

Ing. Jakub KOLAŘÍK^{1,3},
Ing. Ján BABIAK^{2,3}

Použití tepelně aktivních prvků stavební konstrukce k vytápění a chlazení kancelářských budov – díl I

Utilization of the Thermo Active Building Systems for heating and conditioning of the Office Buildings – Part I

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Systémy vytápění a chlazení, které aktivně využívají velkou tepelnou kapacitu masivních stavebních konstrukcí jsou v dnešní době stále více využívány v mnoha Evropských zemích. Použití těchto systémů přináší významné energetické úspory. Článek uvádí přehled tepelně aktivních prvků stavebních konstrukcí užívaných v dnešní době, popisuje princip jejich funkce a podmínky pro jejich použití v administrativních budovách.

Klíčová slova: tepelná kapacita, akumulace, beton, sálavé chlazení, vytápění, spotřeba energie

Thermo Active Building Systems (TABS) are very widely used for heating and cooling of the office buildings in many European countries. Utilization of such systems means significant energy savings. The article gives an overview of currently used types of TABS and describes their operation principles. Basic requirements for the installations of TABS in office buildings are also mentioned.

Keywords: thermal mass, concrete, radiant cooling, heating, energy efficient building

Téměř 30 % světové energetické spotřeby tvoří energie potřebná pro vytápění, chlazení a větrání budov. Vysoká energetická náročnost zařízení techniky prostředí je často diskutována v mnoha evropských zemích. Vědci a inženýři neustále hledají nové způsoby, jak řešit úpravu vnitřního prostředí v budovách s cílem minimalizovat energetické nároky. Na druhé straně, zvýšené požadavky na tepelný komfort a izolační vlastnosti budov, společně s rostoucími vnitřními tepelnými zisky (lidé, instalovaná elektrická zařízení) zapříčinily stále rostoucí počet budov, kde jsou kromě vytápění instalována také klimatizační zařízení. Ve střední Evropě je ke klimatizaci nejčastěji používán centrální vzduchotechnický systém. Vzduchotechnické jednotky nejsou navrženy pouze pro dodávku hygienického množství čerstvého vzduchu, ale jejich výkon je dimenzován na odvod tepelných zisků budovy. To v praxi většinou znamená velmi vysoké intenzity výměny vzduchu a tím i vysoké energetické nároky na jeho úpravu. Navíc, přestože klimatizace umožňuje lepší kontrolu parametrů vnitřního prostředí, je obecně známo, že její užití je často spojeno s problémy. Jako příklad lze uvést obtěžování osob průvanem, zvýšenou hladinu hluku nebo tzv. syndrom nemocné budovy [1]. Velmi časté jsou také případy, kdy je centrální větrací systém kombinován s lokálními klimatizačními jednotkami a zároveň ústředním vytápěním. Není třeba dodávat, že tato řešení jsou také velmi energeticky náročná.

Alternativou vedoucí ke snížení spotřeby energie jsou systémy, které umožňují oddělit přívod čerstvého venkovního vzduchu a úpravu tepelných parametrů v prostoru. Pro odvod tepelné zátěže mohou být použity například chladicí stropy [2]. V poslední době začíná být také stále častěji aplikováno podlahové chlazení [3, 4]. Dalším krokem ke snižování energetické náročnosti je využití tepelné kapacity stavební konstrukce budovy k akumulaci energie. Aby bylo možno tepelně akumulační vlastnosti budovy plně využít, je třeba určitým způsobem ovlivňovat tepelné toky v její konstrukci. Tento postup nazýváme tepelnou aktivací. Systém je přímou součástí stavební konstrukce budovy. V zahraniční odborné literatuře je proto používán název "Thermo Active Building Systems" (zkráceně TABS). Do češtiny lze tento termín přeložit jako „tepelně aktivní prvky stavební konstrukce“. Teplonosná lát-

ka (voda) cirkuluje potrubními registry integrovanými do betonového bloku podlaží. „Aktivace“ stavební konstrukce nemá pouze přímý účinek, ale umožňuje také snížení špičkových tepelných zisků/ztrát a jejich částečné přenesení mimo dobu pobytu osob (noční hodiny).

Použití těchto systémů přináší významné úspory energie, a to hned z několika důvodů. Prvním z nich je výše zmíněný fakt, že odděluje větrání a úpravu tepelných podmínek v místnosti. Vzduchotechnický systém tedy přivádí pouze hygienické minimum čerstvého venkovního vzduchu, což vede k redukci jeho velikosti a ke snížení nákladů na úpravu a transport přiváděného vzduchu. Přenesení části tepelných zisků, respektive ztrát do nočních hodin umožňuje jejich pokrytí v době nižších energetických tarifů. Další významné úspory jsou dosahovány díky tomu, že TABS pracují s teplotami teplonosné látky velmi blízkými teplotám v místnosti (teplotní rozdíl do 5 K). Tato provozní vlastnost usnadňuje jejich použití v kombinaci s alternativními (nízko-potenciálními) zdroji energie jako jsou tepelná čerpadla, zemní výměníky a pod. Výše zmíněný malý teplotní rozdíl má také pozitivní vliv na účinnost použitých zdrojů tepla.

HISTORIE TEPELNĚ AKTIVNÍCH STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Počátky využití tepelné aktivace stavebních konstrukcí pro sálavé vytápění/chlazení v administrativních budovách sahají do třicátých let minulého století. V roce 1937 byla ve Švýcarsku uvedena do provozu první konstrukce systému zvaného „Cristal“. Systém byl tvořen svařovanými ocelovými trubkami zabudovanými v betonové konstrukci podlaží budovy [5]. Nejvýznamnějším nedostatkem prvních systémů byla častá kondenzace vodní páry, a to nejen na povrchu stropu, ale také na povrchu trubek uvnitř stavební konstrukce při použití systému v režimu chlazení. Pozdější studie ukázaly, že tento problém je možné odstranit, pokud je systém používán společně s větracím systémem udržujícím nižší teplotu rosného bodu. Tato koncepce byla úspěšně použita v obchodním domě postaveném v letech 1936–1937 v Curychu [6], a následně také na začátku padesátých let v Kanadě [7]. Kondenzace však nebyl jediný problém, se kterým se tyto systémy potýkaly. Velkou technickou bariérou bráncí jejich velkému rozšíření byl fakt, že ocelové trubky vykazovaly vysokou poruchovost. Porušení svarového spoje uvnitř konstrukce vedlo nejčastěji k uzavření celého jednoho okruhu a oprava nebyla možná bez zásahu do stavební konstrukce.

¹⁾ Dept. of Heating, Ventilation and Dust Removal Technology, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

²⁾ Dept. of Building Services, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

³⁾ International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

Začátkem devadesátých let minulého století začaly tepelně aktivní stavební konstrukce znovu získávat na popularitě [8,9]. Postupem času se staly běžně užívanými hlavně v sousedním Německu, Švýcarsku a Rakousku.

ZÁKLADNÍ TYPY TEPELNĚ AKTIVNÍCH STAVEBNÍCH PRVKŮ

Základní typy aktivních stavebních prvků používaných v současnosti ukazuje obr. 1. Prvek je vždy tvořen samotnou stavební konstrukcí, do které je včleněn „aktivační element“. Aktivačním elementem mohou být podélné kanály pro průchod vzduchu nebo registry z plastových trubek podle toho, jaká teplotonosná látka je použita k aktivaci konstrukce (vzduch/voda).

Vzduchové systémy

Jak je vidět na obr. 1a, prvním typem tepelně aktivních konstrukcí jsou vzduchové. Deska podlaží budovy je ohřívána nebo chlazená vzduchem proudícím podélnými kanály. Tento systém byl v osmdesátých letech minulého století používán v kancelářských budovách zejména ve Velké Británii, ale v současnosti je jeho použití spíše ojedinělé. Betonová deska podlahy musí být konstruována tak, aby byl zajištěn dostatečně vysoký součinitel přestupu tepla z proudícího vzduchu do desky. Vzduch proudící přes kanály může být používán také pro větrání.

Vodní systémy

Většina tepelně aktivních stavebních konstrukcí instalovaných v dnešní době využívá jako teplotonosnou látku vodu (obr. 1b). Potrubní registry jsou většinou instalovány ve středu betonové desky, kde jsou připevněny k její ocelové výztuži. Potrubí je vyrobeno obvykle ze síťovaného polyethylenu – PE-X (případně VPE, při velkých vzdálenostech mezi nosnými stěnami a extrémně namáhaných stropních deskách). Běžně používané světlosti plastových trubek jsou 17 až 20 mm. Rozteč trubek v registru je většinou 150 až 200 mm. Obr. 2 ukazuje detail příklad konstrukce vodního tepelně aktivního stavebního prvku.

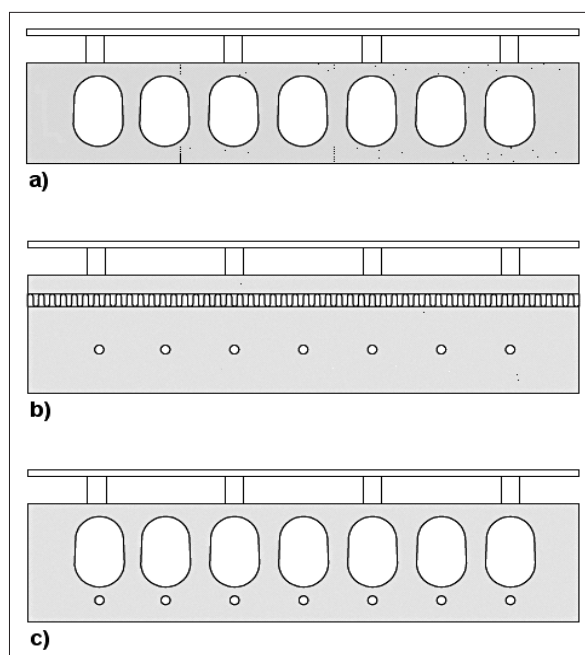
Při instalaci aktivních systémů většina dodavatelů používá prefabrikované moduly s trubkovým registrem připevněným k ocelové konstrukci (mříži). Moduly jsou propojovány do větších celků, aby byla pokryta celá plocha podlaží (obr. 3). Druhou možností je přímá pokládka potrubí, jak je tomu například u podlahového vytápění. Tento způsob se používá zejména v případech, kde není možné rovnoměrně pokrýt plochu podlaží prefabrikovanými moduly (geometricky složitý tvar budovy). Potrubí je připevněno speciálními úchyty na ocelovou výztuž betonového jádra. V betonovém bloku je mezi trubkami a podlahou daného podlaží také umístěna tepelná a zvuková izolace, aby tepelný tok byl směřován dolů (strop předchozího podlaží) a byl omezen přenos hluku. Po položení potrubních registrů je ověřena těsnost tlakovou zkouškou. Po jejím ukončení potrubí je ponecháno pod tlakem a zalito betonem.

Kombinované systémy

Uspořádání tepelně aktivních prvků zahrnující kombinaci obou teplotonosných látek jsou slibnou budoucností pro tepelně aktivní konstrukce. Aktivace vodních registrů urychluje dynamiku systému (ve srovnání se vzduchovým systémem). Kanály pro dopravu vzduchu jej mohou zároveň předejít předtím než je přiveden do místnosti. Tento typ systému není ještě v praxi příliš rozšířen, můžeme však už dnes najít budovy, které ho úspěšně využívají [10], kombinované systémy jsou dnes také předmětem intenzivního výzkumu [11].

Princip fungování aktivní stavební konstrukce

Jak už bylo řečeno v úvodu, mají tepelně aktivní konstrukce vedle přímého účinku na vnitřní prostředí v místnosti také výrazný akumulační efekt. Celá konstrukce podlaží budovy je využita pro akumulaci tepla. Chování tepelně aktivované stavební konstrukce je velmi dobře patrné z obr. 4a až 4c. Ty ukazují výsledky simulace [12]. Obr. 4a ukazuje průběh teploty za 24 hodin



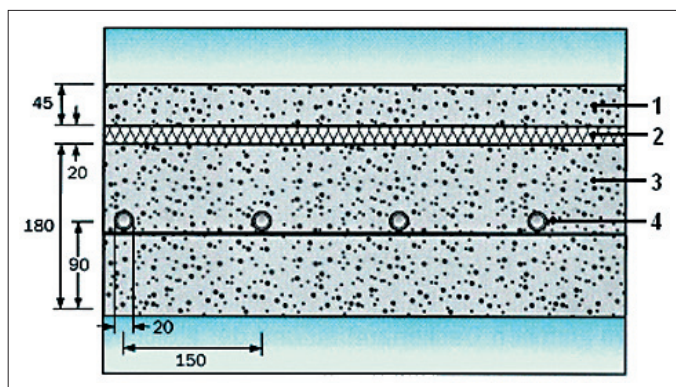
Obr. 1 Základní typy tepelně aktivních stavebních prvků [11]

a) vzduchový, b) vodní, c) kombinovaný

pro místnost s vnitřní tepelnou zátěží bez chlazení. O šesté hodině ranní jsou teploty všech povrchů v místnosti stejné 20 °C. Poté je v místnosti simulována tepelná zátěž a teploty začínají vzrůstat. Operativní teplota vzrůstá po celý den a dosahuje svého maxima 26 °C přibližně v 18:00. V tuto dobu je odstraněna tepelná zátěž („lidé vypnou počítače a jdou domů“) a teploty začínají klesat. V průběhu noci (v místnosti nejsou tepelné zisky) se prostor postupně ochlazuje a dalšího rána dosahuje jak operativní teplota tak průměrná teplota betonové desky cca 21,3 °C. Tato teplota je cca o 1,3 K vyšší než předešlého dne. Pokud by nebylo aplikováno chlazení, bude tato teplota každým dnem postupně vzrůstat. Obr. 4b ukazuje vývoj teplot v případě, že betonové jádro je cirkulací chladicí vody udržováno na stále teplotě 20 °C. Zde je jasné patrné, že teploty se přes noc vrací na původní hodnotu ze začátku simulace, nedochází tedy k postupnému nárůstu teploty v betonové desce. Teplota uvnitř desky vzroste v průběhu dne na 21,5 °C, ale v průběhu noci je tento vzrůst eliminován chlazením. Obr. 4c ukazuje průběhy teplot v případě, kdy je betonové jádro chlazené pouze v noci. Zde si můžeme všimnout, že výsledky jsou v podstatě stejné jako při 24 hodinovém chlazení. Pouze na konci pracovní doby je operativní teplota nepatrně vyšší. Důvodem pro tak malý vliv různé doby chlazení betonového jádra na teploty v místnosti je to, že během pracovní doby dochází ke vzrůstu teploty jádra. V důsledku toho se zmenšuje rozdíl mezi teplotou v trubkovém registru a betonovou deskou, což se projeví ve snížení tepelného toku. Mimo pracovní dobu je však tento teplotní rozdíl stejný jako v případě 24 hodinového chlazení, takže ve výsledné bilanci dojde jen k mírnému snížení předaného tepla. Toto je jedna z hlavních předností tepelně aktivních stavebních konstrukcí – špičková tepelná zátěž místnosti je akumulována v konstrukci budovy a odvedena nočním chladem.

Výkon a dimenzování

Z technického hlediska je návrh tepelně aktivního stavebního prvku založen na stejných parametrech jako návrh běžných systémů velkoplošného sálavého vytápění. Těmito parametry jsou rozteč a světlost trubek, tloušťka betonové vrstvy, umístění (způsob kladení) trubek v betonové vrstvě, hmotnostní průtok teplotonosné látky a její teplota na přívodu. Vedení tepla v betonové desce a jeho přenos mezi jejím povrchem a místností odpovídá výše uvedeným systémům. Mohlo by se tedy zdát, že pro výpočet provozních parametrů můžeme použít současnou evropskou normu pro podlahové vytápění [13]. Zde je však třeba připomenout, že výsledky výpočtu podle této normy striktně reprezentují ustálený provozní stav soustavy. Jelikož pro tepelně aktivní stavební konstrukce je důležitá právě jejich provozní dynamika, jsou tyto



Obr. 2 Řez typickým tepelně aktivním prvkem stavební konstrukce – vodní systém
1 – betonová mazanina, 2 – kročejová a tepelná izolace, 3 – nosná betonová konstrukce podlaží, 4 – trubkový registr

výpočty pro přesný návrh nedostačující. Z tohoto důvodu je pro návrh systému vhodné použít počítačové simulace [14]. Předpověď dynamického chování aktivní stavební konstrukce je možná počítačovou simulací využívající výpočetních možností metody konečných prvků (Finite Elements Method – FEM) [15] nebo metody konečných diferencí (Finite Difference Method – FDM). Použití těchto metod bude zahrnuto v nově připravované Evropské normě nesoucí prozatímní označení prEN 15377 [16].

Provoz a regulace

Díky velké tepelné kapacitě betonové konstrukce je časová konstanta systému velká. Z těchto důvodů není vhodné používat lokální regulaci pro jednotlivé místnosti, ale vhodným způsobem rozdělit budovu na zóny (sever-jih). To umožňuje zohlednit rozdílné vnější i vnitřní tepelné zisky (ztráty). Teplota na přívodu, střední teplota v registru, hmotnostní průtok okruhem, případně pracovní cyklus oběhových čerpadel v jednotlivých zónách jsou poté nastavovány podle odlišných regulačních algoritmů. Malý teplot-

ní rozdíl mezi povrchem stropu a teplotou v místnosti vede k výraznému samoregulačnímu efektu. I malá změna teplotní difference výrazně ovlivňuje přenos tepla mezi chlazeným/vytápěným povrchem a prostorem místnosti. V některých případech, ve velmi dobře izolovaných budovách, může být udržována teplota betonového jádra po celý rok na konstantní teplotě.

Aby nedošlo ke kondenzaci vzdušné vlhkosti na povrchu tepelně aktivní konstrukce, nesmí její povrchová teplota poklesnout pod teplotu rosného bodu.^{*)} Pokud je teplota rosného bodu snížena větracím systémem (instalace odvlhčování), lze snížit také povrchovou teplotu aktivní plochy (stropu) a tím zvýšit výkon systému při odvodu citelných tepelných zisků. Instalace odvlhčování však zároveň zvyšuje cenu celé instalace, takže je třeba jeho použití pečlivě zvážit, nejlépe na základě simulací a ekonomické kalkulace.

^{*)} Pozn. recenzenta: U silikátových stěn dochází ke kondenzaci v jejich pórech (při pohledu neprůhledné) již při poklesu povrchové teploty pod hodnotu, která odpovídá relativní vlhkosti 75 % při dané měrné vlhkosti vnitřního vzduchu!

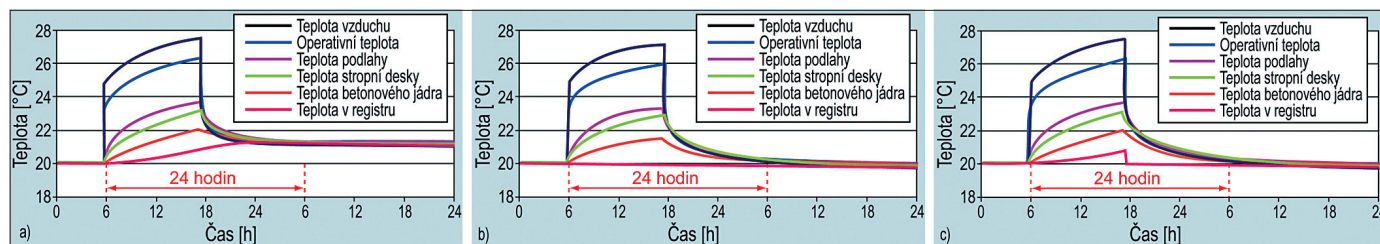
Možnosti použití tepelně aktivních stavebních konstrukcí

Využití systémů tepelně aktivních stavebních konstrukcí je doporučováno pro budovy, u kterých tepelné zisky a tepelné ztráty nepřesahují 40 W/m². Žádoucí je také vyrovnaný poměr mezi tepelnými zisky a ztrátami, potom není třeba nastavovat regulační armatury pro režim chlazení a vytápění odděleně. Ať už systém pracuje v režimu vytápění s relativně nízkou teplotou na přívodu, do 30 °C, a nebo v režimu chlazení s relativně vysokou teplotou přívodu (cca. 16 °C, teplotní rozdíl na okruhu od 3 do 5 K) oba režimy provozu umožňují využít nízkopotenciální zdroje tepla – např. tepelná čerpadla, zemní výměníky atd.

Většina instalací tepelně aktivních stavebních prvků byla zatím provedena v zemích s mírným klimatem. Instalace v zemích s chladným klimatem je omezena zejména tím, že maximální otopný výkon soustavy je limitován plochou tepelně aktivního prvku. I když je ve většině budov pro vytápění/chlaze-

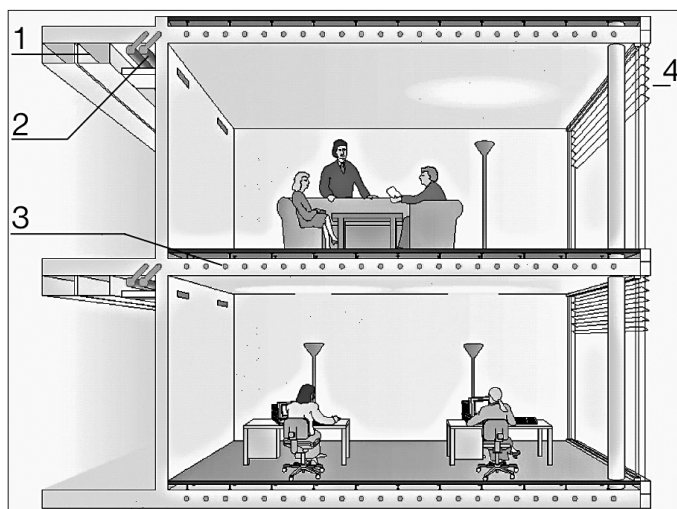


Obr. 3 Prefabrikovaný modul trubkového registru (obrázky z materiálů firmy Velta)
a) transport trubkového registru na stavbu, b) pokládka registru na výztuž nosné betonové desky



Obr. 4 Výsledky simulace místnosti chlazené tepelně aktivní stavební konstrukcí [12]

a) průběh teplot v místnosti bez chlazení, b) jádro betonové konstrukce udržováno na stálé teplotě 20 °C, c) betonové jádro konstrukce je chlazeno pouze v nočních hodinách



Obr. 5 Řešení větrání v budově s tepelně aktivní stavební konstrukcí (obrázek z materiálů fy. Zent – Frenger)

1 – vzduchotechnické potrubí, 2 – rozvod otopné/chladicí vody, 3 – trubkový registr v betonové konstrukci, 4 – systém stínění oken

ní používána celá plocha stropu, dosahuje maximální otopný výkon soustavy cca 60 W/m². Ten může být, v případech velmi nízkých venkovních teplot, nedostačující. Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že dnešní kancelářské budovy mají i v zimním období poměrně vysoké tepelné zisky, které mohou částečně kompenzovat tepelné ztráty. Použití systému v teplých oblastech je limitováno nejen omezeným chladicím výkonem, ale i nutností udržovat teplotu rosného bodu v místnosti na hodnotě nižší než je teplota aktivní konstrukce. Jedině tak může být zabráněno nežádoucí kondenzaci vzdušné vlhkosti (viz. výše). Vždy je vhodné budovu vybavit také účinným systémem stínění, který pomáhá redukovat vnější tepelné zisky (viz. obr. 5).

Větrání budov s tepelně aktivními systémy

V současné době neexistuje jednotný názor na to, který typ větrání je nejvhodnější použít v budově s tepelně aktivní stavební konstrukcí. V praxi se můžeme setkat s kombinacemi TABS a přirozeného i nuceného větrání. V případě nuceného přívodu vzduchu je používáno směšovací větrání, ale i jiné méně obvyklé typy. Hlavním problémem při návrhu a instalaci větracího systému je fakt, že nelze použít stropní konstrukci ani snížený strop pro instalaci potrubních rozvodů inženýrských sítí a pod. Všechny potrubní rozvody jsou vedeny v přilehlých chodbách a do místností vedou jen jednotlivé odbočky skrze stěnu (výústka ve stěně), obr. 5. Dále mohou být použity dvojité instalační podlahy. V některých případech jsou potrubní rozvody umísťovány i přímo do aktivních konstrukcí, a to ve formě oválného flexi-potrubí. Při použití zaplavovacího větrání je třeba pečlivě zvážit, zda chladicí výkon stropní plochy (povrchová teplota a průtok teplotonosné látky) neovlivní výškový teplotní gradient v místnosti. Ten je významným parametrem ovlivňujícím správnou funkci zaplavovacího větrání [17].

SHRNUTÍ

Tepelně aktivní stavební konstrukce lze s výhodami použít k vytápění a chlazení administrativních budov. Jejich instalace je do určité míry náročnější než instalace klasického systému. Avšak jejich provoz vyžaduje jen velmi malou údržbu, je ekologický a zejména ekonomicky velmi výhodný. Následující body shrnují výhody a omezení těchto systémů:

Výhody

- ❑ Malý rozdíl mezi teplotou teplotonosné látky (vody) a teplotou v místnosti umožňuje využití alternativních zdrojů energie.
- ❑ Systém odděluje větrání prostoru a úpravu jeho tepelných parametrů.
- ❑ Aktivací stavební konstrukce je možné převést část tepelných zátěží/ztrát mimo dobu pobytu osob. Tím je nejen snížen maximální po-

třebný výkon zdrojů tepla a chladu (o cca. 40 %), ale spotřeba energie je v průběhu dne rozložena rovnoměrně. Navíc lze v nočních hodinách často využít levnějších energetických tarifů.

Omezení

- ❑ Měrný výkon v režimu chlazení může být limitován obsahem vlhkosti ve vzduchu (rosným bodem).
- ❑ Vzhledem k tomu že systém funguje na principu akumulace, není možné udržovat stálou vnitřní teplotu v prostoru. Ta bude naopak v určitých cyklech pravidelně kolísat. V praxi můžeme očekávat teplotní kolísání cca 0,5 K/h.
- ❑ Je nutná optimalizace regulačních strategií pro provoz zdroje tepla/chladu, oběhová čerpadla a pod. po instalování a spuštění systému. „Ladění“ soustavy probíhá minimálně rok (jednu sezónu chlazení a jednu sezónu vytápění).

Druhé pokračování článku nabídne podrobnější pohled na provozní vlastnosti tepelně aktivních konstrukcí, ukáže příklady jejich úspěšné instalace a seznámí čtenáře podrobně s bariérami, které se mohou vyskytnout při jejich integraci TABS systémů do konstrukce budovy.

Kontakt na autory:

Jakub Kolařík: jak@mek.dtu.dk; Ján Babiak: jan.babiak@gmail.com

Použité zdroje:

- [1] Indoor Environment and Health, National Institute of Public Health, Sweden, 1999, ISBN 91-7257-025-3
- [2] Stetiu, C. Radiant Cooling in US Office Buildings: Towards Eliminating the Perception of Climate-Imposed Barriers, PhD Thesis, University of California, Berkeley, January 1998
- [3] Olesen, B. W. Possibilities and Limitations of Radiant Floor cooling, ASHRAE Trans. V.103, Pt.1, 1997
- [4] Simmonds, P. (1994), Control strategies for combined radiant heating and cooling systems., ASHRAE Trans. v. 100, Pt. 1
- [5] Deecke, H., Guenther, M., Olesen, B. W. 2003 Betonkernaktivierung, Velta Nordestedt, 2003
- [6] Giesecke, F. E. Hot-water heating and radiant heating and radiant cooling, Technical Book Company, Austin, USA, 1946
- [7] Manley, J. K. Radiant heating, radiant cooling, School of Architecture, Pratt Institute, 1954
- [8] Meierhans, R. A. Slab cooling and earth coupling, ASHRAE Transactions Symposia, Vol. 99 (2), 1993
- [9] Meierhans, R. A. Room air conditioning by means of overnight cooling of the concrete ceiling, ASHRAE Transactions Vol. 102 (2), 1996
- [10] Meierhans, R., Olesen B. W. House of Art in Bregenz – Soft HVAC for strong architecture, ASHRAE TC.5-Symposium Honolulu, USA, 2002
- [11] Weitzmann, P. Modeling Building Integrated heating and cooling systems, Ph.D. thesis at Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2002, ISBN 87-7877-152-2
- [12] Meierhans, R., Olesen, B. W. Betonkernaktivierung, Velta Nordestedt, 1999, ISBN 3-00-004092-7
- [13] EN 1264, Floor heating – Systems and Components, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1998
- [14] Hauser, G., Kempkes, Ch., Olesen, B.W. Computer simulation of the performance of a hydronic heating and cooling system with pipes embedded into the concrete slab between each floor., ASHRAE Transactions. Vol. 106 (1), 2000
- [16] prEN 15377, Heating systems in buildings – Design of embedded water based surface heating and cooling systems, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005
- [15] Babiak, J., Minárov, M., Petráš, D. Principles and calculations of temperature distribution in an active slab depending up various operation modes of TABS using FEM software, In proc: 8th REHVA World congress, Clima 2005, Lausanne, Switzerland
- [17] Behne, M. Indoor air quality in rooms with cooled ceilings. Mixing ventilation or rather displacement ventilation? Energy & Buildings 30, 1999