



Ing. Miloš LAIN, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Pasivní chlazení

Passive Cooling

Recenzent
Ing. Jiří Frýba

Článek se zabývá velmi naléhavou problematikou – jak moderně stavět budovy s ohledem na jejich vnitřní mikroklima při využití principů „chlazení bez chlazení“, tedy při zachování zásady maximální energetické hospodárnosti provozu staveb. Obsahuje rovněž vysvětlující partie, které uvádějí čtenáře do zmíněného oboru.

Autor popisuje řadu praktických možností, které naznačená metodika přináší, s příklady jejich uplatnění při výstavbě budov a naznačuje projektantům i stavebníkům správné a moderní směry koncepce tvorby projektové dokumentace všech typů staveb.

Klíčová slova: pasivní chlazení, pasivní budovy, tepelné ostrovy, stínění budovy, sluneční geometrie, přirozené větrání

The article deals with a very urgent issue – how to construct buildings in a modern way regarding their inner microclimate and using principles of „cooling without cooling“, i.e. keeping the maximal energetic efficiency of building operation. It also contains explanatory parts that bring the reader into the mentioned field of knowledge.

The author describes a number of practical possibilities, brought by the outlined methodology, also with examples of their utilization during building construction and shows to designers and constructors the right and modern ways of making project documentation concepts of all building types.

Keywords: passive cooling, passive buildings, heat islands, building shading, solar geometry, natural ventilation

ÚVOD

Pod pojmem pasivní chlazení se rozumí především projektování takových budov, které žádné chlazení nepotřebují. Využívá se pasivních prvků snižujících tepelné zátěže, akumulace tepla a přirozeného odvodu tepla. Koncepce pasivního domu z pohledu chlazení by měla být základem i pro budovy s chlazením nízkoenergetickým nebo strojním a některé principy jako třeba přirozené noční větrání, jsou zahrnovány jak do pasivních tak do nízkoenergetických systémů. Dlouhodobě se koncepcí pasivních domů z pohledu chlazení zabývají především v jižní Evropě a USA, mezinárodně uznávaný je především výzkum v Řecku, Portugalsku, Francii, USA. V podmínkách České republiky je pasivní chlazení standardem pro řadu typů budov (obytné, výrobní, zemědělské) a vyskytuje se i řada administrativních budov, které nemají strojní chlazení. Problém je v přístupu především architektů k pasivnímu chlazení. Pro řadu architektů se budovy dělí na klimatizované a neklimatizované. U neklimatizovaných je pak většinou letní situace řešena okrajově a velmi povrchně. Při správném návrhu je třeba provést návrh neklimatizované (nechlazené) budovy s ohledem na letní tepelnou pohodu. Dle charakteru vnitřní a vnější tepelné zátěže je třeba použít principy pasivního chlazení, které umožní odvod tepelné zátěže v letních měsících při zachování tepelné pohody ve vnitřním prostředí.

TVAR BUDOVY A URBANISTICKÉ ŘEŠENÍ

Z pohledu pasivního chlazení by budova měla mít takový tvar a orientaci, aby se omezily na minimální míru tepelné zisky v letním období a zároveň byl umožněn a podporován přirozený odvod tepla, většinou větráním. Doporučení pro vhodný tvar budovy jsou silně poplatná klimatické oblasti, ve které se budova nachází. Těžko můžeme použít otevřené thajské budovy, ideální pro zajištění stínu a provětrání v místě kde teplota celoročně neklesne pod 20 °C, pro klima střední či severní Evropy, kde se zimní teploty pohybují hluboko pod bodem mrazu. Přesto nám můžou být některé principy běžné v teplém klimatu inspirací.

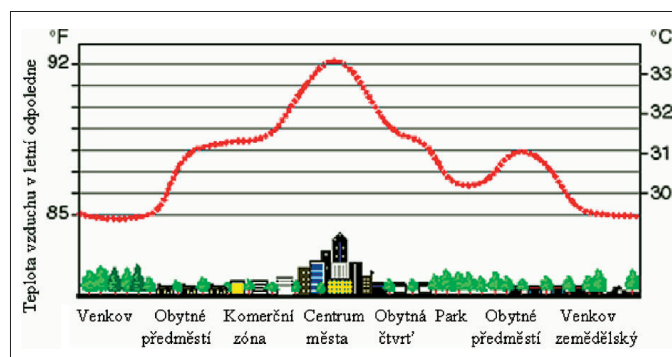
V řadě míst světa existuje převládající směr větru, a tvar budovy i její okolí lze přizpůsobit tak, aby docházelo k maximálnímu provětrání. V přímořských oblastech se vyskytují brízy, vanoucí z moře na pevninu, nebo naopak.

V České republice je málo míst s výrazně převládajícím směrem či charakterem větru, proto je obtížné navrhovat budovu tak, aby bylo maximálně využito tlakového účinku větru.

Okolí budovy – tepelné ostrovy

Problém tepelných ostrovů nastává především v hustě osídlených oblastech, v centrech měst, případně v průmyslových zónách. Značná část dopadajícího slunečního záření je pohlcena střechami, obvodovými konstrukcemi budov, a povrchem vozovek a parkovišť a z nich se pak teplo sdílí konvekcí a sáláním do okolí. Tento děj způsobuje to, že teploty vzduchu v takovýchto oblastech jsou výrazně vyšší než v otevřené krajině, kde se provádějí meteorologická měření. Díky těmto tepelným ostrovům je pak použití venkovního vzduchu pro odvod tepelné zátěže výrazně obtížnější a rostou i tepelné zisky budov.

V souvislosti s globálním oteplováním se posuzuje i celková pohltivost území pro dopadající záření. Snížení pohltivosti měst snižuje jak nárůst teploty ve vlastním městě, tak zpomaluje i nárůst teploty planety a tím globální oteplování. Jedním z možností snížení nárůstu teplot v centrech měst jsou materiály s nižší pohltivostí. Řada měst a vesnic v teplých oblastech má výrazně příznivější charakter, používají se bílé nátěry stěn i fasád, často i zatravněné či skrápěné střechy. Pro moderní města jsou vyvíjeny speciální materiály se sníženou pohltivostí pro střechy, vozovky a parkoviště (obr. 2). Použití těchto materiálů pro střechy a vozovky by mohlo zvýšit v průměru albedo obydlených oblastí o 0,1 a tím snížit teplotu planety o 0,01 K. Toto snížení by kompenzovalo celosvětovou produkci CO₂ za



Obr. 1 Náčrtek teplotního profilu v městském tepelném ostrově (Akbari 1992)

R=0.41 black	R=0.44 blue	R=0.44 gray	R=0.48 terracotta	R=0.46 green	R=0.41 chocolate
R=0.04	R=0.18	R=0.21	R=0.33	R=0.17	R=0.12

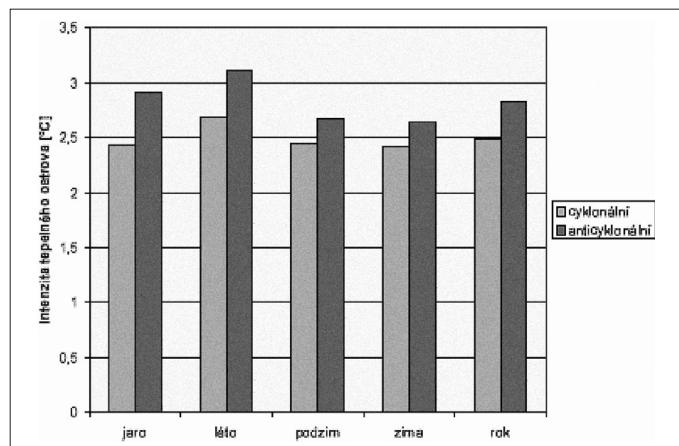
Obr. 2 Odráživostí prototypů betonových barevných střešních krytin nahoře původní, dole nově vyvinuté (Akbari 2005)

0,2 roku (10 Gt CO₂). Chladné střechy mohou snížit roční spotřebu energie klimatizace přibližně v hodnotě 10 miliard USD (Akbari, 2007).

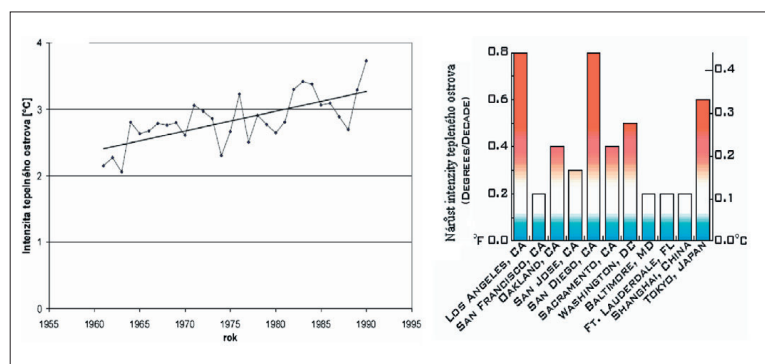
Extrémní situace nastává v některých amerických a asijských velkoměstech, kde je zástavba tak hustá a velké množství výškových budov způsobuje, že vítr není schopen zajistit odvod tepla a přívod čerstvého vzduchu do celých čtvrtí.

I když česká města nejsou zdaleka tak velká a hustě obydlená, přesto i u nás je efekt tepelných ostrovů nezanedbatelný. Intenzita teplotního ostrova je definována jako rozdíl maximální teploty vzduchu v centru města oproti teplotě vzduchu na venkově. Intenzita teplotního ostrova závisí na velikosti města jeho zeměpisné poloze, ročním období, na denním a nočním chodu a na rychlosti a směru větru. Pro Prahu je letní průměrná intenzita tepelného ostrova určená z měření v Klementinu a pěti meteorologických stanic v okolí Prahy 2,7 až 3,1 K (obr. 3). Četnost intenzit tepelného ostrova větších než 4 K je v létě 7 až 16 % (Beranová 2002).

Díky nárůstu počtu obyvatel, intenzifikaci dopravy a dalším faktorům dochází k nárůstu intenzity tepelného ostrova u většiny měst (obr. 4).



Obr. 3 Intenzita pražského tepelného ostrova pro jednotlivá roční období (Beranová 2002)



Obr. 4 Nárůst intenzity tepelného ostrova vybraných měst (Akbari 2007), a pro Prahu (Beranová 2002)

Kromě efektu městských tepelných ostrovů, vznikají i místní tepelné ostrovy okolo jednotlivých budov. Vzduch se ohřívá jak nad ulicemi a parkovacími plochami, tak podél osluněné fasády budovy. Tyto lokální teplotní rozdíly je třeba respektovat při návrhu systému větrání a klimatizace a systémů měření a regulace. Sání čerstvého vzduchu by nemělo být v místě s rizikem vyšší teploty (vhodná je severní orientace), také čidla měření a regulace je třeba důkladně stínit proti slunečnímu záření a umístit mimo lokální tepelné ostrovy.

Efekt stromů a zeleně

Rostliny mají naopak příznivý vliv na teplotu vzduchu a intenzitu záření, jak v interiéru budov tak v jejich okolí. Rostliny, především stromy pohlcují značnou část slunečního záření listy, pohlcená energie se částečně využije pro fotosyntézu (možno zanedbat), částečně se předá do okolí ve formě vázaného tepla (odpar vody z pórů rostliny) a částečně se předá do okolí ve formě tepla citelného. Rozhodující pro výslednou bilanci je množství vody odpařené z povrchu listů, které způsobuje snížení teploty vzduchu. Z povrchu listů s otevřenými póry se odpaří 50 až 70 % vody jako z vodní hladiny o stejné ploše, při stejných klimatických podmínkách (Santamouris 1996). Měření efektu stromů u dvou domů v Sacramentu v Kalifornii v roce 1992 ukázala, že stínění a ochlazování vzduchu stromy v blízkosti budov vedlo ke snížení spotřeby energie na chlazení o 30 % (3,6 a 4,8 kWh/den) a snížení maximální spotřeby el. energie o 0,6 a 0,8 kW (27 % a 42 %) (Akbari 2005). Výsadba stromů a rozšíření parků má významný vliv na snížení výše zmiňovaného efektu městských tepelných ostrovů, v průměru můžou stromy snížit odpolední letní teploty ve městech o 0,3 až 1 K v některých případech i o 3 K (Akbari 2005).

U listnatých stromů je příznivé i opadání listů v zimním období, kdy není stínění v našich klimatických podmínkách žádoucí. Listnatý strom má v létě propustnost slunečního záření 15 až 30 %, a v zimě 55 až 65 % (Santamouris 1996). Pro chlazení budov jsou rozhodující dva efekty stromů a rostlin – stínění a snížení teploty vzduchu adiabatickým odpařováním vody z listů; třetí vliv, který také hraje určitou roli, je rostlina jako překážka při proudění větru. Kromě toho existují i další příznivé vlivy stromů a rostlin, jako je přeměna CO₂ na kyslík, pohlcování smogu, tlumení hluku a v neposlední řadě vytváření lidem příjemného prostředí.

Pro detailní řešení vlivu zeleně existují modely založené na bilanci vázaného tepla sdíleného konvekcí a sáláním. Bilance vázaného tepla lze řešit podle vztahu uvedených v zahraniční literatuře (Levinson 1997):

Význam vodních hladin a fontán

Podobně jako u stromů přispívají ke snížení teploty vzduchu i vodní plochy a fontány. U vodních ploch a fontán dochází k adiabatickému odpařování vody a citelné teplo se přeměňuje na vázané. U větších vodních objemů jako jsou jezera a rybníky, má vliv i vlastní tepelná kapacita objemu vody. Při adiabatickém ochlazování vodou lze snížit teploty vzduchu o cca 4 K (Santamouris 1996).

Kombinace vodních hladin a stromů může kompenzovat v okolí budovy efekt městského ostrova a snižovat teplotu vzduchu. Vodní plochy nebo rostliny mohou být i součástí stavby například zelené střechy či fasády porostlé rostlinami.

Tepelná hmota budovy

Jako tepelná hmota budovy je definována hmota stavebních konstrukcí případně vybavení, která se podílí na akumulaci tepla budovy (Santamouris 1996). Tepelná kapacita stavebních konstrukcí představuje výrazný faktor ovlivňující parametry prostředí v budově. Charakter tepelných zisků je většinou cyklický a to jak během dne tak během roku, proto stavba s dostatečnou tepelnou hmotou akumuluje teplo v době špičkové zátěže během dne a uvolňuje ho v době minimální zátěže v noci (pří-

padně léto-zima). Proto je vysoká tepelná hmota budovy v podstatě nutnou podmínkou pro koncepci pasivní budovy z pohledu chlazení.

Tepelná hmota budovy použitelná pro útlum kolísání teplot v denním cyklu je tvořena vrstvou konstrukcí stěn, stropu a podlah do hloubky 40 až 100 mm, přičemž akumulční schopnosti obvodové stěny jsou výrazně omezeny tepelným tokem z vnějšího prostředí a sezónní akumulací tepla.

Detailní výpočet chování tepelné hmoty je poměrně složitý. Je třeba kombinovat přestup tepla konvekci mezi stěnou a vnitřním vzduchem, teplo předané zářením – jak vnější procházející okny, tak záření z vnitřních zdrojů a vzájemné sálání stěn spolu s nestacionárním vedením tepla ve vlastní stěně. Při řešení se buď vychází ze zjednodušeného sinusového průběhu tepelných zátěží a zjednodušené bilance záření, nebo z výpočtu dynamickým počítačovým modelem. Určitým mezistupněm jsou potom zjednodušené (počítačové) modely prezentované v evropských normách EN ISO 13791 a 13792.

Jednou z možností jak výrazně zvýšit tepelnou hmotu budovy je uplatnění materiálů se změnou skupenství (PCM), které mají výrazně vyšší tepelnou kapacitu při malých rozdílech teplot (Ostrý 2006).

Stínění budovy, oken

Základním prvkem pasivních budov z pohledu chlazení je snížení tepelné zátěže radiací okny. K neúčinnějším možnostem patří vnější stínění oken. Stínění je možné zajistit pevnými či pohyblivými prvky, žaluziemi, roletami, markýzami, či slunolamami. V této kapitole bude prezentován správný návrh stínících prvků.

Sluneční geometrie

Poloha slunce je dána slunečním azimutem a (úhel slunečního paprsku od směru sever) a výškou slunce nad obzorem h (úhel pod kterým pozorovatel vidí slunce nad obzorem), oba tyto úhly závisí na sluneční deklinaci δ (zeměpisná šířka s kolmým dopadem paprsků ve 12 hodin slunečního času). Vztahy pro výpočet polohy slunce jsou všeobecně známé a hojně publikované (Nový 2000) proto je není třeba uvádět.

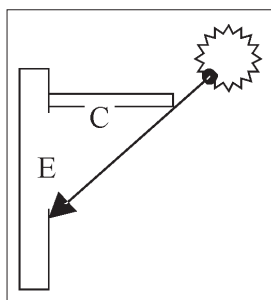
Stínící prvek by měl být navržen tak, aby v době vysoké intenzity dopadajícího záření byla okna plně zastíněna. Za předpokladu vodorovného stínícího prvku lze určit délku stínu (ČSN 730548) ze vztahu:

$$E = C \cdot \frac{\tan(h)}{\cos(a - \gamma)}$$

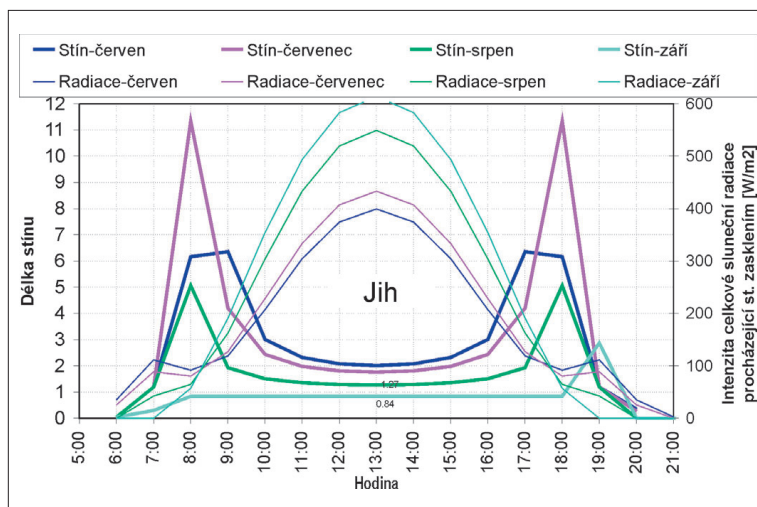
kde

- E délka stínu [m]
- C hloubka stínícího prvku [m]
- h výška slunce nad obzorem [°]
- a sluneční azimut [°]
- γ azimut normály stěny [°].

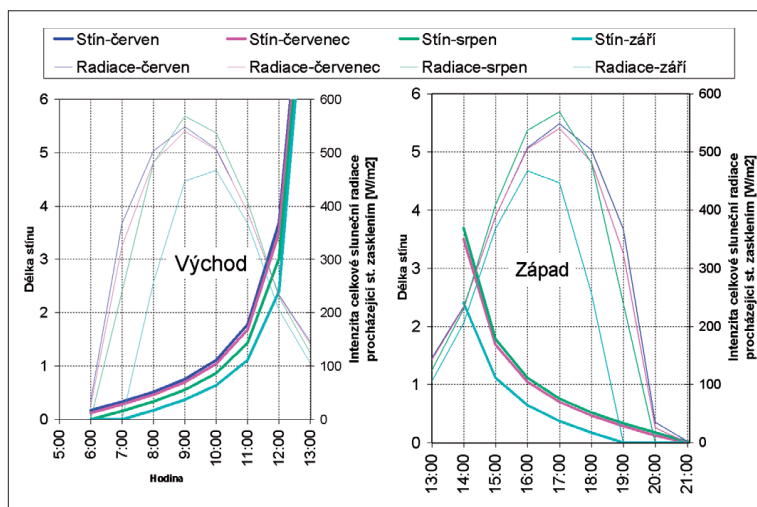
Pro analýzu optimální velikosti stínících prvků byla vypočtena poměrná délka stínu (délka stínu odpovídající 1 m hlubokému vodorovnému slunolam) pro Prahu a vybrané letní měsíce (každý měsíc reprezentován 1 dnem dle ČSN 730548); tyto délky stínů spolu s intenzitami celkové slu-



Obr. 5 Schéma délky stínu



Obr. 6 Poměrná délka stínu [$m_{\text{stínu}}/m_{\text{stínícího prvku}}$] a celková sluneční radiace pro jižní orientaci stěny



Obr. 7 Poměrná délka stínu [$m_{\text{stínu}}/m_{\text{stínícího prvku}}$] a celková sluneční radiace pro východní a západní orientaci stěny

neční radiace procházející standardním zasklením v jasný den, vztažené k letnímu času, jsou znázorněny na obr. 6 a 7.

Z analýzy výsledků vyplývá, že pro jižní orientaci je možné použít vodorovných stínících prvků (slunolamů) nad okny. Délka stínu bude nejnejpříznivější v měsíci září, kdy bude odpovídat celodenně 0,84 násobku hloubky stínícího prvku, v září dosahují maximálních hodnot i intenzity radiace dopadající na jižní stěnu. V ostatních letních měsících budou délky stínů výrazně větší (v srpnu bude minimální délka stínu 1,27 hloubky stínícího prvku). V případě instalace vodorovných pevných žaluzií je vhodné, aby rozteč žaluzií byla 0,84 krát hloubka stínící lamely, v případě slunolamu těsně nad oknem by jeho hloubka měla být 1,2 krát výška okna.

Pro západní a východní orientaci stěn se vodorovné stínící prvky nehodí, v době maximální dopadající radiace je poměrná délka stínu výrazně nižší než 1. V době kdy poměrná délka stínu dosahuje hodnot 0,333 (tj. pro zastínění 1 metru okna je třeba 3 m hloubky slunolamy) jsou intenzity radiace procházející zasklením blízké 400 W/m². Proto pro východní a západní orientaci je třeba použít stínících prvků s pohyblivými lamelami.

Přirozené větrání

Budovy s přirozeným větráním (bez ventilátorů), které je využíváno na odvod tepelné zátěže v letních měsících jsou často zahrnovány mezi budovy s pasivním chlazením.

Přirozené větrání se většinou rozlišuje jako infiltrace, provětrávání, aerace a šachtové větrání (Nový 2000). Komplexní řešení přirozeného větrání budovy může být kombinací těchto základních metod.

Běžné je využití přirozeného větrání rozdílem hustot vzduchu v halách s vnitřními tepelnými zisky (aerace). V těchto halách je celoročně vyšší teplota než teploty venkovního vzduchu a spodní otvory slouží pro přívod a horní pro odvod, v hale nejsou žádné další výrazné odpory pro proudění vzduchu. V zimních měsících je výrazně vyšší rozdíl teplot a tudíž i účinný tlak a pro stejný požadovaný průtok vzduchu je možné využít menších otvorů, menší zimní přívodní otvory se většinou umísťují výše, aby se zmenšilo riziko průvanu v pracovní oblasti. Naopak velké přívodní otvory pro léto jsou u podlahy, kde se maximálně využije výška objektu a vyšší rychlosti proudění jsou při vysokých teplotách v hale příznivé.

V objektech s nižší tepelnou zátěží dochází většinou během horkých letních dnů k opačnému proudění a vzduch je přiváděn horními otvory a odváděn spodními, protože teplota v objektu je nižší než teplota venkovního vzduchu. Optimální návrh a regulace takového systému je poměrně náročná, protože teplejší venkovní vzduch může zahřívát budovu, ale zároveň větrání odvádí tepelné zisky. Pro budovy s velmi nízkými tepelnými zisky je většinou vhodnější větrání během dne omezit. Dynamická počítačová simulace může pomoci při hledání optimálního režimu.

Zásady pro přirozené větrání administrativních budov

Při návrhu budovy s přirozeným větráním je třeba již od prvního konceptu zohlednit koncepci větrání. Budova musí mít vhodně navržené přívodní otvory. V případě že jsou to okna, měla by být otevíratelná část dostatečně velká, měla by umožňovat nastavení velikosti otevření (podle potřeby větrání) a měla by být zabezpečena proti povětrnostním podmínkám (silný vítr, déšť). Je možné použít servopohon pro otevírání oken. Je možné použít i speciálních větracích otvorů (štěrbín), kde je výhodou například možnost automatického nastavení průtoku, či ochrana proti dešti a vniknutí do objektu.

Pro maximální využití proudění vlivem větru je třeba zajistit příčné provětrání budovy. Buď velkoprostorovými kancelářemi s okny na obou stranách budovy, nebo dostatečně velkými otvory propojujícími kanceláře s chodbou případně atriem. Tyto propojovací otvory by měly být opatřeny tlumiči hluku pro zabránění přeslechů.

Pro umožnění proudění vlivem rozdílných hustot uvnitř a venku je třeba zajistit svislé šachty, ty mohou být realizovány formou speciálních vzduchových šachet, nebo atrií.

Pro zvýšení tlakové difference v letních měsících lze použít solárních komínů. Solární komín je umístěn na střeše budovy jako součást šachty pro odvod vzduchu. Solární komín je řešen jako sluneční kolektor, který ohřívá odváděný vzduch a tím se zvyšuje rozdíl tlaků vlivem rozdílných hustot vzduchu. Výhodou solárního komína je, že jeho funkce se zlepšuje s rostoucí intenzitou sluneční radiace stejně jak narůstá i tepelná zátěž objektu. Při návrhu systému přirozeného větrání je třeba řešit jak minimální průtoky, které nastávají v bezvětrí a při malých teplotních rozdílech a ověřit, zda budou dostatečné, pro přívod čerstvého vzduchu a odvod tepelné zátěže. Tak je třeba ověřit i extrémní průtoky, které mohou nastat při vysokých rychlostech větru a nebo velkých teplotních rozdílech, vzhledem k riziku průvanu. Při předběžném návrhu se většinou provádí výpočet pro vybrané klimatické podmínky. Pro detailní řešení je vhodná dynamická počítačová simulace.

V našich klimatických podmínkách je problematické přirozené větrání v zimních měsících, kdy je sice dostatečný rozdíl tlaků díky rozdílu hustot, ale teploty přiváděného vzduchu jsou velmi nízké a hrozí nebezpečí prů-

vanu. Pro zimní větrání by měla být možnost nastavení malých přívodních otvorů (štěrbín).

Komponenty pro přirozené větrání rozsáhlých administrativních budov, nejsou na našem trhu příliš dostupné. Paradoxně se pak cena speciálních servopohonů pro otevírání oken může blížit i pořizovací ceně ventilátorové klimatizační jednotky.

ZÁVĚR

Pasivní administrativní budovy (z pohledu chlazení) jsou v České republice stále hojně zastoupeny. A pasivní chlazení je standardem u budov určených pro bydlení. Zásady správného návrhu pasivní budovy lze shrnout do následujících bodů, které je třeba aplikovat při návrhu budovy s pasivním chlazením:

- Minimalizace tepelných zisků z vnějšího prostředí (vnější stínění oken, selektivní skla, izolace a stínění fasád a střech).
- Minimalizace vnitřních tepelných zisků (dostatečná podlahová plocha na osoby, nepoužívat kancelářskou techniku s vysokými tepelnými výkony, úsporné osvětlení).
- Dostatečná tepelná hmota budovy (betonový strop bez podhledů, podlaha bez koberec).
- Budova navržena tak, aby bylo možné přirozené větrání (nejlépe ve dne i v noci).
- Umožnit tepelnou adaptaci zaměstnanců (lehké oblečení, otevíratelná okna).
- Snažit se minimalizovat teplotu okolo budovy (zeleň, vodní plochy).

Při projektování nové nebo rekonstrukci stávající budovy s pasivním chlazením by měly být ověřeny teploty ve vnitřním prostoru podle adaptivního modelu tepelné pohody a optimalizovány jednotlivé prvky systému předpokládaného provozu.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl napsán s podporou výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí.

Použité zdroje:

- [1] Akbari, H. (2005) *Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation*. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, (<http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-58285/>)
- [2] Akbari, H.; Menon, S.; Rosenfeld, A. (2007) *Global cooling: effect of urban albedo on global temperature*. Proceedings of 2nd PALEC conference and 28th AIVC Conference, Heliotos Conferences, Athens, pp 6-9, ISBN: 978-960-6746-04-8
- [3] Allard, F.; Ghiaus, C.; Mansouri, Y. (2003) *Natural Ventilation Strategies*, NAS EnerBuild RTD proceedings Workshop, pp. 46-64, ISBN 8023907425
- [4] Beranová, R.; vedoucí práce Huth, R. (2002) *Pražský tepelný ostrov: intenzita a dlouhodobé změny za různých synoptických podmínek*, Diplomová práce, Katedra meteorologie a ochrany prostředí, Matematicko-fyzikální fakulta, UK v Praze, s. 84, <http://home.tiscali.cz/podnebi>.
- [5] Levinson, R. (1997) *Near-ground cooling efficacies of trees and high-albedo surfaces*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBL-40334, Berkeley,
- [6] Nový, R.; a kolektiv (2000) *Technika prostředí*, skriptá ČVUT, Praha, ISBN 8001021084
- [7] Ostrý, M. (2006) *Potenciál využití materiálů s fázovou změnou v lehkých konstrukcích*. Budovy a prostredie 2006, Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia ZSVTS Bratislava, ISBN 978-80-227-2759-4.
- [8] Santamouris, M.; Asimakopoulos, D.; (1996) *Passive Cooling of Buildings*, James & James Ltd.; London, U.K.; 472 p. ■