

Ing. Lenka MAUREROVÁ, Ph.D.¹⁾
 Ing. Alena SELUCKÁ²⁾
 Ing. Petr JAKUBEC³⁾
 doc. Ing. Jiří HIRŠ, CSc.¹⁾

¹⁾ VUT v Brně, Fakulta stavební,
 Ústav technických zařízení budov

²⁾ Technické muzeum v Brně,
 Metodické centrum konzervace

³⁾ TR instruments spol. s r. o.

Recenzent
 Ing. Miloš Lain, Ph.D.

Uplatnění simulační analýzy při ověření efektivity vytápění metodou „conservation heating“ v historické budově

Use of Simulation Analysis to Assess Efficiency of Heating by the “Conservation Heating” Method in a Historical Building

Důležitým posláním paměťových institucí je zajistit odpovídající péči předmětům kulturního dědictví během jejich dlouhodobého uchovávání. Mnohé z těchto institucí jsou však umístěny v historických budovách, v nichž nebývá snadné udržovat vhodné vnitřní prostředí a požadované mikroklimatické podmínky, dané zejména relativní vlhkostí a teplotou. Příspěvek prezentuje výsledky experimentu vytápění metodou „conservation heating“ pro dvě vybrané místnosti v Dolním zámku Kunštát. V tomto objektu probíhal uvedený experiment kontinuálně od poloviny roku 2013 do května 2017. Předložená případová studie byla zpracována v roce 2015 a zaměřuje se na rok 2014. Experimentální měření bylo doplněno numerickými simulacemi s cílem zhodnotit efektivitu výše uvedené metody vytápění při extrémních venkovních klimatických podmínkách a predikovat spotřebu elektrické energie. V České republice není doposud známo, že by byl tento systém odzkoušen.

Klíčová slova: vnitřní prostředí, vytápění

An important mission of memory institutions is to ensure adequate care of cultural heritage objects during their long-term storage. However, many of these institutions are located in historical buildings, where it is not easy to maintain proper indoor environment and required microclimate conditions, given especially by relative humidity and temperature. The paper presents results of experiment of heating by the “Conservation Heating” method for two selected rooms of the Kunštát Lower Castle. The experiment was continuously running in the building from middle of the year 2013 until May 2017. Presented case study was made in the year 2015 and it is targeting the year 2014. Experimental measurement was supplemented by numerical simulations, in order to evaluate efficiency of the above-mentioned heating method in more extreme outdoor climatic conditions and thus predicted electricity consumption. It is not known that this system would be previously tested in the Czech Republic.

Keywords: indoor environment, heating

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Mezi základní poslání paměťových institucí, jako jsou muzea, galerie, knihovny, archivy či památková péče, patří zajištění odpovídající péče a dobré kondice předmětům kulturního dědictví během jejich dlouhodobého uchovávání. Mnohé z těchto institucí jsou umístěny v historických budovách, v nichž nebývá snadné udržovat požadovaná kritéria vnitřního prostředí, která jsou charakterizována zejména doporučenými stabilními hodnotami relativní vlhkosti RH [%] a teploty vzduchu t [°C].

Za přijatelné podmínky pro uchovávání smíšených sbírek v objektech s omezenou možností regulací mikroklimatických parametrů jsou většinou považovány hodnoty RH 40–60 % a $t = 15$ –25 °C. Přičemž v historických budovách bez temperování je snahou pomocí různých režimových opatření předcházet alespoň rizikovým hodnotám teploty nad 30 °C a pod 5 °C.

Na základě poznatků chování většiny organických hygroskopických materiálů a s tím spojené současné konzervátorsko-restaurátorské praxe je pozornost zaměřována zejména na předcházení rizikových stavů spojených s vysokými hodnotami relativní vlhkosti nad 75 % a jejich poklesem pod 30 % [1]. Pro tyto materiály platí, že jejich obsah vlhkosti je v rovnováze s teplotou a relativní vlhkostí okolního vzduchu. Zejména prudké výkyvy relativní vlhkosti vyvolávají vnitřní pnutí a rozměrové změny, které mohou vést až k trvalému poškození (např. praskání nebo zborcení dřeva).

METODA „CONSERVATION HEATING“

Jednou z možností, jak regulovat hodnoty relativní vlhkosti, je řízené vytápění, popř. temperování. Především vysoké relativní vlhkosti lze spuštěním dodatečného vytápění, které je ovládáno humidistatem. Tento postup je vhodný zejména v historických objektech s dlouhodobě vyššími hodnotami relativní vlhkosti, kde jsou zároveň velmi omezené možnosti regulace moderními vzduchotechnickými zařízeními a klimatickými jednotkami. Při použití humidistatů je ale nutné počítat s tím, že vytápění je v chodu i během letních měsíců a v průběhu zimní sezóny je nutné snížit referenční teplotu temperování a připustit teplotní diskomfort. Metoda je proto označována jako „conservation heating“ („konzervátorské vytápění“), jelikož nastavení jeho ovládání primárně vychází z ochrany uchovávaných materiálů a nesleduje tepelnou pohodu pracovníků či návštěvníků. „Conservation heating“ bylo zavedeno do mnoha historických objektů spravovaných The National Trust ve Velké Británii [2], [3], [4]. Testováno bylo též pro účely ochrany kulturních památek v Nizozemsku [5]. V České republice není doposud známo, že by byl tento systém odzkoušen.

CÍLE PŘÍPADOVÉ STUDIE

Předmětem experimentálního ověření bylo zjistit efektivitu systému „conservation heating“ v místních klimatických podmínkách. Pro území České republiky je typické mírné kontinentální podnebí, které je charakteristické chladnými, suchými zimami a teplými, vlhkými léty,

s průměrnou roční teplotou vzduchu 5–9 °C a relativní vlhkostí okolo 70–80 %. Velký vliv na podnebí má rovněž nadmořská výška, ale i specifické krajinné prvky či reliéf terénu [6]. Dalším cílem bylo odzkoušet celkový systém řízení dodatečného vytápění vzhledem k nastavení vhodné referenční hodnoty relativní vlhkosti a též okrajových teplot pro spínání a vypínání zdroje dodatečného vytápění.

V neposlední řadě bylo záměrem studie zpracovat numerické simulace pro posouzení uvedeného systému při extrémnějších vnějších klimatických podmínkách. Simulačním nástrojem BSim bylo na virtuálním modelu dotčené části Dolního zámku Kunštát provedeno několik variant simulací. Jejich prostřednictvím byly ve vybraných místnostech predikovány průběhy vnitřní teploty t_i a relativní vlhkosti RH . Pro zvolené varianty bylo dále provedeno vyhodnocení spotřeby energie na vytápění v závislosti na různých okrajových podmínkách.

EXPERIMENT „CONSERVATION HEATING“

Sledovaný objekt

Pro realizaci experimentu byly vybrány prostory Dolního zámku Kunštát, v areálu Státního zámku Kunštát. Jedná se o památkově chráněný

historický objekt, který byl v 60. letech 20. století adaptován pro účely ukládání archiválií. V současné době není objekt využíván a plánuje se jeho opětovná rekonstrukce jako depozitáře. Byly vybrány dvě místnosti, č. 117 – „referenční“ a č. 118 – „experimentální“, ve 2. nadzemním podlaží severního křídla objektu (přibližná lokalizace místností v areálu Státního zámku Kunštát je patrná ze situace na obr. 1). Tyto prostory nebyly v posledních letech temperovány a vykazovaly před zahájením experimentu dlouhodobě vyšší relativní vlhkost kolem 70 %.

Charakteristika zkoumaných místností

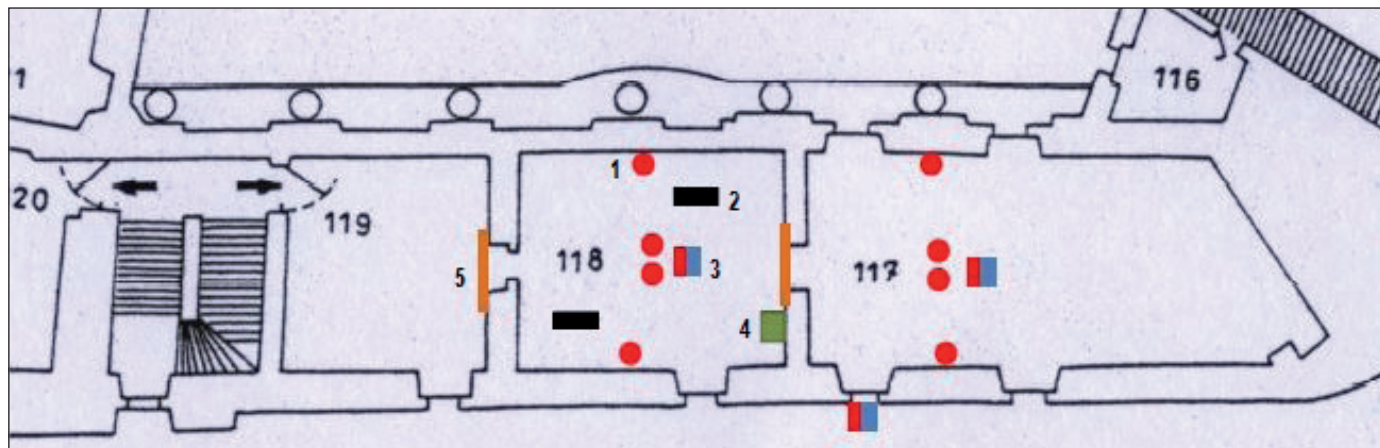
Experimentální místnost č. 118 byla vytápěná metodou „conservation heating“. Byla zde umístěna dvě mobilní olejová přímotopná tělesa o součtovém výkonu 1 200 W (výkonová řada jednoho tělesa umožňuje nastavit výkon na 600 W, 900 W a 1 500 W; v rámci experimentu byl využit pouze nejnižší výkonový stupeň, a to 600 W na jedno těleso). Otopná tělesa pracovala pouze v režimu ZAPNUTO/VYPNUTO. Systém MaR (měření a regulace) zajišťoval zapínání a vypínání těles, na základě aktuálně naměřené relativní vlhkosti RH a teploty vzduchu v místnosti t_i (zajišťovalo čidlo teploty a relativní vlhkosti).

Místnost č. 117 sloužila jako „referenční“ místnost pro provádění experiment. Byla osazena stejným množstvím i typem čidel, avšak nebyla vytápěná.



Obr. 1 Situace areálu Státního zámku Kunštát s vyznačením zkoumaných místností č. 117 a 118 [zdroj: Atelier Soukup s.r.o.; upraveno: autoři]

Fig. 1 Situation of the Kunštát State Castle complex with indication of examined rooms No. 117 and 118 [source: Atelier Soukup s.r.o.; modified by: authors]



Obr. 2 Lokalizace místností č. 118 a 117 s rozmístěním měřicích přístrojů: 1 – čidla povrchové teploty; 2 – olejová přímotopná tělesa; 3 – kombinovaná čidla teploty a relativní vlhkosti; 4 – měřicí a řídicí ústředna systému MS6D; 5 – utěsnění dveřních otvorů polystyrenem [zdroj: autoři]

Fig. 2 Location of rooms No. 118 and 117 with placement of measuring devices: 1 – surface temperature sensors; 2 – oil-filled electric heaters; 3 – combined RH/temp. sensors; 4 – measuring and control logger of MS6D system; 5 – sealing of door openings with polystyrene [source: authors]

Obě místnosti (č. 117 i č. 118) byly uzavřené a nepřístupné. Všechna okna ve výše zmíněných místnostech byla uzavřena. Dveřní otvory (bez osazených dveří) byly po instalaci a zprovoznění systému MaR uzavřeny polystyrenovými deskami o tloušťce 50 mm tak, aby vytápěná místnost č. 118 neovlivňovala mikroklima v referenční místnosti č. 117 a sama nebyla ovlivněna prostředím v dalších přilehlých částech zámku. Lokalizace dotčených místností je patrná z obr. 2.

Nastavení systému MaR dodatečného vytápění pro „conservation heating“

Experiment „conservation heating“ byl zahájen 7. 6. 2013 a ukončen v květnu 2017. Datový kabel určený pro snímání naměřených dat a kontrolu systému byl vytažen mimo testovaný prostor. Obě místnosti byly pro experiment vybaveny stejným počtem a typem čidel (viz obr. 2). Parametry teploty a relativní vlhkosti venkovního vzduchu byly měřeny čidlem umístěným přes okno z místnosti č. 117 na severní stěně objektu zámku.

Kombinovaná čidla teploty a relativní vlhkosti byla v místnostech svěšena od stropu do výšky cca 150 cm nad podlahu. Do systému řízení vytápění bylo použito jen čidlo umístěné v místnosti č. 118. Centrální jednotkou pro měření, záznam dat do paměti a řízení byla měřicí ústředna MS6D doplněná kartou relé pro spínání dodatečného vytápění (viz obr. 3), které zajišťovala olejová přímotopná tělesa. Celkově bylo zapojeno 8 čidel teploty povrchu a 3 čidla teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Všechny měřené veličiny byly ukládány do paměti s periodou 10 minut. Dále byl monitorován aktuální stav systému řízení, tj. dodatečného vytápění ZAPNUTO/VYPNUTO, umožňující vyhodnocení spotřeby elektrické energie v experimentu. Celková spotřeba elektrické energie byla dále měřena speciálním přístrojem umístěným mimo monitorované místnosti.

Experiment probíhal v režimu nastavení uvedeném v tab. 1.

Výsledky experimentu

Experiment byl v uvedeném módu sledován od 7. 6. 2013 až do konce roku 2014. Bohužel vlivem kompletního výpadku napájení došlo ke ztrátě dat v období od 10. 3. 2014 do 28. 4. 2014. Průběh naměřených veličin vnitřní teploty a relativní vlhkosti z místností č. 118 a 117 dokladuje obr. 4.



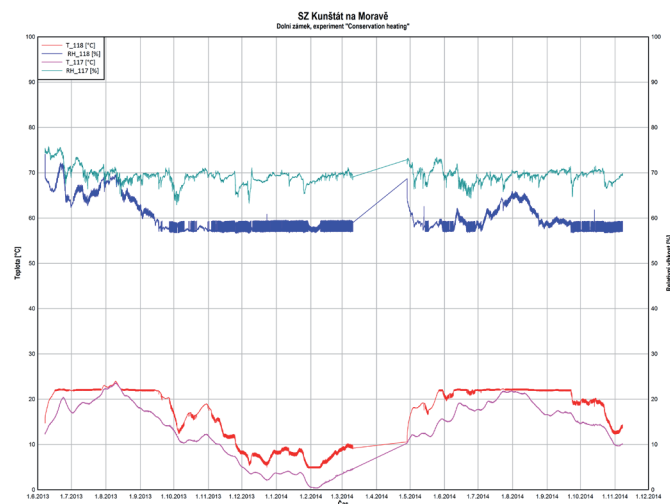
Obr. 3 Experimentální místnost č. 118 vybavená olejovými přímotopnými tělesy a systémem MaR, oddělená polystyrenovou deskou od okolních místností [zdroj: autoři]

Fig. 3 Experimental room No. 118 equipped with oil-filled electric heaters and MaR system, separated by polystyrene board from surrounding rooms [source: authors]

Tab. 1 Přehled nastavení provozu olejových přímotopů v místnosti č. 118 [zdroj: autoři]

Tab. 1 Overview of oil-filled electric heaters operation setting in room No. 118 [source: authors]

Označení režimu	Podmínka RH [%]	Podmínka t_i [°C]	Provozní stav otopného tělesa
Režim A1	> 59 % ($\pm 2\%$)	< 22 °C ($\pm 0,1$ °C)	ZAPNUTO
Režim A2	< 57 %	nezhledňuje se	VYPNUTO
Režim B1	nezhledňuje se	< 5 °C	ZAPNUTO
Režim B2	nezhledňuje se	> 22 °C	VYPNUTO



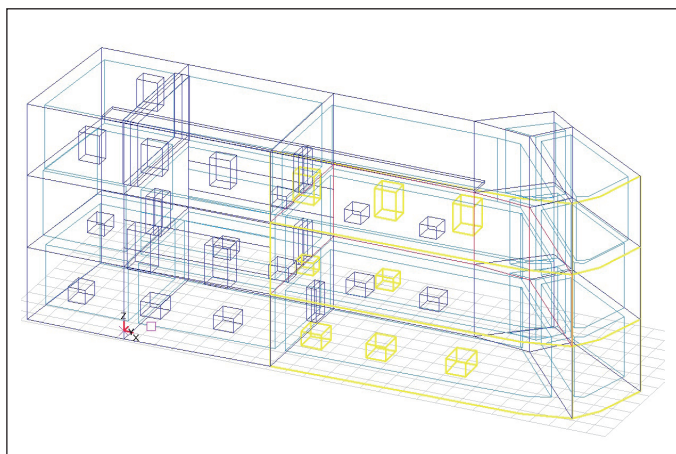
Obr. 4 Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu z experimentální místnosti č. 118 (RH_118, T_118) v porovnání s referenční místností č. 117 (RH_117, T_117) [zdroj: autoři]

Fig. 4 Time course of air temp. and RH from experimental room No. 118 (RH_118, T_118) in comparison to reference room 117 (RH_117, T_117) [source: authors]

Získané křivky ukazují, že v období od června do konce července roku 2013 se RH v místnosti č. 118 (RH_118) nedostala na požadovanou úroveň těsně pod 60 % z důvodu vypínání dodatečného vytápění při dosažení teploty 22 °C. Období od října 2013 až do začátku března 2014 je charakterizováno stálou relativní vlhkostí v místnosti č. 118, které bylo dosaženo právě řízeným přitápěním. Předpokládáme, že období stabilní RH v místnosti č. 118 by trvalo až do konce června 2014, kdy se již začíná projevovat přirozená vyšší teplota venkovního vzduchu a systém se dostává na maximální přípustnou teplotu pro přitápění (22 °C). Tato teplota však již nestačí pro udržení stabilní relativní vlhkosti těsně pod hranici 60 %, která mírně roste až na úroveň cca 65 %. Poté, co koncem srpna 2014 teplota venkovního vzduchu klesá, se systém opět vrací k řízení přitápěním a relativní vlhkost se stabilizuje na úrovni pod 60 %.

Diskuze k experimentu

Na základě získaných experimentálních výsledků bylo potvrzeno, že s použitím vytápění a temperování, které bylo kontrolováno humidistatem, byla udržována přijatelná hodnota relativní vlhkosti pod 60 % po dobu téměř celého roku 2014. Během letních měsíců (červenec a srpen), kdy vnitřní teplota přesáhla 22 °C, se systém vypnul a došlo k nárůstu relativní vlhkosti k cca 65 %. Tento výkyv vlhkosti v rozmezí ± 5 % nad stanovenou horní hranici však v praxi neznamená větší riziko pro uchovávané materiály a případně ho lze eliminovat přidávanými odvlhčovači. V případě zaplnění prostoru organickými materiály, jako je dřevo nebo papír, lze předpokládat, že by výkyvy relativní vlhkosti byly ještě dále zmírněny na základě jejich interakcí s okolním prostředím. Na druhou



Obr. 5 Geometrický 3D model zkoumané části budovy natočený v pohledu na severní fasádu – zpracovaný v nástroji BSim [zdroj: autoři]

Fig. 5 Geometric 3D model of the examined part of the building oriented in the view on the north façade – created in BSim tool [source: authors]

stranu bude nutné v reálných podmínkách postupovat velmi opatrně a sledovat i sorpční izotermu těchto materiálů.

Spotřeba energie během experimentu byla vyměřena na hodnotu 7,211 MWh. Při odhadu spotřeby energie je ale potřeba též zohlednit reálnou intenzitu větrání. Zjištěná kalkulace odpovídá uzavřenému prostoru, ale v běžných podmínkách můžeme očekávat větší frekvenci otevírání dveří, popř. oken.

SIMULACE V NÁSTROJI BSIM

Simulace byly provedeny v simulačním nástroji BSim, který mimo jiné umožňuje provádět energetické bilance budov, tepelně-vlhkostní analýzy a simulace průběhů parametrů vnitřního prostředí [7].

Tvorba modelu

Jako podklad pro tvorbu zjednodušeného geometrického modelu posloužila projektová dokumentace k Dolnímu zámku Kunštát z roku 1953 [8] a dále vlastní zaměření in-situ. Geometrický model obou sledovaných místností, s návazností na okolní místnosti v 1., 2. a 3. nadzemním podlaží, je znázorněn na obr. 5.

Tab. 2 Fyzikální veličiny materiálů, použitých pro skladby konstrukcí v nástroji BSim [zdroj: autoři]

Tab. 2 Physical properties of materials used for compositions of constructions in BSim tool [source: authors]

Materiál použitý ve skladbě konstrukce	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
břidlice	1,70	750	2 800
pískovec	1,40	840	2 400
cihla plná pálená	0,86	900	1 800
opuka	2,30	1 000	2 600
železobeton	1,74	1 020	2 500
beton	1,36	1 020	2 300
hlína	0,70	750	1 600
omítka vápenná	0,87	840	1 600

Skladby konstrukcí byly stanoveny na základě Stavebně historického průřezu fasády Dolního zámku z roku 1995 [9] a dále na základě průřezu in-situ a konzultací s kastelánem zámku. Materiály a z nich sestavené skladby konstrukcí byly implementovány do nástroje BSim. Fyzikální veličiny použitých materiálů jsou uvedeny v tab. 2.

Severní a jižní obvodová stěna je tvořena převážně smíšeným zdívem. Vnitřní stěny taktéž. Okna byla uvažována jako dřevěná, zdvojená s jedním sklem (součinitel prostupu tepla byl odhadnut na hodnotu $U \approx 2,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Přesný popis a zakreslení jednotlivých vrstev zdiva postihuje literatura [9].

Verifikace modelu

Aby bylo možné testovat na vytvořeném modelu varianty, které se lišily v zadání různých typů okrajových podmínek, bylo nutné ověřit platnost modelu verifikací. Verifikace probíhala metodou porovnávání simulovaných hodnot parametrů t_i a RH s hodnotami parametrů t_i a RH naměřenými v rámci experimentu. K verifikaci modelu byla použita vlastní klimatická data (měřená in-situ + data ze stanice ČHMÚ Bystřice nad Pernštejnem) konvertovaná do nástroje BSim.

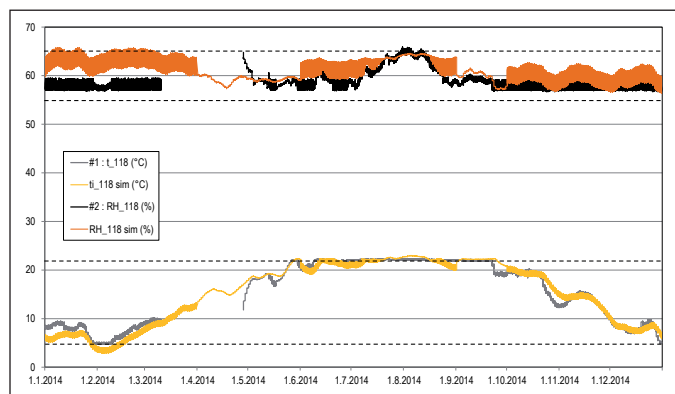
Z důvodu redukce rozsahu článku je zde podrobněji uvedena pouze verifikace experimentální místnosti č. 118, vytápěné metodou „conservation heating“.

V modelu byl v této zóně aktivní systém vytápění a dále zde byl zohledněn vliv přirozeného větrání infiltrací.

Srovnání průběhů sledovaných parametrů v místnosti č. 118 je patrné z grafu na obr. 6. Zde představuje označení v popisu „sim“ simulované hodnoty a označení znakem „#“ měřené hodnoty. Data byla vyhodnocena pro celý rok 2014, kdy v období od 10. 3. do 28. 4. 2014 došlo k výpadku měřených dat.

Z grafu uvedeného na obr. 6 vyplývá, že trend měřených i simulovaných průběhů teplot t_i spolu koresponduje. Poměrně dobře spolu koresponduje také průběh simulovaných a měřených relativních vlhkostí RH . V období leden až únor 2014 však dosahuje rozdíl mezi simulovanou a měřenou relativní vlhkostí největších odchylek. Odchyly mohou být způsobené částečně zjednodušením modelu a dále se zde mohla projevit vyšší počáteční vlhkost konstrukcí, která nebyla v rámci tohoto projektu podrobněji analyzována. Faktorem, který v případě experimentální místnosti č. 118 nejvíce ovlivňuje přesnost simulace, je omezená možnost nastavení systému vytápění v nástroji BSim.

Vytápění metodou „conservation heating“ vyžaduje regulaci otopné soustavy na základě měřené relativní vlhkosti. Tuto možnost nastavení však nástroj BSim neumožňuje. Systém vytápění verifikovaného modelu



Obr. 6 Verifikace modelu experimentální místnosti č. 118 – porovnání průběhů RH a t_i [zdroj: autoři]

Fig. 6 Verification of model of experimental room No. 118 – comparison of time courses of RH and t_i [source: authors]

byl tedy nastaven s ohledem na průběhy vnitřních teplot a relativních vlhkostí. S výhodou zde byl využit záznam z experimentálního měření, který monitoroval spínání olejových otopných těles. Z tohoto záznamu vyplynulo, že v zimních a přechodných měsících roku bylo dodatečné vytápění poměrnou část dne v režimu ZAPNUTO. Přestávky ve vytápění představovaly součtově pouze několik hodin denně. V letním období naopak docházelo k častému cyklování, kdy se otopná tělesa zapínala vždy cca na dobu 15 až 20 minut a potom se znovu vypnula. Podrobné nastavení režimů vytápění v nástroji BSim je uvedeno níže v odstavci Varianty simulací dle použitých klimatických dat.

Při verifikaci modelu byly porovnány i spotřeby energií na vytápění jak v jednotlivých měsících, tak součtově v celém roce 2014. Reálná roční spotřeba elektrické energie na vytápění byla v roce 2014 naměřena ve výši 7,21 MWh. Simulovaná roční spotřeba elektrické energie na vytápění činila 7,33 MWh. Rozdíl mezi simulovanou a skutečnou spotřebou energie na vytápění činí 1,62 %. V roční bilanci spotřeba energie dosahuje shody (např. v metodice energetických auditů se za shodu modelu s realitou považuje odchylka ± 20 % od fakturované spotřeby). V letním období je simulovaná spotřeba energie na vytápění výrazně nižší, avšak při současné kontrole průběhů t_i a RH je možné prohlásit nastavení systému vytápění za vyhovující.

Statistické vyhodnocení verifikace experimentální místnosti č. 118 bylo provedeno pomocí histogramů četnosti. Akceptovatelné výkyvy hodnot RH a t_i byly nastaveny na základě konzervátorsko-restaurátorské praxe. Sledován byl povolený výkyv teploty t_i , který představuje odchylku ± 2 °C od požadované teploty, a povolený výkyv relativní vlhkosti RH , který představuje odchylku ± 5 % od požadované relativní vlhkosti. Požadovanou teplotu a relativní vlhkost v tomto případě reprezentovaly měřené hodnoty. Statisticky byla vyhodnocena absolutní hodnota rozdílu mezi měřenými a simulovanými veličinami.

Ze statistického vyhodnocení vyplynulo, že simulovaná vnitřní teplota t_i se v roce 2014 v 85 % případů pohybovala v intervalu $<0; 2>$ °C od měřené teploty. V 15 % případů simulovaná teplota t_i přesahovala povolenou odchylku ± 2 °C. Simulovaná relativní vlhkost se v roce 2014 v 99,9 % případů pohybovala v intervalu $<0; 5>$ % od měřené relativní vlhkosti. V 0,1 % případů simulovaná relativní vlhkost přesahovala povolenou odchylku ± 5 %.

Varianty simulací dle použitých klimatických dat

Na sestaveném modelu bylo simulováno několik variant, které se od sebe lišily zejména v použití různých klimatických dat a dále v nastavení okrajových podmínek systému vytápění.

Jak již bylo řečeno v úvodu studie, reálný experiment „conservation heating“ probíhal ve Státním zámku Kunštát od poloviny roku 2013. Prvním kompletně naměřeným rokem byl tedy rok 2014, avšak zimní období tohoto roku bylo relativně mírné. Aby bylo možné posoudit možnost využití metody „conservation heating“ i v extrémnějších podmínkách, byla k simulaci vybrána klimatická data z jiných evropských oblastí.

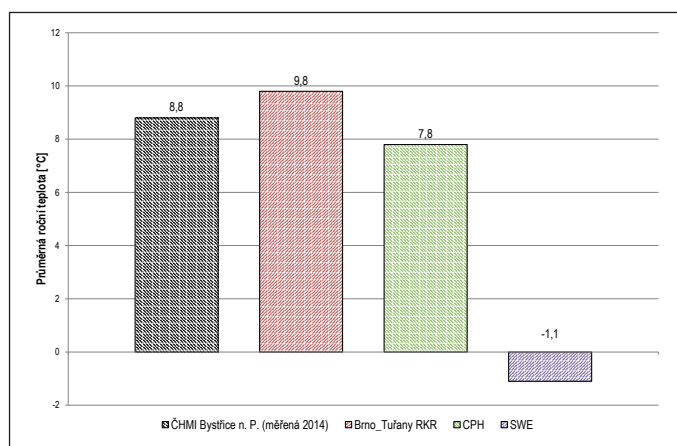
Jednalo se o klimatická data ze stanice Brno-Tuřany, Copenhagen v Dánsku a Kiruna ve Švédsku. Data ze stanice Brno-Tuřany byla ve formátu *.TRY (test reference year). Data ze stanice Copenhagen a Kiruna byla k dispozici na serveru Energy.gov [10], který disponuje klimatickými daty pro simulační nástroj EnergyPlus a další simulační nástroje. Klimatická data jsou zde uložena ve formátu *.TMY (typical meteorological year). Oba datové formáty tedy zohledňují dlouhodobé klimatické podmínky. Na obr. 7 je znázorněno porovnání průměrných ročních teplot venkovního vzduchu t_e a relativních vlhkostí RH_e z použitých klimatických dat.

Tab. 3 představuje přehled jednotlivých simulovaných variant. Varianty byly rozříděny na základě zadání okrajových podmínek. Zadané okrajové

Tab. 3 Přehled jednotlivých simulovaných variant s uvedením konkrétních okrajových podmínek v podobě klimatických dat a nastavení systému vytápění v místnosti č. 118 [zdroj: autoři]

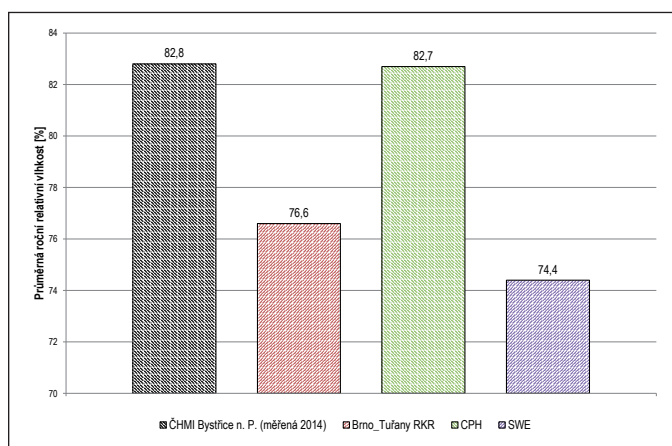
Tab. 3 Overview of simulated variants with specification of used boundary conditions in the form of climatic data and setup of heating system in room No. 118 [source: authors]

Označení varianty	Použitá klimatická data	Základní parametry systému vytápění	Provozní režimy systému vytápění	Použitá vlhčení v zimě
VERIFIKOVANÝ	kombinovaná (Kunštát + Bystřice n. P. + Brno-Tuřany)	max. výkon 1,2 kW pro $t_{e,min} = -15$ °C; min. výkon 1,2 kW pro $t_{e,max} = 25$ °C; set point $t_i = 22$ °C	zimní režim (led.-břez., říj.-pros.) => 5 hod. zapnuto, 1 hod. vypnuto; přechodný režim (dub.-kvě., zář.) => celodenně; letní režim (červ.-srp.) => 1 hod. zapnuto, 2 hod. vypnuto	ne
Brno_RKR_0	Brno-Tuřany	stejně jako var. VERIFIKOVANÝ	stejně jako var. VERIFIKOVANÝ	ne
CPH_0	Copenhagen (Dánsko)	stejně jako var. VERIFIKOVANÝ	stejně jako var. VERIFIKOVANÝ	ne
SWE_0	Kiruna (Švédsko)	stejně jako var. VERIFIKOVANÝ	stejně jako var. VERIFIKOVANÝ	ne
CPH_1	Copenhagen (Dánsko)	max. výkon 3 kW pro $t_{e,min} = -15$ °C; min. výkon 1,2 kW pro $t_{e,max} = 5$ °C; set point $t_i = 22$ °C	zimní režim (led.-břez., říj.-pros.) => 5 hod. zapnuto, 1 hod. vypnuto; přechodný režim (dub.-kvě., zář.) => celodenně; letní režim (červ.-srp.) => 1 hod. zapnuto, 2 hod. vypnuto	ne
SWE_1	Kiruna (Švédsko)	max. výkon 4,2 kW pro $t_{e,min} = -5$ °C; min. výkon 1,2 kW pro $t_{e,max} = 5$ °C; set point $t_i = 22$ °C	celoroční provoz s nepřerušovaným vytápěním	režim 1: množ. dodané vody do vzduchu 0,012 kg/h => zapnuto celodenně list., pros.; režim 2: množ. dodané vody do vzduchu 0,008 kg/h => zapnuto celodenně led.-dub., zář., říj.
SWE_2	Kiruna (Švédsko)	zimní režim => max. výkon 4,2 kW pro $t_{e,min} = -5$ °C; min. výkon 0 kW pro $t_{e,max} = 18$ °C; set point $t_i = 5$ °C; letní režim => max. výkon 1,26 kW pro $t_{e,min} = 0$ °C; min. výkon 0,6 kW pro $t_{e,max} = 18$ °C; set point $t_i = 15$ °C	zimní režim (led.-kvě., lis.-pros.) => celodenně; přechodný režim (červen-říj.) => celodenně	ne



Obr. 7 Průměrné roční teploty venkovního vzduchu (vlevo) a relativní vlhkosti (vpravo) ze stanic: Bystřice nad Pernštejnem, Brno-Tuřany, Copenhagen (CPH) a Kiruna (SWE) [zdroj: autoři]

Fig. 7 Average annual outdoor air temperature (left) and relative humidity (right) from stations: Bystřice nad Pernštejnem, Brno-Tuřany, Copenhagen (CPH) and Kiruna (SWE) [source: authors]



podmínky se lišily v použitých klimatických datech, základních parametrech systému vytápění, provozních režimech systému vytápění a použitím vlhčení v zimních měsících.

Analýza výsledků simulací pro jednotlivé varianty

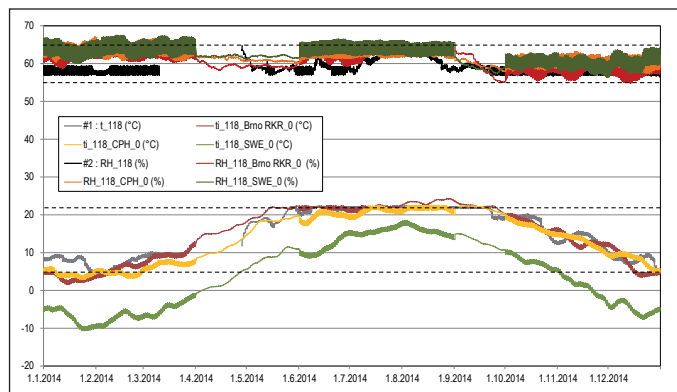
V této kapitole jsou porovnány a vyhodnoceny průběhy vnitřních teplot a relativních vlhkostí. V grafech jsou vyznačeny doporučené meze t_i a RH pro vytápění metodou „conservation heating“, stanovené dle konzervátorské-restaurátorské praxe pro konkrétní zkoumanou budovu Dolního zámku Kunštát. Doporučené meze byly stanoveny následovně $t_i < 5; 22 > ^\circ\text{C}$ a $RH < 55; 65 > \%$.

Graf na obr. 8 zachycuje porovnání sledovaných parametrů vnitřního prostředí v rámci simulovaných variant označených v tab. 3 jako Brno_RKR_0, CPH_0 a SWE_0. Jedná se o varianty, kde byl systém vytápění včetně jeho provozních režimů nastaven shodně jako ve verifikovaném modelu. Proměnnou okrajovou podmínkou simulace byla výměna klimatických dat.

Z grafu na obr. 8 je patrné, že při použití klimatických dat ze stanice Brno-Tuřany a Copenhagen (křivky ozn. Brno_RKR_0 a CPH_0) průběhy parametrů interního mikroklimatu t_i a RH poměrně dobře korespondují s průběhem měřených hodnot z reálného roku 2014. K výraznějšímu rozdílu mezi měřenými a simulovanými hodnotami dochází v zimním období

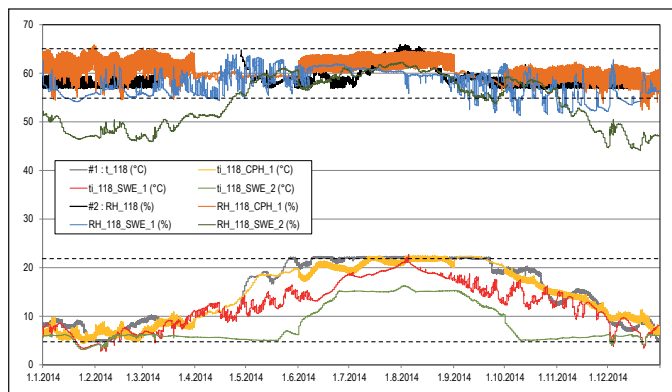
(prosinec až březen). Tento rozdíl je způsoben již zmíněným aspektem, že v reálném roce 2014 bylo zimní období teplotně nadprůměrné. Klimatická data použitá v simulaci reflektují dlouhodobé klimatické podmínky. Z grafu je tedy patrné, jak by se vyvíjel průběh t_i a RH při teplotách venkovního vzduchu, které jsou pro zimní období více charakteristické. V případě použití klimatických dat z Brna-Tuřan a Copenhagen bylo simulací prokázáno, že v zimním období roku by při současném nastavení otopné soustavy (max. výkon 1,2 kW) nebylo dosaženo spodního požadovaného teplotního limitu $5 ^\circ\text{C}$. Otopná soustava by musela pracovat s vyšším otopným výkonem, což by mělo za následek zvýšení spotřeby energie na vytápění. Limity pro výkyv relativní vlhkosti byly v případě použití klimatických dat z Brna-Tuřan v průběhu roku dodrženy. V případě použití klimatických dat z Copenhagen se relativní vlhkost poměrnou část sledovaného období pohybuje v rozmezí 55 až 65 %. V již zmiňovaném období leden až březen zde dochází k občasnému překročení horního limitu 65 %, což je způsobeno nedostatečným výkonem otopné soustavy. Při mírném zvýšení topného výkonu by při dosažení vyšší vnitřní teploty vzduchu klesla relativní vlhkost do požadovaných mezí.

V případě použití klimatických dat ze stanice Kiruna ve Švédsku (křivky ozn. SWE_0) je na první pohled zřejmý výrazný rozdíl mezi průběhem vnitřní teploty t_i simulované a měřené. Vybraná lokalita má reprezentovat průběh sledovaných parametrů při extrémních podmínkách. Tato varianta je spíše hypotetická a má poukazovat na omezení možnosti



Obr. 8 Porovnání měřených průběhů RH a t_i v místnosti č. 118 se simulovanými variantami Brno_RKR_0, CPH_0 a SWE_0; čárkovanou čarou jsou vyznačeny požadované hranice pro RH a t_i [zdroj: autoři]

Fig. 8 Comparison of measured time courses of RH and t_i in room No. 118 with simulated variants Brno_RKR_0, CPH_0 and SWE_0; dashed-line indicates required limits for RH and t_i [source: authors]



Obr. 9 Porovnání měřených průběhů relativní vlhkosti a teploty vzduchu v místnosti č. 118 se simulovanými variantami CPH_1, SWE_1 a SWE_2; čárkovanou čarou jsou vyznačeny požadované hranice pro RH a t_i [zdroj: autoři]

Fig. 9 Comparison of measured time courses of air temp. and relative humidity in room No. 118 with simulated variants CPH_1, SWE_1 and SWE_2; dashed-line indicates required limits for RH and t_i [source: authors]

použití metody „conservation heating“ v závislosti na klimatických podmínkách lokality, ve které se památka nachází. Předpokládáme, že k takto výraznému ochlazení klimatu v ČR v blízké budoucnosti nedojde. Z průběhů simulovaných teplot t_i je patrné, že aktuálně používaný otopný výkon (1,2 kW) není dostačující k pokrytí tepelné ztráty tak, aby teplota ve sledované místnosti dosáhla na spodní hranici 5 °C. Současně však průběh simulovaných relativních vlhkostí jen mírně překračuje povolenou horní hranici 65 %. Ze simulace tedy vyplývá, že k dosažení požadované minimální vnitřní teploty 5 °C by bylo zapotřebí výrazné zvýšení otopného výkonu, což by však vedlo také k výraznému snížení relativní vlhkosti ve sledované místnosti (tato možnost je zpracována ve variantě SWE_2). Výraznější zvýšení výkonu pochopitelně způsobí i nárůst nákladů za energii na vytápění.

Graf na obr. 9 se týká simulovaných variant označených v tab. 3 jako CPH_1, SWE_1 a SWE_2. Varianty postihují průběhy sledovaných parametrů při zadání klimatických dat s mírně chladnějším zimním obdobím (Dánsko) a extrémně chladným zimním obdobím (Švédsko). Ve variantách CPH_1 a SWE_2 byla oproti verifikovanému modelu provedena úprava provozu vytápění – zvýšení otopného výkonu či přenastavení provozního režimu. V těchto variantách nebylo uvažováno s dodatečným vlhčením vzduchu v zimním období. Ve variantě SWE_1 byla oproti verifikovanému modelu provedena úprava provozu vytápění a bylo zde nastaveno zvlhčování vzduchu v zimních měsících (např. mobilními zvlhčovači). Podrobné nastavení systémů jednotlivých variant je shrnuto v tab. 3.

Z grafu na obr. 9 je patrné, že v případě úpravy režimu vytápění se průběhy t_i ve všech simulovaných variantách pohybují téměř celý rok nad limitní spodní hranicí 5 °C. Výjimku tvoří průběhy t_i označené SWE_1 a SWE_2, kde je hranice 5 °C mírně překročena v období na přelomu ledna a února. Relativní vlhkost se v případě varianty CPH_1 pohybuje v požadovaných mezích. Výjimku tvoří několik málo výkyvů v měsíci prosinci, kdy RH chvilově klesá pod požadovanou mez 55 %.

V případě varianty SWE_2 RH v experimentální místnosti nedosahuje v chladnější polovině roku požadované minimální hodnoty 55 %. Tato skutečnost je způsobena nutným navýšením otopného výkonu z důvodu udržení minimální teploty při extrémních vnějších klimatických podmínkách. V letním období se relativní vlhkost pohybuje v požadovaných mezích.

V případě varianty SWE_1 bylo v místnosti 118 uvažováno se zvlhčováním vzduchu v období leden až duben, září až prosinec. Relativní vlhkost se v tomto případě v období od ledna do září pohybuje výhradně v předepsaných mezích. V období od září do prosince relativní vlhkost občasné klesá pod hranici 55 %. Simulace byla testována i pro variantu, kdy bylo množství vody dodávané do vzduchu v období od září do

prosince zvýšeno, avšak v tomto případě byla naopak místy překročena horní povolená hranice pro relativní vlhkost 65 %. Z tohoto důvodu byly okrajové podmínky simulace ponechány v mezích popsaných výše.

Diskuze k simulovaným variantám

Ze simulace varianty CPH_1 vyplývá, že systém vytápění metodou „conservation heating“ je možné použít za předpokladu zvýšení původního maximálního otopného výkonu 1,2 kW.

Na základě předložených simulovaných variant SWE_1 a SWE_2 lze konstatovat, že v případě extrémních klimatických podmínek vytápění touto metodou ztrácí svůj původní význam. Je to způsobeno skutečností, že pro pokrytí tepelné ztráty experimentální místnosti je při extrémních vnějších klimatických podmínkách nutné dodat téměř až čtyřnásobně větší množství tepla oproti verifikovanému modelu. Navíc je v tomto případě nutné vytápět místnost celoročně a nepřerušovaně, aby se vnitřní teplota pohybovala v požadovaném rozmezí. Zvýšení otopného výkonu způsobuje pokles relativní vlhkosti v experimentální místnosti pod požadovanou minimální hranici 55 % (viz varianta SWE_2 na obr. 9). V tomto případě je pak nutné v zimním období místnost zvlhčovat (viz varianta SWE_1 na obr. 9), což představuje z energetického hlediska vícenásobný náklad na provoz mobilního zvlhčovacího zařízení.

V tab. 4 je pro dokreslení celé situace uveden přehled celkových ročních spotřeb energií pro jednotlivé hodnocené varianty.

ZÁVĚR

Z výsledků simulací vyplývá, že vytápění experimentální místnosti č. 118 metodou „conservation heating“ bude funkční i v případě mírného zvýšení otopného výkonu při chladnějších klimatických podmínkách v zimním období (reprezentovaných dlouhodobými klimatickými daty ze stanice Brno-Tuřany v ČR a Copenhagen v Dánsku).

Ze simulované varianty s označením CPH_1 vyplynulo, že pro dodržení požadovaného stavu vnitřního klimatu v experimentální místnosti by bylo nutné zvýšit otopný výkon reálně instalovaných otopných těles z 1,2 kW na 3 kW. Tuto změnu by bylo možné reálně provést nastavením obou otopných těles na nejvyšší výkon jejich výkonové řady, tj. 1,5 kW. Součtově bychom tedy docílili potřebného výkonu 3 kW. Navýšení spotřeby energie na vytápění by v takovémto případě činilo cca 23 % oproti spotřebě naměřené v roce 2014. I při zvýšení otopného výkonu se bude sledovaná relativní vlhkost stále pohybovat v doporučeném rozmezí mezi 55 a 65 %.

Simulace předpověděla, že v případě umístění posuzované budovy do extrémního klimatu, reprezentovaného klimatickými daty ze stanice

Tab. 4 Přehled celkové roční spotřeby energie pro jednotlivé simulované varianty [zdroj: autoři]

Tab. 4 Overview of total annual energy consumption for individual simulated variants [source: authors]

Označení varianty	Použitá klimatická data	Roční spotřeba energie na vytápění [MWh]	Roční spotřeba ostatních energií (chlazení, vlhčení, ventilátor) [MWh]	Celková roční spotřeba [MWh]	Rozdíl od celkové roční spotřeby verifikovaného modelu [%] (+ nárůst, - snížení)
VERIFIKOVANÝ	kombinovaná (Kunštát + Bystřice n. P. + Brno-Tuřany)	7,33	-	7,33	-
Brno_RKR_0	Brno-Tuřany	6,74	-	6,74	-8 %
CPH_0	Copenhagen (Dánsko)	7,82	-	7,82	7 %
SWE_0	Kiruna (Švédsko)	7,85	-	7,85	7 %
CPH_1	Copenhagen (Dánsko)	9,03	-	9,03	23 %
SWE_1	Kiruna (Švédsko)	24,00	0,29 (vlhčení)	24,29	231 %
SWE_2	Kiruna (Švédsko)	14,42	-	14,42	97 %

Kiruna ve Švédsku, přestává metoda „conservation heating“ plnit svůj původní význam. Pro udržení sledovaných parametrů vnitřního klimatu v požadovaných mezích bychom v případě reprezentovaném variantou SWE_1 dosáhli nárůstu spotřeby energie o 231 % oproti spotřebě naměřené v roce 2014 v Kunštátě.

Závěrem lze tedy konstatovat, že pro dlouhodobé klimatické podmínky České republiky je použitá metoda vytápění systémem „conservation heating“ v experimentální místnosti č. 118 vhodná.

Systém „conservation heating“ je vhodný zejména pro předcházení extrémních hodnot vnitřní relativní vlhkosti a snížení rizikových fluktuací v historických objektech, kde není možné uvažovat o moderních instalačních prvcích regulace mikroklimatu. Zároveň je ale možné zajistit vytápění, resp. temperování prostoru s nastavením nižších referenčních teplot během zimní sezóny a připustit tepelný diskomfort. Daný způsob regulace je proto vhodný zejména do oddělených depozitářů či prohlídkových tras.

Kontakt na autory: maurerova.l@fce.vutbr.cz; selucka@technicalmuseum.cz; hirs.j@fce.vutbr.cz

Poděkování: Příspěvek vznikl s podporou probíhajícího projektu „Metodika uchovávání předmětů kulturní povahy – optimalizace podmínek s cílem dosažení dlouhodobé udržitelnosti“ schváleného z grantového programu MK ČR – NAKI, č. j. DF13P010VV016. A dále s podporou smluvního výzkumu HS12557292 mezi Technickým muzeem v Brně a centrem AdMaS – EGAR – Technické zařízení budov. Autoři děkují za spolupráci správě Státního zámku Kunštát Národního památkového ústavu, územní památkové správy v Kroměříži.

Použité zdroje:

- [1] Museums, Galleries, Archives and Libraries. In: ASHRAE Handbook. 2012, Chapter 21.
- [2] BLADES, N., POUPARD, S., BARBER, L. Analysing the energy consumption of conservation heating system at the National Trust. *Journal of the Institute of Conservation*. 2011, Vol. 34, Number 1, p. 16–27. ISSN 1945-5224.
- [3] BULLOCK, L. Environmental Control in National Trust Properties. *Journal of Architectural Conservation*. 2009, March, p. 83–97. ISSN 1355-6207.
- [4] STANFORTH, S. Conservation Heating to Slow Conservation: A Tale of the Appropriate Rather Than the Ideal [online]. Contribution to the Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies. Held in April 2007 in Tenerife, Spain. The Getty Conservation Institute. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/roundtable_transcript.pdf
- [5] NEUHAUS, E., SCHELLEN, H. L. Conservation Heating to control Relative Humidity and create Museum Indoor Conditions in a Monumental Building. In: *Proceedings of the 27th AIVC Conference*. Lyon France, 20-22 November 2006, p. 45–50. ISBN 2-86834-122-5.
- [6] SELUCKÁ, A., JAKUBEC, P. Současné standardy mikroklimatu v muzejní praxi. In: *Fórum pro konzervátory-restaurátory*. Brno, Technické muzeum v Brně 2014, s. 71–76. ISSN 1805-0050. ISBN 978-80-87896-08-2.
- [7] DANISH BUILDING RESEARCH INSTITUTE. *SBI: BSIm – User's Guide*, verze 7.13.10.1 [software]. Hørsholm: Danish Building Research Institute, SBI, Aalborg University, 2013 [cit. 2015-10-22].
- [8] DVOŘÁK. Státní zámek NKK v Kunštátě, Dolní zámek. *Výkresová dokumentace z 20. prosince 1953*. Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Brně, archiv map a plánů č. R 44 659/17.
- [9] AMBROZ, M. Kunštát, Fasáda Dolního zámku severní, západní a východní křídlo – Stavebně historický průzkum. 1995. Archiv SZ Kunštát.
- [10] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy/Efficiency/Buildings/Energy Plus/Weather Data. *Energy.gov* [online]. ©2002, poslední revize 31. 8. 2015 [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data2.cfm/region=6_europe_wmo_region_6

Poznámka recenzenta:

Tento článek je zajímavý a ukazuje netradiční použití nepříliš známé metody, ale rád bych doplnil několik poznámek.

Metoda „conservation heating“ je bezesporu jednoduchou a spolehlivou metodou zajištění relativní vlhkosti v prostoru změnou teploty. Její aplikace však není příliš vhodná přímo do interiérů masivních, netěsných a špatně tepelně izolovaných historických budov. Pro takové typy staveb je pro zvýšení teploty třeba výrazně vyšších tepelných výkonů (a tím i vyšší spotřeby energie). Lokální zdroje tepla s vysokým výkonem v kombinaci s těžkou a členitou a často netěsnou stavbou potom nemohou zajistit rovnoměrné rozložení teplot a vlhkostí v prostoru. V takovém případě hrozí reálné riziko poškození exponátů díky nerovnoměrnému teplotnímu a vlhkostnímu poli. Proto se neztotožňuji se závěry článku, které prezentují metodu jako vhodnou pro historické budovy.



VVI Veletržní číslo

Z obsahu veletržního čísla 1/2018 vybíráme:



- Tepelné čerpadlo vzduch-voda v otopné soustavě
- Algoritmus výpočtu jednotrubkové OS
- Vytápění a svět internetu věcí
- Nejčastější chyby při návrhu zásobníku TV
- Zjišťování účinnosti kotlů na pevná paliva
- Simulace ventilátorové komory v CFD

aqua
THERM PRAHA

Hlavní veletržní partner časopisu VVI

27. 2. – 2. 3. 2018

22. Mezinárodní veletrh technického zařízení, techniky prostředí a technologií pro energeticky efektivní budovy

www.aquatherm-praha.com