

# Aktivní solární tepelné systémy – 1. část Teoretické vztahy

## Active solar thermal systems – 1<sup>st</sup> Part Theoretic relations

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

Recenzent  
 doc. Ing. Karel Brož, CSc.

V článku se uvádějí vztahy, umožňující vytvořit matematický model solárního kapalinového kolektoru. Postup je popsán ze dvou hledisek; vnější energetická bilance absorberu a vnitřní přenos energie teplotonosnou látkou.

**Klíčová slova:** solární kapalinový kolektor, energetická bilance, účinnost kolektoru, teplotní účinnost žebra, tepelná kapacita kolektoru, tepelný přenosový součinitel kolektoru

The article presents relations enabling to create mathematical model of solar liquid collector. The procedure is described from two point of views; external absorber energy balance and internal energy transfer by fluid.

**Key words:** solar liquid collector, energy balance, collector efficiency, rib temperature efficiency, collector heat capacity, heat transfer collector coefficient

Solární kolektory a systémy – jejich účinnost, případně tepelný zisk – lze hodnotit na základě **analytických vztahů**, vycházejících z bilancí tepelných toků v kolektoru a systému, dále z hodnot **experimentálních měření** podle standardních metodik za definovaných okrajových podmínek či přímo za provozu, nebo s využitím **počítačového modelování**. Všechny tyto způsoby získání informace o přeměně slunečního záření ve využitelné teplo mají svůj význam a svou oblast využití. V tomto a následujících článcích bude naznačen jejich význam pro návrh a hodnocení solárních systémů. Jelikož v poslední době jsou uváděny do praxe české ekvivalenty evropských norem v oblasti využití sluneční energie, bude i zde zohledněna terminologie a značení předepsané těmito normami.

### ZÁKLADNÍ ENERGETICKÁ BILANCE SOLÁRNÍHO KOLEKTORU

Funkci plochého solárního kolektoru lze popsat obecnou energetickou rovnováhou. Solární kolektor přijímá sluneční záření, které je částečně přeměněno v teplo a částečně odraženo. Část tepla se odvádí teplotonosnou látkou, část odchází zpět do okolního prostředí ve formě tepelných ztrát a část tepla se akumuluje v těle kolektoru. Základní vztahy se odvozují „vnější bilancí“, tzn. bilancí tepelných toků **vně** a na povrchu absorberu (v porovnání s „vnitřní bilancí“ toků pro stanovení vztahů mezi teplotou absorberu, případně účinností, a teplotou teplotonosné látky **uvnitř** absorberu). V následujících vztazích je uvažována plocha kolektoru  $A_c$  (pro zjednodušení je její velikost totožná s velikostí plochy absorberu  $A_a$ , s velikostí plochy apertury  $A_a$  a velikostí obrysové plochy kolektoru  $A_G$ ). Celková velikost bočních ploch kolektoru je označena  $A_b$ .

Obecnou energetickou bilanci kolektoru lze popsat diferenciální rovnicí

$$\frac{dQ}{dt} = Q_s - Q_{z,opt} - Q_{z,t} - Q_u \quad (1)$$

kde  $dQ/dt$  – časová změna tepelného obsahu kolektoru a teplotonosné látky uvnitř absorberu,

$Q_s$  – ozáření kolektoru,

$Q_{z,opt}$  – optické ztráty,

$Q_{z,t}$  – tepelné ztráty,

$Q_u$  – užitečný tepelný tok odvedený z kolektoru.

Akumulační člen je ovlivňován ozářením, změnou teploty a rychlostí proudění teplotonosné látky na vstupu do kolektoru. Tento dynamický model solárního kolektoru je složitý, ale v řadě případů je nutný pro popis chování solárního kolektoru za reálných proměnlivých podmínek (počítačové modelování). Pro odhad dlouhodobého chování solárního kolektoru velmi dobře postačuje stacionární

model vycházející z výše uvedené bilance při uvažování  $dQ/dt = 0$ , tj. ustálený stav. Rozepsáním jednotlivých členů získáme

$$Q_u = GA_c \tau \alpha - U_1 A_c (T_{abs} - T_a) - U_2 A_c (T_{abs} - T_a) - U_3 A_b (T_{abs} - T_a) \quad (2)$$

kde  $G$  – hemisférické ozáření (intenzita dopadajícího slunečního záření,  $W \cdot m^{-2}$ ),

$T_{abs}$  – střední teplota absorberu,

$T_a$  – teplota okolního vzduchu,

$\tau$  – propustnost slunečního záření zasklení kolektoru,

$\alpha$  – pohltivost slunečního záření absorberu,

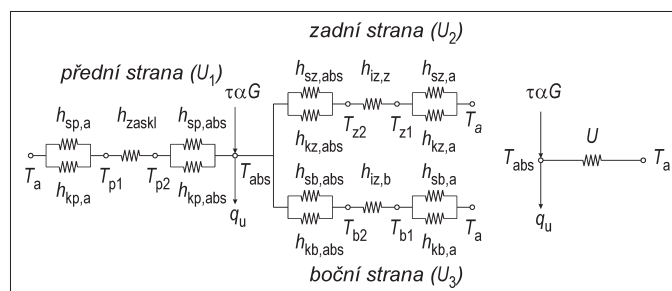
$U_1$  – součinitel prostupu tepla přední stranou kolektoru,

$U_2$  – součinitel prostupu tepla zadní stranou kolektoru,

$U_3$  – součinitel prostupu tepla bočními stranami kolektoru.

Tepelně elektrický model kolektoru zobrazující uvedenou bilanci je uveden na obr. 1. Na přenosu tepla v solárním kolektoru se podílí:

- sálání mezi absorberem a zasklením kolektoru ( $h_{sp,abs}$ ), resp. rámem kolektoru ( $h_{sz,abs}$ ,  $h_{sb,abs}$ ),
- volná konvekce mezi absorberem a zasklením ( $h_{kp,abs}$ ), resp. rámem kolektoru ( $h_{kz,abs}$ ,  $h_{kb,abs}$ ),
- prostup tepla zasklením ( $h_{zaskl}$ ), resp. rámem kolektoru ( $h_{iz,z}$ ,  $h_{iz,b}$ ),
- sálání mezi zasklením a oblohou ( $h_{sp,a}$ ), resp. okolními povrchy, např. střechou ( $h_{sz,a}$ ,  $h_{sb,a}$ )
- volná konvekce ze zasklení do okolí ( $h_{kp,a}$ ), resp. z rámu kolektoru do okolí ( $h_{kz,a}$ ,  $h_{kb,a}$ ).



Obr. 1 Stacionární tepelně elektrický model slunečního kolektoru a jeho zjednodušení

Optické ztráty jsou reprezentovány propustností zasklení  $\tau$  a pohltivostí absorberu  $\alpha$ , tepelné ztráty jsou vyjádřeny celkovým součinitelem prostupu tepla kolektoru  $U$ . Součinitel  $U$  je dán součtem součinitelů prostupu tepla jednotlivých částí (přední, zadní a boční strany) vztáženým na referenční plochu kolektoru, zde obecně plocha kolektoru  $A_c$ .

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \frac{A_b}{A_c} \quad (3)$$

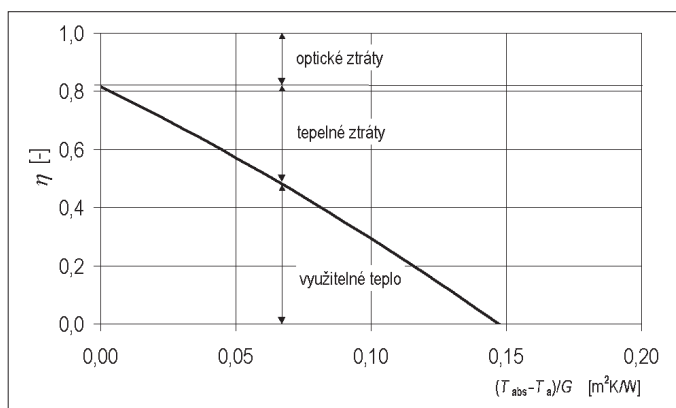
### ÚČINNOST SOLÁRNÍHO KOLEKTORU

Účinnost solárního kolektoru je obecně definována jako poměr energie přenesené teplotnou látkou za určité časové období k součinu definované kolektorové plochy a slunečního ozáření dopadajícího na kolektor za ustálených podmínek.

$$\eta = \frac{Q_u}{GA_c} = \tau\alpha - U \frac{(T_{abs} - T_a)}{G} \quad (4)$$

kde součin  $\tau\alpha$  je označován jako optická účinnost solárního kolektoru  $\eta_0$  (míra optických ztrát).

Poměr  $(T_{abs} - T_a)/G$  se nazývá redukovaný teplotní rozdíl stanovený pro absorpční kolektor a je jedním ze základních parametrů pro hodnocení účinnosti solárních kolektorů za různých provozních podmínek. Výsledkem takového hodnocení je křivka účinnosti solárního kolektoru uvedená na obr. 2. Graficky je znázorněno rozložení podílu optických a tepelných ztrát a využitelného podílu dopadající sluneční energie pro daný provozní stav solárního kolektoru.



Obr. 2 Křivka účinnosti solárního kolektoru

### PARAMETRY SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

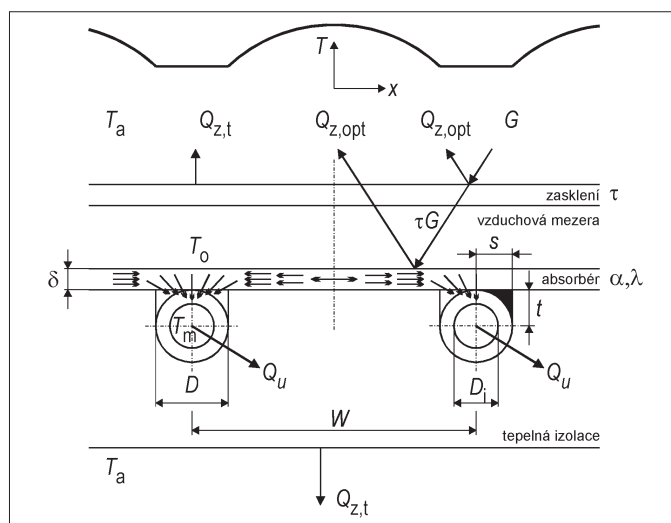
Fyzikální procesy odehrávající se v plochých solárních kolektorech je možné teoreticky popsat tzv. „vnitřní bilancí“. Konstrukce plochých kolektorů je většinou založena na trubce protékané teplotnou látkou, na které je připevněna lamela s povrchem určeným k absorpci slunečního záření. Základem teoretického řešení funkce kolektoru je řešení teplotního pole na lamelě (technicky známého žebra, ale s dopadem slunečního záření), tedy diferenciální rovnice druhého řádu se dvěma okrajovými podmínkami, a řešení teplotního pole na trubce.

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

$$q'_{lam} = (W - D) F [\tau\alpha G - U(T_0 - T_a)] \quad (5)$$

kde  $F$  je **standardní účinnost žebra** daná vztahem

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



Obr. 3 Znáznornění bilance vně a uvnitř absorpční a průběhu teplot v lamelě

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

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

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

Využitelný tepelný tok  $q_u = q_{lam} + q_{tr}$  musí být přenesen z povrchu lamely a trubky do teplotné látky (kapaliny) proudící uvnitř trubky. Odpor proti toku tepla do kapaliny je dán tepelným odporem spoje lamely s trubkou a tepelným odporem přenosu 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  $D_i$  – vnitřní průměr trubky,  
 $h_{f,i}$  – součinitel přenosu tepla mezi vnitřním povrchem trubky a teplotnou látkou (kapalinou, index  $f$ ).

Teplota  $T_0$  je teplota v patě lamely (žebra) a teplota  $T_m$  je střední teplota teplotné látky (kapaliny) v trubce. Tepelná propustnost spoje  $C_{spoj}$  je odhadnuta na základě známé tepelné vodivosti spoje  $\lambda_{spoj}$ , průměrné tloušťky spoje  $t$  a šířky spoje  $s$  a je vztážena na jednotku délky trubky

$$C_{spoj} = \frac{\lambda_{spoj} s}{t} \quad (10)$$

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

$$q'_u = WF' [\tau\alpha G - U(T_m - T_a)] \quad (11)$$

kde  $F'$  je **účinnostní součinitel kolektoru**

$$F' = \frac{1/U}{W \left[ \frac{1}{U[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_{spoj}} + \frac{1}{h_{f,i} \pi D_i} \right]} = \frac{1/U}{1/U_0} \quad (12)$$

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 kolektoru a průtok teplotonosné látky.

Rovnici účinnosti solárního kolektoru v závislosti na střední teplotě kapaliny  $T_m$ , využívanou např. při laboratorním měření účinnosti, lze psát

$$\eta = F' \left[ \tau\alpha - U \frac{(T_m - T_a)}{G} \right] \quad (13)$$

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  $\delta$  a zvyšující se vodivostí materiálu lamely a trubky. Je samozřejmé, že účinnostní součinitel kolektoru se bude zvyšovat také se snižujícím se celkovým součinitelem prostupu tepla kolektoru  $U$  a zvyšujícím se součinitelem přenosu tepla z povrchu trubky do kapaliny  $h_{fi}$  (ovlivněno rychlostí proudění).

Využitelný tepelný tok vztažený na jednotku délky trubky se celý přenáší do teplotonosné látky. Ta vstupuje do kolektoru o teplotě  $T_{in}$ , zvyšuje svou teplotu až opouští kolektor o teplotě  $T_e$ .

Řešením bilance energie na elementu teplotonosné látky získáme diferenciální rovnici, jejímž řešením je závislost teploty teplotonosné látky na souřadnici ve směru toku. Dosazením okrajové podmínky získáme vztah pro stanovení výstupní teploty z kolektoru v závislosti na jeho parametrech a provozních podmínkách.

$$\frac{T_e - T_a - \tau\alpha G / U}{T_{in} - T_a - \tau\alpha G / U} = \exp(-A_c U F' / \dot{m}c) \quad (14)$$

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 teplotonosné látky. Tato veličina se nazývá **tepelný přenosový součinitel kolektoru  $F_R$** .

$$F_R = \frac{\dot{m}c(T_e - T_{in})}{A_c [\tau\alpha G - U(T_{in} - T_a)]} \quad (15)$$

Dosazením z rovnice (14) lze tepelný přenosový součinitel kolektoru vyjádřit jako

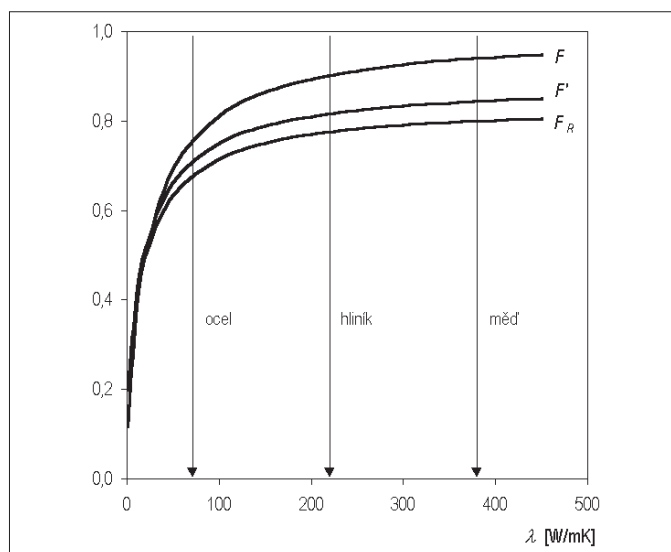
$$F_R = \frac{\dot{m}c}{A_c U} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-A_c U F'}{\dot{m}c}\right) \right] \quad (16)$$

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

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

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

Na obr. 4 je znázorněna závislost součinitelů  $F$ ,  $F'$  a  $F_R$  na tepelné vodivosti žebra a trubky s vyznačením oblastí různých materiálů používaných pro absorber



Obr. 4 Závislost součinitelů  $F$ ,  $F'$  a  $F_R$  na tepelné vodivosti žebra  $\lambda$

kolektorů (ocel, hliník, měď). Z grafu je zřejmá silná vazba součinitelů na použitý materiál.

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).

$$Q_u = A_c F_R [\tau\alpha G - U(T_{in} - T_a)] \quad (18)$$

a podobně pro účinnost

$$\eta = F_R \left[ \tau\alpha - U \frac{(T_{in} - T_a)}{G} \right] \quad (19)$$

kde  $(T_{in} - T_a)/G$  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 vstupní teploty a je možné ji s výhodou použít při analýze solárních systémů, neboť teplota na vstupu do kolektoru  $T_{in}$  je obvykle známa, na rozdíl od střední teploty absorberu  $T_{abs}$  či střední teploty kapaliny  $T_m$ .

Tepelný přenosový součinitel kolektoru  $F_R$  je závislý na průtoku. Zvyšováním průtoku v kolektoru se snižuje teplotní nárůst 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 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 teplotonosné látky. Tento rozdíl teplot je vyjádřen účinnostním součinitelem kolektoru  $F'$ . Proto tepelný přenosový součinitel kolektoru  $F_R$  je vždy menší než účinnostní součinitel kolektoru  $F'$ .

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

$$T_m = T_{in} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U} (1 - F''') \quad (20)$$

Tato teplota je vhodná pro stanovení vlastností teplonosné látky v kolektoru.

Střední teplotu absorberu  $T_{abs}$  určíme jako

$$T_{abs} = T_{in} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U} (1 - F_R) \quad (21)$$

přičemž rovnici je nutné řešit iterativně, neboť celkový součinitel prostupu tepla kolektorem  $U$  je zpětně závislý na  $T_{abs}$ .

## ZÁVĚR

Chování solárních kolektorů je možné popsat teoretickými vztahy, které vycházejí ze dvou možných přístupů, popis fyzikálních jevů vně absorberu (vnější bilance – referenční teplotou je střední teplota absorberu  $T_{abs}$ ) a uvnitř absorberu (vnitřní bilance – referenční teplotou je teplota na vstupu do kolektoru  $T_{in}$ ).

Vnitřní bilance je komplexnějším přístupem, neboť uvažuje vlastnosti celého kolektoru (zasklení, izolace), včetně konstrukčních parametrů absorberu (geometrie, materiál). Pro odhad chování solárního kolektoru je výhodnější, neboť teplota na vstupu do kolektoru  $T_{in}$  je většinou známa, na rozdíl od střední teploty absorberu  $T_{abs}$ , která se při výpočtu obtížně předem stanovuje a nelze ji jednoduše změřit. Proto je vhodná jak pro použití při experimentálním měření, tak v počítačových simulacích solárních systémů.

*Pokračování příspěvku v dalším čísle.*

*Kontakt na autora:*

Tel: 224 355 637, Fax: 224 355 606, E-mail: tomas-matuska@volny.cz

## Použité zdroje:

- [1] DUFFIE, J., BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc. 1991. ISBN 0-471-51056-4.
- [2] KREIDER, J., KREITH, F. *Solar Energy Handbook*. McGraw-Hill, Inc. 1981. ISBN 0-07-035474-X.
- [3] ISAKSON P. *Flat plate thermal solar collectors – a physical background*. Swedish Council for Building Research, Stockholm. 1980. ISBN 91-540-3329-2. ■

## Společnost pro techniku prostředí a Program celoživotního vzdělávání členů ČKAIT

*Ing. Jiří Frýba, místopředseda  
Společnosti pro techniku prostředí*

I když nebyl dosud definován průnik členských databází Společnosti pro techniku prostředí a České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných při výstavbě (ČKAIT), je jisté, že počet odborníků v oboru technika prostředí staveb, kteří jsou členy obou zmíněných organizací, není zanedbatelný. Zvláště pro ně, ale nejen pro ně, je určena následující informace.

Po několikaleté přípravě byl 1. října 2001 zahájen Program celoživotního vzdělávání ČKAIT (CŽV) pro všechny autorizované osoby. V souladu se zněním zákona č. 360/1992 Sb. je totiž každý autorizovaný inženýr a technik povinen se dále odborně vzdělávat a sledovat odborné a legislativní informace nezbytné pro správný výkon své činnosti. Pro splnění tohoto úkolu si každá autorizovaná osoba volí různé formy zvyšování své kvalifikace, odpovídající jeho profesnímu zaměření, doplňuje si své vzdělání samostudiem, sledováním odborného tisku, účastí na odborných akcích a podobně.

Program CŽV tedy prakticky probíhá v zaváděcím (tzv. zkušebním) období od konce roku 2001 a zkušenosti s jeho průběhem budou shrnuty a vyhodnoceny ke konci roku 2003. Při respektování těchto poznatků pak vstoupí Program CŽV do své řádné a trvalé etapy.

Členové Společnosti pro techniku prostředí, kteří jsou autorizovanými osobami, se setkávají s akreditovanými akcemi Programu CŽV v komorových periodikách, kde je pro každé pololetí předložen k výběru seznam zhruba 500 různých příležitostí k dalšímu vzdělávání, ze kterých je možno vybrat ty, které každému individuálně nejvíce vyhovují.

Tento seznam je vždy sestaven akreditační komisí a posléze projednán a schválen řídicí komisí Programu CŽV, což je zárukou určité kvality jak obsahu, tak i organizačního zajištění jednotlivých programových složek.

A zde je příležitost i pro nečleny ČKAIT, kteří mají zájem o svůj další profesní růst, vybrat si vhodnou akci, neboť naprostá většina z nich je veřejně přístupná. Lze tedy konstatovat, že se jedná o unikátní seznam vhodných příležitostí k sebevzdělávání a navázání odborných i společenských kontaktů, navíc ještě s garancí jejich kvality. Nutno podotknout, že položky seznamu zahrnují jak všechny profesní obory členů Společnosti pro techniku prostředí, tak i všechny regiony České republiky. Tento seznam je pro členy k nahlédnutí v sekretariátu Společnosti pro techniku prostředí.

Pro úplnost nelze opomenout zmínku o hodnocení účasti na akcích, které se ovšem týká jen autorizovaných osob. Ty totiž mají povinnost vykazovat svou účast na Programu CŽV evidencí počtu bodů, které jsou přiřazovány jednotlivým akreditovaným akcím, mezi něž patří prakticky všechny akce, přihlášené Společností pro techniku prostředí, nevýmaje i odběr časopisu VVI, který je již nyní automaticky pro všechny členy, což přináší těm, kteří jsou autorizovanými osobami, zisk jednoho bodu ročně.

Za zmínku stojí i uspokojivá okolnost, že všechny akce, které do Programu CŽV naše Společnost přihlásila, byly bez problému akreditovány a příznivě bodově ohodnoceny.

Bylo by tedy účelné, aby možnosti, které Program CŽV skýtá, využívali všichni členové Společnosti pro techniku prostředí co možno nejvíce, čímž budou zvyšovat své možnosti v uplatnění ve svých profesích a aktivním přístupem tak zlepšit své vyhlídky v budoucím, ještě náročnějším konkurenčním prostředí. ■