

Ing. Miloš LAIN, Ph.D.
 ČVUT v Praze,
 Fakulta strojní, Ústav techniky
 prostředí
 Univerzitní centrum energeticky
 efektivních budov

Zimní provoz klimatizačních systémů v nových administrativních budovách

Winter Operation of Air Conditioning Systems in New Office Buildings

Recenzent
 Ing. Marcel Kadlec

Článek se zabývá tepelnou bilancí administrativní budovy v zimním provozu. Poukazuje na skutečnost, že pro stávající administrativní budovy jsou vnitřní tepelné zisky často vyšší než tepelné ztráty prostupem. Do bilance je zahrnut i vliv větrání a zpětného získávání tepla. Analýzy jsou doplněny o detailní hodinový rozbor. Článek se zaměřuje nad koncepty řešení vytápění, větrání a chlazení těchto budov v zimním období. Článek je doplněn i o konkrétní zkušenosti se zimním provozem ve vybraných budovách.

Klíčová slova: administrativní budovy, zimní provoz, úspory energie

The article deals with thermal balance of the administrative building during winter operation. It refers to the fact that for the existing administrative buildings the internal heat gains are often higher than the overall losses by heat transfer. The balance includes the influence of ventilation and heat recovery. The study is supplemented with detailed hourly analysis. The article discusses the conceptual solution for heating, ventilation and cooling of such buildings in winter. The article is also accompanied by actual experience with winter operation of selected buildings.

Keywords: office buildings, winter operation, energy savings

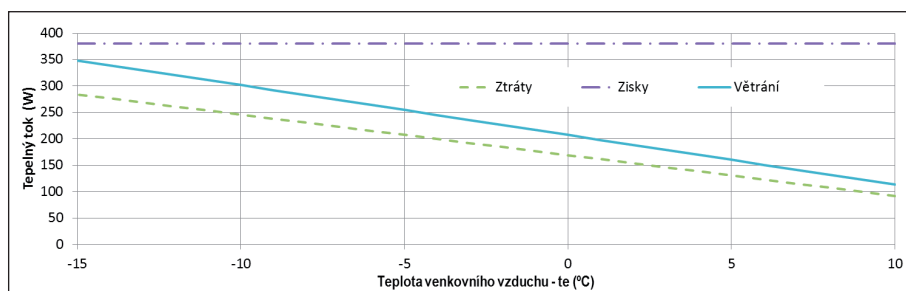
ÚVOD

Zkušenosti ze zimního provozu klimatizačních zařízení v nově stavěných, dobře tepelně izolovaných administrativních budovách ukazují rozpor mezi poměrně vysokými vnitřními tepelnými zisky (lidé, kancelářská technika) a malými tepelnými ztrátami. Na jedné straně existuje potřeba tepla pro vytápění a ohřev větracího vzduchu, na druhé straně nastává přehřívání budovy v odpoledních hodinách. Z této skutečnosti vychází myšlenka, že by budova sama o sobě mohla být alternativním zdrojem tepla, čímž lze docílit radikálního snížení spotřeby energie na vytápění administrativních budov.

ENERGETICKÁ BILANCE TYPICKÉ KANCELÁŘE

Pro posouzení zimního provozu klimatizačního systému byla zvolena typická kancelář (referenční místnost) s délkou fasády 3,2 m, hloubkou 5 m a výškou 3 m. Při půdorysné ploše 16 m² ji užívají dvě osoby s osobními počítači – vnitřní tepelné zisky jsou 380 W. Okna tvoří 50 % plochy fasády, součinitel prostupu tepla oken je uvažován 1,3 W/m²K, stěn 0,3 W/m²K.

Pro větrání kanceláře je zvolen průtok vzduchu 35 m³/h pro jednu osobu, tj. 70 m³/h venkovního vzduchu na kancelář. Je uvažováno s použitím zpětného získávání tepla s účinností 60 %. Teplota vnitřního vzduchu v místnosti je 22 °C. Rozsah teplot venkovního vzduchu odpovídá zimnímu provozu budov v České republice, tj. -15 až +10 °C.



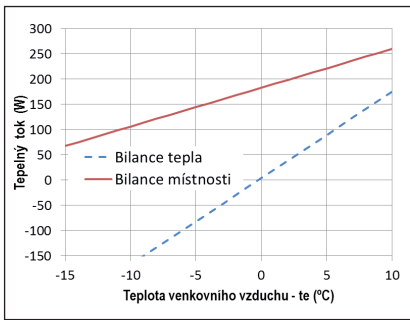
Obr. 1 Tepelná bilance referenční místnosti

Fig. 1 Heat balance of the reference room

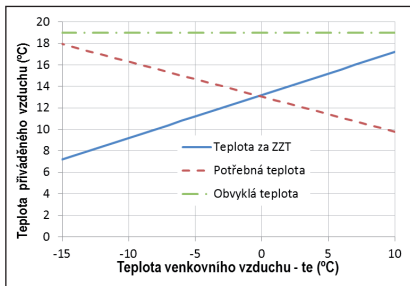
Na uvedeném příkladu byla zpracována tepelná bilance místnosti. Výsledky v závislosti na teplotě venkovního vzduchu jsou prezentovány na obr. 1. Je patrné, že tepelné zisky jsou v referenční místnosti vyšší než ztráty prostupem nebo větráním za všech posuzovaných podmínek. V grafu na obr. 2 je znázorněna energetická bilance zahrnující všechny výše zmíněné toky tepla (modrá čárkovaná čára). Pro teploty venkovního vzduchu vyšší než 0 °C je celková energetická bilance kladná, tepelné zisky jsou vyšší než tepelné ztráty prostupem a větráním. Pro teploty nižší než 0 °C je bilance záporná, tepelné zisky jsou nižší než ztráty a prostor potřebuje i v pracovní době vytápět.

Takto zpracovaná bilance tepla však předpokládá přívod venkovního vzduchu předeřátého ZTZ bez dalšího ohřevu. Nízká teplota přiváděného vzduchu je ale v reálném systému problematická. V běžném provozu je většinou do kanceláří přiváděn vzduch o teplotě blízké teplotě interiéru. V našem případě byla zvolena teplota přiváděného vzduchu 19 °C. Vzduch je ve vzduchotechnické jednotce ohříván z teploty za ZTZ na 19 °C. Na grafu v obr. 3 je znázorněna teplota za ZTZ (modrá čára) a teplota přiváděného vzduchu (zelená čára označená jako „obvyklá teplota“); jejich rozdíl odpovídá potřebnému výkonu pro ohřev vzduchu. Tepelná bilance místnosti (červená čára) uvedená v grafu na obr. 2 zahrnuje tepelné zisky, ztrátu prostupem a ztrátu větráním při teplotě přiváděného vzduchu 19 °C. Tato bilance místnosti je pro celý rozsah teplot kladná, místnost prakticky nepotřebuje v době užívání vytápět a naopak dochází k jejímu přehřívání.

Na obr. 3 jsou vyneseny sledované teploty. Teplota vzduchu (modrá čára) za zpětným získáváním tepla (při referenční účinnosti 60 %) se pohybuje mezi 7 až 17 °C a s rostoucí teplotou venkovního vzduchu narůstá. Přiváděný vzduch o takto nízké teplotě je pro zajištění tepelné pohody osob a minimálního rizika průvanu velmi obtížné v místnosti distribuovat (rozptýlit). Obrácený trend má teplota vzduchu potřebná pro dodržení požadované teploty v místnosti – ta s rostoucí teplotou venkovního vzduchu klesá (červená čárkovaná čára). Prů-



Obr. 2 Výsledná bilance typické kanceláře
Fig. 2 Resulting balance of the typical office room



Obr. 3 Teploty přiváděného vzduchu na základě bilance
Fig. 3 Supply air temperatures based on the balance

pro teploty venkovního vzduchu pod bilanční teplotou 0 °C. Při teplotách venkovního vzduchu nad 0 °C by bylo třeba pro dodržení teploty vnitřního vzduchu 22 °C chladit, nebo snížit účinnost ZTT. Budeme-li uvažovat typický rok, denní dobu, pondělí až pátek, nastávají teploty venkovního vzduchu nad 0 °C v 78 % otopné sezony (říjen až duben), tj. pouze 400 hodin jsou teploty nižší než 0 °C.

Jestliže však systém neumožňuje distribuci chladného vzduchu a přiváděný vzduch se navíc předehřívá, potřebují kanceláře po celou zimu chladit jiným zařízením, jinak se přehřívají.

Vliv průtoku vzduchu a účinnosti ZTT

Předchozí úvahy byly realizovány pro průtok venkovního vzduchu 35 m³/h na osobu a účinnost ZTT 60 %. Pro posouzení vlivu průtoku vzduchu a účinnosti zpětného získávání tepla byly zvoleny tři varianty průtoku venkovního vzduchu $V_e = 25, 35$ a 50 m³/h na osobu. Byl uvažován provoz bez zpětného získávání tepla a se ZTT s účinností 60 % nebo 80 %. Ostatní parametry zůstávají stejné.

Výsledkem bilance (tab. 1) je rozdíl mezi teplotou vnitřního a venkovního vzduchu (označen Δt), pro který jsou tepelné zisky a ztráty systému vyrovnané. Při teplotě vnitřního vzduchu 22 °C tomu odpovídá bilanční teplota venkovního vzduchu uvedená v následujícím sloupci. Jak je z tabulky patrné, je tato teplota silně závislá na účinnosti ZTT a mírně se mění i s průtokem vzduchu. Celkově se pohybuje mezi -12,4 °C pro systém s účinností ZTT 80 % a s průtokem vzduchu 25 m³/h na osobu, až po +12,8 °C pro systém bez ZTT a s průtokem vzduchu 50 m³/h na osobu. V posledním sloupci tabulky je vypočítána teplota venkovního vzduchu, při které je

sečík těchto přímk je opět při teplotě venkovního vzduchu těsně pod 0 °C (bilanční teplota), kdy jsou tepelné zisky a ztráty pro tento případ shodné (vyrovnaná bilance). Při teplotách pod 0 °C je tedy třeba přiváděný vzduch ohřívát minimálně na potřebnou teplotu. Při teplotách venkovního vzduchu nad 0 °C by pro dodržení bilance měla být přiváděná teplota vzduchu nižší, než je teplota za ZTT. Bude-li v této oblasti přiváděn vzduch o teplotě za ZTT nebo vyšší, je bilance v kladných hodnotách a kancelář se přehřívá.

Pro sledovanou typickou kancelář jsou tepelné zisky v zimě vždy vyšší než ztráty prostupem. Systém potřebuje teplo pro ohřev větracího vzduchu, a to pouze

Tab. 1 Vliv průtoku vzduchu a účinnosti ZTT

Tab. 1 Influence of the air flow rate and HR efficiency

V_e m³/h.os	ZTT %	Δt K	t_e pro t_i 22 °C °C	t_e při t_p 19 °C °C
25	0	15,5	6,5	-25,3
25	60	26,4	-4,4	-25,3
25	80	34,4	-12,4	-25,3
35	0	12,2	9,8	-24,4
35	60	22,2	-0,2	-24,4
35	80	30,7	-8,7	-24,4
50	0	9,2	12,8	-23,1
50	60	18,0	4,0	-23,1
50	80	26,4	-4,4	-23,1

*varianta popsána v předchozím odstavci

tepelná bilance nulová při uvažování předehřevu větracího vzduchu na 19 °C. Ta závisí pouze mírně na průtoku vzduchu a hodnoty v tomto sloupci jsou výrazně nižší než minimální venkovní teploty vzduchu v ČR.

DALŠÍ VARIANTY

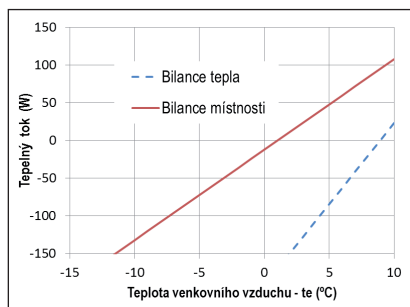
Pro posouzení vlivu zvolených vstupních parametrů byla tepelná bilance provedena i pro varianty s vyššími a nižšími tepelnými zisky blízcími se extrému.

V první variantě s **maximální tepelnou ztrátou a minimálními zisky** je uvažována větší kancelář (délka fasády 4 m) o ploše 20 m². V kanceláři pracují dvě osoby s notebooky (vnitřní zisky 280 W) a součinitel prostupu tepla oken je 1,7 W/m²K, ostatní parametry jsou shodné s předchozím případem.

Jak je patrné z obr. 3, v tomto případě je celková bilance systému většinu zimy záporná, bilanční teplota je cca 8 °C. V případě, že je teplota přiváděného vzduchu 19 °C, potřebuje kancelář vytápet při teplotách venkovního vzduchu pod 1 °C. Zimní provoz se v této variantě blíží tomu, co bylo uvažováno při návrhu a dimenzování klimatizačního systému.

V další variantě s **minimální tepelnou ztrátou a zvýšenými zisky** je uvažována menší kancelář (délka fasády 3 m) o ploše 15 m². V kanceláři pracují dvě osoby s počítači a periferiemi (vnitřní zisky 440 W). Plocha oken je pouze 30 % fasády, součinitel prostupu tepla oken je 1,1 W/m²K a stěn 0,2 W/m²K, ostatní parametry jsou shodné s typickým případem.

V tomto případě je naopak jak celková bilance systému, tak bilance místnosti s konstantní teplotou přiváděného vzduchu většinu zimy



Obr. 4 Výsledná bilance místnosti s nízkými tepelnými zisky (vlevo); teploty přiváděného vzduchu pro tuto místnost (vpravo)

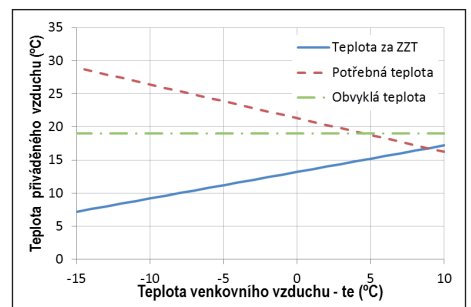
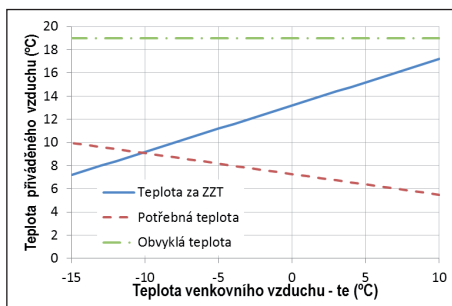
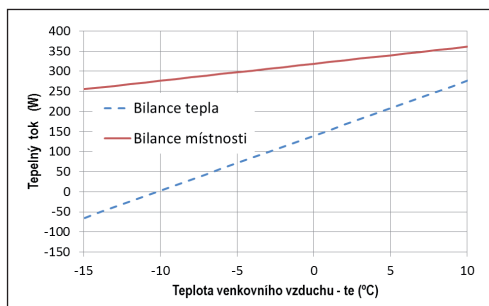
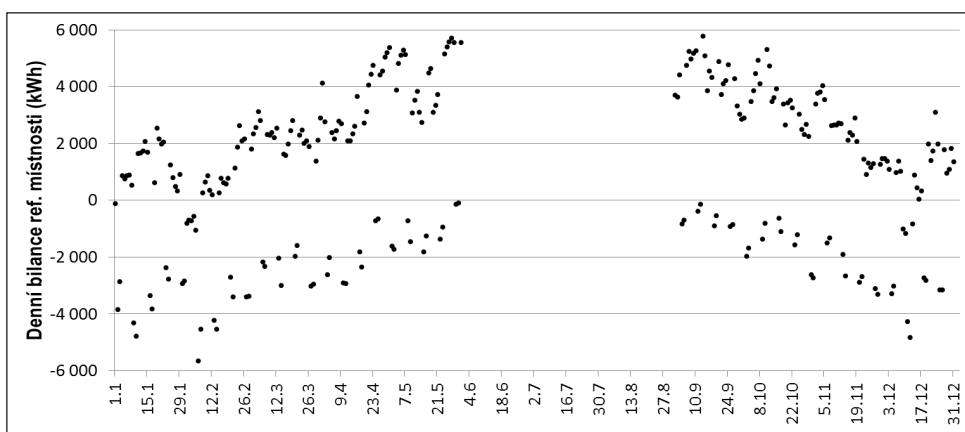


Fig. 4 Resulting balance of the room with low heat gains (left); supply air temperatures for the room (right)



Obr. 5 Výsledná bilance místnosti s nízkou tepelnou ztrátou a vyššími zisky (vlevo); teploty přiváděného vzduchu pro tuto místnost (vpravo)

Fig. 5 Resulting balance of the room with low heat loss and higher heat gains (left); supply air temperatures for the room (right)



Obr. 6 Denní (24 h) bilance tepelných zisků a ztrát místnosti

Fig. 6 Daily (24 h) balance of heat gains and losses of the room

záporná. Bilanční teplota venkovního vzduchu je $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě, že je teplota přiváděného vzduchu $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, potřebuje kancelář chladit celou zimu. Zimní provoz je podobný typickému případu, jen s teplotním posunem.

ROČNÍ BILANCE

V rámci analýz byla zpracována roční bilance typického provozu (viz obr. 1 a 2) vyhodnocená v zimním období (září až květen), 24 hodin denně s použitím referenčního roku pro Prahu. Provoz (vnitřní tepelné zisky, větrání) byl uvažován 5 dní v týdnu od 7 do 19 hodin. V době mimo provoz byla tepelná ztráta prostupem vypočítána pro sníženou teplotu vzduchu v místnosti $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. V bilanci nejsou uvažovány tepelné zisky z vnějšího prostředí.

Tab. 2 Četnosti výskytu hodinových tepelných bilanci během typické zimy
Tab. 2 Frequencies of hourly heat balances occurrence during a typical winter

Od (Wh)	Do (Wh)	počet hodin		74 %	- ztráta
			%		
-400	-300	0	%		
-300	-200	160	2 %		
-200	-100	2140	24 %		
-100	0	4193	48 %	26 %	+ zisk
0	100	263	3 %		
100	200	639	7 %		
200	300	612	7 %		
300	400	353	4 %		
400	0	400	5 %		

Za těchto podmínek je celková bilance místnosti $+321\text{ kWh}$. To znamená, že v celkovém ročním součtu jsou tepelné zisky větší než tepelné ztráty prostupem a infiltrací. Většinu zimy (74 %) je tepelná bilance záporná. Četnosti výskytu jednotlivých hodinových hodnot jsou uvedeny v tab. 2.

Dále byly vyhodnoceny sumy každého dne (24 h), které dávají lepší představu o reálné využitelných tepelných ziscích. Ty se pohybují v rozsahu -6 až $+6\text{ kWh}$ a mírně nadpoloviční (52 %) část zimy jsou v kladných hodnotách. Kladné hodnoty 24hodinové bilance umožňují v případě dostatečné tepelné kapacity budovy provoz bez vytápění. Hodnoty bilanci za 24 hodin jsou zobrazeny v tab. 3 i na grafu na obr. 6.

SKUTEČNÝ PROVOZ

Jak vyplývá z předchozích bilanci, ve většině moderních kancelářských budov jsou v době provozu po většinu zimy tepelné zisky větší než tepelné ztráty. Vytápění je v provozu pouze krátkou dobu v ranních hodinách, kdy nejsou kanceláře ještě v plném provozu a je třeba zvýšit teplotu po nočním útlumu. Během dne již není potřeba vytápět a teploty v kancelářích postupně rostou. Čerstvý přiváděný vzduch je ohříván na teplotu blízkou teplotě v prostoru. Tento režim je typický pro kanceláře s ventilátorovými konvektory (fancoil) u fasády a nezávislým přívodem čerstvého vzduchu pro osoby do prostoru.

Při takto koncipovaném systému nastávají často následující problémy:

- ❑ Lidé jsou nespokojeni a stěžují si na **průvan způsobený chladným proudem vzduchu padajícím podél oken a venkovní fasády**. Tento problém nastává často u plně či značně prosklených fasád. Otopná tělesa (nebo konvektory) pod okny sice jsou osazena, ale vzhledem k tomu, že prostor vytápět nepotřebuje, jsou mimo provoz.
- ❑ Lidé jsou nespokojeni a stěžují si na **chlad od oken**. Pocit chladu a nespokojenosti může být způsoben **sálavou asymetrií**. Podobně jako v předešlém případě je vytápění mimo provoz a chladná stěna s okny má nižší teplotu než vnitřní vzduch, což způsobuje pocit lokálního diskomfortu.
- ❑ Lidé jsou nespokojeni a stěžují si na **průvan způsobený přiváděným čerstvým vzduchem**. Distribuci čerstvého vzduchu je často

Tab. 3 Četnosti výskytu denních tepelných bilanci během typické zimy
Tab. 3 Frequencies of daily heat balances occurrence during a typical winter

Od (kWh)	Do (kWh)	počet dní		48 %
			%	
-6	-4	6	4 %	
-4	-2	29	19 %	
-2	0	38	25 %	
0	2	45	30 %	52 %
2	4	16	11 %	
4	6	17	11 %	
6	0	0		

v projektu věnována malá péče, neboť se jedná o poměrně malé průtoky a předpokládá se izotermický přívod. Ve skutečném provozu je při přetápění kanceláří vhodné přivádět chladnější větrací vzduch. Tím však často vzniká proudění způsobující pocit průvanu.

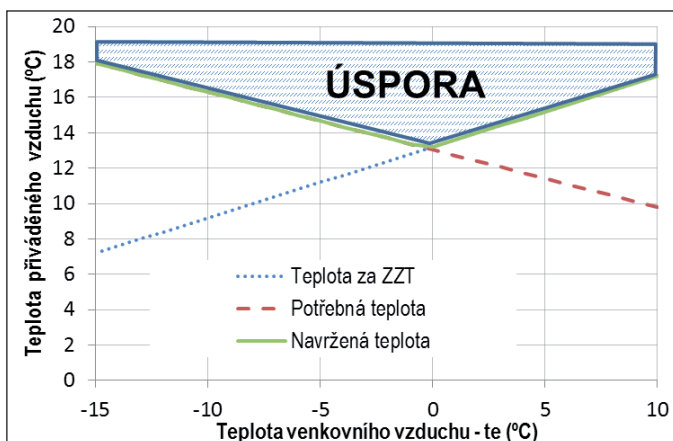
- Lidé si stěžují na **nízkou relativní vlhkost vzduchu**. I v případech, kdy je vlhčení správně navrženo, rostou často díky vnitřním ziskům odpolední teploty v kancelářích obvykle na 25 °C, někdy i 28 °C. Dodržení relativní vlhkosti při takto vysokých teplotách potřebuje výrazně vyšší výkon pro zvlhčování. Takový výkon zvlhčovače často není k dispozici, nebo režim regulace takový stav nepředpokládá. Další snižování relativní vlhkosti v prostoru může způsobovat přirozené větrání. Měření relativní vlhkosti je poměrně jednoduché a poučení uživatelé si mohou stěžovat, když není dodržena zákonem daná minimální relativní vlhkost vzduchu 30 %.

ŘEŠENÍ

Řešení výše zmiňovaných problémů je v provozu poměrně obtížné. Z pohledu spotřeby energie by bylo nejvhodnější minimalizovat potřebu vytápění a ohřevu větracího vzduchu. Na druhé straně z pohledu tepelné pohody by bylo vhodnější zajistit vytápění a izotermický přívod vzduchu.

Vydeme-li z požadavku na maximální úspory energie, je třeba navrhovat budovy s vysokou akumulační hmotou, ve které se naakumulované přebytek tepla během dne mohou uplatnit pro zajištění temperování během noci. Ale i v tomto případě potřebuje většina administrativních budov mírné temperování během chladných víkendů. Pro plné využití energetických přebytků by bylo třeba dlouhodobé akumulace, ta je však pro takto nízké tepelné toky těžko uplatnitelná.

Chceme-li minimalizovat spotřebu energie na vytápění a ohřev vzduchu, je vhodné přivádět v době, kdy jsou vnitřní zisky vysoké, větrací vzduch o co nejnižší teplotě. Pro výše řešenou typickou kancelář by se pak pro teploty venkovního vzduchu nad 0 °C přiváděl vzduch bez ohřevu přímo s teplotou za ZZT. Pro teploty pod 0 °C by se vzduch dohříval na teplotu potřebnou pro dodržení požadované teploty vnitřního vzduchu. Tímto opatřením by se snížila spotřeba energie na ohřev větracího vzduchu v zimě pro typickou kancelář o 145 kWh/rok, tj. o 85 %. Během zimy by se pak teplota přiváděného čerstvého vzduchu pohybovala mezi 13 °C až 18 °C (viz obr. 7). Vzduch o takto nízké teplotě je velmi obtížné distribuovat v prostoru. Pro distribuci chladného vzduchu se potom musí používat štěrbínové, vířivé, či jiné vyústky konstruované pro přívod chladného vzduchu s vysokým pracovním rozdílem teplot. Případně je možné mísit čerstvý vzduch místně se vzduchem cirkulačním (indukční jednotky) a tím snížit rozdíl teplot, ale i v tomto případě je třeba vhodná distribuce chladného vzduchu. Při tomto řešení je pro nadnulové teploty



Obr. 7 Teplota přiváděného vzduchu pro minimální spotřebu energie

Fig. 7 Supply air temperature for minimal power consumption

venkovního vzduchu bilance místnosti kladná a dochází k přehřívání. Chceme-li přehřívání zabránit, lze chladit venkovním vzduchem, ale je třeba snížit účinnost ZZT. Teploty přiváděného vzduchu by potom byly ještě nižší a problémy s distribucí výraznější.

Druhým problémem je zajištění krátkodobé a dlouhodobé akumulace. Akumulace tepla do stavebních konstrukcí by měla umožnit vyrovnání 24hodinové bilance, kdy se teplo produkované budovou v odpoledních hodinách akumuluje do jejich konstrukcí (především podlah a stropů). V noci se potom teplo pozvolna uvolňuje a udržuje v budově přijatelné teploty i bez vytápění. Dlouhodobou akumulaci je obtížnější realizovat, ale například systémy vodních tepelných smyček s akumulačními zásobníky by mohly zajistit temperování budovy pro víkendový provoz.

Na spokojenost osob má dále zásadní vliv i velikost oken (prosklení fasády), výrazně menší rizika jsou v případě klasických parapetů a menších oken než v případě celoprosklených fasád.

ZÁVĚR

Jak ukázaly prezentované výsledky, moderní administrativní budovy mají poměrně značný potenciál pro to, aby byly provozovány s minimálními nároky na vytápění. V dalším stupni řešení problému předpokládáme použití počítačových simulací a skutečně naměřených provozních dat pro rozšíření bilanci a návrhy konkrétních opatření.

Kontakt na autora: milos.lain@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] CHYSKÝ, J. *Vlhký vzduch*. SNTL, Praha 1977
- [2] LAIN, M. *Nízkoenergetické chlazení budov*. Disertační práce. Praha, 2007. ČVUT v Praze,
- [3] LAIN, M. *Zimní provoz klimatizačních systémů*. 21. konference Klimatizace a větrání 2014. STP, Praha 2014. ISBN 978-80-02-02520-7.

Poznámka recenzenta

Přívod venkovního vzduchu do kanceláří administrativních budov o co nejnižší teplotě pro eliminaci vnitřních tepelných ztrát má, mimo uváděné případy, i další úskalí. Jde především o místnosti, kde nejsou předpokládány vnitřní tepelné zdroje tepla. Potom hrozí podchlazení místnosti přiváděným větracím vzduchem. Pokud je místnost vybavena např. ventilátorovým konvektorem, tepelnou ztrátu větráním hradí konvektor, pokud je rozvod otopné vody v činnosti – základní podmínka. Obtížnější situace nastává u vnitřních místností, např. malých zasedacích místností pro cca 6 až 10 pracovníků, které nejsou trvale v provozu. Pokud místnost není vybavena zdrojem tepla (např. konvektor s přívodem otopné vody), je problematické udržet požadované vnitřní klimatické podmínky. Podstatně horší je řešení v přechodném a letním období, kdy není obvyklé, aby rozvody otopné vody, pro část nebo celou budovu, byly v provozu. Ekonomicky už naprosto neodůvodněné. Řešením je použití např. elektrických ohřivačů. Jedním z řešení je ovládání přívodu větracího vzduchu např. regulační klapkou se servopohonem a časovým relé napojeným na osvětlení. Při zapnutí světla se otevře přívod větracího vzduchu, při vypnutí světla se klapka uzavře po nastavené časové prodlevě, aby došlo k vyvětrání místnosti. Optimální je autonomní regulace přívodu vzduchu podle vnitřní teploty nebo obsahu CO₂. Ovládání přívodu vzduchu je nutno řešit již při zpracování projektu.

Řešení stížností pracovníků kanceláří při provozu větrání na průvan způsobený chladným proudem vzduchu padajícím podél oken a venkovních fasád je možno řešit trvalým provozem ventilátorových konvektorů instalovaných pod okny. Proud cirkulačního vzduchu částečně zamezí chladnému proudění a zároveň i mísením zvýší jeho teplotu. Kromě lepšího a rychlejšího provětrání prostoru kanceláře poslouží i pro prodloužení dosahu přiváděného proudu větracího vzduchu (např. štěrbínovou vyústkou), jeho smísením s cirkulačním vzduchem i ke zvýšení teploty přiváděného vzduchu a tím i zabránění průvanu.