

# Hodnocení tepelného komfortu v prostoru s chladicím stropem

## Evaluation of thermal comfort in space with cooling ceiling

Ing. Vladimír ZMRHAL,  
ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav  
techniky prostředí

Klimatizace prostorů chladicími stropy je možnou alternativou úpravy stavu prostředí pro vytvoření optimálního tepelného komfortu osob bez vysokých nároků na distribuci vzduchu. Citelná tepelná zátěž prostoru je odváděna velkoplošnými vodou chlazenými panely, které jsou instalovány většinou do podhledů místností. Objemový průtok vzduchu paralelně pracujícího vzduchotechnického zařízení pak může být redukován pouze na potřebnou, minimální dávku čerstvého vzduchu. Teoreticky je sálavý přenos tepla mezi člověkem a okolím v porovnání s konvekčním přenosem výhodnější jak z hlediska vytvoření tepelné pohody tak z hlediska spotřeby energie (viz dále). Investičně jsou však systémy chladicích stropů poměrně náročné. Příspěvek obecně pojednává o výhodách a nevýhodách použití sálavých chladicích stropů. Zejména se zaměřuje na hodnocení tepelného komfortu v takto klimatizovaném prostoru, což je dokumentováno na simulačním výpočtu.

**Klíčová slova:** klimatizace, chladicí strop, komfort, tepelný komfort

Recenzent  
prof. Ing. František Drkal, CSc.

The air conditioning of spaces with cooling ceilings is a possible alternative of the environment state conditioning for creating the optimum thermal comfort of persons without high requirements concerning the air distribution. The sensible heat load of the space is carried away by large-surface water-cooled panels which are installed in lower ceilings of the room in most cases. The volumetric air flow of the ventilation equipment operating in parallel may be then reduced to only necessary minimum amount of fresh air.

Theoretically the radiant heat transfer between a person and the environment, compared with convection heat transfer, is more advantageous not only from the point of view of thermal comfort creation but also from the point of view of energy consumption (see further). However the systems of cooling ceilings are relatively capital-intensive. The contribution generally deals with advantages and disadvantages of the cooling ceilings use. It pays particular attention to evaluation of the thermal comfort of the space air conditioned in this way, which is documented by a simulation calculation.

**Key words:** air conditioning, cooling ceiling, comfort, thermal comfort

## ZÁKLADNÍ TYPY CHLADICÍCH STROPŮ

Chladicí stropy je možné rozdělit podle konstrukce na otevřené a uzavřené. Otevřené chladicí stropy (někdy nazýváme konvektivní) jsou charakteristické otvory či mezerami, které umožňují proudění vzduchu až ke stropu. U otevřených chladicích stropů převažuje konvektivní složka přenosu tepla mezi povrchem stropu a okolním vzduchem. Naopak uzavřené (sálavé) chladicí stropy pracují převážně se sálavou složkou tepelného toku.

Obecně lze říci, že výkon otevřených chladicích stropů je asi o 10 % vyšší, než u stropů uzavřených. Toto zvýšení je dáno výraznějším vznikem přirozeného proudu vzduchu v místnosti.

Podíl konvektivní složky u sálavých chladicích stropů je asi 40%. Jedná se o přirozené proudění teplého vzduchu vznikající podél vnitřních zdrojů tepla. Zbytek, tedy 60% výkonu náleží sálavému účinku.

## VÝHODY A NEVÝHODY SYSTÉMU S CHLADICÍM STROPEM

Citelnou tepelnou zátěž v prostorech, v nichž je požadováno komfortní prostředí, jako jsou například kanceláře, konferenční sály, muzea atd., je možné odvést sálavým chlazením. Vlhkostní zátěž se z prostoru odvádí minimální dávkou čerstvého vzduchu.

Sálavý způsob chlazení je výhodný i z hygienického hlediska, neboť ho neprovázejí nežádoucí účinky jakými jsou hluk, nebo případný průvan.

Jako každý systém, má i systém s chladicím stropem svoje výhody a nevýhody. Obecně je lze shrnout do následujících bodů.

### Výhody

- kvalita tepelného komfortu
- spotřeba energie
- přívod minimální dávka čerstvého vzduchu
- menší nároky na rozvody vzduchu
- hlukové parametry
- odpadá nebezpečí vzniku průvanu

### Nevýhody

- investiční náklady
- nebezpečí orosování
- nelze jimi odvádět teplo vázané ve vodní páře
- omezení výkonu

Teplota přívodní vody do chladicího stropu se volí tak, aby nedocházelo k orosování povrchu panelu (povrchová teplota panelu musí být vyšší než teplota rosného bodu vzduchu proudícího kolem panelu). Zpravidla se teplota přívodní vody volí  $t_{w1} \geq 16$  °C, maximálně 20 °C. Teplotní rozdíl odváděné a přiváděné chladicí vody bývá v rozmezí  $2 \leq \Delta T \leq 4$  K.

Chladicím stropem je možné odvádět pouze citelnou tepelnou zátěž. Teplo vázané ve vodní páře je nutné odvádět průtokem vzduchu paralelně pracujícího vzduchotechnického zařízení. Tento průtok může být redukován pouze na potřebnou, minimální dávku čerstvého vzduchu. Nejčastěji bývá systém s chladicím stropem kombinován se zdrojovým větráním.

Spotřeba energie je jedním z často diskutovaných témat v souvislosti s rostoucí cenou energie. Existuje mnoho autorů zabývajících se tímto problémem [2], [6], [7], [8], [9], kteří jednoznačně poukazují na možné úspory energie v rozsahu 10 až 30 % oproti vzduchovému systému.

## TEPELNÝ KOMFORT V MÍSTNOSTI S CHLADICÍM STROPEM

Hodnotícím kritériem pro tepelnou pohodu v prostoru podle Nařízení vlády č. 523/2002 Sb., či dle ČSN ISO 7730 je operativní teplota  $t_o$ , která respektuje kromě teploty vzduchu  $t_a$  i střední radiční teplotu  $t_r$  (= účinná teplota okolních ploch, v zahraniční literatuře označovaná jako MRT – mean radiant temperature) a rychlost proudění vzduchu  $w_a$ .

Operativní teplota je jednotná teplota uzavřeného černého prostoru, ve kterém by tělo sdílelo radiaci a konvekcí stejné tepla, jako ve skutečném nehomogenním prostředí a vypočítá se podle vzorce

$$t_o = At_a + (1 - A) t_r \quad [^\circ\text{C}]$$

kde

A je hodnota závislá na relativní rychlosti proudění vzduchu [-]

Tab. 1 – Závislost součinitele A na rychlosti proudění vzduchu v prostoru, dle [5]

$w_a$ [m.s <sup>-1</sup> ]	<0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
A [-]	0,5	0,53	0,6	0,65	0,7	0,75

Při rychlostech proudění vzduchu pod 0,2 m/s lze nahradit operativní teplotu výslednou teplotou  $t_g$ , měřenou kulovým teploměrem.

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2} \approx t_g \quad [^\circ\text{C}]$$

Z uvedeného vyplývá, že na tepelnou pohodu má výrazný vliv povrchová teplota okolních ploch. V prostoru s chladicím stropem lze tedy udržovat poněkud vyšší teplotu vzduchu, než je tomu u klimatizačních systémů s konvekčním přenosem tepla. Projektanti vzduchotechniky, kteří jsou zvyklí pracovat většinou jen s teplotou vzduchu  $t_a$  si tuto skutečnost často vůbec neuvědomují. Pokud totiž chceme zachovat v prostoru stejný tepelný komfort, jako při použití klimatizace s konvekčním přenosem tepla, bude teplota vzduchu ve vnitřním prostoru vyšší, podle dostupných údajů až o 2 K.

## APLIKACE POUŽITÍ CHLADICÍCH STROPŮ V PRAXI

Použití klimatizačního systému s chladicím stropem je určitým způsobem omezeno. Tato omezení v podstatě vyplývají z již zmiňovaných výhod a nevýhod systému. Bylo zmíněno, že ve většině případů nelze chladicím stropem obložit celou půdorysnou plochu stropu. V praxi je možné počítat s obložením cca 70 až 80 %. To je základní omezení použití systému s chladicím stropem.

Použití chladicích stropů, vzhledem k jejich charakteristické vlastnosti (tj. odvod pouze citelného tepla), je prakticky vyloučené v tzv. vlhkých prostorech, nebo v prostorách s vysokou vlhkostí. Rovněž použití tohoto systému pro shromažďovací prostory, jakými mohou být např. koncertní sály, kina, či zasedací místnosti není vhodné, vzhledem k vysoké obsazenosti těchto prostor. Osoby pobývající v takových prostorech produkují teplo vázané ve vodní páře a navíc je nutné přivádět značné množství čerstvého vzduchu nuceným větráním. Toto množství vzduchu často postačuje pro odvod celkové tepelné zátěže.

Následující odstavce popisují možnosti užití systému klimatizace v konkrétních budovách.

### Administrativní budovy

Nejčastější a nejvýhodnější je použití chladicích stropů pro kanceláře administrativních budov. Kanceláře v moderních budovách s významným podílem lehkých, prosklených fasád jsou značně zatíženy citelnými tepelnými zisky, zejména sluneční radiací. Zanedbatelné ale nejsou ani zisky od vnitřních zdrojů tepla

jakými mohou být např. elektrická zařízení (PC, kopírovací stroje, tiskárny) či osvětlení.

Centrální zónová klimatizační jednotka pracující se 100 % čerstvého vzduchu pak přivádí do kanceláří pouze minimální, požadované množství vzduchu pro osoby, které slouží zároveň pro odvod vázaného tepla.

Většinou bývá teplota přiváděného vzduchu do místnosti konstantní a výkon panelu je regulován termostatickým ventilem. V některých případech je možné navrhnout panely pro skupinu místností (zónu) a vzduchový systém pak zajišťuje individuální úpravu prostředí každé místnosti.

### Nemocnice

Použití systému se sálavými panely se v posledních letech osvědčilo i pro nemocniční pokoje. Systém je vhodný především z následujících důvodů:

- zajištění teplotně stálého prostředí
- prakticky nehluký systém
- nevyžaduje údržbu uvnitř prostoru
- nezabírá místo v místnosti
- možné použití i pro vytápění
- neznečišťuje prostor

Potrubi systém může být dvou či čtyř-trubkový. Trojcestné ventily, bývají umístěny v chodbě tak, aby jejich případná údržba byla možná bez obtěžování pacientu. Tento systém může být s výhodou používán také v nemocničních prostorách kde pobývají mentálně postižení pacienti. V takovýchto prostorách je totiž požadováno minimální vybavení zasahující do prostoru, aby se předešlo možnému zničení zařízení či sebepoškození.

### Průmyslové aplikace

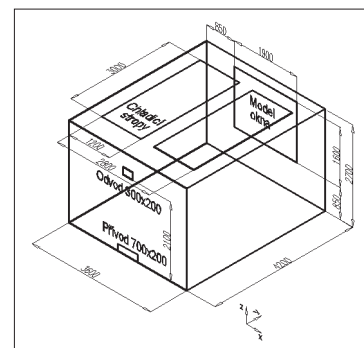
Použití chladicích panelů v průmyslových budovách není nejčastější, avšak i v této oblasti našly své uplatnění a to zejména v západní části Evropy. Nároky na pohodu prostředí, a tím i tepelný komfort osob pracujících v průmyslu se stále zvyšují a sálavé chladicí panely mohou být v tomto směru velmi účinným prostředkem.

### Ostatní aplikace

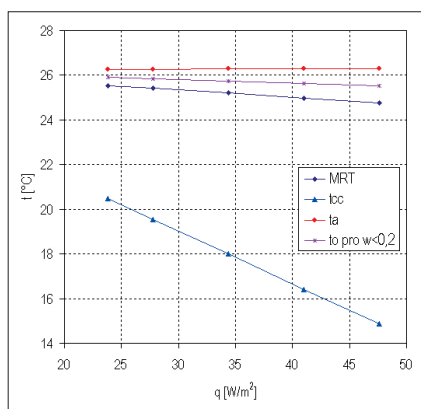
Stropní panely mohou najít dále široké uplatnění např. v muzeích, letištních terminálech, vestibulech, atp. V poslední době se dostává do popředí zájmu i tzv. osobní větrání. Jedná se o větrání, kdy je přívod vzduchu uskutečňován pouze minimální dávkou čerstvého vzduchu, který je přiváděn přímo do dýchací zóny člověka. Taková dávka však nepostačuje k odvodu citelné tepelné zátěže prostoru, proto se systém přívodu vzduchu musí kombinovat s paralelně pracujícím chladicím systémem. Systém s chladicím stropem by mohl být v tomto směru možnou alternativou.

## HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU POUŽITÍM SIMULAČNÍHO ŘEŠENÍ

Simulační výpočet v programu ESP-r byl prováděn pro model měřící místnosti s chladicím stropem. Skutečná měřící místnost je umístěna v laboratořích Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze a probíhají v ní různé experimenty, související s úpravou vzduchu v klimatizovaných místnostech. Schéma a rozměry měřící místnosti vybavené chladicím stropem jsou patrné z obr. 1.



Obr. 1 – Schéma měřící místnosti



Obr. 2 – Průběh teplot v prostoru s chladícím stropem

Simulovány byly stavy uvedené v tab. 2 a) a b). V případě a) byla udržována konstantní teplota vzduchu v místnosti 26 °C a tepelná zátěž prostoru  $q$  se měnila v rozmezí 23,9 až 47,9 W/m<sup>2</sup>. Chladicí výkon stropu  $q_s$  se vždy rovnal dané tepelné zátěži. Údaj chladicího výkonu stropu  $q_s$  vyjadřuje výkon vztážený na aktivní plochu stropu 7,2 m<sup>2</sup>. Větrání prostoru bylo uvažováno vždy jako izotermní s minimálním přívodem čerstvého vzduchu pro 2 osoby (50 m<sup>3</sup>/h na osobu) tzn. veškerá citelná tepelná zátěž prostoru byla odváděna chladícím stropem.

Výsledek simulace na obr. 2 ukazuje jak se mění střední radiční teplota  $t_r$  (MRT) a operativní teplota  $t_o$  (rychlost proudění vzduchu  $w \leq 0,2$  m/s) při dodržení uvedených podmínek. V grafu je rovněž zobrazena povrchová teplota stropu  $t_{cc}$  odpovídající simulačnímu řešení.

V případě b) byla teplota vzduchu simulována v rozmezí 24,5 až 28,5 °C, tepelná zátěž prostoru  $q$  byla ve všech případech stejná 34,66 W/m<sup>2</sup>. Chladicí výkon stropu  $q_s$  se vždy odpovídal dané tepelné zátěži  $Q$ . Větrání prostoru bylo opět uvažováno jako izotermní s minimálním přívodem čerstvého vzduchu pro 2 osoby (50 m<sup>3</sup>/h na osobu).

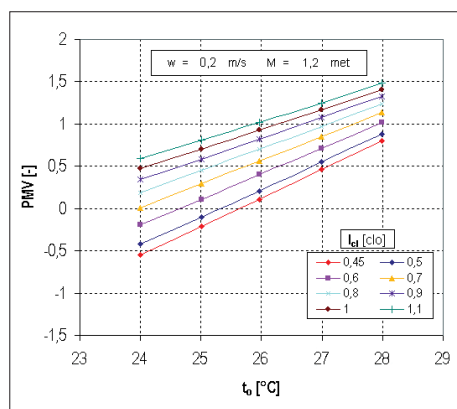
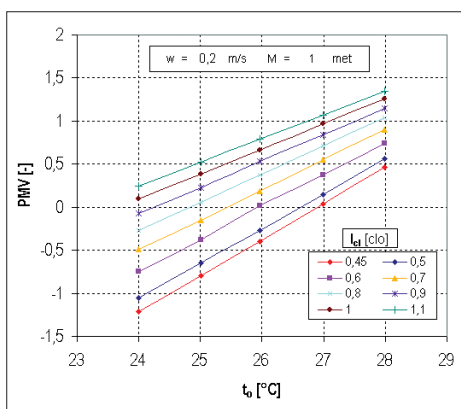
Pro tyto parametry byl vyhodnocen ukazatel tepelného pocitu lidí  $PMV$  dle ČSN EN ISO 7730. Výsledky jsou znázorněny na obr. 3 až 4.

Ukazatel tepelného pocitu lidí  $PMV$  byl vyhodnocen pro jednotně zvolenou relativní vlhkost vzduch  $\varphi = 50 \%$ , pro různé druhy lidské činnosti  $M$  uvedené v tab. 3 a pro různé druhy tepelného odporu oděvu  $I_{cl}$  podle tab. 4.

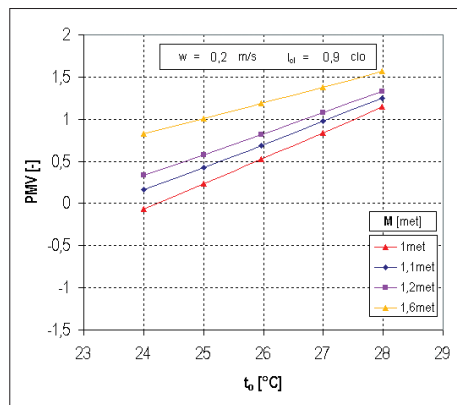
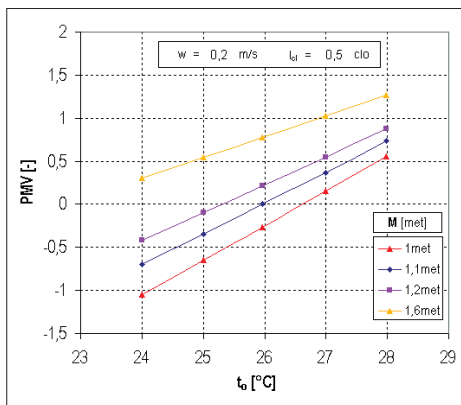
Hodnoty tepelného pocitu lidí  $PMV$  byly stanoveny v závislosti na operativní teplotě  $t_o$ .

Výsledky jsou typické zejména pro kancelářské prostory. Rychlost proudění vzduchu  $w$  v těchto případech je volena 0,2 m/s, jakožto maximální hodnota předepsaná hygienickým předpisem a rovněž jako mezní hodnota, kterou prakticky nelze, při distribuci vzduchu zdrojovým větráním, překročit.

Na obr. 3 a,b je zobrazena závislost  $PMV = f(t_o)$  pro různé tepelné odpory oděvu  $I_{cl}$  a definovanou rychlost proudění vzduchu  $w$  a energetický výdej člověka  $M$ . Na obr. 4 a, b pak rovněž závislost  $PMV = f(t_o)$ , avšak pro různ-



Obr. 3 a, b – Ukazatel PMV v závislosti na operativní teplotě  $t_o$ , pro různé druhy oděvu



Obr. 4 a, b – Ukazatel PMV v závislosti na operativní teplotě  $t_o$ , pro různé lidské činnosti

Tab. 2 a, b – Stav jednotlivých simulací

Nast.	Tepelná zátěž		Strop	Větrání	
$t_a$	$Q$	$q$	$q_s$	$I$	$V$
[°C]	[W]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[h <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]
26	362	23,94	50,3	2,45	100
26	424	28,04	58,9	2,45	100
26	524	34,66	72,8	2,45	100
26	624	41,27	86,7	2,45	100
26	724	47,88	100,6	2,45	100

Sim.	Tepelná zátěž		Strop	Větrání	
$t_a$	$Q$	$q$	$q_s$	$I$	$V$
[°C]	[W]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[h <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]
24,5	524	34,66	72,8	2,45	100
25,5	524	34,66	72,8	2,45	100
26,5	524	34,66	72,8	2,45	100
27,5	524	34,66	72,8	2,45	100
28,5	524	34,66	72,8	2,45	100

Tab. 3 – Energetické výdeje pro různé druhy lidské činnosti

Lidská činnost	$M$	
	[met]	[W/m <sup>2</sup> ]
Sezení, uvolněné	1	58
Psaní na stroji	1,1	65
Práce vsedě	1,2	70
Stání, lehká práce	1,6	93

né lidské činnosti při konkrétní rychlosti proudění  $w$  a tepelném odporu oděvu  $I_{cl}$ .

### ZÁVĚR

Simulační výsledky ukazují vliv tepelné zátěže na střední radiční teplotu v prostoru s chladícím stropem. Je vidět, že s rostoucí tepelnou zátěží (klesající

Tab. 4 – Tepelné odpory typických kombinací oděvu

Oděv (denní běžné oblečení)	$I_{cl}$	
	[clo]	[m <sup>2</sup> K/W]
Kalhotky, spodnička, punčochy, lehké šaty s rukávy, sandály	0,45	0,07
Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, lehké ponožky, boty	0,5	0,08
Spodky, košile, lehčí kalhoty, ponožky, boty	0,6	0,095
Spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty	0,7	0,105
Kalhotky, spodnička, košile, sukně, silné podkolenky, boty	0,8	0,12
Kalhotky, košile, sukně, svetr - kulatý výstřih, silné podkolenky, boty	0,9	0,14
Spodní prádlo, košile, kalhoty, sako, ponožky, boty	1,0	0,155
Spodní prádlo, nátělník, košile, kalhoty, sako, ponožky, boty	1,1	0,17

povrchovou teplotou stropu) střední radiační teplota klesá, avšak změna není příliš výrazná.

To, že má na tepelný komfort výrazný vliv vlastnost oděvu a druh lidské činnosti není informace nová. Výsledky však ukazují jak široký může být rozptyl tepelného pocitu přítomných osob v takovémto prostoru právě pro různé oblečené osoby, či osoby pracující s různou intenzitou.

Z uvedených výsledků vyplývá, že v prostoru s chladičím stropem může, za určitých podmínek, nastat tepelný komfort při vyšší teplotě vzduchu než je tomu v vzduchových systémech. Ve zkoumaném případě však tento rozdíl není větší než 1 K.

Spojení na autora: zmrhal@fsid.cvut.cz

Tento příspěvek je součástí vědeckého záměru CEZ: MSM 21000011.

Příspěvek byl přednesen na 16. konferenci Klimatizace a větrání v únoru 2004.

#### Použité zdroje:

- [1] ASHRAE Handbook 1984 Systems, ASHRAE, Atlanta 1984
- [2] BRUNK, M.F., *Cooling ceiling – an opportunity to reduce energy costs by way of radiant cooling*. ASHRAE Transactions 99 (2): 479–487, 1993
- [3] FERSTL, K., *Klimatizačné zariadenia so sálavým chlazením*. TZB Haustechnik, Bratislava 1999
- [4] ČSN EN ISO 7730, Mírné tepelné prostředí – Stanovení PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody
- [5] Nařízení vlády č. 523/2002 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 178/2001 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci
- [6] Imanari, T., Omori, T., Bogaki, K., *Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system*. Energy and Buildings 30: 167–175, 1999
- [7] MIRIEL, J., SERRES, L., TROMBE, A., *Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumption*. Applied Thermal Energy 22: 1861–1873, 2002
- [8] SODEC, F., *Economic viability of cooling ceiling systems*. Energy and Buildings 30: 195–201, 1999
- [9] STETIU, C., *Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings*. Energy and Buildings 30: 127–138, 1999
- [10] ZMRHAL, V., DRKAL, F., SCHWARZER, J., *Chladičí stropy*. Grantová zpráva, ČVUT v Praze 2002
- [11] ZMRHAL, V., HENSEN, J., DRKAL, F., *Modelling and Simulation of a Room with Radiant Cooling Ceiling*. Proc. of 8th Int. IBPSA Conference Building Simulation 2003, Eindhoven 2003. ■

#### \* 100 let chlazení

Ve dnech 26. až 28.6.2004 byl v Nashville, USA organizován seminář pod patronací ASHRAE na téma „Aplikace chlazení v uplynulých 100 letech“.

První setkání ASRE (Americká společnost inženýrů zabývajících se chlazením, založená v r. 1904 – později se stala součástí ASHRAE) se konalo v r. 1905. Zde W.T. Robinson poprvé přednesl požadavek na stavbu chlazených skladů k uchování rychle se kazících potravin. Po 2. světové válce došlo k rozvoji potravinářského průmyslu, který se orientoval na výrobu polotovarů a mražených hotových jídel. Potřeba chlazených skladů podnítila značný rozvoj technického oboru chlazení, který oslavuje 100. výročí své existence.

[www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)

(Laj)

#### \* Chlazení při projektu využití zemního tepla

Mnichov sází na využívání zdrojů regenerativní energie. V rámci projektu geothermie v Mnichově-Riemu se bude čerpat spodní voda o teplotě 80 °C z hloubky přes 3000 m. Voda bude odevzdávat své teplo do teplovodní sítě s tím, že bude kryt 50 % potřeby tepla veletřního města Riemu – avšak až potom, co skončí prováděné zkoušky čerpadel, jimiž se má vyhodnotit vydatnost podzemních vodních rezerv a jejich očekávaná teplota 80 °C. Přitom vznikl problém, kam pak s tou horkou vodou? Do kanálové sítě smí být vypouštěna voda jen teploty max. 35 °C. Z tohoto důvodu bude až 200 m<sup>3</sup>/h teplé vody prozatím chlazen v nájemných chladičích věžích firmy *Axima Refrigeration* na požadovaných 35 °C.

CCI 13/2003

(Ku)

#### \* CLIMA 2005

8. světová konference REHVA „Clima 2005“ se bude konat pod heslem stavební technologie budoucnosti od 9. do 12. října 2005 v Lausanne ve Švýcarsku. Hlavními tématy jsou:

1. nové systémy vytápění, větrání a klimatizace
2. vytápění, větrání, klimatizace a stavební technologie
3. technické řešení a uživatelský komfort
4. zdravé budovy
5. renovace existujících systémů
6. nové trendy.

Více informací na [www.clima2005.ch](http://www.clima2005.ch).

(Laj)

#### \* EDF – Electricité de France

EDF je významným francouzským podnikem s více než padesátiletou zkušeností na trhu. Zabývá se výrobou, přenosem, prodejem a distribucí elektrické energie. Věnuje se výzkumu, vývoji, místnímu rozvoji a péči o životní prostředí. Dnes zásobuje energií 51 milionů zákazníků, z toho 20 milionů mimo Francii. Skupina EDF je přítomna ve 26 zemích světa. Jako investor působí ve 24 zemích, z toho v 11 zemích Evropy. Je **od r. 1994 zastoupena také v České republice** (sídlo zastoupení je v Praze 1, Týnská 12). V ČR zaměstnává firma 2700 zaměstnanců, kteří se zabývají převážně energetickými službami. Smlouva mezi EDF a Vivendi Environment by měla napomoci rozvíjet u nás **nové služby v oblasti vytápění, veřejného osvětlení a zpracování odpadů**.

EDF je největším vývozcem energií v Evropě a největším mezinárodním investorem v oblasti distribuce. Její celková výrobní kapacita dosahuje 140 200 MW, z toho zahraniční zdroje ve výstavbě nebo provozu dosahují 36 900 MW. Tato francouzská společnost je jedním z pěti mezinárodních investorů do výroby elektrické energie na světě.

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

(Laj)