REGULACE MIKROKLIMATICKÝCH PARAMETRŮ METODOU CONSERVATION HEATING

Alena Selucká[1], Petr Jakubec[2], Lenka Maurerová[3], Jiří Hirš[3] (selucka@tmbrno.cz)

[1] Metodické centrum konzervace TMB
[2] TR Instruments, s. r. o.
[3] Vysoké učení technické v Brně

Pro udržení dobré kondice a životnosti předmětů kulturní povahy je nutné zajistit optimální mikroklimatické podmínky prostředí během jejich dlouhodobého uchovávání. Jedním z klíčových faktorů je regulace relativní vlhkosti vzduchu, která ovlivňuje celou řadu fyzikálně-chemických i biologických mechanismů poškozovaní nejrůznějších materiálů. V historických budovách nebo jiných typech objektů paměťových institucí nelze většinou instalovat moderní vzduchotechnická zařízení a klimatizační jednotky. V těchto případech je možné použít alternativní řešení regulace relativní vlhkosti pomocí vytápění řízeným humidistaty – metodou, která je označována jako conservation heating. Tento systém vytápění byl experimentálně ověřen v testovací místnosti Dolního zámku Kunštát a také i na základě simulačního modelu. Výsledky studie uvádí různou funkčnost metody v návaznosti na reálné a simulované externí klimatické podmínky a s tím související spotřebu elektrické energie na vytápění.

CONTROL OF MICROCLIMATE PARAMETERS USING THE CONSERVATION HEATING METHOD To maintain a good condition and long life of cultural objects it is necessary to ensure optimum microclimate conditions throughout their long-term storage. One of the key factors is the regulation of the air relative humidity which affects a number of physico-chemical and biological mechanisms causing deterioration of various materials. Historic buildings or buildings of other types of memory institutions usually cannot be equipped with modern ventilation systems and air conditioning units. In these cases it is possible to use alternative solutions to control the relative humidity by means of controlled heating humidistat - a method that is referred to as conservation heating. The heating system has been experimentally verified in a test room of the Lower Castle Kunštát (Dolní zámek) and also on the basis of the simulation model. Results of the study show variable functionality of the method in response to the real and simulated external climatic conditions and the related energy consumption for heating.

Preventivní konzervace, jejíž součástí je měření a regulace parametrů prostředí, je součástí strategie dlouhodobé péče o předměty kulturní povahy již ve většině sbírkotvorných institucí. Její forma a rozsah uplatňování se však v rámci běžné muzejní praxe doposud velmi liší. Příčiny jsou dány nejenom různými možnostmi jednotlivých institucí, ale též nejednotnými a stále se vyvíjejícími standardy optimálních mikroklimatických veličin [Kopecká, 2014]. V posledních letech je pozornost zaměřována na přehodnocování striktně nastavených hodnot (někdy označovaných jako ideální muzejní hodnoty) relativní vlhkosti (RH) 50 ± 5 % a teploty (T) 16–18 °C (až 21 °C) pro uchovávání smíšených sbírek, které se dostaly do širšího povědomí muzejních pracovníků na základě doporučení Garry Thomsona, publikovaného v knize The Museum Environment [Thomson, 1985]. Důvody k uvolňování parametrů prostředí jsou dány zejména požadavky na snižování energetické spotřeby, ale též celkovým holistickým přístupem k vnímání vazby ošetřovaných materiálů na jejich způsob a frekvenci využívání, význam a očekávanou životnost, předchozí podmínky uložení, charakteristiky budov a rovněž požadavek na ochranu staveb samotných, případně další faktory. Obecně jsou sice v depozitářích a expozicích upřednostňovány stabilní klimatické podmínky, bez náhlých skokových změn T a RH, ale zajištění jejich stability do velké míry závisí na typu a konstrukci stavby, na plášti budovy s požadovanými izolačními vlastnostmi, termální kapacitě apod. Vzhledem k tomu, že předměty kulturní povahy jsou uchovávány nejen v účelově postavených depozitářích, ale i v historických budovách, sezónních objektech, halách, ve kterých není možné dosáhnout optimálních mikroklimatických podmínek, je nutné připustit různé rozsahy sezónních a krátkodobých výkyvů teplot a relativní vlhkosti. Tento princip kategorizace vnitřního prostředí je základem amerického standardu klasifikace prostředí v muzeích, archivech a knihovnách ASHRAE [ASHRAE, 2011], který představuje racionální přístup k nastavování podmínek dlouhodobého uchovávání sbírkových předmětů. Kategorie řízení vnitřního prostředí je rozdělena do progresivních skupin AA až D. Tento rozsah zahrnuje jak nejvyšší stupeň kontroly, respektující nejpřísnější kritéria pro fluktuace RH a T (zároveň je ale i energeticky nejnáročnější), tak i částečnou kontrolu zaměřenou pouze na prevenci rizik spojených s překročením mezních hodnot uvedených faktorů (skupině C odpovídá RH 25–75 % a teplota T přesahující zřídka přes 30 °C, většinou pod 25 °C; skupina D znamená pouze prevenci vysoké vlhkosti, RH pod 75 %) [Selucká – Jakubec, 2014]. Správná volba nastavení podmínek prostředí pro dlouhodobé uchovávání souborů předmětů odpovídá proto kompromisnímu řešení, které na jedné straně respektuje nároky na ochranu nejcitlivějšího materiálu ve sbírce a na druhé straně zvažuje dlouhodobou udržitelnost prostoru a s tím spojenou energetickou a ekonomickou spotřebu. V každém případě i v objektech s omezenou možností regulace vnitřního prostředí je nutné pomocí různých režimových opatření usilovat o snížení rizika poškozování sbírek a o prodlužování jejich životnosti.

OBJEKTY S VYSOKOU RELATIVNÍ VLHKOSTÍ VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

Mnoho muzeí, galerií, knihoven a institucí památkové péče spravuje svůj sbírkový fond v historických budovách, církevních stavbách, vesnických sídlech nebo v bývalých vojenských objektech, které ztratily svůj původní účel a režim využívání. Dnes plní tyto objekty jinou funkci – jsou většinou zpřístupněny široké veřejnosti jako expozice nebo slouží jako depozitáře. Mikroklimatické podmínky v jejich prostorách, které zpravidla nebývají vytápěny ani temperovány, jsou více podmíněny vnějšími i vnitřními klimatickými zónami, historií využívání stavby a více korespondují s celkovým podnebím. Pro naši středoevropskou oblast jsou charakteristické hodnoty průměrné roční teploty okolo 5–9 °C a relativní vlhkosti 70–80 %. Je tedy jasné, že i v uvedených případech bude vnitřní klima chladnější a vlhčí. Samozřejmě rozhodující vliv na vnitřní podmínky mají další faktory spojené s konstrukcí stavby a výskytem různých závad jako zatékání dešťové vody, prorůstání okolní vegetace do základů a zdiva stavby, špatné okenní výplně apod. [Červenák – Vácha, 2015].

Většina organických hygroskopických materiálů a předmětů z nich zhotovených, které tvoří podstatnou součást movitého kulturního dědictví, má schopnost se postupně adaptovat na okolní podmínky a jejich fyzický stav je tak po dlouhá léta velmi dobrý. Tento princip respektování dynamické rovnováhy mezi materiály a jejich okolním prostředím je podstatný při rozhodování o změnách a úpravách podmínek jejich uchovávání. V této souvislosti je možné vycházet z doporučení evropské normy *ČSN EN 15757: Ochrana kulturního dědictví – Požadavky na teplotu a relativní vlhkost prostředí s cílem zamezit mechanickému poškozování organických hygroskopických materiálů, k němuž dochází v důsledku klimatu*, přijaté u nás v roce 2011. Tato norma zavádí pojem historického klimatu, které je definováno jako *„klimatické podmínky prostředí, ve kterém byly objekty kulturního dědictví vždy drženy, nebo v něm byly ponechány delší dobu (minimálně po dobu jednoho roku) a jsou v něm aklimatizovány.“* Pokud bylo prokázáno, že historické klima není pro dané materiály škodlivé, pak tato norma doporučuje ponechávat předměty v daném prostředí, na které byly po dlouhou dobu aklimatizovány. Vychází se z předpokladu, že riziko fyzického poškození vlivem fluktuací, které nepřesahují již historicky ověřený rozsah (na který jsou předměty adaptovány), je velmi nízké [Selucká, 2015]. Nicméně opakované prudké výkyvy a přesahování mezních hodnot RH a T může u citlivých materiálů vyvolávat různá vnitřní pnutí, která nemusí být rozpoznatelná na první pohled, ale následně mohou způsobovat rozměrové změny až trvalá poškození. Hrozí samozřejmě i další formy degradace, jako je růst plísní, koroze kovů, pohyb solí uvnitř anorganických hygroskopických materiálů apod.

Za optimální 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. V každém případě by mělo být předcházeno rizikových stavům spojeným s vysokými hodnotami relativní vlhkosti nad 75 % a jejich poklesem pod 30 % (dle ASHRAE RH pod 25 %), u teploty překročení 30 °C a jejímu poklesu pod 5 °C. I když veškeré změny teploty přímo souvisejí se změnami relativní vlhkosti vzduchu, z hlediska konzervátorské praxe se považuje udržování přijatelného intervalu hodnot relativní vlhkosti za stěžejní pro zajištění dobré kondice většiny smíšených sbírek[1]. Uvažujeme-li objekty, kde převládá jako hlavní problém vysoká vlhkost, pak v této souvislosti platí:

- Při RH 75 % a více dochází k exponenciálnímu navyšování obsahu rovnovážné vlhkosti u organických hygroskopických materiálů, což způsobuje i jejich velké rozměrové změny. Tato závislost je dána tvarem jejich sorpčních izoterem.
- Zvýšená vlhkost stimuluje také celou řadu chemických degradačních mechanismů, jako je kyselá hydrolýza papíru (zejména v případě papíru s vyšším podílem dřevoviny a papíru obsahujícího železogallové inkousty), významněji probíhají rovněž reakce s oxidy síry a dalšími polutanty.
- Prostředí s vysokou RH je živnou půdou pro růst plísní způsobujících rozklad a barevné změny organických materiálů, zejména usně, textilu, papíru a dřeva. Nejvíce ohrožené jsou materiály obsahující proteiny, škrob nebo jiné sacharidy (např. pergamen, škrobený textil, živočišná lepidla, prachem zanesený papír). Tvorba plísní a rychlost jejich růstu je však ovlivněna i dalšími faktory, jako je teplota, pohyb vzduchu, druh plísní apod. I když plísně se vyskytují v širokém rozsahu teplot a relativní vlhkosti, za nebezpečnou hranici, vymezující oblast viditelného růstu plísní, se považuje RH nad 65 % při T 20 °C.
- Rychlost většiny korozních dějů kovových materiálů se značně zvyšuje při RH nad 60 %.
- Pro anorganické materiály, jako jsou určité druhy minerálů, archeologické kovy, některé typy nestabilních skel, zasolený kámen apod., platí specifické doporučené horní limity RH. Pokud jsou předměty zhotovené z těchto materiálů součástí smíšených sbírek, je doporučeno tyto materiály oddělit od zbytku sbírky například umístěním v ochranných boxech nebo v odděleném prostoru s regulovanými mikroklimatickými podmínkami.

METODA „CONSERVATION HEATING“

Jednou z možností, jak regulovat hodnoty RH, je řízené vytápění popř. temperování. Zamezení vysoké RH je dosaženo pomocí topení, které je ovládáno regulátorem vlhkosti vzduchu – humidistatem. Tento postup je vhodný zejména v uvedených historických objektech s dlouhodobě vyššími hodnotami RH, kde zároveň platí velmi omezené možnosti regulace pomocí moderních vzduchotechnických zařízení a klimatizačních jednotek. 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 z pohledu zaměstnanců a návštěvníků teplotní diskomfort. Metoda je proto označována jako „conservation heating“ (konzervátorské vytápění), jelikož nastavení jeho ovládání primárně vychází z ochrany uchovávaných materiálů a nesleduje pohodlí osob. Conservation heating bylo zavedeno do mnoha historických objektů spravovaných The National Trust ve Velké Británii [BLADES – POUPARD – BARBER, 2011; BULLOCK, 2009;]. Testováno bylo též pro účely ochrany kulturních památek v Nizozemí [NEUHAUS – SCHELLEN, 2006]. V České republice není doposud známo, že by tento systémem byl odzkoušen. Uvedená studie si proto klade za cíl ověřit metodu conservation heating v lokálních středoevropských klimatických podmínkách a predikovat též s tím spojené náklady na spotřebu elektrické energie.

CÍLE

Předmětem experimentálního ověření bylo zejména zjistit efektivitu systému conservation heating v místních klimatických podmínkách. Pro realizaci experimentu byly vybrány prostory Dolního zámku Kunštát v areálu Státního zámku Kunštát (Obr. 1). Jedná se o památkově chráněný historický objekt, který byl v šedesátých letech 20. století adaptován pro účely ukládání archiválií. V současné době není objekt využíván a plánovaná je jeho opětovná rekonstrukce jako depozitáře. Vytipovány byly dvě místnosti (č. 117 – „referenční“ a č. 118 – „experimentální“), které se nacházejíí ve 2. NP severního křídla objektu (přibližná lokalizace místností v areálu SZ Kunštát je patrná ze situace na obr. 2). Tyto prostory nebyly v posledních letech temperovány a vykazovaly před zahájením experimentu dlouhodobě vyšší RH okolo 70 % (Obr. 3).

Dalším cílem bylo odzkoušet celkový systém řízení topení vzhledem k nastavení vhodné referenční hodnoty RH a též okrajových teplot pro spínání a vypínání zdroje topení. V neposlední řadě bylo záměrem experimentu zpracovat numerické simulace pro posouzení uvedeného systému při extrémnějších vnějších klimatických podmínkách.

METODIKA EXPERIMENTU

Nastavení systému regulace topení pro conservation heating

Experiment conservation heating byl zahájen 7. 6. 2013. Všechna okna v místnostech č. 117 a č. 118 byla uzavřena. Dveřní otvory (bez instalovaných dveří) byly po umístění a zprovoznění systému uzavřeny polystyrénovými deskami o síle 50 mm tak, aby temperovaná místnost č. 118 neovlivňovala mikroklima v referenční místnosti č. 117 a sama nebyla ovlivněna prostředím v dalších přilehlých částech zámku (Obr. 4). 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 snímačů. Parametry teploty a relativní vlhkosti venkovního prostředí jsou měřeny snímačem umístěným přes okno z místnosti č. 117 na severní stěně objektu zámku.

V experimentu jsou použity speciální odporové (PT1000) snímače teploty povrchu, které v obou místnostech měří teploty severní a jižní stěny, stropu a podlahy. Snímače na stěnách jsou ve výšce cca 150 cm nad úrovní podlah. Tyto snímače nejsou zahrnuty do systému řízení.

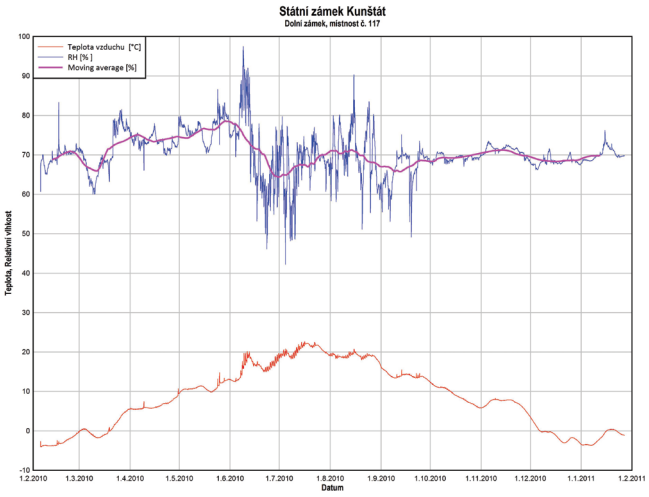
Obr. 1 Pohled na Dolní zámek Kunštát, 2015, archiv Technického muzea v Brně

Obr. 2 Situace areálu SZ Kunštát – vyšrafovaným obdélníkem jsou vyznačeny dotčené místnosti v severním křídle Dolního zámku [zdroj: Atelier Soukup s. r. o. – Studie SZ Kunštát, Využití dolního zámku pro centrální depozitář NPÚ ú. o. p. v Brně; upraveno dle Maurerová, 2015]

Označení režimu	Podmínka RH (%)	Podmínka Ti (°C)	Provozní stav otopného tělesa
Režim A1	> 59 % (± 2%)	< 22 °C (± 0,1 °C)	ZAPNUTO
Režim A2	< 57 %	nezohledňuje se	VYPNUTO
Režim B1	nezohledňuje se	< 5 °C	ZAPNUTO
Režim B2	nezohledňuje se	> 22 °C	VYPNUTO

Tab. 1 Přehled nastavení provozu otopných těles v místnosti č. 118, dle snímačů RH/T systému

Kombinované snímače teploty a relativní vlhkosti jsou v místnostech svěšeny od stropu opět do výšky cca 150 cm od podlahy. Do systému řízení je použit jen snímač RH/T v místnosti č. 118. Jako centrální jednotka pro měření, záznam dat do paměti a řízení je použita měřicí ústředna MS6D doplněná kartou relé pro spínání topení, které zajišťují dva olejové radiátory s výkonem nastavitelným na 600, 900 nebo 1500 W. Po dobu experimentu byly zapnuty dva olejové radiátory s celkovým výkonem 1,2 kW. Celkově je zapojeno 8 snímačů teploty povrchu a 3 snímače RH/T. Všechny měřené veličiny jsou ukládány do paměti s periodou 10 minut. Dále je monitorován aktuální stav systému řízení, tj. topení ZAPNUTO/VYPNUTO, umožňující vyhodnocení spotřeby elektrické energie v experimentu. Celková spotřeba elektrické energie je dále měřena speciálním přístrojem umístěným mimo monitorované místnosti. Pro řízení spínání topných těles jsou využity informace poskytované snímačem RH/T v místnosti č. 118. Experiment probíhal v režimu nastavení uvedeném v tab. 1.



Obr. 3 *Výsledky měření RH a T v místnosti č. 117 v období před zahájením experimentu (2010–2011); data byla poskytnuta správou SZ Kunštát*

Obr. 4 *Experimentální místnost č. 118 vybavena olejovými radiátory a systémem měření, oddělena polystyrenovou deskou od okolních místností*

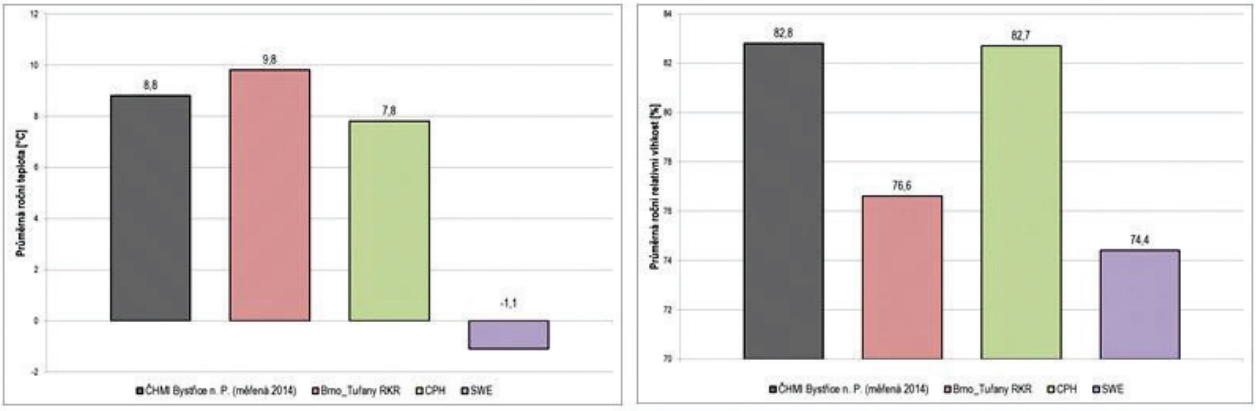
Simulační nástroj BSim Ve spolupráci s Fakultou stavební VUT v Brně, Centrem AdMAS, bylo pomoci dánského simulačního nástroje BSim na virtuálním modelu dotčené části Dolního zámku provedeno několik variant simulací. Tento nástroj umožňuje mimo jiné provádět energetické bilance budov, tepelně vlhkostní analýzy a simulace průběhů parametrů vnitřního prostředí [Danish Building Research Institute, 2013].

Použití tohoto nástroje vyžadovalo nejprve vytvoření geometrického modelu experimentální a referenční místnosti včetně zjištění fyzikálních parametrů konstrukce stavby. Model byl sestaven na základě údajů získaných z projektové dokumentace k Dolnímu zámku z roku 1953 [Dvořák, 1953], stavebně historického průzkumu fasády Dolního zámku z roku 1995 [Ambrož, 1995] včetně vlastního zaměření in situ a konzultací s kastelánem zámku. Severní a jižní obvodová stěna je tvořena převážně smíšeným zdivem, stejně tak jako vnitřní stěny. Okna byla uvažována jako dřevěná, zdvojená s jedním sklem (součinitel prostupu tepla byl odhadnut na hodnotu $U \approx 2{,}8\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$).

Dále bylo nutné provést verifikaci modelu pomocí naměřených dat. Verifikace probíhala metodou porovnávání simulovaných hodnot parametrů T_i (°C) a *RH* (%) s hodnotami parametrů T_i (°C) a *RH* (%) naměřenými v rámci experimentu. Na sestaveném modelu bylo poté simulováno několik variant, které se od sebe lišily zejména v použití různých klimatických dat a dále v nastavení okrajových podmínek systému vytápění (Tab. 2). Aby bylo možné posoudit možnost využití metody conservation heating i v extrémnějších podmínkách, byla k simulaci vybrána klimatickou data z jiných evropských oblastí – ze stanice Brno-Tuřany, Copenhagen v Dánsku a Kiruna ve Švédsku (průměrné roční hodnoty RH a T jsou uvedeny na obr. 5). Jejich prostřednictvím byly v místnostech č. 117 a č. 118 predikovány průběhy vnitřní teploty T_i (°C) a relativní vlhkosti RH (%) zaznamenané během roku 2014. Pro zvolené varianty bylo dále provedeno vyhodnocení spotřeby energie na vytápění v závislosti na okrajových podmínkách. Výsledky simulací mají za úkol potvrdit nebo vyvrátit možnost využití metody conservation heating v případech, kdy vnější klimatické podmínky v průběhu topné sezony budou dosahovat extrémnějších hodnot. Vyhodnocení variant zahrnovalo sledování průběhů vnitřních teplot T_i (°C) a relativních vlhkostí RH (%) v místnosti č. 118 a současné stanovení spotřeby energie na vytápění, včetně určení orientační výše nákladů. Jednou z variant bylo také modelování experimentální místnosti, ve které by požadované parametry interního mikroklimatu zajišťoval systém klimatizace.

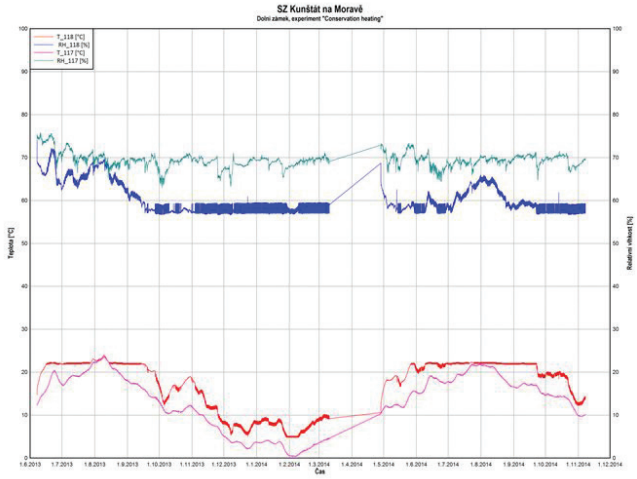
VÝSLEDKY

Systém conservation heating Experiment conservation heating byl sledován v uvedeném módu od června 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 RH a T z místností č. 118 a 117 dokladuje obr. 6. 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 topení při dosažení teploty 22 °C. Období od října 2013 až do začátku března 2014



Tab. 2 *Průměrné roční venkovní teploty (vlevo) a roční venkovní relativní vlhkosti (vpravo) ze stanic Bystřice nad Pernštejnem, Brno-Tuřany, Copenhagen (CPH) a Kiruna (SWE) [zdroj: Maurerová, 2015]*

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 externí teplota a systém se dostává na maximální přípustnou teplotu pro přitápění (22 °C). Tato teplota však již nestačí pro udržení stabilní RH těsně pod hranicí 60 % a RH mírně roste až na úroveň cca 65 %. Poté, co koncem srpna 2014 externí teplota klesá, se systém opět vrací k řízení přitápěním a RH se stabilizuje na úrovni pod 60 %.



Obr. 6 Průběh hodnot RH a T z místnosti č. 118 regulované metodou conservation heating (RH_118, T_118) v porovnání s RH a T místnosti č. 117 bez regulace mikroklimatu ((RH_117, T_117)

Simulace BSim a spotřeba energie Reálná roční spotřeba elektrické energie na vytápění byla v roce 2014 naměřena ve výši 7,211 MWh (což představovalo částku 821,8 Kč při tarifu C45d). Simulovaná roční spotřeba elektrické energie na vytápění (v tab. 2 a 3 označeno jako varianta VERIFIKOVANÝ), zpracovaná na základě verifikovaného modelu porovnávání simulovaných hodnot parametrů T_i a RH s hodnotami parametrů T_i a RH naměřenými v rámci experimentu, činila 7,33 MWh (při tarifu C45d by se jednalo o částku 835 Kč). Rozdíl mezi simulovanou a skutečnou spotřebou energie na vytápění činí 1,62 %. V roční bilanci tedy spotřeba energie i cena nákladů dosahuje shody mezi zvoleným modelem a realitou.

Vzhledem k tomu, že experiment probíhal za velmi mírné zimy v roce 2014, byly pro modelaci dále nastaveny různé podmínky externího klimatu. Vybrána byla data referenčního roku z meteorologické stanice Brno-Tuřany (*Brno_RKR_0),* která představují dlouhodobé klimatické podmínky v lokalitě blízké posuzované budově. Dále bylo zvoleno chladnější a vlhčí klima ze stanice Copenhagen v Dánsku (*CPH_0)* a velmi chladné, ale sušší podmínky ze stanice Kiruna ve Švédsku (*SWE_0)*. V uvedených případech bylo prokázáno, že v zimních měsících by bylo nutné zvýšit topný výkon a případně i zvlhčování prostoru tak, aby bylo dosaženo požadovaného spodního teplotního limitu 5 °C a intervalu hodnot relativní vlhkosti 55–65 %. Z tohoto důvodu byly analyzovány další varianty označené *CPH_1* a *SWE_1 a SWE_2,* u kterých byly základní parametry vytápění dále upraveny (Tab. 2 a 3). Ze simulované varianty s označením *CPH_1* vyplynulo, že pro dodržení požadovaného stavu vnitřního klimatu v experimentální místnosti by bylo nutné zvýšit topný výkon instalovaných topných těles z 1,2 kW na 3 kW. Navýšení spotřeby energie na vytápění by v takovémto případě činilo cca 23 % oproti spotřebě naměřené v roce 2014. Simulace dále prokázala, že v případě umístění posuzované budovy do extrémního klimatu, reprezentovaného klimatickými daty ze stanice Kiruna

Označení varianty	Použitá klimatická data	Základní parametry systému vytápění	Provozní režimy systému vytápění	Použité vlhčení v zimě
VERIFIKOVANÝ	kombinovaná (Kunštát + Bystřice n. P. + Brno_Tuřany)	max. výkon 1,2 kW pro Te,min = -15°C; min. výkon 1,2 kW pro Te,max = 25°C; set point Ti =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	stejné jako var. VERIFIKOVANÝ	stejné jako var. VERIFIKOVANÝ	ne
CPH_0	Copenhagen_Dánsko	stejné jako var. VERIFIKOVANÝ	stejné jako var. VERIFIKOVANÝ	ne
SWE_0	Kiruna_Švédsko	stejné jako var. VERIFIKOVANÝ	stejné jako var. VERIFIKOVANÝ	ne
CPH_1	Copenhagen_Dánsko	max. výkon 3 kW pro Te,min = -15°C; min. výkon 1,2 kW pro Te,max = 5°C; set point Ti =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 Te,min = -5°C; min. výkon 1,2 kW pro Te,max = 5°C; set point Ti =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 Te,min = -5°C; min. výkon 0 kW pro Te,max = 18°C; set point Ti = 5°C; letní režim => max. výkon 1,26 kW pro Te,min = 0°C; min. výkon 0,6 kW pro Te,max = 18°C; set point Ti = 15°C	zimní režim (led.-kvě., lis.-pros.) => celodenně; přechodný řežim (červen-říj.) => celodenně	ne

Tab. 2 Přehled jednotlivých simulovaných variant s uvedením konkrétních okrajových podmínek v podobě klimatických dat a nastavení systému vytápění v m. č. 118 [zdroj: Maurerová, 2015]

Označení varianty	Použitá klimatická data	Roční spotřeba energie na vytápění (MWh)	Roční spotřeba ostatních energií (chlazení, vlhčení, ventilátor) (MWh)	Celková roční spotřeba (MWh)	Náklady na spotřebovanou el. energii (Kč)	Rozdíl od celkové roční spotřeby verifikovaného modelu (%) (+ nárůst, - snížení)
VERIFIKOVANÝ	kombinovaná (Kunštát + Bystřice n. P. + Brno_Tuřany)	7,33	-	7,33	835	-
Brno_RKR_0	Brno_Tuřany	6,74	-	6,74	768	-8%
CPH_0	Copenhagen_Dánsko	7,82	-	7,82	891	7%
SWE_0	Kiruna_Švédsko	7,85	-	7,85	895	7%
CPH_1	Copenhagen_Dánsko	9,03	-	9,03	1 029	23%
SWE_1	Kiruna_Švédsko	24,00	0,29 (vlhčení)	24,29	2 768	231%
SWE_2	Kiruna_Švédsko	14,42	-	14,42	1 643	97%
Klimatizace	kombinovaná (Kunštát + Bystřice n. P. + Brno Tuřany)	7,67	1,75 (chlacení, vlhčení, ventilátor)	9,42	1 074	29%

Tab. 3 Přehled celkové roční spotřeby energie s vyčíslením nákladů pro jednotlivé simulované varianty [zdroj: Maurerová, 2015]

ve Švédsku, přestává metoda conservation heating plnit svůj původní význam. V tomto případě by nutné zvýšení topného výkonu z důvodu dodržení minimální požadované vnitřní teploty 5 °C současně způsobovalo pokles relativní vlhkosti ve sledované místnosti pod požadovanou hranici 55 % (viz výsledky varianty *SWE_2*). Tento pokles relativní vlhkosti by bylo nutné eliminovat dodatečným zvlhčováním vzduchu v téměř celé topné sezóně (viz výsledky varianty *SWE_1*). 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. Roční náklady na vytápění a vlhčení by v tomto případě představovaly nárůst o 1 933 Kč.
Poslední simulovaná varianta posuzuje ekonomický rozdíl mezi vytápěním experimentální místnosti metodou conservation heating a úpravou vnitřního klimatu v téže místnosti pomocí systému klimatizace. Vzhledem k nestabilitě simulace modelu s klimatizací lze pouze konstatovat, že v případě použití klimatizačního systému by mělo dojít ke zvýšení celkové spotřeby energie nutné pro chod všech komponentů klimatizačního systému o 29 % oproti reálně naměřené spotřebě energie v roce 2014. Zvýšení nákladů by v tomto případě představovalo navýšení o 239 Kč za rok.

DISKUZE

Na základě získaných experimentálních výsledků bylo potvrzeno, že pomocí 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–srpen), kdy vnitřní teplota přesáhla 22 °C, se systém vypnul a došlo k nárůstu RH k cca 65 %. Tento výkyv RH v rozmezí ± 5 % nad stanovenou horní hranici však v praxi neznamená větší riziko pro uchovávané materiály a případně jej lze eliminovat přídavnými odvlhčovači. V případě zaplnění prostoru organickými materiály, jako je dřevo nebo papír, lze předpokládat, že by výkyvy RH byly ještě dále zmírněny na základě jejich interakcí s okolním prostředím. Na druhou stranu bude nutné v reálných podmínkách postupovat velmi opatrně. Zejména v případech přesouvání předmětů z chladných prostorů do temperované (vytápěné) místnosti, byť se stejnou hodnotou RH, může dojít k jejich orosení a případnému rozvoji plísní (obsah rovnovážné vlhkosti v těchto materiálech klesá se zvyšující se teplotou). Stejně tak bude nutné věnovat pozornost vlivu rozdílného proudění vzduchu a tím pádem i nerovnoměrného rozložení teplot uvnitř prostoru s instalovaným úložným systémem a schraňovanými předměty. Spotřeba energie v roce 2014 byla vyměřena na základě verifikovaného modelu na hodnotu 7,33 MWh, což vzhledem k danému tarifu odpovídá přijatelné ceně 835 Kč za roční dodání tepla pro testovací místnost. Při odhadnutí spotřeby energie je ale potřeba též zohlednit reálnou rychlost výměny vzduchu. Zjištěná kalkulace odpovídá uzavřenému prostoru, ale v běžných podmínkách můžeme očekávat větší frekvenci otevírání dveří popř. oken. Daný způsob regulace je proto vhodný zejména do oddělených depozitářů či prohlídkových tras. Předpokladem implementace systému jsou samozřejmě revidované elektrické rozvody.
Výsledky modelace chladnějších podmínek ze stanice v Copenhagenu (CPH_1) prokázaly, že v zimním období je nutné počítat se zvýšením topného výkonu a navýšením spotřeby energie o cca 23 % oproti roku 2014. Sledovaná relativní vlhkost se bude i v tomto případě stále pohybovat v doporučeném rozmezí mezi 55 a 65 %. Naproti tomu extrémní chladné a sušší klima stanice Kiruna vyžaduje celkovou změnu v nastavení systému conservation heating včetně zvlhčování prostoru. Zvýšení nákladů by v tomto případě bylo téměř 3,3násobné. Varianta s klimatizací znamená nárůst spotřebované energie o 29 % vzhledem k roku 2014. Z hlediska provozních nákladů se nejeví o moc nevýhodněji, než vytápění metodou conservation heating. Je potřeba si však současně uvědomit, že instalace klimatizačního systému bude několikanásobně nákladnější z hlediska počáteční investice do systému. Dále je v tomto případě nutné počítat s instalací vzduchotechnických rozvodů v místnosti, což není v případě památkově chráněného objektu vždy žádoucí. Instalace mobilních olejových otopných těles, která byla v tomto případě pro metodu conservation heating použita, představuje podstatně menší zásahy jak do historických konstrukcí, tak do celkového vzhledu místnosti.

ZÁVĚR

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 teplotní nepohodlí pracovníků nebo návštěvníků. Z výsledků simulací vyplývá, že vytápění bude funkční a ekonomicky výhodné i v případě mírného zvýšení topného výkonu při „chladnějších" klimatických podmínkách v zimním období, reprezentovaných dlouhodobými klimatickými daty získanými ze stanice Brno-Tuřany v ČR a Copenhagen v Dánsku.
Na základě experimentálního ověření bylo zjištěno, že pro dlouhodobé klimatické podmínky České republiky je použitá metoda vytápění systémem conservation heating vhodná a ekonomicky optimální. Lze tedy tento postup regulace mikroklimatických podmínek za uvedených podmínek využít v objektech, které slouží pro dlouhodobé uchovávání předmětů kulturní povahy.

POZNÁMKY

[1] Materiály vyžadující specifické teplotní podmínky by měly být ukládány odděleně, v depozitářích, které tyto požadavky splní, např. v depozitářích chlazených nebo s teplotou pod bodem mrazu (toto platí např. pro ukládání historických fotografií, papírových dokumentů apod.).

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují za spolupráci Bc. Radimovi Štěpánovi ze správy státního zámku Kunštát Národního památkového ústavu, územní památkové správy v Kroměříži.

Případová studie vznikla 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. DF13P01OVV016. A dále s podporou *smluvního výzkumu HS12557292 mezi Technickým muzeem v Brně a centrem AdMaS – EGAR – Technické zařízení budov.*

LITERATURA

- AMBROZ, M.: *Kunštát, Fasáda Dolního zámku severní, západní a východní křídlo – Stavebně historický průzkum.* 1995. Archiv SZ Kunštát.
- *ASHRAE Handbook – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Museums, Galleries and Libraries*. Chapter 23, 2011.
- BLADES, N. – POUPARD, S. – BARBER, L.: Analysing the energy consumption of conservation heating system at the National Trust, In: *Journal of the Institute of Conservation*, Vol. 34, Number 1, 2011, ISSN 1945-5224, p. 16–27.
- BULLOCK, L.: Environmental Control in National Trust Properties, In: *Journal of Architectural Conservation*, March 2009, ISSN 1355-6207, p. 83–97.
- ČERVENÁK, J. – VÁCHA, Z.: Regulace podmínek pro uchovávání předmětů kulturní povahy v historických objektech, In: *Zprávy památkové péče. Materiály, studie*, roč. 75, 2015, 5, ISNN 1210-5538, s. 457–464.

- DANISH BUILDING RESEARCH INSTITUTE: *SBi: BSim – User's Guide* [CD-ROM, upgrade online s licencí]. Verze 7.13.10.1 Hørsholm: Danish Building Research Institute, SBi, Aalborg University, 2013, [cit. 2015-10-22].
- 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.
- KOPECKÁ, I.: Preventivní konzervace – požadavky, standardy a možnosti v roce 2014. In: *Fórum pro konzervátory-restaurátory*, 2014, ISSN 1805-0050, ISBN 978-80-87896-08-2, s. 83–86.
- MAUREROVÁ, L.: *Experiment „conservation heating" v Dolním zámku Kunštát. Případová studie – simulace průběhů vybraných parametrů interního mikroklimatu pro variantní nastavení okrajových podmínek výpočtu, v podobě různých klimatických dat a různých režimů vytápění, dílčí zpráva projektu „Metodika uchovávání předmětů kulturní povahy – optimalizace podmínek s cílem dosažení dlouhodobé udržitelnosti", 2013–2017*. Archiv Technického muzea v Brně.
- 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.
- SELUCKÁ, A. – JAKUBEC, P.: Současné standardy mikroklimatu v muzejní praxi. In*: Fórum pro konzervátory-restaurátory*, 2014, ISSN 1805-0050, ISBN 978-80-87896-08-2, s. 71–76.
- SELUCKÁ, A.: Postup vyhodnocování historického klimatu na příkladu státního zámku Hluboká nad Vltavou. In: *Zprávy památkové péče, Materiály, studie*, roč. 75, 2015, 5, ISNN 1210-5538, s. 445–449.
- STANIFORTH, S.: *Conservation Heating to Slow Conservation: A Tale of the Approprite Rather Than the Ideal*, Contribution to the Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, April 2007, in Tenerife, Spain, The Getty Conservation Institute.
- THOMSON, G.: *The Museum Enviroment*. London, Butterworth--Heinemann, 2th ed., 1985.