

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

Riziko kondenzace u vysokoteplotních klimatizačních systémů

Condensation Risk in High-Temperature Air-conditioning Systems

Recenzenti:
 Ing. Václav Šimánek
 Ing. Marcel Kadlec

Článek analyzuje riziko kondenzace u vysokoteplotních klimatizačních systémů s použitím extrémních klimatických údajů pro ČR. V úvahách jsou zohledněny různé systémy větrání, dávky venkovního vzduchu na osobu a rovněž vlastnosti reálných chladičů vzduchu používaných ve vzduchotechnických jednotkách. V závěru jsou uvedena doporučení při navrhování systémů obdobného typu.

Klíčová slova: větrání, klimatizace, vysokoteplotní chlazení, kondenzace vodních par

Paper deals with the condensation risk concerning high-temperature air-conditioning systems using the extreme climatic data for the Czech Republic. Different ventilation systems, ventilation rate for a person as well as properties of real air coolers used in air handling units are taken into consideration in contemplations. Recommendations for designing of similar systems are specified.

Key words: ventilation, air-conditioning, high-temperature cooling, risk of condensation

ÚVOD

Riziko kondenzace je u vysokoteplotních klimatizačních systémů (chladičí stropy, indukční jednotky, chladičí trámce) hlavním omezujícím faktorem. Teplota přívodní vody do chladičů systému se volí tak, aby nedocházelo k orosování povrchu. Povrchová teplota musí být vyšší než teplota rosného bodu okolního vzduchu, jinak hrozí riziko kondenzace (např. na přívodním potrubí chlazené vody apod.). Vysokoteplotní chladičí systémy slouží především k odvodu citelné tepelné zátěže a nelze jimi odvádět teplo vázané ve vodní páře. Pro odvod vodní páry slouží paralelně pracující větrací zařízení. Průtok vzduchu je zpravidla redukován pouze na potřebnou, minimální dávku čerstvého vzduchu pro osoby.

Venkovní klimatické údaje pro ČR

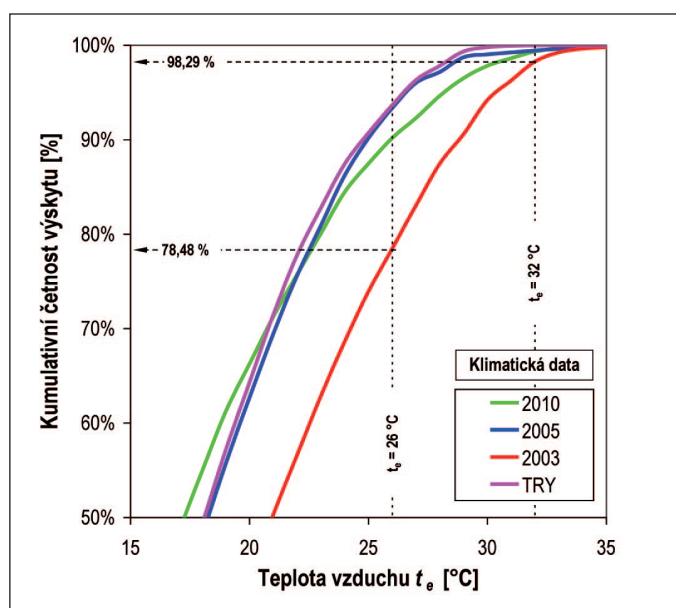
Na obr. 1 jsou znázorněny četnosti teploty a entalpie venkovního vzduchu pro vybrané klimatické databáze se zaměřením na letní extrémy. TRY (test reference year) je referenční rok zpracovaný pro Prahu, který představuje reálná charakteristická klimatická data pro účely výpočtu energetické potřeby budov, se zahrnutím dynamických změn, trendů

a extrémních hodnot. Rok 2003 je považován za období s dlouhodobým teplotním extrémem. Dále jsou v grafu pro představu uvedeny roky 2005 a 2010. Četnosti uvedené na obr. 1 jsou zpracovány pouze pro teplé období roku od 1. 5. do 30. 9. v době od 7.00 do 19.00 hodin a zahrnují rovněž víkendy (celkem 1989 hodin).

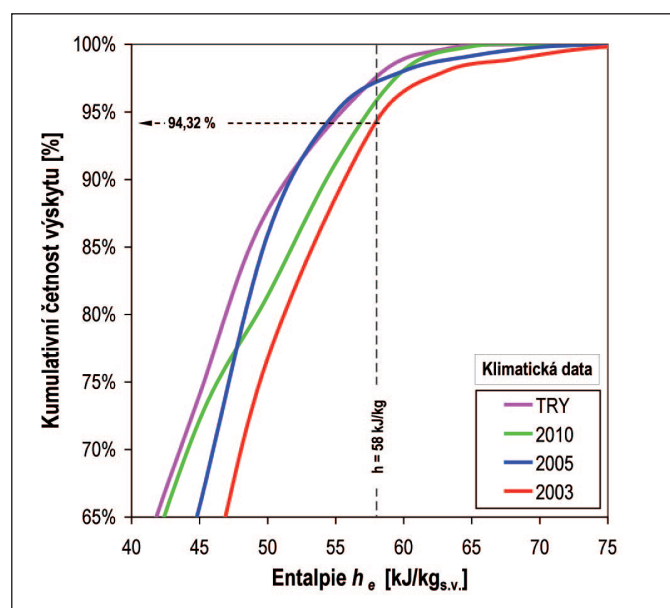
Analýzy rizika kondenzace u vysokoteplotních klimatizačních systémů jsou vyčísleny pro nejhorší možný případ, tj. extrémní klimatická data - rok 2003. Z obr. 1 lze odečíst počet hodin, kdy jsou překračovány návrhové údaje venkovního vzduchu. Pro klimatickou databázi roku 2003 překračuje teplota venkovního vzduchu návrhovou hodnotu 32 °C pouze v 1,71 % případů (tj. celkem 34 hodin), návrhová entalpie venkovního vzduchu 58 kJ/kg je pak překročena v 5,68 % případů (113 hodin).

ODVOD VODNÍCH PAR Z KLIMATIZOVANÉHO PROSTORU

V klimatizovaných místnostech dochází vlivem přítomnosti člověka a jeho činnosti k produkci vodní páry, kterou je nutné odvádět. Vysokoteplotní



a)



b)

Obr. 1 Četnosti výskytu teplot a entalpií venkovního vzduchu v letním období od 1. 5. do 30. 9. v době od 7.00 do 19.00 hodin vč. víkendů
 a) teplota venkovního vzduchu, b) entalpie venkovního vzduchu

klimatizační systémy nejsou určené k tomu, aby odváděly z prostoru vázané teplo a kondenzace vodních par na kterémkoliv povrchu systému je nežádoucí. Mezi základní vysokoteplotní klimatizační systémy bez možnosti odvodu kondenzátu patří:

- ☐ sálavé chladicí systémy (chladicí stropy),
- ☐ kombinované systémy voda - vzduch (stropní indukční jednotky / / chladicí trámce).

Pro odvod vodní páry z prostoru slouží větrací vzduch, který je nutné v létě odvlhčovat. Odvod vodní páry z prostoru závisí na měrné vlhkosti a průtoku přiváděného venkovního vzduchu. Uvedenou skutečnost poněkud komplikuje relativně nové nařízení vlády [1], které upravuje přívod venkovního vzduchu na osobu v rozsahu 25 až 50 m³/h při práci převážně vsedě. Reálné minimální množství venkovního vzduchu pro osoby pracující v kancelářích se pohybuje kolem hodnoty 35 m³/h.os., což je množství odpovídající i doporučeným, normovým hodnotám [2].

Chlazení venkovního vzduchu

Obr. 2 znázorňuje teoretický a reálný proces při chlazení vzduchu. Teoretický průběh probíhá po přímce a výsledný stav vzduchu 2t leží na spojnici stavu chlazeného vzduchu (t_1, x_1) a povrchové teploty chladiče t_{ch} při stavu nasycení ($\varphi = 100\%$). U některých lamelových výměníků s úzkou mezerou mezi lamelami nedochází k dokonalému odvedení kondenzátu a reálný proces probíhá po křivce do stavu 2r. Reálný stav za lamelovým chladičem vzduchu je dán podmínkami, které se ustaví na povrchu žeber. Teplotu a měrnou vlhkost za reálným chladičem (stav 2r na obr. 2) lze stanovit dle metodiky popsané v literatuře [2]. Je zřejmé, že výsledný stav po chlazení v reálném chladiči 2r se proti teoretickému 2t poněkud liší. Lze konstatovat, že rozdíl mezi reálnou a teoretickou hodnotou měrné vlhkosti ($x_{2r} - x_{2t}$) se snižuje s rostoucí měrnou vlhkostí nasávaného venkovního vzduchu (v obr. 2 zelený průběh). V případě, že

teplota rosného bodu je nižší než povrchová teplota chladiče $t_{RB} < t_{ch}$, ke kondenzaci nedochází (v obr. 2 červený průběh).

Riziko kondenzace

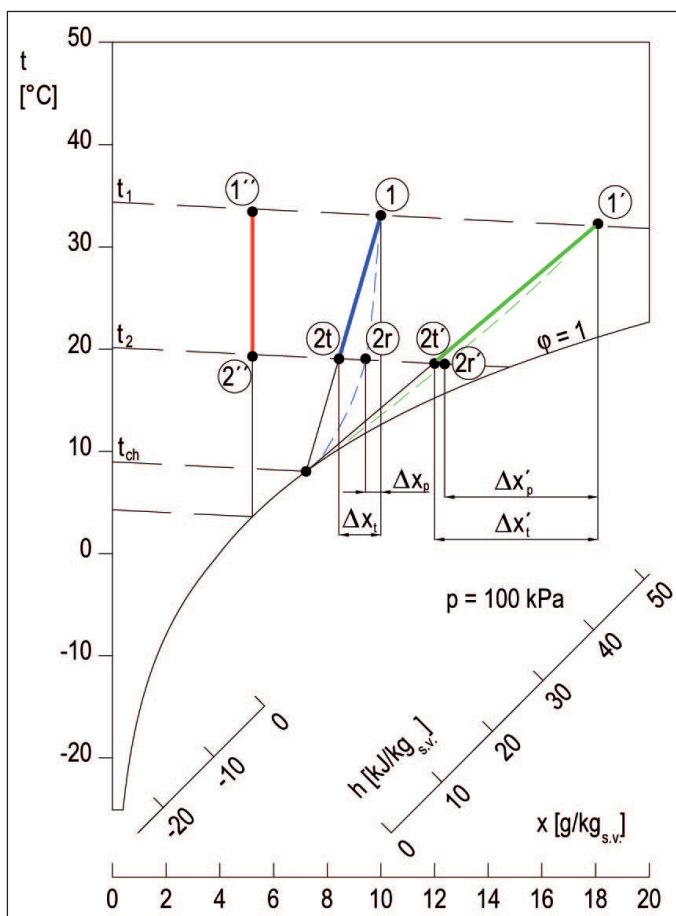
Obr. 3 znázorňuje princip hodnocení rizika kondenzace pro konkrétní případ v h - x diagramu. Venkovní vzduch o stavu E je chlazen na teplotu přiváděného vzduchu t_{pe} v chladíči s povrchovou teplotou t_{ch} . Vlivem vlhkostních zisků dojde v místnosti k navlžení vzduchu o hodnotu Δx_w . Vzhledem k tomu, že vodní pára je odváděna pouze větracím vzduchem je možné takto určit výsledný stav vnitřního vzduchu I bez ohledu na proces, který probíhá v místnosti (odvod citelné tepelné zátěže místnosti koncovým prvkem klimatizace). Riziko kondenzace vodních par obsažených ve vnitřním vzduchu nastává tehdy, bude-li teplota rosného bodu pro stav vnitřního vzduchu $t_{RB,i}$ vyšší než povrchová teplota prvků chladicího systému (výměník, potrubí, apod.). Za přípustnou povrchovou teplotu se zpravidla dosazuje teplota vstupní vody $t_{w,i}$. S využitím psychrometrických výpočtů je možné analyzovat riziko kondenzace pro různé případy úpravy venkovního vzduchu během celého roku resp. během chodu klimatizačního zařízení.

ANALÝZA RIZIKA KONDENZACE

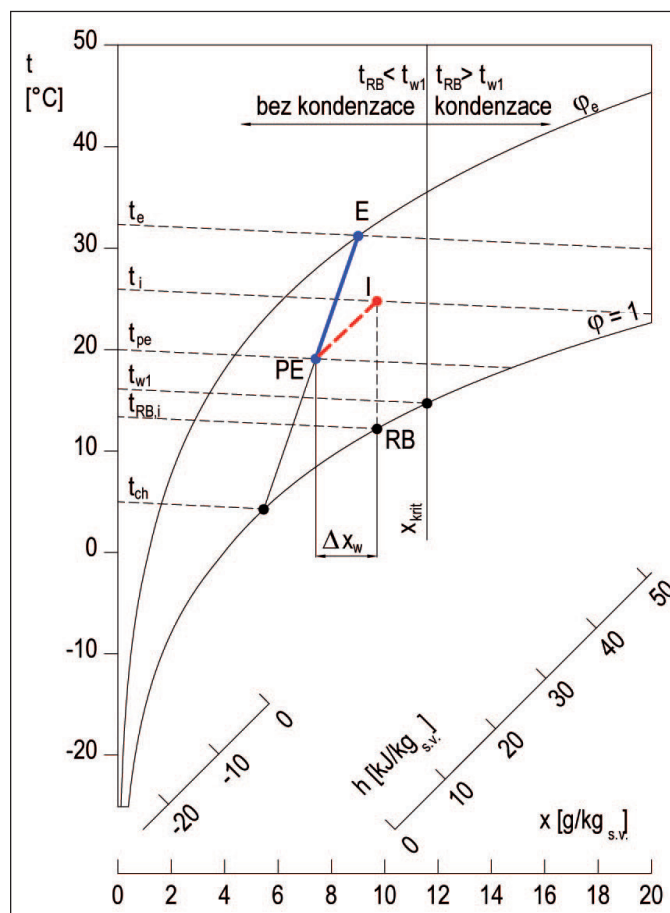
Nucené větrání

Odvod vodní páry z prostoru s vysokoteplotním klimatizačním systémem (bez odvodu kondenzátu) je nutné realizovat nuceným větráním s tepelně upraveným větracím vzduchem. Takto upravený vzduch pak kromě funkce větrání zajišťuje i odvod části citelné tepelné zátěže z vnitřního prostoru [6].

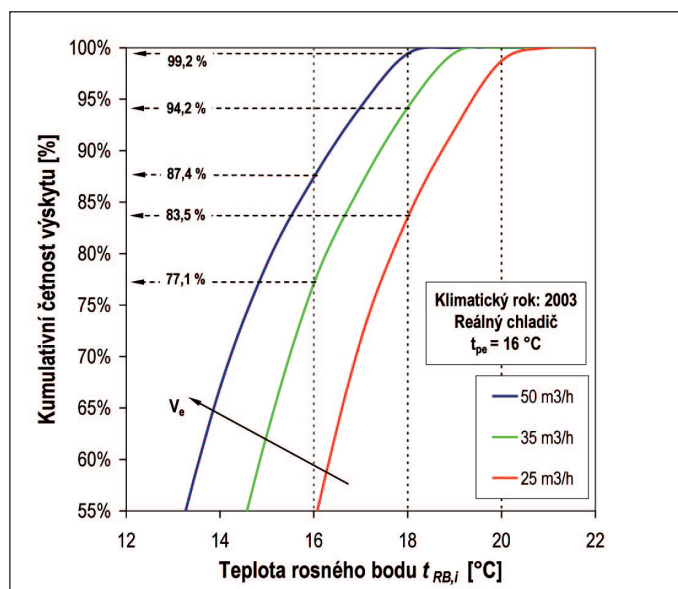
Obr. 4 znázorňuje příklad vyhodnocení výsledků rizika kondenzace v podobě kumulativní četnosti teplot rosného bodu pro stav vnitřního vzdu-



Obr. 2 Teoretické a reálné průběhy při chlazení venkovního vzduchu znázorněné v h - x diagramu



Obr. 3 Znáznornění chlazení vzduchu a hodnocení rizika kondenzace na chladných površích ve vnitřním prostoru

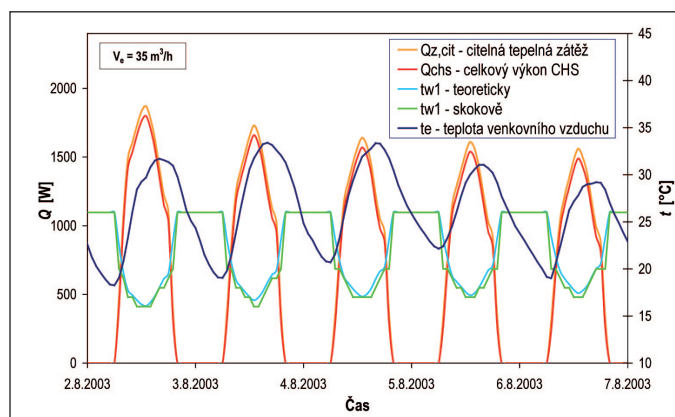


Obr. 4 Kumulativní četnost výskytu teploty rosného bodu pro reálný chladíč a teplotu přiváděného venkovního vzduchu $t_{pe} = 16\text{ °C}$

chu ($t = 26\text{ °C}$) při dávce vzduchu 25, 35 a 50 m³/h na osobu a teplotě přiváděného vzduchu 16 °C. Zdrojem vlhkosti v komfortních prostorách je především člověk, produkce vlhkosti byla uvažována 116 g/hod na osobu [3]. V analýzách je uvažováno s reálným průběhem na chladíči vzduchu [2] s přímým výparem chladiva, jehož povrchová teplota $t_{ch} \sim 5\text{ °C}$. Údaje platí pro extrémní klimatická data roku 2003 pro Prahu. Celkový počet hodin provozu klimatizačního zařízení ve zkoumaném období od 1. 5. do 31. 9. je 1414 hodin (předpokládá se doba provozu ve všední den od 7.00 do 19.00 hodin).

Tab. 1 prezentuje výsledky pro všechny analyzované případy a uvádí procento času (z celkového počtu 1414 hodin), kdy dochází k překročení teploty rosného bodu $t_{RB,i}$. Výsledky jsou prezentovány jak pro teoretickou, tak reálnou úpravu vzduchu na chladíči. Je vidět, že při reálné úpravě vzduchu na chladíči je riziko kondenzace poněkud vyšší než při uvažování teoretického průběhu. Z výsledků uvedených v tab. 1 je zřejmé, že při zadaných klimatických podmínkách a teplotě vstupní vody $t_{w1} = 16\text{ °C}$ může vzniknout riziko kondenzace i při relativně vysokém průtoku venkovního vzduchu 50 m³/h.osobu. V takovém případě je nutné přijmout určitá opatření, v podobě regulačního zásahu (viz dále).

Uvedené analýzy předpokládají, že výkon chladíče je navržen tak, aby za všech venkovních klimatických podmínek umožňoval chlazení venkov-



Obr. 5 Průběh teploty chladicí vody t_{w1} v závislosti na potřebě chladu (tepelné zátěži místnosti)

ního vzduchu na 16 °C. Chladíče venkovního vzduchu centrálních jednotek pro aplikace s vysokoteplotními systémy bývají často poddimenzované. V případě, že je chladíč vzduchu navržen dle běžné projektové praxe s návrhovými hodnotami venkovního vzduchu 32 °C a 58 kJ/kg, pak při extrémních entalpiích venkovního vzduchu dochází k situaci, kdy výkon chladíče nepostačuje k odvlhčení vzduchu. V takových případech riziko kondenzace narůstá.

Využití regulace teploty vstupní vody

Je zřejmé, že riziko kondenzace podstatně závisí na teplotě chladicí vody (tab. 1). Pokud bychom připustili zónování administrativní budovy podle charakteru tepelné zátěže, je možné regulovat teplotu vstupní chladicí vody t_{w1} centrálně podle aktuální potřeby (teoreticky v rozsahu 16 až 26 °C). Na obr. 5 je uveden průběh tepelné zátěže $Q_{z,cit}$, výkonu chladicí soustavy Q_{chs} a teploty venkovního vzduchu t_e pro místnost popsanou např. v příspěvku [7]. V grafu je rovněž znázorněn teoretický průběh teploty chladicí vody t_{w1} regulované podle potřeby chladu ve vybraném týdnu během léta (v obr. 5 průběh „tw1 - teoreticky“). Znamená to, že nejnižší teplota chladicí vody $t_{w1} = 16\text{ °C}$ bude nastavena pouze při maximální tepelné zátěži. Vzhledem k tomu, že přesná a rychlá regulace teploty vody na žádané parametry je relativně obtížná, byla uvažována i varianta se skokovou změnou teploty po 1 K v rozsahu 16 až 20 °C (v obr. 5 průběh „tw1 - skokově“ vyznačen zeleně).

Stejným způsobem jako v předchozím odstavci bylo analyzováno riziko kondenzace pro dané množství a teplotu přiváděného venkovního vzduchu. Při tomto pojetí provozu vysokoteplotního klimatizačního systému bude riziko kondenzace sníženo na minimum (viz tab. 2). Na tomto místě je nutné připomenout, že výsledky prezentované v článku odpoví-

Tab. 1 Vyhodnocení rizika kondenzace s odpovídajícím počtem hodin (extrémní klimatická data roku 2003 pro Prahu)

Riziko kondenzace	$t_{RB,i}$ [°C]	Průtok venkovního vzduchu na osobu [m³/h.os]					
		25		35		50	
		Teplota přiváděného vzduchu t_{pe} [°C]					
		16	20	16	20	16	20
Teoretický průběh chlazení	> 16	37,4 %	47,9 %	19,4 %	28,8 %	12,3 %	20,2 %
	> 18	14,9 %	23,8 %	5,7 %	14,1 %	0,8 %	9,1 %
	> 20	1,4 %	9,6 %	0,0 %	4,2 %	0,0 %	1,2 %
Reálný průběh chlazení	> 16	46,5 %	57,1 %	22,9 %	35,9 %	12,6 %	24,7 %
	> 18	16,5 %	29,1 %	5,8 %	17,6 %	0,8 %	12,0 %
	> 20	1,4 %	12,9 %	0,0 %	6,1 %	0,0 %	1,9 %

Tab. 2 Vyhodnocení rizika kondenzace při zónové regulaci teploty chladicí vody při uvažování reálného chladiče vzduchu (extrémní klimatická data roku 2003 pro Prahu)

Riziko kondenzace	Průtok venkovního vzduchu na osobu [m³/h.os]					
	25		35		50	
Regulace chladiče	Teplota přiváděného vzduchu t_p [°C]					
	16	20	16	20	16	20
Teoretická	2,41 %	9,62 %	0,28 %	3,04 %	0,07 %	1,14 %
Skoková	4,60 %	19,09 %	0,64 %	8,63 %	0,14 %	3,55 %

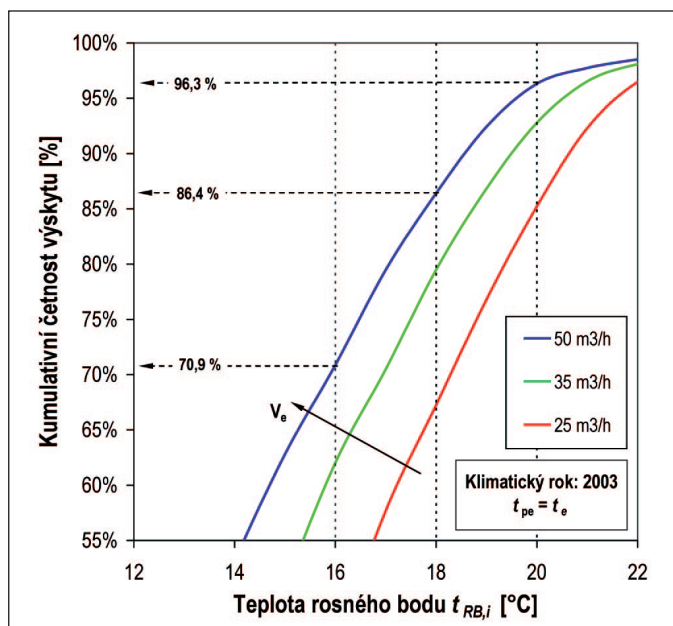
dají provozu zařízení při extrémních letních klimatických podmínkách. V případě, že k riziku kondenzace i přes uvedené opatření dojde, je nutné uzavřít přívod chladicí vody. V této době bude místnost klimatizována pouze částečně - přiváděným venkovním vzduchem.

Přirozené větrání

V některých případech se pro přívod hygienické dávky čerstvého vzduchu pro osoby používá přirozené větrání oknem [6]. Takové řešení však nesplňuje základní podmínku komfortní klimatizace, jejíž nedílnou součástí je řízená úprava čerstvého venkovního vzduchu. Přirozené větrání oknem v kombinaci např. se sálavým chladicím systémem se obecně nedoporučuje. Nevýhody při použití přirozeného větrání lze shrnout do následujících bodů:

- ☐ dávky čerstvého vzduchu se nedají regulovat,
- ☐ přirozený přívod vzduchu oknem navyšuje tepelnou zátěž místnosti v létě,
- ☐ dochází ke ztrátám energie,
- ☐ zvyšuje se riziko orosování chladicího povrchu v horkých a vlhkých letních dnech,
- ☐ v zimě není možné využít zpětné získávání tepla,
- ☐ vzduch není filtrován.

V obr. 6 je v grafické formě znázorněno riziko kondenzace při větrání neupraveným venkovním vzduchem (případ kdy $t_{pe} = t_e$ a $x_{pe} = x_e$) při definovaných dávkách vzduchu. Z obr. 6 je zřejmé, že použití venkovního větracího vzduchu bez úpravy povede logicky k výraznějšímu riziku kondenzace na povrchu chladných ploch. Při povrchové teplotě 16 °C a průtoku vzduchu 50 m³/h na osobu nastane riziko kondenzace téměř ve 30 % času.



Obr. 6 Riziko kondenzace při větrání neupraveným venkovním vzduchem

DOPORUČENÍ PRO PROJEKČNÍ PRAXI

Průtoky venkovního vzduchu a systém větrání

Z předložených analýz vyplývá, že z hlediska odvodu vázaného tepla je nutné venkovní vzduch odvlhčovat, což znamená chladit vzduch na relativně nízkou teplotu (cca 16 °C). Výhodné se jeví přivádět vyšší průtoky čerstvého vzduchu (v souladu s hygienickými předpisy). Zatímco indukční jednotky slouží zároveň pro přívod větracího vzduchu, u sálavých chladicích systémů je nutné takto upravený vzduch v místnosti vhodně distribuovat (rozptýlit), což vede na použití směšovacího způsobu větrání s vířivými anemostaty.

Použití přirozeného větrání se obecně nedoporučuje a jeho použití je značně limitováno. Aplikace je možná pouze v případech, kdy systém pracuje s vysokou teplotou chladicí vody $t_{w1} \geq 20$ °C. Příkladem jsou systémy s akumulací hmotou (TABS – Thermo Active Building Systems) [6], u kterých je navíc odvod tepelné zátěže, díky akumulaci, přesunut mimo provozní dobu budovy.

V případě, že je budova vybavena současně nuceným větráním a zároveň otevíratelnými okny, je nutno přistoupit k některému z následujících opatření:

- ☐ okna vybavit koncovým kontaktem se signálem, na jehož základě dojde k uzavření přívodu chladicí vody - vypnutí chlazení (platí obecně téměř pro všechna klimatizační zařízení),
- ☐ vybavit systém ochranou proti kondenzaci v podobě čidla rosného bodu (viz dále).

Návrh chladiče vzduchu

Pro chlazení venkovního vzduchu se jeví jako vhodné použít přímé výparníky, které pracují s nízkou povrchovou teplotou chladiče (4 až 5 °C). Zařízení s přímým výparníkem navíc pracují s vyššími chladicími faktory než běžně používané jednotky pro výrobu chlazené vody. V případě použití vodních výměníků se volí nízká teplota vstupní vody, např. teplotní rozdíl 6/12 °C. Obecně se doporučuje volit víceřadé výměníky a relativně nízké rychlosti proudění vzduchu jednotkou tak, aby docházelo k odvlhčení vzduchu (v souladu s ČSN EN 13058 v rozsahu od 1,6 do 3,2 m/s). Důležité je kontrolovat výsledný stav vzduchu za chladičem, zejména pak vlhkost vzduchu.

Návrh výkonu chladiče vzduchu by se měl provádět pro extrémní stavy venkovního vzduchu. Pro analyzovaný extrémní klimatický rok 2003 je to 30 °C a 70 kJ/kg.

Měření a regulace

Sálavé velkoplošné chladicí systémy sice disponují samoregulační schopností, neboť chladicí výkon závisí na rozdílu mezi teplotou vzduchu v prostoru a povrchovou teplotou chladicí plochy - čím větší je tento rozdíl teplot, tím větší je chladicí výkon. Uvedená schopnost však nezabrání kondenzaci vodních par na povrchu chladicí plochy. Nezastupitelnou úlohu při provozu vysokoteplotních chladicích systémů má tedy systém měření a regulace.

Součástí systému měření a regulace je čidlo rosného bodu (u sálavých chladicích systémů vždy). V případě, že dojde k zaznamenání nebezpečí kondenzace, vyšle regulátor signál k akčnímu členu a dojde ke změně regulované veličiny. Čidlo se zpravidla umísťuje v blízkosti přírodního potrubí na vstupu do místnosti (nejchladnější místo systému), nebo v blízkosti otevíratelného okna tak, aby rychle zaznamenalo změnu vlhkosti způsobenou přirozeným větráním. Čidlo snímá relativní vlhkost a teplotu vzduchu v místnosti a je nutno jej instalovat tak, aby k němu byl umožněn přístup vzduchu.

V zásadě existují dva základní způsoby regulace vysokoteplotních klimatizačních systémů: kvantitativní a kvalitativní. Kvantitativní regulace představuje změnu výkonu průtokem chladicí vody, kvalitativní pak změnu teploty přírodní vody. Z technického hlediska je vhodné vybavit systém kombinací obou způsobů regulace. Chladicí voda je upravována centrálně ve strojovně chlazení na určitou teplotu (kvalitativně) a na odbočkách do jednotlivých místností se instalují uzavírací armatury (kvantitativní regulace). Systém měření vyhodnotí potřebu chladu (popř. riziko kondenzace) a na základě aktuálního požadavku dané zóny se reguluje teplota vstupní chladicí vody. Uzavírací ventily pak mohou v případě rizika kondenzace zcela uzavřít přívod vody do příslušné místnosti.

ZÁVĚR

V souvislosti s úpravou předpisu stanovující množství čerstvého vzduchu na osobu pro pracovní prostory může v prostorách s vysokoteplot-

ními systémy dojít k problémům s kondenzací vodní páry na chladných površích systémů. Článek se snaží nabídnout vhodná řešení již v době návrhu zařízení tak, aby riziko kondenzace nebylo zásadní překážkou při provozování těchto energeticky výhodných systémů. Z uvedených závěrů vyplývá, že nezastupitelnou úlohu při provozu vysokoteplotních chladicích systémů má systém měření a regulace.

Kontakt na autora: Vladimir.Zmrhal@fs.cvut.cz

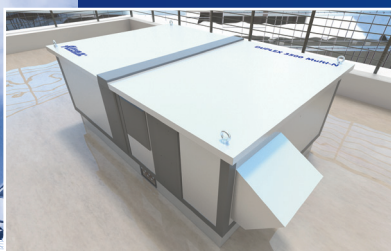
Použité zdroje

- [1] Nařízení vlády č.93/2012 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci.
- [2] ČSN EN 13779: 2007. Větrání nebytových budov – Základní požadavky na větrací a klimatizační zařízení.
- [3] ČSN 73 0548: 1985 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1985.
- [4] Drkal, F., Zmrhal, V. *Větrání*. Vysokoškolské skriptum. Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2013.
- [5] Schramek, E.R. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2007. ISBN 10:3-8356-3104-7.
- [6] Zmrhal, V. *Sálavé chladicí systémy*. Monografie. Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2009.
- [7] Zmrhal, V. Spotřeba energie vícezónových klimatizačních systémů. In: *Vytápění, větrání, instalace*. 2011, roč. 20, č.4a, s. 253-261. ISSN 1210-1389
- [8] ČSN EN 13058+A1: 2011. Větrání budov - Vzduchotechnické manipulační jednotky - Hodnocení a provedení jednotek, prvků a částí. ■

novinka

NOVÁ GENERACE NÁSTŘEŠNÍCH JEDNOTEK S REKUPERACÍ TEPLA

DUPLEX Multi-N > špičková technika a elegantní design



- Účinnost rekuperace až 93 %
– špičkový protiproudý rekuperátor
- Velmi ploché a kompaktní provedení
- Možnost integrovaného ohřevu, předehřevu a chlazení
- BMS kompatibilita
- 100 % by-pass
- Možnost integrovaného ohřevu a chlazení
- Internetové rozhraní ve standardu (RD4)
- Významné snížení servisních nákladů
- Plášť jednotky s vynikajícími tepelnými vlastnostmi
- EC ventilátory – nejvyšší německá kvalita
- Aplikace pro chytré telefony
- LCC – analýza nákladů životního cyklu výrobků
- Cirkulační režim
- Řízení na konstantní průtok a tlak
- Příprava pro transport jeřábem

VĚTRACÍ JEDNOTKY
obč. a průmyslové **STAVBY**

VĚTRÁNÍ A KLIMATIZACE
(velko) **KUCHYNĚ**

SYSTÉMY VĚTRÁNÍ
(+ bazény) **RD A BYTY**

tepelná **ČERPADLA**
a **ZÁSOBNÍKY** tepla