového kroku bude proměnná v závislosti na průtoku v rozmezí přibližně 10–40 s.

Změna průtoku je ve výpočetním programu upravována v každém časovém kroku na základě porovnání teploty na výstupu kolektoru T_{vy} s optimální teplotou na výstupu kolektoru T_{vy}^{optim} , která je zadávána vztahem

$$T_{vy}^{optim} = T_{zas} + \Delta T_{RP} \quad (^\circ\text{C}), \quad (22)$$

kde ΔT_{RP} je konstanta, daná pracovním režimem solárního systému, T_{zas} je okamžitá teplota vody v zásobníku. Konstanta ΔT_{RP} byla pro uvažovaný systém navržena na základě zkušeností, získaných při měření solárního systému ve Výzkumném a vývojovém ústavu sklářském Trenčín a bere v úvahu mimo jiné i vliv oblačnosti na chování systému.

Základem výpočtu průběhu teploty pracovní kapaliny je představa, že během časového kroku zůstává pracovní kapalina v místě, odpovídajícím příslušnému dílku absorpční plochy. Po ukončení tohoto kroku se skokem přemístí do dílku následujícího, přičemž teplota pracovní kapaliny je změněna v závislosti na pracovním režimu kolektoru v sledovaném časovém kroku.

Po výpočtu změny teploty pracovní kapaliny je ve výpočetním programu zařazen rozhodovací člen, který v podstatě simuluje regulaci systému a který porovnává velikost teploty v posledním dílku na výstupu jedné paralelní větve kolektorové plochy s hodnotou T_{vy}^{min} , nastavenou na regulátoru, přičemž

$$T_{vy}^{min} = T_{zas} + \Delta T_{RS} \quad (^\circ\text{C}), \quad (23)$$

kde ΔT_{RS} je konstanta, která udává minimální rozdíl teplot mezi výstupem z kolektorového pole a okamžitou teplotou v zásobníku, kdy je již výhodné vést pracovní kapalinu přes výměník tepla.

Je-li teplota na výstupu kolektoru větší nebo rovna teplotě T_{vy}^{min} , otevře se větev primárního okruhu, vedoucí k výměníku, a dojde k předání tepla příslušného

množství pracovní kapaliny ohříváné vodě a v konečném důsledku ke zvýšení teploty ohříváné vody v zásobníku. Teplota ochlazené pracovní kapaliny z výměníku je pak přiřazena prvnímu dílku (vstup kolektoru). Pokud je teplota na výstupu kolektoru menší než hodnota T_{vy}^{\min} , je tato teplota přiřazena beze změny prvnímu dílku paralelní větve. Jedná se tedy o pracovní režim při zkratovaném vstupu — výstupu kolektorového pole.

Výpočet změny teploty pracovní kapaliny v každém dílku kolektorové plochy za dobu časového kroku byl proveden na základě rovnice účinnosti TVK, která byla pro pracovní kapalinu Solaren 30 naměřena ve SVÚSS Praha-Běchovice [5]. Rovnice účinnosti byla vztažena na 1 m^2 čelní absorpční plochy a lze ji do hodnot parametru $A = 0,06 \text{ m}^2 \text{ kW}^{-1}$ vyjádřit vztahem

$$\eta = 0,998 - 6,448 \cdot A \quad (-), \quad (24)$$

přičemž

$$A = \frac{T_K - T_o}{E_c} \quad (\text{m}^2 \text{ KW}^{-1}), \quad (25)$$

a η je účinnost TVK při nezacloněné zadní ploše, T_K je střední teplota pracovní kapaliny v kolektoru a T_o je střední teplota okolí za měřený časový úsek.

Obecně má křivka účinnosti tvar, který lze s dostatečnou přesností vyjádřit vztahem

$$\eta = \eta_{opt}^0 \cdot F_K \cdot F_a - U \cdot A \quad (-), \quad (26)$$

kde η_{opt}^0 je maximální optická účinnost kolektoru, F_K , resp. F_a jsou korekční faktory, udávající změnu světelné propustnosti skleněného krytu, resp. absorptivity absorpční vrstvy na úhlu dopadu přímého slunečního záření a na poměru záření difúzního k záření globálnímu, U je koeficient tepelných ztrát kolektoru, který je závislý na více parametrech a podle literatury [10] jej lze dostatečně přesně při určitých limitujících podmínkách popsat vztahem

$$U = U_o + U_1 \cdot (T_K - T_o) \quad (\text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}), \quad (27)$$

kde U_o a U_1 jsou konstanty, takže křivka účinnosti má potom tvar paraboly.

Nejdůležitějšími parametry teplotní závislosti koeficientu U jsou:

a) Hmotnostní průtok pracovní kapaliny a její druh

Oba tyto parametry v podstatě určují koeficient prostupu tepla ve směru teplovodní kanál — pracovní kapalina. Hmotnostní průtok pracovní kapaliny Solaren 30 se pohyboval při měření účinnosti v rozmezí 77 až 133 kg za h. Uvažovaný průtok ve výpočtu je 30 až 120 kg za h.

b) Teplota okolí

Teplota okolí se pohybovala při měření křivky účinnosti v rozmezí 21 až 31,5 °C, průměrně 26,5 °C. Vzhledem k ostatním ročním obdobím jde o poměrně vysoké teploty. Z tohoto hlediska lze hodnotu koeficientu U považovat za maximální. Když uvážíme tepelně izolační vlastnosti vakua, jsou tepelné ztráty vyzařováním dominující. Na základě Stefanova—Boltzmannova zákona proto tepelné ztráty rostou nejen s rozdílem $T_K - T_o$, ale i se stoupající hodnotou T_o .

c) Rychlost větru

Rychlost větru se při měření křivky účinnosti pohybovala v rozmezí 0 až 4,8 ms⁻¹.

d) Parametry, dané konstrukcí kolektoru

Jsou dány typem kolektoru a vlastnostmi absorpční vrstvy. Měřený prototyp

kolektoru měl absorpční vrstvu s tepelnou emisivitou $\epsilon_T \doteq 0,35$ (platí pro 60°C). Vysoká hodnota ϵ_T (a tím i koeficientu U) byla ovlivněna skutečností, že výrobce (VVÚ-ZSNP n. p., Žiar nad Hronom) neměl v době výroby měřeného TVK ještě optimalizovanou technologii výroby absorpční vrstvy a též technologii výroby TVK (vysoká teplota odplyňování).

e) Stupeň pokrytí oblohy oblačností, tepelné vyzařování terénu a okolních objektů

Oblačnost zvyšuje tepelnou emisivitu oblohy a tím snižuje tepelné ztráty kolektoru, obdobně působí i tepelné vyzařování terénu a objektů v místě umístění kolektoru.

Křivka účinnosti byla proměřena v letním období, kdy hodnoty E_c dosahovaly velikosti 763 až 924 Wm^{-2} , průměrně 853 Wm^{-2} . Získané účinnosti kolektoru při tomto průměrném ozáření odpovídají maximální průměrné teplotě pracovní kapaliny v TVK $T_{K, \max} \doteq 50 + T_0$ a proměřená část křivky účinnosti tedy pokrývá celý rozsah teplot pracovní kapaliny. Získaná hodnota $U = 6,448 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ potom odpovídá průměrné teplotě pracovní kapaliny $T_K \doteq 25 + T_0$ při $T_0 = 26,5^\circ\text{C}$. Z průběhu křivek účinnosti podobných zařízení [17], jež udávají závislost účinnosti kolektoru na parametru A při konstantním ozáření, dále vyplývá, že v uvažovaném rozsahu parametru A lze bez podstatné chyby nahradit koeficient U konstantní hodnotou. Dále je zřejmé, že se snižujícím se průměrným ozářením kolektoru se zmenšuje i sklon křivek účinnosti kolektoru, tedy zvyšuje se hodnota parametru A , kterému odpovídá nulová účinnost kolektoru.

Tepelné ztráty uvažovaného TVK můžeme tedy vyjádřit vztahem

$$W_{ztr} = 6,448(\bar{T}_K - \bar{T}_0) \quad (\text{Wm}^{-2}). \quad (28)$$

Pokud uvažujeme, že

$$\bar{T}_K = (T_k + T_{k+1})/2 \quad (^\circ\text{C}), \quad (29)$$

kde T_k , resp. T_{k+1} je teplota pracovní kapaliny na začátku, popř. na konci časového kroku, můžeme z energetické bilance pro jeden dílek absorpční plochy napsat

$$W_{opt} = \dot{m} \cdot \bar{c}_p^{S30} \cdot (T_{k+1} - T_k) + U \cdot \left[\frac{T_{k+1} + T_k}{2} - T_0 \right] \cdot S_1 \quad (\text{W}), \quad (30)$$

a vyjádřit

$$T_{k+1} = \frac{W_{opt} + S_1 \cdot U \cdot \bar{T}_0 - T_k \cdot (0,5 \cdot S_1 \cdot U - \dot{m} \cdot \bar{c}_p^{S30})}{0,5 \cdot S_1 \cdot U + \dot{m} \cdot \bar{c}_p^{S30}} \quad (^\circ\text{C}), \quad (31)$$

kde W_{opt} je energetický příkon slunečního záření, přeměněného na teplo, v jednom dílku absorpční plochy na obou stranách kolektoru, \dot{m} je hmotnostní průtok pracovní kapaliny Solaren 30 a \bar{c}_p^{S30} je příslušné střední měrné teplo. Závislost tohoto měrného tepla na teplotě byla ve výpočtu popsána vztahem

$$\bar{c}_p^{S30} = 3\,350,45 + 5,515 \cdot T \quad (\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}). \quad (32)$$

Výpočet W_{opt} je daný rovnicí

$$W_{opt} = [(E_{\epsilon p} + E_{z p}) \cdot P_{\tau K} \cdot P_{a s} + (H E_{\text{d}} + H E_o) \cdot D \eta_{opt}] \cdot S_1 \quad (\text{W}), \quad (33)$$

popř.

$$W_{opt} = [E_{\epsilon p} \cdot P_{\tau K} \cdot P_{a s} + [E_{\epsilon d} + E_{\epsilon o}) \cdot D \eta_{opt}] \cdot S_1 \quad (\text{W}), \quad (34)$$

pro simulaci zastínění zadní pracovní plochy.

V těchto rovnicích vystupují veličiny $P\tau_K$, Pa_S , $D\eta_{opt}$, popisující optické vlastnosti skleněného krytu a absorpční vrstvy. Jejich význam je tento:

$P\tau_K$ je světelná propustnost skleněného krytu při obecném úhlu dopadu přímého slunečního záření na skleněný kryt kolektoru a lze ji aproximovat vztahem [11]

$$P\tau_K = P\tau_K^0 \cdot [1 - B(\cos^{-1}\Theta - 1)] \quad (-), \quad (35)$$

kde $P\tau_K^0$ je světelná propustnost skleněného krytu pro kolmý dopad slunečního záření vzhledem k podélné ose skleněného krytu. Tato propustnost, vypočtená pro trubici ze skla Simax vnějšího průměru 100 mm a tloušťce stěny 3 mm intergrací přes šířku absorberu 89 mm, má hodnotu 0,895 [12]. Úhel Θ je úhlem mezi směrem slunečního záření a normálou k podélné ose skleněného krytu v rovině, vymezené směrem slunečního záření a osou skleněného krytu. Tento úhel lze pro horizontální orientaci TVK vypočítat ze vztahu

$$\Theta = \arcsin [\cos h_0 \cdot \sin (A_K - A_S)] \quad (^\circ), \quad (36)$$

kde h_0 je výška Slunce nad obzorem, A_K je azimut horizontální normály k podélné ose kolektoru a A_S je azimut Slunce. B je konstanta pro daný skleněný kryt, její hodnotu lze určit např. regresní analýzou naměřených nebo teoreticky vypočítaných hodnot $P\tau_K$.

Pa_S je sluneční absorptivita použité absorpční vrstvy pro obecný úhel dopadu přímého slunečního záření, která byla proměřena v rozmezí úhlu $i = 0-45^\circ$. Pro úhel $i = 0^\circ$ (kolmý dopad záření) je sluneční absorptivita označena symbolem Pa_S^0 a její hodnota je 0,975 (pro $M_A = 1,5$). Směrová účinnost absorpční vrstvy je velmi dobrá a hodnota Pa_S klesne v uvedeném intervalu úhlů dopadu přibližně o 3%. Protože významnost úhlu $i > 45^\circ$ pro odhad energetického zisku je jen velmi malá, byla Pa_S aproximována lineárně pro všechny úhly rovnicí

$$Pa_S = Pa_S^0 \cdot \left(1 - \frac{0,03}{45} \cdot i\right) \quad (-). \quad (37)$$

$D\eta_{opt}$ je optická účinnost kolektoru pro difúzní záření a byla získána z rovnice účinnosti kolektoru při zacloněné zadní straně a při ozáření výhradně difúzním zářením. Její hodnota byla určena jako konstanta o velikosti 0,796.

VÝPOČET ÚČINNOSTI SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

Teplu, předané ve výměníku za příslušný časový krok ohřívané vodě pracovní kapalinou, je (viz popis výpočetního podprogramu SOLDAY v Části II)

$$q_{vym} = p \cdot (T_{vy} - T_{vs}) \cdot m_1 \cdot \bar{c}_p^{S30} \quad (J), \quad (38)$$

kde p je počet paralelních větví.

Teplu q_{vym} zvýší teplotu vody v zásobníku o hodnotu

$$\Delta T = q_{vym} / (m_{z\acute{a}s} \cdot \bar{c}_p^{H2O}) \quad (^\circ C), \quad (39)$$

kde $m_{z\acute{a}s}$ je hmotnost vody v zásobníku a \bar{c}_p^{H2O} je příslušné střední měrné teplo vody.

Výpočty energetického zisku solárního systému byly vykonány pro den s nepřetržitým slunečním svitem a pro den bez slunečního svitu. Na konci příslušného dne lze pak zjistit denní zisk tepelné energie

$$q_{jas} = m_{zas} \cdot \int_{T_{zas, jas}^1}^{T_{zas, jas}^2} c_p^{H_2O} dT = \sum q_{vym} \quad (J), \quad (40)$$

pro den s nepřetržitým slunečním svitem, kde $T_{zas, jas}^1$, resp. $T_{zas, jas}^2$ je teplota vody v zásobníku na počátku, resp. na konci dne (analogicky určíme q_{zam} pro den bez slunečního svitu). Hodnoty q_{jas} a q_{zam} je možné zjistit i sumací tepelné energie q_{vym} za příslušný den. Tento způsob je nutné použít v případě, kdy se v průběhu dne počítá s odběrem teplé vody ze zásobníku.

Průměrný měsíční zisk tepelné energie q_{mes} byl počítán na základě vztahu

$$q_{mes} = [q_{jas} \cdot s_m + q_{zam} \cdot (1 - s_m)] \cdot N \quad (J). \quad (41)$$

Průměrná účinnost solárního systému byla vztažena na energii slunečního záření, dopadlého na obě pracovní plochy obecně orientovaného TVK v příslušném časovém období.

ZÁVĚR

Spojením navržené metody výpočtu ozáření pracovních ploch kolektoru, ověření srovnáním s experimentálně získanými výsledky, a vypracované metody popisu průběhu teplot pracovní kapaliny v kolektorovém poli se získaly podklady pro sestavení obecného výpočetního algoritmu numerické simulace činnosti TVK.

Opis programu, vypracovaného pro samočinný číslicový počítač, bude předmětem další části předkládané práce.

Použité symboly a označení

a_s	sluneční absorptivita
A	parametr účinnosti slunečních kolektorů
A_K, A_S	azimut normály pracovní plochy kolektoru, resp. Slunce
B	konstanta pro daný typ skleněného krytu
c_p, \bar{c}_p	specifické měrné teplo, popř. jeho střední hodnota
e_T	tepelná emisivita
E, E_z, E_z	ozáření pracovních ploch kolektoru: celkové, čelní, resp. zadní plochy
F_K, F_a	korekční faktory výpočtu optických ztrát
h_o	výška Slunce nad obzorem
i	úhel dopadu přímého záření
m, \dot{m}	hmotnost, resp. hmotnostní průtok
n	počet dílků
p	počet paralelních větví
q, q_{vym}	tepelná energie, resp. tepelná energie předaná ve výměníku tepla
Q	energie slunečního záření
s	počet rámvů v sérii
s_m	průměrný měsíční relativní sluneční svit
T	teplota
$T_{vy}^{optim}, T_{vy}^{min}$	optimální, resp. minimální požadovaná pracovní teplota

\bar{T}_K, \bar{T}_0	střední teplota pracovní kapaliny v kolektoru, resp. střední teplota okolí
$\Delta T_{RP}, \Delta T_{RS}$	rozdíl teplot, nastavený na regulátoru průtoku, resp. regulátoru solárního systému
U, U_0, U_1	koefficient tepelných ztrát, resp. konstanty v jeho vyjádření rovnicí II. řádu
W_{opt}, W_{ztr}	energetický tok světelného záření, přeměněného na teplo, resp. tepelných ztrát
β	úhel sklonu roviny
η, η_{opt}	účinnost, resp. optická účinnost slunečního kolektoru
Θ	úhel, potřebný k výpočtu světelných ztrát skleněného krytu
τ_K	světelná propustnost skleněného krytu

Index vpravo dole

p, d, o	přímé, difúzní resp. odražené
G	globální
jas, zam	platí pro jeden den s nepřetržitým slunečním svitem, resp. bez slunečního svitu
vs, vý	vstup, výstup
zás	zásobník
k	index dílku
l	platí pro jeden dílek

Index vlevo nahoře

N	platí pro kolmý dopad
H	odpovídá horizontální rovině
P	platí pro přímé záření
D	platí pro difúzní záření
Z	zdanlivé

Index vpravo nahoře

měř	naměřená hodnota
teor	teoretická hodnota
vyp	vypočítaná hodnota
o	maximální hodnota
S30, H ₂ O	platí pro Solaren 30, resp. vodu
1, 2	počáteční, resp. konečný stav jednoho dne

Literatura

- [1] Píkna I., Sural M., Kandráč J.: Růrové vákuové kolektory. Závěrečná výskumná správa úlohy A 02-124-113 DÚ 05 — Textová část, Výskumný a vývojový ústav sklársky, Trenčín 1985.
- [2] Mikler J.: Stav. čas 31, 395 (1983).
- [3] Štastný P.: Energetická bilancia zemského povrchu vybranej časti Východoslovenského kraja. Kandidátská disertační práce, Slovenský hydrometeorologický ústav, pobočka Košice 1986.
- [4] Smolen F.: Časové a priestorové zmeny radiačných tokov v prízemnej vrstve atmosféry. Doktorská disertační práce, Ústav stavebníctva a architektúry SAV, Bratislava 1986

- [5] Funkční charakteristika slunečního trubčového vakuovaného kolektoru. Protokol číslo 85-05 P 15 E, Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů, Praha 9-Běchovice 1985.
- [6] Metodika ispytaní ploškových kolektorů solárních vodohřevatelů s židkostným teplosносителем. Příloha protokolu o schůzi expertů ze RVHP, Taškent 1979.
- [7] Smolen F.: Geogr. čas. 32, 4 (1980).
- [8] Smolen F.: Geogr. čas. 29, 4 (1977).
- [9] Kittler R., Mikler J.: *Základy využívání slunečního žiření*. VEDA, Bratislava 1986.
- [10] Guisan O., Mermoud A., Rudaz O.: Development and performance evaluation of a large solar energy facility using evacuated collectors in connection with a district heating system INTERIM REPORT for IEA TASK VI. MEETING, SYDNEY, august 1983.
- [11] Guisan O., Mermoud A., Lachal B., Rudaz O.: Evacuated collector system characterization. Interní publikace, Section de Physique, University of Geneva, 32 Bd d'Yvoy, Ženeva 1985.
- [12] Liška M., Soural M.: Výpočet světelné propustnosti válcového krytu slunečních kolektorů. (Připraveno k publikaci.)

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРИБЫЛИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОРИЕНТАЦИИ ТРУБЧАТЫХ ВАКУУМИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СОЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ

I. Теоретические основания и их верификация

Милослав Соурал*, Марек Лишка**, Иван Пикна*

**Научно-исследовательский и проектный институт стекла,
ул. SNP 20, 912 50 Тренчин*

***Общая лаборатория для основного исследования стекла Центра химического
исследования САН и Научно-исследовательского и проектного института стекла,
ул. SNP 20, 912 50 Тренчин*

Суммарная радиация рабочих поверхностей трубчатого вакуумированного солнечного коллектора дана суммой радиации передней и задней поверхностей [1], которую можно далее подразделить на прямую радиацию, рассеянную радиацию и отраженную солнечную радиацию (2, 3). Отдельные доли радиации зависят от угла i солнечных лучей с нормалью рабочей поверхности (прямая радиация (4, 5)) и угла наклона рабочих поверхностей β (диффузионная и отраженная радиация (8—12)). Справедливость приводимых соотношений проверялась сопоставлением рассчитанной и экспериментальным путем полученной величины кажущейся оптической эффективности вакуумированного коллектора (13—19). Для расчета радиации использовали отношение s_m между действительным и астрономически возможным солнечным блеском в данный период времени (месяц) и месте нахождения (Братислава) и среднесуточные величины прямой и диффузионной радиации в данном месте нахождения, полученные из долгосрочных средних величин (20). Верификацию метода расчета радиации проводили, сопоставляя результаты пиранометрических изменений с величинами, рассчитанными для горизонтальной ориентации коллектора (табл. I). Относительное отклонение за период одного года составляет 3,5 %.

Далее была предложена солнечная система, состоящая из первичной цепи рабочей жидкости (поле коллектора, элементы регуляции, бак теплообмена) и вторичной цепи нагреваемой воды (бак теплообмена, аккумулятор). Ограниченной регулировкой течения обеспечивается оптимальная разность температур между выходом из поля коллектора и аккумулятором. Дальнейшим элементом регулировки обеспечивается рециркуляция рабочей жидкости в поле коллектора при недостаточной температуре рабочей жидкости на его выходе в сопоставлении с температурой нагреваемой воды в аккумуляторе. Для приводимой солярной системы предлагается метод математической суммуляции среднедневного хода температур и энергетической прибыли, исходящий из дискретизации временной оси в небольших интервалах Δt . Нагрев рабочей жидкости в поле коллектора зависит от моментальной температуры окружающей среды, коэффициента тепловых потерь коллектора и моментальной энергетической мощности Солнца (31).

Рис. 1. Конструктивное решение трубчатого вакуумированного солнечного коллектора. Ширина абсорбера — 89 мм, передняя поверхность абсорбера — 0,2 м².

Рис. 2. Рама с трубчатыми вакуумированными солнечными коллекторами. Общая передняя поверхность абсорберов составляет 2 м². Отдельные коллекторы в раме последовательно связаны.

Рис. 3. Упрощенная схема рассматриваемой солнечной системы, предназначенной для нагрева горячей воды для хозяйственных целей; TV — трехходовой вентиль, RV — вентиль регулировки течения, Č1 — насос первичной цепи, Č2 — насос, вторичной цепи, TČ1 — датчик температуры на выходе поля коллектора, TČ2 — датчик температуры воды в аккумуляторе, V — теплообменник ZAS — аккумулятор нагреваемой воды, R — регулятор.

ESTIMATING THE ENERGY YIELD AND OPTIMIZING THE ORIENTATION OF TUBULAR VACUUM SOLAR COLLECTORS IN A SOLAR SYSTEM

Part I. — Theoretical Data and their Verification

Miloslav Soral*, Marek Liška,** Ivan Píkna*

*Glass Research and Development Institute, ul. SNP 20, 912 50 Trenčín

**Joint Laboratory for Basic Glass Research, Centre of Chemical Research, Slovak Academy of Sciences, and the Glass Research and Development Institute, ul. SNP 20, 912 50 Trenčín

The total irradiation, E , of the working surfaces of evacuated tubular solar collectors is given by the sum of irradiation of the front and the rear area (1), which can be further divided into direct, diffuse and reflected solar radiation (2,3). The individual contributions of the radiation depend on angle i of the incident sunrays with the normal of the working area (direct radiation (4,5)) and the tilt angle β of the working surfaces (diffusion and reflected radiation (8—12)). Validity of the relationships was verified by comparing the calculated and experimental values of apparent optical efficiency of the vacuum collectors (13—19). The irradiation was calculated by means of ratio σ_m of the real and the astronomically possible time of duration of sunshine over a given period of time (month) in a certain locality (Bratislava) and by means of the courses of daily energy of direct or diffused radiation in the given locality, obtained from long-term means (20). The method used in calculating the irradiation was verified by comparing the results of pyranometric measurements with the values calculated for horizontal orientation of the collector (Table I). The relative deviation for a one-year period amounts to 3.5 %.

The solar heating system designed within the framework of the present study consisted of a primary loop of the working fluid (collector field, control elements, heat exchanger) and a secondary circuit of the water being heated (heat exchanger, storage tank). The optimum temperature difference between the outlet from the collector field and the storage tank is ensured by a restricted flow rate control. An additional control element ensures recycling of the working liquid in the collector field at an inadequate temperature of the working liquid at the outlet with respect to the temperature of heated water in the storage tank. Mathematical simulation of the daily course of temperature and energy yield, based on discretizing the time axis into small Δt intervals, was suggested for the given solar system. The heating of the working liquid in the collector field depends on the instantaneous ambient temperature, the heat loss coefficient of the collector and the instantaneous energy input of the Sun (31).

Fig. 1. Structural design of the tubular vacuum solar collector. The absorber is 89 mm in width, and its face area amounts to 0.2 m².

Fig. 2. The frame with tubular vacuum solar collectors. The total face area of the absorbers amounts to 2 m². The individual collectors in the frame are connected in series.

Fig. 3. Simplified diagram of the solar system suggested for service water heating.

List of symbols: TVK — Frames of tubular vacuum collectors

TV — Three-way valve

RV — Flow control valve

Č1 — Primary circuit pump

Č2 — Secondary circuit pump

TČ1 — Temperature sensor at the outlet from the collector field

TČ2 — Water temperature sensor in the storage tank

V — Heat exchanger

ZAS — Hot water storage tank

R — Controller