

Ing. Stanislav PECHAČ,
Doc. Ing. Richard NOVÝ, CSc.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí



Ústav techniky prostředí

Mikroklima zimních stadionů

Microclimate in Ice Stadiums

Recenzent
Ing. Václav Šimánek

Článek vznikl jako výsledek řešení diplomové práce, která se zabývala návrhem klimatizace sportovní haly. V rámci řešení byl kladen důraz na zajištění optimálních mikroklimatických podmínek zimního stadionu. To se týkalo zejména míst ovlivněných ledovou plochou s ohledem na problematiku tvorby mlhy a kondenzace vlhkosti na stavebních konstrukcích a zajištění nutného diváckého komfortu v oblasti tribun.

Je uvedena diskuze nad uvažovanými mikroklimatickými podmínkami, způsoby výpočtu tepelné a vlhkostní zátěže podle různých autorů, zabývajících se problematikou sportovních hal s existencí ledové plochy. Je uveden rozbor tepelných toků mezi ledovou plochou a okolními plochami stavebních konstrukcí sáláním a konvekcí do vzduchu v prostoru haly. Teoretické výsledky byly ověřovány měřením vlhkosti, teploty vzduchu a výsledné teploty kulovým Vernonovým teploměrem ve svislém řezu nad ledovou plochou na zimním stadionu v Příbrami.

Získané poznatky je možno využít při dimenzování vzduchotechnických zařízení ve sportovních halách určených především k provozování ledního hokeje.

Klíčová slova: zimní stadion, mikroklima, kondenzace, mlha, sálání ledové plochy, měření teplot a vlhkosti, zónové větrání, klimatizace

Article originated from the result of a graduation thesis that had been engaged in the design of air conditioning in a sports hall. An emphasis was insisted on ensuring the optimal microclimatic conditions in the ice stadium in the framework of the solution. In particular, it related of places affected by the ice surface with respect to the generation of mist and condensation of humidity at construction structures as well as ensuring a necessary comfort for spectators in the area of stands and terraces.

There in the article are stated discussions concerning the considered microclimatic conditions and methods for calculation of heat and humidity loads according to different authors, which have been engaged in problems of sports halls equipped with the ice surface. The analysis of heat fluxes between the ice surface and surrounding surfaces of construction structures by means of heat radiation and convection in the air into the area of the hall.

Theoretic results were verified by measurements of humidity, air temperature, and the resulting temperature was measured with the globe Vernon thermometer in the vertical profile over the ice surface at the Ice Stadium in the town of Příbram.

Obtained findings can be utilized during dimensioning the air handling equipment in sports halls, which shall serve for playing the ice hockey above all.

Key words: ice stadium, microclimate, condensation, mist, ice surface radiation, measurements of temperatures and humidity, zoned system ventilation, air conditioning

1. ÚVOD

První umělé kluziště u nás bylo postaveno před druhou světovou válkou. Dnes je v ČR v provozu 160 zimních stadionů. Převážně byly vybudovány v 60. až 80. letech.

Mnoho zimních stadionů se potýká s problémy s udržováním kvality ledu a vznikem mlhy nad ledovou plochou v přechodném období, tj. v měsících září, říjen a duben, květen. V mnoha případech jsou patrné známky degradace podhledových i nosných střešních konstrukcí těchto stadionů.

Stále větší nároky na kvalitu vnitřního prostředí a maximální pocit pohody a komfortu diváků, vede k nutnosti tyto stavby klimatizovat, a proto se stává klimatizace nedílnou součástí moderních zimních stadionů.

Z řešerše problémů vyplynulo, že je třeba podrobit diskuzi uvažované mikroklimatické podmínky, způsoby výpočtu tepelné a vlhkostní zátěže dle různých autorů, zabývajících se problematikou zimních stadionů. Jak z dalšího vyplyne, různí autoři přistupovali k řešení problému z různých stran, ale ve výsledném efektu se jejich výsledky podstatně nerozcházejí.

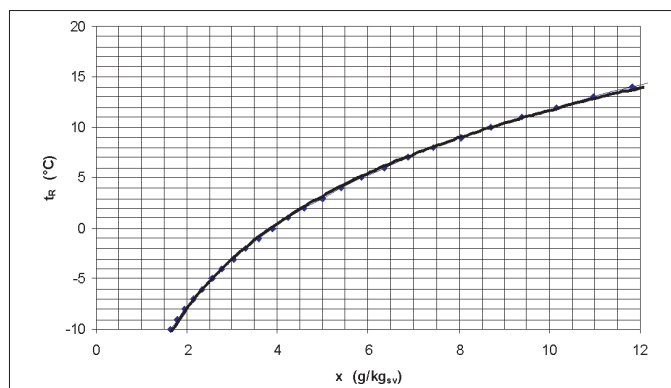
K získání vlastních praktických zkušeností byla orientačně měřena vlhkost a teplotní profil nad ledovou plochou na zimním stadionu v Příbrami a to v období přechodném (konec dubna 2009, kdy externí teplota vzduchu byla cca 23 °C a $x = 10 \text{ g/kg}_{\text{sv}}$) a začátkem zimního období 2009, kdy ven-

kovní teploty klesly na úroveň průměrných teplot v otopném období a měrná vlhkost externího vzduchu byla cca 2 g/kg suchého vzduchu.

Zde je třeba připomenout závislost teploty rosného bodu na měrné vlhkosti. Při barometrickém tlaku 98 kPa lze stanovit regresní křivku mezi teplotou rosného bodu a měrnou vlhkostí (platí pro rozsah teplot -10 až +15 °C) ze vztahu ve tvaru

$$t_R = 13,393 \cdot \ln(x) - 17,614 \quad (1)$$

Graficky je tato závislost vyjádřena na obr. 1.



Obr. 1 Závislost teploty rosného bodu na měrné vlhkosti vzduchu

Je zřejmé, že na všech plochách v hokejové hale, které budou mít nižší teplotu, než odpovídá shora uvedené teplotě rosného bodu bude docházet ke kondenzaci vodních par. Je třeba zdůraznit, že teplota rosného bodu záleží na měrné vlhkosti vzduchu, nikoliv na jeho relativní vlhkosti.

Zimní stadiony ve značné míře nemají funkční vzduchotechniku. Finančně slabé organizace, které investují do výstavby zimních stadionů nevyžadují od projektantů funkční vzduchotechniku a když ano, tak ji z úsporných důvodů neprovozují. Paradoxní v některých případech je, že provozem nesprávně navrženého větracího zařízení se situace s mikroklimatem ve vnitřním prostoru výrazně zhoršuje.

Zimní stadiony se často provozují až do května a jejich provoz začíná již v září. To jsou období, ve kterých má externí vzduch vysokou měrnou vlhkost, často i přes 10 g/kg_{sv}. Ledová plocha vnitřní vzduch ochlazuje a i odvlhčuje tím, že na ledu dochází ke kondenzaci vodních par. Kdyby přívod externího vzduchu v tomto období limitoval k nule, tak by se interní vzduch postupně zbavil vlhkosti. To lze však připustit pouze v době, kdy není ledová plocha využívána, nebo když je počet bruslících osob minimální.

Při účasti většího počtu diváků nutno do prostoru přivádět čerstvý vzduch, který sebou přináší vlhkost. Tím se do prostoru dostává vlhkost od tří zdrojů, diváků, s čerstvým vzduchem a při úpravě ledu horkou vodou. Odvlhčování vzduchu na ledové ploše již zdaleka nedokáže nastavit rovnováhu.

2. PROBLÉMY VNITŘNÍHO MIKROKLIMATU ZIMNÍCH STADIONŮ

Nadměrná vlhkost u zimních stadionů způsobuje dva specifické jevy. V přechodovém období se nad ledovou plochou tvoří mlha. Dalším jevem je zvýšená kondenzace vodních par na stavebních konstrukcích zvláště pak na konstrukci střechy.

Navíc je kondenzace vodních par spojena se skapáváním kondenzátu na ledovou plochu a často i do hlediště. Kromě zhoršení komfortu pro diváky skapávání vody na ledovou plochu výrazně zhoršuje jeho kvalitu a vyžaduje častější úpravu ledové plochy, což je samozřejmě spojeno se zvýšením provozních nákladů zimního stadionu.

Hlavní příčinou obou jevů, kterou se tyto stavby liší od ostatních halových objektů, je přítomnost velice chladné ledové plochy s povrchovou teplotou cca -5 až -8 °C, která sdílí teplo s okolními plochami stavební konstrukce především sáláním.

2.1 Tvorba mlhy nad ledovou plochou

Přivede-li se vlhký vzduch z exteriéru do vnitřního prostředí haly, dochází k jeho ochlazení vlivem promíchávání se studeným vzduchem nad ledovou plochou, což zvyšuje jeho relativní vlhkost a současně hustotu. Tím má tento vzduch tendenci klesat mezi mantinely k ledové ploše. Jakmile stav tohoto vnitřního vzduchu dosáhne nebo se blíží stavu nasycení, vytvoří se nad ledovou plochou mlha.

Ochlazený vlhký vzduch s vyšší hustotou se drží při ledové ploše mezi mantinely, které brání přirozenějšímu promíchávání s ostatním vzduchem v hale. Bariéry jsou ochlazovány sáláním od ledové plochy a ohřívány z opačné strany konvekci od vzduchu za mantinely. Plexisklo má malou tepelnou vodivost, což má za následek pokles povrchové teploty prosklených částí mantinelu pod teplotu rosného bodu vzduchu nad ledovou plochou. Na ochranných plexisklových bariérách se vytváří kondenzát zhoršující jeho průhlednost.

Situace bývá poměrně nepříjemná z důvodu následné špatné viditelnosti diváků v předních řadách hlediště.

Někdy se řeší daný jev rozfukáváním mlhy nad ledovou plochou instalací axiálních ventilátorů. Tím dochází ke zvýšenému proudění vzduchu nad ledovou plochou a k zvýšenému přestupu tepla konvekci ze vzduchu do ledu, což vede ke zhoršení jeho kvality. Na některých místech dochází dokonce k jeho odtávání.

S ohledem na uvedené skutečnosti lze doporučit, co nejvíce omezit zvláště v přechodném období, přístup neupraveného velmi vlhkého vzduchu z exteriéru. Ke vstupu do prostoru stadionu s ledovou plochou lze doporučit jako minimální opatření realizaci záďveří či jiného meziprostoru, kterým lze zabránit nežádoucímu přirozenému větrání.

Jako nejlepší způsob řešení odstranění tvorby mlhy nad ledovou plochou se jeví přívod odvlhčeného vzduchu do haly a zajištění jeho optimální cirkulace nad ledovou plochou. Slovem optimální se rozumí zajištění potřebného promíchání „starého vzduchu“ nad ledovou plochou se suchým vzduchem upraveným v klimatizačním zařízení a přitom minimální zvýšení konvekce nad ledovou plochou.

2.2 Kondenzace vlhkosti na stavebních konstrukcích

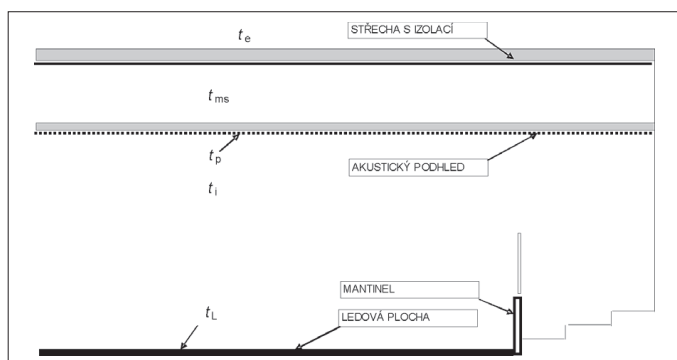
Závažným problémem je riziko vzniku povrchové kondenzace a plísní na okolních konstrukcích, zejména pak na spodním líci střešní konstrukce nebo spodní straně instalovaného podhledu. Riziko roste ze zvyšující se měrnou vlhkostí vzduchu v interiéru. K ochlazování dochází nejvíce sáláním (radiací) mezi střešní konstrukcí a ledovou plochou, kde teplejší střecha odevzdává teplo sáláním chladnější ledové ploše, čímž se led ohřívá a střešní konstrukce ochlazuje. Povrchová kondenzace způsobuje především chemickou a biologickou korozi samotné konstrukce a poškozování elektronických zařízení instalovaných na zimních stadionech. V souvislosti s tím dochází ke skapávání vody na ledovou plochu resp. do hlediště. Po dopadu jednotlivé kapky mrznou na ledové ploše a vytvářejí tak postupně malé, vzhůru z ledové plochy, rostoucí krápníky. Tyto „krápníky“ jsou pak příčinou nekvalitního a nerovného ledu a v mnoha případech musí být odstraňovány správcí mechanicky škrabkami nebo zvýšenou frekvencí úprav ledu rolbou.

Začátkem 60. let minulého století byl v Praze přebudován tzv. průmyslový palác Pražského výstaviště na sportovní halu určenou především k lednímu hokeji. Při projektování došlo k řadě chybných rozhodnutí. Firma zajišťující tepelnou izolaci objektu poprvé použila desky z pěnového polystyrenu. Tímto materiálem byly obloženy všechny plochy tvořící střechu (strop) hokejové haly. Tento materiál měl mít dvě funkce. Kromě zajištění tepelného odporu bylo jeho aplikací zamýšleno zvýšení zvukové pohltivosti prostoru.

Základní chyba spočívala v umístění tepelné izolace na vnitřní straně konstrukce ocelové střechy. Jelikož použitý pěnový polystyren není parotěsný, tak se ve velké míře dostávala vodní pára difúzí na chladný ocelový plech střechy. Tam došlo ke kondenzaci vodních par a ke skapávání kondenzátu jak do hlediště, tak i na ledovou plochu. Navíc pěnový polystyren nevykazuje vyšší činitel zvukové pohltivosti. Byla z toho ostuda a velká arbitráž, při níž hlavním posuzovatelem problému byl prof. Ing. Jan Pulkrábek, DrSc. Ten kromě již shora uvedeného konstatoval, že projektanti nerespektovali výrazný gradient vlhkosti vzduchu, která v důsledku nižší hustoty vlhkého vzduchu stoupá do výšky pod střechu vysoké haly. Tím se samozřejmě zvýšila i difúze vodních par pěnovým polystyrenem, o kterém se původně projektant tepelných izolací domníval, že je parotěsný.

K podobným chybám došlo i na jiných významných stavbách, jako je např. budova hotelu Thermal v Karlových Varech.

V dnešní době již většina projektantů ví, že tepelnou izolaci je nutné dát na chladnou stranu, tzn. do exteriéru. Ve sportovních halách se v posledních letech používají stropy zavěšené pod střechou objektu, jejichž hlavní funk-



Obr. 2 Příčný řez zimním stadionem

ce je kromě architektonické úpravy prostoru i funkce akustická. Dochází tedy k situaci, která je schématicky vyjádřena na obr. 2.

Předpokládá se tepelná izolace střešky na externí straně vodotěsné střešní konstrukce. Pod vlastní střeškou je zavěšen podhled, který kromě zámeru architekta upravit pohledově interiér haly má funkci akustickou. Podhledy jsou obvykle z perforovaného plechu na němž je položena zvuk pohlcující vrstva porézního materiálu. V mezistropu se nastaví teplota vzduchu podle toho, do jaké míry je tento prostor větrán a jakým vzduchem a jaká je teplota vzduchu ve venkovním prostoru. Povrchová teplota akustického podhledu je výsledkem sdílení tepla sáláním mezi podhledem a ledovou plochou, konvekci z povrchu podhledu do vzduchu v interiéru haly a prostupem tepla akustickou izolací do meziprostoru mezi střeškou a zavěšeným podhledem.

Možností jak omezit riziko kondenzace je několik a lze je rozdělit na prvky pasivní a aktivní.

Jednou z možností je zvýšení proudění upraveného vzduchu kolem stropních konstrukcí. Pokud by bylo možné dosáhnout zvýšení teploty povrchu např. umělým ohřevem konstrukce, kleslo by nebezpečí kondenzace vodních par. Toto opatření by se však negativně projevilo zvýšeným přestupem tepla sáláním do ledu a následně požadavkem na vyšší chladicí výkon strojního chlazení.

Nejperspektivnější se jeví snížení teploty rosného bodu vzduchu.

a) Snížení radiačního účinku

Možnost snížení radiačního účinku mezi obvodovými konstrukcemi, tj. hlavně mezi podhledem, ledovou plochou a okolními tribunami lze vyhodnotit na základě rozboru obecně známého výpočetního vztahu, který popisuje sdílení tepla radiací mezi dvěma obecně položenými plochami.

$$Q = \varepsilon_1 \varepsilon_2 c_{\varepsilon} \varphi_{12} S_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

O velikosti tepelného toku sáláním rozhodují:

- ☐ emisivity povrchů $\varepsilon_1, \varepsilon_2$
- ☐ povrchové teploty T_1, T_2
- ☐ geometrická poloha ozařujících se ploch S_1 a S_2 , vyjádřená úhlovými poměry φ_{12} a φ_{21} , pro které platí rovnice reciprocity

$$\varphi_{12} S_1 = \varphi_{21} S_2 \quad (3)$$

Úhlový poměr osálení lze stanovit pro rovinné plochy uplatněním adičního zákona. Postup výpočtu není v tomto článku uváděn, protože bylo o něm nedávno podrobně pojednáno v článku [13], na který odkazujeme.

Z rozboru vztahů vyplývá, že z hlediska snížení přenosu tepla mezi podhledem a ledovou plochou přichází do úvahy pouze povrchová úprava akustického podhledu, kterou by se výrazně snížila jeho emisivita. Toho lze dosáhnout kovově lesklým povrchem, u něhož může emisivita klesnout řádově na hodnotu $\varepsilon = 0,1$. Kvalita kovově lesklých povrchů (leštěný nerez,

Al apod.) však poměrně rychle klesá vlivem znečištění prachem nebo oxidací.

Nejvíce využívaným materiálem jsou ocelové pozinkované plechy, které se svojí kvalitou blíží šedým tělesům.

Povrchově upravené ocelové plechy, na nichž je nanesena vrstva plastu, sice odolávají dobře korozi, ale mají vysokou emisivitu cca $\varepsilon = 0,95$.

Současně je třeba se zabývat kvalitou akustické úpravy podhledu, u které by tepelný odpor akustické izolace směrem do meziprostoru měl být minimální.

Je zřejmé, že pokud bude tepelná izolace podhledu vykazovat vysoký tepelný odpor, bude povrchová teplota podhledu klesat.

Pro případ, že meziprostor není větrán ani jiným způsobem vytápěn, byl sestaven matematický model respektující sdílení tepla konvekci podhledu s vnitřním vzduchem, prostupem tepla akustickou izolací do meziprostoru pod střeškou haly a sáláním mezi ledovou plochou, okolními tribunami a podhledem haly. Výsledky kontrolního výpočtu povrchových teplot podhledu pro podélný i příčný řez, jsou na obr. 3 až 6. Základní parametry výpočtu jsou uvedeny v tab.1.

Tab. 1 Přehled základních veličin uvažovaných ve výpočtu povrchové teploty podhledu

Tepelný odpor akustického obkladu podhledu	R	2	m ² .K/W
Teplota vzduchu nad podhledem	t_e	5	°C
Povrchová teplota ledu	t_L	-5	°C
Teplota vzduchu v interiéru	t_i	5 až 15	°C
Emisivita ledu	ε_1	0,95	–
Emisivita podhledu	ε_2	0,95	–
Součinitel konvekce na vnitřní straně podhledu	α_i	4	W/m ² K
Střední radiační teplota přilehlých ploch (tribun)	t_r	5	°C

V diagramech uvedené hodnoty povrchových teplot podhledu byly stanoveny výpočtem pro různé teploty v hale. Teplota nad podhledem byla zvolena na základě zkušeností získaných měřením mikroklimatu na zimním stadionu v Příbrami, o kterém bude pojednáno v další kapitole.

Výpočet byl opakován pro emisivity podhledu $\varepsilon_2 = 0,2$ a $\varepsilon_2 = 0,5$. Výsledky jsou na obr. 5 a 6.

Výsledky ukazují, že vlivem nízké emisivity podhledu se zvýší jeho teplota, což by mělo být cílem projektanta.

b) Zvýšení proudění vzduchu kolem konstrukcí

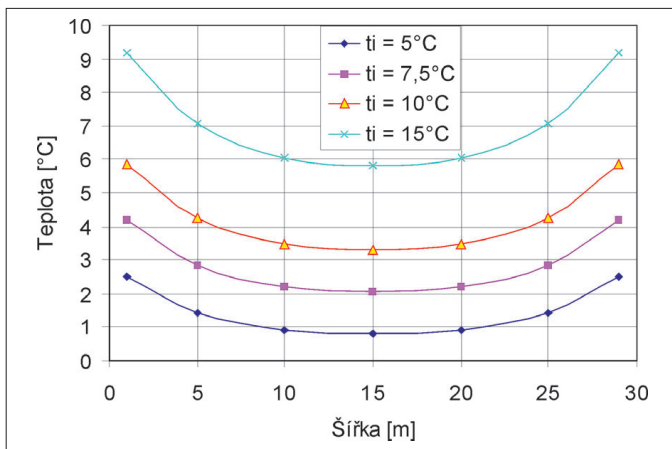
Při zvýšeném proudění vzduchu kolem stropní konstrukce se její povrch zahřeje a tím lze omezit kondenzaci vodních par na jeho povrchu. Toho lze docílit vhodnou distribucí vzduchu, kdy výústky budou částečně nasměrovány na stropní konstrukci.

c) Zvýšení teploty povrchu

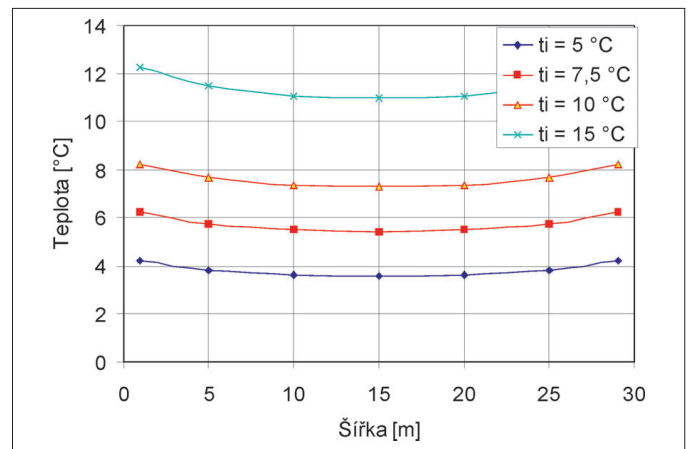
Instalací otopných rohoží do stropní konstrukce se zvýší její povrchová teplota nad teplotu rosného bodu vzduchu v hale. Tato možnost připadá v úvahu spíše teoreticky, protože vyšší teplota stropu bude zvyšovat nároky na dodávku chladu pro ledovou plochu.

d) Snížení teploty rosného bodu vzduchu

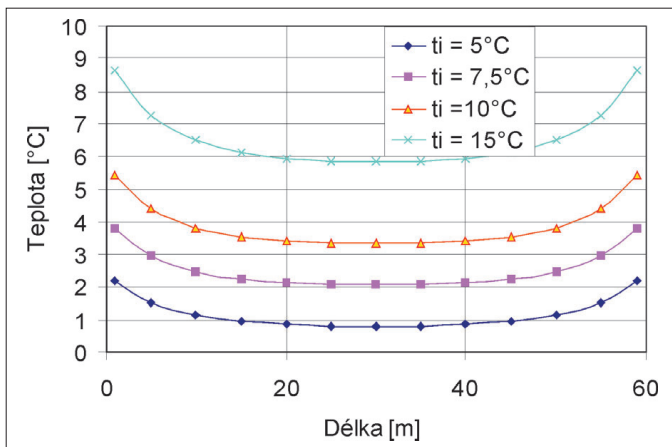
Nejvhodnějším způsobem jak zabránit výše uvedeným problémům, je snížit teplotu rosného bodu vzduchu v hale. Cílem odvlhčení vzduchu na zimních stadionech je dosáhnout a udržovat v celém objemu haly hodnotu teploty rosného bodu v rozsahu, který je uveden v následující kapitole. Vzduch lze odvlhčovat dvěma způsoby:



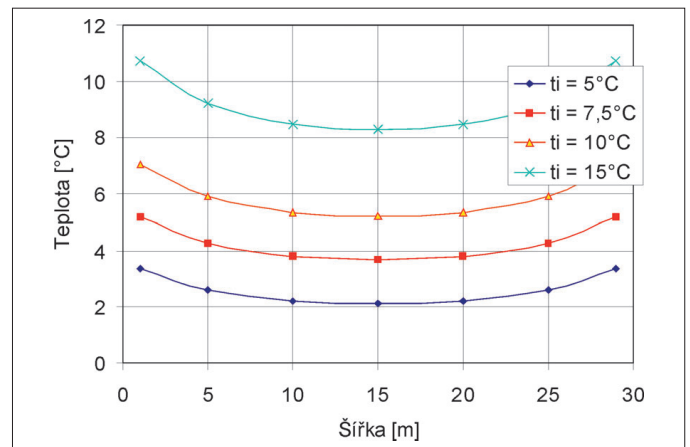
Obr. 3 Rozložení povrchových teplot podhledu v příčném řezu, teplota vzduchu v mezistropu $t_e = 5\text{ °C}$, emisivita povrchu podhledu $\varepsilon_2 = 0,95$



Obr. 5 Rozložení povrchových teplot podhledu v příčném řezu, teplota vzduchu v mezistropu $t_e = 5\text{ °C}$, emisivita povrchu podhledu $\varepsilon_2 = 0,2$



Obr. 4 Rozložení povrchových teplot podhledu v podélném řezu, teplota vzduchu v mezistropu $t_e = 5\text{ °C}$, emisivita povrchu podhledu $\varepsilon_2 = 0,95$



Obr. 6 Rozložení povrchových teplot podhledu v příčném řezu, teplota vzduchu v mezistropu $t_e = 5\text{ °C}$, emisivita povrchu podhledu $\varepsilon_2 = 0,5$

Kondenzační systémy – vychlazením vzduchu s následnou kondenzací vlhkosti na chladném povrchu chladiče, který má nižší teplotu, než je teplota rosného bodu chlazeného vzduchu.

Sorpční odvlhčování – odvlhčování vzduchu sorpčním způsobem. Používají se materiály se schopností pohlcovat vlhkost jako je zejména silika-gel fyzikální cestou (adsorpcí) a lithium-chlorid (případně lithiumbromid), kde se pohlcení odehrává na principu chemické reakce. Tyto látky pak prochází procesem regenerace, kde jsou zbavovány v kontinuálním cyklu zachycené vlhkosti.

2.3 Teplota ledové plochy

Každý druh sportu má zvláštní požadavek na povrchovou teplotu ledové plochy. Následující tabulka ukazuje nejčastěji používané povrchové teploty ledové plochy dle [5]. S klesající teplotou ledu dochází ke zvyšování energetických nároků na chlazení ledové plochy.

Tab. 2 Povrchové teploty ledové plochy

Sport	Povrchová teplota ledu
Lední hokej	-5,5 až -8 °C
Krasobruslení	-3,3 °C
Rekreační bruslení	-2,2 °C
Curling	-4,4 °C
Rychlobruslení	-8 °C

2.4 Požadavky na mikroklima

Teplota vnitřního vzduchu

Teplota vnitřního vzduchu je z jedním nejdůležitějších parametrů pro návrh klimatizace zimních stadionů. Teplota vzduchu ovlivňuje tepelnou pohodu diváků a sportovců, neměla by klesnout pod 10 °C z důvodů zamezení problémů uvedených v předcházející kapitole.

Teplota vzduchu v prostoru kluziště s úpravou vnitřního prostředí se pohybuje v rozmezí od 5 °C do 12 °C, závisí především na povrchové teplotě ledové plochy, jak je uvedeno v tab. 2 a teplotě vzduchu ve zbývajícím prostoru haly a na způsobu distribuce vzduchu.

V oblasti tribun je snahou zajistit dostatečnou tepelnou pohodu pro diváky. Norma ČSN 060210 stanovuje vnitřní teplotu u zimních stadionů mezi 15 a 20 °C. Literatura [5] doporučuje teplotu mezi 10 až 20 °C. S rostoucí teplotou dochází ke zvyšování energetických nároků na chlazení ledové plochy, proto je nutné volit teplotu s ohledem na využití kluziště a nutný divácký komfort v hale.

V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty teplot zjištěných na některých tuzemských stadionech. Hodnoty byly zjišťovány telefonickou konzultací, je proto vhodné brát tato data pouze jako orientační. Dále byl měřen teplotní profil na zimním stadionu v Příbrami.

Podrobný popis tohoto měření je uvedený v další kapitole.

Tab. 3 Hodnoty teplot na tuzemských zimních stadionech

Stadion	Úprava prostředí	Povrch ledu	V oblasti hráčů	V oblasti diváků, hala prázdná	V oblasti pobytu diváků, hala plná	Koncert
[°C]						
ČEZ aréna Pardubice	ano	-8	8	14 až 15	19 °C, $\varphi = 80 \%$ 18 až 20 °C, $\varphi = 40$ až 80 %	20 °C, $\varphi = 55 \%$
O ₂ aréna Praha	ano	-6 až -8				
Tábor	ne	-4 až -5		11 až 12	16 až 17 °C	
Liberec		-2 až -11		5 až 7		
Písek	ne				6 až 7 °C v létě, 0 °C v zimě	
Brno				11 až 12	15 až 17 °C	

Vlhkost vnitřního vzduchu

Pro zamezení problémů uvedených v předcházející kapitole je nutné volit vhodnou měrnou vlhkost vnitřního vzduchu. V tab. 4 jsou uvedeny doporučené maximální hodnoty měrných vlhkostí a teplot rosného bodu vnitřního vzduchu podle různých autorů.

Tab. 4 Doporučené teploty a vlhkosti vzduchu na zimních stadionech

Literatura (zdroj)	Teplota vzduchu [°C]	Měrná vlhkost [g/kg _{sv}]	Relativní vlhkost [%]	Teplota rosného bodu [°C]
Grasso [5]	10 až 20	4 až 6	50	
Flair [3]	> 10	4 až 4,5	50 až 60	
SEN[8]		4,2 až 5		1,5 až 4
NHL[8]		4,3		1,7

Měření vlhkosti vzduchu na zimním stadionu v Příbrami, které podává informace o reálném případě zimního stadionu v ČR, bude uvedeno v kap. 3.

Dimenzování výměny vzduchu

Průtok čerstvého vzduchu se stanovuje na základě hygienických předpisů a doporučení. Bohužel u nás neexistuje legislativa, která by řešila větrání ledových ploch. Je proto nutné vycházet z dostupné literatury a doporučení výrobců odvlhčovacích zařízení. Podle [5] je doporučeno na jednu osobu přivádět 36 m³/h čerstvého vzduchu. ASHRAE Standard stanovuje pro zimní stadiony minimální dávku čerstvého vzduchu 25 m³/h na osobu.

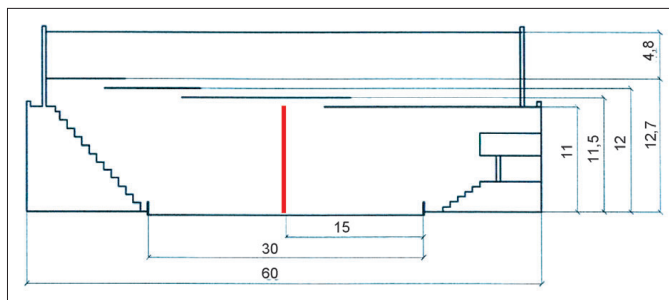
Bude-li se uvažovat hráč ledního hokeje jako pracující osoba, lze ho dle Nařízení vlády č.361/2002 zařadit do třídy práce stupně 5. Pro stupeň práce 5 toto nařízení stanovuje minimální dávku čerstvého vzduchu 90 m³/h na osobu. Pro venkovní teplotu vyšší než 26 °C a nižší než 0 °C může být tato dávka snížena, nejvýše však na polovinu.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

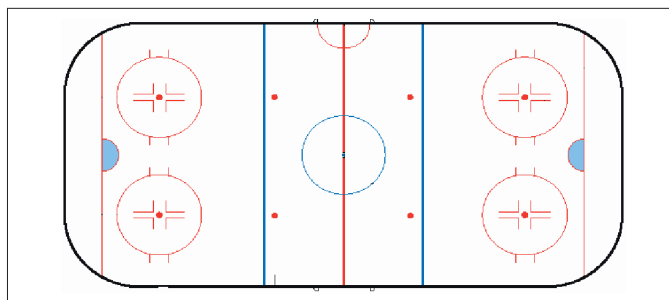
3.1 Popis měřeného objektu

Problematikou zimních stadionů se u nás i ve světě zabývá jen málo autorů, jejich výsledky se značně liší, jak vyplývá z výsledků rešerše. Z tohoto důvodu bylo orientačně měřeno mikroklima na zimním stadionu v Příbrami. Cílem měření bylo zjistit rozložení teploty vzduchu, výsledné teploty a vlhkosti vzduchu ve vertikálním řezu nad ledovou plochou.

Měření se uskutečnilo 3. 4. 2009. Jedná se o středně velký zimní stadion o celkové kapacitě 3500 diváků. Jeho půdorysná plocha má rozměry



Obr. 7 Příčný řez s vyznačeným místem měření teplotního profilu



Obr. 8 Půdorys ledové plochy zimního stadionu

85 × 60 m s výškou podhledu nad ledovou plochou 11,5 m. Velikost ledové plochy je 60 × 30 m.

Obklopující konstrukce

Severní a východní stěna stadionu je z větší části prosklená. Jižní stranu zimního stadionu tvoří administrativní zázemí a hotel. Prostor pod hlavní tribunou (západní část) slouží jako prodejna nábytku, pod ostatními tribunami jsou skladovací prostory.

Konstrukce stropu

Na nosné ocelové konstrukci střechy jsou zavěšeny hliníkové děrované desky (obr. 9) o rozměrech 0,5 × 0,5 m. Plocha děrování je zhruba 50 %. Desky jsou z pohledové strany opatřeny světle béžovým nátěrem. Na deskách je umístěna izolace s přibližnou tloušťkou 40 až 80 mm (dle míry deformace). Izolace je zatavena v obalu (pytle z polyetylénu), který slouží jako parotěsná zábrana. Mezi podhledem a střešní konstrukcí je cca 6-ti metrová vzduchová mezera (obr. 10), kde je umístěna nosná ocelová konstrukce. Dále jsou zde umístěny pochůzné lávky pro prohlídky a servis umístěného zařízení a stávající vzduchotechnické potrubí (v době měření mimo provoz). Podhled je řešený jako stupňovitý, s nejvyšší světlou výškou vůči ledové ploše nad východní částí kluziště. Mezi jednotlivými částmi je mezera cca 0,8 m.

Střešní konstrukce je tvořena profilovaným trapézovým pozinkovaným plechem. Na něm je údajně umístěno 10 cm pěnového polystyrenu. Vrchní část střechy tvoří asfaltové pásy.

3.2 Místo měření

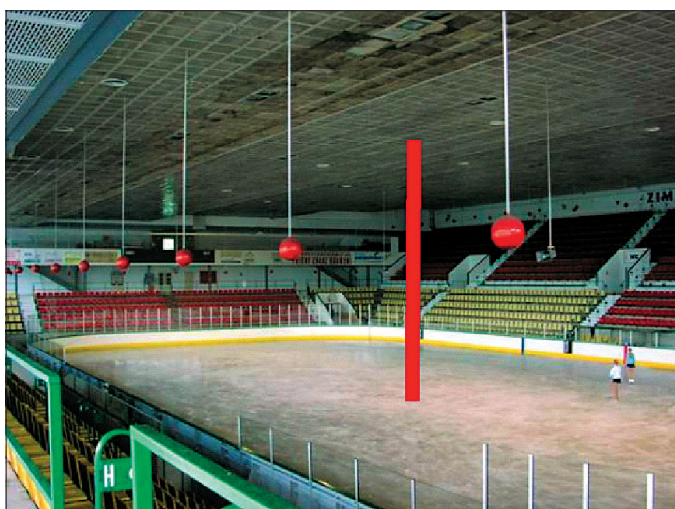
Měření teplotního profilu probíhalo na jižní straně ledového oválu, na modré čáře na začátku útočného pásma ve středu kluziště. Místo je patrné z obr. 7 a 11. Toto místo bylo vybráno z důvodu umístění závěsné kladky pro výcvik krasobruslařů, která byla využita pro zavěšení měřicích přístrojů v různé výšce nad ledovou plochou.

3.3 Použité přístroje a podmínky měření

Pro měření výsledné teploty byl použit kulový teploměr a pro měření relativní vlhkosti (teploty suchého a teploty vlhkého teploměru) Assmannův aspirační psychrometr, který byl při měření ve vodorovné poloze, aby bylo zamezeno sálání ledu přímo na teploměry.



Obr. 9 Detail akustického obkladu stropu



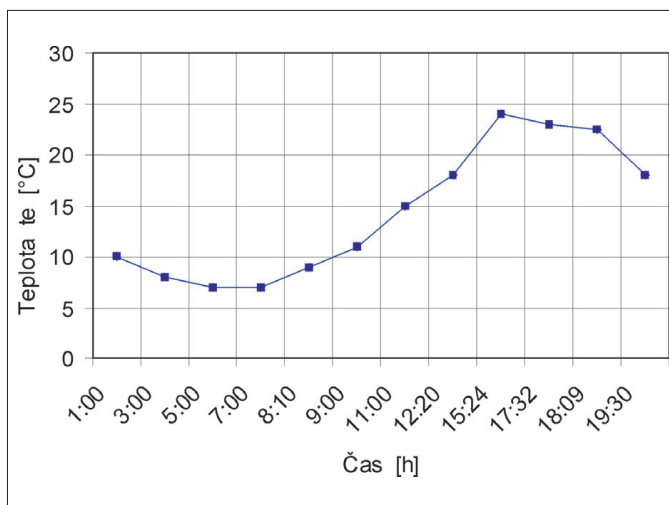
Obr. 10 Pohled do meziprostoru



Obr. 11 Místo měření

Během měření teplotních profilů nebyla ledová plocha osluněna, venkovní teplota byla měřena ve třech různých časech s průměrnou hodnotou 22 °C.

Odvětrání stánoviště rolby, které je propojeno s halou otvorem přibližně o rozměrech 3 × 2,5 m, bylo řešeno podtlakově, dvoustupňovým axiálním ventilátorem o průtoku 7200/9600 m³/h. Stupeň, na který byl ventilátor



Obr. 12 Průběh teploty venkovního vzduchu v závislosti na čase během měření v dubnu

v době měření provozován, nebyl znám. Možná předpokládat i přívod venkovního vzduchu do haly infiltrací z okolních neklimatizovaných prostor. V hale nejsou dveře otevírané přímo do venkovního prostoru. Mimo dvou venkovních dveří o rozměrech 0,8 × 1,97 m, které jsou umístěné v rozích je nad hlavní tribunu uzavřený vstup na střechu (během měření nebyl tento vstup využíván).

Ve většině případů je vstup do haly přes zádveří a meziprostor. Ke stánovišti rolby je také přímý vstup z venkovního prostoru realizovaný ocelovými vraty přibližně o rozměrech 3 × 2,5 m, u nichž lze uvažovat velmi nízkou těsnost. Axiální ventilátor pak nasává část vzduchu spárami vrat.

3.4 Teplota a vlhkost venkovního vzduchu

Teplota venkovního vzduchu byla měřena na jižní straně objektu v zastíněném výklenku (na teploměr nedopadalo přímé sluneční záření), běžným rtuťovým teploměrem. Ve třech případech byl k měření použit Assmannův aspirační psychrometr. Způsob získání dat je patrný z následující tab. 5 ve sloupci poznámka.

3.5 Průběh měření

Měření vertikálního teplotního profilu bylo uskutečněno během odpoledne v intervalu 3,5 hodin (od 14:30 do 18:04 hodin). Nejprve byla měřena výsledná teplota kulovým teploměrem. První měření proběhlo v devátém měřicím bodě cca 9,9 metrů nad ledovým povrchem ve 14:30 h. Poté měření probíhala postupně po cca 25 minutových intervalech, zároveň byla vzdálenost od ledové plochy snižována na výšku patrnou z tabulky naměřených hodnot. Jednotlivé délkové intervaly nebyly totožné z důvodu malého časového prostoru. Poslední měření výsledné teploty bylo 0,06 m nad ledovým povrchem v 16:56 h.

Teplota vzduchu byla měřena obdobným způsobem jako výsledná teplota, s menšími časovými intervaly (cca 5 min), s časovým posunem cca 2,5 h od začátku měření výsledné teploty. První měření začalo v měřicím bodě 9 v 17:10 h. Poslední potom v bodě 1 v 18:00 h.

Dalším cílem měření bylo stanovení průběhu teplot nad tribunami v závislosti na výšce od ledové plochy. Měření probíhala ve stejném příčném řezu jako předchozí měření viz obr.7. Začalo v měřicím bodě 13 metrů nad ledovým povrchem v 16:17 h.

Dále pokračovalo postupným snižováním výšky až do 16:45 hodin, kde bylo měřeno ve výšce 0,4 m od podlahy (umístěné zároveň s ledovou plochou).

Vlhkost Assmannovým aspiračním psychmetrem byla měřena pouze ve dvou ve výškách 0,9 metru a 9,9 metru nad ledovým povrchem. Relativní vlhkost vzduchu se po dobu měření pohybovala od 70 do 90 %.

3.6 Vyhodnocení měření

K vyhodnocení naměřených hodnot byly použity vztahy pro výpočet vlhkosti a střední radiační teploty z literatury [2], [14].

Relativní vlhkost vzduchu φ [-] se stanoví z definičního vztahu

$$\varphi = \frac{p_d}{p_d''} \quad (4)$$

kde je

p_d'' [Pa] tlak sytých par při teplotě vzduchu,
 p_d [Pa] parciální tlak par ve vzduchu, jehož hodnota se stanoví ze vztahu

$$p_d = p_{dm}'' - A p(t - t_m) \quad (5)$$

kde je

p_{dm}'' [Pa] tlak sytých par při teplotě mokrého teploměru,
 A [K⁻¹] psychrometrický součinitel, $A = 662 \cdot 10^{-6}$,
 t [°C] teplota vzduchu,
 t_m [°C] teplota mokrého teploměru.

Střední radiační teplotu t_r [°C] lze stanovit z naměřené výsledné teploty kulovým teploměrem t_g [°C] podle vztahu

$$t_r = \sqrt[4]{(t_g + 273) + 1,855 \cdot 10^7 \alpha_{kg}(t_g - t)} - 273 \quad (6)$$

kde je

α_{kg} [W/m²K] součinitel přestupu tepla konvekcí.

Pro klidný vzduch možno použít k jeho určení výraz

$$\alpha_{kg} = 1,4 \left[\frac{(t - t_g)}{D} \right]^{0,25} \quad (7)$$

kde je

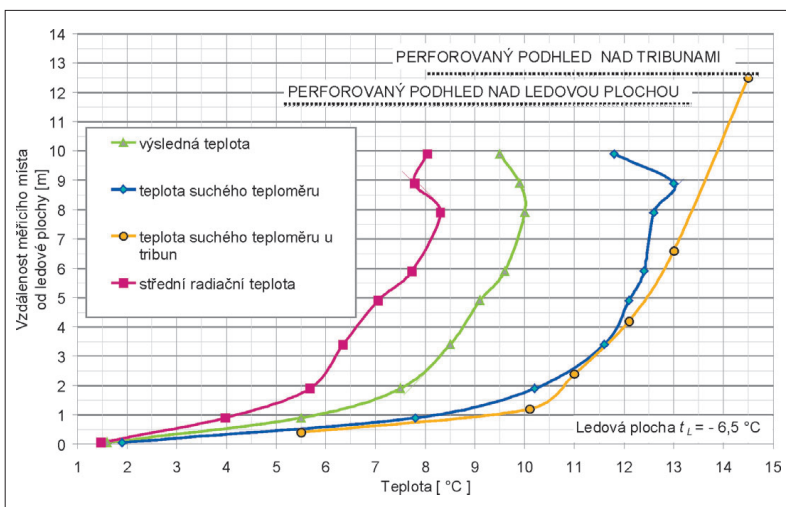
D [m] průměr kulového teploměru

Druhého dne během dopoledních hodin (od 8.00 do 14.00 hodin) byla měřena teplota a vlhkost vzduchu Assmannovým aspiračním psychmetrem a výsledná teplota kulovým teploměrem.

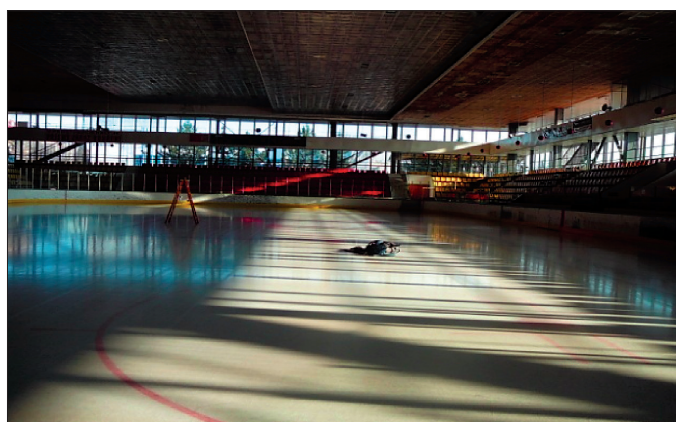
Podmínky měření byly obdobné jako při měření teplotního profilu. S rozdílem částečného oslunění ledové plochy od 8:00 do 9:00 hodin (obr. 14) a následného obsazení ledové plochy v 9:25 hodin 80 dětmi ve věku 12 let. V 11:50 hodin byl led upraven rolbou.

Měření probíhalo v různých částech ledové plochy a to ve výškách 0,06 m; 1 m; 1,65 m nad ledovým povrchem a v několika místech mimo ledovou plochu. Umístění těchto míst je patrné z obr. 15. Místa měření jsou označena křížkem v kruhu s číslem. Toto číslo odpovídá hodnotě čísla uvedeného v tab. 8 naměřených a vypočtených hodnot.

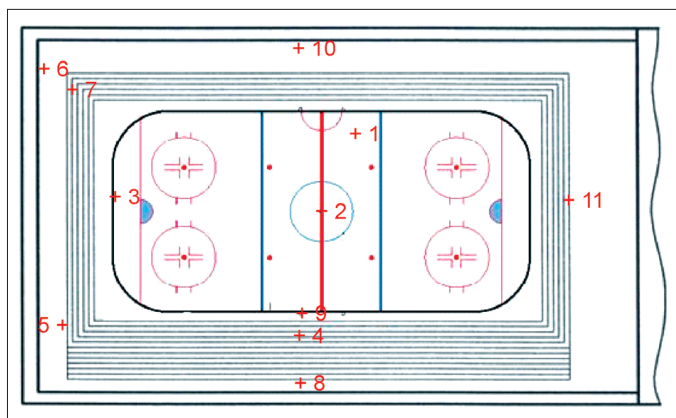
Měření proběhlo v době od 8:00 do 14:30. Měření psychmetrem probíhalo současně s měřením kulovým teploměrem v době jeho ustálení do rovnovážného stavu. Pro měření nad ledovou plochou byl měřicí přístroj zavěšen na stojanu. V případě měření mimo ledovou plochu bylo měřidlo zavěšeno na konstrukci budovy (zábradlí). Během měření byla změřena vlhkost na různých místech ledové plochy a prostoru haly.



Obr. 13 Průběh teplot nad ledovou plochou a nad hlavní tribunou s uvedením času měření (duben)



Obr. 14 Osluněná ledová plocha



Obr. 15 Místa měření

3.7 Vyhodnocení měření

Z naměřených a vypočtených hodnot byl sestaven diagram uvedený na obr. 13, kde jsou patrné průběhy teplot nad ledovou plochou a tribunami: střední radiační teploty (červeně), výsledné teploty (zeleně), průběhy teplot vzduchu nad ledovou plochou (modře) a nad hlavní tribunou (žlutě). Z uvedených průběhů vyplývá, že při teplotě ledové plochy $-6,5^\circ\text{C}$, se dá předpokládat, že v mezní vrstvě těsně nad ledem jsou všechny teploty blízké teplotě ledu. Jednotlivé teploty přibližně do výšky 2 m prudce rostou. Nad touto výškou již dochází k poklesu jejich gradientu. Od výšky 8 m nad ledovým povrchem dochází ke změně směru změny teplot a teplota začíná postupně klesat, což je zřejmě způsobeno chladným povrchem podhledu, na který sálá ledový povrch a ochlazuje

ho na teplotu nižší než je teplota okolních povrchů. Ochlazování stropní konstrukce závisí z velké části na emisivitě povrchu stropní konstrukce, vzdálenosti od ledové plochy a na kvalitě tepelné izolace (akustické). Při měření bohužel nebylo možné změřit další body blíže k podhledu a teplotu nad podhledem.

Průběh teploty nad hlavní tribunou má přibližně exponenciální charakter. Je vidět, že efekt ochlazení stropu ledovou plochou není v tomto případě znatelný (vliv sálání tribuny a nižší úhlové poměry osálení od ledové plochy (větší úhel a vzdálenost)).

Výsledky měření vlhkosti ukázaly rovnoměrné rozložení vlhkosti v hale, která dosahuje ve všech místech prostoru přibližně hodnoty $\varphi = 70$ až 85 % s výjimkou oblasti do 2 m nad ledovým povrchem, kde dochází k vytvoření stagnující podchlazené vrstvy vzduchu s relativní vlhkostí okolo 85 %.

Měření v jednotlivých místech byla jednorázová, proto není možné stanovit nejistotu měření a přesnost výsledků naměřených hodnot. Chyby měření jsou také způsobeny nesoučasností měření všech hodnot potřebných pro výpočet střední radiační teploty, a v neposlední řadě malou znalostí jednotlivých parametrů konstrukce haly. Z těchto důvodů je nutno brát měření pouze jako orientační.

Závěrem nutno zdůraznit, že v době měření koncem měsíce dubna 2009 byly téměř letní externí podmínky, viz obr. 12. Proto bylo rozhodnuto měření v nejdůležitějších bodech opakovat za externích teplot, které odpovídají přibližně průměrné teplotě za otopné období.

Měření bylo opakováno dne 14. 10. 2009.

4. OPAKOVANÉ MĚŘENÍ

Měření všech veličin bylo opakováno v období, kdy externí teplota i měrná vlhkost vzduchu po delší dobu byly na úrovni odpovídající průměrným teplotám za otopné období. Měření mělo ukázat na rozdíly ve vnitřním mikroklimatu zimního stadionu za rozdílných externích podmínek.

Externí teplota vzduchu během měření, tj. v době od 9:00 do 14:00 h, byla v rozsahu 2 až 4,5 °C. Relativní vlhkost vzduchu byla v rozsahu 80 až 85 %.

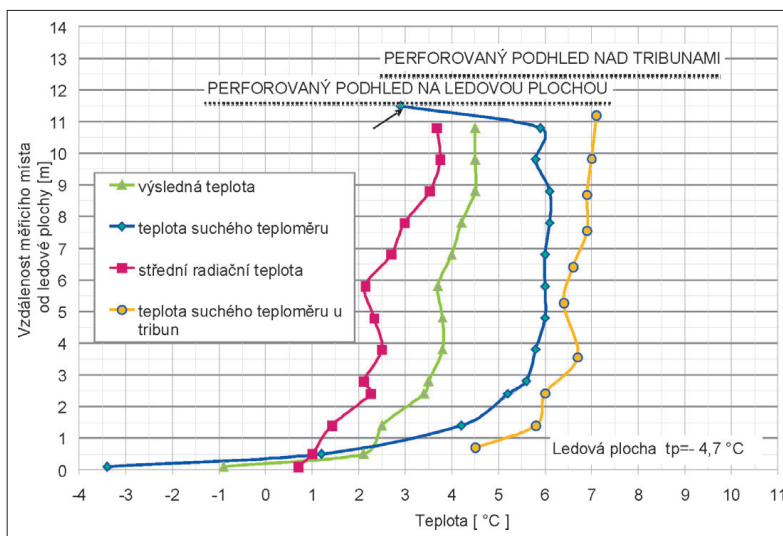
Měření v dubnu bylo při vysokých externích teplotách a tomu odpovídajícím měrných vlhkostech vzduchu.

5. ZÁVĚR

Výsledky prokazují, že návrh klimatizačního zařízení musí brát ohledy na poněkud jiné poměry než je tomu při návrhu klimatizace bez existence ledové plochy.

Pro dosažení požadovaných mikroklimatických podmínek nad ledovou plochou a současně přijatelné tepelné podmínky pro diváky, je jasné, že je nutno navrhovat vzduchotechnické zařízení umožňující více zónové provětrávání.

K ledové ploše je třeba zajistit přívod chladného vzduchu s nízkou měrnou vlhkostí. Prostor hlediště a prostor pod střechou, resp. pod akustickým podhledem by mohl být zásoben vzduchem upraveným na vyšší teploty. Pro hlediště by vzduch byl upraven na vyšší operativní teplotu, plocha podhledu by mohla být mírně ohřívána proudem čerstvého vzduchu.



Obr. 16 Průběh teplot nad ledovou plochou a nad hlavní tribunou s uvedením času měření (říjen)

Prostor hlediště a prostor pod střechou, resp. pod akustickým podhledem by mohl být zásoben upraveným vzduchem na vyšší teploty. Pro hlediště by vzduch byl upraven na vyšší operativní teplotu, plocha podhledu by mohla být mírně ohřívána proudem čerstvého vzduchu. Takže lze závěrem konstatovat, že klimatizace zimních stadionů musí respektovat minimálně tři zóny samostatně zásobené upraveným vzduchem.

Prezentované práce byly v rámci plnění výzkumného záměru VZ MSM 6840770011.

Kontakt na autora: Stanislav.Pechac@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] ASHRAE Handbook-Refrigeration. 2002, Atlanta: ASHRAE kapitola 34. ISBN 1-883413-35-4
- [2] Nový, R. a kol.: Technika prostředí. 2006, Praha: Vydavatelství ČVUT, 267s. ISBN 80-01-03492-5
- [3] Andres, P.: Zimní stadiony z hlediska odvodu vlhkosti. VVI 4/2007, st. 227-229.
- [4] Desert aire.: Indoor ice-rinks Dehumidification. Dostupné z www.desert-aire.cz
- [5] Johansson, Y.: Artificial ice rinks. 2000, Stockholm: Interní manuál firmy GRASSO International Refrigeration Division,
- [6] Misar, I.: Zimní stadiony, stavební fyzika střešních plášťů. Icopal s.r.o., dostupné z <http://www.icopal.cz>
- [7] Munters CZ : Regulace vlhkosti vzduchu na zimních stadionech. Dostupné z www.munters-odvlhcovani.cz
- [8] SEN – vysoušecí technika, s. r. o.: Odvlhčování vzduchu na zimních stadionech. dostupné z <http://www.odvlhcovani.cz>
- [9] Žák, A.: Vliv radiace ledové plochy na teplotu kovových konstrukcí DEKTIME. VVI 5/2005, st. 27-35.
- [10] Žák, A.: Navrhování střech nevytápěných a neklimatizovaných zimních stadionů., Juniorstav – 1.3 Stavební fyzika a prostředí v budovách., dostupné z http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce_1.3/Zak_Antonin_CL.pdf
- [11] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci.
- [12] Kunz, J.: Využití odpadního tepla při chlazení zimních stadionů. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3325>
- [13] Zmrhal, V.: Přípustné povrchové teploty sálavých ploch, VVI 2007/4, Společnost pro techniku prostředí
- [14] Matuška T.: Experimentální metody v technice prostředí, Vydavatelství ČVUT Praha 2005. ISBN 80/01/03291/4. ■